Funktionale Dynamik von Technologischen Innovationssystemen im Bereich der Erneuerbaren Energietechnologien: Das Beispiel der weltweiten Durchsetzung von batteriebetriebenen Fahrzeugen und Plug-in-Hybridfahrzeugen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. oec.)

vorgelegt an der

UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften

Institut für Marketing & Management (570)

Fachgebiet: Betriebswirtschaftslehre, insb. Internationales Management (570F)

Leitung: Prof. Dr. Alexander Gerybadze

von

Andreas Sauer

Dekan der Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften:

Prof. Dr. Karsten Hadwich

Fachgebiet: Betriebswirtschaftslehre, insb. Dienstleistungsmanagement und Dienstleistungsmärkte (570D)

Berichterstatter:

Prof. Dr. Alexander Gerybadze (Erstgutachter)

Fachgebiet: Betriebswirtschaftslehre, insb. Internationales Management (570F)

Prof. Dr. Rüdiger Hahn (Zweitgutachter)

Fachgebiet: Betriebswirtschaftslehre, insb. Nachhaltigkeitsmanagement (570G)

Datum der mündlichen Prüfung / Abschluss des Promotionsverfahrens:

Montag, den 9. April 2018

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Andreas Pyka

Institut für Volkswirtschaftslehre (520)

Fachgebiet: Volkswirtschaftslehre, insb. Innovationsökonomik (520I)

In den Jahren der Erstellung der vorliegenden Doktorarbeit war der Autor am

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48

76139 Karlsruhe

als Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Competence Center Neue Technologien angestellt.

Die dieser wissenschaftlichen Arbeit maßgeblich zugrunde liegenden Vorhaben

- Roadmapping-Prozess in Begleitung der Partner der Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ (LIB 2015-Roadmapping) und
- Begleitforschungsprojekt „Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)“ im Rahmen der Förderbekanntmachung „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“

wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03X4611 (LIB 2015-Roadmapping) und 03X4616A (EMOTOR) gefördert.

Darüber hinaus war der Autor Teilnehmer an der Phd School einer der durch das European Institute of Innovation and Technology (EIT) ausgezeichneten Knowledge Innovation Communities (KIC) mit dem Namen „InnoEnergy“ im Track „Energy from Chemical Fuels“.

Die Verantwortung für den Inhalt der vorliegenden Doktorarbeit liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary 1

1 Einführung in das Dissertationsvorhaben 4

1.1 Motivation, Forschungsfragen und Zielsetzung 4

1.2 Aufbau der Dissertation 13

2 Technologische Innovationssysteme in den Erneuerbaren Energietechnologien 15

2.1 Einführung I: Innovation – System – Innovationssystem 15

2.1.1 Was ist eine Innovation? 15

2.1.2 Was ist ein System? 17

2.1.3 Ergänzende Anmerkungen zu Innovationssystemen 19

2.2 Einführung II: Verschiedene Typen von Innovationssystemen 20

2.2.1 Nationale Innovationssysteme 22

2.2.2 Regionale Innovationssysteme 27

2.2.3 Sektorale Innovationssysteme 30

2.3 Einführung III: Technologische Innovationssysteme 34

2.3.1 Theoretische Grundlagen von TIS 36

2.3.2 Funktionale Analyse von TIS 39

2.3.3 Das Phasenmodell zur Entwicklung von TIS 43

2.3.4 Relevante Fallstudien 46

3 Elektrochemische Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität 54

3.1 Einführung I: Roadmapping bis zum Jahr 2030 54

3.1.1 Begleitvorhaben „LIB 2015-Roadmapping“ 55

3.1.2 Technologie-Roadmap ESEM 2030 58

3.1.3 Produkt-Roadmap ESEM 2030 62

3.1.4 Gesamt-Roadmap ESEM 2030 67

3.2 Allgemeine Einführung: Energiespeichertechnologien 72

3.2.1 Grundlegende Energiespeicher-Kategorisierung 72
3.2.2 Funktionsweise elektrochemischer Energiespeicher 73
3.3 Elektrochemische Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität....75
3.3.1 Fahrzeugkonzepte der Elektromobilität 75
3.3.2 Politische Rahmenbedingungen....77
3.3.3 Marktanforderungen an die zentralen Leistungsparameter....82
3.3.4 Aktueller Stand von FuE....85

4 Das Technologische Innovationssystem rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität 99
4.1 Vorgehensmodell innerhalb der vorliegenden Dissertation....99
4.2 Schritt 1: Definition des TIS im Fokus....100
4.3 Identifikation der maßgeblichen strukturellen Komponenten....107
4.3.1 Akteure #1: Energiespeicher-Industrie/Batteriezellhersteller....107
4.3.2 Akteure #2: Automobilindustrie/Elektrofahrzeughersteller....111

5 Die Funktionale Dynamik des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität 140
5.1 Schritt 2: Festlegung des funktionalen Musters im TIS 140
5.1.1 Einfluss auf die Suchrichtung 142
5.1.2 Wissensentwicklung 168
5.1.3 Unternehmerisches Experimentieren....176
5.1.4 Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte 183
5.1.5 Legitimität....193
5.1.6 Ressourcenmobilisierung 198
5.1.7 Marktentstehung....202

6 Die Schlüsselfaktoren der Entwicklung des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität 208
6.1 Schritt 3: Beurteilung der Funktionalität (a) und Festlegung von Prozesszielen (b)....208
6.2 Fördernde und hemmende Schlüsselfaktoren 215
6.3 Politische Schlüsselfragen....219

7 Zusammenfassung und Diskussion.....226

7.1 Zusammenfassung.....226

7.2 Diskussion.....230

Anhang I.....235

Anhang II.....237

Quellenverzeichnis.....240

Abbildungsverzeichnis 282

Tabellenverzeichnis 287

Abkürzungsverzeichnis 289

Eidesstattliche Versicherung 290

Danksagung.....292

Executive Summary

Die Elektromobilität erhielt einen neuen Aufschwung, als die Menschheit mit der jüngsten Jahrtausendwende realisierte, dass der fortschreitende Klimawandel u. a. auf das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2) zurückzuführen ist, welches auch durch den Verkehr weltweit emittiert wird. Innerhalb des Verkehrssektors nahmen insbesondere die CO_2-Emissionen durch die Mobilität auf der Straße zu, weshalb der Fokus auf Elektrofahrzeuge und dabei vor allem auf Plug-in-Hybridfahrzeuge (engl. „plug-in hybrid electric vehicles“, Abkürzung PHEV) und rein batterieelektrische Fahrzeuge (engl. „battery electric vehicles“, Abkürzung BEV) fiel. Für die Verwirklichung von Elektromobilität stellen elektrochemische Energiespeicher vor allem angesichts ihres wesentlichen Wertschöpfungsbeitrages eine Schlüsseltechnologie dar, weshalb ein internationaler Wettlauf einsetzte, um möglichst früh große Marktanteile zu sichern.

Als Methodik zur Analyse, welche Länder weltweit die besten Voraussetzungen für diese Konkurrenz aufweisen, wurden die Grundlagen zu Technologischen Innovationssystemen (TIS) in den Erneuerbaren Energietechnologien ausgewählt, dokumentiert und ausführlich diskutiert. Der TIS-Ansatz entwickelte sich evolutionär über verschiedene Ansätze der Innovationssystemforschung hinweg und erlaubt heute nicht nur eine funktionale Analyse von TIS, sondern bietet auch ein Phasenmodell zur Entwicklung von TIS, das in der vorliegenden Dissertation diskutiert und überarbeitet wird. Eine Untersuchung relevanter Fallstudien in den Erneuerbaren Energietechnologien nach den drei Kriterien Hypothese, Ergebnis und Lesson learned erlaubte es, bewährte Vorgehensweisen für die folgende, detailliert vergleichende Innovationssystem-Analyse abzuleiten.

Ein umfassendes Roadmapping bis zum Jahr 2030 zeigt auf, welche technologischen Entwicklungspfade zur Verfügung stehen, welche Anwendungsvielfalt und Marktentwicklung zu erwarten ist und welche Herausforderungen konkret zu lösen sind, um den technischen Fortschritt mit der marktbezogenen Nachfrage in Einklang zu bringen:

> „Die Roadmaps zeigen, dass kostenoptimierte Elektrofahrzeuge in den kommenden Jahren nur für bestimmte Zielgruppen und Einsatzzwecke attraktiv sind. Durch die schrittweise Reichweitensteigerung mittels einer verbesserten Batterietechnologie sowie eines optimierten Energieverbrauchs können bis zum Jahr 2030 aber kostenoptimierte Fahrzeugmodelle entwickelt werden, die Reichweiten herkömmlicher Automobile mit Verbrennungsmotor erreichen und sich in kurzer Zeit aufladen lassen. Ein vollständiger Wechsel in eine rein elektrifizierte Mobilität kann also aus technischer Sicht zwischen 2030 und 2050 nach einem Markthochlauf bis 2030 gelingen – und zwar allein auf Basis einer optimierten Lithium-Ionen-Batterietechnologie.“ (Fraunhofer ISI 2015-1)

Aus den beiden oben genannten, innerhalb der politischen Rahmenbedingungen wirklich zukunftsfähigen Fahrzeugkonzepten der Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeicher resultieren verschiedene Anforderungen und zentrale Leistungsparameter, welche vor allem die ausführlich diskutierte Lithium-Ionen-Batterie (LIB) erfüllt.

Vor diesem Hintergrund also wurde in dieser Dissertation das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität auf Batteriesystemebene bzw. noch vor der Integration in spezifische Fahrzeugkonzepte in Deutschland im Kontext der Europäischen Union analysiert und mit den TIS in den Ländern China, Japan, Korea, den USA und Frankreich verglichen. Diese sechs Länder waren im Rahmen einer Patentanalyse als führend bestimmt worden, wobei nach anfänglicher Führung durch die USA in den 80er Jahren insbesondere Japan heute mit weitem Abstand unumstrittener Technologieführer ist.

Die Analyse begann mit maßgeblichen strukturellen Komponenten und damit der Energiespeicher-Industrie/Batteriehersteller, wo Unternehmen aus den asiatischen Ländern Japan, China und Korea über alle Teile der Wertschöpfungskette hinweg dominieren. Ein leicht abweichendes Bild ergibt sich in der Automobilindustrie/Elektrofahrzeughersteller, wo bei PHEV mit der BYD Auto Co. ein chinesisches Unternehmen vor zwei US-amerikanischen und einem japanischen Unternehmen deutlich führt. Bei BEV wiederum führt mit der Renault-Nissan Alliance ein französisch-japanisches Joint Venture vor einem US-amerikanischen und zwei chinesischen Unternehmen. Mit den drei Unternehmen Toyota Motor Corp. (vom Pionier und Innovationsführer in Hybridfahrzeugen (HEV) zum Pionier und Innovationsführer in Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV)), Tesla Inc. (vom Angreifer zum Weltmarktführer in BEV) und der BMW Group (Plug-in-Hybridisierung der Produktpalette auf dem Weg zum BEV-Premiumhersteller) wurden drei vollkommen unterschiedliche Unternehmensstrategien in detaillierten Fallstudien analysiert. Die weiteren strukturellen Komponenten wie Netzwerke und nicht-technische Institutionen/Rahmenbedingungen wurden im weiteren Verlauf der Analyse ebenfalls berücksichtigt.

Anschließend wurde das funktionale Muster des TIS in den sechs führenden Ländern analysiert, entlang der sieben Schlüsselprozesse bzw. Funktionen des Einflusses auf die Suchrichtung, der Wissensentwicklung, des Unternehmerischen Experimentierens, der Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte, der Legitimität, der Ressourcenmobilisierung und der Marktentstehung. Insgesamt resultiert aus den Untersuchungsergebnissen ein großer Vorsprung der asiatischen Länder und insbesondere Japans vor China und Korea, vor den USA, Frankreich und Deutschland, der zwar kleiner wird, aber immer noch nicht aufgeholt ist. Für den Moment produzieren die asiatischen Batteriehersteller großformatige Zellen für die Abnehmer im eigenen Land und international.

Abschließend wurde die Funktionalität des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland beurteilt, das sich in der formenden Phase und damit im internationalen Vergleich vor allem mit Nachbarland Frankreich sowie den Vereinigten Staaten von Amerika auf einer Ebene befindet. Aus den Stärken und Schwächen wurden die fördernden und hemmenden Schlüsselfaktoren für das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität abgeleitet und als Treiber und Blockaden dargestellt. Daraus resultierten politische Schlüsselfragen, die es für die weitere Positionierung des deutschen Automobilstandorts hinsichtlich der Elektromobilität im Allgemeinen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien im Besonderen zu beantworten gilt.

Quellenverzeichnis

Fraunhofer ISI 2015-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015). Eine global elektrifizierte Mobilität bis 2050 ist möglich – auf Basis optimierter Lithium-Ionen-Batterien. Zuletzt abgerufen am 29.05.2017 von der Webseite: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/service/presseinfos/2015/presseinfo-37-2015-lithium-ionen-batterien-roadmaps.php

1 Einführung in das Dissertationsvorhaben

In diesem ersten Kapitel werden Motivation und Zielsetzung für die Erstellung der vorliegenden Dissertation erläutert (1.1). Außerdem wird ihr Aufbau vorgestellt (1.2).

1.1 Motivation, Forschungsfragen und Zielsetzung

In der Automobilindustrie nicht nur in Deutschland, sondern auch weltweit ist viel in Bewegung geraten, seit Trends wie Big Data, die zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstrangs mit der Elektromobilität, intelligente Fahrerassistenzsysteme in Richtung autonomes Fahren und vernetztes Fahrzeug oder digitalisierte Produktionsverfahren mit der Industrie 4.0 und die Sharing Economy in der breiten Öffentlichkeit diskutiert werden. Weil die Automobilindustrie mit ihrem Branchenumsatz und ihrer Beschäftigtenzahl als eine der Schlüsselindustrien in Deutschland gilt (BMWi 2017-1), ist es von gesellschaftlichem Interesse, wie sich die Branche hinsichtlich der neuen Trends positioniert und sich aufgrund ihrer Bedeutung für den deutschen Export auch gegenüber Mitbewerbern aus anderen Ländern durchsetzt.

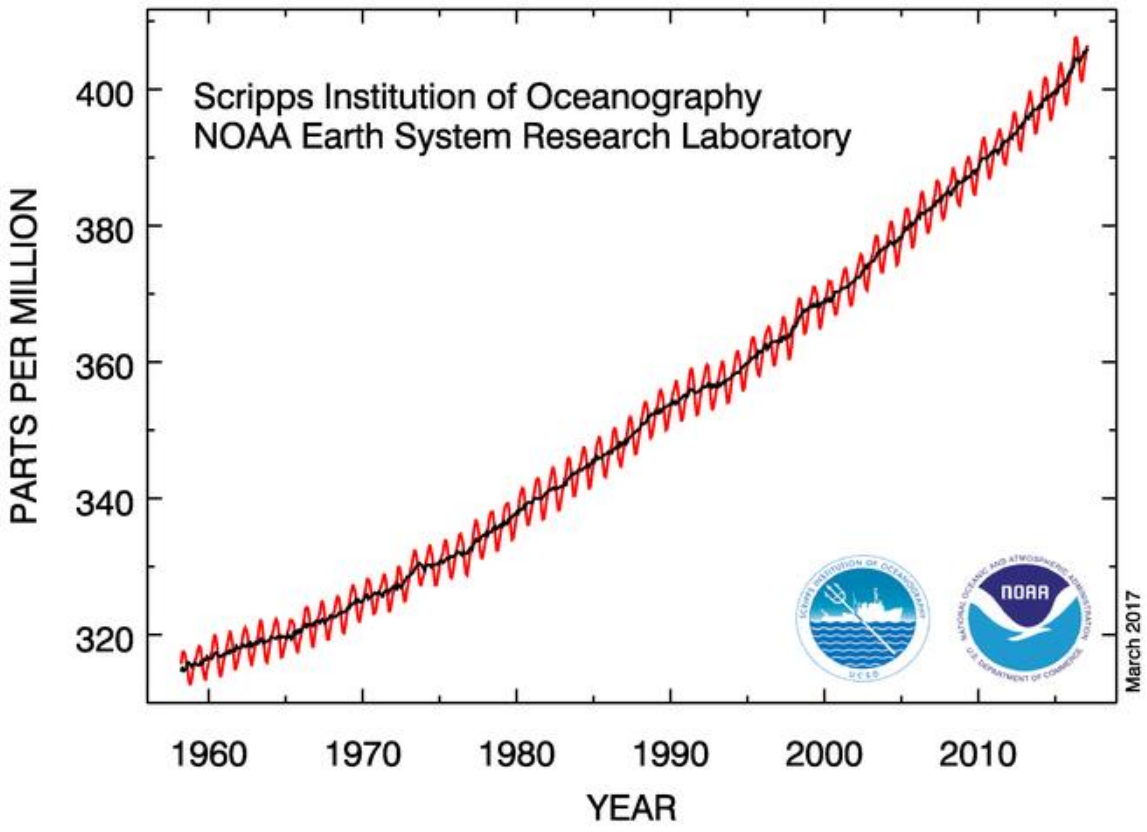
Elektromobilität auf der Basis elektrochemischer Energiespeichertechnologien ist an und für sich nicht neu bzw. ihre Anfänge reichen zurück bis zum Anfang der Automobilgeschichte im 19. Jahrhundert (BMVBS 2011, Seite 4f.). Damals war es noch das weithin zur Verfügung stehende günstige Erdöl bzw. Benzin und Diesel, das in Verbindung mit immer günstigeren und leistungsfähigeren Verbrennungsmotoren der Elektromobilität mit ihren großen, schweren und nur langsam wieder aufladbaren Batterien den Rang ablief. Aus der Vergessenheit hervorgeholt wurde die Elektromobilität, als durch die beiden Golfkriege in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts verursachte Ölkrisen dafür sorgten, dass die Suche nach Alternativen zum Erdöl aufgenommen wurde. Mehr als ein Nischendasein fristeten die damals produzierten Elektrofahrzeuge allerdings nicht: Die Verfügbarkeit von günstigem Erdöl war allenfalls durch politische Gründe kurzzeitig eingeschränkt, und die Batterietechnologie war noch nicht so signifikant fortgeschritten, wie sie es hätte sein müssen, um Elektrofahrzeuge gegenüber herkömmlichen Automobilen mit Verbrennungsmotor wettbewerbsfähig zu machen.

Mit der Jahrtausendwende erlebte die Elektromobilität ein erneutes Aufleben. Dieses Mal war ihre Entstehung allerdings vor allem das Resultat mehrerer kontinuierlich vollzogener Bewusstseinswandel: Die Menschheit realisierte den fortlaufenden Klimawandel, litt in fast allen größeren Metropolen dieser Welt zunehmend unter den lokalen Emissionen der Benzin und Diesel verbrennenden Automobile (Stichworte: Feinstaub, Lärm) und auch der Ölpreis stieg zu dieser Zeit wieder deutlich an.

Der in der breiten Öffentlichkeit kontrovers diskutierte Klimawandel resultiert aus einer globalen Erderwärmung, welche zuletzt im Fünften Sachstandsbericht (engl. „Fourth Assessment Report", Abkürzung AR5) des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (engl. „Intergovernmental Panel on Climate Change", Abkürzung IPCC) der Vereinten Nationen (engl. „United Nations", Abkürzung UN) ausführlich behandelt wurde (IPCC 2017). Die Erwärmung wird dabei auf den sogenannten Treibhauseffekt zurückgeführt, und führt bereits heute

und weltweit zu schweren Konsequenzen für Mensch und Umwelt. Der mit dem Treibhauseffekt verbundene Konzentrationsanstieg des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO_2) in der Atmosphäre wird durch eine 1958 auf Hawaii installierte Messstation dokumentiert (siehe Abbildung 1). Die Werte wurden von zahlreichen anderen Stationen auf dem Globus bestätigt, und so ist die stetige Entwicklung von 315 Teilen pro Million (engl. „parts per million“, Abkürzung ppm) vor dem Jahr 1960 auf mittlerweile über 400 ppm unbestritten.

Abbildung 1: Atmosphärisches CO_2, gemessen am Mauna Loa-Observatorium.

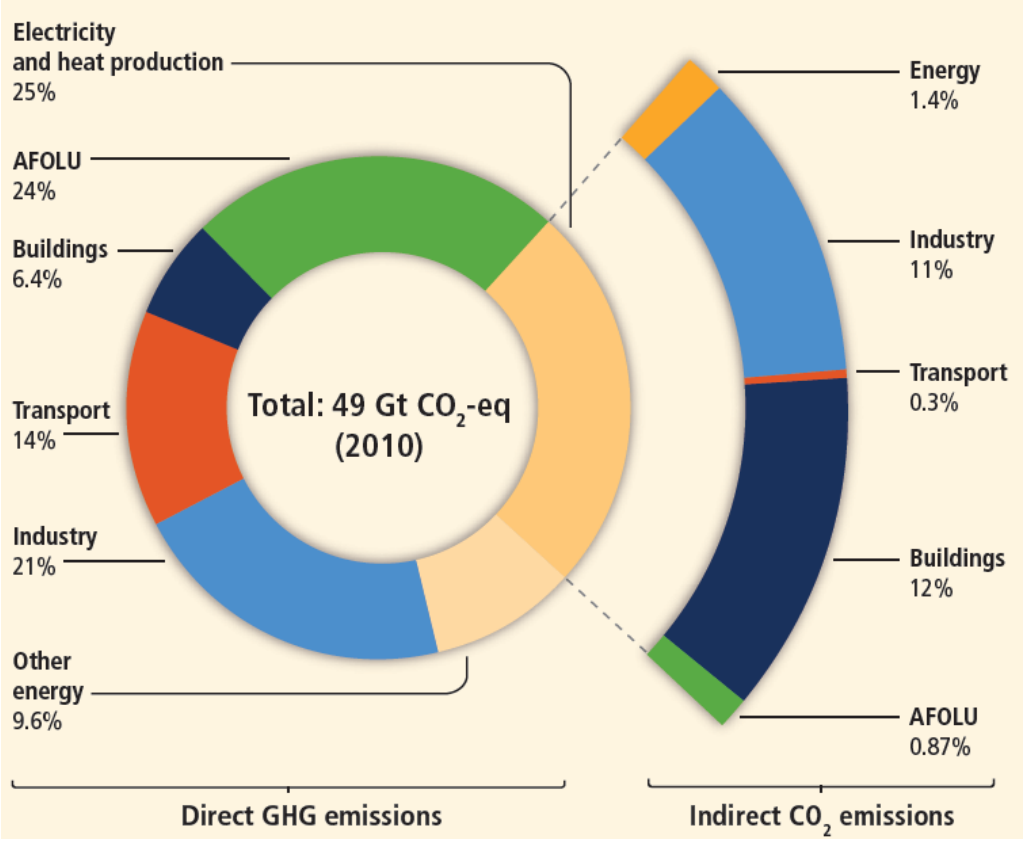


Quelle: NOAA 2017.

Akzeptiert man diese rasante Erhöhung als Ursache für die globale Erderwärmung, so liegt die Frage nahe, wie groß der Einfluss der Menschheit auf diese Entwicklung ist, und wie man ihn wenn auch nicht ganz stoppen, so doch zumindest verringern kann. Deswegen hielt das IPCC im AR5 nicht nur fest, wie hoch die Treibhausgas-Emissionen der Menschheit insgesamt sind, sondern es analysierte auch, welcher Anteil daran auf welches der von der Menschheit erzeugte Treibhausgase entfällt, wobei auch Gase wie Methan (CH_4) oder Distickstoffmonoxid (N_2O) bzw. die Höhe ihres Anteils in der Atmosphäre eine Rolle spielen. Außerdem stellte es dar, in welchen gesellschaftlichen Bereichen die Emissionen der Menschheit entstanden sind (siehe Abbildung 2). Der Verkehrssektor kommt dabei für mehr als 14 Prozent der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen auf. Innerhalb des Verkehrssektors treiben insbesondere die CO_2-Emissionen durch die Mobilität auf der Straße das Emissionswachstum (siehe Abbildung 3). Seit dem Jahr 1990 stiegen die CO_2-Emissionen auf der Straße um 68 Prozent und stellen seither mehr als drei Viertel aller Emissionen im Verkehrssektor (OECD/IEA 2015,

Seite 11). Der Verkehrsträger Straße ist deshalb der allererste Ort, an dem Konzepte zur Emissionseinsparung von CO_2 und anderen Treibhausgasen ansetzen müssen, um im Rahmen globaler Anstrengungen diese anthropogen verursachten CO_2-Emissionen zu senken.

Abbildung 2: Direkte und indirekte Treibhausgasemissionen nach Wirtschaftssektoren.[1]



Quelle: IPCC 2014, Seite 47.

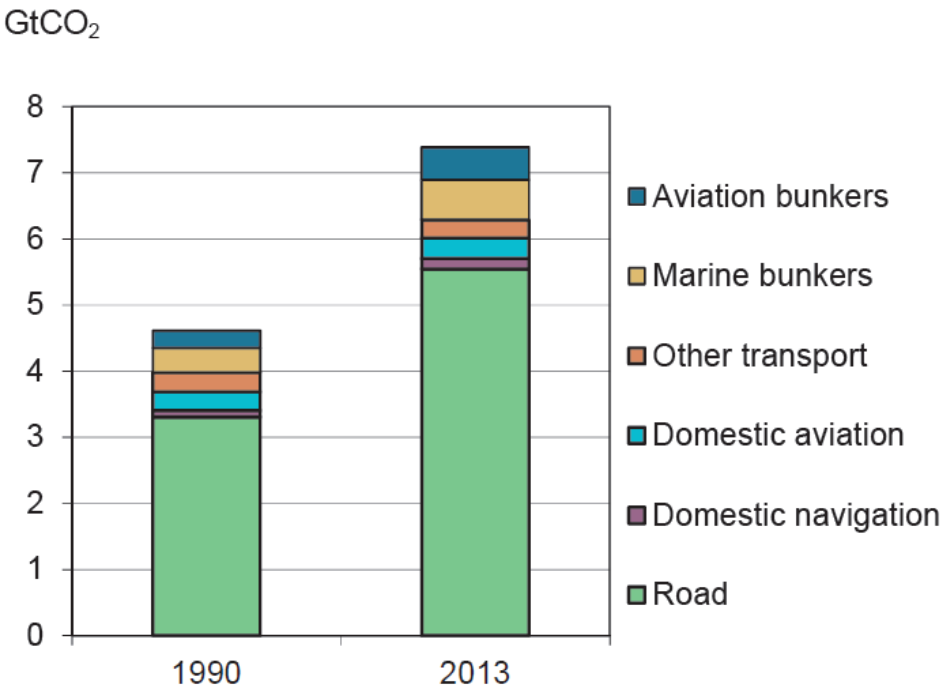
Zu Beginn des Jahres 2015 waren in Deutschland 53,7 Millionen Kraftfahrzeuge zugelassen (Statistisches Bundesamt 2016, Seite 149). Die Tatsache, dass Personenkraftwagen (PKW) mit 44,4 Millionen zugelassenen Fahrzeugen und einem Anteil von 83 Prozent die größte Gruppe an Fahrzeugen bilden, deutet darauf hin, warum viele Menschen im Kontext der Elektromobilität vor allem an dieses Fortbewegungsmittel denken und Regierungen insbesondere hier mit der CO_2-Emissionsregulierung begonnen haben.

Durch Fortschritte in der Forschung und Entwicklung (FuE) zu Batterietechnologien sowie zur Elektromobilität vergrößerte sich aber auch die Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten: Sie reichen von kleinen Elektrofahrzeugen im Bereich von wenigen Kilowattstunden (kWh) bis zu großen Elektrofahrzeugen mit heute weit über 25 kWh (Fraunhofer ISI 2012-1, Seite 20). Der Begriff „Elektrofahrzeug“ umfasst bei weitem nicht nur das herkömmliche Automobil mit einem elektrifizierten Antriebsstrang, sondern viel mehr Anwendungen:

[1] Die unter der Abkürzung AFOLU (engl. „‘Net’ agriculture, forestry and other land use”) angegebenen „Netto“-Emissionen berücksichtigen positive (CO_2-reduzierende) wie negative (CO_2-steigernde) Aktivitäten in der Land- und Forstwirtschaft (z. B. Aufforstung, Wiederaufforstung sowie Abholzung) sowie anderen Bodennutzungen (IPCC 2014, Seite 28).

- Bereits in zahlreichen Ländern weltweit für einen Massenmarkt produzierte Zweiräder wie z. B. Elektroroller und -scooter oder Segways,
- Kleine Flurförderzeuge der Logistik wie z. B. Gabelstapler,
- Automobile natürlich, Kleintransporter sowie Busse und sogar Bahnen,
- Nutzfahrzeuge wie z. B. Traktoren und Baustellenfahrzeuge wie z. B. Bagger, aber auch Lastkraftwagen (LKW) und Walzenfertiger,
- Boote, Containertransporter und sogar Schiffe.

Abbildung 3: CO_2-Emissionen aus dem Verkehr.



Quelle: OECD/IEA 2015, Seite 11.

Unterschieden werden müssen die Anwendungen aber nach dem Grad der Elektrifizierung ihres Antriebsstrangs: Für hybrid betriebene Anwendungen müssen die eingesetzten Batteriesysteme auf den Hochleistungsbereich ausgelegt werden, für reine Traktionsanwendungen auf den Hochenergiebereich. Trends in der FuE an Elektrofahrzeugen wie z. B. Plug-in-Hybridfahrzeuge (engl. „plug-in hybrid electric vehicles“, Abkürzung PHEV) und batterieelektrischen Fahrzeuge (engl. „battery electric vehicles“, Abkürzung BEV) werden auch Entwicklungen in anderen Anwendungen treiben bzw. mit sich bringen, z. B. bei Kleintransportern, weshalb der Reifegrad unterschiedlicher Anwendungen für die Markteinführung entsprechender Modelle und ihre Massenproduktion voneinander abhängt. Aus heutiger Sicht lässt sich festhalten, dass mit der Größe einer Anwendung der Verbreitungsgrad und die Geschwindigkeit der Marktdiffusion dieser Anwendung sinken.

Der Klimawandel kann durch weitestgehend emissionsfreie Mobilität nicht aufgehalten, soll aber zumindest verlangsamt werden. Darüber hinaus können die elektrischen Antriebe auch dabei helfen, die Abhängigkeit insbesondere der Volkswirtschaften in den westlichen Industrie-

ländern vom etablierten Brennstoff Erdöl zu verringern, vor allem, wenn die Erzeugung der eingesetzten elektrischen Energie über den Einsatz Erneuerbarer Energietechnologien erfolgt.

Als offizieller Startpunkt für die Elektromobilität in Deutschland kann im Sinne ihrer politischen Förderung „Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung“ (IEKP) genannt werden, dessen Eckpunkte in der Klausur des Bundeskabinetts in Meseberg am 23. und 24. August 2007 beschlossen wurden. In dem dazugehörigen Bericht wurde die „Elektromobilität“ als Maßnahme der vier Bundesministerien für Wirtschaft und Technologie (BMWi, heute Wirtschaft und Energie), Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, heute Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI), Bildung und Forschung (BMBF) und Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, heute Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMUB) aufgegriffen, der zukünftige Bedarf nach elektrischen Fahrzeugantrieben betont und begründet, ein aktueller Sachstand dokumentiert sowie eine erste Reihe von Förderaktivitäten durch die Bundesregierung angekündigt (BMUB 2007, Seite 89ff.). Die damaligen Förderaktivitäten der Bundesregierung im Bereich Elektromobilität waren auf weniger als einer Seite darstellbar, und der Zeitplan für weitere Maßnahmen visierte hauptsächlich die Entwicklung des sogenannten Nationalen Entwicklungsplans (NEP) Elektromobilität bis zum Sommer 2008 an.

In den nächsten Jahren entstand um die Elektromobilität in Deutschland und international ein richtig gehender „Hype“, welcher in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft seine Kreise zog und Ausdruck u. a. in zahllosen Fachtagungen und Kongressen, Ausschreibungen und Förderprogrammen sowie öffentlich und privatwirtschaftlich initiierten Projekten für FuE fand. Für die Verwirklichung von Elektromobilität stellen elektrochemische Energiespeicher vor allem angesichts ihres wesentlichen Wertschöpfungsbeitrages eine Schlüsseltechnologie dar: Allein in der Fahrzeugproduktion entfallen etwa dreißig bis vierzig Prozent der Wertschöpfung auf die Batterie, davon allein etwa sechzig bis achtzig Prozent auf die Batteriezelle, entsprechend groß ist das Marktpotenzial für diese Schlüsseltechnologie (BMBF 2015). Mit der Umsetzung und bis hin zur breiten Diffusion von z. B. Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in elektromobilen Anwendungen und Produkten sind jedoch noch immer vielfältige Herausforderungen und zu lösende Fragestellungen verbunden:

1. Energiespeicher für die Elektromobilität beeinflussen die Kundenakzeptanz ganz entscheidend durch ihre Eigenschaften und damit die des Elektrofahrzeugs, in welches sie als Komponente verbaut werden. Je „besser“ ein Energiespeicher, desto „besser“ das Elektromobil (und desto größer der anschließende Absatz). Fragen wie z. B. die nach der Ladedauer eines Batteriesystems oder die Reichweite eines Elektrofahrzeuges beschäftigen potenzielle Endverbraucher und beeinflussen die Nachfrage in Verbindung mit dem Preis eines Elektrofahrzeuges enorm.
2. Energiespeicher für die Elektromobilität bzw. großformatige Batteriesysteme stellen nach wie vor eine der teuersten Elektrofahrzeugkomponenten dar. Die Preise sinken allerdings und sollen auch weiterhin beträchtlich zurückgehen. Was gut ist für die Endverbraucher (durch sinkende Verkaufspreise steigt in der Regel die Kundenakzeptanz), stellt die Automobilindustrie vor große Herausforderungen (die Herstellungskosten sinken und verändern die Wirtschaftlichkeit eines Elektrofahrzeuges), was den Umstieg

aus dem nach wie vor hervorragend laufenden Geschäft mit herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in die Segmente neuer Fahrzeugkonzepte wie Hybridfahrzeuge (engl. „hybrid electric vehicles“, Abkürzung HEV), PHEV und BEV anbelangt.

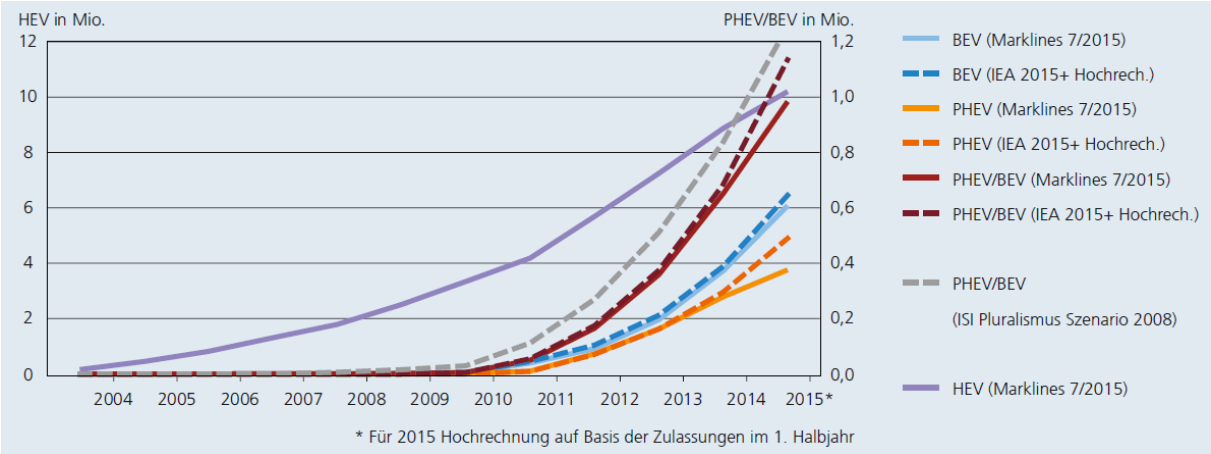
3. Die Energiespeicher sind Teil einer sich für etablierte Industrien (z. B. rund um das Automobil) im Kontext der Elektromobilität auf erhebliche Weise neu strukturierenden Wertschöpfungskette. Aus politischer Sicht ist es eine sehr interessante Fragestellung, ob sie vollständig in Deutschland abgebildet werden sollte. In jedem Fall scheint klar zu sein, dass alle bekannten Phasen eines neuen Marktes für die Elektromobilität in Deutschland durchlaufen werden müssen. Angesichts der potenziellen Marktgröße treten aber nicht nur hier, sondern weltweit neue Akteure in den Wettbewerb sowohl um die Elektromobilität als auch die Energiespeicher als Schlüsseltechnologie ein.
4. Mit Energiespeichern für die Elektromobilität ergeben sich über den gesamten Lebenszyklus hinweg Fragestellungen neu, welche für das etablierte Automobil mit Verbrennungsmotor bereits gelöst wurden. Beispiele sind: Welche Infrastruktur wird für den Betrieb notwendig sein? Welche Geschäftsmodelle werden in Zukunft erfolgreich sein? Welche Mobilitätskonzepte werden sich durchsetzen? Wie könnte das Recycling der Energiespeicher aussehen? Die Beantwortung dieser Fragen stößt auf beliebig komplexe Antworten, die keine einfachen, im Idealfall schlüsselfertigen Komplettlösungen beinhalten.

Der gefühlte „Hype“ ist in Deutschland wieder abgeklungen (BEM 2012), u. a. auch deshalb, weil elektrochemische Energiespeicher wie z. B. LIB im Vergleich zu herkömmlichen Benzin- oder Dieseltanks deutlich komplexere Systeme darstellen und trotz umfassender Kooperation zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft in Deutschland und länderübergreifender Kooperationen zwischen Ministerien, Unternehmen und Universitäten weltweit die technologische Entwicklung nicht schnell genug voranzukommen scheint. Auf dem Spiel steht dabei nicht nur das Ziel der Bundesregierung von einer Million Elektrofahrzeugen auf Deutschlands Straßen im Jahr 2020, sondern auch die Frage, ob sich die im Rahmen der Elektromobilität weltweit entstehenden Massenmärkte für deutsche Expertise und in Deutschland hergestellte Produkte öffnen lassen.

Im Jahr 2015 stieg der weltweite Bestand an Elektrofahrzeugen zum ersten Mal über die Schwelle von einer Million BEV und PHEV (Abbildung 4) (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 12; ZSW 2016, Seite 1). Der Bestand an HEV hat sich in den zehn Jahren zwischen 2004 und 2014 zwar von rund 160 000 Neuzulassungen auf 1,6 Millionen verzehnfacht, die zuletzt erfassten Angaben der Neuzulassungen weist aber auf eine Stagnation dieses Marktes hin (Abbildung 5). HEV mit zwei Antriebskonzepten in einem Fahrzeug sind vor diesem Hintergrund eher als eine Anwendung des Übergangs in die „richtige“ Elektromobilität mit rein batterieelektrisch angetriebenen Elektrofahrzeugen bzw. BEV aufzufassen. Die regulatorischen Emissionsgrenzwerte für den Straßenverkehr sind mit dem breiten Einsatz von HEV spätestens langfristig ohnehin nicht mehr zu realisieren, weshalb mit einem Rückgang der Verkaufszahlen zu rechnen ist. Deshalb wird auch der HEV-getriebene Bedarf an Batteriezellen zuerst stagnieren und dann sinken, wobei diese Entwicklung mit dem zunehmenden Einsatz von LIB gegenüber den heute dominierenden Nickel-Metallhydrid (Ni/MH)-Batterien

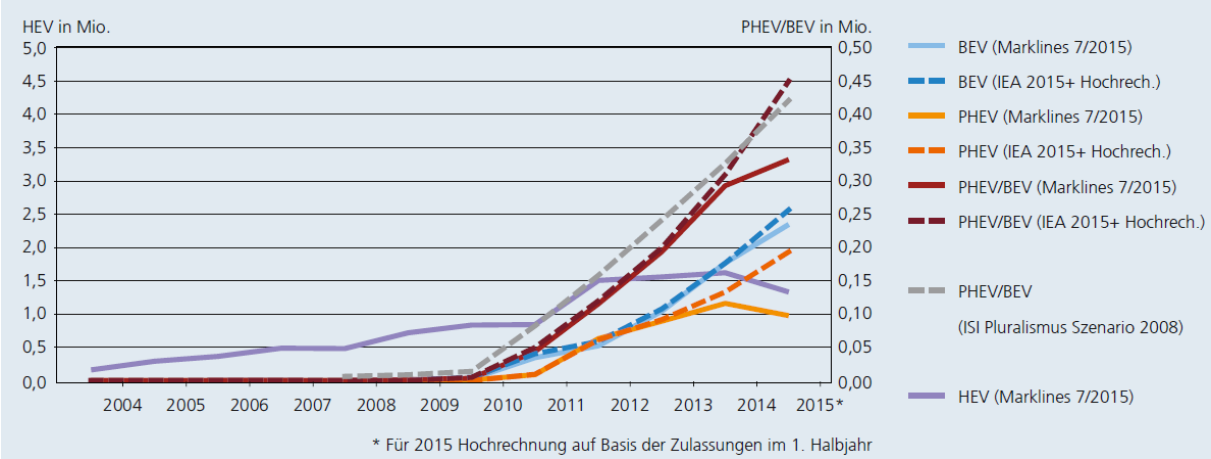
zusammen fällt. Dieser Markt für Ni/MH wird komplett verschwinden, und der HEV-getriebene Bedarf an LIB-Zellen langfristig mit der HEV-Verbreitung zurückgehen.

Abbildung 4: Weltweiter Bestand von Elektrofahrzeugen.



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 12 auf der Basis von IEA 2015; MarkLines 2017 (Stand: Juli 2015); Wietschel et al. 2008, Seite 11.

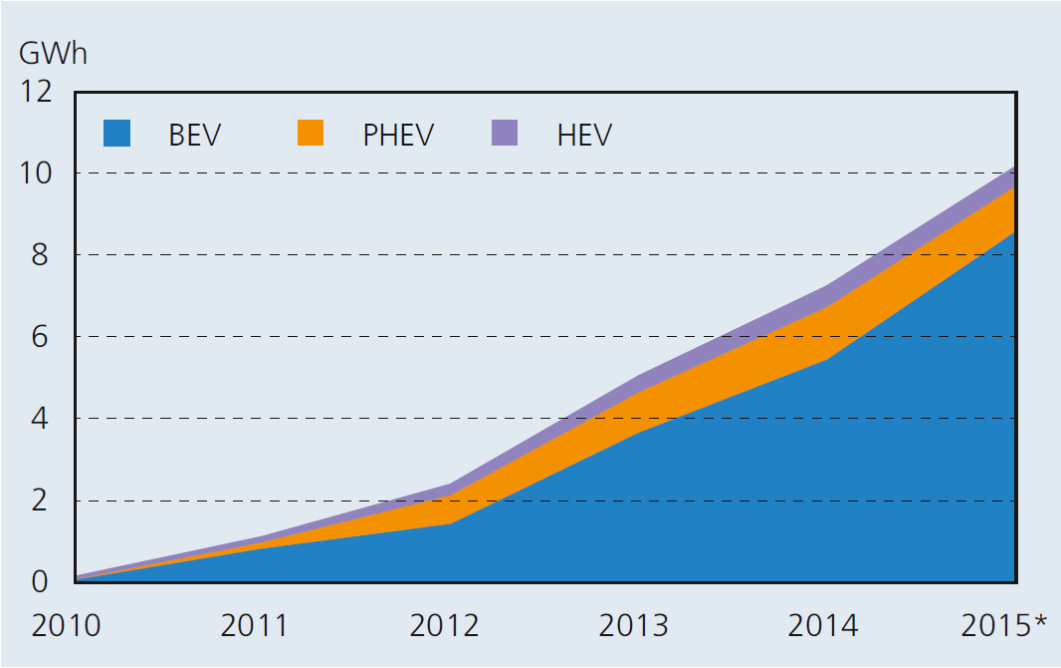
Abbildung 5: Weltweite Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen.



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 12 auf der Basis von IEA 2015; MarkLines 2017 (Stand: Juli 2015); Wietschel et al. 2008, Seite 11.

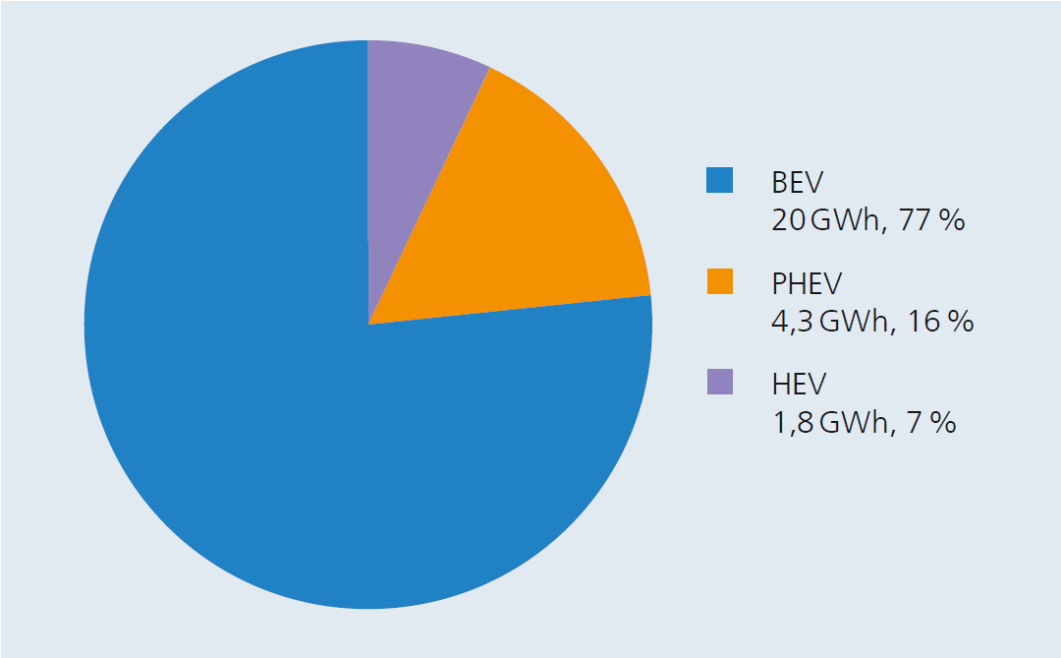
Für PHEV und BEV steigen die Verkaufszahlen immer weiter, allerdings mit großen Unterschieden je nach Land, das untersucht wird, und oft in Zusammenhang mit dem Anspruch der jeweiligen Regierung, gegen lokale Emissionen bzw. Luftverschmutzung vorzugehen. Ende des Jahres 2015 gab es weltweit einen Bestand von rd. 1,3 Millionen PHEV und BEV. Aus den Verkaufszahlen der jeweiligen Elektrofahrzeug-Modelle sowie der in jedem Modell eingesetzten Kapazität des Batteriesystems (in kWh) kann die Entwicklung der LIB-Zellen-Nachfrage für die Elektromobilität (HEV, PHEV und BEV) abgeleitet werden (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 15). Dieser LIB-Zellbedarf hat sich in den letzten Jahren auf über 10 GWh weltweit entwickelt (Abbildung 6). Der LIB-Markt für BEV ist dabei mit großem Abstand als attraktivster Zukunftsmarkt einzustufen, mit hohem Wachstum auch in den nächsten Jahren.

Abbildung 6: Entwicklung des LIB-Zellbedarfs bis zum Jahr 2015 nach Fahrzeugkonzepten der Elektromobilität.[2]



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 15.

Abbildung 7: Entwicklung des LIB-Zellbedarfs bis zum Jahr 2015 kumuliert.



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 15.

Der kumulierte LIB-Zellbedarf zeigt, mit welcher Größenordnung der Bedarf an LIB-Zellen für BEV über dem Bedarf an LIB-Zellen für HEV und PHEV schon in den letzten Jahren lag

[2] Für HEV sind nur die Anteile verkaufter LIB-Zellen angegeben. Rund 80 bis 90 Prozent der HEV fahren heute aber noch mit Ni/MH-Batterien.

(Abbildung 7). Trotz der im Vergleich zu HEV nach wie vor niedrigen Verkaufszahlen von PHEV und BEV lag die Nachfrage nach LIB-Zellen schon im Jahr 2015 für BEV über zehn Mal höher als bei HEV, für PHEV mehr als doppelt so hoch wie bei HEV.

Energiespeichern für die Elektromobilität wird für die nächsten Jahre ein großes Wachstum vorhergesagt, denn wenn man den weltweit vorhandenen Fahrzeugbestand als Basis voraussetzt, ist das Marktpotenzial als riesig einzustufen (VDMA Batterieproduktion 2014, Seite 14f.; VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 13f.). Die Reduzierung von Kraftstoffeinsatz und Emissionsumfang bei gleichzeitiger Kostenreduktion wird bei allen Fahrzeugen der oben genannten Anwendungen keinen Halt machen, denn ihre Betreiber wissen um die Abhängigkeit ihrer Betriebskosten vom volatilen Erdölpreis und werden sie durch den Einsatz von zunehmend elektrifizierten Fahrzeugen bei nachweislicher Wirtschaftlichkeit gerne verringern. Die konkreten Marktprognosen für elektrochemische Energiespeicher im Allgemeinen und LIB im Speziellen unterscheiden sich aber abgesehen von ihrer Kernbotschaft des rasanten Anstiegs teilweise deutlich. Die Prognosen für die Entwicklung des LIB-Zellbedarfes bis 2025 sind dabei an die Prognosen für die Entwicklung der weltweiten PHEV- und BEV-Verkäufe bis 2025 gekoppelt (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 18f.). Deshalb sind nicht nur die Ankündigungen bereits etablierter und potenziell neuer Batteriezellhersteller zum Aufbau von Produktionskapazitäten zu beobachten, sondern auch die heute schon etablierten und potenziell neuen Automobilhersteller beobachten die Marktentwicklungen und reagieren schnell. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Energiespeichern für die Elektromobilität werden Unternehmen fortlaufend aktualisiert planen müssen, um Angebot und Nachfrage aufeinander abzustimmen und Produktionsstätten im Idealfall vollständig auslasten zu können.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Dissertation das Technologische Innovationssystem (TIS) rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland analysiert und in Vergleich mit den vergleichbaren TIS in den Ländern China, Japan, Korea, den USA und Frankreich gesetzt.

Die maßgeblichen Forschungsfragen sind dabei:

1. Worum handelt es sich bei TIS, und was kann aus bereits durchgeführten Fallstudien zu TIS in Erneuerbaren Energietechnologien für die anstehende Analyse des TIS rund Energiespeicher für die Elektromobilität gelernt werden?
2. Welche elektrochemischen Energiespeichertechnologien sind heute und bis 2030 relevant für die Anwendung in der Elektromobilität mit Fokus auf PHEV und BEV?
3. Welche strukturellen Komponenten weist das TIS in Deutschland sowie im Vergleich dazu auch in China, Japan, Korea, den USA und Frankreich auf, welche Akteure wie z. B. Batterie- und Elektrofahrzeughersteller und Netzwerke mit ihren unterschiedlichen Lösungsansätzen, aber auch welche Rahmenbedingungen beeinflussen die zukünftige Entwicklung von Energiespeichern für die Elektromobilität?
4. Wie werden die einzelnen Funktionen in den analysierten TIS erfüllt und wie kann ihre Funktionalität beurteilt werden?
5. Welche fördernden und hemmenden Schlüsselfaktoren beeinflussen das Erreichen dieser Zielvorgaben im deutschen TIS?

6. Welche politischen Schlüsselfragen ergeben sich daraus für die weitere Entwicklung des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland?

Ziel ist es dabei nicht nur, die Barrieren und Treiber für die aktuelle und zukünftige Entwicklung der Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland zu identifizieren und mit den politischen Schlüsselfragen wesentliche Handlungsoptionen für den Wandel des Nationalen Innovationssystems der deutschen Automobilindustrie hin zur Elektromobilität zu formulieren. Gleichzeitig wird auch der Ansatz zur Analyse von TIS in den Erneuerbaren Energietechnologien einem vollständigen Test unterzogen und damit unter Beweis gestellt, wie hilfreich er für die vergleichende Analyse von Innovationssystemen rund um dieselbe Technologie in mehreren Ländern sein kann. Weiterer Forschungsbedarf wird artikuliert und ggf. sogar schon direkt mit eingearbeitet.

1.2 Aufbau der Dissertation

Die vorliegende Dissertation ist modular aufgebaut. Dem Leser ist es damit freigestellt, ob die ganze Arbeit in einem Stück durchgelesen oder nur ein spezifisches Kapitel studiert wird. Zu Beginn eines jeden Kapitels lassen sich kurze Einführungen finden, welche den Inhalt des jeweiligen Kapitels wiedergeben und so eine Entscheidungshilfe zum weiteren Vorgehen bieten. Sie verbessern auch die Möglichkeit zur Orientierung innerhalb der Arbeit.

In diesem ersten Kapitel werden Motivation, Forschungsfragen und Zielsetzung für die Erstellung der vorliegenden Dissertation erläutert (1.1). Außerdem wird der Aufbau der Dissertation geschildert (1.2).

Im zweiten Kapitel werden die theoretisch-methodischen Grundlagen zu Technologischen Innovationssystemen in den Erneuerbaren Energietechnologien gelegt. Dazu werden in einer Einleitung (2.1) zunächst die Begrifflichkeiten Innovation (2.1.1), System (2.1.2) und Innovationssystem (2.1.3) erläutert, bevor die Entwicklung verschiedener Typen von Innovationssystemen aufgezeigt wird (2.2), Nationale (2.2.1), Regionale (2.2.2) und Sektorale (2.2.3) Innovationssysteme. Der für die vorliegende Dissertation wesentliche Ansatz der Technologischen Innovationssysteme (TIS) wird in Theorie und Praxis geschildert (2.3). Dabei sind nicht nur die theoretischen Grundlagen von TIS zu berücksichtigen (2.3.1), sondern es wird auch dem maßgeblichen Wandel der letzten Jahre von der struktur- zur prozessorientierten bzw. funktionalen Analyse von TIS (2.3.2) Rechnung getragen. Das Phasenmodell zur Entwicklung von TIS (2.3.3) wird zur Verwendung in der vorliegenden Dissertation erläutert, bevor die relevanten Fallstudien (2.3.4) in den Erneuerbaren Energietechnologien recherchiert und nach den Kriterien Hypothese, Ergebnis und Lesson learned analysiert werden.

Im dritten Kapitel werden die elektrochemischen Energiespeichertechnologien beschrieben, welche auf dem Stand des Jahres 2016 für die Elektromobilität bereits zur Verfügung stehen oder Teil der FuE bis zum Jahr 2030 sind. Dazu erfolgt zuerst eine Einführung in die für dieses Kapitel grundlegende Methodik des Roadmapping bis zum Jahr 2030 (3.1), in welchem zuerst das Begleitvorhaben „LIB 2015-Roadmapping“ vorgestellt wird (3.1.1), bevor Aufbau und Inhalt der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität (ESEM) 2030 (3.1.2),

der Produkt-Roadmap ESEM 2030 (3.1.3) und der Gesamt-Roadmap ESEM 2030 (3.1.4) erläutert werden. Es folgt eine allgemeine Einführung in die Energiespeichertechnologien (3.2), worin nach einer grundlegenden Energiespeicher-Kategorisierung (3.2.1) die Funktionsweise elektrochemischer Energiespeichertechnologien (3.2.2) erläutert wird. Danach folgt der größte Teil dieses Kapitels mit der oben genannten Vorstellung der elektrochemischen Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität (3.3). Dort werden die Fahrzeugkonzepte der Elektromobilität allgemein vorgestellt (3.3.1), die politischen Rahmenbedingungen geschildert, auf deren Basis die Elektromobilität mit spezifischen Fahrzeugkonzepten zur breiten Durchsetzung kommen soll (3.3.2), Marktanforderungen an die zentralen Leistungsparameter werden abgeleitet (3.3.3), bevor der aktuelle Stand der FuE dokumentiert und diskutiert wird (3.3.4).

Im vierten Kapitel beginnt die Analyse des Technologischen Innovationssystems (TIS) rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in insgesamt sechs verschiedenen Ländern. Nach der Vorstellung des Vorgehensmodells innerhalb der vorliegenden Dissertation (4.1) folgt Schritt 1 der Analyse, die Definition des TIS im Fokus (4.2). Danach werden die maßgeblichen strukturellen Komponenten des TIS identifiziert (4.3), wozu Akteure wie erstens die Energiespeicher-Industrie/Batteriezellhersteller (4.3.1) und zweitens die Automobilindustrie/ Elektrofahrzeughersteller (4.3.2) gehören.

Die funktionale Dynamik der TIS in den sechs betrachteten Ländern steht im Mittelpunkt des fünften Kapitels. In Schritt 2 der Analyse wird das funktionale Muster im TIS ermittelt (5.1), wobei der Fokus auf den sieben Funktionen Einfluss auf die Suchrichtung (5.1.1), Wissensentwicklung (5.1.2), Unternehmerisches Experimentieren (5.1.3), Wissensverbreitung/ Entwicklung positiver externer Effekte (5.1.4), Legitimität (5.1.5), Ressourcenmobilisierung (5.1.6) und Marktentstehung (5.1.7) liegt.

Im sechsten Kapitel folgt Schritt 3 der Analyse, die Beurteilung der Funktionalität (a) und die Festlegung von Prozesszielen (b) des TIS in Deutschland (6.1). Anschließend werden fördernde und hemmende Schlüsselfaktoren identifiziert (6.2), bevor die politischen Schlüsselfaktoren abgeleitet und beantwortet werden (6.3). Der Fokus liegt in diesem Kapitel aus naheliegenden Gründen auf Deutschland, das sich nicht nur hinsichtlich der inländischen Großindustrie in der Elektromobilität allgemein, sondern ganz spezifisch auch bezüglich der darin eingesetzten Energiespeicher positionieren möchte und muss.

Im siebten und letzten Kapitel werden zentrale Ergebnisse der vorliegenden Dissertation in einer Zusammenfassung geschildert (7.1) und in einer Diskussion eingeordnet (7.2).

2 Technologische Innovationssysteme in den Erneuerbaren Energietechnologien

In diesem zweiten Kapitel werden die theoretisch-methodischen Grundlagen zu Technologischen Innovationssystemen in den Erneuerbaren Energietechnologien gelegt.[3] Dazu werden in einer Einleitung (2.1) zunächst die Begrifflichkeiten Innovation (2.1.1), System (2.1.2) und Innovationssystem (2.1.3) erläutert, bevor die Entwicklung verschiedener Typen von Innovationssystemen aufgezeigt wird (2.2), Nationale (2.2.1), Regionale (2.2.2) und Sektorale (2.2.3) Innovationssysteme. Der für die vorliegende Dissertation wesentliche Ansatz der Technologischen Innovationssysteme (TIS) wird in Theorie und Praxis geschildert (2.3). Dabei sind nicht nur die theoretischen Grundlagen von TIS zu berücksichtigen (2.3.1), sondern es wird auch dem maßgeblichen Wandel der letzten Jahre von der struktur- zur prozessorientierten bzw. funktionalen Analyse von TIS (2.3.2) Rechnung getragen. Das Phasenmodell zur Entwicklung von TIS (2.3.3) wird zur Verwendung in der vorliegenden Dissertation erläutert, bevor die relevanten Fallstudien (2.3.4) in den Erneuerbaren Energietechnologien recherchiert und nach den Kriterien Hypothese, Ergebnis und Lesson learned analysiert werden.

Damit sollen bewährte Vorgehensweisen (engl. „best practices“) für die folgende vergleichende Innovationssystem-Analyse abgeleitet werden (siehe Kapitel 4).

2.1 Einführung I: Innovation – System – Innovationssystem

Die Innovationssystemforschung insgesamt sowie ihre wesentlichen Ansätze bauen auf zwei grundlegenden Bestandteilen auf, nämlich „Innovation“, „System“ und nicht zuletzt natürlich auch dem Konzept eines „Innovationssystems“. Diese drei Begrifflichkeiten gilt es gleich zu Beginn der vorliegenden Dissertation präzise zu definieren.

2.1.1 Was ist eine Innovation?

Innovationen, und dabei insbesondere ihre Entstehung, ihre Entfaltung und Verbreitung sowie ihre Auswirkungen stehen heute im Interesse zahlreicher wissenschaftlicher Disziplinen und Studien. Aus dem jeweils spezifischen Einsatz des Terms „Innovation“ wiederum entstanden zahlreiche Nuancen, welche die Festlegung auf eine einzige, zentrale Definition des theoretischen Konstrukts erschweren.

Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (engl. „Organisation for Economic Co-operation and Development“; Abkürzung OECD) hat im Rahmen ihrer Arbeiten

[3] Insbesondere die Grundlagen zur Innovationssystemforschung in diesem Kapitel basieren auf einer Forschungskooperation zwischen dem Autor der vorliegenden Dissertation und Malte Klein vom Institut für Marketing und Management (570F), Universität Hohenheim (heute Daimler AG). Die Ergebnisse dieser Kooperation wurden in Klein et al. (2016) veröffentlicht, Teile daraus wurden als Poster mit den Titeln „Comparison of the Technological Innovation System and the Sectoral Innovation System approaches along ten criteria based on renewable energy case studies“ und „Extension of the phase model for assessing the functionality of TIS“ auf der 16th International Schumpeter Society (ISS)-Konferenz 2016 der International Joseph A. Schumpeter Society vom 6.-8. Juli 2016 in Montreal, Kanada, vorgestellt.

zur Sammlung und Interpretation von innovationsbezogenen Daten eine Definition vorgenommen, welche sehr oft zitiert wird:

> „An innovation is the implementation of a new or significantly improved product (good or service), or process, a new marketing method, or a new organisational method inbusiness practices, workplace organisation or external relations." (OECD 2005, Seite 46)

Diese Definition spiegelt die vier Typen von Innovationen wider, auf welche sich die OECD festgelegt hat, nämlich Produkt-, Prozess-, Marketing- und Organisationsinnovationen. Produkt- und Prozessinnovationen stehen nach diesem Konstrukt in einer engen Beziehung mit den Konzepten technologischer Produktinnovationen und technologischer Prozessinnovationen. Allerdings geht die Definition nur auf die inhaltliche Dimension des Begriffes „Innovation" ein, wobei noch vier weitere Dimensionen unterschieden werden können: Eine Intensitätsdimension, eine subjektive Dimension, eine prozessuale Dimension, und eine normative Dimension (Hauschildt et al. 2011, Seite 5ff.). Nur durch die Einbeziehung aller genannten Dimensionen kann die ganzheitliche Beurteilung einer spezifischen Innovation erfolgen.

Die Unterscheidung von Innovationen nach ihrer Intensität kann in der Einteilung in vier Gruppen der inkrementellen Innovationen, radikalen Innovationen, Veränderungen des technologischen Systems und in technologischen Revolutionen resultieren (Grupp 1997, Seite 136). Vorschläge für weitere Typologien wurden entwickelt, z. B. von eher kontinuierlichen (engl. „continuous") und Kompetenz-zerstörenden oder Kompetenz-steigernden diskontinuierlichen (engl. „discontinuous") Innovationen (Tushman et al. 1986, Seite 439ff.) oder erhaltenden (engl. „sustaining") und ablösenden (engl. „disruptive") Innovationen (Christensen 1997, Seite xvii ff.). Alle Typologien unterscheiden sich aber letztlich nur dadurch, welche Rolle sie Innovationen als Treiber für den technischen Wandel zugestehen bzw. wie sie ihn ausgestalten. Schon Joseph Schumpeter arbeitete 1912 heraus, dass die Entstehung von Innovationen in der Durchsetzung „neuer Kombinationen der vorhandenen wirtschaftlichen Möglichkeiten" begründet liegt (Schumpeter 1912, Seite 158). Diese würden z. B. auf der fortwährenden Veränderung der Produktion aufgrund neuer Maschinen und technischer Verfahren beruhen, und die Grundlage für den kapitalistischen Wirtschaftsprozess darstellen, welcher von der Dynamik des technischen Wandels lebt (Grupp 1997, Seite 55).

Für die Innovationssystemforschung zentral ist das Verständnis von Innovationen als die Einführung von neuem Wissen oder als neue Kombinationen von existierendem Wissen in die Wirtschaft (Edquist 1997, Seite 1). Damit resultieren Innovationen aus dem interaktiven Lernprozess, an welchem idealerweise alle Akteure eines Innovationssystems teilnehmen. Dieser Zusammenhang wird mit der folgenden Definition detailliert dargestellt:

> „Innovation ist ein evolutionärer, kumulativer, interaktiver und rückgekoppelter Prozess des Transfers von Information, implizitem und explizitem Wissen in Neuerungen technischen und organisatorischen Charakters. Dieser Prozess ist charakterisiert durch Unsicherheit, Informationssuche, Informationskodierung und -dekodierung sowie gegenseitiges Lernen. Das Bindeglied zwischen Innovation und Raum ist die Interaktion, d.h. der distanzielle Austausch materieller und immaterieller Ressourcen zwischen den Innovationsakteuren.

> Dieser Innovationsbegriff schließt sozio-kulturelle Faktoren explizit ein, da diese die Interaktionsfähigkeit, -art und -intensität zwischen den verschiedenen Akteuren im Innovationsprozess sowie die entsprechenden Lernprozesse entscheidend beeinflussen." (Koschatzky 2001, Seite 61)

Im Rahmen der Innovationssystemforschung haben sich zwei Auffassungen von „Innovation" etabliert, mit unterschiedlich engem und weitem Sinn. Im engen Sinn konzentrieren sich manche Autoren rein auf technische Innovationen (Nelson et al. 1993, Seite 1), betrachten allerdings nicht nur deren Entstehung, sondern auch ihre Einführung und Verbreitung (Carlsson et al. 1995, Seite 49). Schumpeters oben zitierte Feststellung zur Entstehung von Innovationen als „neuer Kombinationen der vorhandenen wirtschaftlichen Möglichkeiten" geht deutlich weiter und umfasst alle vier Typen von Innovationen, welche die OECD in ihrer oben zitierten Definition erfasst. Andere Autoren der Innovationssystemforschung versuchen sich ebenfalls an einer breiteren Definition, welche auch nicht-technische Innovationen berücksichtigt (Freeman 1987, Seite 1; Lundvall 1992, Seite 8f.). Weil es streng genommen aber keine falsche oder richtige Definition des Terms „Innovation" gibt, mag es je nach Verwendungszweck hilfreiche und weniger hilfreiche Definitionen geben (Edquist 1997, Seite 10).

2.1.2 Was ist ein System?

Der Begriff eines Systems kann sehr weit gefasst werden, die breitest mögliche Definition eines Systems könnte ‚alles, das kein Chaos ist' sein. Anders ausgedrückt aber könnte ein System als jede Struktur, die eine Art Ordnung oder Muster aufweist, definiert werden (Boulding 1985, Seite 9). Schon hier fällt auf, dass einem jeden System eine gewisse Struktur gemein ist, das durch eine inhärente Ordnung und Muster ggf. in seinem Verhalten geprägt wird. Immer noch relativ allgemein, aber deutlich fokussierter ist die folgende Definition, welche den Aufbau und den Zweck eines Systems thematisiert:

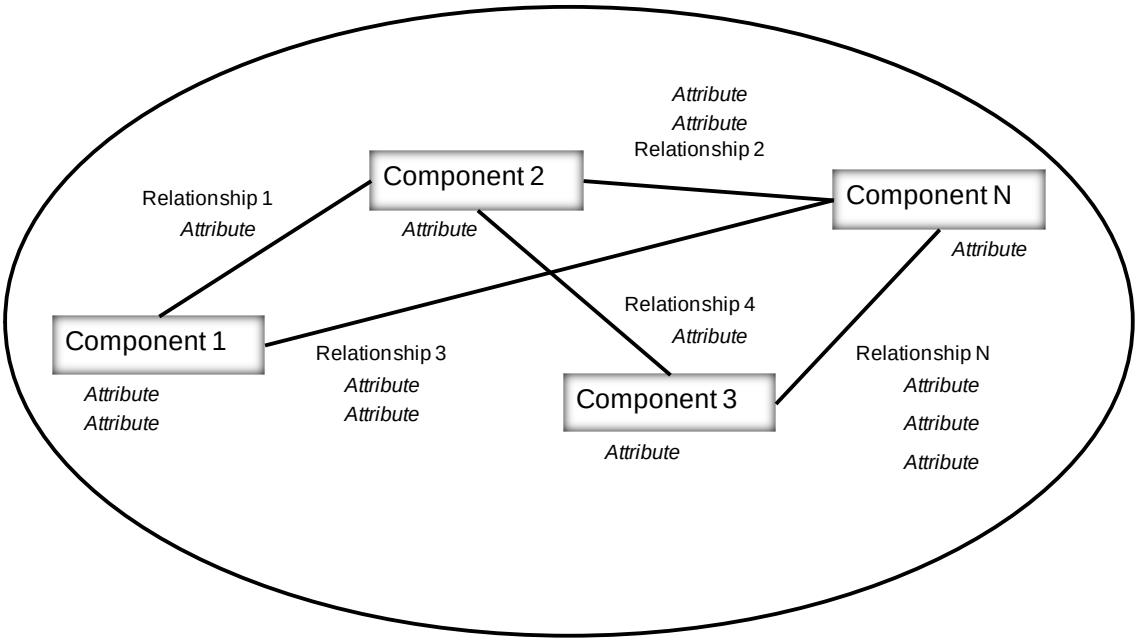
> „Conventionally, systems refer to complexes of elements or components, which mutually condition and constrain one another, so that the whole complex works together, with some reasonably clearly defined overall function." (Fleck 1993, Seite 17)

Für die Innovationssystemforschung zentral ist hier, dass ein System aus Komponenten mit verschiedenen Eigenschaften und Leistungsmerkmalen erst dann entsteht, wenn sie miteinander in Beziehung stehen und einem einheitlichen Sinn oder Zweck dienen, in diesem Fall der Schaffung, Verteilung und Verwendung von Wissen (Carlsson et al. 2002, Seite 233). Eine Definition könnte aus dieser Perspektive wie folgt aussehen:

> „A system [may be defined] as a set of interrelated components working toward a common objective. Systems are made up of components, relationships, and attributes. Components are the operating parts of a system. [...] Relationships are links between the components. [...] Attributes are the properties of the components and the relationships between them; they characterize the system." (Carlsson et al. 2002, Seite 234)

Die Visualisierung eines Systems hilft (Abbildung 8), die verschiedenen Zusammenhänge zu verdeutlichen: Ein System kann aus beliebig vielen (in diesem Fall als Variable „N“ bezeichnete Anzahl von) Komponenten bestehen. Diese Komponenten stehen miteinander in Beziehung. Sowohl die Komponenten als auch die Beziehungen haben verschiedene Eigenschaften und Leistungsmerkmale, deren Anzahl aber nicht näher definiert ist und variieren kann. Ein System kann mit einem oder mehreren anderen Systemen in Verbindung stehen, wobei eine oder mehrere Komponenten über direkte Beziehungen miteinander verbunden sein können. So lange die Systeme verschiedene Ziele haben, werden sie nicht verschmelzen. Weil sich ihr Sinn oder Zweck über eine bestimmte Zeit hinweg allerdings aufeinander anpassen kann, ist es möglich, dass sie sich zu einem gewissen Zeitpunkt vereinigen.

Abbildung 8: Grafische Illustration eines Systems.



Quelle: Klein et al. 2016, Seite 4.

In Bezug auf die Komponenten gibt es eine Vielfalt von Typen:

> „They can be [...] actors or organizations such as individuals, business firms, banks, universities, research institutes, and public policy agencies (or parts or groups of each). They can be physical or technological artifacts such as turbogenerators […] in electrical power systems [or] they can also be institutions in the form of legislative artifacts such as regulatory laws, traditions, and social norms.“ (Carlsson et al. 2002, Seite 234)

Beziehungen verlinken diese Komponenten miteinander. Weil jede Komponente mit ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten das System als Ganzes beeinflusst und dabei von den Eigenschaften und dem Verhalten von zumindest einer anderen Komponente im System abhängig ist, können die Komponenten nicht einfach in verschiedene Teilsysteme aufgeteilt werden und das System ist gleichzeitig mehr als die Summe seiner Teile (Blanchard et al. 2006, Seite 4; Carlsson et al. 2002, Seite 234). Die Beziehungen zwischen den Komponenten sind absolut essentiell für die Weiterentwicklung des Systems insgesamt:

> „Relationships involve market as well as non-market links. Feedback (interaction) is what makes systems dynamic; without such feedback, the system is static. [...] One of the most important types of relationships in innovation systems involves technology transfer or acquisition, some of which takes place via markets, some via non-market interaction.“ (Carlsson et al. 2002, Seite 234)

Attribute stellen die Merkmale eines Systems dar, wobei sowohl Komponenten als auch Beziehungen über Attribute verfügen. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Komponenten können die Attribute aus dem System abgeleitet werden (Carlsson et al., 2002, Seite 234; Hughes 1987, Seite 52). Um ein System verstehen zu können und seine Attribute abzuleiten, muss man das Ziel des Systems kennen.

2.1.3 Ergänzende Anmerkungen zu Innovationssystemen

Aus der Perspektive der Innovationssystemforschung ist festzuhalten, dass die konkrete Abgrenzung eines Systems essentiell für die erfolgreiche Anwendung der Methode zur Analyse von Innovationssystemen ist. In der Wissenschaft entworfene Ansätze liefern diesen für die Empirie zentralen Baustein nicht (Edquist 1997, Seite 11f.), denn die Entscheidung gilt es sowohl für die rein räumlichen Grenzen zu treffen, als auch für die innerhalb der Grenzen für die Analyse zu berücksichtigenden Akteure und Institutionen. Eine Möglichkeit wäre es deshalb, ein System so abzugrenzen, dass alle wichtigen ökonomischen, sozialen, politischen, organisatorischen, institutionellen und andere Faktoren einbezogen sind, welche die Entwicklung, Verteilung und Verwendung von Innovationen beeinflussen (Edquist 1997, Seite 14f.). Weil all diese Faktoren aber nicht im Detail und insbesondere nicht für alle Typen von Innovationen bekannt sind, kann geschlussfolgert werden, dass eine allgemeine Definition der Grenzen eines Innovationssystems auf diesem Wege (mit allen Faktoren) gar nicht gelingen kann.

Um die Komplexität der Analyse zu senken, werden Systeme so abgegrenzt, dass alle für Innovation wichtigen Faktoren enthalten sind – ohne eine Aussage über die tatsächliche Bedeutung bzw. „Wichtigkeit“ einzelner Faktoren zu treffen. Mit zunehmender Erforschung dieser Faktoren und ihrer Auswirkung auf Innovationen wiederum erhöht sich auch gleichzeitig die Genauigkeit der Abgrenzung eines Systems bzw. seiner Innovationsfähigkeit.

Für das korrekte Verständnis des Terms „System“ im Rahmen der Innovationssystemforschung ist auch die Verdeutlichung wichtig, dass ein Innovationssystem anders als ein System im rein ingenieurwissenschaftlichen Sinn nicht bewusst entworfen und gebaut sein muss, sondern aus dem Zusammenspiel verschiedener Akteure und Institutionen entstehen kann, welche eine bedeutende Rolle mit Einfluss auf die Innovationsfähigkeit des Systems haben (Nelson et al. 1993, Seite 5ff.). Dabei ist also weder gesagt, dass das Innovationssystem bewusst angelegt wurde, noch dass alle Akteure und Institutionen reibungslos und auf schlüssige Weise miteinander arbeiten.

Aus der politischen Perspektive kann ein Innovationssystem aber durchaus bewusst entworfen und gefördert werden, vorausgesetzt, die für einen bestimmten Typ von Innovation notwendigen Akteure und Institutionen sind vorhanden und willens, miteinander für das übergreifende

Ziel zu kooperieren bzw. Innovationsfähigkeit zu demonstrieren. Aus wirtschaftlicher oder gar wissenschaftlicher Perspektive mag dies deutlich schwieriger bzw. mit wesentlich höherem Aufwand verbunden sein, ist allerdings ebenfalls zu bewerkstelligen. Prinzipiell kann also jede der drei großen Säulen eines Innovationssystems als Politik, Wirtschaft oder Wissenschaft die Initiative zum Aufbau eines bestimmten Innovationssystems übernehmen.

2.2 Einführung II: Verschiedene Typen von Innovationssystemen

Insgesamt wurden bisher vier verschiedene Typen von Innovationssystemen mit unterschiedlichen Bezugsebenen ausdifferenziert (Klein et al. 2016, Seite 1):

1. Nationale Innovationssysteme (NIS; List (1844), Freeman (1987), Dosi et al. (1988), Lundvall (1992), Nelson (1993), Edquist (1997)),
2. Regionale Innovationssysteme (RIS; Cooke (1992), Braczyk et al. (1998), Howells (1999), Maskell et al. (1999), Asheim et al. (2002), Doloreux (2002)),
3. Sektorale Innovationssysteme (SIS; Breschi et al. (1997); Breschi et al. (2000); Malerba (2002; 2004; 2005-1; 2005-2)),
4. Technologische Innovationssysteme (TIS; Carlsson et al. (1991); Jacobsson et al. (2000), Rickne (2000), Johnson (2001), Hekkert et al. (2007); Bergek et al. (2008)-1).

Ein fünfter Typ von Systemen wurde erst vor einigen Jahren entwickelt und steht nicht nur damit, sondern auch konzeptionell abseits der vier bereits genannten Typen:

5. Sozio-Technische Systeme, inklusive der sogenannten „Transitionen“ (STS; Geels 2002, Geels 2004, Geels 2005, Grin et al. 2010, Kemp et al. 2006, Kemp et al. 2007, Rotmans et al. 2001, Smith et al. 2005).

Auf STS soll im weiteren Verlauf aufgrund der großen konzeptionellen Unterschiede (Coenen et al. 2010) nicht weiter eingegangen werden. An dieser Stelle ist allerdings auf die erste Arbeit zur Entwicklung eines integrierten Ansatzes aus dem TIS und der sogenannten Multi-Level-Perspektive (engl. „Multi-Level Perspective“ bzw. MLP) zur Erklärung der Transitionstheorie hinzuweisen (Markard et al. 2008).

Zur weiteren Forschung bezüglich Ansätzen der Innovationssystem-Analyse muss auch der neueste Ansatz von sogenannten Globalen Innovationsystemen (GIS; Binz et al. 2016) genannt werden. Dieser Ansatz betont die Transnationalität von Innovationen. Er baut zwar auf den existierenden und oben genannten vier Typen von Innovationssystemen auf, aber richtet sie in Bezug auf die wissenschaftliche Literatur zu globalen Wertschöpfungsketten, globalen Produktionsnetzwerken oder globalen Innovationsnetzwerken neu aus (Binz et al. 2016, Seite 2). Weil der GIS-Ansatz von nicht weiter etabliert wurde, ist seine Anwendung noch nicht erfolgt und es sind noch keine zitierfähigen Fallstudien auffindbar.

Mit diesem Beispiel zeigt sich aber, dass die Innovationssystemforschung in einem Prozess fortlaufender Evolution begriffen ist. Seit den Anfängen mit dem Typus des NIS sind bereits fast 30 Jahre vergangen (sieht man von den frühen Arbeiten durch den Deutschen Friedrich List ab, siehe Kapitel 2.2.1). Über die folgenden Jahrzehnte bis heute hat sich der Ansatz zur

Innovationssystem-Analyse als das einflussreichste Paradigma innerhalb internationaler Innovationsforschung etabliert (Lindner et al. 2016, Seite 1). Er rahmt allerdings nicht nur die wissenschaftliche Diskussion rund um Innovation ein, sondern liefert auch konzeptionelle Orientierung und strategische Anleitung für viele Regierungen sowie internationale und supranationale Organisationen. Und obwohl ein zunehmendes Maß an Kritik an diesem Ansatz geäußert wird, betonen Wissenschaftler nach wie vor, dass er auch weiterhin ein hilfreiches analytisches Instrument und eine wertvolle konzeptionelle Referenz für den Entwurf von Wissenschafts-, Technologie und Innovationspolitik (engl. „science, technology and innovation policy", Abkürzung STI policy) darstellt. Der Ansatz wird deshalb überarbeitet und weiterentwickelt, um auf neue Herausforderungen wie z. B. Direktionalität und normative Orientierung zu reagieren (Lindner et al. 2016, Seite 2f.). Dazu werden vier Kapazitäten für eine sogenannte „reflexive Regierungsführung" von Innovationssystemen vorgeschlagen wie folgt: Kapazitäten zur Selbstreflektion, zur transdisziplinaren Arbeit und Integration, zur Antizipation und zum Experimentieren. Diese und zukünftige Forschung muss in den kommenden Jahren genau beobachtet werden, da nicht nur Herausforderungen des Ansatzes zur Innovationssystem-Analyse adressiert werden, sondern auch eine Reihe von miteinander verbundenen Phänomenen und Entwicklungen zeitgenössischer Innovationsforschung bearbeitet und beantwortet werden (Lindner et al. 2016, Seite 5).

Ein Vergleich der bereits etablierten vier Typen von Innovationssystemen zeigt, dass sie durchaus gegeneinander abgegrenzt werden können bzw. sollten (Klein et al. 2016, Seite 33ff.). Es gibt Wissenschaftler, welche die neueren Modelle gar nicht als Alternativen zum ursprünglich als ersten Ansatz entwickelten NIS auffassen möchten, sondern vielmehr als hilfreiche Werkzeuge sehen: Die anderen analytischen Ebenen seien nicht nur legitim, sie seien sogar notwendig, um ein realistisches Verständnis der Funktionsweise von NIS und nicht zuletzt der politischen Rahmenbedingungen und Leistungsfähigkeit auf der nationalen Ebene zu erhalten (Lundvall et al. 2002, Seite 215f.). Trotzdem ist jeder Typ von Innovationssystemen je nach Schwerpunkt der vorzunehmenden Analyse unterschiedlich hilfreich, weshalb im Folgenden die Evolution der Innovationssystemforschung von NIS über RIS zu SIS und TIS als Grundlage für die Entscheidung für einen bestimmten Typus von Innovations-systemen aufgezeigt wird, welcher dann die Basis für die weiterführende wissenschaftliche Argumentation innerhalb der vorliegenden Dissertation zur „Funktionalen Dynamik von Technologischen Innovationssystemen im Bereich der Erneuerbaren Energietechnologien" darstellt.

2.2.1 Nationale Innovationssysteme

Die Theorie der Nationalen Innovationssysteme (NIS) geht bis auf den Deutschen Friedrich List zurück, der als erster Akademiker über ein „nationales System“ schrieb, mit dem „auf nationalökonomischem Wege Deutschlands Wohlstand, Kultur und Macht zu fördern sei“ (List 1844, Seite vi). Nachdem er die Transportmittel „in ihrer Gesamtwirkung als Nationaltransportsystem, folglich nach ihrem Einfluss auf das ganze geistige und politische Leben, den geselligen Verkehr, die Produktivkraft und die Macht der Nationen“ studiert hatte (List 1844, Seite xxii)[4], folgte er seiner Überzeugung, dass Nationen eine der reichsten Quellen des Wohlstandes, der Zivilisation und Macht unbenutzt lassen würden, wenn sie nicht die Arbeitsteilung und die Einbindung der produktiven Kräfte im nationalen Maßstab zu realisieren anstrebten, sobald sie die dazu erforderlichen ökonomischen (angesichts einer schon weit entwickelten Landwirtschaft), geistigen (angesichts einer schon weit fortgeschrittenen Bildung) und gesellschaftlichen (angesichts schon weit ausgereifter Institutionen und Gesetze) Hilfsmittel besäßen (List 1844, Seite 23).[5] Um sein Ziel für Deutschland zu erreichen, das industrialisierte England einzuholen und sogar zu überholen, befürwortete er nicht nur den Schutz junger Industrien, sondern ein breites Spektrum von politischen Maßnahmen zur Beschleunigung von Industrialisierung und Wirtschaftswachstum (Freeman 1995, Seite 5).

Fast 150 Jahre später war der Engländer Christopher Freeman der erste Akademiker, der „national systems of innovation“ spezifisch diskutierte (Freeman 1987, Seite 1), als er das japanische NIS analysierte und Schlüsse auch für andere Länder zog. Ein NIS war für ihn ein Netzwerk von Institutionen im öffentlichen und in den privaten Sektoren, die durch Aktivitäten und Interaktionen neue Technologien initiieren, importieren, modifizieren und verbreiten. Beeindruckt von Japans intensiven Anstrengungen, die führenden Industrienationen einzuholen und eventuell Westeuropa und die Vereinigten Staaten von Amerika (USA) mit enormen Raten von technologischem Wandel zu überholen, präsentierte Freeman den statistischen Nachweis für Japans wachsende Führung in industrieller FuE und technologischer Innovation, welche die Grundlage für Japans hervorragende Handelsbilanz bildete. Seine Arbeit war durch eine Forschungszuwendung durch den Wirtschafts- und Sozialforschungsrat (engl. „Economic and Social Research Council“, Abkürzung ESRC) möglich geworden.[6] Freeman selbst dokumentierte zwei Entwicklungen auf internationaler Ebene, die einen tiefen Eindruck in den 1980er Jahren sowohl auf die Politiker als auch auf die Wissenschaftler machten, auf der einen Seite der außerordentliche Erfolg von zuerst Japan und dann Korea in ihrer technologischen und wirtschaftlichen Aufholjagd, und auf der anderen Seite der Zusammenbruch der sozialistischen Volkswirtschaften Osteuropas (Freeman 1995, Seite 11).

---

[4] Friedrich List veröffentlichte im Jahr 1838 dazu ein Buch mit dem Titel „Das deutsche National-Transport-System in volks- und staatswirthschaftlicher Beziehung“ (List 1838).

[5] Für weitere Analysen und Hintergründe wird an dieser Stelle die umfassende Einführung in das Nationalsystem von Dr. Friedrich List empfohlen: „Introduction: The National System of Friedrich List“ (Freeman 1995, Seite 5ff.).

[6] Der ESRC bezeichnet sich als die im Vereinigten Königreich (UK) führende Forschungs- und Ausbildungsagentur, die sich mit wirtschaftlichen und sozialen Belangen auseinandersetzt, siehe (ESRC 2016).

Ein anderer Gründungsvater der Theorie von NIS war der US-Amerikaner Richard R. Nelson, der das Vorwort zu einem Kapitel mit dem Titel „PART V: National systems of innovation" (Dosi et al. 1988, Seite 309ff.) schrieb, in welchem die NIS der USA und Japan zu dieser Zeit verglichen wurden, mit vielen Gemeinsamkeiten, aber auch einigen wichtigen Unterschieden. Das Hauptanliegen des Essays über die USA war, die institutionellen Strukturen offenzulegen, welche den technischen Fortschritt in modernen kapitalistischen Ländern unterstützen, eine Gedankenkette, welche wie schon zuvor deutlich auf das Kalte Krieg-Denken im Hintergrund hinwies.[7]

Interessanterweise erschien in diesem Buch auch ein Kapitel des Schweden Bengt-Åke Lundvall mit dem Titel „17. Innovation as an interactive process: from user-producer interaction to the national system of innovation".[8] Er betrachtete NIS aus einer anderen Perspektive, er fokussierte auf Interaktionen zwischen Nutzern und Herstellern und argumentierte plausibel, dass geografische und kulturelle Nähe effektive Interaktion erleichtert. In anderen Worten: Während Freeman und Nelson die Grenzen eines Landes als gegeben akzeptierten und von außen auf ein spezifisches NIS blickten, ging Lundvall weiter und schlug vor, dass die nationalen Grenzen dazu neigen, Netzwerke mit technologischen Wechselwirkungen zu umschließen, die NIS definieren (Dosi et al. 1988, Seite 310), womit er von innen auf ein spezifisches NIS blickte. Sowohl Lundvall als auch Nelson editierten und trugen zu bahnbrechenden Buchtiteln über „National Systems of Innovation – Toward a Theory of Innovation and Interactive Learning" (Lundvall 1992) bzw. „National Innovation Systems: A Comparative Analysis" (Nelson 1993) bei. Gerade die „Interaktion" zwischen den an einem NIS beteiligten Institutionen stand in ihren Definitionen im Vordergrund, wo die Elemente und Beziehungen, welche in der Produktion, Verbreitung und Benutzung von neuem, ökonomisch hilfreichem Wissen interagieren und entweder ihren Standort in oder ihre Wurzeln innerhalb der Grenzen eines Nationalstaates haben (Lundvall 2010, Seite 2) und wo eine Reihe von Institutionen mit ihren Interaktionen die innovative Leistungsfähigkeit der nationalen Unternehmen bestimmen (Nelson 1993, Seite 5ff.).

Ein anderes Standardwerk mit dem Titel „Systems of Innovation – Technologies, Institutions and Organizations" (Edquist 1997) wurde editiert und mit Beiträgen versehen durch den Schweden Charles Edquist, der im Jahr 1994 ein sogenanntes Innovationssystemforschungsnetzwerk (engl. „Systems of Innovation Research Network") initiierte: Es hatte zum Ziel, einen Beitrag zum Aufbau einer soliden und durchdachten konzeptionellen und theoretischen Grundlage für das weitere Studium von Innovationen in einem systemischen Kontext zu leisten (Edquist 1997, Seite xiii). Die Arbeit des Netzwerks war Paper-basiert, und die Paper wurden

[7] Das Kapitel endet mit einem Essay des Tschechen Pavel Pelikan mit dem Titel „18. Can the innovation system of capitalism be outperformed". Er arbeitet darin an einer theoretischen Erklärung, ob ein kapitalistisches Innovationssystem durch ein sozialistisches Innovationssystem leistungsbezogen übertroffen werden kann, in dem von einer zentralen Behörde eingesetzte Beamte die Erstellung und Nutzung von Technologien steuern.

[8] Im Jahr 1985 veröffentlichte er ein Paper mit dem Titel „Product Innovation and User-Producer Interaction", in dem er „national systems of production" erwähnte (Lundvall 1985, Seite 3 und Seite 34) und ein „system of innovation" skizzierte (Lundvall 1985, Seite 29f.), aber die beiden Konzepte noch nicht miteinander verschmolz.

in drei Treffen im Jahr 1994 und 1995 entwickelt und letztlich zu Kapiteln im zitierten Buch. Um das Jahr 1997 hatten sich in der Innovationssystemforschung schon mehrere Ansätze mit unterschiedlichen Eigenschaften hervorgetan, und die durch Edquist geschriebene exzellente Einführung mit dem Titel „1. Systems of Innovation Approaches – Their Emergence and Characteristics“ sollte nach wie vor Teil einer grundlegenden Leseliste zum Thema Innovationssystemforschung sein.

Die räumlichen Grenzen von NIS hängen vom betrachteten Innovationssystem ab. Ursprünglich wurde sogar die Meinung geäußert, dass das Konzept von NIS zu breit sein könnte, als dass die Institutionen, welche technische Innovationen in einem Bereich unterstützen, nur sehr wenig Überschneidung mit den Institutionen aufweisen, die Innovationen in einem anderen Bereich hervorbringen (Nelson et al. 1993, Seite 5), was generell für die Verwendung eines anderen Typs von Innovationssystemen spricht. In die gleiche Richtung geht, dass Innovationssysteme supranational, national, oder „subnational“ (also regional oder lokal) sein können – und zur gleichen Zeit sektoral in jeder der genannten geografischen Abgrenzungen sein können (Edquist 1997, Seite 12). Ob ein Innovationssystem räumlich oder sektoral abgegrenzt sein sollte, hängt von der jeweiligen Fallstudie ab. Speziell für NIS gilt, dass die Landesgrenzen normalerweise die Begrenzung liefern (Edquist 2005, Seite 200). Es könnte jedoch argumentiert werden, dass die Kriterien für Regionale Innovationssysteme (RIS) genauso stichhaltig sind wie für NIS. In anderen Worten, wenn der Grad der Kohärenz oder der nach innen gerichteten Orientierung sehr gering ist, kann das Land vernünftigerweise nicht dafür in Betracht gezogen werden, ein NIS zu haben. Der NIS-Ansatz ist deshalb auch weniger relevant für große als für eher kleinere Länder.

Empirisch gesehen werden die Bemerkungen von den fünf meistzitierten Fallstudien unterstützt[9], die bezüglich NIS eine repräsentative Vielfalt offenbaren, was den Vergleich ihrer räumlichen Grenzen anbelangt: Die NIS von Deutschland, Japan und der früheren Sowjetunion werden analysiert (Freeman 1995), das NIS der USA und von verschiedenen OECD-Ländern (Furman et al. 2002), das NIS von Deutschland (Meyer-Krahmer 1998), das NIS von China (Liu et al. 2001) und das NIS von Japan und anderen ostasiatischen Volkswirtschaften (Mowery et al. 1995). Die meisten Fallstudien diskutieren nationale oder supranationale Innovationssysteme, davon Letzteres, wenn ein NIS-Vergleich mit mehr als einer Nation durchgeführt wird.

Konzeptionell gesehen ist die Analyseeinheit für NIS ein „Nationalstaat“, und die Suche nach einer allgemein gültigen Definition des Terms einer „Nation“ in seinen verschiedenen Varianten hat bereits viel Aufwand gekostet. Interessanterweise ist der ideale, abstrakte Nationalstaat, in welchem die beiden national-kulturellen und staatspolitischen Dimensionen in Einklang stehen, in diesem strikten Sinn sehr schwierig in der realen Wirklichkeit vorzufinden: Es gibt eigentlich keinen einzigen Nationalstaat – definiert durch eine Kultur, ethische und sprachliche Eigenschaften – weltweit, in welchem alle dazugehörigen Individuen tatsächlich in einem

[9] Die fünf meistzitierten Fallstudien wurden im Rahmen einer Recherche mit konkret abgestimmten Suchstrategien in der Abstract- und Zitationsdatenbank „Web of Science“ (WoS) im Juni 2015 ermittelt, siehe (WoS 2017).

einzigen geografischen Raum versammelt sind, der von einer zentralen staatlichen Autorität verwaltet wird, und ohne dass sich ausländische Nationalitäten unter diesen Individuen befinden (Lundvall 1992, Seite 2). Schon in einem intuitiven Sinn allerdings wird die Analyse und der Vergleich von verschiedenen Innovationssystemen auf einer nationalen Ebene das hauptsächliche Analysemittel für eine lange Zeit bleiben, und obwohl NIS nur einer von mehreren möglichen Ansätzen der heutigen Innovationssystemforschung sind, stellen sie nach wie vor einen der meist relevanten Ansätze dar (Edquist 2005, Seite 198f.). Im Allgemeinen gibt es große Unterschiede zwischen den verschiedenen nationalen Systemen hinsichtlich ihrer Eigenschaften wie dem institutionellen Aufbau, der organisatorischen Struktur, Investitionen in FuE und ihrer Leistung. Dazu kommt ein weiterer Grund, sich auf NIS zu konzentrieren: Die meisten öffentlichen Politikmaßnahmen, welche die Innovationsprozesse oder die Wirtschaft als Ganzes beeinflussen, werden immer noch auf nationaler Ebene entworfen und umgesetzt.

Empirisch beobachtet führen die fünf meistzitierten Fallstudien eine ökonomische Analyse mit den historischen Beispielen von Deutschland, Japan und der früheren Sowjetunion durch (Freeman 1995), messen die nationale Innovationsfähigkeit der USA und von verschiedenen OECD-Ländern (Furman et al. 2002), analysieren den Technologietransfer innerhalb Deutschlands NIS (Meyer-Krahmer 1998), offenbaren ein allgemeines Rahmenwerk zur Analyse von Innovationssystemen angewendet auf einen Vergleich von Chinas NIS unter Zentralplanung und nach Reformen (Liu et al. 2001) und dokumentieren die Rolle von NIS im nach innen gerichteten Technologietransfer in Japan und anderen ostasiatischen Volkswirtschaften (Mowery et al. 1995).

Um die grundlegenden Komponenten von NIS zu nennen, könnte eine Definition von NIS wie folgt aussehen:

> „A national system of innovation is the system of interacting private and public firms (either large or small), universities, and government agencies aiming at the production of science and technology within national borders. Interaction among these units may be technical, commercial, legal, social, and financial, in as much as the goal of the interaction is the development, protection, financing, or regulation of new science and technology.“ (Niosi et al. 1993, Seite 212)

Abhängig von der gewünschten Komplexität kann diese Definition natürlich leicht verallgemeinert werden, z. B. durch die Berücksichtigung von anderen öffentlichen und privaten Organisationen, die eine Rolle im NIS spielen, wie z. B. öffentliche Laboreinrichtungen, Organisationen für den Technologietransfer, gemeinsame Forschungsinstitute, Patentämter, Ausbildungseinrichtungen und so weiter (OECD 1999, Seite 32).

Hinsichtlich der Funktionen von NIS gibt es fünf Primärfunktionen wie folgt:

1. Die Schaffung neuen Wissens zu fördern,
2. Die Ausrichtung des Suchprozesses zu steuern,
3. Die Bereitstellung von Ressourcen, z. B. Kapital und Kompetenzen,
4. Die Schaffung von positiven externen Zusatzerträgen (z. B. durch Austausch von Informationen, Wissen und Visionen) zu ermöglichen, und

5. Die Entstehung von Märkten zu erleichtern.
(Johnson et al. 2000 nach Feinson 2003, Seite 22)[10]

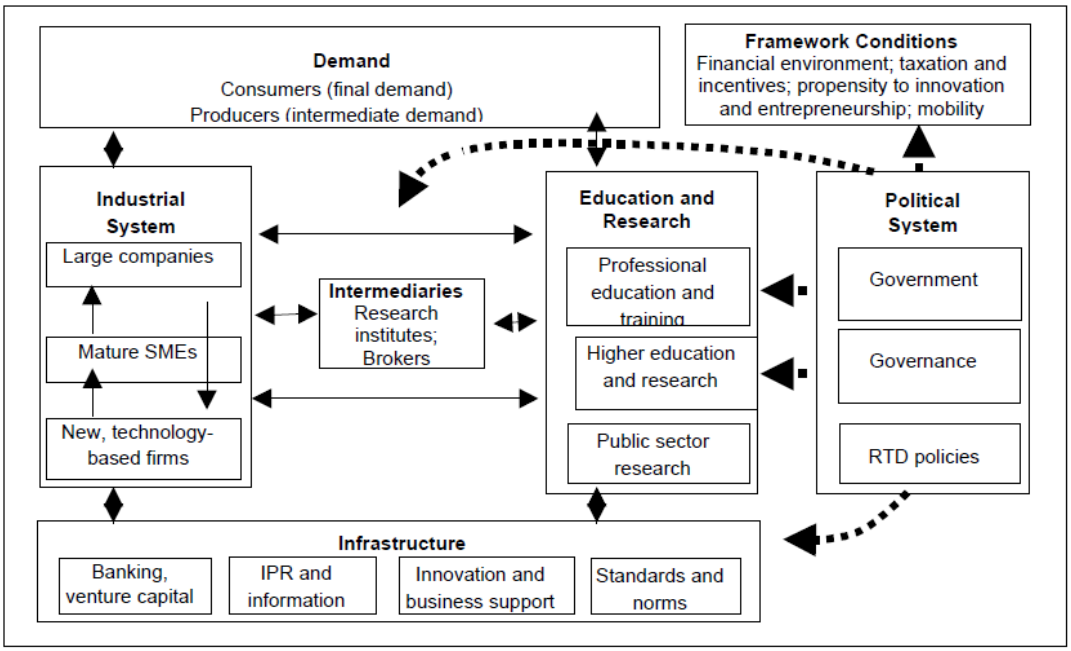
Diese Liste kann deutlich erweitert werden, was die Beiträge anderer Wissenschaftler anbelangt, z. B. mit den folgenden Aspekten:

1. Die Schaffung von Humankapital anzustreben,
2. Die Legitimität von Technologien und Unternehmen herzustellen, und
3. Die Schaffung eines frei nutzbaren Arbeitsmarktes zu erzielen.
(Rickne 2000 in Edquist 2001, nach Feinson 2003)

Insbesondere auf der nationalen Ebene ist jedes Innovationssystem unterschiedlich, genau wie sich auch jede Gesellschaft von einer anderen Gesellschaft unterscheidet (Kuhlmann et al. 2001, Seite 1). Eine angemessen nachhaltige, verantwortungsvolle Steuerung eines solchen NIS beruht auf der wechselseitig aufeinander angepassten Entwicklung und stabilen Wechselbeziehungen zwischen den drei Säulen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, die nur so ihre oft über längere Zeit hinweg entwickelten speziellen Profile und Stärken zusammen erfolgreich ausspielen können. Die drei Säulen stehen im Mittelpunkt der Darstellung eines NIS (Abbildung 9), umgeben von der Nachfrage als wichtigem Wachstumstreiber, Rahmenbedingungen, welche insbesondere durch die Politik beeinflusst werden sowie von der Infrastruktur, welche durch alle Beteiligten ausgestaltet und genutzt wird.

[10] Bezüglich dem Zitat (Johnson et al. 2000) in (Feinson 2003, Seite 22) ist davon auszugehen, dass (Bergek et al. 2003, Seite 199) gemeint ist. Zu diesem Zeitpunkt hatten Anna Johnson (Nachname bereits geändert in Anna Bergek) und Staffan Jacobsson allerdings schon damit begonnen, über Innovationssysteme mit einem technologischen Hintergrund bzw. technologische Innovationssysteme und ihre Funktionalität zu schreiben, ohne sie explizit als Technologische Innovationssysteme (TIS) zu benennen. Dies veranschaulicht, wie schwierig es sein kann, eindeutig zwischen verschiedenen Entwicklungen in der Innovationssystemforschung als Ganzes und bezüglich einzelner Ansätze der Innovationssystem-Analyse zu unterscheiden.

Abbildung 9: Modell eines Nationalen Innovationssystems.



Quelle: Kuhlmann et al. 2001, Seite 2.

2.2.2 Regionale Innovationssysteme

Als der Schwede Bengt-Åke Lundvall und der US-Amerikaner Richard R. Nelson ihre bahnbrechenden Buchtitel „National Systems of Innovation – Toward a Theory of Innovation and Interactive Learning“ (Lundvall 1992) bzw. „National Innovation Systems: A Comparative Analysis“ (Nelson 1993) editierten und zu den Buchinhalten beitrugen, veröffentlichte der Engländer Philip Cooke ein Paper mit dem Titel „Regional Innovation Systems: Competitive Regulation in the New Europe“ (Cooke 1992).

Cookes Paper resultierte aus früheren Forschungsarbeiten über regionale Innovation, z. B. in Baden-Württemberg/Deutschland und Emilia-Romagna/Italien für verschiedene ‚Regional Industrial Research Reports‘, welche durch den Economic and Social Research Council (ESRC) bewilligt wurden (ESRC 2016). Der reine Begriff eines Innovationssystems (engl. „innovation system“ oder „system of innovation“) erscheint nur drei Mal in diesem Paper, was verdeutlicht, dass die hauptsächliche Intention eher darin lag, das Konzept von Regulierung in ihrer wechselnden Rolle als eine Form von proaktiver Unterstützung für die Industrie in einem modernen Europa zu ergründen: Die bevorzugte räumliche Ebene für regulatorische Eingriffe ist die der Region anstatt des Nationalstaates (Cooke 1992, Seite 366). Aber die Idee der „Region“ als einer subnationalen Sphäre für Innovation, welche abhängig vom jeweils differenzierten Modell von regionalem Technologietransfer durch eine spezifische regionale Technologiepolitik gefördert wird, traf voll ins Schwarze und erweiterte die aktuelle Debatte um nationale Innovationssysteme um einen wichtigen Aspekt: Systemische Innovation ist genauso ausfindig zu machen auf regionaler und sogar lokaler Ebene wie auf nationaler und globaler Ebene (Cooke et al. 1997, Seite 476).

Cooke setzte seine Arbeit an diesem Thema fort, editierte und trug einige Jahre später zum ersten bahnbrechenden Buchtitel über „Regional Innovation Systems – The role of governances in a globalized world“ (Braczyk et al. 1998) bei. Das Buch resultierte aus einer Zusammenarbeit zwischen dem Centre for Advanced Studies in the Social Sciences (CASS) der University of Wales in Cardiff/Wales und der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg/Deutschland (engl. „Centre for Technology Assessment“, Abkürzung CTA), die im Jahr 1995 begann. Auch andere Innovationsforscher hatten schon die Notwendigkeit einer neuen räumlichen Grenze von Innovationssystemen begründet, von regionalen oder lokalen „technologischen Systemen“ (engl. „technological systems“) (Carlsson et al. 1991, Seite 111).

Mehr und mehr Veröffentlichungen fokussierten auf ein echtes Verständnis der technologischen Entwicklungen und deren Verbreitung in Wirtschaft und Gesellschaft und bezogen die Begrifflichkeit von lokalen, regionalen, sektoralen oder nationalen „Innovationssystemen“ mit ein, die weithin verwendet wurde, um die Wechselwirkungen zwischen den Agenten, die Technologien erzeugen und nutzen, aufzuzeichnen und zu erklären. Regionale Innovationssysteme (RIS) sollten dabei wie eine Art zusätzliche Ebene oder ein konzeptionelles Objektiv zu einem „Systemansatz“ bereitstellen (Howells et al. 1999, Seite 67). Aspekte wie die örtliche Nähe zwischen Unternehmen (Maskell et al. 1999, Seite 167) erhielten zunehmend mehr Aufmerksamkeit und wurden auf regionale Beispiele weltweit angewendet – wie drei regionale Cluster in Norwegen, die von Schiffsbau-, Maschinenbau- und Elektronikindustrie dominiert werden und sowohl ortsspezifische lokale Ressourcen als auch externes, erstklassiges Wissen nutzen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken (Asheim et al. 2002, Seite 77). Daraus wurden einige Erkenntnisse abgeleitet und das Konzept von RIS verfestigt und erweitert, Fragen in Bezug auf die grundlegenden theoretischen Perspektiven, seinen Platz unter anderen Formen der industriellen Organisation, verschiedene Formen von RIS und mögliche Fehler des Konzepts wurden studiert (Doloreux 2002, Seite 243).

Hinsichtlich der räumlichen Grenzen von RIS ergeben sich konzeptionelle Schwierigkeiten: Die Vielfalt der Analyseeinheiten, die in Studien von RIS verwendet werden, stellt ein großes Problem dar, einen einheitlichen konzeptionellen Rahmen für das Konstrukt der Region als theoretisches Untersuchungsobjekt zu entwickeln (Doloreux et al. 2005, Seite 142). Dies führt zu erneuter Verwirrung nicht nur gegenüber der Anwendung und Bewertung eines Innovationssystems auf regionaler Ebene (wie auch immer definiert), sondern auch seiner räumlichen Grenzen. Diese Verwirrung mag auch von der Beobachtung kommen, dass Innovationssysteme eine Vielzahl von Ideen und theoretischen Perspektiven umfassen, z. B. eine historische Perspektive, eine institutionelle Perspektive, eine evolutionäre Perspektive und eine soziale Perspektive (Doloreux 2002, Seite 251).

Empirisch finden diese Ausführungen Bestätigung, zumindest wenn die fünf hinsichtlich RIS meistzitierten Studien berücksichtigt werden: Mehrere RIS/großstädtische Statistikgebiete innerhalb der USA werden beobachtet (Acs et al. 2002), mehrere RIS in verschiedenen Regionen/Bundesstaaten innerhalb Norwegens und Schweden (Asheim et al. 2005), Regionen in Japan, Deutschland und Frankreich, Großbritannien und Wales (Cooke 1992), NUTS 1 (“große sozioökonomische“) and NUTS 2 (“grundlegende”) Regionen innerhalb der EU-25

(Rodríguez-Pose et al. 2008)[11] und mehrere RIS/Bundesstaaten innerhalb Deutschlands (Fritsch et al. 2004). Insgesamt diskutieren die meisten Fallstudien also regionale oder nationale Innovationssysteme, Letzteres, wenn ein RIS-Vergleich mit mehr als einer Region innerhalb einer Nation oder supranational im Fall eines RIS-Vergleichs mit mehr als einer Region in mehr als einer Nation durchgeführt wird.

Konzeptionell ergibt sich eine immense Vielfalt hinsichtlich der Analyseeinheit von RIS und umfasst Städte, Metropolregionen, Viertel bzw. Kreise innerhalb von Städten oder Metropolregionen, Regionen, die entsprechend der NUTS-Klassifikation definiert wurden und Gebiete auf der supraregionalen/supranationalen Skala. Und dennoch bietet die Literatur über RIS Beschreibungen und Analysen der Beziehungen zwischen Innovation, Lernen und der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit einzelner Regionen (Doloreux et al. 2005, Seite 134).

Empirisch gesehen analysieren die fünf meistzitierten Fallstudien die regionalen Innovationsaktivitäten in 125 großstädtischen Statistikgebieten (engl. „metropolitan statistical areas“, Abkürzung MSA) in den USA (Acs et al. 2002), sie diskutieren verschiedene Typen von RIS mit fünf empirischen Illustrationen: Möbelindustrie in Salling/Dänemark, drahtlose Kommunikationsindustrie in Nordjütland/Dänemark, funktionelle Lebensmittelindustrie in Scania/Schweden, Lebensmittelindustrie in Rogaland/Norwegen, Elektronikindustrie in Horten/Norwegen (Asheim et al. 2005), die Rolle von Regulierung für regionale Innovation mit Material aus Japan, Deutschland und Frankreich, innerhalb Großbritanniens und insbesondere in Bezug auf Wales (Cooke 1992), den Einfluss von Innovation auf die regionale Wirtschaftsleistung in Europa mit mehreren Regressionsanalysen für alle Regionen der EU-25 (Rodríguez-Pose et al. 2008) und den Einfluss von Wissensübertragung und Forschungs- und Entwicklungskooperationen auf die Innovationsaktivitäten in den drei deutschen Regionen Baden, Hannover-Braunschweig-Göttingen in Niedersachsen und Sachsen (Fritsch et al. 2004).

Eine erste Liste von Schlüsselelementen einer erfolgreich regulierten, vernetzten Region beinhaltet eine dicke Schicht öffentlicher und privater Institutionen zur Industrieförderung, eine hochgradige Intelligenz auf dem Arbeitsmarkt und damit verbundene Berufsausbildung, eine rasche Verbreitung des Technologietransfers, ein hohes Maß an Vernetzung zwischen den Unternehmen und vor allem aufnahmebereite, innovationsfreundliche Unternehmen (Cooke 1992, Seite 381). Alle diese Faktoren wurden mit zahlreichen empirischen Fallstudien in den letzten Jahren bestätigt. Eine mehr grundlegende Liste an Komponenten von RIS enthält Unternehmen als wirtschaftliche Agenten, Institutionen wie z. B. die industrielle FuE, Universitäten und Regierungen, Wissensinfrastrukturen im Sinne der physischen und organisatorischen Infrastruktur sowie innovative Politikmaßnahmen zur Verbesserung der Wechselwirkungen zwischen Unternehmen, Institutionen und Wissensinfrastrukturen (Doloreux 2002, Seite

[11] Die engl. „nomenclature of territorial units for statistics“ (NUTS) ist ein Geocode-Standard zur Referenzierung von Untereinheiten von Ländern für statistische Zwecke. Der Standard wurde entwickelt und wird reguliert von der Europäischen Union (EU) und deckt deshalb nur die Mitgliedsstaaten der EU detailliert ab (Wikipedia 2017). Die aktuelle NUTS 2013-Klassifizierung gilt seit dem 1. Januar 2015 und listet 98 Regionen auf NUTS 1-, 276 Regionen auf NUTS 2- und 1342 Regionen auf NUTS 3-Level auf (eurostat 2017).

247f.). Aus der funktionellen Analyse folgt, dass die hauptsächlichen Mechanismen das interaktive Lernen, die Wissensproduktion, Nähe und soziale Einbindung sind (Doloreux 2002, Seite 249ff.). Eine allgemeingültige Definition von RIS ist aufgrund der genannten Vielfalt einzelner Aspekte schwierig, RIS können aber wie folgt sehr eindrücklich beschrieben werden:

> „The concept of regional innovation systems has no generally accepted definitions, although it is typically understood to be a set of interacting private and public interests, formal institutions, and other organizations that function according to organizational and institutional arrangements and relationships conducive to the generation, use, and dissemination of knowledge.“ (Doloreux et al. 2005, Seite 134f.)

Sowohl NIS als auch RIS werden nach wie vor weiterentwickelt. Aktuell werden z. B. sechs Forschungsstränge verfolgt, welche die klassischen Ansätze NIS und RIS herausfordern, indem sie auf eine breitere Palette von Akteuren, Institutionen und Innovationsformen hinweisen, die für die Innovationslandschaft relevant sind (Warnke et al. 2016, Seite 1). Dadurch wird auf relevante Beiträge für nationale oder regionale Innovationskapazitäten hingewiesen, die noch nicht durch die aktuelle Innovationssystemforschung in Bezug auf NIS und RIS erfasst werden.

2.2.3 Sektorale Innovationssysteme

Der Ansatz von Sektoralen Innovationssystemen (SIS) unterscheidet sich von NIS und RIS dadurch, dass die Abgrenzung nicht durch geografische Grenzen erfolgt, sondern einzelne Industriesektoren bzw. ihre Innovationssysteme analysiert werden. SIS können ausschließlich einen Teil eines NIS oder eines RIS abdecken, oder aber länderübergreifend international sein, wie der Schwede Charles Edquist in seiner Einführung „1. Systems of Innovation Approaches – Their Emergence and Characteristics“ des Buchtitels „Systems of Innovation – Technologies, Institutions and Organizations“ schrieb (Edquist 1997, Seite 11). Die Italiener Stefano Breschi und Franco Malerba entwickeln in ihrem Kapitel „6. Sectoral Innovation Systems: Technological Regimes, Schumpeterian Dynamics, and Spatial Boundaries“ zum ersten Mal ihre Theorie und definierten ein SIS wie folgt:

> „More accurately, a Sectoral Innovation System (SIS) can be defined as that system (group) of firms active in developing and making a sector’s products and in generating and utilizing a sector’s technologies; such a system of firms is related in two different ways: through processes of interaction and cooperation in artefact-technology development and through processes of competition and selection in innovative and market activities.“ (Breschi et al. 1997, Seite 131)

Die Autoren grenzen das SIS ganz deutlich zum TIS ab, das sie Technologisches System (engl. „technological systems“, Abkürzung TS) nennen. Während das Konzept eines TS Netzwerke von vertikal wie horizontal verbundenen wirtschaftlichen Agenten und Organisationen betrachtet, die an der Entwicklung spezifischer Technologien arbeiten, konzentriert sich das Konzept von SIS explizit auf Wettbewerbsbeziehungen zwischen Unternehmen in relativ homogenen Sektoren, die unter dem Einfluss frei beweglicher und dynamischer Selektionsprozesse auf Produkte und die Unternehmen selbst stehen (Breschi et al. 1997, Seite 131).

Die weitere Entwicklung des Ansatzes von SIS ist eng mit den beiden genannten Innovationsforschern verbunden: Zusammen mit dem Italiener Luigi Orsenigo veröffentlichten sie das Paper „Technological Regimes and Schumpeterian Patterns of Innovation“, in dem sie erläuterten, dass das spezifische Muster von Innovationsaktivitäten in einem Industriesektor mit dem Ergebnis verschiedener Lernmuster erklärt werden kann (Breschi et al. 2000, Seite 390). Franco Malerba allein schrieb in den folgenden Jahren noch Veröffentlichungen, mit denen er den SIS-Ansatz vertiefte und als einen Teil der vier verschiedenen Typen von Innovationssystemen mit unterschiedlichen Bezugsebenen etablierte: Im Paper „Sectoral systems of innovation and production“ untersuchte er produktionsbasierte SIS, entwickelt in einem Projekt namens „European Sectoral Systems of Innovation (ESSY) – Innovation, Competitiveness and Growth)“ im Rahmen eines Forschungsprogramms mit dem Namen „European Union Targeted Socio-economic Research (EU-TSER)“ (Malerba 2002, Seite 247).

Im Buchtitel „Sectoral Systems of Innovation: Concepts, issues and analyses of six major sectors in Europe“ untermauert Franco Malerba den SIS-Ansatz empirisch. Mit Beiträgen von neunzehn weiteren Experten entwirft dieses Buch die Grundstruktur eines sektoralen Innovationssystems zur Analyse des Innovationsprozesses, der Faktoren, die Innovation beeinflussen, das Verhältnis zwischen Innovationen und Industriedynamik, die sich wandelnden Grenzen und die Transformation von Sektoren sowie die Determinanten der Innovationskapazität von Unternehmen und Ländern in verschiedenen Sektoren (Malerba 2004, Abstract/keine Seitenangabe verfügbar). Der Gründungsgedanke, sich mit dem Ansatz von SIS auseinanderzusetzen, wird hier deutlich auf den Punkt gebracht: Innovation und technologischer Wandel entwickeln sich unterschiedlich, abhängig von dem Sektor, in welchem sie auftreten. Und dadurch weisen sie auch unterschiedliche Eigenschaften auf, geprägt durch das Wissen, die Akteure und Institutionen in einem spezifischen Sektor. In Fallstudien wird der Innovationsprozess in sechs maßgeblichen Sektoren in Europa untersucht wie folgt: Pharmaka und Biotechnologie, Telekommunikationsausrüstung und Dienstleistungen, Chemikalien, Software, Werkzeugmaschinen und Dienstleistungen in Flughäfen, in der Medizin und im Einzelhandel (Malerba 2004, Seite 1).

Im Paper „Sectoral systems of innovation: a framework for linking innovation to the knowledge base, structure and dynamics of sectors“ summierte Franco Malerba schließlich alle gesammelten Erkenntnisse: Im ersten Teil werden das Konzept und die Definition von SIS vorgestellt. Im zweiten Teil wird die Rolle von Wissen, Akteuren und Netzwerken sowie Institutionen in fünf wichtigen SIS untersucht. Dann verschiebt sich der Fokus auf die Analyse der Dynamik und Transformation von SIS, bevor einige allgemeine Schlussfolgerungen und Hinweise für die zukünftige Forschung das Paper beenden (Malerba 2005-1, Seite 63).

Konzeptionell gesehen sind nationale Grenzen bei der Abgrenzung von SIS nicht notwendigerweise am besten für ihre Untersuchung, manchmal sind eher regionale oder sogar lokale Grenzen angebrachter (Malerba 2004, Seite 33). Empirisch lässt sich hinsichtlich der fünf meistzitierten Studien feststellen, dass außer einer ersten Ausnahme mit einer globalen bzw. länderübergreifenden Analyse des SIS für Nanotechnologie hauptsächlich in Asien bzw. Japan, der EU und den USA (Miyazaki et al. 2007) vor allem SIS in spezifischen Ländern im

Vordergrund stehen, die französische Automobilindustrie z. B. (Oltra et al. 2009), der Sektor Biotechnologie in Deutschland, Cambridge/Massachusetts in den USA und Cambridge in Großbritannien (Cooke 2002), der Wohnungsbausektor in den Niederlanden (Beerepoot et al. 2007) und die elektronische Spieleindustrie in Großbritannien (Sapsed et al. 2007). Insgesamt diskutieren die meisten Fallstudien also regionale oder am häufigsten nationale Innovationssysteme, manchmal auch supranationale Innovationssysteme und Letzteres vor allem dann, wenn ein transnationaler Sektor analysiert wird.

Hinsichtlich der Analyseeinheit für SIS ergibt sich konzeptionell ebenfalls eine große Vielfalt, Flexibilität muss bei der Auswahl vorhanden sein (Malerba 2005-1, Seite 68). Angemessene Analyseeinheiten sind nicht notwendigerweise Unternehmen, es können auch Individuen sein, Unterabteilungen von Unternehmen, z. B. für FuE, oder Gruppen von Unternehmen, z. B. Industriekonsortien (Malerba 2004, Seite 25). Empirisch beobachtet kann diese genannte Vielfalt ebenfalls werden, Nanotechnologie-Akteure wie Autoren und Unternehmen oder ganze Länder (Miyazaki et al. 2007), Unternehmen der französischen Automobilindustrie (Oltra et al. 2009), Biotechnologie-Cluster (Cooke 2002), Energieeffizienz-Technologien (Beerepoot et al. 2007) und einzelne (Start-up-)Unternehmen (Sapsed et al. 2007).

Malerba definiert einen Sektor als eine Reihe von Aktivitäten rund um verwandte Produktgruppen für eine gegebene oder ansteigende Nachfrage, die ein gewisses Maß an grundlegendem Wissen teilen (Malerba, 2004, pp. 9-10). Zu den maßgeblichen Komponenten gehören das genannte grundlegende Wissen und Technologie, Akteure und Netzwerke sowie Rahmenbedingungen (Malerba 2004, Seite 10). Die Nachfrage wird nicht als eigentliche „Komponente“ aufgeführt, ist aber essentiell für die Entwicklung eines SIS.

Wissen und Technologie

Eine weitere grundlegende Komponente von SIS wird durch Wissen und Technologie dargestellt, wobei im Unterschied zu einem TIS natürlich mehr als eine Technologie relevant sein kann (Malerba 2004, Seite 18ff.). Die Systemgrenze wird hauptsächlich durch Verbindungen und statische (z. B. Input-Output-Verbindungen) oder dynamische (z. B. Wechselbeziehungen) Komplementaritäten zwischen den Technologien definiert. Vor allem Letztere sind verantwortlich für die Transformation und das Wachstum eines Systems. Sie setzen positive Innovations- und Wandlungszyklen in Gang und stehen im Zusammenhang mit dem Konzept von Dahmén (1988) von so genannten Entwicklungsblöcken (engl. „development blocs“). Die Literatur der Evolutionsökonomie beruht auf dem Gedanken, dass Wissen die Grundlage für den technologischen Wandel bildet und der Schlüssel zur Innovation ist. Wissen muss deshalb zugänglich sein, aus Wissen müssen Möglichkeiten resultieren und Wissen muss verwaltet werden, so dass auf älterem Wissen aufgebaut werden kann, um neues Wissen zu erschaffen. Durch diese drei Schlüsseldimensionen der Zugänglichkeit, Möglichkeiten und Anhäufung wird Wissen definiert. Es wird dabei direkt mit technologischen und lernenden vorherrschenden Maßstäben in Verbindung gebracht. Unternehmen mit einem hohen Maß an Wissensanhäufung werden voraussichtlich eine hohe Beharrlichkeit bei innovativen Aktivitäten haben (Malerba 2004, Seite 22). Auf sektoraler Ebene wird die Organisation innovativer Aktivitäten direkt auf die Unterscheidung zwischen den sogenannten Modellen „Schumpeter Mark 1“ und

„Schumpeter Mark 2“ zurückgeführt: Hohe technologische Möglichkeiten gepaart mit niedriger Zugänglichkeit und geringer Anhäufung resultieren in dem Muster von „Mark 1“ und damit kreativer Zerstörung (engl. „creative distruction“). Hohe Zugänglichkeit und große Anhäufung von Wissen wiederum repräsentieren das Muster von „Mark 2“ und damit die kreative Anreicherung (engl. „creative accumulation“). Sowohl technologische vorherrschende Maßstäbe als auch Schumpeterianische Muster ändern sich aber im Laufe der Zeit, ein „Schumpeter Mark 1“-Muster kann zu einem „Schumpeter Mark 2“-Muster werden.

Akteure und Netzwerke

Beispiele für die heterogenen Akteure in einem Sektor sind Verbraucher, Unternehmer, Wissenschaftler und andere, also Organisationen wie Individuen. Während Unternehmen als Schlüsselakteure in einem SIS gehandelt werden, können auch nicht-unternehmerische Organisationen wie Universitäten, Finanzinstitute, Regierungsbehörden, Gewerkschaften oder technische Verbände eine Rolle spielen (Malerba 2004, Seite 24ff.). Unternehmen betreiben Innovation, Produktion und Vertrieb von Sektor-spezifischen Produkten. Unternehmen sind an der Erzeugung, der Akzeptanz bzw. Übernahme sowie Nutzung neuer Technologien beteiligt. Die oben genannten nicht-unternehmerischen Organisationen unterstützen die Unternehmen und ihre Aktivitäten zur Generierung und Verbreitung von Innovationen. Die Beziehungen zwischen all diesen genannten Akteuren können auf Markt-Basis oder unabhängig davon entweder in formaler Kooperation oder informeller Interaktion erfolgen. Während manche Sektoren Nutzer-getrieben sind, sind andere Sektoren Lieferanten-getrieben. Netzwerke erlauben den Zugang zu und die Integration von komplementärem Wissen, von komplementären Kapazitäten und komplementärer Spezialisierung. Die Typen und Strukturen von Beziehungen und Netzwerken unterscheiden sich von einem SIS zu einem anderen SIS als Konsequenz unterschiedlicher Merkmale in der Wissensbasis, des relevanten Lernprozesses, der grundlegenden Technologien, der Nachfrage, der Schlüsselbeziehungen im SIS sowie der dynamischen Entwicklung der oben genannten Komplementaritäten.

Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen (engl. „institutions“) eines SIS werden durch die Wahrnehmung, Aktionen und Interaktionen aller teilnehmenden Akteure geprägt (Malerba 2004, Seite 27f.). Sie können unterschiedliche Merkmale haben, z. B. wie bindend sie sind, ob sie (in-)formal, national und sektoral sind. Damit umfassen sie u. a. Normen, Routinen, Gesetze und Standards. Rahmenbedingungen haben unterschiedliche Auswirkungen auf den Innovationsprozess in einem bestimmten Sektor. Je nach Patent-, Eigentums- oder Kartellrecht hat der Innovationsprozess in einem Sektor einen anderen Mechanismus. Gleichzeitig unterscheiden sich Rahmenbedingungen von Land zu Land und beeinflussen somit die Innovation unterschiedlich. Daher ist ein SIS wie auch ein TIS für jedes Land einzeln zu untersuchen. Darüber hinaus unterstützen die nationalen Einrichtungen solche Sektoren, die den Besonderheiten des Landes am besten entsprechen. Ein Sektor kann auf nationaler Ebene in Bezug auf Beschäftigung, Wettbewerbsfähigkeit oder strategischer Bedeutung so groß werden, dass sektorale und nationale Rahmenbedingungen zusammengeführt werden.

Nachfrage

Die Nachfrage setzt sich zusammen aus einzelnen Verbrauchern, Firmen und öffentlichen Einrichtungen, die jeweils durch Wissen, Lernprozesse, Kompetenzen und Ziele gekennzeichnet und von sozialen Faktoren und Rahmenbedingungen betroffen sind (Malerba, 2005, S. 67). Deshalb wird in einem SIS die Nachfrage nicht als Gesamtsumme der Nachfragen gleicher Käufer angesehen, sondern als Zusammensetzung der Nachfrage absolut heterogener Akteure, deren Interaktion mit den produzierenden Unternehmen auch durch die Rahmenbedingungen beeinflusst wird (Malerba 2004, Seite 28). Die Nachfrage und vor allem ihre Entstehung und Entwicklung spielt eine wichtige Rolle in der Dynamik und Evolution eines SIS.

Aus der funktionellen Analyse folgt, dass mit der Erschaffung von Vielfalt und der Auswahl (Moallemi et al. 2014, Seite 309)[12] zwei Prozesse die industrielle Dynamik beeinflussen und für viele Unterschiede über die SIS hinweg zuständig sind. Die Erschaffung von Vielfalt (engl. „variety creation“) bezieht sich dabei auf Produkte und Technologien, Unternehmen und Forschungseinrichtungen und ihre Strategien und ihr Verhalten. Insbesondere im Sektor neu teilnehmende Agenten sind wichtig für die Dynamik im SIS, weil sie neue Varianten in Bezug auf Ansätze, Spezialisierung und Wissen in Form von Innovationen und Produktionsprozessen einbringen. Der Auswahlprozess beschreibt die Reduktion von heterogener Vielfalt in diesem Sektor und ist für Unternehmen, Produkte und Technologien relevant.

2.3 Einführung III: Technologische Innovationssysteme

Bevor die theoretischen Grundlagen zu Technologischen Innovationssystemen (TIS) erörtert werden (siehe Kapitel 2.3.1), sind einige Ausführungen zur Abgrenzung zwischen NIS, RIS, SIS und TIS fällig. Die Grenzen eines TIS mögen mit den Grenzen eines Nationalstaates übereinstimmen, müssen aber nicht (Carlsson et al. 1991, Seite 93). Gleichzeitig können sie sich von einer Industriebranche zur nächsten schon deutlich verändern. Gegenüber den räumlich relativ einfach abzugrenzenden NIS und RIS können TIS ähnlich wie SIS nur einen Teil eines NIS oder eines RIS abdecken, oder aber länderübergreifend international sein (Edquist 1997, Seite 11f.): Wo die Grenzen gezogen werden, hängt einzig und allein von der jeweiligen Fallstudie ab, die erstellt werden soll. Eine Rolle spielen dabei z. B. die technologischen und Marktanforderungen, die Leistungsfähigkeiten von verschiedenen am TIS beteiligten Agenten, der Grad der wechselseitigen Abhängigkeit zwischen den Agenten, etc. (Carlsson et al. 1991, Seite 111). In anderen Worten: In der räumlichen Abgrenzung kann ein TIS einem NIS oder RIS sehr ähnlich sein. Prinzipiell allerdings gibt es drei wesentliche Unterschiede zwischen NIS bzw. RIS und TIS: TIS werden erstens in spezifischen Technologiefeldern diskutiert, während NIS und RIS das gesamte Innovationssystem eines Landes oder einer Region über alle technologischen Bereiche hinweg analysieren. Zweitens stimmen die Grenzen eines TIS nicht notwendigerweise mit den nationalen oder regionalen Grenzen überein und sind auch von Technologiefeld zu Technologiefeld anders. Drittens verlagert sich der Fokus in TIS anders

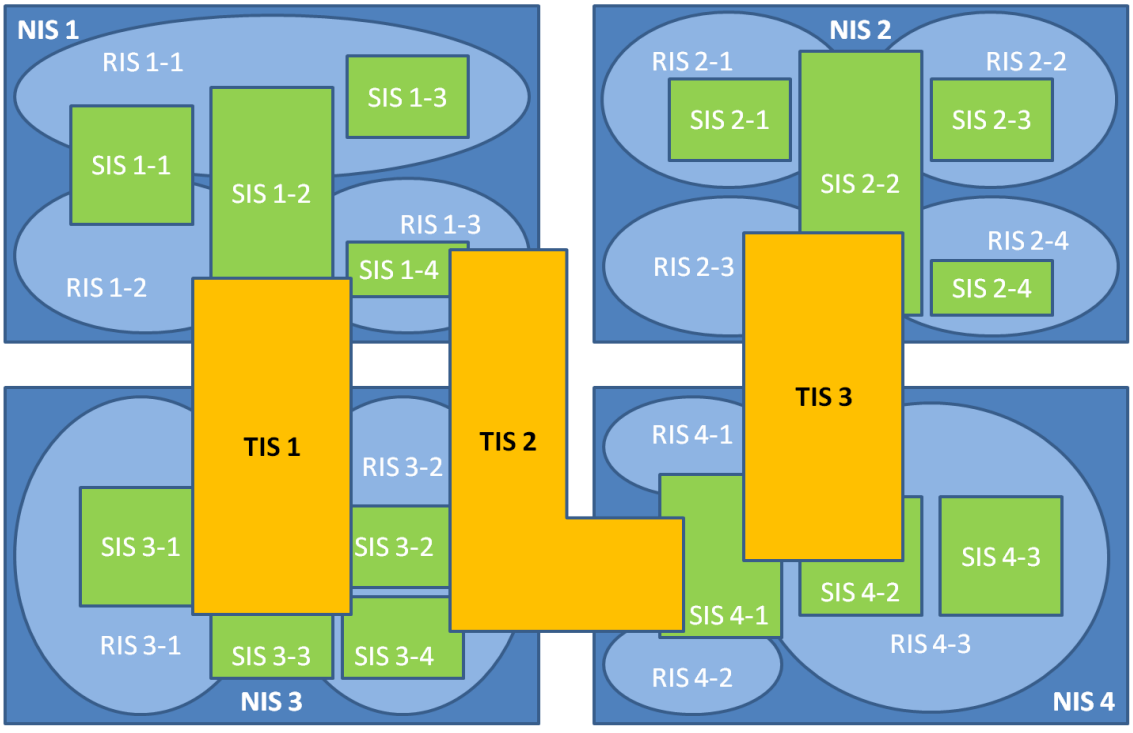
[12] Auf diese beiden evolutionären Schlüsselprozesse innerhalb SIS beziehen sich auch Metcalfe (1998), Malerba (2004) und Nelson (1995).

als in NIS bzw. RIS von der Erschaffung und Verteilung von Wissen eher hin zur Adoption und Verwendung von Technologie.

Gegenüber einem SIS fällt die Abgrenzung etwas schwerer, gelingt aber ebenfalls: In der räumlichen Abgrenzung verhalten sich SIS und TIS sehr ähnlich, genau wie auch in der Hinsicht, dass beide rund um spezifische Technologien entstehen bzw. aufgebaut sind. TIS können, müssen aber nicht nur auf einen Industriesektor beschränkt sein, insbesondere dann nicht, wenn eine Technologie sektorenübergreifend angewendet bzw. in einer entsprechenden Vielfalt von Produkten vermarket wird. Darin liegt der Hauptunterschied zwischen SIS und TIS.

Eine Visualisierung von NIS, RIS, SIS und TIS zeigt die eben vorgenommene Abgrenzung: Gerade in unserer modernen Welt sind TIS üblicherweise länderübergreifend vorzufinden oder sogar gänzlich global aufzufassen und damit nicht in die geographischen Grenzen eines einzelnen Nationalstaates (oder einer einzelnen Region) einzuordnen (Abbildung 10). TIS können ein Teilsystem eines einzigen SIS sein, wenn ihr Schwerpunkt auf einem Erzeugnis dieses Sektors oder in einem Wissensgebiet liegt, das exklusiv für den Sektor ist, oder mehrere Sektoren berühren oder auch ganz umfassen, wenn der Fokus mehr auf "generischem" Wissen liegt, das mehrere Sektoren nutzen. Weil die TIS zugrunde liegenden Technologien zunehmend komplex aufgebaut sind, ist Letzteres zur Normalität geworden.

Abbildung 10: Visuelle Abgrenzung der verschiedenen Typen von Innovationssystemen.



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Hekkert et al. 2007, Seite 417.

Die Frage nach der Komplexität von TIS ist allerdings schwer pauschal zu beantworten: Auf der einen Seite setzen sie sich über (im Allgemeinen vereinfachende) nationale, regionale und sektorale Grenzen hinweg, auf der anderen Seite wird ihre Dynamik hinsichtlich technologischem Fortschritt, Preisgestaltung und Verbreitung nach wie vor durch die verschiedenen

NIS, RIS und SIS beeinflusst, welche in das zu untersuchende TIS eingebunden sind. Während NIS aufgrund der großen Anzahl von zu berücksichtigenden Akteuren, Netzwerkbeziehungen und Institutionen als sehr komplex gelten und ihre Dynamik schwierig abzubilden ist, ist die Anzahl an Akteuren, Netzwerken und relevanten Institutionen in TIS im Allgemeinen deutlich geringer. Dies reduziert die Komplexität und erlaubt eine Analyse der Dynamik anhand der sogenannten „Funktionen“ in einem zu definierenden TIS.

2.3.1 Theoretische Grundlagen von TIS

TIS wurden im Paper „On the nature, function and composition of technological systems“ vom Schweden Bo Carlsson und dem Tschechen Rikard Stankiewicz eingeführt (Carlsson et al. 1991), die damit erklären wollten, wie das wirtschaftliche Wachstum von Ländern auf ihrem Entwicklungspotenzial als Funktion der verschiedenen TIS ist, an welchen verschiedene Agenten der Volkswirtschaft teilnehmen. Das Paper wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts mit dem Titel „Sweden’s Technological system and Future Development Potential“ entwickelt, finanziert durch den Schwedischen Nationalrat für Technologische Entwicklung (engl. „Swedish National Board for Technical Development“, Abkürzung STU) und den Schwedischen Ausschuss der Forschungsräte (engl. „Swedish Board of Research Councils“, Abkürzung FRN). Eine grundlegende Definition von TIS wie folgt hebt die Bedeutung von Technologien, ihrer Erfindung, Verbreitung und Nutzung hervor:

> „A technological system is defined as a dynamic network of agents interacting in a specific economic/industrial area under a particular institutional infrastructure and involved in the generation, diffusion, and utilization of technology.“ (Carlsson et al. 1991, Seite 93)

Insbesondere Bo Carlsson blieb dem neuen Ansatz der Innovationssystemforschung auch in den Folgejahren treu und veröffentlichte mehrere wissenschaftliche Papers. Um die Jahrtausendwende geriet dann eine starke Dynamik in die Erforschung des Ansatzes von TIS: Mit dem Aufkommen der Erneuerbaren Energien in zahlreichen Ländern Europas und der zunehmenden Verbreitung Erneuerbarer Energietechnologien rückte der Ansatz von TIS in den Fokus. Die beiden Schweden Staffan Jacobsson und Anna Johnson blickten in ihrem Paper „The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research“ aus der TIS-Perspektive auf die Verbreitung der genannten Erneuerbaren Energietechnologien (Jacobsson et al. 2000), um Schlüsselaspekte zu identifizieren, welche in Bezug zur Geschwindigkeit und Richtung des Transformationsprozesses hin zum weit verbreiteten Einsatz von Erneuerbaren Energien stehen.

Neben der zunehmenden „Technologisierung“ der Innovationssystem-Analysen wurden zunehmend auch die Funktionen von TIS analysiert: Die Schwedin Annika Rickne schrieb in ihrem Paper „Assessing the functionality of an innovation system“, dass ein Innovationssystem in Bezug auf eine bestimmte Art von Unternehmen als leistungsfähig gilt, wenn es eine Reihe von Funktionen bieten kann, die diesen erfolgreich zu gedeihen helfen (Rickne 2000). Die empirische Analyse basierte zwar einerseits auf RIS, andererseits wiederum standen junge Technologie-basierte Unternehmen mit Sitz in Schweden, Ohio und Massachusetts in den USA im Vordergrund, die biokompatible Materialien und Produkte entwickelten.

Auch Anna Johnson widmete sich zunehmend diesem Thema und schrieb im Jahr 2001 das Paper „Functions in Innovation System Approaches“, in welchem sie quasi einen Blick auf die bis dahin entwickelten Typen von Innovationssystemen werfen wollte, um zu ermitteln, ob und welche Funktionen innerhalb eines Innovationssystems eine Rolle spielen und ob sie ggf. über alle Innovationssystem-Typen hinweg gleich sind (Johnson 2001). Sie identifizierte übergreifend grundlegende Funktionen, welche es erlauben, Systemgrenzen zu setzen und den aktuellen Zustand eines Innovationssystems zu analysieren bzw. die Dynamik innerhalb des Innovationssystems abzubilden. Und dabei schienen die bereits vorhandenen Typen von Innovationssystemen eine gewisse Anzahl an grundlegenden Funktionen zu teilen, denen in Innovationssystemen gedient wird oder gedient werden sollte (Johnson 2001). Damit sollte es möglich werden, die Systemleistung zu bewerten und verschiedene Innovationssysteme miteinander zu vergleichen.

Im Jahr 2008 veröffentlichte die dann verheiratete Anna Bergek (vormals Anna Johnson) zusammen mit ihren schwedischen Kollegen Staffan Jacobsson, Bo Carlsson, Sven Lindmark und Annika Rickne ein Paper mit dem Titel „Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis“, in welchem die vorige Arbeit zum funktionellen Ansatz in ein Rahmenwerk zur Innovationssystem-Analyse operationalisiert wurde, um von Politikern nicht nur zur Identifikation von Schlüsselfragen für die Politik, sondern auch zur Aufstellung von politischen Zielen genutzt zu werden (Bergek et al. 2008-1).

Neben dieser schwedischen Gruppe arbeitete auch eine Gruppe in den Niederlanden an Fallstudien zu Funktionen von TIS mit Schwerpunkt auf Erneuerbaren Energietechnologien, die in die Veröffentlichung des Papers „Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change“ mündeten (Hekkert et al. 2007). Ausgehend vom Gedanken, dass die traditionellen Methoden zur Analyse von Innovationssystemen, die sich hauptsächlich mit ihrer Struktur beschäftigten, als ungenügend herausstellten, wurde hier ein Rahmenwerk vorgeschlagen, das auf die Anzahl von Prozessen bzw. Funktionen fokussierte, die äußerst wichtig für Innovationssysteme mit guter Leistung sind.

Seither sind viele weitere Fallstudien erschienen, welche sich mit TIS rund um Erneuerbare Energietechnologien beschäftigen (siehe Kapitel 2.3.4).

Hinsichtlich der räumlichen Abgrenzung sind TIS konzeptionell gesehen eher global zu charakterisieren, wobei eine geografische Begrenzung, um sich auf einen räumlich begrenzten Teil eines bestimmten TIS zu konzentrieren, um ggf. die für eine bestimmte Auswahl an Akteuren in einem nationalen oder regionalen Kontext relevanten Aspekte zu untersuchen, durchaus Sinn machen kann (Bergek et al. 2008-1, Seite 412f.) Jedoch sollte eine geografische Abgrenzung eines TIS nicht allein für sich verwendet werden: Eine Analyse mit dem TIS-Ansatz braucht eine starke internationale Komponente, weil ein räumlich begrenzter Teil eines globalen TIS ohne ein gründliches Verständnis des globalen Kontextes weder verstanden, noch bewertet werden kann. Empirisch werden diese Ausführungen nicht durchgängig unterstützt, unter den fünf meistzitierten Fallstudien konzentrieren sich einige auf ausgewählte Erneuerbare Energietechnologien in verschiedenen Ländern bzw. TIS, manche allerdings auch nur auf ein Land bzw. TIS: Erneuerbare Energien in Deutschland und den Niederlanden

(Hekkert et al. 2007), in Deutschland und Schweden (Bergek et al. 2008-1), in Großbritannien (Foxon et al. 2010), noch einmal in Deutschland und den Niederlanden (Hekkert et al. 2009) und in der Schweiz (Markard et al. 2009). Damit beschäftigen sich die meisten Fallstudien also mit regionalen oder nationalen oder supranationalen Innovationssystemen, davon Letzteres, wenn ein TIS-Vergleich mit mehr als einem TIS in mehr als einer Nation durchgeführt wird.

Hinsichtlich der konzeptionell gewählten Analyseeinheit kann es eine spezifische Technologie sein, wobei die erste Herausforderung darin besteht, die Aggregationsebene zu bestimmen. Das einem TIS zu Grunde liegende Wissensgebiet könnte durch ein bestimmtes Wissensgebiet definiert werden, oder durch eine Reihe von verwandten Wissensgebieten (Bergek et al. 2008-1, Seite 412). Die zweite Herausforderung besteht darin, die Breite an Anwendungen festzulegen, welche in der Fallstudie aufgenommen werden sollen, wobei natürlich auch alle in Frage kommenden Anwendungen aufgenommen werden können.

Empirisch beobachtet werden an dieser Stelle bzw. im Verlauf der vorliegenden Dissertation nur Fallstudien zu TIS rund um Erneuerbare Energietechnologien, weshalb sich die gewählte Analyseeinheit sehr einheitlich als eine spezifische Erneuerbare Energietechnologie herausstellt (Hekkert et al. 2007, Bergek et al. 2008-1, Hekkert et al. 2009, Markard et al. 2009).

TIS umfassen nicht ausschließlich diejenigen strukturellen Komponenten, welche der Technologie im Fokus gewidmet sind, sondern alle strukturellen Komponenten, die den Innovationsprozess für diese Technologie beeinflussen (Bergek et al. 2008-1, Seite 409). Die folgende Definition erläutert die grundlegenden Komponenten eines TIS:

> „A technological system may be defined as a network of agents interacting in a specific economic/industrial area under a particular institutional infrastructure or set of infrastructures and involved in the generation, diffusion, and utilization of technology. Technological systems are defined in terms of knowledge/competence flows rather than flows of ordinary goods and services. They consist of dynamic knowledge and competence networks. In the presence of an entrepreneur and sufficient critical mass, such networks can be transformed into development blocks, i.e. synergistic clusters of firms and technologies within an industry or a group of industries.“ (Carlsson et al. 1991, Seite 111)

Als grundlegende Komponenten von TIS gelten also Akteure und ihre Kompetenzen, wobei die Pioniere besonders wichtig sind, das heißt diejenigen Akteure, welche technisch, finanziell und/oder politisch so mächtig sind, dass sie einen Beitrag zur Entwicklung und Verbreitung einer neuen Technologie leisten (Jacobsson et al. 2000, Seite 629f.). Dazu kommen Netzwerke, die eine wichtige Plattform für den Transfer von implizitem und explizitem Wissen darstellen. Dabei verbessert die starke Integration in ein Netzwerk die Ressourcenbasis eines einzelnen Unternehmens z. B. hinsichtlich Informationen, Wissen, Technologien, etc. und damit auch dessen Freiheitsgrade. Zuletzt zählen dazu auch Rahmenbedingungen, welche sowohl „harte“ Restriktionen wie die Gesetzgebung, den Kapitalmarkt oder das Bildungssystem umfassen, aber auch „weichere“ Eigenschaften wie die Kultur sein können.

2.3.2 Funktionale Analyse von TIS

Wie oben bereits angesprochen, hat sich über die letzten beiden Jahrzehnte innerhalb der Forschung an TIS ein Umschwung von der rein struktur- hin zur prozessorientierten Analyse vollzogen. Im Vordergrund stehen damit nicht mehr die strukturellen Bestandteile eines TIS selbst, also die Akteure, Netzwerke und Rahmenbedingungen, sondern deren Zusammenwirken bzw. Funktionen, die zu erfüllen sind. Anlass für den Wandel war die aus zunehmend mehr Fallstudien abgeleitete Feststellung, dass spezifische TIS durchaus Schwächen aufweisen konnten, selbst wenn alle strukturellen Bestandteile offensichtlich vorhanden waren, und andere TIS problemlos funktionierten, selbst wenn eben nicht alle strukturellen Bestandteile offensichtlich vorhanden waren.

Der reine Fokus auf die strukturellen Bestandteile eines TIS erlaubte es noch nicht, die Qualität eines bestimmten strukturellen Bestandteils oder einer Kombination mehrerer struktureller Bestandteile im Sinne seiner oder ihrer Auswirkung auf den Innovationsprozess bzw. die Funktion des TIS vollumfassend zu beurteilen (Bergek et al. 2008-1, Seite 409). Dazu war es notwendig, die Interaktion zwischen den strukturellen Bestandteilen zu untersuchen, um TIS so besser zu verstehen und deutlich verbesserte politische Handlungsoptionen aufzuzeigen. Im Folgenden wird ein Vergleich der von verschiedenen Autoren als grundlegend identifizierten Funktionen verschiedener Typen von Innovationssystemen durchgeführt (Tabelle 1).

Weil sich zahlreiche Anläufe zur Innovationssystem-Analyse in verschiedenen Fallstudien im Hinblick auf die identifizierten Funktionen unterschieden, stellte sich die Frage, welche Gemeinsamkeiten vorlagen (Johnson 2001, Seite 11ff.). In einem systematischen Vergleich ging die Schwedin Anna Johnson dieser Frage nach, und unterschied dabei noch die den Innovationsprozess direkt und indirekt unterstützenden Funktionen. Sie identifizierte zehn mehr oder weniger einheitliche Funktionen, die allesamt sehr aufeinander bezogen waren (Johnson 2001, Seite 15f.). Außerdem stellte sie fest, dass die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Funktionen eine Systemdynamik erzeugen, in deren Kontext die Nichterfüllung einer Funktion den Ausfall eines Innovationssystems auch in anderen Aspekten nach sich zieht. Allerdings konnte eine erfüllte Funktion auch zur Verstärkung anderer Funktionen führen, wenn Rückkopplungsschleifen dazu führten. Zusammenfassend erschien sich eine große Übereinstimmung unter zahlreichen Autoren für die verschiedenen Anläufe zur Innovationssystem-Analyse zu ergeben, was die durch sie identifizierten Funktionen anbelangte.

Ebenfalls zehn Funktionen, „Aktivitäten“ genannt, beschreibt der Schwede Charles Edquist, nachdem er die von anderen Autoren genannten Funktionen analysiert hat. Es fällt allerdings auf, dass bei ihm die Funktion der „Bereitstellung von Ressourcen“ (Johnson 2001, Seite 13) gleich in mehreren „Aktivitäten“ aufgeht: Zur Kompetenzbildung in der Arbeitnehmerschaft, in den Aktivitäten zur „Ausbrütung“ von Innovationen, zur Finanzierung von Innovationsprozessen sowie in der Bereitstellung von Unternehmensberatungsdienstleistungen. Ansonsten ergibt sich auch hier eine relative hohe Übereinstimmung. In den beiden kurz aufeinander folgenden maßgeblichen Veröffentlichungen wurden im Jahr 2007 und 2008 jeweils sieben Funktionen eines TIS auf der Basis intensiver Literaturrecherche identifiziert und publiziert (Hekkert et al. 2007, Seite 421ff.; Bergek et al. 2008-1, Seite 414ff.). Diese Funktionen decken

sich weitestgehend und wurden in den folgenden Jahren in empirischen Fallstudien als relevant bestätigt (siehe Kapitel 2.3.4). Es fällt auf, dass neben dem Unternehmerischen Experimentieren die Wissensentwicklung und -verbreitung als wichtigste Funktion gilt. Es folgt der Einfluss auf die Richtung der Suche und die Marktentstehung sowie die Ressourcenmobilisierung auf dem gleichen Platz. Marginale, quasi „Platzierungsunterschiede" ziehen sich durch das gesamte Ranking.

Den Fokus auf die Funktionen eines TIS zu richten, erlaubt die Beurteilung seiner Leistungsfähigkeit im Sinne der Entwicklung erfolgreicher technologischer Innovationen, die zuerst einmal unabhängig davon sein kann, welche oder wie viele Akteure spezifisch vertreten sind. So kann z. B. Systemversagen in funktioneller Hinsicht erklärt werden, indem Schwächen identifiziert und strategische Herausforderungen offenbart werden.

Im ursprünglichen Paper der Schwedin Anna Bergek beginnen die Autoren mit einer Erklärung von jeder der sieben genannten Funktionen, bevor sie ein illustrierendes Beispiel von verschiedenen von ihnen durchgeführten Fallstudien anführen und schließlich dazu übergehen, Beispiele für Indikatoren zu nennen, die den Erfüllungsgrad einer Funktion reflektieren. Die Indikatoren können qualitativer oder quantitativer Natur sein, und die daraus zusammengesetzte Beurteilung der Erfüllung einer Funktion kann auf beiden basieren. Auf dieser Basis ist es allerdings auch möglich, die genannten Beispiel-Indikatoren den drei Säulen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft von Innovationssystemen (siehe Kapitel 2.2.1) ganz allgemein zuzuordnen (Abbildung 11).

Es ist eindrucksvoll zu sehen, dass sich der Einfluss jeder Institution auf eine Funktion von Indikator zu Indikator ändert und bereits auf eine Agenda für die drei Säulen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft hindeutet. In Bezug auf die Funktion Einfluss auf die Richtung der Suche z. B. hat die Politik/Staatsregierung einen starken Einfluss und eine führende Rolle auf/bezüglich z. B. Regulierung und politische Maßnahmen, die für die Entwicklung eines TIS von größerer Bedeutung und damit wichtiger sein können als z. B. die Beurteilung technologischer Möglichkeiten durch die Akteure in Wissenschaft/Hochschulbereich oder z. B. die Artikulation von Nachfrage durch führende Kunden in der Wirtschaft/Industrie. Das Gleiche trifft auf die Funktion der Legitimität zu, deren Erfüllung am meisten beeinflusst wird durch die Politik/ Staatsregierung, die z. B. über die Stärke der Legitimität eines TIS entscheiden und die Angleichung zwischen TIS und geltender Rechtsvorschriften und der Wertebasis in Industrie und Gesellschaft maßgeblich beeinflussen können. Der Einfluss von Wissenschaft/Hochschulbereich, z. B. was oder wer die Legitimität beeinflusst und wie, oder von Wirtschaft/Industrie, z. B. wie die Legitimität Nachfrage, (Gesetzgebung) und Unternehmensverhalten beeinflusst, muss als schwächer beurteilt werden.

Tabelle 1: Vergleich der von verschiedenen Autoren als grundlegend identifizierten Funktionen von Innovationssystemen, die inhaltlich übereinstimmenden Funktionen sind farblich einheitlich gekennzeichnet.

	Johnson 2001	**Edquist 2005**	**Hekkert et al. 2007**	**Bergek et al. 2008-1**
1	Identifikation von Problemen („Engpässe“)	FuE-Bereitstellung, Erschaffung neuen Wissens	Unternehmerisches Experimentieren	Wissensentwicklung und -verbreitung
2	Erschaffung neuen Wissens	Kompetenzbildung in Arbeitnehmerschaft	Wissensentwicklung	Einfluss auf die Richtung der Suche
3	Bereitst. Innovat.-Anreize für Untern.	Bildung neuer Produktmärkte	Wissensverbreitung durch Netzwerke	Unternehmerisches Experimentation
4	Bereitstellung von Ressourcen	Artikulation von Produktanford.	Führung der Suche	Marktentstehung
5	Führung der Richtung der Suche	Entst./Anpassung von Organisationen	Marktentstehung	Legitimität
6	Erkennung von Wachstumspotenzialen	Vernetztes Arbeiten über Märkte u. andere Mechanismen	Ressourcenmobilisierung	Ressourcenmobilisierung
7	Unterstützung von Informations- und Wissensaustausch	Entstehung und Anpassung von Institutionen	Legitimitätsbild./ Gegenmaßn. zu Widerst. gegen Wandel	Entwicklung positiver externer Effekte
8	Stimulierung/ Marktentstehung	Akt. zur „Ausbrütung“ von Innov.	-	-
9	Reduktion sozialer Unsicherheit	Finanz. von Innovationsprozessen	-	-
10	Gegenmaßn. zu Widerstand gegen Wandel	Bereitst. von Unternehmensberat.-dienstleistungen	-	-

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis der zitierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

Abbildung 11: Funktionen und Beispiele für Indikatoren, welche den Erfüllungsgrad einer Funktion in einem TIS reflektieren, pro Säule.[13]

Funktionen	Wissenschaft/ Hochschulbereich	Wirtschaft/ Industrie	Politik/ Staatsregierung
Wissensentwicklung und -verbreitung	Z.B. wissenschaftliches, technologisches Wissen (→ Publikationen)	Z.B. Produktion, Markt, Logistik und Entwurfs-wissen (→ Patente)	Z.B. Lernen von neuen Anwendungen, Produktion, etc.
Einfluss auf die Richtung der Suche	Z.B. Beurteilung technolog. Möglichkeiten durch die Akteure	Z.B. Artikulation von Nachfrage durch führende Kunden	Z.B. Regulierung und politische Maßnahmen
Unternehmerische Experimentation	Z.B. die Vielfalt eingesetzter Techn.	Z.B. die Anzahl neuer Marktteilnehmer	Z.B. die Anzahl an verschiedenen Typen von Anwendungen
Marktentstehung	Z.B. in welcher Phase ist der Markt (aufpäppelnd, überbrückend, reif)	Z.B. wer sind die Nutzer, ist das Nachfrageprofil deutlich artikuliert	Z.B. ob es institutionelle Anreize für die Marktentstehung gibt
Legitimation	Z.B. was oder wer die Legitimation beeinflusst, und wie	Z.B. wie die Legitimation Nachfrage beeinflusst, (Gesetzgebung) und Unternehmensverhalten	Z.B. die Stärke der Legitimation des TIS, Angleichung zw. TIS und geltender Rechtsvorschr. und der Wertebasis in Industrie und Gesellsch.
Ressourcen-mobilisierung	Z.B. Veränderungen in den ergänzenden Vermögenswerten	Z.B. wachsendes Volumen von Start- und Risikokapital	Z.B. Veränderungen von Volumen und Qualität des Humankapitals
Entwicklung positiver externer Effekte	Z.B. Informationsflüsse und Wissensspillover	Z.B. Entstehung spez. Zwischenhändler für Güter und Dienstleist.	Z.B. Entstehung vereinigter Arbeitsmärkte

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Bergek et al. 2008-1, Seite 414 ff.

Hinsichtlich der Funktion Entwicklung positiver externer Effekte hat jede der drei Säulen im Allgemeinen den gleichen starken Einfluss/eine führende Rolle mit z. B. Informationsflüssen und Wissensübertragung in Wissenschaft/Hochschulbereich, der Entstehung spezialisierter Zwischenhändler für Güter und Dienstleistungen in Wirtschaft/Industrie und der Entstehung vereinigter Arbeitsmärkte in Politik/Staatsregierung. Einblicke aus vielen weiteren Fallstudien sollten bezüglich der Mitwirkung einer jeden Institution in Hinblick auf die Entwicklung bestimmter/spezifischer Indikatoren analysiert werden, um ihren Einfluss auf/ihre Rolle bezüglich einzelner Indikatoren und damit auch der jeweilig zu Grunde liegenden Funktion besser zu verstehen und wissenschaftliche/wirtschaftliche/politische Programme für jede der drei Säulen z. B. in einem TIS abzuleiten.

Die geschilderten sieben Funktionen wurden in ein Analyseschema eingebettet, das sechs Teilanalysen bzw. Schritte umfasst wie folgt (Abbildung 12) (Bergek et al. 2008-1, Seite 410f.):

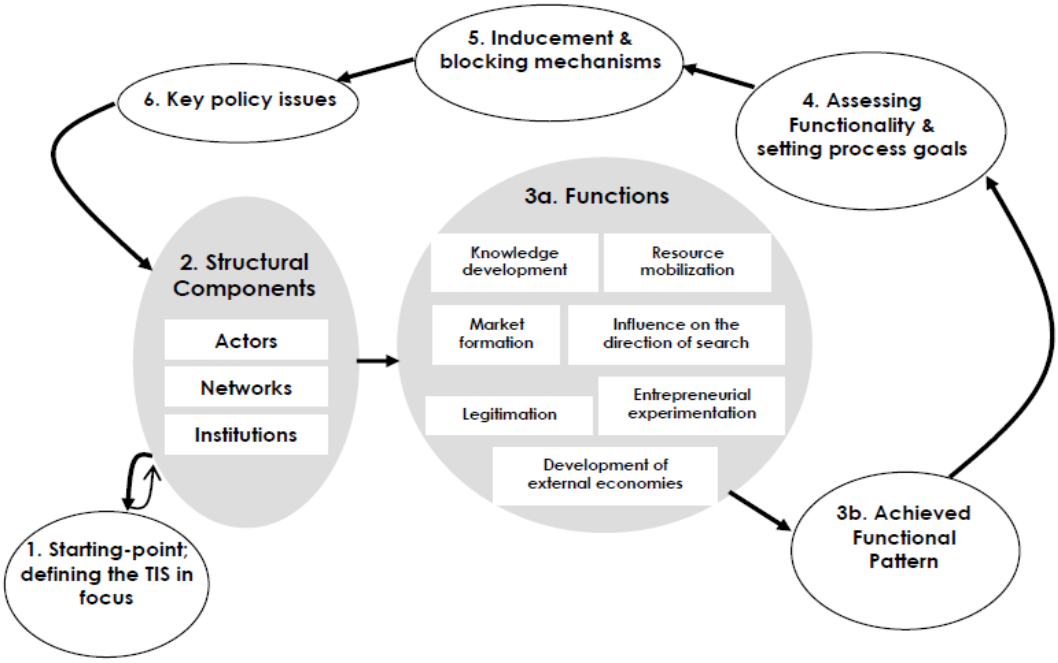
1. Ausgangspunkt: Definition des im Fokus stehenden TIS, iterativ mit (2),
2. Identifikation der strukturellen Komponenten wie Akteure, Netzwerke und Institutionen, iterativ mit (1),

[13] Dunkelgrau: Starker Einfluss/Führende Rolle der Institution auf/bezüglich dem genannten Indikator, Hellgrau: Einfluss/assoziative Rolle der Institution auf/bezüglich dem genannten Indikator.

3. Funktionelle Analyse des TIS in Bezug auf die sieben geschilderten Prozesse (a) sowie Dokumentation bereits ablaufender Funktionsmuster (b),
4. Beurteilung der Funktionalität & (normative) Festlegung von Prozesszielen in Hinblick auf gewünschte Funktionsmuster,
5. Identifikation von antreibenden oder hemmenden Mechanismen in Hinblick auf gewünschte Funktionsmuster,
6. Ableitung der politischen Schlüsselfragen im Zusammenhang mit den gefundenen Treiber- und Hemmnis-Mechanismen.

(Bergek et al. 2008-1, Seite 410f.)

Abbildung 12: Das Schema zur Innovationssystemanalyse.



Quelle: Adaptiert in Bergek et al. 2008-1, Seite 411 von Oltander et al. 2005, Seite 20.

Diese Schritte sind nicht nur linear abzuarbeiten, sondern mit mehreren Iterationen erneut zu durchlaufen. Mit diesem Analyseschema sollte es Innovationssystemforschern und politischen Entscheidungsträgern erleichtert werden, politische Schlüsselfragen zu identifizieren und Ziele für Änderungen der Funktionsmuster in einem TIS zu setzen. Großer Forschungsbedarf bestand nach dieser Veröffentlichung insbesondere hinsichtlich dem Verständnis, wie TIS aufkommen und wie sie sich entwickeln, wie ihre Funktionalität beurteilt werden kann und welche Methoden (z. B. die Aufstellung aussagekräftiger Indikatoren) sich eignen.

2.3.3 Das Phasenmodell zur Entwicklung von TIS

Eine immer größere Anzahl von empirischen Fallstudien unterstreichen den Wert des Innovationssystem-Ansatzes, um die Innovationsfähigkeit einer Nation (siehe Kapitel 2.2.1), einer Region (siehe Kapitel 2.2.2), eines Industriesektors (siehe Kapitel 2.2.3) oder in Bezug auf

eine spezifische Technologie (siehe Kapitel 2.3) zu analysieren und politische Schlüsselaspekte bzw. spezifische Handlungsempfehlungen für die Innovationspolitik abzuleiten.

Innerhalb des Kontextes der Analyse der funktionellen Dynamik von TIS kam die Frage auf, wie die Funktionalität eines Systems beurteilt oder wie die relative „Stärke" eines besonderen funktionalen Musters bewertet werden kann und zwei Grundlagen für eine Beurteilung wurden identifiziert, (1) die Entwicklungsphase eines TIS und (2) Vergleiche zwischen TIS (Bergek et al. 2008-1, S. 419f.). Hinsichtlich (1) war bereits früher angeraten worden, zwischen einer formenden Phase (engl. „formative phase") und einer Wachstumsphase (engl. „growth phase") in der Entwicklung eines TIS zu unterscheiden und dass die Definition von „Funktionalität" zwischen diesen beiden Phasen unterschiedlich sein mag (Bergek et al. 2003, Seite 200f.; Jacobsson et al. 2004, Seite 815ff.). Später wurden drei Marktphasen erwähnt, aufpäppelnd, überbrückend, reif (engl. „nursing, bridging, mature"; Bergek et al. 2008-1, Seite 416), jedoch ohne sie mit den Entwicklungsphasen des überprüften TIS zu verknüpfen.

Die Systemfunktionalität und die relative „Stärke" eines besonderen funktionalen Musters variiert tatsächlich, abhängig von der Entwicklungsphase, in der sich ein TIS befindet.[14] Deshalb ist das oben erwähnte Phasenmodell um drei Phasen zu erweitern. Basierend auf dem klassischen Produktlebenszyklus in den Wirtschaftswissenschaften werden insgesamt fünf Phasen der Entwicklung für das jeweils überprüfte TIS vorgeschlagen wie folgt:

1. *Formende (engl. „formative") Phase vs. aufpäppelnder (engl. „nursing") Markt, Produkt in Phase der Markteinführung,*
2. *Wachstumsphase (engl. „growth phase") vs. überbrückender (engl. „bridging") Markt, Produkt in Phase des Marktwachstums,*
3. Reife (engl. „mature") Phase vs. Massenmarkt (engl. „mass market"), Produkt in Phase der Marktreife,
4. Stagnationsphase (engl. „stagnation phase") vs. gesättigter (engl. „saturated") Markt, Produkt in Phase der Marktsättigung,
5. Rückentwicklungsphase (engl. „degeneration phase") vs. rückläufiger (engl. „declining") Markt, Produkt in Phase des Marktrückgangs.

Für die erste und zweite Phase wurden bereits empirische Fallstudien durchgeführt, das beste Beispiel ist „The Emergence of a Growth Industry: A Comparative Analysis of the German,

[14] Die folgenden Ausführungen in diesem Teil des Kapitels basieren auf einer Forschungskooperation zwischen dem Autor der vorliegenden Dissertation und Malte Klein vom Institut für Marketing und Management (570F), Universität Hohenheim (heute Daimler AG). Die Ergebnisse dieser Kooperation wurden als Poster mit dem Titel „Extension of the phase model for assessing the functionality of TIS" auf der 16th International Schumpeter Society (ISS)-Konferenz 2016 von der International Joseph A. Schumpeter Society vom 6.-8. Juli 2016 in Montreal, Kanada, vorgestelt.

Dutch and Swedish Wind Turbine Industries“ (Bergek et al. 2003, Seite 197).[15] In der ersten Phase stehen das Experimentieren und die Generierung von Vielfalt im Vordergrund, weshalb den Funktionen des Einflusses auf die Suchrichtung, der Wissensentwicklung sowie -verbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte, der Legitimität, dem Unternehmerischen Experimentieren sowie der Ressourcenmobilisierung eine besondere Bedeutung zukommt (Bergek et al. 2003, Seite 200f.). In der zweiten Phase stehen dann die Diffusion und Unternehmensexpansion im Vordergrund, weshalb der Marktentstehung die wichtigste Rolle zukommt, noch vor der Legitimität, dem Unternehmerischen Experimentieren, dem Einfluss auf die Suchrichtung und der Ressourcenmobilisierung. Die Funktionalität eines TIS kann also im Hinblick darauf bewertet werden, wie es in der ersten Phase den Eintritt von Unternehmen, die Vielfalt und die Entstehung von Nischenmärkten erlaubt. In der zweiten Phase sollten das Marktwachstum und die Ressourcenmobilisierung im Vordergrund stehen, um das Marktpotenzial voll auszuschöpfen. In dem Paper „Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology“, werden die betroffenen Phasen formende Phase (engl. „the formative phase“) und Phase der Marktvergrößerung (engl. „the phase of market expansion“) genannt (Jacobsson et al. 2004, Seite 819). Alle zitierten Arbeiten fokussieren sich auf Erneuerbare Energietechnologien.

Für die weiteren Phasen der Reife, Stagnation und Rückentwicklung gibt es hervorragende Beispiele: Ein gutes Beispiel für ein TIS in der reifen Phase ist das TIS für Ethanol in Brasilien, wo sich das Marktwachstum gerade verlangsamt. Dieses TIS steht vor großen Herausforderungen im Hinblick auf das Ethanol der zweiten Generation und einem zunehmenden Wettbewerbsdruck. In einer Stagnationsphase sind Blei-Säure-Batterien (Pb-Säure) in Industrieländern weltweit befindlich, als eine Energiespeichertechnologie, die einen gesättigten Markt erreicht hat (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 7). Die fortgeschrittene Elektromobilität der Zukunft wird allerdings nicht auf Pb-Säure beruhen. In der aktuellen Übergangszeit werden Pb-Säure vor allem dann angewendet, wenn die Kostenreduktion wichtiger als die Fahrzeugreichweite ist und/oder in Elektrofahrzeugen für den chinesischen und vor allem Städteorientierten Markt. Die Biogasindustrie in Deutschland ist ein gutes Beispiel für die Degenerationsphase und den starken Einfluss der Funktion Legitimität in einem TIS in Erneuerbaren Energien. In der Elektromobilität ist die Erfolgsgeschichte von Nickel-Metall-Hydrid-Batterien (Ni/MH) eng mit der Marktentwicklung von Hybrid-Elektrofahrzeugen (HEV) verbunden und der Markt rückläufig (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 13).

Diese Beispiele aus dem Bereich der Erneuerbaren Energietechnologien rechtfertigen das oben vorgeschlagene Phasenmodell und zeigen, dass i) unterschiedlich Indikatoren die Identifizierung der Entwicklungsphase eines TIS erleichtern und ii) darauf basierend spezifische

[15] In Publikationen von und mit Anna Bergek wurde die erste Phase die Phase der Experimentation (engl. „phase of experimentation“) genannt (Bergek et al. 2003, Seite 201), später die formende Phase (engl. „formative phase, Bergek et al. 2008-1, Seite 419). Die zweite Phase war früher die Phase von Turbulenz und Wachstum (engl. „phase of turbulence and growth“, Bergek et al. 2003, Seite 203), später dann nur noch die Wachstumsphase (engl. „growth phase“, Bergek et al. 2008-1, Seite 419).

politische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Auch im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird das Phasenmodell herangezogen und mit dem empirischen Beispiel des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität angewendet. Dadurch soll nicht nur gezeigt werden, dass das Phasenmodell richtig ist, sondern sich auch zeigen, dass die Systemfunktionalität und/oder die relative „Stärke“ eines besonderen funktionalen Musters nur dann korrekt validiert werden kann, wenn die Phase der Entwicklung eines TIS in Betracht gezogen wird.

2.3.4 Relevante Fallstudien

Als relevante Fallstudien gelten im Sinne dieser Dissertation Arbeiten, in welchen basierend auf der Methodik der TIS neu formierte bzw. aktuell aufsteigende Industrien analysiert werden und die meisten Zitationen aufweisen.[16] Als notwendig wurden zwei Abfragen erachtet, die Ergebnisliste auf die erste Abfrage wurde bei zwanzig Ergebnissen mit nur vier relevanten Fallstudien abgebrochen. Die ausführliche Ergebnisliste ist in ANHANG I zu finden, die auf die relevanten Ergebnisse gekürzte Ergebnisliste folgt unten (Tabelle 2).

Tabelle 2: Gekürzte Ergebnisliste auf die erste Abfrage.[17]

Zitat.	Autor(en)	Titel	Inhalt	Aufn.
304	**Hekkert et al. 2007**	**Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change**	**TIS**	**Ja, #1**
267	**Carlsson et al. 2002**	**Innovation systems: analytical and methodological issues**	**TIS**	**Ja, #2**
253	**Jacobsson et al. 2000**	**The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research**	**TIS**	**Ja, #3**
235	**Bergek et al. 2008-1**	**Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis**	**TIS**	**Ja, #4**

Quelle: Eigene Recherche.

[16] Die meistzitierten Fallstudien wurden im Rahmen einer Recherche mit konkret abgestimmten Suchstrategien in der Abstract- und Zitationsdatenbank „Web of Science“ (WoS) im Januar 2016 ermittelt, siehe (WoS 2017).

[17] Suchterm <<technolog* „innovati* system*"">> unter dem Kriterium „Topic“ im Zeitraum „All years“. Nur die als relevant eingestuften und fett markierten Fallstudien wurden ins Quellenverzeichnis der vorliegenden Dissertation aufgenommen bzw. sind dort enthalten.

Die Ergebnisliste auf die zweite Abfrage wurde erst vor Veröffentlichungen mit unter fünfzehn Zitationen pro Veröffentlichung abgebrochen, bei dreizehn weiteren Ergebnissen von relevanten Fallstudien. Die ausführliche Ergebnisliste ist in ANHANG II zu finden, die auf die relevanten Ergebnisse gekürzte Ergebnisliste folgt unten (Tabelle 3).

Tabelle 3: Gekürzte Ergebnisliste auf die zweite Abfrage.[18]

Zitat.	Autor(en)	Titel	Inhalt	Aufn.
304	**Hekkert et al. 2007**	**Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change**	**TIS**	**Ja, #1**
235	**Bergek et al. 2008-1**	**Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis**	**TIS**	**Ja, #4**
133	**Foxon et al. 2005**	**UK innovation systems for new and renewable energy technologies: drivers, barriers and systems failures**	**TIS**	**Ja, #5**
61	**Hekkert et al. 2009**	**Functions of innovation systems as a framework to understand sustainable technological change: Empirical evidence for earlier claims**	**TIS**	**Ja, #6**
54	**Bergek et al. 2008-2**	**'Legitimation' and 'development of positive externalities': two key processes in the formation phase of technological innovation systems**	**TIS**	**Ja, #7**
29	**Markard et al. 2009**	**Prospective analysis of technological innovation systems: Identifying technological and organizational development options for biogas in Switzerland**	**Integration von TIS & Transitionen**	**Ja, #8 (als Ausn.)**
26	**Mondal et al. 2010**	**Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh-An innovation system analysis**	**TIS**	**Ja, #9**

[18] Suchterm <<technolog* „innovati* system*"">> unter dem Kriterium „Title" im Zeitraum „All years". Nur die als relevant eingestuften und fett markierten Fallstudien wurden ins Quellenverzeichnis der vorliegenden Dissertation aufgenommen.

26	**Suurs et al. 2009-1**	**Competition between first and second generation technologies: Lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands**	**TIS**	**Ja, #10**
25	**Negro et al. 2008**	**Explaining the success of emerging technologies by innovation system functioning: the case of biomass digestion in Germany**	**TIS**	**Ja, #11**
24	**Dewald et al. 2011**	**Market Formation in Technological Innovation Systems: Diffusion of Photovoltaic Applications in Germany**	**TIS**	**Ja, #12**
20	**Suurs et al. 2010**	**Understanding the formative stage of technological innovation system development: The case of natural gas as an automotive fuel**	**TIS**	**Ja, #13**
19	**Musiolik et al. 2012**	**Networks and network resources in technological innovation systems: Towards a conceptual framework for system building**	**TIS**	**Ja, #14**
19	**Suurs et al. 2009-2**	**Understanding the build-up of a technological innovation system around hydrogen and fuel cell technologies**	**TIS**	**Ja, #15**

Quelle: Eigene Recherche.

Die relevanten Fallstudien wurden auf ihre wichtige Hypothesen und wesentlichen Ergebnisse hin analysiert und Lessons learned für die vorliegende Doktorarbeit abgeleitet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Analyse aller fünfzehn als relevant identifizierten Fallstudien entsprechend der drei Kriterien Hypothese, Ergebnis, Lesson learned.

#1 Hekkert et al. 2007 **Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change** Hypothese: Weil Innovationssysteme sehr wichtige Bestimmungsfaktoren für den technologischen Wandel sind, muss ihre Dynamik verstanden werden. Die vor allem auf Strukturen fokussierenden traditionellen Analysemethoden haben sich als ungenügend erwiesen, weshalb sich das vorgeschlagene Rahmenwerk auf eine Reihe von Prozessen fokussiert.

Ergebnis: Es wird eine Methode zur systematischen Erfassung dieser auch „Funktionen“ genannten Prozesse vorgestellt und empirisch mit dem Beispiel der Entwicklung von nachhaltigen Technologien in Deutschland und den Niederlanden unterlegt.

Lesson learned: Die „funktionale Dynamik“ von TIS ist auch Thema der vorliegenden Doktorarbeit, die Funktionen des TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität sind zu analysieren, um fördernde und hemmende Mechanismen zu finden.

#2 Carlsson et al. 2002

Innovation systems: analytical and methodological issues

Hypothese: Verschiedene analytische und methodologische Aspekte des Ansatzes zur Innovationssystem-Analyse sind zu klären, erstens das angemessene Analyseniveau, zweitens die Bestandsaufnahme, drittens die Messung der Systemleistung.

Ergebnis: Alle drei Aspekte werden auf Basis der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Literatur behandelt und mit Fallbeispielen hinterlegt. Besonders die Systemleistung wird den größten weiteren Forschungsbedarf in Anspruch nehmen.

Lesson learned: Gerade der Beurteilung der Systemleistung des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität kommt also besondere Bedeutung bei.

#3 Jacobsson et al. 2000

The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research

Hypothese: Die Forschung an und Entwicklung von Erneuerbaren Energietechnologien in den vergangenen zwei Jahrzehnten hat hinsichtlich kommerziell interessanter Technologien nur sehr wenige lukrative Ergebnisse hervorgebracht.

Ergebnis: Eine Marktanalyse zeigt, dass diese Wahrnehmung nicht stimmt, aber die konsequente Transformation des Energiesystems ein sehr langsamer Prozess mit ungewissem Ausgang ist. Ein analytisches Rahmenwerk auf Basis des Ansatzes zur Innovationssystem-Analyse wird empfohlen und Schlüsselaspekte identifiziert.

Lesson learned: Auch die Transformation hin zur Elektromobilität verläuft schleichend und dem TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität kommt eine Schlüsselrolle zu, um letztlich politische Handlungsempfehlungen abgeben zu können.

#4 Bergek et al. 2008-1

Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis

Hypothese: Politische Entscheidungsträger haben oft Probleme, praktische Richtlinien aus den empirischen Fallstudien zu Innovationssystemen zu ziehen.

Ergebnis: Auf Basis früherer Veröffentlichungen wird der funktionale Ansatz zur Analyse der Dynamik von Innovationssystemen zu einem praktischen Analyseschema operationalisiert und mit zahlreichen Beispielen aus empirischen Fallstudien unterlegt.

Lesson learned: Das Analyseschema kann auch auf das zu analysierende TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität angewendet werden.

#5 Foxon et al. 2005

UK innovation systems for new and renewable energy technologies: drivers, barriers and systems failures

Hypothese: Ein besseres Verständnis der systemischen Prozesse rund um Innovationen ist hilfreich, sowohl konzeptionell als auch zur Information von politischen Entscheidungsträgern, die Innovation in nachhaltigen Technologien unterstützen.

Ergebnis: Eine Analyse aktueller Innovationssysteme in Großbritannien für neue, Erneuerbare Energietechnologien und die Ableitung politischer Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Effizienz dieser Innovationssysteme.

Lesson learned: Systemversagen bzw. das Auftreten von -„Lücken" kann im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität auftreten und muss behandelt werden.

#6 Hekkert et al. 2009

Functions of innovation systems as a framework to understand sustainable technological change: Empirical evidence for earlier claims

Hypothese: Das Rahmenwerk zur Untersuchung der Funktionen eines Innovationssystems ist zulässig, um Prozesse des technischen Wandels zu analysieren.

Ergebnis: Auf Basis von fünf empirischen Fallstudien wird bestätigt, dass eine spezifische Reihe von Funktionen passend ist und dass die Interaktionen zwischen Systemfunktionen das Aufkommen und Wachstum von Innovationssystemen beschleunigt.

Lesson learned: Es gilt, die bestätigten Systemfunktionen auch für das TIS zu Energiespeichern für die Elektromobilität und ihre Rolle für das TIS zu untersuchen.

#7 Bergek et al. 2008-2

'Legitimation' and 'development of positive externalities': two key processes in the formation phase of technological innovation systems

Hypothese: Die beiden Funktionen (1) „Legitimität" und (2) „Entwicklung positiver externer Effekte" spielen eine herausragende Rolle in der frühen Marktentstehung (1) und im Wachstum eines Innovationssystems (2).

Ergebnis: Auf der Basis von empirischen Beispielen aus zahlreichen Fallstudien über Erneuerbare Energietechnologien wird die Rolle der beiden Funktionen beleuchtet und damit verknüpfte Herausforderungen für Politik und Management identifiziert.

Lesson learned: Die beiden Funktionen spielen auch im TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität eine besondere Rolle und sind entsprechend zu analysieren.

#8 Markard et al. 2009

Prospective analysis of technological innovation systems: Identifying technological and organizational development options for biogas in Switzerland

Hypothese: Ein dreigeteiltes Analysekonzept zur Identifikation und Analyse von zukünftigen Entwicklungspfaden für TIS hilft, ihre weitere Entwicklung zu antizipieren.

Ergebnis: Am empirischen Beispiel des TIS rund um Biomassevergärung in der Schweiz wird gezeigt, dass neue Technologiekonfigurationen und maßgebliche organisatorische Änderungen durchaus Konsequenzen für das TIS haben.

Lesson learned: Das Paper sowie der darin angegebene weitere Forschungsbedarf zeigt, dass die Integration des TIS-Ansatzes und der Transitionen-Theorie noch nicht abgeschlossen und nach wie vor daran zu arbeiten ist. Trotzdem bleibt natürlich die Frage nach adäquaten Analysemethoden zur Weiterentwicklung von TIS bestehen.

#9 Mondal et al. 2010

Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh-An innovation system analysis

Hypothese: Bangladesch bietet großes Potenzial zur Nutzung von Quellen Erneuerbarer Energien, die nach und nach als treibende Kraft zur ländlichen Entwicklung wirken.

Ergebnis: In einer Analyse von Politik und Regulierung sowie den aktuellen Status und die Lessons learned von Pilot-Demonstrationsprojekten rund um die Entwicklung von Erneuerbaren Energietechnologien werden Barrieren identifiziert, die es zu überwinden gilt, um weitreichende Vorteile zu Menschen in entlegenen Gegenden zu bringen.

Lesson learned: Hemmende Barrieren in allen Bereichen des TIS gilt es auch rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität und zu ihrer Verbreitung zu identifizieren.

#10 Suurs et al. 2009-1

Competition between first and second generation technologies: Lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands

Hypothese: Die Unterstützung nachhaltiger Energieinnovationen bleibt schwierig, weil die Prozesse, die zu ihren Entwicklungskurven beitragen, kaum verstanden werden.

Ergebnis: Mit der Historie von Biokraftstoffen in den Niederlanden wird untersucht, wie die gleichzeitige Entwicklung von zwei Technologiegenerationen innerhalb eines TIS abläuft.

Lesson learned: Innerhalb des analysierten TIS gibt es auch verschiedene Technologiegenerationen, deren gegenseitige Entwicklung genau zu beobachten ist.

#11 Negro et al. 2008

Explaining the success of emerging technologies by innovation system functioning: the case of biomass digestion in Germany

Hypothese: Der Erfolg von neuen Technologien kann verstanden werden, wenn eine TIS-Analyse durchgeführt wird, die auf einem Systemfunktionen-Ansatz basiert.

Ergebnis: Am empirischen Beispiel des TIS rund um Biomassenvergärungstechnologie in Deutschland wird gezeigt, dass alle mutmaßlich wichtigen Systemfunktionen nicht nur vorhanden sind, sondern zum raschen Wachstum des TIS positiv beitragen.

Lesson learned: Den Systemfunktionen kommt eine hohe Bedeutung zu, sie sind also auch im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität zu untersuchen.

#12 Dewald et al. 2011

Market Formation in Technological Innovation Systems: Diffusion of Photovoltaic Applications in Germany

Hypothese: Strukturen und Prozesse zur Einrichtung und Entwicklung von Endverbrauchermärkten haben sehr wenig Aufmerksamkeit erhalten, spielen aber gerade in reifen TIS eine wichtige Rolle für den langfristigen Erfolg von Innovationen.

Ergebnis: Ein konzeptionelles Rahmenwerk wird vorgeschlagen und angewendet, um TIS-Teilkonstruktionen zu analysieren, die sich an spezif. Endverbrauchermärkten orientieren.

Lesson learned: Es gilt, die Implikationen für eine differenziertere Konzeptualisierung von Markt-orientierten Strukturen und Prozessen im analysierten TIS umzusetzen.

#13 Suurs et al. 2010

Understanding the formative stage of technological innovation system development: The case of natural gas as an automotive fuel

Hypothese: Der Aufbau eines TIS beschleunigt sich auf Basis der sich gegenseitig verstärkenden Systemfunktionen über die Zeit hinweg, ein Phänomen, das engl. „cumulative causation“ genannt wird.

Ergebnis: Schuld an den Trends im empirischen Beispiel (Erdgastechnologie für Automobile) sind tatsächlich verschiedene Formen von engl. „cumulative causation“, die hier auch „Motoren der Innovation“ genannt werden.

Lesson learned: Es gilt, die Motoren der Innovation auch für das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität zu identifizieren.

#14 Musiolik et al. 2012

Networks and network resources in technological innovation systems: Towards a conceptual framework for system building

Hypothese: Formale Netzwerke spielen eine ausschlaggebende Rolle in TIS – hier entwickelte und ausgebrachte Ressourcen helfen, TIS aufzubauen.

Ergebnis: Die Analyse zeigt, dass die Leistungsfähigkeit eines Netzwerks zur Erfüllung von Aufgaben im Systemaufbau insbesondere von den eingebrachten Ressourcen abhängt. Das Konzept von Ressourcen in TIS wird verbessert und eine Ressourcen-orientierte Perspektive auf die Analyse von TIS wird entwickelt.

Lesson learned: Gerade die Rolle von Netzwerken und ihren Ressourcen gilt es also auch im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität zu analysieren.

#15 Suurs et al. 2009-2

Understanding the build-up of a technological innovation system around hydrogen and fuel cell technologies

Hypothese: Eine Technologie wird durch das sie umgebende Netzwerk von Akteuren, Regulierung und Technologien entwickelt.

Ergebnis: Am Fallbeispiel der Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellen-technologien in den Niederlanden zwischen 1980 und 2007 wird der Aufbau eines TIS entlang der sieben Schlüsselaktivitäten studiert und die engl. „motors of innovation" identifiziert sowie unterliegende strukturelle Treiber und Blockaden herausgestellt.

Lesson learned: Das TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität ist jünger. Die sieben Schlüsselaktivitäten können aber auch hier analysiert werden. Insbesondere die ereignisbasierte Analyse sowie die daraus abgeleitete Einteilung verschiedener Entwicklungsphasen des studierten TIS sind vorbildlich.

Quelle: Eigene Recherche.

Hinsichtlich der gefundenen Lessons learned bestätigt sich eindeutig, dass die im Rahmen der vorliegenden Dissertation untersuchte funktionale Dynamik von TIS eine große Rolle spielt: Die Funktionen des TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität sind zu analysieren (Fallstudien #1, #6, #11, #15), um fördernde und hemmende Mechanismen (Fallstudie #9) sowie „Lücken" (Fallstudie #5) zu finden. Ein besonderer Fokus kann dabei auf den Funktionen (1) „Legitimität" und (2) „Entwicklung positiver externer Effekte" liegen (Fallstudie #7). Innerhalb des analysierten TIS sollten die unterschiedenen Generationen von Energiespeichertechnologien und ihre Wirkung aufeinander beobachtet (Fallstudie #10), aber auch die Marktorientierung von Strukturen und Prozessen dringend analysiert werden (Fallstudie #12). Zu den Strukturen gehören auch Netzwerke, die mit ihren Ressourcen einen großen Einfluss auf die Entwicklung des TIS nehmen können (Fallstudie #14). Das in der Literatur gefundene Analyseschema kann auch hier empirisch angewendet werden (Fallstudien #3, #4). Gerade der Beurteilung der Systemleistung des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität kommt eine besondere Bedeutung zu (Fallstudie #2), wozu auch die Motoren der Innovation herausragend beitragen (Fallstudie #13). Die Integration des TIS-Ansatzes und der Transitionen-Theorie ist jedoch noch nicht abgeschlossen und wird demnach für die vorliegende Dissertation außer Acht gelassen (Fallstudie #8).

Damit sind die theoretisch-methodischen Grundlagen gelegt, um in die umfassende Analyse des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität einzusteigen.

3 Elektrochemische Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität

Im dritten Kapitel werden die elektrochemischen Energiespeichertechnologien beschrieben, welche auf dem Stand des Jahres 2016 für die Elektromobilität bereits zur Verfügung stehen oder Teil der FuE bis zum Jahr 2030 sind. Dazu erfolgt zuerst eine Einführung in die für dieses Kapitel grundlegende Methodik des Roadmapping bis zum Jahr 2030 (3.1), in welchem zuerst das Begleitvorhaben „LIB 2015-Roadmapping“ vorgestellt wird (3.1.1), bevor Aufbau und Inhalt der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität (ESEM) 2030 (3.1.2), der Produkt-Roadmap ESEM 2030 (3.1.3) und der Gesamt-Roadmap ESEM 2030 (3.1.4) erläutert werden. Es folgt eine allgemeine Einführung in die Energiespeichertechnologien (3.2), worin nach einer grundlegenden Energiespeicher-Kategorisierung (3.2.1) die Funktionsweise elektrochemischer Energiespeichertechnologien (3.2.2) erläutert wird. Danach folgt der größte Teil dieses Kapitels mit der oben genannten Vorstellung der elektrochemischen Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität (3.3). Dort werden die Fahrzeugkonzepte der Elektromobilität allgemein vorgestellt (3.3.1), die politischen Rahmenbedingungen geschildert, auf deren Basis die Elektromobilität mit spezifischen Fahrzeugkonzepten zur breiten Durchsetzung kommen soll (3.3.2), Marktanforderungen an die zentralen Leistungsparameter werden abgeleitet (3.3.3), bevor der aktuelle Stand der FuE dokumentiert und diskutiert wird (3.3.4).

Damit sind alle grundlegenden elektrochemischen Energiespeichertechnologien für die folgende Analyse des Technologischen Innovationssystems rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität vorgestellt worden (siehe Kapitel 4).

3.1 Einführung I: Roadmapping bis zum Jahr 2030

Weite Teile des dritten Kapitels basieren theoretisch-methodisch auf einem Roadmapping, welches im Folgenden erläutert wird. Insbesondere das sogenannte „Technologie-Roadmapping“ hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einem beliebten Werkzeug entwickelt, um Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen zu entwerfen, deren technologische Position im Zeitablauf auszubauen, Marktchancen frühzeitig aufzuspüren und Ressourcen zielorientiert einzusetzen (Möhrle et al. 2007). An der Schnittstelle zwischen Innovations- und Technologiemanagement und Vorausschau wird es als robustes Planungsinstrument (Fraunhofer ISI 2017-1) aber auch von zahlreichen öffentlichen Auftraggebern eingesetzt, um die Entwicklung ganzer Industrien zu begleiten, Trends frühzeitig einzuordnen und ihre Auswirkungen zeitlich einzuschätzen. Daraus können dann Anknüpfungspunkte für öffentliche Förderprogramme entstehen, in deren Ausrichtung die entsprechenden Roadmaps mit einfließen. Weil in der vorliegenden Dissertation allerdings nicht die Methodik des Roadmapping im Vordergrund steht und methodisch weiterentwickelt wird, beschränkt sich ihre Erläuterung in diesem ersten

Teil des Kapitels auf die wesentlichen Grundzüge als Basis für dieses Kapitel über elektrochemische Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität.[19]

3.1.1 Begleitvorhaben „LIB 2015-Roadmapping“

Die Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ (Abkürzung LIB 2015; MEET 2011) wurde 2007 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) initiiert (BMBF 2007). Rund 60 Projektpartner aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft vereinten sich hinter dem Ziel, effiziente, fortschrittliche Lithium-Ionen-Batterien (LIB) mit FuE verfügbar zu machen (Fraunhofer ISI 2017-2). Weil LIB als maßgebliche Komponente für Elektrofahrzeuge galten und nach wie vor gelten, waren für ihren serienmäßigen Einsatz zahlreiche Herausforderungen zu lösen: Die neuen LIB sollten eine höhere Speicherkapazität bieten, eine größere Zuverlässigkeit und längere Lebensdauer sowie die maximal mögliche Sicherheit. Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts LIB 2015 angegangen, weshalb sich bei der Gründung der gleichnamigen Innovationsallianz zahlreiche Unternehmen in Deutschland verpflichteten, 360 Millionen Euro zu investieren. Ergänzt wurde dieser Betrag durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) durch weitere 60 Millionen Euro.

Für das BMBF ging es in diesem Projekt um nicht weniger als darum, Deutschland in eine Führungsrolle zu bringen, was die FuE in Elektrochemie als Basisdisziplin aller Batterietechnologien, die Massenproduktion von Energiespeichern für die Elektromobilität und letztlich auch die Produktion von Elektrofahrzeugen anbelangte (BMBF 2010-1). Mit der Betonung auf Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Bezahlbarkeit der Batteriesysteme war die Richtung für die FuE an Aspekten wie z. B. der Energie- und Leistungsdichte oder Lebensdauer vorgegeben (BMBF 2010-2). Der Bedarf an starken Energiespeichern existiert allerdings nicht nur im Bereich der Elektromobilität, wo sie eine wesentliche Komponente für den elektrifizierten Antriebsstrang der Zukunft insbesondere in batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen sowie Hybridfahrzeugen darstellen, sondern auch im Bereich der stationären Energiespeicherung, wo erhebliche Mengen volatil anfallender Erneuerbarer Energien für eine zeitlich verzögerte Nutzung gespeichert werden sollte und muss.

Das Projekt wurde unter die Konsortialführung des Institutes für Physikalische Chemie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Mainz gestellt und insgesamt arbeiteten 57 Projektpartner

[19] Insbesondere aus der Entwicklung des Roadmapping-Rahmenwerks in diesem Kapitel resultierte ein Paper basierend auf einer Kooperation zwischen dem Autor der vorliegenden Dissertation und Dr. Axel Thielmann vom Competence Center Neue Technologien, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI sowie Prof. Dr. habil. Ralf Isenmann für Nachhaltiges Zukunftsmanagement, Hochschule München (heute Professor für BWL in Innovations- und Technologiemanagement an der Wilhelm Büchner Hochschule in Pfungstadt bei Darmstadt). Das Paper wurde als Sauer et al. (2016) veröffentlicht und trägt den Titel „Modularity in Roadmapping – Integrated foresight of technologies, products, applications, markets and society: The case of “Lithium Ion Battery LIB 2015”. Das Paper beschreibt, wie Modularität in einem Roadmapping-Rahmenwerk so eingesetzt werden kann, dass eine Reihe von eigenständigen Roadmaps jeweils als zusammenhängende Module verwendet werden, die vertikal und horizontal perfekt in eine umfassend integrierte Roadmap eingefügt werden können und so eine breite Landschaft von entsprechenden Entwicklungen in Technologien, Produkten, Anwendungen, Märkten und Gesellschaft beschreiben.

aus 27 Forschungseinrichtungen und Universitäten sowie 30 Unternehmen an den Projektvorhaben, was das Projekt zu einem Beispiel dafür machte, wie Politik, Wirtschaft und Wissenschaft an einem Strang ziehen können. Nach dem Ende der finanziellen Förderung durch das BMBF floss die Innovationsallianz schließlich in das „Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien“ (KLiB) ein, das die gesamte Wertschöpfungskette von LIB mit seinen Mitgliedern aus Deutschland abbildet (KLiB 2017-1).

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe hatte innerhalb eines Begleitvorhabens zur Innovationsallianz LIB2015 drei Arbeitspakete übernommen, welche wie folgt aufgebaut waren (Fraunhofer ISI 2017-2):

1. Im Arbeitspaket Roadmapping sollten neun Roadmaps entwickelt werden, welche sowohl technologische Kriterien der Batterie-FuE wie z. B. Leistungseigenschaften und Zellchemien als auch marktseitige Aspekte wie z. B. Leistungsanforderungen und Anwendungsvielfalt sowie Marktdurchdringung berücksichtigen. Dazu galt es, eine ganzheitliche Perspektive der System- und Innovationsforschung einzunehmen,
2. Im Arbeitspaket Nachhaltigkeit sollten relevante Batterietechnologien mit einer (roh-) stofflichen Perspektive analysiert werden, was z. B. die Rohstoffverfügbarkeit der eingesetzten Materialien sowie ihr Recycling anbelangte,
3. Im Arbeitspaket Bewertung sollten alle Perspektiven zusammengeführt und darauf aufbauend die Entwicklung von Szenarien vorgenommen werden.

Das Begleitvorhaben hatte das Ziel, die Forschung und Entwicklung an LIB in Verbindung mit Aspekten der Nachhaltigkeit zu analysieren, fördernde und hemmende Schlüsselfaktoren wie Treiber und Hindernisse ausfindig zu machen und damit die aussichtsreichen Entwicklungspfade für eine erfolgreiche Einführung von LIB in zahlreichen Anwendungsfeldern der Elektromobilität und stationären Energiespeicherung aufzuzeigen.

Das erstgenannte Arbeitspaket umfasste die Erstellung von neun einzelnen Roadmaps (Abbildung 13), wovon auf die LIB eine im Juni 2010 erstellte Technologie-Roadmap für die Darstellung der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Zellkonfigurationen, eine im Februar 2012 veröffentlichte Produkt-Roadmap für die Darstellung der über verschiedene Anwendungen hinweg unterschiedlichen Marktanforderungen sowie eine im Dezember 2015 veröffentlichte Gesamt-Roadmap mit einem umfassenden Überblick über den Status quo und die Entwicklungspotenziale von LIB für elektromobile und stationäre Anwendungen entfallen.

So konnten technologieseitig z. B. Fragen nach kritischen Rohstoffen (z. B. nach Kriterien der geografischen Verteilung, Preisentwicklung oder des Zugriffs) im Kontext der in der Roadmap identifizierten Entwicklungen untersucht und in der Gesamt-Roadmap verortet werden, während in der Produkt-Roadmap Fragen der Wirtschaftlichkeit und Marktpenetration (u. a. nach Geschäftsmodellen, Infrastrukturaufbau, etc.) untersucht und so die Gesamt-Roadmap marktseitig ergänzt wurde.

Abbildung 13: Übersicht der im Projekt LIB 2015-Roadmapping zur Erstellung geplanten und mit Stand von Januar 2016 veröffentlichten Roadmaps.

Quelle: Fraunhofer ISI 2017-2.

Der Erstellung jeder Roadmap waren Experteninterviews zur Rahmensetzung und Vorbereitung des jeweiligen Roadmapping-Workshops vorgeschaltet. Zu den Workshops wurden jeweils spezifische Expertengruppen (z. B. Batteriehersteller, Zulieferer, Automobilhersteller, etc.) eingeladen. Die Ergebnisse der Roadmapping-Workshops sollten jeweils anhand bibliometrischer oder Marktanalysen und durch den weiteren Auf- und Ausbau des vorliegenden Monitoring-Systems oder eines Markt-Monitoring je nach Roadmap-Schwerpunkt reflektiert und diskutiert werden.

Neben den Roadmaps zu LIB allgemein wurden auch je drei Roadmaps für die sich zur LIB komplementär oder konkurrierend verhaltenden Energiespeicherkonzepten im Sinne der Elektromobilität und in der stationären Energiespeicherung entwickelt. Die zeitlichen Angaben entsprachen dabei einer groben zeitlichen Einordnung der Erarbeitung. Auf die Roadmaps für die stationären Energiespeicher (SES) wird im Rahmen dieser Dissertation aufgrund des gewählten Schwerpunktes der Elektromobilität nicht eingegangen.[20] Stattdessen werden im Folgenden explizit die drei Roadmaps rund um Energiespeicher für die Elektromobilität (ESEM) behandelt.

[20] Diese sowie die übergreifenden Roadmaps zu Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind auf den Webseiten des Fraunhofer ISI frei zum Download verfügbar (Fraunhofer ISI 2017-2).

3.1.2 Technologie-Roadmap ESEM 2030

Während der Fokus der im Jahr 2010 veröffentlichten „Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“ (Fraunhofer ISI 2010-1) auf der FuE an LIB-Zellen einschließlich ihrer Einbettung in das technologische Umfeld zwischen 2010 und 2030 lag, geht die im Jahr 2012 veröffentlichte „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ inhaltlich deutlich darüber hinaus (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 2).[21] In einer logischen Fortsetzung entlang der Wertschöpfungskette von LIB hebt sie die FuE an Lithium-basierten Systemen hervor und berücksichtigt das technologische Umfeld und insbesondere die Brennstoffzellentechnologie zwischen 2011/2012 und 2030. Die einzelnen elektrochemischen Energiespeichertechnologien und auch die Brennstoffzellentechnologie als Energiewandler werden auf der Systemebene zum Zeitpunkt ihrer voraussichtlichen Marktreife in der Roadmap verortet (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 10). Bevor sie jedoch im Rahmen einer Serienproduktion in Elektrofahrzeuge integriert werden können, wird seitens der Industrie je nach Anwendung von einem weiteren Zeitverzug zwischen fünf bis zehn Jahren ausgegangen.

Weil die Automobilindustrie als eine Schlüsselindustrie in Deutschland überragende Bedeutung für die deutsche Volkswirtschaft hat und FuE-Trends von ihr ausgehend auch die FuE in zahlreichen anderen Anwendungen treibt, ist die Roadmap wie die vorliegende Dissertation auf die FuE an Plug-in-Hybridfahrzeugen (engl. „plug-in hybrid electric vehicle“, Abkürzung PHEV) und rein batterieelektrischen Fahrzeugen (engl. „battery electric vehicle“, Abkürzung BEV) mit entsprechender Speicherkapazität des Batteriesystems in der Größenordnung von 5 bis 15 kWh ausgerichtet. Diese beiden Fahrzeugkonzepte der Elektromobilität (siehe Kapitel 3.3.1) stellen z. B. mit ihren Anforderungen einer hohen Energiedichte bei gleichzeitig geringen Kosten, aber auch aufgrund ihres großen Marktpotenzials kurz- bis mittelfristig (PHEV) und mittel- bis langfristig (BEV) die maßgeblichen Anwendungen auf dem Weg zur Markteinführung und -diffusion der Elektromobilität dar. Andere Fahrzeugkonzepte wurden ausgeschlossen, weil sie zum Teil andere Anforderungen an das Batteriesystem stellen und auch deshalb noch nicht so stark im Fokus stehen.

Der Stand der Technik wurde wie folgt definiert:

> „Als elektrochemische Referenztechnologie im Jahr 2012 wurden 4 Volt-LIB mit einer Kathode aus Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) oder Lithium-Eisen-Phosphat (LFP), einer Anode aus Graphit für den Einsatz in PHEV mit ~5 kWh Kapazität, in Elektrofahrzeugen mit Reichweitenverlängerung (engl. „range extended electric vehicle“, Abkürzung REEV) mit ~10 kWh Kapazität bzw. BEV mit ~15 kWh Kapazität herangezogen.“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 10)

[21] Dieses Kapitel 3.1.2 basiert in weiten Teilen auf der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ (Fraunhofer ISI 2012-2), welche von Dr. Axel Thielmann, Andreas Sauer als dem Autor der vorliegenden Dissertation, Prof. Dr. Ralf Isenmann und Prof. Dr. Martin Wietschel am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI erstellt wurde. – Weil die Roadmap teilweise nicht mehr den aktuellen Stand abbildet, sind aktuelle Informationen in den folgenden Abschnitten des Kapitels 3.1 direkt eingearbeitet worden.

Im Detail wurden in der Roadmap die Eigenschaften der folgenden vielversprechenden elektrochemischen Energiespeicher- und -wandler-Systeme quantitativ dokumentiert:

- „Lithium-Ionen-Batterien (mit NMC oder LFP sowie Graphit/4 [Volt]) als elektrochemische Referenztechnologie
- Brennstoffzelle PEM-FC [engl. „proton exchange membrance fuel cell“, deutsch Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle] mit Stack und Wasserstoff-Druckspeicher als alternative Referenztechnologie ab dem Jahr 2014
- 4,4 [Volt]-Lithium-Ionen-Systeme um etwa 2015
- Lithium-basiertes System mit Lithium-Legierungen/Kohlenstoff-Kompositen nach 2015
- Lithium-Schwefel-Systeme um 2020
- Lithium-Polymer-Systeme um 2020
- 5 [Volt]-Lithium-Ionen-Systeme nach 2020“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 10)

Mehr Informationen zu den Batterietechnologien folgen im Kapitel zum aktuellen Stand von FuE (siehe Kapitel 3.3.4). Die zentralen Leistungsparameter in der Roadmap sind:

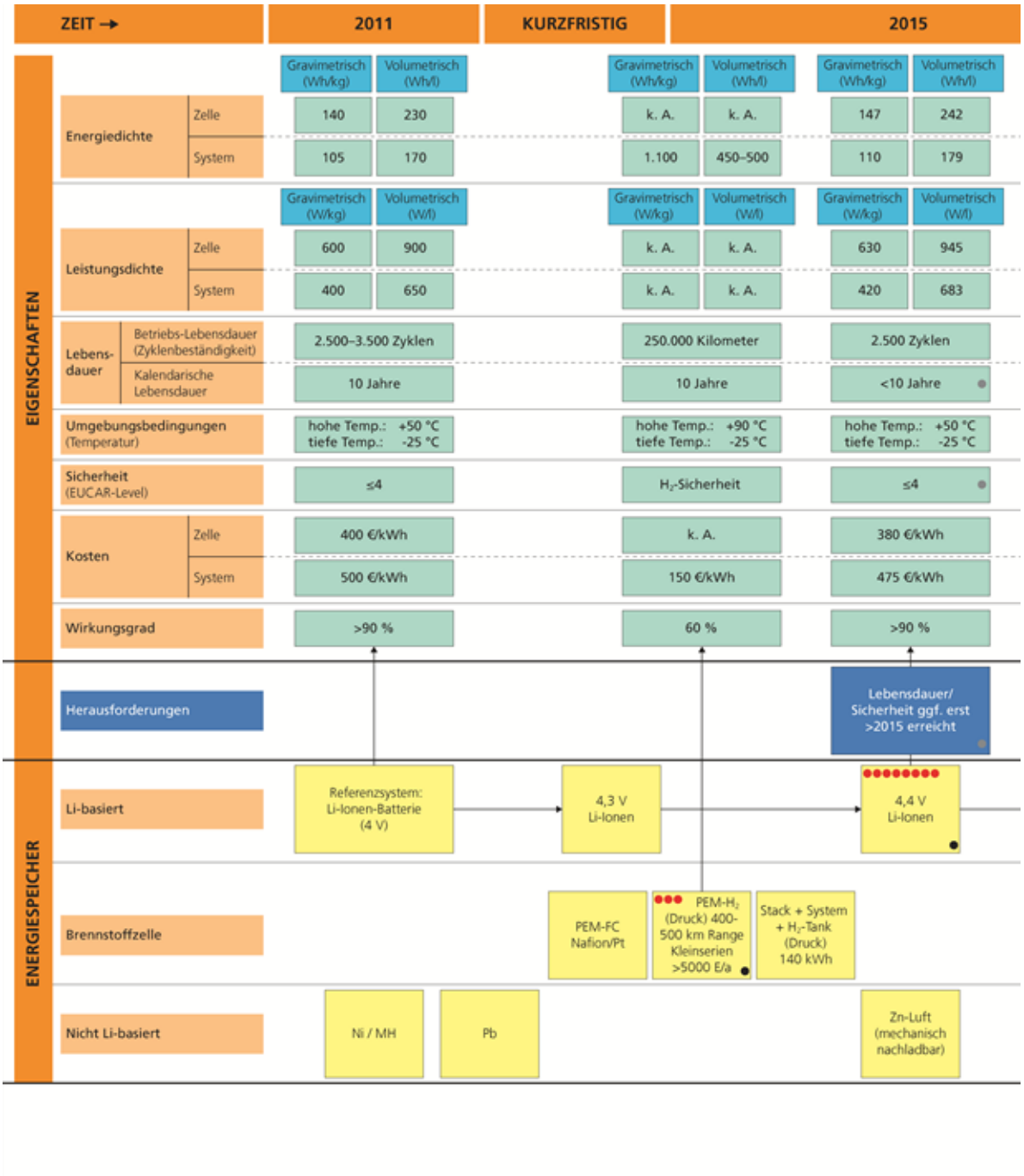
- „Energiedichte (auf Zell- und Systemebene sowie gravimetrisch in Wh/kg und volumetrisch in Wh/l)
- Leistungsdichte (auf Zell- und Systemebene sowie gravimetrisch in W/kg und volumetrisch in W/l)
- Lebensdauer (Betriebslebensdauer in Zyklen und kalendarische Lebensdauer in Jahren)
- Umgebungsbedingungen (tolerierte hohe und tiefe Temperaturen in °C)
- Sicherheit (in Hinsicht auf das EUCAR-Level)
- Kosten (für Zelle und System, in €/kWh)
- Wirkungsgrad in Prozent“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 10)

Mehr Informationen zu den einzelnen Leistungsparametern und ihrer gewünschten Entwicklung in den nächsten Jahren folgen im Kapitel zu Anforderungen und zentralen Leistungsparametern (siehe Kapitel 3.3.3). Um die Leistungsdaten verschiedener Systeme miteinander vergleichen zu können, wurden sie mit Stand Oktober 2012 für die oben genannten Eigenschaften dokumentiert. Weil dabei teilweise zwischen Zell- und Systemebene unterschieden wurde, ist es möglich, Verluste z. B. bei der Energiedichte und den Kosten herauszulesen.

Die vollständige Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 kann auf den folgenden Seiten eingesehen werden (Abbildung 14; Abbildung 15).

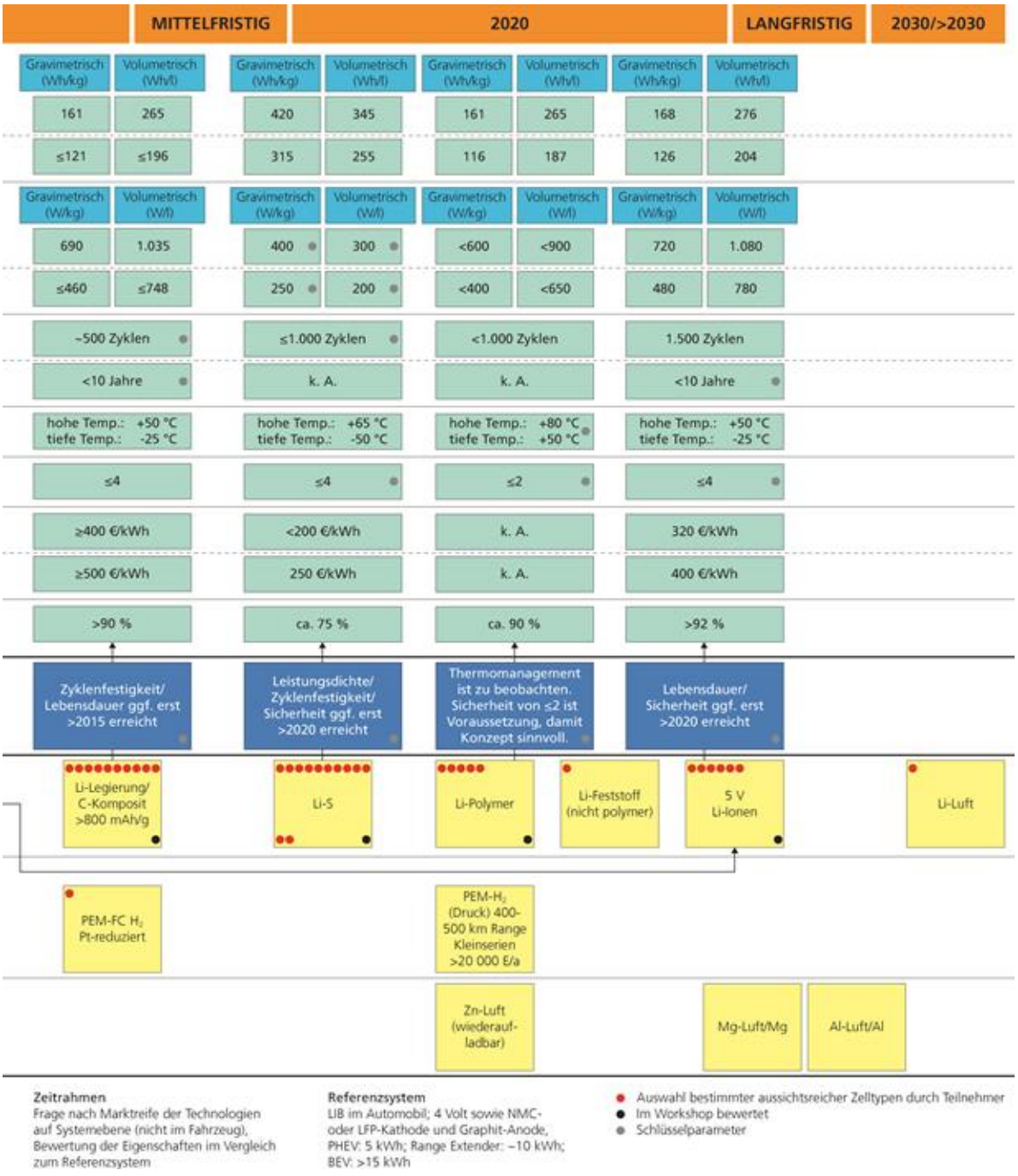
Im Fazit wurde festgehalten, dass neben den zum Zeitpunkt der Roadmap-Veröffentlichung bereits verfügbaren LIB-Systemen auch weiterentwickelte LIB für die Markteinführung und den -hochlauf der Elektromobilität relevant sein werden. Dabei ist zwischen der eher evolutionären Batterieentwicklung entlang dem Hochvolt (HV)-Entwicklungspfad (von 4 Volt- bis 5 Volt-LIB) und der eher disruptiven Batterieentwicklung mit z. B. Lithium-Schwefel- oder Lithium-Luft-Batterietechnologie zu unterscheiden, die sich zeitlich deutlich verzögern werden. Daneben ist insbesondere die PEM-FC als Komplementärtechnologie zu berücksichtigen.

Abbildung 14: Die vollständige Ansicht der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2011 bis 2015.



Quelle: Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 8.

Abbildung 15: Die vollständige Ansicht der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2015 bis 2030.



Quelle: Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 9.

3.1.3 Produkt-Roadmap ESEM 2030

Die im Jahr 2015 veröffentlichte „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ beschreibt die marktseitigen Anforderungen verschiedener Anwendungen und Produkte an die für sie zu entwickelnden elektrochemischen Energiespeichersysteme (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 2).[22] Für die in der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ vorgestellten zentralen Leistungsparameter werden (abgesehen vom Wirkungsgrad in Prozent) für Hybridfahrzeuge (engl. „hybrid electric vehicle“, Abkürzung HEV), PHEV und BEV quantitativ dargelegt, welchen Anforderungen die Batteriesysteme schon heute genügen müssen, und qualitativ dokumentiert, welche Richtung die FuE in den nächsten Jahren nehmen muss.

Dies wird auch auf der Fahrzeugebene fortgesetzt, wo ausgehend vom Stand der Technik die technische Entwicklung im Rahmen des Markthochlaufs von HEV, PHEV und BEV, aber auch Brennstoffzellenfahrzeugen (engl. „fuel cell electric vehicle“, Abkürzung FCEV) abgebildet wird. Insbesondere BEV gelten dabei als Innovationstreiber für LIB in Bezug z. B. auf die Energiedichte und die Kosten der eingesetzten Batteriesysteme, sie bilden deshalb den weitaus wichtigsten Markt für Hochenergie (HE)-LIB-Zellen. Die heute bereits auf dem Markt verfügbaren Fahrzeugkonzepte mit elektrifiziertem Antriebsstrang können zum Beispiel über ihre Preise, Reichweite und Infrastruktur verglichen und bewertet werden.

Dazu werden auch fördernde und hemmende Aspekte der Rahmenbedingungen für die Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen diskutiert, in sechs Kategorien wie folgt:

- Regulierung/Gesetzgebung,
- Preisentwicklungen,
- Infrastruktur,
- Normen/Standards,
- Kundenakzeptanz,
- Fahrzeugangebot.

Die Anforderungen an die Fahrzeugbatterien haben sich in den letzten Jahren dynamisch weiterentwickelt (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 6ff.). Dies hatte große Auswirkungen auf die FuE an Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität sowie die konkrete Auswahl relevanter Batterietechnologien: Sollte eine bestimmte Batterietechnologie keine nennenswerten Vorteile in den Schlüsselparametern wie z. B. Energiedichte und Kosten bringen, aber gleichzeitig andere Leistungsparameter vernachlässigen, so hatte dies direkte Auswirkung auf ihre Bewertung und damit auf den in sie investierten FuE-Aufwand. Über die Jahre zeigte sich so auch, dass verschiedene Batterietechnologien eher für die stationäre Energiespeicherung relevant sind als für den Einsatz in Anwendungen der Elektromobilität.

---

[22] Dieses Kapitel 3.1.3 basiert in weiten Teilen auf der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ (Fraunhofer ISI 2015-1), welche von Dr. Axel Thielmann, Andreas Sauer als dem Autor der vorliegenden Dissertation und Prof. Dr. Martin Wietschel am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI erstellt wurde.

Die Schlüsselparameter Energiedichte und Kosten stehen hinsichtlich der Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge in einem direkten Zusammenhang. Dem Wunsch vieler potenzieller Kunden nach einer höheren Reichweite ist mit Batterietechnologien mit einer hohen Energiedichte nachzukommen, welche in Batteriesystemen bzw. im Verbund zahlreicher Batteriezellen ggf. sogar noch optimiert werden kann. Weil darüber hinaus Elektrofahrzeugkonzepte mit höheren Reichweiten aber oft auch größere Batteriesysteme aufweisen, müssen die Kosten der Batteriezellen sinken, um die Preise der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu herkömmlichen Automobilen mit Verbrennungsmotor nicht noch teurer wie heute werden zu lassen.

Während die heute größtenteils kostenoptimierten Elektrofahrzeugmodelle mit rund 25 kWh Batteriekapazität, aber nur 150 bis 200 Kilometern Reichweite von vielen Kunden aufgrund ihrer geringen Reichweite abgelehnt werden, sind die Elektrofahrzeuge von Tesla Inc. (siehe Kapitel 4.3.2.2) mit teilweise 100 kWh Batteriekapazität und 300 bis 600 Kilometern Reichweite für die breite Masse an Kunden jedoch kaum zu finanzieren. Deshalb erarbeitet die Roadmap ein Szenario für reichweitenoptimierte und trotzdem finanzierbare Elektromobilität, welche schon in zehn bis zwanzig Jahren einen Massenmarkt erreichen kann.

Im Kontext einer reichweitenoptimierten, Batterie-basierten Elektromobilität könnten sich die Fahrzeugkonzepte BEV und FCEV dann auch zu stark konkurrierenden Konzepten entwickeln, beide stehen z. B. hinsichtlich dem notwendigen Aufbau flächendeckender Ladeinfrastruktur vor ähnlichen Herausforderungen. PHEV wiederum werden nur dort noch näher analysiert, wo Vergleiche und eine Einsortierung möglich sind. HEV werden nicht weiter behandelt, weil sie für Deutschland bzw. Europa keine zentrale Rolle spielen.

Kostenoptimierte Elektrofahrzeuge mit geringer Reichweite werden aber auch in den nächsten Jahren noch für innovativ denkende, im Alltag flexible Erstkäufergruppen und besondere Einsatzzwecke attraktiv sein (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 3). Auch das andere Extrem, die eher hochpreisigen Elektrofahrzeuge mit hoher Reichweite insbesondere von Tesla Inc. werden weiterhin ihren Markt finden. Für den breiten Massenmarkt arbeitet aber auch Tesla Inc. bereits an einem kostenreduzierten Fahrzeugkonzept mit gleichzeitig relativ hoher Reichweite, welches seinen Markteintritt bis zum Jahr 2020 erleben und dann möglichst viele Schichten der Bevölkerung begeistern soll. Der Entwicklungspfad über die nächsten Jahre kann wie folgt beschrieben werden:

> „Durch die schrittweise Erhöhung von Reichweiten durch Verbesserung der Batterietechnik ebenso wie ingenieurstechnische Verbesserungen des Energieverbrauchs der Elektrofahrzeuge können bis zum Jahr 2030 Fahrzeuge entwickelt werden, welche dem kostenoptimierten Pfad folgen, schließlich aber in den Bereich von Reichweiten herkömmlicher Automobile mit Verbrennungsmotor kommen und zudem schnell aufgeladen werden können.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 3)

Mit diesem Zeitfenster lässt sich aber auch begründen, warum der Markthochlauf für Elektrofahrzeuge aktuell noch relativ schleppend anläuft und auch in den nächsten Jahren noch relativ langsam beschleunigen wird. Während das für die potenziellen Kunden kein allzu großes Problem darstellt, resultieren für die Automobilindustrie angesichts der zunehmend strengen

Emissionsregulierung über alle verkauften Fahrzeuge eines Unternehmens hinweg sowie die Notwendigkeit der zeitnahen Amortisation hoher Investitionen durchaus schwierige Herausforderungen. Von einem großen Marktpotenzial allein kann kein Unternehmen leben.

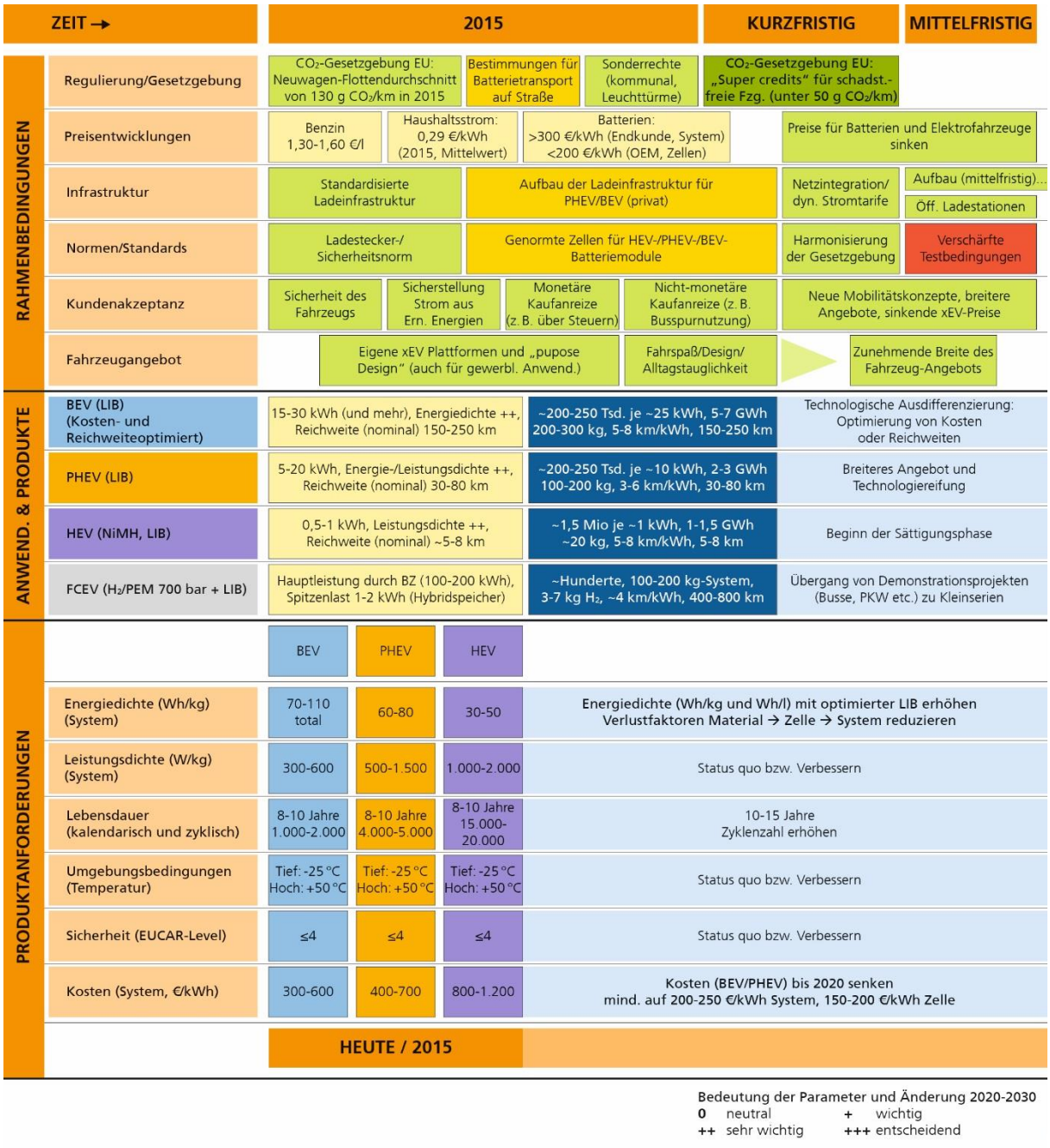
Es ist davon auszugehen, dass in Deutschland bis zum Jahr 2020 zwischen 200.000 und 300.000 und bis zum Jahr 2030 zwischen eine und drei Millionen Elektrofahrzeuge auf den Straßen sein könnten. Schon letztgenanntes Bestandsziel hängt aber sowohl nach unten als auch nach oben von den bis dahin gesetzten Rahmenbedingungen ab, welche von Gesellschaft und Politik entsprechend zu setzen sind. Regionale Unterschiede, wie sie schon heute in der Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen selbst innerhalb des gleichen Landes zu beobachten sind, wird es auch in Zukunft geben. Global gesehen wird die Elektromobilität allerdings schon bis zum Jahr 2050 zu einem groß angelegten Systemwandel führen, der nicht nur die Automobilindustrie selbst strukturell tief verändern wird. Weil Elektromobilität viel mehr Potenzial bietet, als rein von der Batterie her gedacht „nur eine neue Komponente“, ist die Analyse ihrer Wertschöpfungspotenziale deutlich komplexer. Zwar hängt die Reichweite eines Elektrofahrzeugs direkt mit der Speicherkapazität des eingesetzten Batteriesystems zusammen, aber auch andere Komponenten wie die Leistungselektronik oder das Thermomanagement sind teilweise neu zu entwickeln und teilweise zu überarbeiten.

Die vollständige Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 kann auf den folgenden Seiten eingesehen werden (Abbildung 16; Abbildung 17).

Die „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ hilft, die Komplexität der Veränderungen für alle interessierten Zielgruppen herunter zu brechen (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 32). Sie zeigt aber auch, worauf die Prioritäten nicht nur in der FuE, sondern auch bei der Gestaltung der Rahmenbedingungen gelegt werden müssten, um der Elektromobilität sukzessive zum Erfolg zu verhelfen: Um auch mit kostenoptimierten Elektrofahrzeugen mit geringer Reichweite Markterfolge zu erzielen, müsste die Automobilindustrie enger mit den Energieversorgungsunternehmen kooperieren, um zeitnah eine schnellladefähige Ladeinfrastruktur bereitzustellen. Dann wären auch Fahrten über längere Distanzen bei relativ kurzer Ladedauer mit den verfügbaren Elektrofahrzeugen darzustellen. Mit diesem Beispiel wird deutlich, dass die Veröffentlichung ein übergeordnetes Ziel verfolgt:

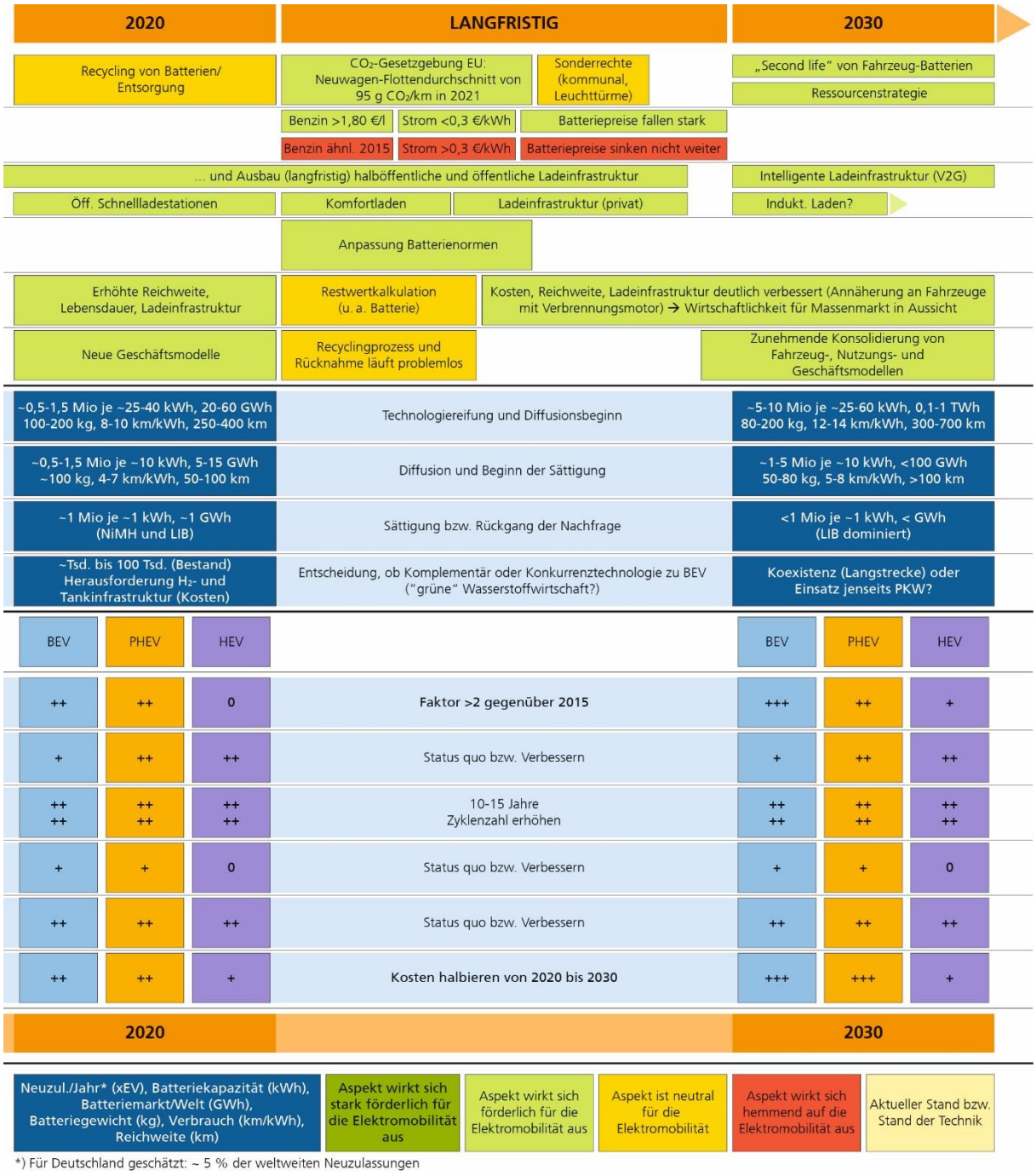
> „Durch die Rechnung und Illustration der Ergebnisse in Szenarien soll die Roadmap zudem ein Stück weit zeitloser sein und als ein Werkzeug dienen, da sich zukünftige Entwicklungen nun in einer etablierten Systematik einordnen lassen und damit überprüfbar wird, welchem Entwicklungspfad die Elektromobilität folgt. Auch eigene Berechnungen lassen sich dank der in der Roadmap angegebenen Parameter leichter durchführen.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 32)

Abbildung 16: Die vollständige Ansicht der Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2015 bis mittelfristig.



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 4.

Abbildung 17: Die vollständige Ansicht der Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2020 bis 2030.



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 5.

3.1.4 Gesamt-Roadmap ESEM 2030

Die „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ verbindet die beiden oben vorgestellten Veröffentlichungen, die „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ (siehe Kapitel 3.1.2) und die „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ (siehe Kapitel 3.1.3).[23] In ihr werden die Entwicklungspfade von technologischen FuE an Batteriezellen über die Bereitstellung von vollständigen Batteriesystemen bis hin zur Integration in Elektrofahrzeuge dokumentiert, welche mit der höchsten Wahrscheinlichkeit umgesetzt werden (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 2). Das Technologieumfeld von Lithium-basierten Batterietechnologien, nicht Lithium-basierten Batterietechnologien sowie der Brennstoffzelle wird zwar umfassend dokumentiert und diskutiert, die zentrale Rolle spielen aber heutige LIB sowie ihre evolutionären und disruptiven Weiterentwicklungen. Zuerst werden die Fortschritte in der Batterie-FuE und -produktion entlang einiger Schlüsselparameter wie z. B. der Energiedichte oder den Kosten diskutiert, bevor mittels drei Lernkurvenanalysen für die gravimetrische Energiedichte, der volumetrischen Energiedichte sowie den Zellkosten aufgezeigt wird, welche Entwicklungspotenziale die LIB bietet.

Hinsichtlich der im Fokus stehenden „Anwendungen & Produkte“ werden HEV (mit einer Batteriekapazität von <3 kWh), PHEV (5-20 kWh) und BEV (>20 kWh) anvisiert. Mittels der schon in der Produkt-Roadmap definierten (Mindest-)Anforderungen an Elektrofahrzeuge bzw. die in ihnen verbauten Batteriesysteme sowie ihre Leistungsparameter können die Batterietechnologien identifiziert werden, welche für die oben genannten Anwendungen das größte Potenzial aufweisen und auch deshalb mit der größten Wahrscheinlichkeit eingesetzt werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Diskussion zur zeitlichen Verortung von Technologiesprüngen z. B. weg von der heutigen Referenztechnologie, also wann von einer Batterietechnologie auf eine andere Batterietechnologie umgestiegen werden kann. Dazu muss die „neue“ Batterietechnologie alle Leistungsparameter des Status quo mindestens erfüllen bzw. eine niedrigere Leistung in verschiedenen Parametern wäre ohne eine deutliche Weiterentwicklung in einem oder mehreren Schlüsselparametern inakzeptabel.

Aus dieser Diskussion kann abgeleitet werden, welche Batterietechnologien aus dem potenziellen Angebot für Elektrofahrzeuge unter Einbezug der jeweiligen (Mindest-)Anforderungen noch nicht in Frage kommen bzw. welche Leistungsparameter genau dies verhindern (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 18). Damit ist bekannt, wo die großen Herausforderungen für die FuE für die nächsten Jahre liegen. Diskutiert wird aber auch der konkrete Mehrwert einer „neuen“ Batterietechnologie gegenüber der aktuellen Referenztechnologie für die Anwendungen und Produkte, in denen sie eingesetzt werden könnte. Und weil auch für ihre Massenproduktion einige Herausforderungen zu lösen sind, kann von der Fertigstellung der FuE an einem Batteriesystem bis hin zu seiner Fahrzeugintegration durchaus Zeit vergehen:

---

[23] Dieses Kapitel 3.1.4 basiert in weiten Teilen auf der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“ (Fraunhofer ISI 2015-3), welche von Dr. Axel Thielmann, Andreas Sauer als dem Autor der vorliegenden Dissertation und Prof. Dr. Martin Wietschel am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI erstellt wurde.

> „Zwischen dem unten in der Roadmap beschriebenen Technologie-Angebot und dem tatsächlich[en] Einsatz und Markteintritt (und damit erst Start einer Technologiediffusion) können somit durchaus 10 bis 15 Jahre oder gar mehr liegen." (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 18)

Hinsichtlich der in Frage kommenden Energiespeichertechnologien bzw. dem Vergleich ihrer Eigenschaften mit den (Mindest-)Anforderungen zeigt die Gesamt-Roadmap auf einen weitestgehend evolutionären Entwicklungspfad auf, welcher in der Batterietechnologie für Elektrofahrzeuge in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren keine wirklich disruptiven Technologiesprünge aufweist (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 21). Damit ist jedoch auch klar, dass keine unüberwindbaren Hindernisse in der FuE oder in der Massenproduktion zu erwarten sind.

Die LIB als Plattform- und aktuelle Referenztechnologie bietet bis zum Jahr 2030 noch einiges Weiterentwicklungspotenzial, und gleichzeitig ist in diesem Zeitraum keine andere Batterietechnologie abzusehen, die den bis dato dokumentierten Anforderungen der Elektromobilität ebenso gut gerecht werden kann (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 3). Schon aus der Analyse von Lernkurven der kleinformatigen LIB in der Konsumelektronik resultiert, dass auch die Energiedichte der großformatigen LIB bis zum Jahr 2030 auf bis zu 300 Wh/kg verdoppelt und die Kosten auf bis unter 100 Euro/kWh reduziert werden können, beides auf Zellebene. Selbst potenziell disruptive Batterietechnologien mit deutlich höheren Energiedichten wie z. B. Lithium-Schwefel- oder Lithium-Luft-Batterien müssten deshalb erst einmal in einer Massenproduktion herstellbar sein, und dann auch noch zu so geringen Kosten, dass sie attraktiver als die spätestens dann wirklich günstigen LIB sind. Aufgrund des theoretisch sehr großen Potenzials dieser zukünftigen Batterietechnologien, mit potenziell deutlich höheren Energiedichten die Reichweite von Elektrofahrzeugen deutlich zu steigern, ist die FuE an ihnen aber auch weiterhin nicht zu vernachlässigen.

Insbesondere die Hochenergie-LIB (HE-LIB) weist heute großes Potenzial auf. Ihr Entwicklungspfad sieht vor, dass unter den Zellchemien bzw. Kathodenmaterialien wie Lithium-Eisenphosphat (LFP), Lithium-Nickel-Kobaltaluminium (NCA) und Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) mit Graphit-Anode, die heute in Batteriesystemen für PHEV und BEV eingesetzt werden, insbesondere letztgenanntes Kathodenmaterial ein hohes Optimierungspotenzial für die Energiedichte bietet. Mit mehr Lithium, weniger Kobalt und damit mehr Nickel sollen diese HE-LIB zusammen mit Silizium-Kohlenstoff (Si/C)-Kompositen als Anodenmaterial in der aktuellen FuE weiter verbessert und damit letztlich die Reichweite von Elektrofahrzeugen erhöhen. Mit der Senkung des Kobaltanteils werden auch die Kosten der Batteriezellen sinken, und weiterhin werden ingenieurstechnische Verbesserungen z. B. auf Systemebene dafür sorgen, dass auch andere Aspekte wie der Energieverbrauch optimiert werden.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass solchermaßen optimierte LIB in den kommenden Jahren, für den Markthochlauf der Elektromobilität, als Schlüsseltechnologie gelten:

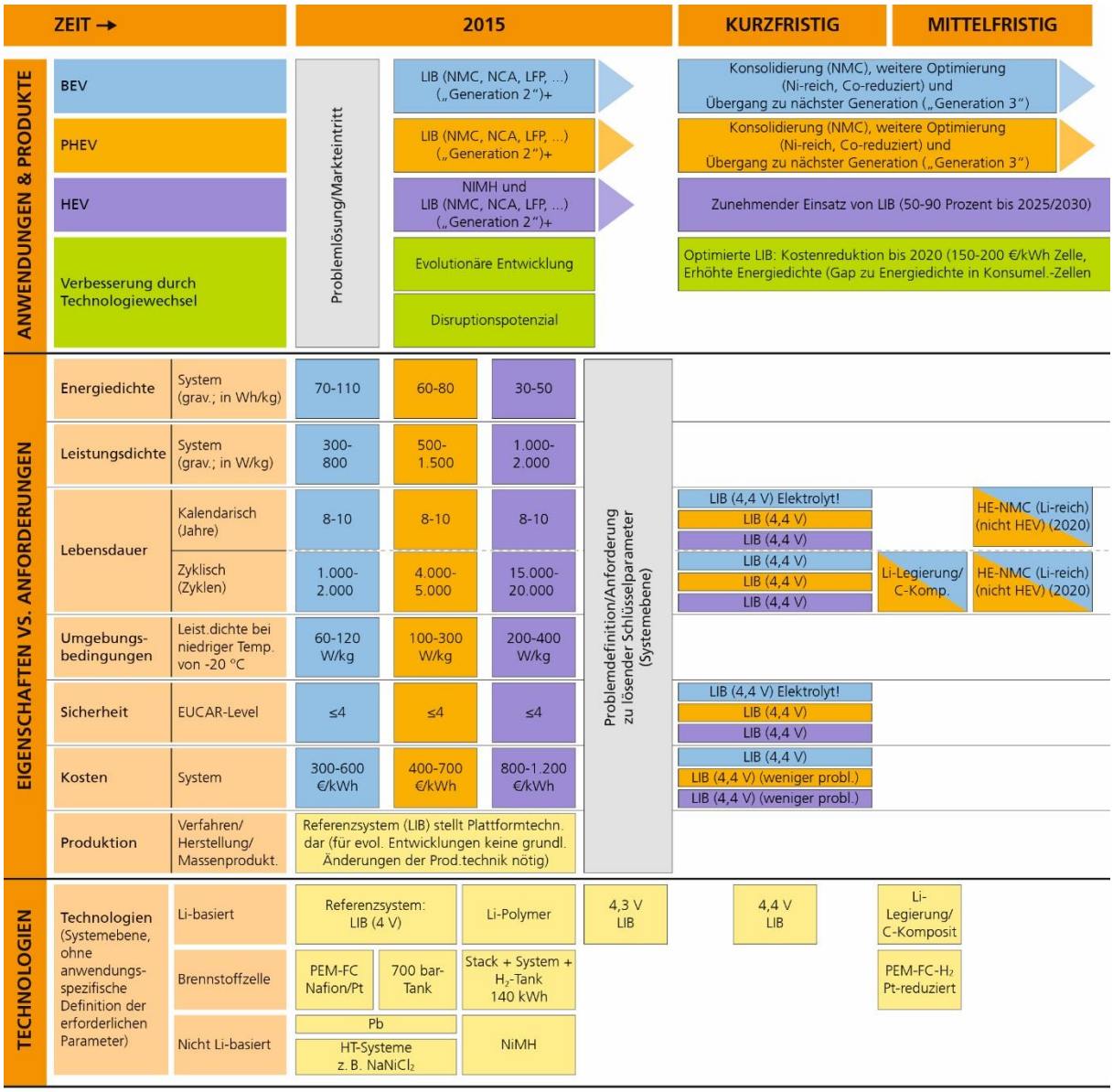
> „[Es handelt sich um eine] Technologie, welche geringfügige bzw. gut absehbare Veränderungen in der Produktionstechnologie mit sich bringt, andererseits aber noch viel Entwicklungspotenzial bzgl. Zell-Materialien, -Komponenten bis hin zum System und der

> Fahrzeugintegration und dem Fahrzeugdesign birgt. Ein Verständnis und Zugang zu Zellproduktionsanlagen und Know-how in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten ist daher mit entscheidenden Wettbewerbsvorteilen für Forscher, Entwickler, Zulieferer (z.B. Material-/Komponentenhersteller, Maschinenbau etc.) und Zellhersteller in diesem Bereich verbunden.“ (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 28)

Die vollständige Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030 kann auf den folgenden Seiten eingesehen werden (Abbildung 18; Abbildung 19). Viele weitere Ausführungen z. B. zu den einzelnen Elektrofahrzeug-Typen können in der eigentlichen Veröffentlichung eingesehen werden (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 22ff.).

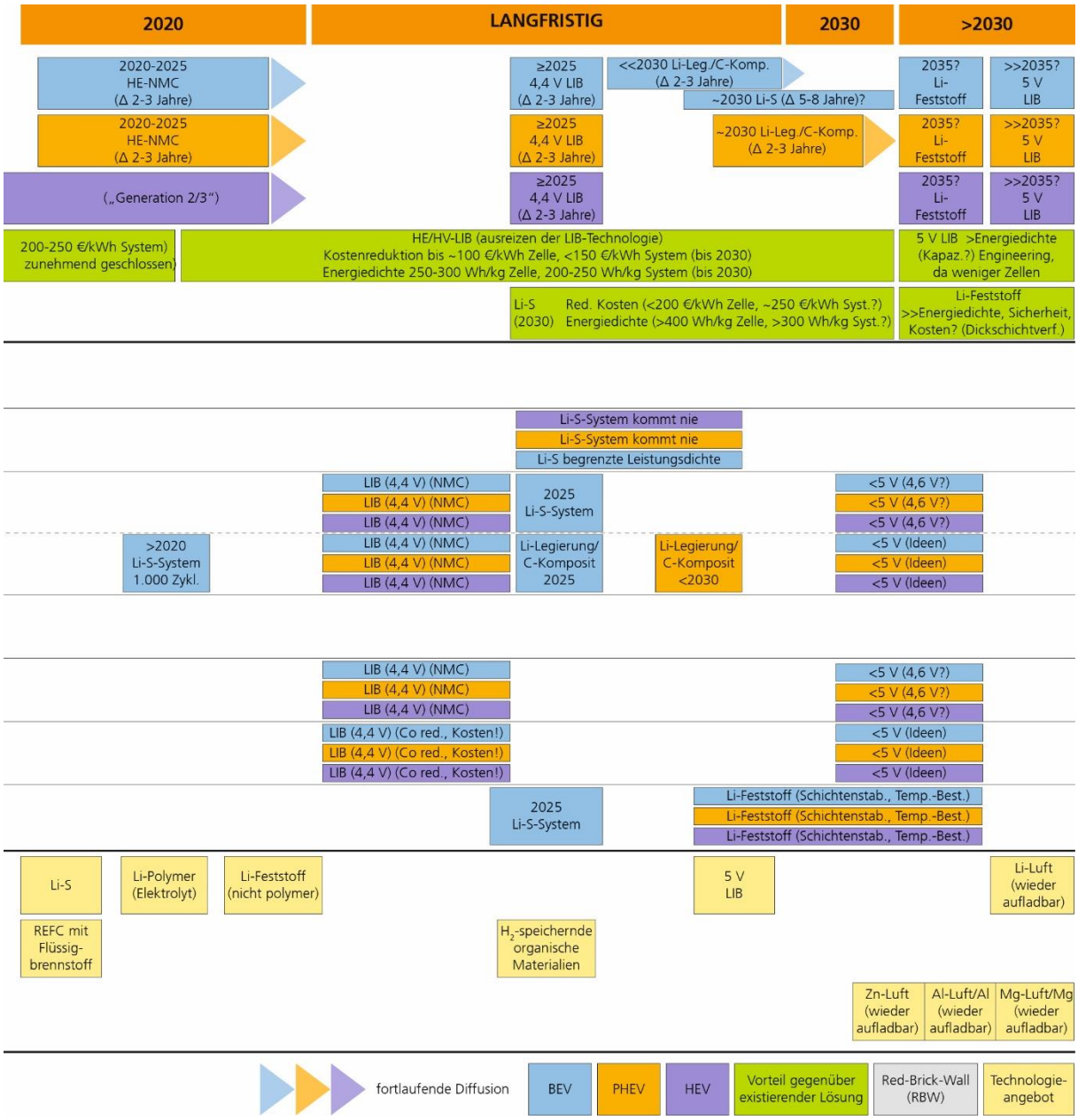
Im Folgenden wird auch der aktuelle Stand der FuE an elektrochemischen Energiespeichertechnologien vertieft betrachtet (siehe Kapitel 3.3.4).

Abbildung 18: Die vollständige Ansicht der Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2015 bis mittelfristig.



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 14.

Abbildung 19: Die vollständige Ansicht der Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2020 bis über 2030 hinaus.



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 15.

3.2 Allgemeine Einführung: Energiespeichertechnologien

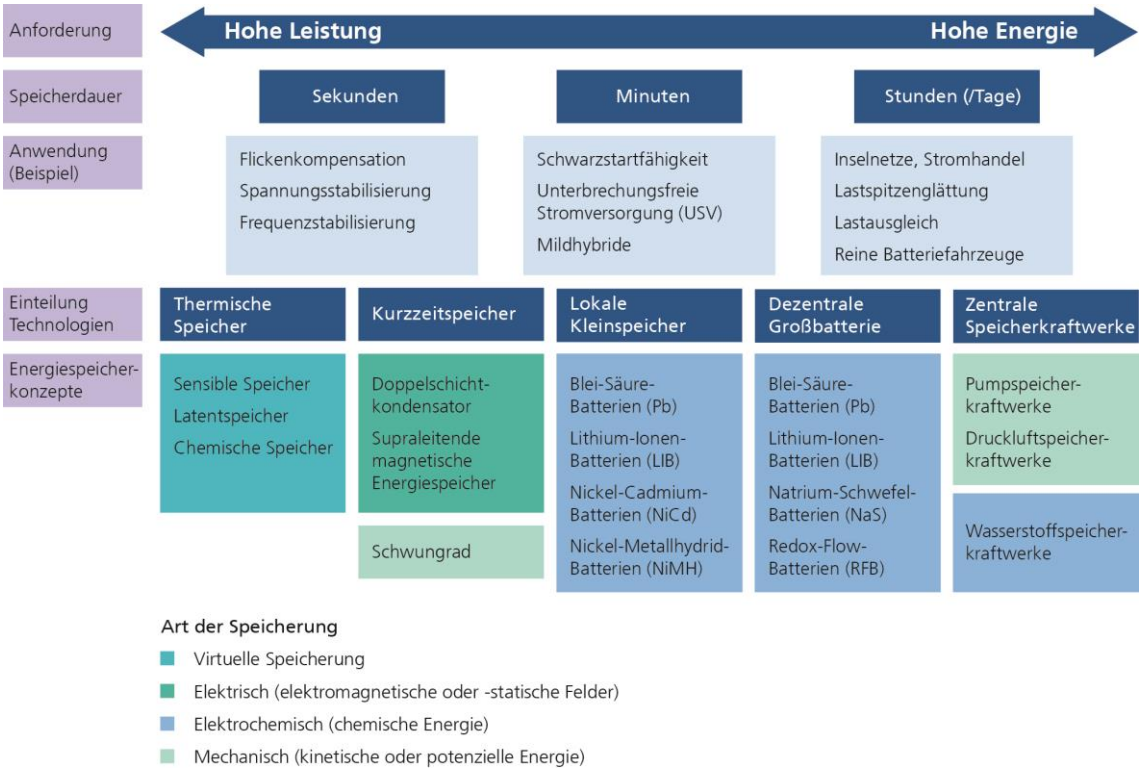
Weil für die vorliegende Dissertation elektrochemische Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität im Vordergrund stehen (siehe Kapitel 3.3), wird im zweiten Teil dieses dritten Kapitels mit Hilfe einer Kategorisierung zuerst ein Überblick über alle möglichen Alternativen zur Energiespeicherung gegeben. Anschließend wird die Funktionsweise elektrochemischer Energiespeichertechnologien allgemein erläutert.

3.2.1 Grundlegende Energiespeicher-Kategorisierung

Grundsätzlich kann elektrische Energie in zahlreichen verschiedenen Energieformen vorliegen, und deshalb auch auf vielfältige Art und Weise gespeichert werden (Wietschel et al. 2010, Seite 521ff.). Im Normalfall wird Energie indirekt gespeichert, wobei im Überschuss erzeugter Strom dazu genutzt wird, elektrische Energie entweder in elektrochemische, mechanisch-kinetische oder mechanisch-potenzielle Energie zu wandeln und so einzuspeichern. Zur Verwendung dieser Energie wird sie in elektrische Energie zurückgewandelt. Die elektrische Energie kann auch direkt eingespeichert werden, was für große Energiemengen allerdings sehr aufwändig ist. Einen ähnlichen Fall stellen thermische Speicher dar, deren Energie direkt als thermische Energie eingesetzt wird, weshalb auch von der sogenannten virtuellen Speicherung gesprochen wird. Die verschiedenen Energiespeicherkonzepte lassen sich aufgrund der großen Leistungsunterschiede von einigen Watt bis Gigawatt entlang ihrer Speicherdauer grob in fünf verschiedene Technologie-Kategorien einteilen (Abbildung 20): Thermische Speicher, Kurzzeitspeicher, Lokale Kleinspeicher, Dezentrale Großbatterie, Zentrale Speicherkraftwerke.

Bei den angegebenen Anwendungen wiederum kommen zahlreiche Beispiele aus der stationären Energiespeicherung bzw. finden ihr jeweiliges Einsatzgebiet vor oder im (auf Seiten der Energieversorger) oder nach dem elektrischen Stromnetz (auf Seiten der Energieverbraucher). Weil in der vorliegenden Dissertation Anwendungen in der Elektromobilität im Vordergrund stehen sollen, sind vor allem die elektrochemischen Energiespeichertechnologien in der Kategorie „Lokale Kleinspeicher“ von Interesse. Sie werden im Normalfall, z. B. wenn in einem privaten Haushalt das Elektrofahrzeug über Nacht aufgeladen werden soll, an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Wie groß der im Elektrofahrzeug eingesetzte Energiespeicher sein muss bzw. ob er eher hohe Leistung oder hohe Energie bereitstellen soll, hängt auch vom eingesetzten Fahrzeugkonzept ab (siehe Kapitel 3.3.1). Als Beispiel dafür seien „Mildhybride“ (mit einer Speicherdauer im Minuten-Bereich) und „Reine Batteriefahrzeuge“ (mit einer Speicherdauer im Stunden-Bereich) schon an dieser Stelle genannt.

Abbildung 20: Klassifizierung gängiger Energiespeichertechnologien.



Quelle: Fraunhofer ISI 2012-1, Seite 6 auf Basis von Wietschel et al. 2010, Seite 521ff.

3.2.2 Funktionsweise elektrochemischer Energiespeicher

Selbst die heutigen, technologisch weit fortgeschrittenen elektrochemischen Energiespeichertechnologien stellen im Prinzip eine weiterentwickelte Form des als galvanische Zelle bekannten Konzepts zur Speicherung von elektrischer Energie in elektrochemischer Form dar (TAB 2012, Seite 25f.). In einer galvanischen Zelle laufen in zwei Kammern bzw. an zwei Elektroden elektrochemische Reaktionen ab wie folgt: An der negativen Elektrode bzw. der Anode gibt das sogenannte Reduktionsmittel Elektronen ab und wird oxidiert. An der positiven Elektrode bzw. der Kathode nimmt das sogenannte Oxidationsmittel Elektronen auf und wird damit reduziert. Oxidations- und Reduktionsmittel sind als grundlegende Bestandteile einer galvanischen Zelle vorzuhalten, sie bilden das sogenannte Redoxpaar. Die beiden Elektroden wiederum stellen eine Art Katalysator für die in den beiden Kammern ablaufenden Teilreaktionen dar. Über eine sogenannte „Ionenbrücke“ zwischen den Kammern kann ein Ionenaustausch stattfinden. Dies ist ein Elektrolyt in meist flüssiger oder gelartiger, heute aber zunehmend auch in fester Form. Ein sogenannter Separator ermöglicht den Übergang der Ionen, unterbindet als Membran aber den direkten Kammerkontakt.

Werden Anode und Kathode mit einem elektrischen Leiter verbunden, beginnen die beschriebenen Reaktionen in den Kammern abzulaufen, und es wird ein elektrischer Gleichstrom erzeugt. Die Zellspannung wird begrenzt durch die sogenannten elektrochemischen Potenziale der beiden an Anode und Kathode ablaufenden Reaktionen. Werden mehrere galvanische Zellen hintereinander geschaltet, können höhere Spannungen erzielt werden. Ganz allgemein

formuliert wird in der FuE an galvanischen Zellen sowohl an der richtigen Kombination geeigneter Redoxpaare gearbeitet, es werden vielversprechende Elektrolyte und Separatoren entwickelt sowie effektive Katalysatoren erforscht. Galvanische Zellen bieten einen sehr hohen Wirkungsgrad, weil sie lokale Emissionen praktisch vollständig vermeiden. Der FuE-Aufwand ist deshalb so hoch, weil ihre Hauptschwierigkeit in der begrenzten Speicherfähigkeit von elektrischer Energie liegt. Dabei lassen sich Lade- und Entladevorgang unterscheiden, die im Folgenden am Beispiel einer LIB exemplarisch erläutert werden. Die Bedeutung von Lithium für die Funktionsweise einer LIB liegt im Allgemeinen in seiner Wanderung als Ion, welche es von der positiven Elektrode bzw. Kathode zur negativen Elektrode bzw. Anode im Falle der Ladung und umgekehrt für den Fall der Entladung vornimmt.

3.2.2.1 Ladevorgang

Beim Aufladen einer LIB wird die einzuspeichernde elektrische Energie über die positive Graphit-Elektrode bzw. Kathode eingebracht (Sauer 2011-1, Seite 78). Die darin befindlichen Elektronen gehen zusammen mit den bereits im Elektrolyten vorliegenden Lithium-Kationen als vollständige Lithium-Atome auf und werden im Graphitgitter eingelagert:

$$n\,C + x\,Li^+ + x\,e^- \rightarrow Li_xC_n.$$

An der negativen Lithium-Kobaltoxid-Elektrode (Summenformel $LiCoO_2$) bzw. Anode wird mit der abnehmenden Anzahl von Lithium-Kationen im Elektrolyten Nachschub freigesetzt:

$$Li_yCoO_2 \rightarrow Li_{y-x}CoO_2 + x\,Li^+ + x\,e^-.$$

Daneben werden auch Elektronen freigesetzt, die durch einen Leiter zur Kathode wandern. Im Ladevorgang „wächst“ die Kathode, während die Anode „schrumpft“. Der Vorgang endet, wenn kein Anodenmaterial oder keine Lithium-Kationen im Elektrolyten mehr verfügbar sind oder im Graphitgitter keine weiteren Lithium-Atome mehr eingelagert werden können.

3.2.2.2 Entladevorgang

Beim Entladen einer LIB verläuft die obige Schilderung genau entgegengesetzt ab, und es wird die eingespeicherte elektrochemische Energie über die Graphit-Anode entnommen (Sauer 2011-1, Seite 79f.). An dieser Anode werden Lithium-Kationen freigesetzt und sie diffundieren durch den Elektrolyten Richtung Lithium-Kobaltoxid-Kathode:

$$Li_xC_n \rightarrow C_n + x\,Li^+ + x\,e^-.$$

Die freigesetzten Elektronen wandern durch den Leiter ebenfalls zur Kathode. Dort angekommen reagieren die Lithium-Kationen mit den eintreffenden Elektronen und werden wieder im Lithium-Kobaltoxid-Gitter eingelagert:

$$Li_{y-x}CoO_2 + x\,Li^+ + x\,e^- \rightarrow Li_yCoO_2.$$

Mit den genau entgegengesetzten Begrifflichkeiten drehen sich auch die Ab- und Zunahme des Elektrodenvolumens sowie die Bedingungen für die Dauer des Entladevorgangs.

3.3 Elektrochemische Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität

In diesem dritten Teil des dritten Kapitels wird zuerst geklärt, welche Fahrzeugkonzepte im weitesten Sinne zur Elektromobilität gehören, bevor durch eine Analyse der politischen Rahmenbedingungen in Deutschland erläutert wird, welche Fahrzeugkonzepte hierzulande als tatsächlich zukunftstauglich gelten und für welche die entsprechenden elektrochemischen Energiespeichertechnologien gefördert werden. Das ist deshalb relevant, weil ganz konkrete Anwendungen der Elektromobilität jeweils spezifische Anforderungen an und zentrale Leistungsparameter für die darin eingesetzten Energiespeichersysteme mit sich bringen. Anschließend wird der aktuelle Stand von FuE derjenigen Energiespeichertechnologien diskutiert, welche im Rahmen der in Deutschland zur Elektromobilität gehörenden Fahrzeugkonzepte eingesetzt werden können. Nicht alle bekannten elektrochemischen Energiespeichertechnologien sind für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte der Elektromobilität geeignet.

Der Fokus liegt dabei beispielhaft auf Deutschland, das wie zahlreiche andere Länder weltweit damit begonnen hat, Elektrofahrzeuge im großen Stil zu fördern. Von der FuE sowie Produktion der darin integrierten Energiespeichersysteme können von den drei großen Kernindustrien Automobilbaus, der Chemie und Pharmazie sowie des Maschinen- und Anlagenbaus gleich alle drei vom Umstieg des Antriebsstrangs in herkömmlichen Automobilen auf den elektrifizierten Antriebsstrang in Elektrofahrzeugen der Zukunft profitieren.

3.3.1 Fahrzeugkonzepte der Elektromobilität

Wenn über die Elektromobilität gesprochen wird, ist zuerst eine Unterscheidung notwendig, welches elektromobile Antriebskonzept genau gemeint ist. Prinzipiell nämlich können unter diesem Begriff sämtliche Fahrzeuge des Individualverkehrs wie z. B. Zweiräder, Personenkraftwagen, Nutzfahrzeuge oder Arbeitsfahrzeuge und Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs wie z. B. Busse, schienengebundene Fahrzeuge und Schiffe differenziert werden, die zumindest eine Teilstrecke mit ihrem unterschiedlich stark elektrifizierten Antrieb absolvieren können (e-mobil BW 2015, Seite 8f.). Eine Übersicht zeigt ihre Vielfalt (Abbildung 18):

- Ausgangspunkt ist ein *konventionelles Fahrzeug* mit Verbrennungsmotor (engl. „internal combustion engine, Abkürzung ICE), dessen Antriebsstrang nach wie vor im Rahmen von FuE optimiert wird. Als „Energiespeicher“ weist es einen leicht befüllbaren Benzintank auf.
- Das *elektrifizierte konventionelle Fahrzeug* beinhaltet eine zunehmende Anzahl elektrischer Merkmale, welche durch einen elektrisch optimierten Verbrennungsmotor z. B. zur Vermeidung von CO_2-Emissionen sowie elektrifizierte Nebenaggregate z. B. zur Bremsenergierückgewinnung ermöglicht werden. Diese Fahrzeuge werden auch Micro-Hybridfahrzeuge genannt, sie stellen die schwächste Form von Hybridfahrzeugen dar.
- Ein *Hybridfahrzeug (parallel)* (engl. „hybrid electric vehicle“, Abkürzung HEV) verfügt zusätzlich über einen Elektromotor/Generator sowie eine Batterie und damit über zwei vollständige, allerdings parallel verlaufende Antriebsstränge. Das Batteriesystem verfügt üblicherweise über eine geringe Kapazität, weshalb rein elektrisches Fahren nur über

sehr geringe Distanzen möglich ist. Es kann durch Energierückgewinnung nur über den Verbrennungsmotor, nicht aber über das Stromnetz aufgeladen werden. Diese Fahrzeuge werden je nach Leistung des eingebauten Elektromotors Mild- oder Voll-Hybridfahrzeuge genannt.

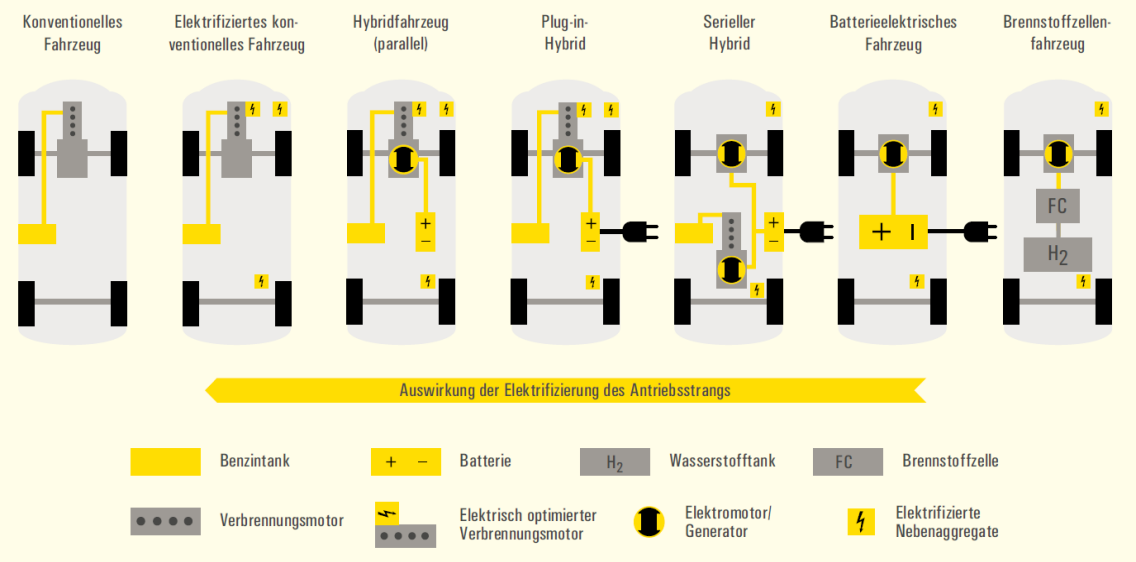
- Ein *Plug-in-Hybridfahrzeug* (engl. „plug-in hybrid electric vehicle“, Abkürzung PHEV) bzw. das eingebaute Batteriesystem kann über das Stromnetz aufgeladen werden. Abhängig von der Größe des Batteriesystems und seiner Nutzung ist elektrisches Fahren über kurze Distanzen möglich.
- Auch ein *serielles Hybridfahrzeug* bzw. ein Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung (engl. „range extended electric vehicle“, Abkürzung REEV) kann am Stromnetz aufgeladen werden. Im Gegensatz zu einem Fahrzeug mit parallelem Hybridantrieb und zwei Traktionsmotoren, ist hier nur ein Traktionsmotor vorhanden, der zweite modifizierte (Verbrennungs-)Motor mit beschränkter Leistung ist vorgelagert und lädt das Batteriesystem auf (TAB 2012, Seite 21f.).[24] Diese indirekte Aufladung des Batteriesystems ermöglicht größere Reichweiten.
- Ein *batterieelektrisches Fahrzeug* (engl. „battery electric vehicle“, Abkürzung BEV) repräsentiert die Vision von rein elektrischer Mobilität über Distanzen, deren Ausmaß von der Speicherkapazität des eingebauten Batteriesystems abhängt. Der Wegfall des Verbrennungsmotors, Treibstofftanks und der Abgasanlage im Gegensatz zu den anderen Antriebskonzepten sorgt auf der einen Seite für ein geringeres Gesamtgewicht und mehr Platzverfügbarkeit, auf der anderen Seite wird beides vom Batteriesystem erhöht bzw. eingenommen. Das Batteriesystem kann auch über Bremsenergierückgewinnung bzw. Rekuperation aufgeladen werden.
- Mit einem *Brennstoffzellenfahrzeug* (engl. „fuel cell electric vehicle“, Abkürzung FCEV) steht noch ein gänzlich anderes Antriebskonzept zur Verfügung: Eine Brennstoffzelle als Energiewandler versorgt den Elektromotor z. B. über den Energieträger Wasserstoff aus einem entsprechend zu dimensionierenden Wasserstofftank. Oftmals ist auch eine kleine Batterie zur Speicherung von Rekuperationsenergie eingebaut.

An dieser Stelle sei noch kurz erläutert, dass die Abkürzung „xEV“ im internationalen Umfeld oft als übergeordnete Kategoriebezeichnung für Konzepte von Elektrofahrzeugen (engl. „electric vehicle“, Abkürzung EV) mit einem höher elektrifizierten, Batterie-basierten Antriebsstrang bzw. zumeist PHEV und BEV eingesetzt wird.

Die nun folgende Analyse der politischen Rahmenbedingungen zur Förderung der Elektromobilität in Deutschland zeigt, dass im Rahmen der Elektromobilität nur bestimmte Antriebskonzepte als tatsächlich zukunftstauglich gelten. Die vorliegende Dissertation richtet sich nach diesen Vorgaben, um das Technologische Innovationssystem (TIS) im Fokus zu definieren (siehe Kapitel 4.2).

[24] Hybride Fahrzeugkonzepte können nach dem Aufbau des Antriebsstranges nicht nur in parallele und serielle, sondern auch leistungsverzweigte Hybridantriebe unterschieden werden. Ein leistungsverzweigter Hybridantrieb kombiniert die beiden Funktionen eines Verbrennungsmotors des direkten Antriebs und der Aufladung (TAB 2012, Seite 22).

Abbildung 21: Elektromobile Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionellen Antrieb.



Quelle: e-mobil BW 2015, Seite 8.

3.3.2 Politische Rahmenbedingungen

Der Klimawandel, steigende Preise für fossile Brennstoffe sowie die wachsende Leistungsfähigkeit neuer Speichermedien für elektrische Energie machen die Elektromobilität zum Hoffnungsträger für die Zukunft individueller Mobilität auf umweltfreundlicher Basis. Vor diesem Hintergrund gibt es ehrgeizige politische Ziele wie z. B. die Reduktion der Abhängigkeit von Erdöl und die Senkung der CO_2-Emissionen im Straßenverkehr. Diese Ziele stellen wichtige Treiber für die Verwirklichung von Elektromobilität in Deutschland dar, weshalb die Bundesregierung in diesem Bereich bereits einige Schritte unternommen hat, z. B. Maßnahmen im Rahmen des Konjunkturpakets II im Jahr 2009 oder die Initiierung der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) im Jahr 2010 (Forum Elektromobilität 2017; NPE 2017-1).

Die Elektromobilität symbolisiert einen Zukunftstrend, der mittlerweile ein fester Bestandteil der öffentlichen Diskussion in Deutschland geworden ist. Ihre große gesellschafts- und wirtschaftspolitische Bedeutung resultiert aus der Entstehung neuer bzw. der Umwälzung etablierter Märkte. Für ihre Verwirklichung spielt es eine große Rolle, welche Energiespeichertechnologien in FuE befindlich sind und ab wann sie der Industrie in Marktreife für Integration in Elektrofahrzeuge zur Verfügung stehen. Im November 2010 veröffentlichte die NPE bzw. die Arbeitsgruppe 2 zur „Batterietechnologie“ einen detaillierten Zwischenbericht. Darin wurde zum einen der vorläufige Sachstand u. a. in Form einer Wettbewerbsanalyse, (Batterie-) Roadmap und Maßnahmenplanung zum Erreichen der Meilensteine über verschiedene Handlungsfelder hinweg erfasst, und zum anderen Empfehlungen an die Bundesregierung nebst notwendiger Finanzmittel aus Sicht der Arbeitsgruppe 2 dokumentiert (NPE 2010-1).

Im Mai 2011 veröffentlichte die NPE ihren zweiten Zwischenbericht (NPE 2011). Neben einem eigenen Leitbild dokumentierte sie die Chancen für Deutschland, welche durch die Etablierung von Elektromobilität realisiert werden könnten, und unterstrich im gleichen Zug auch die

Bedeutung davon, dass sich der Industriestandort Deutschland sowohl als Leitanbieter als auch als Leitmarkt für die Elektromobilität positioniert. Der Bericht enthält zahlreiche an die Bundesregierung gerichtete Empfehlungen für die Ausgestaltung ihrer zukünftigen Politik, u. a. die Förderung von Batterietechnologie als einem „Leuchtturm“ in FuE.

Ebenfalls im Mai 2011 reagierte die Bundesregierung mit ihrem neuen „Regierungsprogramm Elektromobilität“, das die von staatlicher Seite aus auf Basis des Zwischenberichts geplanten Maßnahmen beinhaltet (Bundesregierung 2011). Der Regierung sind Innovationen sehr wichtig, weshalb die Förderung von FuE für die Elektromobilität entscheidend bleibt. Die Zielsetzung war dabei wie folgt:

> „Deutschland soll sich nicht nur zu einem ‚Leitmarkt Elektromobilität‘ entwickeln, sondern sich mit Innovationen im Bereich Fahrzeuge, Antriebe und Komponenten sowie der Einbindung der Fahrzeuge in die Strom- und Verkehrsnetze künftig auch als ein ‚Leitanbieter Elektromobilität‘ etablieren.“ (Bundesregierung 2011, Seite 7)

Und in diesem Kontext wurde es das Ziel der Bundesregierung, bis spätestens zum Jahr 2020 mindestens eine Million Elektromobile auf die deutschen Straßen zu bringen, und bis zum Jahr 2030 mindestens sechs Millionen Elektrofahrzeuge (Bundesregierung 2011, Seite 10). An diesem Ziel hält die Bundesregierung bis heute fest:

> „Die Bundesregierung hält an den gemeinsam mit der Industrie in der „Gemeinsamen Erklärung von Bundesregierung und deutscher Industrie anlässlich der Etablierung der Nationalen Plattform Elektromobilität am 3. Mai 2010“ gesetzten Zielen fest. Zur Umsetzung dieser Ziele ist bereits eine Reihe von Fördermaßnahmen umgesetzt worden.“ (Deutscher Bundestag 2016, Seite 5)

Unter diesen Fördermaßnahmen war zum Beispiel die Förderung zum Themenfeld „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“, welche vom 1. April 2010 stammt:

> „Die deutsche Automobil- und Zulieferindustrie hat auf Grund ihrer technologischen Kompetenz die Chance, sich langfristig einen weltweiten Spitzenplatz auf dem hoch kompetitiven Zukunftsmarkt der Elektromobilität zu sichern. Zu diesem Zweck müssen aber möglichst zügig Schlüsseltechnologien für energieeffiziente, ressourcenschonende, sichere, bezahlbare und leistungsfähige Elektrofahrzeuge entwickelt und diese Fahrzeuge in signifikanten Stückzahlen auf den Markt gebracht werden.“ (BMBF 2010-3)

Weil die Lithium-Ionen-Batterie als die Schlüsseltechnologie für zukunftsweisende (elektrische) Antriebssysteme betrachtet wurde und wird, hatte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) schon im Jahr 2007 die Fördermaßnahme "Lithium-Ionen-Batterie (LIB2015)" initiiert mit dem Ziel, eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien für den breiten Einsatz CO_2-armer bis -freier Technologien zu entwickeln (BMBF 2007). Eine wichtige Rolle spielt in diesem Kontext die gleichnamige Innovationsallianz (MEET 2011), welche die deutschen Anstrengungen in der FuE an der Lithium-Ionen-Batterie koordinierte und schließlich im „Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien“ (KLiB) aufging (KLiB 2017-1).

Im dritten Fortschrittsbericht vom Juni 2012 schildert die NPE mit einem systemischen Ansatz den Weg zur Leitanbieterschaft und zum Leitmarkt, mit einigen Kernbotschaften und Empfehlungen, wie Deutschland sich im internationalen Vergleich behaupten kann (NPE 2012). Für den Leuchtturm Batterie wird dargestellt, auf welche Themencluster und Projekte sich das veranschlagte Projektvolumen von 601 Millionen Euro über drei Jahre verteilt:

> „Der Förderschwerpunkt innerhalb der Konsortien liegt […] zum einen stark auf den Forschungsthemen, die in der aktuellen Marktvorbereitungsphase hoch relevant sind […]. Zum anderen wird die Umsetzung der Forschungsthemen in Pilotanlagen für die Zell- und Batterieproduktion gezielt unterstützt. Mit diesen Projekten wurde gezielt der Bedarf für den Aufbau einer integrierten Zell- und Batteriesystemproduktion in Deutschland definiert. Der qualitative Sprung an die Spitze der Batterietechnologie, im Vergleich zum internationalen Wettbewerb, kann aus Sicht der NPE mithilfe der Durchführung der vorgeschlagenen Projekte erreicht werden." (NPE 2012, Seite 16)

Die technologische Entwicklung erschien zu diesem Zeitpunkt offen, weshalb die NPE eine duale Strategie verfolgte, die sowohl Lithium-Ionen- als auch Post-Lithium-Ionen-Technologien umfasste (NPE 2012, Seite 17). Zu den relevanten Märkten für die Elektromobilität der Zukunft zählen aus Sicht der NPE:

- Rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV),
- Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV),
- Elektrofahrzeuge mit Range-Extender-Lösungen (REEV),
- Leichte Nutzfahrzeuge mit elektrischer Reichweite für den Stadtverkehr.

Im September 2014 wurde der Entwurf eines Elektromobilitätsgesetzes durch das Bundeskabinett beschlossen (BMUB 2014), das am 12. Juni 2015 in Kraft getreten ist. Mit dem Elektromobilitätsgesetz unterstützte die Bundesregierung die Verbreitung von Elektrofahrzeugen durch eine gewisse Privilegierung im Straßenverkehr, indem Länder, Städte und Kommunen Sonderrechte für Elektrofahrzeuge vergeben konnten (Bundesregierung 2015). Um die Privilegien wahrnehmen zu dürfen, gelten folgende Vorschriften:

> „Diese Bevorrechtigungen gelten lediglich für elektrisch betriebene Fahrzeuge sowie extern aufladbare Hybridfahrzeuge, die den Vorgaben von einer Mindestreichweite von 40 Kilometer bei rein elektrischer Nutzung entsprechen oder im Betrieb maximal 50 Gramm Kohlendioxid je gefahrenem Kilometer ausstoßen." (BMWi 2017-2)

Betreffende Fahrzeuge sind entsprechend zu kennzeichnen und genießen z. B. eine freie Nutzung von Busspuren oder die Aufhebung von Zufahrtsverboten z. B. in den Innenstädten.

Im Dezember 2014 legte die NPE ihren vierten Fortschrittsbericht vor und zog eine erste Bilanz der Marktvorbereitung, indem sie einen internationalen Benchmark erhob, eine Bestandsaufnahme dokumentierte und den weiteren Markthochlauf auch mit einem NPE-bezogenen Status und Ausblick zu gestalten versuchte (NPE 2014). Hinsichtlich der ambitionierten politischen Ziele Deutschlands bis zum Jahr 2020 erklärte die NPE die Marktvorbereitungsphase

von 2010 bis 2014 für abgeschlossen und entwarf für die anschließende Phase des Markthochlaufes von 2015 bis 2017 ein Maßnahmenpaket sowie einen Fahrplan, wie Deutschland die gesteckten Ziele bis 2020 erreichen könne:

> „Es gilt nun, das Potenzial der deutschen Industrie in höhere Marktanteile umzusetzen und damit die Leitanbieterschaft zu erreichen. Elektrofahrzeuge müssen sich im Wettbewerb mit anderen Antriebskonzepten insbesondere hinsichtlich Preis und Reichweite behaupten. Hierfür bedarf es weiterhin vorwettbewerblicher Forschung und Entwicklung auf hohem Niveau. Um die Innovationsprozesse fortzuschreiben, hat die NPE ein Gesamtprojektvolumen für Forschung und Entwicklung in Höhe von rund 2,2 Milliarden Euro bis zum Abschluss der Markthochlaufphase Ende 2017 identifiziert.“ (NPE 2014, Seite 3)

Davon sollten laut Empfehlung der NPE mindestens 360 Millionen Euro jährlich auf die Bereiche Fahrzeugtechnologie, Batterie sowie IKT und Infrastruktur entfallen, bis die Markthochlaufphase abgeschlossen sei (NPE 2014, Seite 6). Zu der „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland“ legte die NPE bzw. die Arbeitsgruppe 3 zur „Ladeinfrastruktur und Netzintegration“ im November 2015 auch einen Statusbericht zu Normal- und Schnellladen sowie ein Maßnahmenpaket mit Handlungsempfehlungen vor (NPE 2015, Seite 3f.).

Wichtiger für die vorliegende Dissertation ist allerdings die „Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland“ der NPE bzw. der Arbeitsgruppe 2 zur „Batterietechnologie“ von Januar 2016 (NPE 2016). Die Veröffentlichung dreht sich um die große Frage des TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität in den letzten Jahren, ob, und wenn ja durch wen bzw. mit welchen Mitteln eine große Zell- und Batterieproduktion in Deutschland aufgebaut werden soll:

> „Die Ansiedlung einer Batteriezellproduktion in Deutschland bietet die Chance, die Kompetenz der hier ansässigen Unternehmen (z.B. Materialhersteller, Maschinen- und Anlagenbauer) und Forschungseinrichtungen aufgrund ihrer räumlichen Nähe eng zu verknüpfen und so eine möglichst vollständige Abdeckung der Wertschöpfungskette Batterie zu erreichen. Weiter besteht die Chance, die Systemkompetenz für die gesamte Batterie in Deutschland und die Innovationsfähigkeit auszubauen.“ (NPE 2016, Seite 6)

Insgesamt 28 Projektskizzen mit einem Volumen zwischen 220 und 230 Millionen Euro wurden deshalb erarbeitet und sollten den Ministerien bzw. Projektträgern vorgelegt werden. Die Roadmap bietet einen umfassenden Leitfaden und setzt Schwerpunkte insbesondere mit den Kapiteln zum „Exemplarischen Aufbau einer Zellproduktion“ sowie der „Exemplarischen Business- und Realisierungsplanung“, welche die Grundintention offenlegen.

Von der Bundesregierung kam im Mai 2016 ein Maßnahmenpaket, welches die Rahmenbedingungen für Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur verbessern sollte und auch in den folgenden Monaten noch um weitere Maßnahmen ergänzt wurde wie folgt (BMWi 2017-2):

- Durch eine Kaufprämie werden BEV mit je 2.000 Euro aus Bundesmitteln und 2.000 Euro von der Automobilindustrie vergünstigt, PHEV mit jeweils 1.500 Euro. Der sogenannte Umweltbonus gilt für Elektrofahrzeuge mit einem Listenpreis von maximal 60.000

Euro und läuft aus, sobald die Gesamtfördersumme von 600 Millionen Euro aus Bundesmitteln und 600 Millionen Euro von der Automobilindustrie abgerufen wurde. Anträge dürfen seit dem 2. Juli 2016 beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) gestellt werden (BAFA 2016).

- Die Ladeinfrastruktur soll mit 100 Millionen Euro zum Normalladen und 200 Millionen Euro zum Schnellladen aus Bundesmitteln verbessert werden. Seit 17. März 2016 gibt es außerdem eine Ladesäulenverordnung (LSV), die Ladestecker-Standards und Mindestanforderungen zum Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladestationen beinhaltet, um nicht zuletzt Rechts- und Investitionssicherheit zu bieten.
- Darüber hinaus soll eine öffentliche Beschaffungsinitiative dafür sorgen, dass zukünftig mehr als 20 Prozent an Elektrofahrzeugen im Bundesfuhrpark vorhanden sind.
- Es wurden Steuerbefreiungen für geldwerte Vorteile von Arbeitgebern für Arbeitnehmer verabschiedet, womit Elektro- und Hybridfahrzeuge keine einkommensteuerrechtlichen Nachteile mehr haben. Außerdem gilt die Kraftfahrzeugsteuerbefreiung für BEV mit erstmaliger Zulassung bis 31. Dezember 2020 mittlerweile zehn Jahre lang und für alle Fahrzeugklassen, auch für ordnungsgemäß zu BEV umgerüstete Fahrzeuge.

Das Maßnahmenpaket stieß allerdings schon vor seiner Umsetzung auf heftige Kritik: Selbst der Wissenschaftlichen Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sah nicht nur übergeordnet einfachere und kostengünstigere Wege, zu einer klimapolitisch erwünschten Verringerung der CO_2-Emissionen im Automobilverkehr zu kommen (Beirat beim BMWi 2016). Der Beirat begründet die bis dato niedrige Nachfrage nach Elektrofahrzeugen damit, dass ihre Technik nach Auffassung der deutschen Autofahrer noch nicht ausgereift sei. Deshalb sei die Förderung von FuE neuer umweltschonender Antriebsformen zielführender. Der Staat solle allenfalls die Bereitstellung der für die Elektromobilität erforderlichen Infrastruktur fördern. Der Beirat wies außerdem darauf hin, dass die gesellschaftlichen Verteilungswirkungen von Kaufanreizen problematisch sind, da Elektrofahrzeuge wegen ihrer geringen Reichweite derzeit überwiegend von wohlhabenden Haushalten als Zweitwagen angeschafft werden. Ende Juni 2017 waren erst 23.024 Anträge auf Anrechnung des Umweltbonus eingegangen, davon 13.083 für BEV, 9.937 für PHEV und 4 für FCEV (BAFA 2017).

Auch die oben genannte Ladesäulenverordnung (LSV) war auf heftige Kritik seitens dem Bundesverband für Solare Mobilität e.V. und anderer Organisationen gestoßen, auf die an dieser Stelle allerdings nicht explizit eingegangen werden soll (BSM 2016).

Gleichzeitig läuft allerdings schon seit einigen Jahren die Energiespeicher-Förderung durch die Bundesregierung:

> „Im Bereich der Projektförderung für Forschung und Entwicklung zu Energiespeichern hat die Bundesregierung im Jahr 2015 Fördermittel von rund 61,59 Millionen Euro für 373 Projekte ausgezahlt. 83 Projekte mit einem Fördermittelansatz von rund 60,32 Millionen Euro wurden neu bewilligt.“ (BMWi 2016, Seite 18)

Außerhalb des zitierten Energieforschungsprogramms hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Strategie zur FuE an elektrochemischen Energiespeichertechnologien und -systemen weiterentwickelt:

> „Neben der Stärkung der wissenschaftlichen Basis in Deutschland wurde der Technologietransfer in die Industrie weiter gestärkt. Begonnene Maßnahmen wurden erfolgreich fortgeführt und neue Maßnahmen für Batterien sowohl für elektromobile als auch für stationäre Anwendungen auf den Weg gebracht. Neuartige Lithium-Ionen- und Post-Lithium-Systeme (Batterien der Zukunft) sowie Verfahren zur effizienten Produktion von Batteriezellen bilden dabei thematische Schwerpunkte. In 2015 stellte das BMBF für diese Aktivitäten Mittel in Höhe von rund 18,9 Millionen Euro zur Verfügung.“ (BMWi 2016, Seite 19)

Auch in den kommenden Jahren soll diese Förderung fortgesetzt werden: Die Planungen des BMBF sehen vor, die Batterieforschung und -entwicklung mit etwa 35 Millionen Euro pro Jahr zu fördern (BMBF 2016-1). Damit einhergehen soll allerdings, dass die Voraussetzung geschaffen wird, dass Deutschland zukünftig nicht nur als Käufer, sondern auch als Hersteller von Batteriezellen z. B. für Elektrofahrzeuge in Erscheinung treten kann. Dazu wird auf FuE sowie den Nachwuchs, die Zusammenarbeit aller an der Wertschöpfungskette beteiligten Akteure und europäische und internationale Kooperationen gesetzt.

3.3.3 Marktanforderungen an die zentralen Leistungsparameter

Weil die Kundenakzeptanz der Elektromobilität für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen eine maßgebliche Bedeutung hat, ist die Analyse derselben sehr wichtig. Im Rahmen einer groß angelegten Nutzerbefragung wurden folgende, zentrale Herausforderungen identifiziert:

> „Kritisch sind aus Nutzersicht dagegen die Themen Kosten, Reichweite und Infrastruktur. Die Anschaffungspreise von Elektrofahrzeugen sind für gewerbliche und private Nutzer momentan noch zu hoch. […] Gleichzeitig ist auch das Vertrauen in die Reichweite der Fahrzeuge nur mittelmäßig ausgeprägt, das heißt, die Nutzer sind sich mitunter unsicher, wie viel Reichweite ihnen noch zur Verfügung steht. […] Des Weiteren formulieren die Nutzer aus heutiger Sicht den Wunsch nach einem Infrastrukturausbau, der es ihnen ermöglicht, die Fahrzeuge auch unterwegs bzw. tagsüber zu laden, das heißt, in Stadtzentren oder auch am Arbeitsplatz.“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 29)

Interessanterweise haben die in Elektrofahrzeugen eingesetzten elektrochemischen Energiespeichertechnologien Einfluss auf gleich zwei der drei oben genannten Herausforderungen: Während die Energiedichte eines Batteriesystems in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Reichweite eines Elektrofahrzeugs steht, beeinflussen die Kosten eines Batteriesystems mit seinem im Moment noch sehr hohen Wertschöpfungsanteil den Preis eines Elektrofahrzeugs deutlich. Deshalb sind die Energiedichte und Kosten eines Batteriesystems für alle Anbieter von Elektrofahrzeugen zentrale Leistungs- bzw. sogar Schlüsselparameter. Wichtig sind vor dem Hintergrund der jahrelangen Benutzung eines Elektrofahrzeugs außerdem auch die Lebensdauer eines Batteriesystems sowie seine Sicherheit. Insgesamt können die relevanten Leistungsparameter wie folgt zusammengefasst werden (siehe Kapitel 3.1.2):

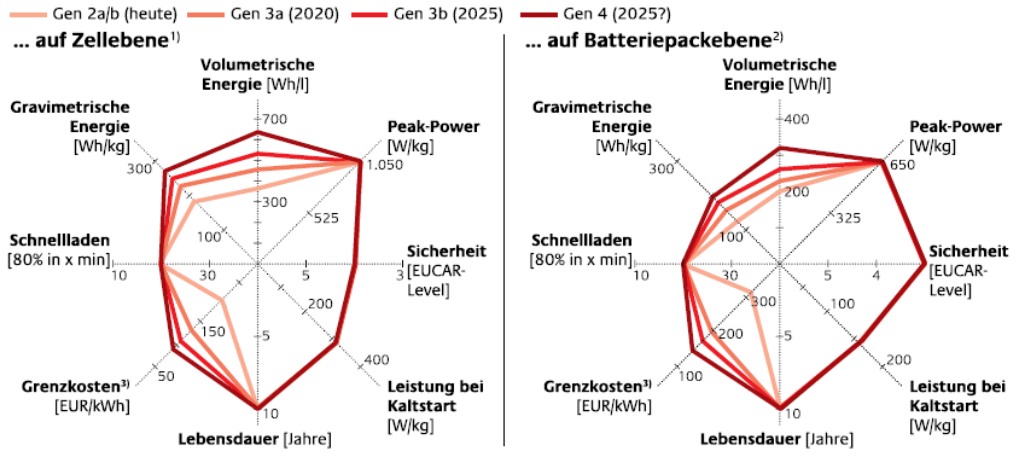
- „Energiedichte (gravimetrisch in Wh/kg und volumetrisch in Wh/l)
- Leistungsdichte (gravimetrisch in W/kg und volumetrisch in W/l)
- Lebensdauer (betrieblich in Zyklen und kalendarisch in Jahren)
- Umgebungsbedingungen (tolerierte hohe und tiefe Temperaturen in °C)
- Sicherheit (in Hinsicht auf das EUCAR-Level)
- Kosten (für Zelle und System, in €/kWh)
- Wirkungsgrad in Prozent“ (auf der Basis von Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 10)

Dazu kommen Faktoren, die sich je nach Anwendungsfall unterschiedlich stark auf die Einsatzfähigkeit eines bestimmten Batteriesystems auswirken können:

> „Zur Auswahl des für eine spezifische Anwendung geeigneten Batteriesystems sind außerdem Kriterien wie die Ladekapazität, Spannungsstabilität während des Entladungsvorgangs, die Dauer eines Ladevorgangs sowie Degradationseffekte, die zu einer Begrenzung der kalendarischen Lebensdauer führen, hilfreich. Dazu kommen zunehmend übergeordnete Spezifikationen wie eine umweltverträgliche Produktion und eine kostengünstige und umweltfreundliche Entsorgung.“ (VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 21)

Hohe Energiedichten sind für BEV sehr wichtig, hohe Leistungsdichten eher für PHEV und die im Rahmen der vorliegenden Dissertation nicht weiter analysierten HEV (Fraunhofer ISI 2012-1, Seite 7). Interessant ist die jüngste Verschärfung der Anforderungen aus der Automobilindustrie, was die volumetrische Energiedichte anbelangt, denn der zur Verfügung stehende Platz für Batteriesysteme in der Karosserie ist limitiert und so könnte mit einer effizienten Volumenausnutzung die Speicherkapazität eines Elektrofahrzeugs und insbesondere seine Reichweite deutlich verbessert werden (VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 21).

Abbildung 22: Key-Performance-Parameter aus Sicht der Kunden/OEM für BEV.



1) Batteriezelle für EV 2) Batteriepack für EV mit 80 kWh 3) Bei 15 Mio. Zellen über Lebenszyklus eines Fahrzeugs oder einer Fahrzeugfamilie (entspricht heute bei Gen 2a ~70k Fahrzeuge mit 20 kWh Energieinhalt)
Quelle: NPE UAG 2.2 M. Weiss, A. Lamm, P. Lamp (2015)

Quelle: NPE 2016, Seite 16.

Ein Ausblick von an der NPE-Arbeit beteiligten, größtenteils deutschen Fahrzeugherstellern hinsichtlich der Entwicklung von Leistungs- und Kostenzielen auf Batteriezell- und Batteriepackebene in den nächsten Jahren zeigt, dass mit den verschiedenen Zellgenerationen (siehe Kapitel 3.3.4.2) bis zum Jahr 2025 eine Reichweitenverdopplung oder alternativ eine Kostenhalbierung erwartet wird (Abbildung 19). Abhängig ist dies von der Strategiewahl der Elektrofahrzeughersteller, ob sie auf größere Reichweiten setzen, was die Kosten eines Batteriesystems steigert, oder ob sie auf niedrigere Kosten setzen, was die Reichweiten eines Batteriesystems senkt. Besonderes Augenmerk wird auch in den nächsten Jahren auf der Sicherheit als Schlüsselparameter liegen:

> „Mit signifikant steigender Kapazität im gleichen Batteriezellbauraum stellen die heutigen Sicherheitsziele eine zunehmende Herausforderung dar. Mehr „Intelligenz“ in der Traktionsbatteriezelle ist eine wesentliche Voraussetzung, um gleiche Sicherheitsstandards zu erzielen […]. Zusätzlich müssen Parameter wie Leistung bei Kaltstart, Lebensdauer und Schnellladefähigkeit weiterhin auf hohem Niveau erreicht werden.“ (NPE 2016, Seite 16)

Die Angabe für das zu erreichende Sicherheitsniveau erfolgt über das sogenannte EUCAR-Level, welche der engl. „European Council for Automotive R&D” (EUCAR) eingerichtet hat:

> „EUCAR legt Gefährdungsstufen für elektrische Energiespeichertechnologien fest, die auf der Widerstandsfähigkeit einer Technologie angesichts von Missbrauchsbedingungen basieren. Hersteller und Zulieferer müssen ihre Batterien entsprechend entwickeln und testen, um das Erreichen der notwendigen EUCAR-Levels sicherzustellen.“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 23)

Mit der Angabe eines EUCAR-Levels von kleiner gleich 4 wird festgelegt, dass Batteriezellen und Batteriepacks so sicher sein müssen, dass sie im Schadensfall weder brennbar sind, noch brechen oder explodieren dürfen. Ein Austritt von mehr als 50 Prozent des Elektrolyten ist erlaubt wie auch das engl. „venting“, das Entweichen entstehender Gase.

Die kalendarische Lebensdauer muss langfristig über die oben angegebene Mindestanforderung von zehn Lebensjahren hinaus deutlich ansteigen, damit die Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen vergleichbar wird mit den herkömmlichen Automobilen mit Verbrennungsmotor. Zusammen mit der gewünschten Schnellladefähigkeit ergeben sich hier große Herausforderungen für FuE, um die Lebensdauer der Batteriesysteme deutlich zu verbessern.

Ebenfalls sehr wichtig sind die von einem Batteriesystem tolerierbaren Umgebungsbedingungen, welchen durch die Angabe der Leistungsdichte bei Kaltstart Rechnung getragen wird: Auch sie muss in den nächsten Jahren noch deutlich steigen bzw. das Batteriesystem muss robuster werden gegenüber den vorherrschenden Umgebungsbedingungen, was auch durch ein fortgeschrittenes Thermomanagement beeinflusst werden kann.

Die Kosten für Zellen und Systeme sollen sinken, wodurch wegen dem zumindest im Moment noch hohen Anteil des Batteriesystems an den Gesamtkosten eines Elektrofahrzeugs voraussichtlich auch die Preise von Elektrofahrzeugen sinken werden. Die Zielvorstellung von 100 €/kWh wird auf Zellebene vor allem aufgrund des heftigen Wettbewerbs um Marktanteile schon

heute manchmal als erreicht kommuniziert, die realen Herstellungskosten dürften je nach Zellformat, Zellchemie und Zellhersteller aber noch darüber liegen. Und auch auf Systemebene soll diese Zielvorstellung in den nächsten Jahren deutlich näher rücken.

Damit sind die aus den Kundenanforderungen abzuleitenden zentralen Leistungsparameter genannt und der Einstieg in die spezifisch für Anwendungen der Elektromobilität relevanten elektrochemischen Batterietechnologien kann erfolgen.

3.3.4 Aktueller Stand von FuE

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik anhand des heutigen Referenzsystems für elektrochemische Energiespeichertechnologien als Grundlage für die folgenden Betrachtungen zur Weiterentwicklung der Batterietechnologie insgesamt geschildert. Dazu sei als Grundlage vorweg festgehalten:

> „Wiederaufladbare Batterien – […] Akkumulatoren, in denen die elektrochemischen Prozesse reversibel verlaufen – unterscheiden sich voneinander durch die Wahl des chemischen Speichersystems (welches für den jeweiligen Batterietyp namensgebend ist), durch das zum Einsatz kommende Kathoden- und Anodenmaterial, die verwendeten Elektrolyte sowie die Betriebstemperatur. Durch die Kombination dieser Komponenten hat sich eine Vielzahl von Batteriesystemen ergeben.“ (TAB 2012, Seite 26)

Weil die Entwicklung hinsichtlich der Energiespeicher für die Elektromobilität auch die Entwicklung hinsichtlich der Energiespeicher für den Einsatz in stationären Anwendungen treibt, jedoch teilweise deutlich anderen Leistungsanforderungen genügen muss, wird in dieser Doktorarbeit trennscharf auf Energiespeicher für die Elektromobilität fokussiert.

3.3.4.1 State of the Art: Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

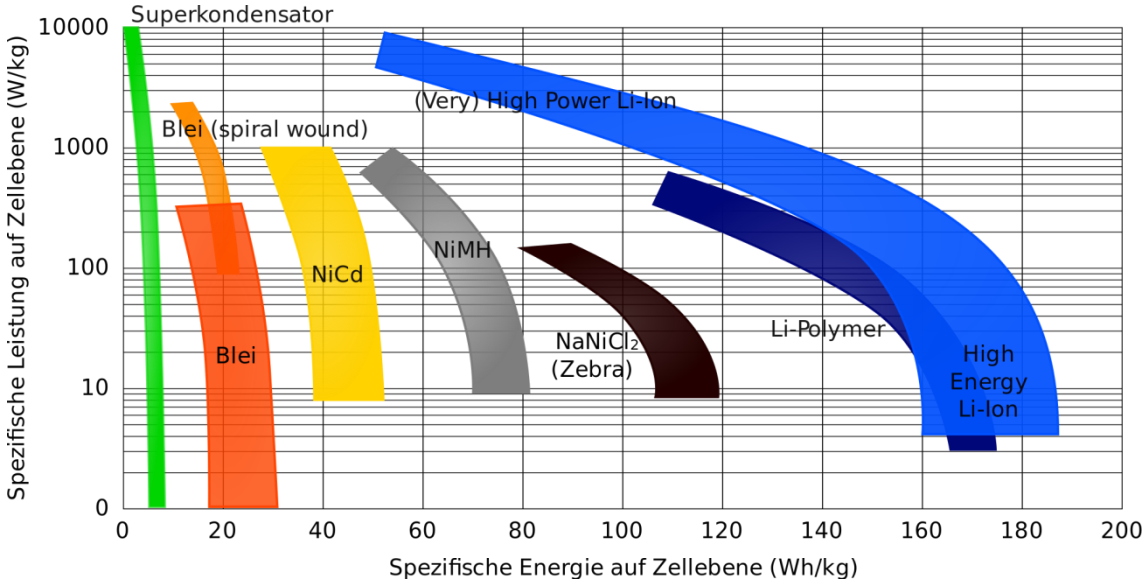
Lithium-Ionen-Batterien (LIB) bieten im Vergleich zu herkömmlichen Blei-Säure-Batterien (siehe Kapitel 3.3.4.3.1) oder Nickel-basierten Energiespeicherkonzepten (siehe Kapitel 3.3.4.3.2) einen großen Vorteil: Ihre Batteriezellen können je nach anvisierter Anwendung unterschiedlich ausgelegt werden, auf jeweils deutlich höhere Energie- und/oder Leistungsdichten. Üblich ist, dass LIB in den gängigen Schaubildern zum diesbezüglichen Vergleich unterschiedlicher Energiespeichertechnologien, sogenannten „Ragone-Diagrammen“, deshalb äußerst „rechts“ bzw. „oben“ zu finden sind (Abbildung 23). Deshalb spielen LIB sowohl für mobile Anwendungen, wo es für die Reichweite mehr auf hohe Energiedichten ankommt, als auch für stationäre Anwendungen, wo es für die Speicherkapazität mehr auf hohe Leistungsdichten ankommt, heute eine Vorreiterrolle.

Ein weiterer großer Vorteil der LIB-Technologie ist ihr Wirkungsgrad von über 90 Prozent (Wietschel et al. 2010, Seite 535), auch im heutigen Referenzsystem einer 4 Volt-LIB:

> „Aktuelle Well-to-Wheel-Analysen für BEV ergeben selbst unter Berücksichtigung aller auftretenden Verluste zum Beispiel bei der Stromleitung und beim Beladen in der Summe zwischen 70 und ca. 80 Prozent Wirkungsgrad [Bünger et al. 2011, Seite 4; ifeu 2011, Seite

47f.], welche durch den Einsatz von 100 Prozent erneuerbaren Energien erreicht werden können und umso stärker absinken, je mehr konventionelle Energiequellen eingesetzt werden. Dies übertrifft selbst Fahrzeugkonzepte mit den besten Verbrennungsmotoren deutlich und damit auch Brennstoffzellenfahrzeuge.“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 11)

Abbildung 23: Spezifische Energie- und spezifische Leistungsdichten für ausgewählte Batterietechnologien.



Quelle: Sauer 2011-2, Seite 10.

LIB können bei jedem Ladezustand aufgeladen werden (Wietschel et al. 2010, Seite 535) und weisen kaum Selbstentladung auf. Sie können dadurch auch für einige Zeit nicht im Gebrauch befindlich sein und passen ihre Speicherkapazität dennoch nicht der eigentlich genutzten Energie an, unterliegen also nicht dem als „Memory-Effekt“ bekannt gewordenen Phänomen, der Batteriezellen in der Vergangenheit sogar unbrauchbar gemacht hat.

Bei ordnungsgemäßem Gebrauch können LIB sehr lange beste Leistungen verrichten. Ihr größter Nachteil ist die hohe Reaktionsfreude von Lithium mit Wasser, wobei Wasserstoff in Gas-Form entsteht, das ebenfalls hoch reaktiv ist (Jossen et al. 2006, Seite 101). Selbst wenn die Batteriezelle dadurch noch keinen Schaden annimmt, steht das Lithium dann nicht mehr für die eigentlichen Zellreaktionen zur Verfügung, wodurch die Lebensdauer der Batteriezelle sinkt. Deshalb müssen Batteriezellen komplett wasserfrei hergestellt werden, was auch eine Reduktion der Luftfeuchtigkeit in den Produktionshallen erforderlich macht. Die angedeuteten Anforderungen an die Batterieproduktion sorgen für höhere Kosten, auch was den Einsatz reinster Materialien anbelangt, und die Notwendigkeit eines umfassenden Qualitätsmanagements. Die Batteriekosten sinken im Moment aber schnell, was mit dem Ausbau der weltweiten Produktionskapazitäten und dem damit verbundenen Wettbewerb der Batteriehersteller um Marktanteile zusammenhängt. Die Lernkurve für eine Optimierung des Spannungsverhältnisses zwischen niedrigen Kosten und hochwertigen Zellkomponenten steigt.

Außerdem sind bei LIB Vorkehrungen gegen die beiden Ladungsextreme einer Tiefentladung wegen der Kurzschlussgefahr beim Aufladen und einer Überladung wegen der Überhitzungsgefahr beim Aufladen zu treffen, damit die Batteriezellen nicht nachhaltig beschädigt werden und ihre volle Leistung nicht mehr erbringen können. Die Ladungsextreme werden im Falle der Energiespeicher für die Konsumelektronik bereits gut kontrolliert, wo zum Beispiel Handys und Laptops in großer Zahl vollkommen störungsfrei betrieben werden, der gleiche Standard ist auch für die Energiespeicher für die Elektromobilität zu erreichen.

Auch die Umgebungsbedingungen betreffend zeigen LIB eine hohe Empfindlichkeit: Optimal für die Ladung erscheint im Allgemeinen ein Fenster von 0 bis +40 °C als geeignet, für die Entladung sind -20 bis +50 °C möglich, die Lagerung kann bei -20 bis +60 °C erfolgen (Jossen et al. 2006, Seite 140f.). Diese Bandbreiten geben zwar Sicherheit, dass die Batterie bei entsprechender Berücksichtigung auch funktionieren wird – sie schränken die Benutzung allerdings auch ein, denn ein Elektrofahrzeug wird auch im mitteleuropäischen Winter bei Minusgraden vor dem Haus auf der Straße stehen und soll dort aufgeladen werden. Innerhalb dieses Kontextes wird klar, dass die Rolle des Thermomanagements in Elektrofahrzeugen aufgrund der begrenzten Batteriekapazität bzw. Fahrzeugreichweite gar nicht deutlich genug hervorgehoben werden kann:

> „Zum einen muss die temperaturempfindliche Lithium-Ionen-Batterie […] auf Zieltemperaturen gekühlt werden, was eine Anbindung der Batteriekühlung an die Klimatisierung des Fahrzeugs notwendig macht. Zum anderen stellen die Klimatisierung im Sommer und vor allem die Innenraumheizung im Winter neue Ansprüche an die Auslegung dieser Systeme. Mit steigender Elektrifizierung des Antriebsstrangs muss die hierfür erforderliche Leistung mehr und mehr von der Batterie zur Verfügung gestellt werden, mit entsprechender Reduktion der elektrischen Fahrzeugreichweite.“ (Springer Fachmedien 2013)

Das zukünftige Thermomanagement muss also eine hohe Effizienz aufweisen, damit der Zielkonflikt zwischen Fahrzeuginnenraumkomfort und Fahrzeugreichweite für alle Akteure zufriedenstellend gelöst werden kann.

Insgesamt sieht die heutige Referenz bei Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität sowie stationäre Anwendungen wie folgt aus:

> „Das aktuelle Referenzsystem der „klassischen“ LIB […] ist die bereits sehr weit entwickelte 4 [Volt]-LIB mit folgenden Parametern: einer Energiedichte von über 110 Wh/kg (gravimetrisch) bzw. 179 Wh/l (volumetrisch), einer Lebensdauer von mehr als 5.000 Zyklen bzw. 10-15 Jahren, einer Sicherheit von kleiner gleich 4 (EUCAR-Level) und Kosten, welche im Moment, abhängig von den produzierten Stückzahlen, der Technologie (zum Beispiel Zellformat, Zellchemie) und dem Hersteller, zwischen 300-400 €/kWh betragen dürften (die Batteriepreise belaufen sich heute auf >300 €/kWh Systempreis für Endkunden und <200 €/kWh Zellpreis für OEM).“ (VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 19)

Diese Energiespeichertechnologie genügt zwar den Anforderungen an die Lebensdauer noch nicht vollständig, die damit verbundenen Probleme werden aber durch intensive FuE bis 2020

ausgeräumt sein und dann auch die 4 Volt-LIB im Rahmen einer Serienproduktion in Elektrofahrzeuge integriert werden. Gleichzeitig werden auch die Herstellungskosten weiter sinken, mit dem ambitionierten Ziel, die Zellpreise auf bis zu 100 €/kWh zu senken, was Systempreisen von 200-250 €/kWh entsprechen würde. Andere Energiespeichersysteme müssen diese Leistungsparameter verbessern, um eine Alternative darzustellen.

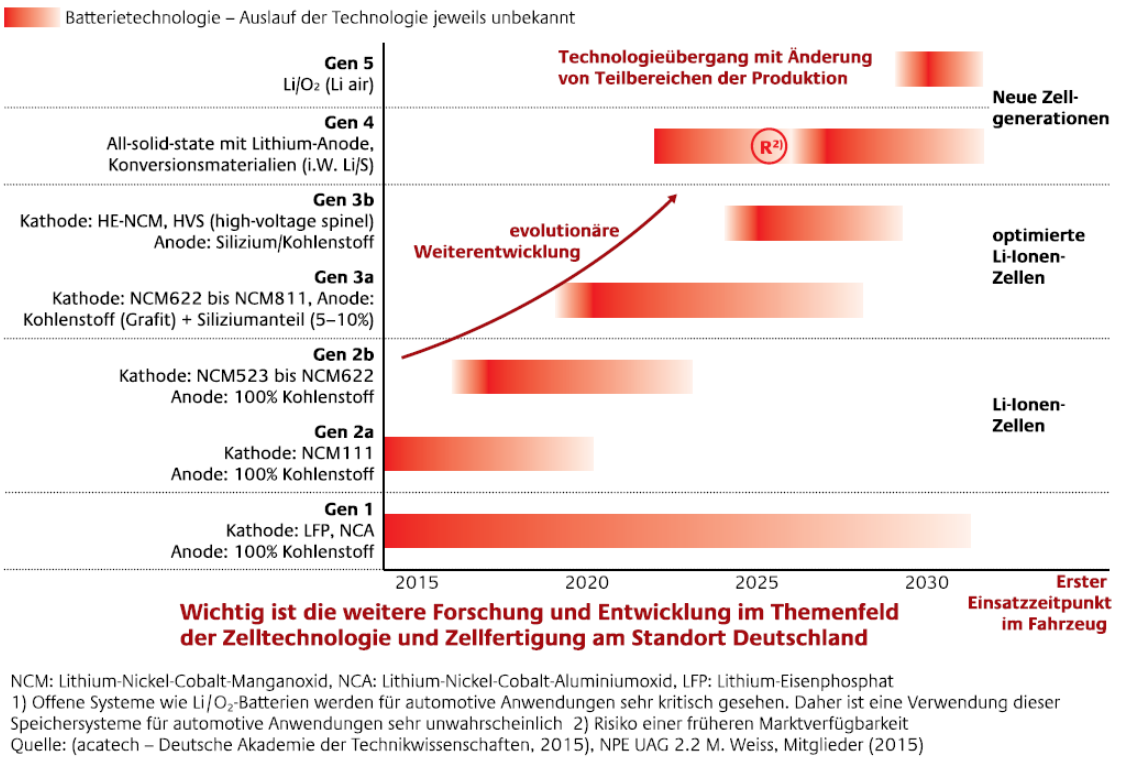
3.3.4.2 FuE an verschiedenen „Generationen“ von Lithium-basierten Batterien

Bei der Verwendung des Terms „Lithium-Ionen-Batterie“ wird in der Öffentlichkeit manchmal außer Acht gelassen, dass die exakte Zellkonfiguration zu spezifizieren ist:

> „Heutzutage ist Lithium-Ionen-Batterie ein Oberbegriff für eine große Anzahl an technologischen Varianten. Es werden verschiedene Materialien für Elektrolyte sowie für positive und negative Elektroden verwendet und kombiniert. Hierdurch entstanden und entstehen neue Zelltypen.“ (Wietschel et al. 2010, Seite 534)

Um die Vielfalt von Zellkonfigurationen zu strukturieren, wurden ursprünglich vier verschiedene „Batteriegenerationen“ entlang der in der FuE verwendeten Materialien definiert, um sinnvoll voneinander abgegrenzte Entwicklungsstufen zu erhalten (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 22). In der Zwischenzeit hat sich die Einteilung in fünf verschiedene Batteriegenerationen leicht verändert, was eine aktuellere Darstellung der NPE anbelangt (Abbildung 24).

Abbildung 24: Entwicklung einer Roadmap für Zelltechnologie 2015 bis 2030[1)]



NCM: Lithium-Nickel-Cobalt-Manganoxid, NCA: Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid, LFP: Lithium-Eisenphosphat
1) Offene Systeme wie Li/O_2-Batterien werden für automotive Anwendungen sehr kritisch gesehen. Daher ist eine Verwendung dieser Speichersysteme für automotive Anwendungen sehr unwahrscheinlich 2) Risiko einer früheren Marktverfügbarkeit
Quelle: (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2015), NPE UAG 2.2 M. Weiss, Mitglieder (2015)

Quelle: NPE 2016, Seite 19.

Die NPE geht dabei zunächst von einer weitgehend evolutionären Entwicklung der LIB-Technologie aus. Den Stand der Technik sieht sie wie folgt:

> „Derzeit sind überwiegend Fahrzeuge mit einer Zellchemie der Generationen 1 und 2a im Einsatz." (NPE 2016, Seite 19f.)

Diese heutigen LIB-Zellen werden in den nächsten Jahren optimiert, bevor mit neuen Zellgenerationen ein Technologieübergang zu den „Post-LIB"-Technologien eingeläutet wird. Ein technologischer Überblick über die Zellkonfigurationen der einzelnen Batteriegenerationen mit ihren Vorteilen und Nachteilen wird im Folgenden gegeben (Tabellen 5; 6; 7).

Die Sicherheitsanforderungen von Batteriezellen mit dem Kathodenmaterial LCO werden in der Konsumelektronik zwar bereits seit Jahren fast durchgehend problemlos beherrscht, als großformatige Batteriesysteme kommen sie aus Sicherheitsgründen aber nicht in Elektrofahrzeugen zum Einsatz. Die Kathodenmaterialien LFP und LMO bieten nicht nur eine deutlich bessere Sicherheit, sondern auch Kostenvorteile resultierend aus den günstigeren eingesetzten Materialien. Teilweise werden heute (Stand: April 2017) auch schon Batteriesysteme der Generation 2b eingesetzt, mit den zunehmend nickelreichen Kathodenmaterialien NCA und NMC, die deutlich höhere Energiedichten und damit auch höhere Reichweiten der entsprechend ausgestatteten Elektrofahrzeuge ermöglichen (NPE 2016, Seite 19).

Insbesondere Batteriesysteme mit dem Kathodenmaterial NMC stehen auch für die Generation 3a, wo der Nickel-Anteil im Gegensatz zu den Anteilen von Mangan und Kobalt weiter ansteigen soll. Die Generation 3b bezieht sich zum einen auf die Hochenergie-Entwicklung:

> „[Sie] setzt auf Batteriematerialien mit höherer spezifischer Energie ohne dabei die Zellspannung zu erhöhen. Entsprechende Batterietechnologien befinden sich heute in der FuE und werden in den kommenden Jahren als marktreif, insbesondere für den Einsatz in Elektrofahrzeugen erwartet." (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 31)

Gleichzeitig dazu läuft allerdings auch die Hochvolt-Entwicklung weiter, innerhalb derer die Zellspannung von LIB-Zellen erhöht werden soll:

> „[Damit] wird ganz konkret auf die Batterietechnologien hingewiesen, die ausgehend vom Referenzsystem der 4 Volt-Lithium-Ionen-Batterie bis hin zu den 5 Volt-Lithium-Ionen-Batterien entwickelt werden." (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 31)

Obwohl diese Hochvolt-Entwicklung noch relativ weit am Anfang steht, was FuE anbelangt, wird erwartet, dass mit diesen Batterietechnologien in zehn bis zwanzig Jahren die breite Marktdiffusion der batterie-basierten Elektromobilität stattfinden wird. Parallel betrachtet werden muss noch der Ansatz von Tesla Inc., das mit 18650-Batteriezellen auf eine schon seit Jahren in der Konsumelektronik etablierte Batterietechnologie setzt:

Tabelle 5: Technologischer Überblick über die gängigen Zellkonfigurationen der Generation 1 und 2 von LIB.

Batterie-generation	**Kathode**	**Anode**	**Elektrolyt**	**Vorteile u. a.**	**Nachteile u. a.**
1	Lithium-Kobaltoxid (LCO)	Graphit	Org. Karbonate (z.B. Ethylen- oder Diethylenkarbonat) mit Lithium-Hexafluorophosphat ($LiPF_6$) sowie Zusätze	- Hoher Reifegrad - Breiter Einsatz in Anwendungen der Konsumelektronik - Relativ hohe Leistungsdichte - Schnelle Be- und Entladung	- Relativ geringe Energiedichte - Erhöhte Sicherheits-anforderungen - Relativ hohe Kosten (Kobalt)
2a	Lithium-Eisenphosphat (LFP)	- Optimierte Graphit-basierte Anoden	- Elektrolyte mit Additiven ($LiPF_6$-reduziert und ggf. sogar ganz ohne $LiPF_6$)	- Höhere Sicherheit - Geringe Materialkosten - Höhere Leistungsdichte - Längere Lebensdauer	- Geringere Energiedichte - Relativ langsame Be- und Entladung
2a	Lithium-Manganoxid (LMO)			- Höhere Sicherheit - Geringe Materialkosten - Schnelle Be- und Entladung - Große Überladestabilität	- Geringere Energiedichte - Kürzere Lebensdauer
2b	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA)	- Ggf. Lithium-Titanoxid bzw. -Titanat (Energiedichte sinkt, Leistungsdichte steigt)		- Relativ hohe Energiedichte - Relativ lange Lebensdauer - Schnelle Be- und Entladung	- Erhöhte Sicherheits-anforderungen - Relativ hohe Kosten (Nickel, Kobalt, ggf. Titan)
2b	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC)			- Relativ hohe Energiedichte - Relativ lange Lebensdauer - Schnelle Be- und Entladung - Große Überladestabilität	- Relativ hohe Kosten (Nickel, Kobalt, ggf. Titan)

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von (Fraunhofer ISI 2012-2, 2015-1, 2015-2; NPE 2016; TAB 2008, 2012).

Tabelle 6: Technologischer Überblick über die gängigen Zellkonfigurationen der Generation 3 und 4 von LIB.

3a	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC)	- Kohlenstoff-Komposite mit z.B. Silizium - Lithium-Legierungen z.B. mit Silizium	- Weitere Verbesserung ausgehend von Generation 2	- Weitere Verbesserung von NMC in Generation 2b - Lithium-Legierung/Kohlenstoff-Komposite mit relativ hoher Energie- und Leistungsdichte - Kostensenkung auf Ebene des Batteriesystems durch Senkung der Zellanzahl möglich	- Wie NMC in Generation 2b, zusätzliche Kosten durch teure Komposit-Herstellung - Lithium-Legierung/ Kohlenstoff-Komposite mit FuE-Herausford. bzgl. Lebensdauer
3b	Hochenergie (HE)-NMC & Hochvolt (HV)-Entwicklung	- Weitere Verbesserung von NMC in Generation 3a	Hochvolt-fähige Elektrolyte, Probleme aktuell u. a. bzgl. Elektrolytzersetzung (Lebensdauer) und $LiPF_6$-Leitfähigkeit bei steigender Spannung (Temperaturbeständigkeit), Festkörper-Elektrolyte als Lösung (?)	- Deutliche Verbesserung der Energiedichte - Kostenreduktion erwartet, u. a. durch Kobalt-Reduzierung (Lithium- und Nickel-Anteile steigen aber) mit HE sowie durch Senkung der Zellanzahl durch höhere Zellspannung mit HV	- Hochvolt-fähige Zell-materialien notwendig (FuE an hochnickelhaltigen Kathodenmaterialien und an Elektrolyten), Herausforderungen bzgl. Lebensdauer und Sicherheit
4	Lithium-Feststoff	Lithium-Metall-Folie	- Feststoffelektrolyte z.B. auf Polymer- oder Keramikbasis, schnelle Energieaufnahme bei hoher Hitzebeständigkeit	- Höhere Sicherheit - Kostenreduktion erwartet, u. a. durch Senkung der Zellanzahl - Gewichts- und Volumenredukt., z.B. entfallende Kühlsysteme	- Herausforderung für Herstellungsverfahren und Temperaturbest. - Feststoffelektrolyte noch nicht fertig entwickelt
4	(Lithium-) Schwefel und Kohlenstoff (mit einer Zielstruktur, die Schwefel viel Reaktionsoberfläche ermöglicht)	Metallisches Lithium (die Zielstruktur hängt prinzipiell vom gesamten Zellaufbau ab)	- Mit den Elektroden kompatible Elektrolyte bzw. Kombinationen z.B. aus ionischen Flüssigkeiten und Mischungen mit org. Materialien oder feste Polymerelektrolyte	- Deutliche Verbesserung der gravimetrischen Energiedichte (theoretisch) - Geringe Materialkosten	- FuE-Herausforderung bzgl. Lebensdauer (Hochtemperaturbest.) - Hohe Sicherheitsanford. - Volumetr. Energiedichte und Leistungsdichte nicht zufriedenstellend

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von (Fraunhofer ISI 2012-2, 2015-1, 2015-2; NPE 2016; TAB 2008, 2012).

Tabelle 7: Technologischer Überblick über die gängigen Zellkonfigurationen der Generation 5 von LIB.

5	(Lithium-) Luft/Sauerstoff bzw. poröser, luftdurchlässiger Kohlenstoff	Metallisches Lithium (die Zielstruktur hängt prinzipiell vom gesamten Zellaufbau ab)	- Auch hier wie bei Generation 4 noch weitestgehend Grundlagen-FuE, die die spezif. Herausforderungen von Lithium-Luft-Batterien lösen muss	- Deutliche Verbesserung der gravimetrischen Energiedichte (theoretisch) - Geringe Materialkosten	- Zahlreiche Fragen offen z.B. bzgl. einem funktionierenden Zellaufbau sowie der aufgrund des metallischen Lithiums sauerstoff- und wasserstofffreien Herstellung
5	Luft/Sauerstoff bzw. poröser, luftdurchlässiger Kohlenstoff	Metallisches Aluminium oder Magnesium oder Zink (die Zielstruktur hängt prinzipiell vom gesamten Zellaufbau ab)	- Auch hier wie bei Generation 4 noch weitestgehend Grundlagen-FuE, die die spezif. Herausforderungen der jeweiligen Metall-Luft-Batterien lösen muss - Bei Aluminium-Luft- und Magnesium-Luft-Batterien ist aufgrund hoher Betriebstemperaturen aber fraglich, ob sie ohne Feststoffelektrolyten umsetzbar sind	- Deutliche Verbesserung der gravimetrischen Energiedichte (theoretisch) - Geringe Materialkosten (insbesondere von Magnesium) - Batteriezellen müssten nicht sauerstoff- und wasserstofffrei hergestellt werden	- FuE-Herausforderungen bzgl. der elektrischen Wiederaufladbarkeit der Batteriezellen bzw. ihrer zyklischen Lebensdauer - Volumetr. Energiedichte und Leistungsdichte nicht zufriedenstellend - Hohe Anforderung an Umgebungsbeding. (z.B. hinsichtlich Luftfeuchtigkeit)

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von (Fraunhofer ISI 2012-2, 2015-1, 2015-2; NPE 2016; TAB 2008, 2012).

> „Interessant ist, dass mit der 18650-Zelle eine frühe Batteriegeneration bzw. kleinformatige Zelle gegenüber den aktuellen HV- und HE-Entwicklungen (gemessen an der Energiedichte und damit Reichweiten in Elektrofahrzeugen) zunächst durchaus höhere Potenziale aufweist als die neuen, innovativen großformatigen Batterietechnologien. […] Mit den kleinformatigen Zellen sind Energiedichten von 250-270 Wh/kg gerade über bessere Anodenmaterialien anvisiert, wurden aber noch nicht auf großformatige Batterien übertragen. Eine typische großformatige Zelle für den Automotivbereich liegt derzeit zwischen 150-160Wh/kg – diese Lücke sollte geschlossen werden und ist auf Basis der Lernkurven in der kommenden Dekade zu erwarten. Heute wird davon ausgegangen, dass dies mit HE-NMC-Kathoden […] gelingt. [Es wäre] eine Ausreifung der Technologie jenseits 2020, die produktionstechnische Umsetzung bis ca. 2025 und der Einsatz im Fahrzeug anschließend bis 2030 zu erwarten. Zwischenstufen der Entwicklung (insbesondere HE-NMC/Graphit) dürften sukzessive in den Markt eintreten.“ (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 6)

Mit der Generation 4 sind ambitionierte Zielvorstellungen verbunden, deren realistische Umsetzung allerdings noch eher ungewiss erscheint:

> „Darüber hinaus erscheint mittelfristig besonders mit Traktionsbatteriezellen der Generation 4 gegenüber heute eine Verdopplung der Reichweite oder eine Halbierung der Kosten möglich. […] Es ist noch weitgehend offen, ob sich der theoretisch nachgewiesene Vorteil der höheren Energiedichte auf Zellebene auch praktisch – insbesondere in Form einer funktionstüchtigen Batterie auf Pack-Ebene – umsetzen lässt.“ (NPE 2016, Seite 19f.)

Deshalb bleibt die Frage, wann genau die Batteriezellen und insbesondere in Elektrofahrzeuge integrierfähige Batteriesysteme der Generation 4 verfügbar sind, weiterhin offen:

> „Unter Laborbedingungen lassen sich Materialien und Zellen [für Lithium-Feststoff-Batterien] mit geforderten Energiedichten sowie Lebensdauern zwar realisieren. Jedoch stellen die dünnen Schichten für die Produktion […] und die Temperaturbeständigkeit noch Hindernisse dar. Ein einziger Defekt reicht aus, und es kann zum Kurzschluss durch ein „Leck“ in den dünnen Schichten kommen. Sollten besser leitende Fest-Elektrolyt-Materialien entwickelt werden, dann könnte man sich den Aufbau funktionierender Batteriezellen vorstellen. Diese Materialien sind aber heute noch nicht verfügbar/entwickelt.“ (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 20)

Und hinsichtlich der Lithium-Schwefel-Batterien wird es sogar so sein, dass die in den nächsten Jahren fortlaufend optimierte LIB-Technologie immer konkurrenzfähiger wird:

> „Auch [sie] dürfte bis 2030, wenn die Li-S-Technologie den heutigen Mindestanforderungen an BEV-Batterien genügen könnte, diese Energiedichten erreichen. Zusätzlich schwinden die Vorteile der Li-S hinsichtlich der Kosten (evtl. <200 €/kWh), da für die optimierte HE-LIB-Technologie deutlich vor 2030 starke Kostenreduktionspotenziale erwartet werden. Zudem stellt sich für die Li-S-Technologie die noch offene Frage einer (Massen-) produktion, welche vermutlich nicht so schnell aufzubauen bzw. zu übertragen wäre, wie mit klassischen, bekannten LIB-Systemen.“ (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 19)

Letzteres ist auch deshalb ein Problem für die Vorhersage, welche Batterietechnologie sich langfristig durchsetzen wird, weil über den Produktionsprozess einer Lithium-Schwefel Batterie mit hohem Volumen überhaupt noch nicht allzu viel bekannt ist, dazu befinden sie sich erst zu kurze Zeit in der FuE. Insgesamt ergibt sich hier eine hohe Unsicherheit bzgl. der Zukunft, welche selbstverständlich auch die Generation 5, deren Batterietechnologien sich nach wie vor in der grundlegenden Labor-FuE befinden, betrifft. Langfristig gesehen könnten die optimierten LIB der Generation 3 also den heute ungewissen Markteintritt der Generationen 4 und 5 sogar ganz verhindern, wenn deren Herausforderungen nicht gut gelöst werden.

Für die Zukunft gilt also, dass zuerst die bestehenden Konzepte von LIB evolutionär optimiert werden. Außerdem sind bereits neue und vielversprechende Batteriekonzepte, sogenannte „Post-LIB“, als Gegenstand intensiver FuE zu beobachten, welche sich immer weiter vom eigentlichen Konzept der LIB emanzipieren und damit potenziell disruptiv auftreten könnten.

3.3.4.3 Trends im Technologie-Umfeld von LIB und deren Relevanz für die Elektromobilität

Im Folgenden wird das Potenzial der Technologien erörtert, die sich im Technologie-Umfeld von LIB befinden und deren Relevanz für die Elektromobilität in der Öffentlichkeit aktuell diskutiert wird oder in den vergangenen Jahren diskutiert wurde.

3.3.4.3.1 Blei-Säure-Batterien (Pb-Säure)

Mit Blei-Säure-Batterien (Pb-Säure) steht eine ausgereifte Batterietechnologie zur Verfügung, die in herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bereits als sogenannte Starterbatterie zum Einsatz kommt. Ihr Marktpotenzial kann wie folgt eingeschätzt werden:

> „Blei[-Säure-B]atterien spielen zwar für Schwellenländer wie z. B. Indien eine sehr große Rolle, um kostengünstige Fahrzeuge herzustellen und eine breite, günstige Mobilität für die Gesellschaft zu gewährleisten. Für den deutschen bzw. europäischen Markt werden sie allerdings nicht als vielversprechend für Traktionszwecke [der batterie-basierten Elektromobilität] eingestuft und gelten hier vor allem als State of the Art im Bereich der Starterbatterien. Dies liegt u.a. auch daran, dass sie bereits das Ende ihres Entwicklungspotenzials erreicht haben und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zum Beispiel hinter Lithium-Ionen-Batterien deutlich zurückstehen.“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 17)

Dabei fällt vor allem ihre relativ niedrige Energiedichte auf, weshalb sie in Industrieländern heute hauptsächlich in logistischen Anwendungen wie z. B. in Gabelstaplern eingesetzt werden. In diesen Anwendungen werden LIB auch erst dann den Verdrängungswettbewerb gewinnen, wenn ihre Kosten unter den der Pb-Säure liegen.

3.3.4.3.2 Nickel-basierte Energiespeicherkonzepte

Die Benutzung von Nickel-Cadmium-Batterien (Ni-Cd) wurde aufgrund des darin eingesetzten giftigen Schwermetalls Cadmium in den vergangenen Jahren bereits sehr stark eingeschränkt, weil dessen Abbau und Einsatz nicht nur im Falle eines Unfalls Menschen schadet und die

Umwelt schwer belastet (Umweltbundesamt 2012; Europäisches Parlament 2013). Ni-Cd gelten für den Einsatz in der Elektromobilität schon heute als nicht mehr relevant und werden in allen potenziellen Anwendungen zunehmend ersetzt bzw. verdrängt.

Die ähnlich aufgebauten Nickel-Metallhydrid-Batterien (Ni/MH) werden in der vorliegenden Dissertation nicht weiter diskutiert, weil sie vor allem für den Einsatz in HEV geeignet sind. Darüber hinaus ergeben sich folgende nichttechnische Nachteile dieser Batterietechnologie:

> „Für die Automobilindustrie bietet die Ni/MH-Batterie ein nur geringes Potenzial. Nickel und die Versorgungssituation mit diesem Rohstoff selbst bilden ein Problem. Die Ni/MH-Batterie hält dem Kostenvergleich mit der [LIB] nicht stand, das eingesetzte Nickel ist zu teuer. Die Materialpreise für [LIB] liegen bereits heute unter denen der Ni/MH-Batterien. Darüber hinaus fällt auch ihre Umweltbilanz deutlich schlechter aus.“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 17; Wuppertal Institut 2012, Seite 8f.)

Damit kommen Ni/MH nur noch für eine gewisse Übergangszeit für den Einsatz in Elektrofahrzeugen in Frage.

In Bezug auf die nach Aufbau und Produktionsprozess ebenfalls ähnlichen Nickel-Zink Batterien (Ni/Zn) gibt es Zweifel an ihrer Einsatzfähigkeit im Rahmen der Elektromobilität:

> „Da die Ni/Zn-Zelle eher als randständiges Nischenprodukt angesehen wird, sollte für deren Entwicklung kein intensives Programm aufgelegt werden. Nach langen Jahren der [FuE] hat keine Ni/Zn-Zelle bislang die Lebensdauer von mehr als 100 Zyklen erreicht.“ (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 17)

Damit scheint diese Batterietechnologie allenfalls für stationäre Anwendungen geeignet zu sein, im Kontext der Elektromobilität wird sie den Anforderungen nicht genügen können.

3.3.4.3.3 Hochleistungsdoppelschichtkondensatoren

Hochleistungsdoppelschichtkondensatoren bzw. engl. „Supercaps“ kommen in der Traktionsanwendung für die Elektromobilität nicht in Frage. Ihr Potenzial begründet sich so:

> „[Sie] bieten […] eine hohe, kurzfristig zur Verfügung stehende Leistungsdichte sowohl zur Aufnahme kurzzeitig hoher Ladeleistungen bei plötzlichen Bremsvorgängen als auch zum Decken von Bedarfsspitzen und stellen damit eine gute Ergänzung zu Batterien mit hohen Energiedichten dar. Ihr Einsatz glättet den Leistungseingang bzw. die Leistungsentnahme aus Batterien und erhöht dadurch deren Lebensdauer.“ (TAB 2012, Seite 32)

Damit wird deutlich, dass LIB als Hochenergiesysteme und Supercaps als Hochleistungssysteme eher komplementär aufzufassen sind (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 18). Im Moment werden sie noch in einigen HEV-Modellen eingesetzt, in Zukunft wäre ihr Einsatz zum Beispiel auch in der Bordnetzversorgung interessant.

3.3.4.3.4 Hochtemperaturenergiespeicher

Hochtemperaturenergiespeicher wie z. B. Natrium-Nickelchlorid-Batterien ($NaNiCl_2$), die sogenannten „ZEBRA-Batterien“ und Natrium-Schwefel-Batterien (NaS) sind für die in der vorliegenden Dissertation betrachteten Anwendungen der Elektromobilität, also PHEV und BEV, nicht relevant (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 18):

> „Die Notwendigkeit zur Aufrechterhaltung der hohen Betriebstemperatur erzwingt den Einsatz einer Heizung zusätzlich zur thermischen Isolation, da sich die Zelle sonst stetig entlädt.“ (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 33)

Diese zusätzliche Heizung verbraucht Energie, wodurch sie angesichts einer begrenzten Speicherkapazität des Batteriesystems im Elektrofahrzeug direkt dessen Reichweite eingrenzt. Im Rahmen des Thermomanagements eines Elektrofahrzeugs wird aber auf höchste Effizienz geachtet und unnötige Nebenverbraucher werden so weit wie möglich aus Fahrzeugkonzepten gestrichen.

3.3.4.3.5 Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Batterien (RFB) bieten ein anderes elektrochemisches Energiespeichersystem:

> „[Es handelt sich um] ein Akkumulatorenkonzept, welches auf der Reduktion und Oxidation von umgepumpten Elektrolytlösungen aus Vorratstanks an einem brennstoffzellartigen Stack basiert.“ (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 34)

Damit setzen sie sich z. B. von den oben vorgestellten LIB deutlich ab:

> „Im Unterschied zu „klassischen Akkumulatoren“ […] wird das energiespeichernde Material – eine chemische Verbindung – außerhalb der Zelle gelagert. Dies macht die gespeicherten Energiemengen unabhängig von der Zellengröße und zudem jederzeit kapazitativ ausbaubar. Die externen Elektrolyttanks können manuell befüllt werden. […] Die Attraktivität dieses Konzepts liegt im Wegfall der „modularen Grenzen“ beim Speichern von z. B. fluktuierender Energie, da die Speichermenge i. W. vom Tankinhalt der Elektrolyten abhängt. Daneben bieten Redox-Flow-Batterien weitere Vorteile wie: fehlender Memoryeffekt, keine nennenswerte Selbstentladung und Unempfindlichkeit gegenüber Tiefentladung. Das Prinzip der räumlichen Trennung von Energiewandlung und chemischer Speicherung wird auch bei Brennstoffzellen praktiziert.“ (TAB 2008, Seite 64ff.)

Weitere große Vorteile von RFB sind die einfache Betankung, eine hohe zyklische Lebensdauer und Sicherheit (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 17). Nachteilig wirken sich insbesondere die relativ niedrige Energiedichte aus, sowie die weiter zu verbessernde kalendarische Lebensdauer. Für Anwendungen der Elektromobilität scheinen RFB sowie ihre Varianten weniger geeignet zu sein, jedenfalls sind sie für den Einsatz im Elektrofahrzeug noch längst nicht ausgereift und werden sich später im Vergleich mit den dann optimierten LIB nicht durchsetzen können (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 17). Auch zur Herstellung im Rahmen einer Massenproduktion ist noch viel FuE notwendig (VDMA Batterieproduktion 2014, Seite 53).

3.3.4.3.6 Brennstoffzellentechnologie

Die Definition eines Brennstoffzellensystems für den Vergleich mit elektrochemischen Energiespeichertechnologien muss wie folgt aussehen:

> „Die Brennstoffzelle repräsentiert einen Energiewandler und kann deshalb nicht für sich selbst stehen. Deshalb [wird] die folgende Arbeitsdefinition zugrunde gelegt. Es handelt sich um das für den Einsatz in Fahrzeugen favorisierte System der sogenannten Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle ([engl. „proton exchange membrane fuel cell", Abkürzung] PEM-FC) als Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle mit Stack und Wasserstoff-Tank. Mit dieser Beschreibung ist das System […] näherungsweise vergleichbar mit den anderen Energiespeichertechnologien." (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 6)

Der Vergleich verschiedener Automotive-Antriebskonzepte (Abbildung 25) ergibt:

> „Fahrzeuge mit Brennstoffzelle [haben] bereits heute einige Vorteile gegenüber PHEV und BEV. Dazu gehören beispielsweise der höhere Energieinhalt im Tank (bzw. die höhere Energiedichte), die damit deutlich höhere Reichweite und die viel geringere Tankdauer. Vorteile der batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeuge liegen im deutlich höheren Wirkungsgrad sowie der höheren Leistungsdichte. Hinsichtlich der Energiedichte steht somit schon fest, dass auf Lithium-Batterien basierende Fahrzeugkonzepte erst mit der vierten Batteriegeneration (und einer deutlich erhöhten Energiedichte) bezüglich hoher Reichweiten konkurrenzfähig werden. Diese wird jedoch von den meisten Experten nicht vor dem Jahr 2025 bzw. 2030 in Marktreife erwartet." (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 7)

Wenn also nicht eine Technologie vor der anderen Technologie priorisiert werden soll, müsste ein Kompromiss zwischen Batterie- und Brennstoffzelle verfolgt werden:

> „Unter den Experten besteht Konsens darüber, dass Fortschritte in der Batterietechnologie kaum ausreichen dürften, um der Elektromobilität hinsichtlich aller Fahrzeugtypen und Nutzungsprofile zum Durchbruch zu verhelfen. […] Deshalb sprechen sie sich dafür aus, Batterien und die Brennstoffzelle nicht nur als Konkurrenz-, sondern auch als mögliche Komplementärtechnologien zu beobachten. Während die Lithium-Technologien für eher kürzere Reichweiten und kleinere Fahrzeuge geeignet sind, werden Brennstoffzellen für größere Fahrzeuge und lange Reichweiten langfristig die wohl besten technologischen Eigenschaften bieten. Beide Ansätze scheinen für ihre spezifischen Einsatzbereiche nahezu konkurrenzlos bzw. nur in Konkurrenz mit dem Verbrennungsmotor zu sein. Sie gelten aus heutiger Sicht als Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität. Als Hybrid-Technologien bieten sie eine Chance, beide Einsatzfelder zu erschließen. Eine Kompromiss-Lösung wäre also das PHEV-Fahrzeugkonzept oder der Einsatz [einer Reichweitenverlängerung (engl. „range extender)]." (Fraunhofer ISI 2012-2, Seite 6)

Allerdings wird sich dann schon sehr schnell eine ganz spezifische Kompatibiliätsherausforderung der beiden Antriebskonzepte ergeben: Der parallele Aufbau zweier unterschiedlicher Lade- bzw. Tankinfrastrukturen macht z. B. volkswirtschaftlich kaum Sinn (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 11).

Abbildung 25: Ausgewählte Eigenschaften verschiedener Antriebskonzepte.

Eigenschaft	Benzin-Fahrzeug	Plug-In Hybrid	Lithium-Ionen-Batteriefahrzeug	Brennstoffzellen-fahrzeug
Abkürzung	ICE	PHEV	BEV	FCEV
Energieinhalt (Tank)	445 kWh	200 + 10 kWh	24 kWh	140 kWh
Volumen (Tank)	50 Liter	25 + 50 Liter	90 bis 170 Liter	120 bis 180 Liter
Gewicht (Tank)	37 kg	20 + 100 kg	150 bis 250 kg (Zelle+System)	4+80 kg (Kraft-stoff+System)
Reichweite	> 700 km	50 + 600 km	< 150 km	~400 km
„Tank"-Häufigkeit	Alle 2 Wochen	Jeden Tag + alle 2 Wochen	Alle 3 Tage voll, 30 % jeden Tag	Alle 1 bis 2 Wochen
„Tank"-Dauer	3 Minuten	3 Minuten + 2 Stunden	0,5-8 Stunden	3 Minuten

Quelle: Michaelis et al. 2014, Seite 52.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation liegt der Fokus gemäß ihrem Titel auf Batterie-betriebenen Fahrzeugen und damit insbesondere PHEV und BEV. Das Technologische Innovationssystem rund um die Brennstoffzellen für die Elektromobilität sieht weitgehend anders aus als das rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität, was zum Beispiel die strukturellen Komponenten wie Akteure und ihre Kompetenzen anbelangt. Auch die funktionale Dynamik der beiden Technologischen Innovationssysteme mag sich deutlich unterscheiden. Weil die Bestandsaufnahme zum erstgenannten Technologischen Innovationssystem und der Vergleich der beiden Technologischen Innovationssysteme miteinander nicht zum Umfang der vorliegenden Dissertation gehört, wäre er in einer weiteren Veröffentlichung zu erarbeiten. Dadurch könnten sich zahlreiche, hilfreiche Rückschlüsse ergeben, welche den unterschiedlichen Erfolg der beiden je nach Perspektive Komplementär- bzw. Konkurrenztechnologien auf dem Weg in einen Massenmarkt für die Elektromobilität erklären.

Die oben vorgestellten Roadmaps der „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030" (siehe Kapitel 3.1.2), der „Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030" (siehe Kapitel 3.1.3) und der „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030" (siehe Kapitel 3.1.4) gehen alle drei auch auf Aspekte der Brennstoffzelle ein, die Brennstoffzellentechnologie, die Brennstoffzellenfahrzeuge, Herausforderungen und Märkte sowie den notwendigen Infrastrukturaufbau.

4 Das Technologische Innovationssystem rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität

Im vierten Kapitel beginnt die Analyse des Technologischen Innovationssystems (TIS) rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in insgesamt sechs verschiedenen Ländern. Nach der Vorstellung des Vorgehensmodells innerhalb der vorliegenden Dissertation (4.1) folgt Schritt 1 der Analyse, die Definition des TIS im Fokus (4.2). Danach werden die maßgeblichen strukturellen Komponenten des TIS identifiziert (4.3), wozu Akteure wie erstens die Energiespeicher-Industrie/Batteriezellhersteller (4.3.1) und zweitens die Automobilindustrie/ Elektrofahrzeughersteller (4.3.2) gehören.

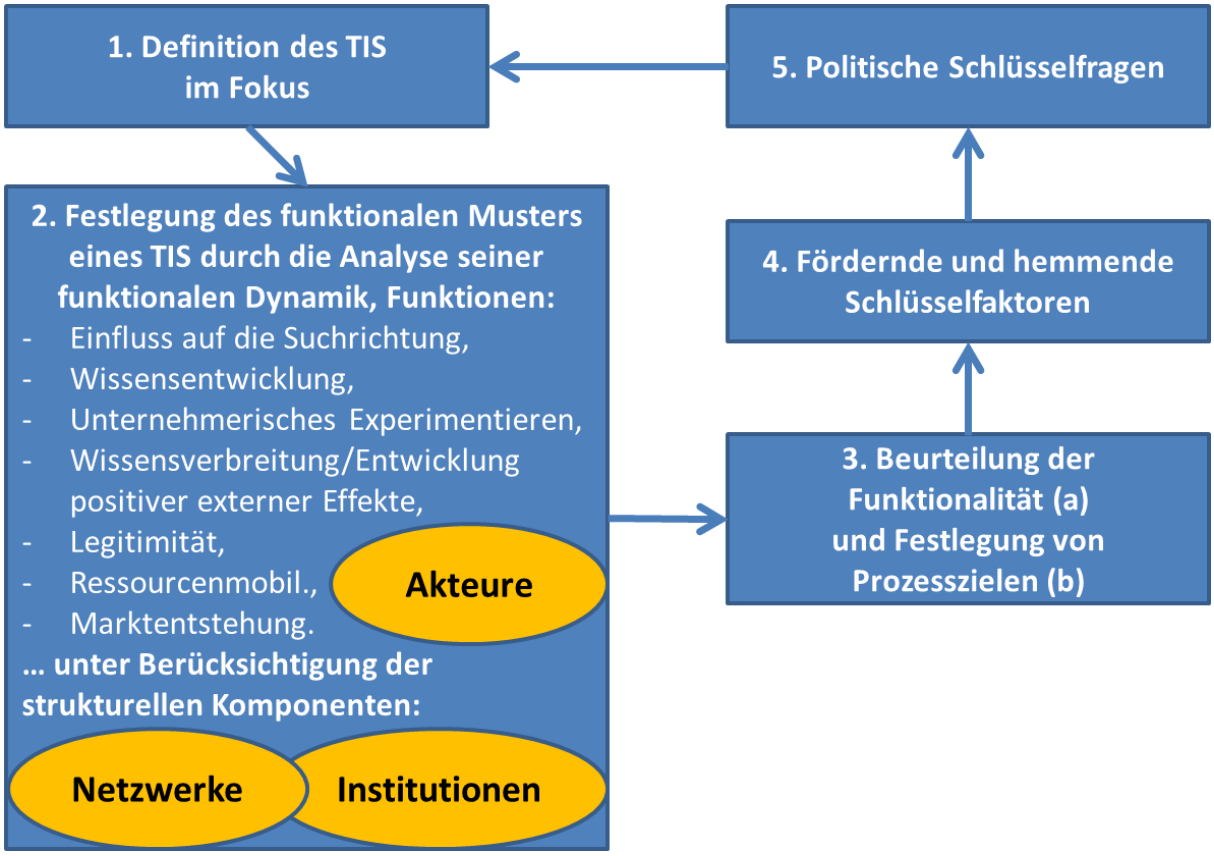
Mit drei Fallstudien zur Toyota Motor Corporation, zu Tesla Inc. und zur BMW Group werden dort drei weitgehend unterschiedliche Strategien analysiert, wie Unternehmen in der Automobilindustrie mit der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs umgehen.

4.1 Vorgehensmodell innerhalb der vorliegenden Dissertation

Die Vorgehensweise im Rahmen der vorliegenden Dissertation orientiert sich an dem vorgestellten Analyseschema, das sechs Teilanalysen bzw. Schritte umfasst (siehe Kapitel 2.3.2). Allerdings vollzieht sie den dort diskutierten und eigentlich nur logischen Schritt weg von der strukturellen Analyse hin zur funktionalen Dynamik eines TIS wirklich, was Schritt 2 und 3 im Original-Analyseschema betreffend nicht wirklich deutlich wird: Nach Schritt 1, der überaus wichtigen Definition des TIS im Fokus soll dort in Schritt 2 eine Identifikation der strukturellen Komponenten erfolgen. Die Notwendigkeit dieses Schrittes erschließt sich allerdings nicht.

Wenn es für die Leistungsfähigkeit eines TIS nicht relevant ist, welche strukturellen Komponenten in dem TIS vorhanden sind, spielt deren Identifikation höchstens sekundär eine Rolle. Denn die in Schritt 3 vorgenommene Analyse der funktionalen Dynamik müsste eigentlich genau diese strukturellen Komponenten bzw. ihre Zwischenverbindungen und ihr Zusammenspiel berücksichtigen, um die Festlegung eines funktionalen Musters des TIS sowie die Durchführung aller weiteren Schritte zu ermöglichen. Und so ist die Analyse der funktionalen Dynamik auch tatsächlich angelegt, ein Beispiel: Während „Netzwerke“ neben „Akteuren“ und „Rahmenbedingungen“ zu den drei strukturellen Komponenten eines TIS gehören und deshalb schon in Schritt 2 zu identifizieren wären (Bergek et al. 2008-1, Seite 413), gilt die „Anzahl, Umfang und Intensität von Netzwerken“ auch als möglicher Indikator zur Funktion „Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte“ (Hekkert et al. 2007, Seite 423). Anstatt jedoch den gleichen Schritt zwei Mal hintereinander durchzuführen, liegt im Rahmen der vorliegenden Dissertation der Fokus gemäß ihrem Titel auf der funktionalen Dynamik und deshalb geht Schritt 2 des Original-Analyseschemas weitgehend in Schritt 3 auf.

Abbildung 26: Das Schema zur Innovationssystemanalyse in der vorliegenden Dissertation.



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf der Adaption in Bergek et al. 2008-1, Seite 411 von Oltander et al. 2005, Seite 20.

Nach der nun folgenden Definition des TIS im Fokus (Schritt 1) erfolgt also die Festlegung des funktionalen Musters des TIS durch die Analyse seiner funktionalen Dynamik anhand der sieben genannten Funktionen (Schritt 2). Dabei werden alle strukturellen Komponenten wie Akteure, Netzwerke und Institutionen berücksichtigt, welche für das funktionale Muster eine Rolle spielen. Danach folgt die Beurteilung der Funktionalität (Schritt 3a) und Festlegung von Prozesszielen (Schritt 3b) für das TIS im Fokus. Daraus können fördernde und hemmende Schlüsselfaktoren abgeleitet werden (Schritt 4), aus denen die politischen Schlüsselfragen für die weitere Ausgestaltung des TIS im Fokus resultieren (Schritt 5). Weil der Untersuchungsalgorithmus iterativ angelegt ist, kann dieses Analyseschema beliebig oft durchlaufen werden, zum Beispiel um die Entwicklung des TIS im Fokus regelmäßig zu evaluieren und sie schrittweise zu beschleunigen oder zu korrigieren.

4.2 Schritt 1: Definition des TIS im Fokus

Als erster Schritt bzw. Startpunkt für die Analyse ist das TIS im Fokus zu definieren (Bergek et al. 2008-1, Seite 411ff.). Dazu werden drei wichtige Entscheidungen fällig, (1) die Wahl zwischen Produkt oder Wissensgebiet als den Untersuchungen zu Grunde liegendes Gerät bzw. Lehre, (2) die Wahl zwischen Breite und Tiefe der vorgenommenen Untersuchung und (3) die Wahl des räumlichen Ausmaßes des Untersuchungsbereichs.

Weil das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität im Vordergrund stehen soll, ist (1) schnell beantwortet: Gewählt werden als Produkt bzw. Produktgruppe oder als Wissensgebiet die Energiespeicher für die Elektromobilität bzw. elektrochemische Batterietechnologien, welche für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs in Frage kommen (siehe Kapitel 3.3). Dabei handelt es sich maßgeblich um die Technologie optimierter Lithium-Ionen-Batterien (LIB). Hinsichtlich (2) bzw. zur Abgrenzung von Breite und Tiefe der Fallstudie werden als Aggregationsebene die elektrochemische Batterietechnologien auf Systemebene (die sogenannten „Batteriesysteme“) bzw. noch vor der Integration in spezifische Fahrzeugkonzepte gewählt. In Bezug auf die Anwendungsvielfalt werden vierrädrige Elektrofahrzeuge gewählt (siehe Kapitel 3.3.1), wobei der Fokus auf PHEV und BEV liegt. Zuletzt wird bezüglich (3) bzw. dem räumlichen Einzugsgebiet entschieden, dass globale Entwicklungen und Trends eine Rolle spielen, allerdings aus der Perspektive Deutschlands im Kontext der Europäischen Union betrachtet werden. Dazu werden die Länder Japan, Korea, China, die USA, Frankreich und Deutschland erfasst und ihre TIS miteinander verglichen.

Eine aktuelle Patentanalyse verdeutlicht, warum diese sechs Länder ausgewählt werden. Patentanmeldungen geben über eher mittelfristige und marktnahe Entwicklungsarbeiten Auskunft und drücken mit der Gesamtheit der Patente eines Landes also aus, wie dieses Land bezüglich der Marktentwicklung für einzelne Technologien bzw. die Technologien einsetzende Anwendungen aufgestellt ist. Die Patentdaten waren zum Zeitpunkt der Untersuchung allerdings nur bis einschließlich dem Jahr 2013 verfügbar.[25] Ermittelt wurde dazu die Anzahl an transnationalen Patentanmeldungen am Europäischen Patentamt (EPA)[26] und im Rahmen des Vertrags über die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Patentwesens (engl. „patent cooperation treaty“, Abkürzung PCT)[27] angemeldeten Patente. Im Jahr 1977 trat das Europäische Patentübereinkommen (EPÜ) in Kraft, ein Jahr später das PCT. Weil beides in etwa auch dem Start von EPA- und PCT-Direktanmeldungen entspricht, lohnt sich eine früher angesiedelte Patentanalyse nicht. Analysiert wurden Patente aus der Internationalen Patentklassifikation (IPC)[28] bzw. aus den Klassen:

- Sektion H - Elektrotechnik,
- H01 Grundlegende elektrische Bauteile,

---

25 Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse der Patentanalyse wurden im Rahmen einer Recherche mit konkret abgestimmten Suchstrategien in der Patentdatenbank „PATSTAT“ im September 2016 erarbeitet, siehe (EPO 2017-1).

26 Das Glossar zu EPA: „Das Europäische Patentamt bietet Erfindern ein einheitliches Anmeldeverfahren, über das sie in bis zu 40 europäischen Staaten Patentschutz erlangen können. Es ist das Exekutivorgan der Europäischen Patentorganisation.“ (EPO 2017-2)

27 Das Glossar zu PCT: „Vertrag über die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Patentwesens. Internationaler Vertrag, nach dem mit einer einzigen internationalen Patentanmeldung Patentschutz in bis zu 144 Ländern erlangt werden kann.“ (EPO 2017-2). Eine sogenannte PCT-Anmeldung erfolgt im Rahmen des genannten Vertrags.

28 Die IPC ist wie folgt zu erläutern: „Die Internationale Patentklassifikation (IPC) ist ein Recherche-Hilfsmittel. Sie dient der Klassifizierung technischer Sachverhalte und bildet sämtliche Gebiete der Technik ab. Sie wird seit 1975 für die Klassifikation von Patenten und Gebrauchsmustern verwendet. Über 100 Patentbehörden weltweit klassifizieren nach der IPC.“ (DPM 2017)

- H01M Verfahren oder Mittel, z. B. Batterien, für die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie,
- H01M 2/00 Bauliche Einzelheiten oder Verfahren zur Herstellung nichtaktiver Teile,
- H01M 4/00 Elektroden,
- H01M 10/00 Sekundärelemente; Herstellung derselben und insbesondere
- H01M 10/0525 „Schaukelstuhl"-Batterien, z. B. Batterien mit Lithium-Einschub oder -Interkalation in beiden Elektroden; Lithium-Ionen-Batterien.

(IPC entsprechend DPM 2017)

Teilweise wurde die ganze Klasse berücksichtigt, teilweise die Klasse geschnitten mit Schlüsselbegriffen wie „Lithium" und „Ionen". Durchsucht wurden die Titel und Abstracts der Patente, nicht aber die sogenannten Patentansprüche (engl. „claims"), welche erst ab dem Jahr 2000 durchsuchbar sind.

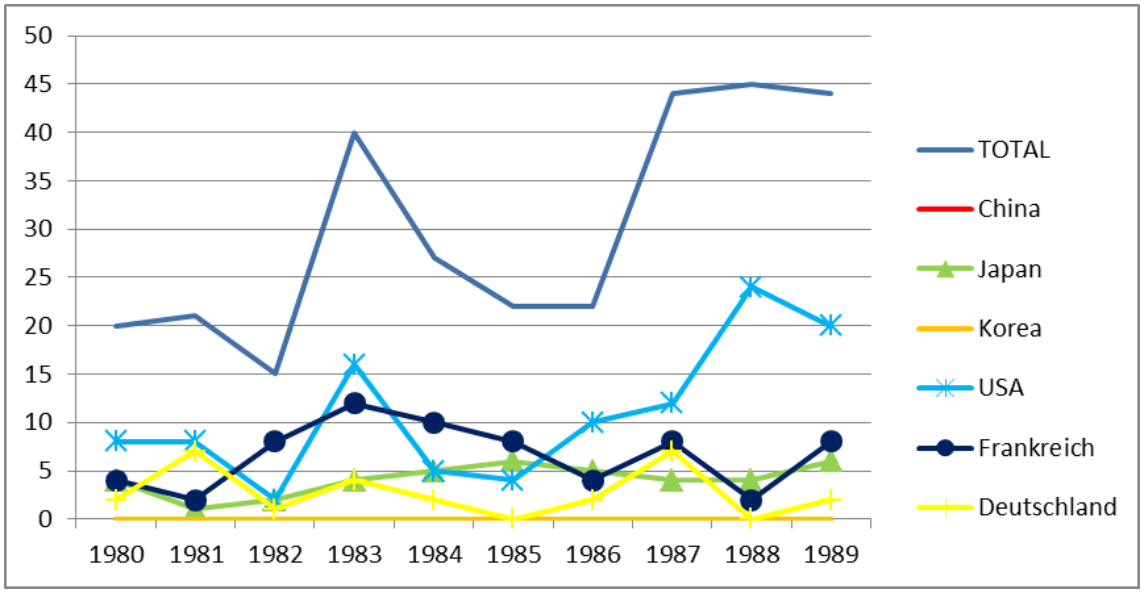
Im Jahrzehnt zwischen 1980 und 1989 befand sich die Anzahl der Patente zu LIB auf einem relativ niedrigen Niveau zwischen 15 (1982) und 45 Patenten (1988), die deutlichen Schwankungen ergaben sich vor allem durch die schwankenden Patentierungsaktivitäten in den USA, die das Ranking oft anführten (Abbildung 27). In diesen „Anfangsjahren" belegte Frankreich selten den ersten, öfter den zweiten Platz, China und Korea traten im Gegensatz zu Deutschland noch gar nicht in Erscheinung. Diese führenden vier Nationen waren verantwortlich für einen überwältigenden Patentanteil zwischen 66,67 Prozent (1988) und 95,45 Prozent (1986). Aus dem Rest der Welt fielen lediglich Kanada und Großbritannien weiter ins Gewicht, die zusammen aber nie mehr als zehn Patente (1987) erreichten.

Im nächsten Jahrzehnt zwischen 1990 und 1999 bahnten sich Anwendungen der Konsumelektronik den Weg in den Massenmarkt, zuerst mp3-Player, Video-Camcorder, später Laptops und Mobiltelefone. Gleichzeitig nahm auch die Anzahl der Patente zu LIB deutlich zu, von 32 (1990) auf 231 Patente (1999) (Abbildung 28). In den Jahren zwischen 1994 und 1996 ergab sich ein sehr schneller Anstieg, von dem die Nationen Japan und die USA am besten profitierten. Deutschland und Frankreich konnten ihr Niveau nur geringfügig steigern, Korea wurde ab dem Jahr 1996 aktiv und machte sich an die Aufholjagd. China blieb weiterhin inaktiv. Auch in diesem Jahrzehnt waren die vier führenden Nationen plus Korea verantwortlich für einen großen Patentanteil von 68,75 Prozent (1990) bis 93,00 Prozent (1995). Aus dem Rest der Welt war Kanada jedes Jahr eine der zwei besten Nationen und verzeichnete in der Spitze 22 Patente (1996). Andere Nationen traten nur punktuell in Erscheinung, die Niederlande mit 8 Patenten (1999), Großbritannien mit 4 Patenten (1997).

Das Jahrzehnt zwischen den Jahren 2000 und 2009 erlebte nach den heftigen Anstiegen bis auf 337 Patente (2000) eine Konsolidierung (Abbildung 29). Erst gegen Ende des Jahrzehnts bzw. mit dem Aufkommen der Elektromobilität in der öffentlichen Diskussion und ersten Prototypen auf dem Markt nahm die Anzahl der Patente von LIB wieder zu und wuchs bis auf 519 Patente (2009) an. Insbesondere Japan vergrößerte seinen Vorsprung bzw. baute seine in der Konsumelektronik erworbene Technologieführerschaft auch über die Elektromobilität weiter aus, die USA folgten mit einigem Abstand. Korea überholte zuerst Frankreich und dann Deutschland, das seinen dritten Platz zum Ende des Jahrzehnts aber verteidigen konnte.

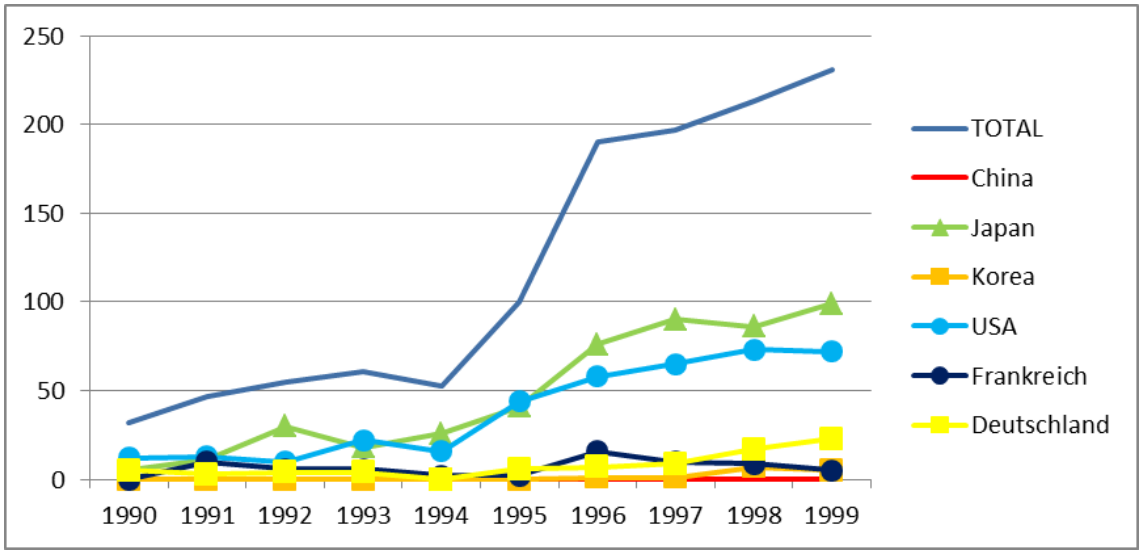
China wurde ebenfalls aktiv und überholte Frankreich mit Verzögerung. Die sechs führenden Nationen konnten in diesem Jahrzehnt einen hervorragenden Patentanteil zwischen 86,65 Prozent (2000) und 93,64 Prozent (2009) aufweisen. Der Rest der Welt wurde damit praktisch bedeutungslos, was andere Nationen nur stellenweise aufhalten konnten, Kanada mit 14 Patenten (2000), die Schweiz mit 13 Patenten (2006), Großbritannien mit 10 Patenten (2007).

Abbildung 27: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 1980 und 1989 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen.



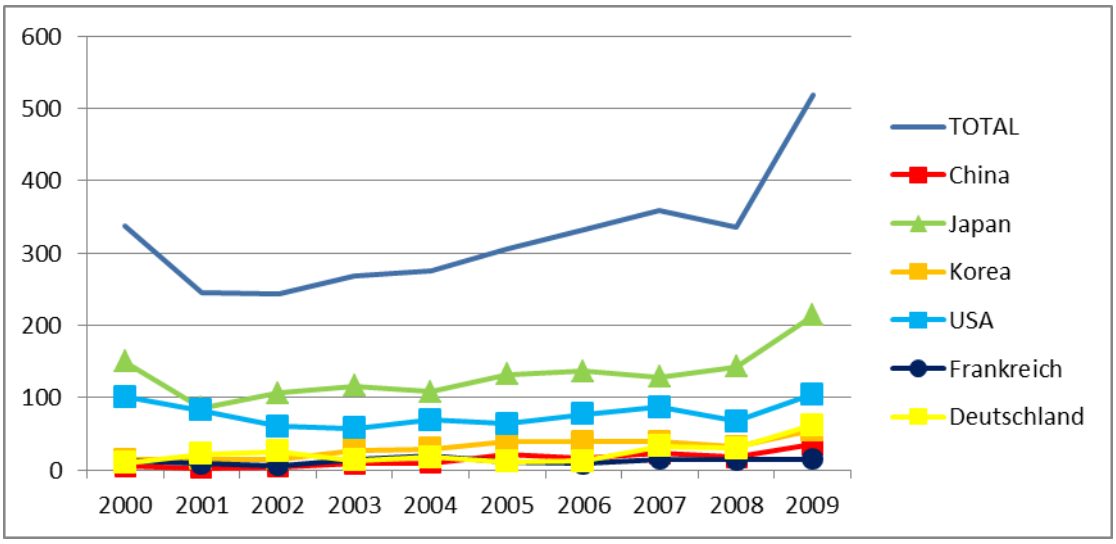
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 28: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 1990 und 1999 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen.



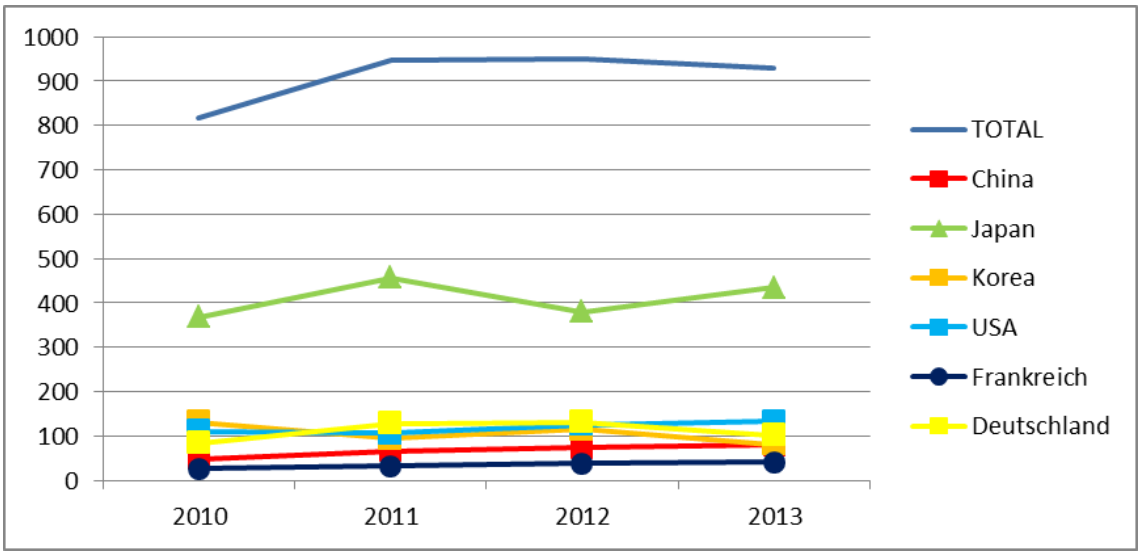
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 29: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 2000 und 2009 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen.



Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 30: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 2010 und 2013 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen.



Quelle: Eigene Darstellung.

Das aktuelle Jahrzehnt ist bis einschließlich dem Jahr 2013 überraschenderweise nicht von einem hohen jährlichen Wachstum der Anzahl der Patente von LIB gekennzeichnet (Abbildung 30). Stattdessen verlangsamte sich das Wachstum von 819 Patenten (2010) auf das Maximum von 951 Patenten (2012) und sank zuletzt wieder. Japan konsolidierte seine Technologieführerschaft auf einem sehr hohen Niveau rund um 400 Patente pro Jahr, die USA, Deutschland und Korea folgen auf einem annähernd gleichen Niveau von rund einem Viertel der Patentanmeldungen Japans. China hat Frankreich überholt und abgehängt.

Insgesamt verteidigten die sechs führenden Nationen einen hohen Patentanteil zwischen 91,06 Prozent (2012) und 94,01 Prozent (2010) (siehe Tabelle 8). Hinsichtlich dem Rest der Welt fällt auf, dass Kanada keinen starken Ausdruck in Patentaktivitäten mehr findet und dass stattdessen die Schweiz mit 16 Patenten (2012), Belgien und Großbritannien mit 13 Patenten (2012) punktuell für Eindruck sorgen.

Tabelle 8: Übersicht zur Analyse der Transnationalen Patentanmeldungen zu LIB zwischen 2010 und 2013.[29]

	2010	**2011**	**2012**	**2013**
TOTAL	818	947	**951**	929
China	49	67	**74**	79
Japan	368	**457**	380	434
Korea	**131**	95	115	81
USA	111	107	126	**133**
Frankreich	26	32	39	**41**
Deutschland	84	129	**132**	102
G6	**94,01%**	93,66%	91,06%	93,65%
RdW	5,99%	6,34%	**8,94%**	6,35%
RdW - TOP 1	BE (11)	GB (7)	CH (16)	BE (12)
RdW - TOP 2	GB (9)	AT/BE (6)	BE/GB (13)	CH (11)
RdW - TOP 3	CH (5)	CA/CH/IT (5)	IT (8)	GB (8)

Quelle: Eigene Darstellung.

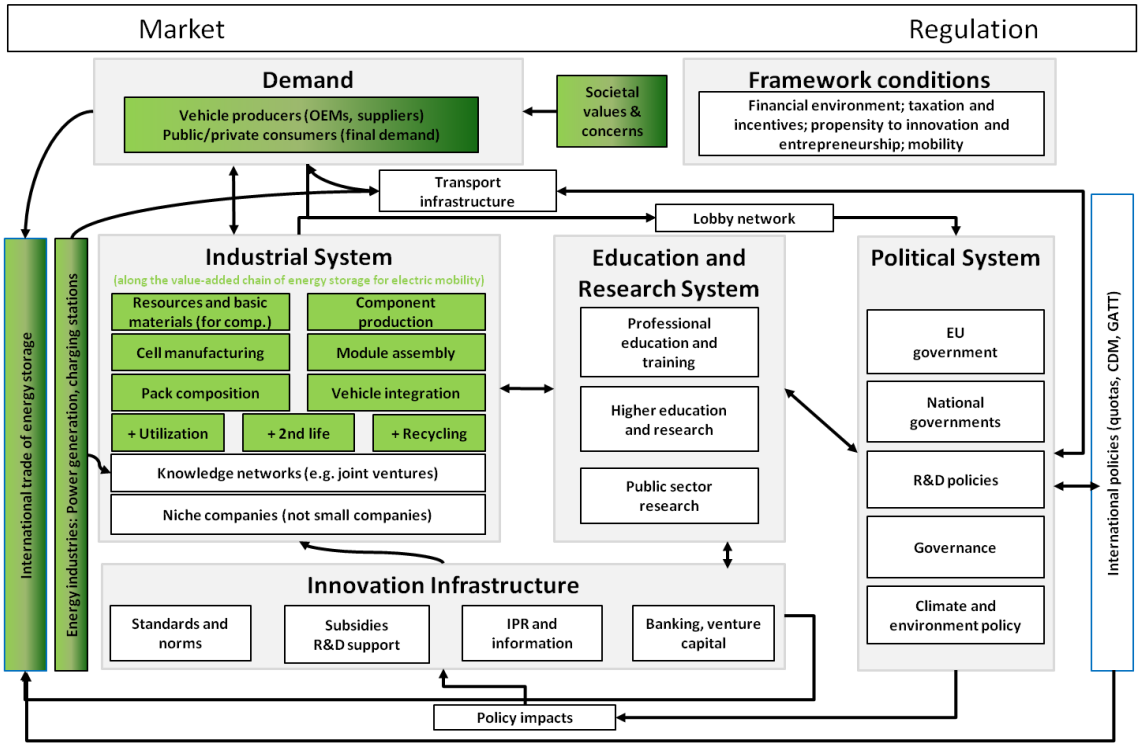
Eine erste Darstellung des Innovationssystems für kohlenstoffarme Automobile wurde innerhalb des Forschungsprojektes „GHG-TransPoRD“ im Rahmen des siebten Rahmenprogramms für Forschung und technologische Entwicklung der EU (2007-2013) entwickelt und diskutiert (Köhler et al. 2013, Seite 177f.). Hier bilden die drei Teilsysteme der Industrie, Bildung und Forschung sowie Politik den Kern des Innovationssystems. In der Industrie spielen die Automobilhersteller die herausragende Rolle, aber auch andere Akteure beeinflussen den Innovationsprozess über das im Folgenden noch zu diskutierende funktionelle Muster (siehe Kapitel 5). Dazu gehören zahlreiche große und kleine Zulieferunternehmen, Lobby-, aber auch Wissensnetzwerke wie z. B. zeitweilige Unternehmenszusammenschlüsse (engl. „joint ventures“, Abkürzung JV) sowie Nischenunternehmen, wobei „Nische“ in diesem Fall gar nicht implizieren soll, dass die Unternehmen klein sein müssen – sie können über beträchtliche finanzielle Ressourcen und Mitarbeiterzahlen verfügen. Indirekt zum Industriesystem gehören auch die Mineralölunternehmen, welche z. B. die herkömmlichen Kraftstoffe her- und bereitstellen, sowie der weite internationale Handel von Automobilen und Komponenten. Im System

[29] Von Einzelerfindern und institutionellen Anmeldern, inklusive Ko-Patentierungen.

von Bildung und Forschung spielen die Universitäten und Forschungsinstitute eine wichtige Rolle, z. B. in der Vertragsforschung für die Industrie. Im Politiksystem sind z. B. die EU und nationale Regierungen zu nennen, die nicht nur die Regulierung in zahlreichen Aspekten vornehmen, sondern auch z. B. die Straßeninfrastruktur bereitstellen und international übergreifende Abkommen abschließen.

Das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität erfährt im Vergleich dazu einige Anpassungen (Abbildung 31). Das Industriesystem entwickelt sich entlang der Wertschöpfungskette, die mit den Ressourcen und Basismaterialien (für die Batteriekomponenten) beginnt und mit der Integration der Batteriesysteme in Elektrofahrzeugen nicht am Ende ist. Über die eigentliche Nutzungsdauer in der Elektromobilität hinaus wird bei diesen Batteriesystemen auch von der Zweitnutzung (eng. „Second life“) gesprochen (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 37). Wenn dieses „zweite Leben“ vorbei ist, werden die Batteriesysteme dem Recycling zugeführt und der Rohstoffkreislauf schließt sich im Idealfall mit einem hohen Prozentsatz recycelter Batteriesysteme.

Abbildung 31: Das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität.



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Kuhlmann et al. 2001, Seite 2. Grün markiert sind die durchgeführten Anpassungen.

Weitere kleine Änderungen betreffen den Beitrag der Energieindustrie, wo statt der rund um herkömmliche Brenn- und Kraftstoffen arbeitenden Mineralölunternehmen die Energie- bzw. Stromversorgungsunternehmen eine zunehmend größere Rolle spielen, und zwar nicht nur in der eigentlichen Stromgenerierung, sondern auch in der Bereitstellung z. B. über im öffentlichen Raum verfügbare Ladestationen. Der internationale Handel entsteht zwischen verschiedenen TIS rund um elektrochemische Energiespeichertechnologien.

Hinsichtlich der sich ändernden gesellschaftlichen Werte und Interessen ist festzustellen, dass insbesondere der Klimawandel einen wichtigen Rang in der öffentlichen Aufmerksamkeit einnimmt. Auch dadurch ändert sich die Nachfrage, die im Falle der Energiespeicher für die Elektromobilität aber vor allem von den Elektrofahrzeugherstellern und nur indirekt von den öffentlichen und privaten Konsumenten ausgeht.

Insgesamt zeigt sich allerdings, dass das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität nicht radikal neu ist bzw. in vielerlei Hinsicht ähnlich oder sogar gleich ist wie das TIS rund um kohlenstoffarme Automobile. Damit kommen zwar neue Akteure, Netzwerke und Institutionen „ins Spiel", die grundsätzlichen „Spielregeln" sind allerdings etabliert und damit ist die Grundlage für einen Umstieg von mit herkömmlichen Kraftstoffen betriebener Mobilität auf die Elektromobilität gegeben.

4.3 Identifikation der maßgeblichen strukturellen Komponenten

Nach dem ursprünglichen Analyseschema sind im zweiten Schritt die strukturellen Komponenten des TIS zu identifizieren (Bergek et al. 2008-1, Seite 413f.). Dieser Schritt wird nach dem Vorgehensmodell innerhalb der vorliegenden Dissertation (siehe Kapitel 4.1) mit dem ursprünglich dritten Schritt der Festlegung des funktionalen Musters im TIS zusammengelegt (siehe Kapitel 5). Im Folgenden erfolgt deshalb ein Marktüberblick über die Akteure der Energiespeicher-Industrie (siehe Kapitel 4.3.1) sowie die Akteure der Automobilindustrie (siehe Kapitel 4.3.2). Mit den Batterie- und Elektrofahrzeugherstellern bzw. den Herstellern und den Hauptanwendern der namensgebenden Schlüsseltechnologie des im Fokus stehenden TIS werden seine Schlüsselakteure dargestellt, zusammen bilden sie einen wichtigen Teil der Wertschöpfungskette von Energiespeichern für die Elektromobilität. Drei Fallstudien zu spezifisch ausgewählten Unternehmen der Automobilindustrie zeigen außerdem die Bandbreite an Strategien, mit denen der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs begegnet werden kann.

4.3.1 Akteure #1: Energiespeicher-Industrie/Batteriezellhersteller

Wie die Patentanalyse zeigt (siehe Kapitel 4.2), dominierten japanische Unternehmen spätestens seit dem Jahr 1995 die Patentaktivitäten zu LIB. Waren sie anfangs noch für den Einsatz in Anwendungen der Konsumelektronik vorgesehen, so wurden sie mit dem Aufschwung der Elektromobilität um das Jahr 2008 auch in diesem Bereich für Anwendungen zuerst neben anderen Batterietechnologien vorgesehen, bevor sie das dominante Design wurden und für die nächsten Jahre sein werden (siehe Kapitel 3). Der Vorsprung Japans begründet sich also auch durch die mittlerweile rund 25-jährige Erfahrung japanischer Unternehmen in der Herstellung von LIB (Dudenhöffer 2010, Seite 24ff.).

Die Marktanteile der Länder weltweit kann gemessen werden wie folgt:

> „Der Marktanteil jedes Landes am Weltmarkt im Jahr 2015 wird einzeln für die Komponenten- und Zellmärkte ermittelt. Die Marktanteile für die Teilmärkte Kathode, Anode, Separator und Elektrolyt werden auf Mengenbasis der Studien von B3 Corporation [aus den Jahren

2015 und 2016] entnommen (Märkte nur für LIB-Komponenten für [Elektrofahrzeuge]) und für das tatsächlich erreichte Ergebnis umgerechnet (rd. 14 GWh globale Nachfrage, zum Vergleich war die gesamte LIB-Nachfrage in 2015 rd. 70 GWh). Für den Zellmarkt wird die Marktgröße in GWh aus der Datenbank des Fraunhofer ISI [2016-2] verwendet." (Fraunhofer ISI 2016-1, Seite 66)

Neben Japan rückt vor allem China deutlich mehr in den Fokus (Abbildung 32):

„Die asiatischen Länder dominieren in der Herstellung der Komponenten und der Zellen für Lithium-Ionen-Batterien. Japanische Unternehmen weisen über alle Komponenten sowie die Zellfertigung hinweg Marktanteile von 40 bis 60 Prozent auf. Auch Unternehmen aus China decken alle Bereiche mit hohen Marktanteilen ab [und sind] mit 30 Prozent und mehr an den jeweiligen Teilmärkten beteiligt […]. Koreanische Unternehmen wiesen in 2015 nur bei Zellen und Elektrolyten Marktanteile über 10 Prozent auf. Im Bereich der Separatoren hielt Polypore (US) einen Marktanteil von fast 20 Prozent. Einzig bei den Kathodenmaterialien sind weitere Unternehmen [wie] Umicore (Belgien) und Johnson Matthey (UK) mit über 10 Prozent Marktanteil in 2015 aktiv. Durch die hohe Dynamik der Zell- und damit Komponentennachfrage für LIB in xEV können sich diese Anteile in den kommenden Jahren deutlich verschieben […]. Die drei asiatischen Länder werden dabei aber sicherlich ihre signifikanten Anteile halten und wenig Spielraum für weitere Marktteilnehmer lassen." (Fraunhofer ISI 2016-1, Seite 66)

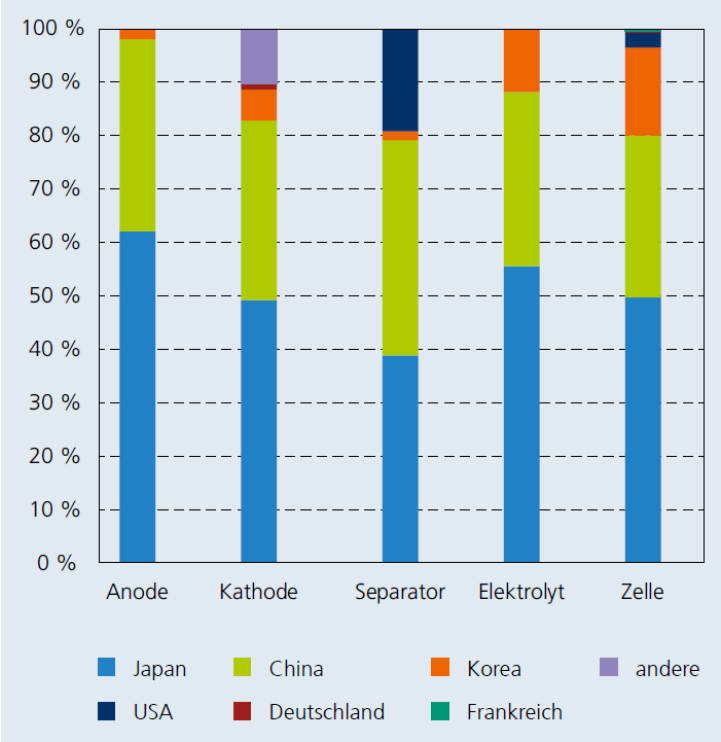
Interessant ist deshalb auch die Verschiebung von Marktanteilen unter den Ländern weltweit:

„Das relative Marktwachstum wird als Veränderung der Marktanteile über die Differenz der Marktanteile im Jahr 2015 und 2017 in Prozentpunkten ermittelt. Die Marktanteile 2015 sind [oben bzw. in Abbildung 32] dargestellt. Für das Jahr 2017 werden die Marktanteile auf Basis der Hochrechnung der xEV-Verkaufszahlen im 1. Halbjahr 2016 auf das gesamte Jahr 2016 und Fortschreibung für 2017 ermittelt, wobei angenommen wird, dass sich die OEM-Zellhersteller-Komponentenhersteller Beziehungen bis dahin nicht ändern." (Fraunhofer ISI 2016-1, Seite 67)

Als große Gewinner von Marktanteilen sind China und Korea zu sehen (Abbildung 33):

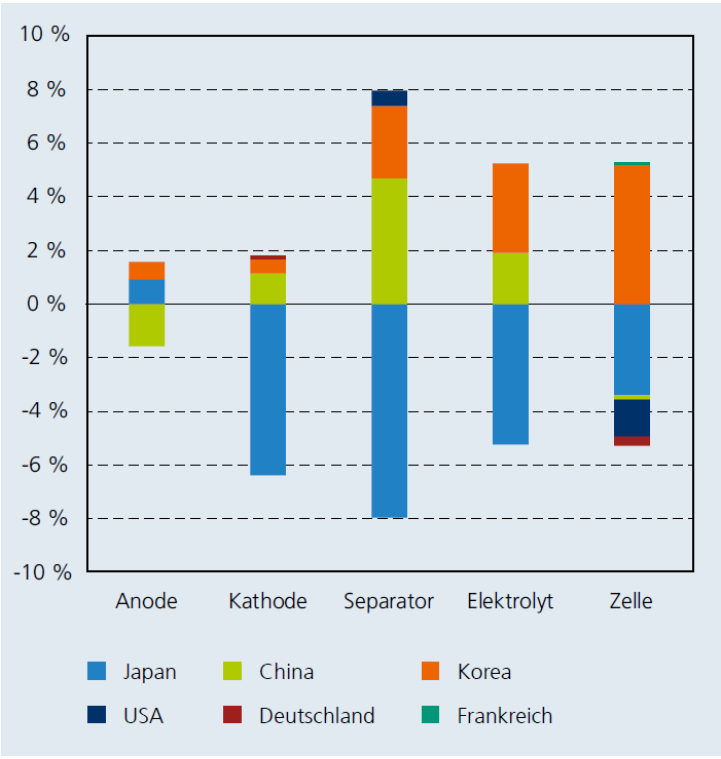
„Durch die hohe Dynamik im chinesischen Markt für Elektrofahrzeuge, aber auch das Wachstum des globalen Elektromobilitätsmarktes gesamt ist mit deutlichen Verschiebungen der Marktanteile unter den drei asiatischen Marktteilnehmern Japan, Korea und China zu rechnen. Koreanische Zellhersteller dürften durch zahlreiche etablierte Zulieferbeziehungen von LG Chem, Samsung SDI und SKI mit weltweiten (auch chinesischen) OEM deutliche Anteile am Zellmarkt gewinnen. Japan verliert demgegenüber und die Anteile der USA und Deutschlands aus 2015 verschwinden. Im Bereich der Komponenten verliert Japan zum Teil deutlich. China und Korea gewinnen Marktanteile. Insgesamt ergeben sich deutliche Verluste für Japan (da Japan aktuell auch die meisten Marktanteile hält). China und Korea gewinnen im Bereich der Komponenten, Korea besonders beim Zellmarkt." (Fraunhofer ISI 2016-1, Seite 67)

Abbildung 32: Marktanteile in den Teilmärkten im Jahr 2015.



Quelle: Fraunhofer ISI 2016-1, Seite 66 bzw. B3 Corporation 2015; 2016 und Fraunhofer ISI 2016-2.

Abbildung 33: Veränderung der Marktanteile in den Teilmärkten 2015-2017.



Quelle: Fraunhofer ISI 2016-1, Seite 67.

Um einen besseren Überblick über die Akteure auf dem Weltmarkt für elektrochemische Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität zu erhalten, lohnt sich ein Blick auf die prognostizierten Märkte von LIB-Zellen für PHEV und BEV (Tabelle 9). Die Abschätzungen wurden auf der Basis von PHEV- bzw. BEV-Verkaufsprognosen und entsprechenden Preisinformationen zu Batteriezellen aus der Energiespeicher- bzw. Automobilindustrie ermittelt (Anderman 2013, Seite 161f.).

Tabelle 9: Märkte für LIB-Zellen für PHEV und BEV nach Zellherstellern oder zeitweiligen Unternehmenszusammenschlüssen in Mio. USD.

Zellhersteller	**Land**	**PHEV 2014**	**PHEV 2015**	**PHEV 2016**	**BEV 2014**	**BEV 2015**	**BEV 2016**
Panasonic Corp. (Sanyo Co. Ltd.)	JP	88	105	130	43	94	135
Panasonic Corp. (18650-Zellen)	JP	-	-	-	417	413	449
Blue Energy Co. Ltd. (JV)	JP	6	11	26	-	-	-
Lithium Energy Japan (LEJ, JV)	JP	52	66	84	74	73	76
Automotive Energy Supply Corp. (AESC, JV)	JP	-	-	-	394	384	373
Toshiba Corp.	JP	-	-	-	33	24	23
LG Chem Ltd.	KR	234	232	227	220	244	265
Samsung SDI Co. Ltd.	KR	43	72	105	197	250	403
BYD Co. Ltd.	CN	18	22	27	30	32	35
A123 Systems LLC	CN	8	12	16	62	72	86
Tianjin Lishen Battery Co. Ltd.	CN	7	14	17	44	48	52
Li-Tech Battery GmbH	DE	-	-	-	48	59	X
Others	RdW/ CN	21	38	55	107	111	139

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Anderman 2013, Seite 161f.; Anderman 2016, Kapitel III.2, Seite 6ff.

Wichtig ist dabei nicht unbedingt die exakte Genauigkeit der angegebenen Beträge, sondern vielmehr die Unternehmen, denen sie zugeschrieben werden, und ggf. auch die Größenordnung der einzelnen Marktanteile relativ zueinander. Besonders eindrücklich ist die Feststellung, dass aus der Sicht des Jahres 2013 mit nur einer Ausnahme alle großen Hersteller aus Asien kommen, wo Japan vor Korea und China führt. Die einzige und aus Europa stammende Ausnahme der Li-Tech Battery GmbH (Deutschland) stand fast ganz am Ende der Liste international bedeutender Batteriehersteller und wurde bis Ende 2015 sogar vollständig abgewickelt (manager magazin online 2015-1). Insgesamt ergibt sich mit dieser Aufstellung eine recht überschaubare Anzahl von knapp mehr als zehn großen, für PHEV und BEV Batteriezellen-herstellenden Unternehmen weltweit.

Dazu kommen die Unternehmen, welche bis dato ausschließlich deshalb aufgefallen waren, weil sie Batteriezellen für HEV herstellten (Tabelle 10). Diese drei Unternehmen stammen ebenfalls aus Japan.

Tabelle 10: Märkte für LIB-Zellen für HEV nach Zellherstellern in Mio. USD.

Zellhersteller	**Land**	**HEV 2014**	**HEV 2015**	**HEV 2016**
GS Yuasa Corp.	JP	222	264	322
Primearth EV Energy Co. Ltd. (PEVE)	JP	30	71	99
Hitachi Ltd. Corp.	JP	48	53	61

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Anderman 2013, Seite 163; Anderman 2016, Kapitel III.2, Seite 5.

Nach diesem Überblick über die Energiespeicher-Industrie/Batteriezellhersteller folgt ein Überblick über die Automobilindustrie/Elektrofahrzeughersteller.

4.3.2 Akteure #2: Automobilindustrie/Elektrofahrzeughersteller

2015 war kein gutes Jahr für die umfassende Verbreitung von Elektromobilität weltweit, wenn man es rein in Bezug auf die insgesamt verkauften Elektrofahrzeuge (HEV, PHEV, BEV und FCEV) analysiert. Nachdem die Zahl von 2012 auf 2013 noch um knapp acht Prozent angestiegen war (von 1.576.161 auf 1.696.755 Elektrofahrzeuge), stieg die Zahl im Jahr 2014 erneut um knapp acht Prozent (auf 1.817.123 Elektrofahrzeuge).[30] Im Jahr 2015 sank die Zahl der verkauften Elektrofahrzeuge allerdings um knapp 1,5 Prozent (auf 1.789.337 Elektrofahrzeuge). Damit sank nicht nur die Anzahl der weltweit verkauften Elektrofahrzeuge, sondern die Erwartungen an ein eigentlich hohes Marktwachstum wurden deutlich enttäuscht. In der

[30] Vgl. MarkLines 2017 bzw. zur Verfügbarkeit der Verkaufsdaten von Elektrofahrzeugherstellern weltweit auch die folgende Webseite von MarkLines: https://www.marklines.com/en/green_vehicles/ (zuletzt abgerufen am 7.05.2017).

ersten Hälfte des Jahres 2016 wurden allerdings bereits 1.093.519 Elektrofahrzeuge verkauft, was auf eine positive Entwicklung der Verkaufszahlen bis zum Ende des Jahres schließen lässt. Unangefochtener Spitzenreiter im Verkauf von Elektrofahrzeugen war auch im Jahr 2015 die Toyota Motor Corporation (TMC), was allerdings einem sehr hohen Anteil verkaufter HEV zu verdanken ist, was viel über die Rolle des Unternehmens als Pionier für elektromobile Fahrzeugkonzepte aussagt.

Tabelle 11: Die zehn marktführenden PHEV-Hersteller im Jahr 2015 plus Unternehmen aus Deutschland.

PHEV-Hersteller	**Land**	**Marken**	**2014 verkauft**	**2015 verkauft**	**Entwicklung**
BYD Auto Company, Ltd.	CN	BYD Auto	14.748	**47.876**	+224,63 %
General Motors Corporation	USA	Chevrolet, Opel, Vauxhall, Cadillac, Holden	22.729	**18.475**	-18,72 %
Ford Group	USA	Ford	19.983	**17.341**	-13,22 %
Mitsubishi Motors Corporation	JP	Mitsubishi	12.353	**14.321**	+15,93 %
SAIC Group	CN	Roewe	0	**10.711**	-
BMW Group	**DE**	**BMW**	**1.942**	**6.138**	+216,07 %
Toyota Motor Corporation	**JP**	**Toyota**	**18.737**	**5.667**	-69,76 %
Volkswagen Group	DE	Audi, Porsche, VW	1.029	**2.648**	+157,34 %
Geely Holding Group	CN	Volvo	**745**	**813**	+9,13 %
Honda Motor Corporation, Ltd.	JP	Honda	550	**137**	-75,09 %
Daimler Group	DE	Mercedes-Benz	0	**121**	-

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von MarkLines 2017 (Stand: August 2016).

In einem Ranking der zehn marktführenden PHEV-Hersteller im Jahr 2015 hat die BYD Auto Company mit rasantem Wachstum vom Jahr 2014 (14.748 verkaufte PHEV) auf das Jahr 2015

(47.876 verkaufte PHEV) deutlich die Führung übernommen (Platz 1) (Tabelle 11). Verantwortlich dafür ist eine im Sommer 2015 deutliche Steigerung der Verkaufszahlen des Modells Qin und die teilweise noch erfolgreichere Markteinführung des Modells Tang zum Juni 2015, die aber beide ausschließlich in China verkauft werden. Es folgt die General Motors Corporation, die einen Rückgang von etwas mehr als 18 Prozent verzeichnen musste (Platz 2). Der Rückgang war vor allem darauf zurückzuführen, dass die Verkaufszahlen für den Chevrolet Volt in Kanada und den USA sanken.

Auch die Ford Group musste einen Rückgang von etwas mehr als 13 Prozent hinnehmen (Platz 3), auch hier sanken die Verkaufszahlen von Ford Fusion und Ford C-Max in den USA. Die Mitsubishi Motors Corporation mit fast 16 Prozent Wachstum verkauft den Mitsubishi Outlander zunehmend erfolgreich nicht nur in Japan, sondern auch in Europa und vor allem Schweden (Platz 4). Die Shanghai Automotive Industry Corporation (SAIC) Group ist mit dem Roewe 550 im Jahr 2015 neu auf den Markt gekommen (Platz 5). Mit der BMW Group hat das erste deutsche Unternehmen ein außerordentliches Wachstum vor allem mit dem BMW i8 erzielt (Platz 6). Die TMC musste heftige Verluste von fast 70 Prozent hinnehmen (Platz 7), was auf deutlich sinkende Verkaufszahlen des Toyota Prius PHEV zurückzuführen ist. Die Volkswagen Group weist als zweiter deutscher Elektrofahrzeughersteller im PHEV-Ranking das dritthöchste Wachstum aus (Platz 8), was auf vier Modelle und zwei Länder zurückzuführen ist, den VW Golf PHEV und den Audi A3 PHEV in Schweden, sowie die Porsche-Modelle Cayenne PHEV und Panamera PHEV in den USA. Zumindest im PHEV-Ranking abgeschlagen folgen die Geely Holding Group (Platz 8), Honda Motor Corporation (Platz 9) und die Daimler Group (Platz 10).

Das Ranking der zehn marktführenden BEV-Hersteller im Jahr 2015 sieht ganz anders aus: Es führt die Renault-Nissan Alliance (Platz 1), obwohl sie eine Absenkung der Verkaufszahlen vom Jahr 2014 (66.918 verkaufte BEV) auf das Jahr 2015 (59.881 verkaufte BEV) verzeichnen musste (Tabelle 12). Dies war vor allem auf leicht gesunkene Verkaufszahlen des Nissan Leaf zurückzuführen. Danach folgt Tesla Inc. mit einem Wachstum von knapp mehr als 55 Prozent (Platz 2), was vor allem aus deutlich gestiegenen Verkaufszahlen des Tesla Model S in den USA resultierte. Zotye Holding Group (Platz 3) und Geely Holding Group (Platz 4) führen eine Reihe von chinesischen BEV-Herstellern in den TOP 10 an, die ihre Produkte zwar nur in China, dort allerdings mit einigem Erfolg verkaufen. Die BMW Group hat als erstes deutsches Unternehmen ein ordentliches Wachstum von mehr als 61 Prozent vor allem mit dem BMW i3 erzielt (Platz 5). Mit der Beijing Automotive Industry Holding Co. Ltd. (BAIC) (Platz 6) und der Chery Automobile Co. (Platz 7) folgen zwei weitere chinesische BEV-Hersteller, die ihre Produkte ausschließlich und erfolgreich für den chinesischen Markt produzieren. Die BYD Auto Company stellt insofern eine Ausnahme unter den chinesischen BEV-Herstellern dar (Platz 8), als dass sie das Elektrofahrzeug BYD e6 auch schon nach Spanien bzw. in die Europäische Union (EU) verkauft hat. Das Unternehmen hat seine Verkaufszahlen aber vor allem in China deutlich gesteigert. Auch die Daimler Group (Platz 9) und die Volkswagen Group (Platz 10) stehen innerhalb der TOP 10, mit solidem bzw. außerordentlichem Wachstum. Im Falle von Daimler liegt das vor allem an den Modellen des Denza in China, der Mercedes-Benz B-Klasse

und dem smart fortwo in den USA, im Falle von Volkswagen sind es die Modelle des elektrifizierten Golf und des up! in den USA und skandinavischen Ländern wie z. B. Dänemark.

Tabelle 12: Die zehn marktführenden BEV-Hersteller im Jahr 2015, deutsche Unternehmen sind enthalten.

BEV-Hersteller	Land	Marken	2014 verkauft	2015 verkauft	Entwicklung
Renault-Nissan Alliance	FR/JP	u. a. LADA, Nissan, Renault, Venucia	66.918	**59.881**	-10,52 %
Tesla Inc.	**USA**	**Tesla**	**28.283**	**43.859**	+55,07 %
Zotye Holding Group	CN	Zotye	9.666	**24.408**	+152,51 %
Geely Holding Group	CN	Emgrand, Geely, Kandi, Volvo, ZD	**16**	**24.007**	-
BMW Group	**DE**	**BMW, Zinoro**	**13.614**	**21.966**	+61,35 %
BAIC	CN	Beijing	5.233	**17.040**	+225,63 %
Chery Automobile Co., Ltd.	CN	Chery, Riich	7.921	**12.018**	+51,72 %
BYD Auto Co., Ltd.	CN	BYD Auto	3.576	**9.623**	+169,10 %
Daimler Group	DE	Denza, Mercedes-Benz, smart	4.031	**6.472**	+60,56 %
Volkswagen Group	DE	Audi, VW	1.159	**4.748**	+309,66 %

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von MarkLines 2017 (Stand: August 2016).

Besonders wichtig für die vorliegende Dissertation sind die folgenden Feststellungen:

- Der uneingeschränkte Marktführer im Verkauf von Elektrofahrzeugen insgesamt, die TMC aus Japan, verkaufte im Jahr 2015 über die Marken Daihatsu, Lexus und Toyota insgesamt 973.786 HEV, PHEV, BEV und FCEV. Im PHEV-Ranking spielt das Unternehmen allerdings nur eine untergeordnete und im BEV-Ranking überhaupt gar keine Rolle. Damit ist klar, warum es sich lohnt, die Positionierung des Unternehmens in einer Fallstudie zu analysieren (siehe Kapitel 4.3.2.1).
- Die massive staatliche Unterstützung der Elektromobilität durch monetäre, fiskalische, infrastrukturelle und ordnungspolitische Maßnahmen in China in den letzten Jahren (Handelsblatt 2014-1; Handelsblatt 2016-1) trägt bereits Früchte insofern, als dass drei

der TOP 10 PHEV-Hersteller und ganze fünf der TOP 10 BEV-Hersteller aus diesem Land kommen. Weil aber alle diese Unternehmen zu einem überwiegenden Anteil nur für den chinesischen Markt produzieren, treten sie ausschließlich zu den ausländischen Unternehmen in Konkurrenz, die auf dem chinesischen Markt Umsatz erzielen möchten. Sie weisen fast allesamt hohe Wachstumsraten auf, und zahlreiche weitere BEV-Hersteller sind in China auch durch Unterstützung ausländischer Investoren entstanden, die erst neuerdings zum Opfer strenger Regulierung werden könnten (NZZ 2016).

- Tesla Inc. führte das BEV-Ranking Ende des Jahres 2015 noch nicht an, weist aber ein hohes Wachstum auf und fährt eine interessante Strategie, die eine detaillierte Analyse im Rahmen einer eigenen Fallstudie rechtfertigt (siehe Kapitel 4.3.2.2).
- Mit der BMW Group wird der größte deutsche PHEV- und BEV-Hersteller ebenfalls in einer detaillierten Fallstudie genauer analysiert (siehe Kapitel 4.3.2.3).
- Etwas weiter abgeschlagen sind die deutschen Elektrofahrzeughersteller Volkswagen Group und Daimler Group, die teilweise sehr hohe Wachstumsraten vorzeigen können. Beide Unternehmen fielen zuletzt durch große Ankündigungen auf. Die Volkswagen Group möchte im Rahmen ihrer neuen Strategie im Jahr 2025 zwei bis drei Millionen PHEV und BEV verkaufen (Automobil Produktion 2016-1) und erwägt auch den Aufbau einer eigenen Batterieproduktion (Zeit Online 2016-1), die Daimler Group plant eine weltweite Investition von rd. einer Milliarde Euro für die Produktion von Batteriesystemen ein (Springer Fachmedien 2016) und berücksichtigt dabei rd. 500 Millionen Euro für ein zweites Batteriewerk in Kamenz, Sachsen (Stuttgarter Zeitung 2016).

Ein Vergleich der aktuellen und angekündigten Modelle der zehn marktführenden Elektrofahrzeughersteller im Jahr 2015 sowie Volkswagen Group und Daimler Group aus Deutschland gibt einen ersten Eindruck davon, wie unterschiedlich ausdifferenziert die Unternehmensstrategien ausfallen können (Tabelle 13). Die japanischen Unternehmen neigen aufgrund ihrer Vorreiterschaft in der HEV-Produktion dazu, auch weiterhin auf dieses Elektrofahrzeugkonzept zu setzen (TMC, Honda Motor Company) und allenfalls zusätzlich auf BEV setzen (Renault-Nissan Alliance). Die TMC baut ihren Vorsprung in der HEV-Produktion vorerst noch weiter aus, und arbeitet gleichzeitig aber auch sehr stark an der Wasserstoff-basierten Mobilität, u. a. mit öffentlicher Unterstützung durch die japanische Regierung. Die Honda Motor Company hat bereits vorhandene Fahrzeugmodelle hybridisiert und positioniert sich noch nicht wirklich zielstrebig bezüglich der Elektrofahrzeugkonzepte der Zukunft. Die Kooperation zwischen Renault Group und Nissan Motor Company ist sehr erfolgreich.

Bei den im Ranking folgenden Unternehmen ist die Hybridisierung zumindest schwächer ausgeprägt (Ford Motor Company, Hyundai Kia Automotive Group), und der Schwerpunkt verschob bzw. verschiebt sich mehr auf die PHEV-Produktion. Insbesondere die Ford Motor Company muss sich allerdings noch deutlich stärker positionieren, was die zukünftigen Fahrzeugkonzepte anbelangt. Danach folgen zwei aufstrebende Unternehmen aus China und den USA, die erst gar nicht mehr auf HEV setzen, sondern sich entweder auf PHEV und BEV (BYD Auto Company) oder sogar nur auf BEV (Tesla Inc.) konzentrieren. Interessant ist, dass beide Unternehmen in Zukunft nicht auf zahlreiche verschiedene PHEV- oder BEV-Konzepte setzen, sondern mit wenigen, ausgewählten Modellen zu punkten versuchen. Während die BYD Auto

Company einen Schwerpunkt auf den chinesischem Markt legt, hat Tesla Inc. das große Ziel, zum Weltmarktführer für BEV zu werden und schreckt auch nicht vor ambitionierten Vorhaben wie dem Auf- und Ausbau einer unternehmenseigenen Batterieproduktion und eines Schnellladestationsnetzwerks zurück.

Mit der BMW Group folgt das stärkste deutsche Unternehmen, bei dem der Schwerpunkt schon heute, aber vor allem in naher Zukunft auf einer breiten Plug-in-Hybridisierung des eigenen Modellportfolios liegt. Auch bei der General Motors Corporation verschiebt sich die Aufmerksamkeit weg von HEV, bei der Geely Holding Group wird bereits heute sehr stark auf BEV, in Zukunft auch auf PHEV gesetzt. Hinsichtlich der deutschen Unternehmen ist besonders bei der Volkswagen Group zu sehen, wie sie sich zunehmend weg von HEV hin zu insbesondere PHEV und BEV positioniert. Interessanterweise werden allerdings auch von diesem Unternehmen ganze vier FCEV-Modelle angekündigt, genau wie bei der TMC. Bei der Daimler Group sind beide Trends schon allein aufgrund der geringeren Unternehmensverbundgröße zwar schwächer ausgeprägt, aber auch gut auszumachen.

Tabelle 13: Aktuelle (gelb) und angekündigte (rot) Modelle der zehn marktführenden Elektrofahrzeughersteller im Jahr 2015 (sortiert nach verkauften Elektrofahrzeugen) plus Unternehmen aus Deutschland.

Rang	Elektrofahrzeughersteller	Land	HEV	PHEV	BEV	FCEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
1	**Toyota Motor Corporation**	**JP**	**36**	**1**	**3**	**2**	**8**	**2**	**4**	**4**
2	Honda Motor Co., Ltd.	JP	14	1	1	-	2	1	3	1
3	Renault-Nissan Alliance	FR/JP	8	-	10	-	5	1	13	1
4	Ford Motor Company	USA	5	2	2	-	1	-	1	-
5	Hyundai Kia Automotive Group	KR	8	5	3	1	8	5	3	1
6	BYD Auto Company Ltd.	CN	0	4	3	0	-	2	1	-
7	**Tesla Inc.**	**USA**	**0**	**0**	**2**	**0**	**0**	**0**	**2**	**0**
8	**BMW Group**	**DE**	**2**	**5**	**3**	**0**	**0**	**6**	**1**	**0**
9	General Motors Corporation	USA	10	3	2	0	1	2	3	0
10	Geely Holding Group	CN	0	3	6	0	1	5	2	0
N/A	Volkswagen Group	DE	4	7	2	0	0	25	10	4
N/A	Daimler Group	DE	4	3	5	1	0	5	6	3

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von MarkLines 2017 (Stand: August 2016).

4.3.2.1 Fallstudie/Profil 1: Toyota Motor Corporation

4.3.2.1.1 IST: Pionier und Innovationsführer in HEV

Die Toyota Motor Corporation (TMC) hat im Jahr 2015 über ihre Marken Daihatsu, Lexus und Toyota insgesamt 973.786 Elektromobile verkauft und ist noch immer der weltweit unumstrittene Marktführer (MarkLines 2017).

Der Erfolg hat dabei vor allem einen Namen: Prius (Toyota Deutschland 2016-1). Seit der Markteinführung in Japan im Jahr 1997 hat die TMC es über vier Generationen von Prius-Modellen geschafft, sich einen Ruf als Innovationsführer in der Hybrid-Technologie zu erarbeiten. Das Unternehmen wies mit Stand des Jahres 2014 insgesamt 1.750 Hybrid-Patente aus (Toyota Deutschland 2016-2).

In den Verkaufszahlen schlug sich diese Erfolgsgeschichte (Handelsblatt 2012-1) so nieder, dass die TMC von einer zur nächsten Millionenmarke eilt: Waren mit dem Ende des Jahres 2013 insgesamt mehr als sechs Millionen HEV weltweit verkauft worden (Toyota USA Newsroom 2014-1), so waren es keine neun Monate später im September 2014 schon über sieben Millionen HEV (Toyota USA Newsroom 2014-2). Schon bis Ende Juli 2015 wurden mehr als acht Millionen HEV verkauft (Toyota Motor 2015-1), bis Ende April 2016 waren es dann insgesamt über neun Millionen HEV (Toyota Motor 2016-1) und bis Ende Januar 2017 über zehn Millionen HEV (Toyota Motor 2016-2).

Die Analyse der Verkaufszahlen des Elektrofahrzeug-Modellportfolios der TMC im Jahr 2015 zeigt, dass noch immer mehr als die Hälfte aller verkauften Elektrofahrzeuge den Namen Prius tragen (Tabelle 14). Insgesamt gibt es heute aber schon zahlreiche HEV-Modelle zu kaufen, überraschend ist auf der einen Seite, wie wenige PHEV- und BEV-Modelle dem gegenüber stehen. Hier zeigt sich einiger Nachholbedarf für die TMC: Im November 2016 reagierte das Unternehmen und schuf eine neue Geschäftseinheit mit dem Titel „EV Business Planning Department“ (Toyota Motor 2016-3), welcher niemand sonst als der CEO von TMC, Akio Toyoda, vorstehen wird. Damit einher geht eine Anpassung der Unternehmensstrategie: Das Unternehmen hatte sich bis dato sehr viel von den beiden kommerziell verfügbaren FCEV-Modellen, vor allem von dem Toyota Mirai, versprochen.[31] Weil Batterie-basierte Elektrofahrzeuge jüngst aber viel Aufmerksamkeit vor allem auf den großen Automobilmärkten wie z. B. in China gewonnen haben und insbesondere hinsichtlich der Wasserstoff-bezogenen Infrastrukturfrage noch nicht deutlich wurde, bis wann sie zufriedenstellend bzw. flächendeckend beantwortet sein wird (Thomson Reuters 2016-1), muss auch TMC die FuE an Batterie-basierten Elektrofahrzeugen beschleunigen (Thomson Reuters 2016-2).

Als die TMC im Jahr 1997 den allerersten Prius bzw. das allererste in Massenproduktion hergestellte, teilelektrifizierte Hybrid-Elektromobil in Japan auf den Markt brachte, traf dies auf die

[31] Im Rahmen dieser Fallstudie ist mit FCEV immer ein Elektromobil mit Wasserstoff-Brennstoffzelle gemeint. Die Brennstoffzellentechnologie wird in Kapitel 3 der vorliegenden Dissertation näher erläutert (siehe Kapitel 3.3.4.3.6).

gleichzeitig zunehmende Aufmerksamkeit weltweit für den Klimawandel und das daraus resultierende Bestreben zahlreicher Staaten, die Emission von sechs Treibhausgasen, darunter auch Kohlenstoffdioxid (Summenformel CO_2), deutlich zu reduzieren (bpb 2010).

Tabelle 14: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio der Toyota Motor Corporation im Jahr 2015.

Marke	**Typ**	**Modell**	**Antrieb**	**2015 verkauft**
Toyota	Cars	Aqua (Prius C), Prius, Prius alpha (Prius v/Prius +), Prius Plus, Prius v	HEV, PHEV	557.041
Toyota	Cars	Alphard, Auris, Corolla, Crown, Esquire, E-stima (Previa), Harrier, Levin, Noah, Sienta, Vellfire, Vitz (Yaris), Voxy	HEV	252.857
Lexus	Cars	Lexus CT, ES, GS, HS, IS, LS, NX, RC, RX	HEV	88.491
Toyota	Cars	Camry	HEV	48.913
Toyota	Cars	Avalon, SAI	HEV	20.210
Toyota	Light Trucks	Highlander, RAV4	HEV, BEV	5.517
Toyota	Cars	MIRAI, Toyota-FCHV	FCEV	496
Daihatsu	Cars	Altis, Mebius	HEV	261
TOTAL				973.786

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von MarkLines 2016-1 (Stand: August 2016)

Die TMC erkannte den Trend zur Teil-Elektrifizierung des Antriebsstranges in Fahrzeugen als Erstes und schaffte es, den Toyota Prius im Jahr 2001 auf den US-amerikanischen Markt zu bringen (NADAguides 2017). Zum Verkaufserfolg in den USA trug bei, dass zahlreiche Prominente insbesondere aus der Filmindustrie von Hollywood in Los Angeles/Kalifornien mit dem Fahren dieses Hybrid-Elektromobils ihre umweltbewussten Prinzipien öffentlichkeitswirksam demonstrieren wollten.

So begann die Erfolgsgeschichte dieses Fahrzeugs, das über Jahre hinweg das meistverkaufte (weil vom Benzinverbrauch her sparsamste) Hybrid-Fahrzeug in den USA war und weltweit Millionen von Käufern überzeugte. In den letzten Jahren ergaben sich allerdings einige Herausforderungen für HEV im Allgemeinen und die TMC im Besonderen:

- Die Hybrid-Technologie war nicht mehr neu bzw. auf dem Automobilmarkt so etabliert, dass es nun neben der TMC zahlreiche weitere Mitbewerber gab, welche ebenfalls Hybrid-Fahrzeuge mit guten Leistungsdaten z. B. in Bezug auf den Benzinverbrauch und schöneres Design anbieten (Automotive News 2014-1). Kunden sehen die Hybrid-Technologie deshalb nicht mehr als Teil der Marke TMC bzw. lange Zeit galt die Gleichung „Hybrid" ist gleich (Toyota) Prius, sondern als eine von mehreren Optionen, denn zahlreiche Automobilhersteller boten ihre Fahrzeuge auch als Hybrid-Version an.
- Die TMC hatte es verpasst, dem Toyota Prius nach der zweiten Neugestaltung schon im Jahr 2009 mit der sogenannten dritten Generation ein modernes Aussehen zu geben (International Business Times 2014). Kunden neigten deshalb dazu, das Interesse an den rein technischen Eigenschaften zu verlieren und zu optisch aufregenderen Alternativen zu wechseln. Der Toyota Prius verlor seinen Ruf als „Statussymbol".
- Die zunehmende Konkurrenz durch Elektromobile mit stärker elektrifizierten Antriebssträngen wie PHEV und BEV sorgte dafür, dass HEV nicht mehr zwangsläufig als der einzig „richtige" Weg in Richtung Elektromobilität galten. Kunden, die ein Elektromobil kaufen wollten, konnten zwischen dem Grad der Elektrifizierung des Antriebsstrangs vor dem Hintergrund ihres eigenen Fahrprofils bzw. den alltäglichen Anforderungen an ein Elektromobil frei wählen, und hatten eine immer größere Auswahl an Modellvarianten. Der Toyota Prius ist zwar seit dem Jahr 2012 auch als PHEV erhältlich (Toyota USA Newsroom 2011), wird aber bei weitem nicht so wahrgenommen bzw. noch immer als HEV assoziiert. Den Ruf als Vorreiter für innovative Antriebstechnologien führt neuerdings eher Tesla Inc. (siehe Kapitel 4.3.2.2).
- Ganz allgemein trafen die zwischenzeitlich gesunkenen Benzinpreise die gesamte Industrie für Elektromobilität hart (Financial Times 2015). Zum Kauf von benzinsparenden Modellen wie dem Toyota Prius bestand zuletzt eher weniger Anlass, wenn Kunden rein auf die Ausgabenseite schauen und keine Umweltaspekte berücksichtigen.

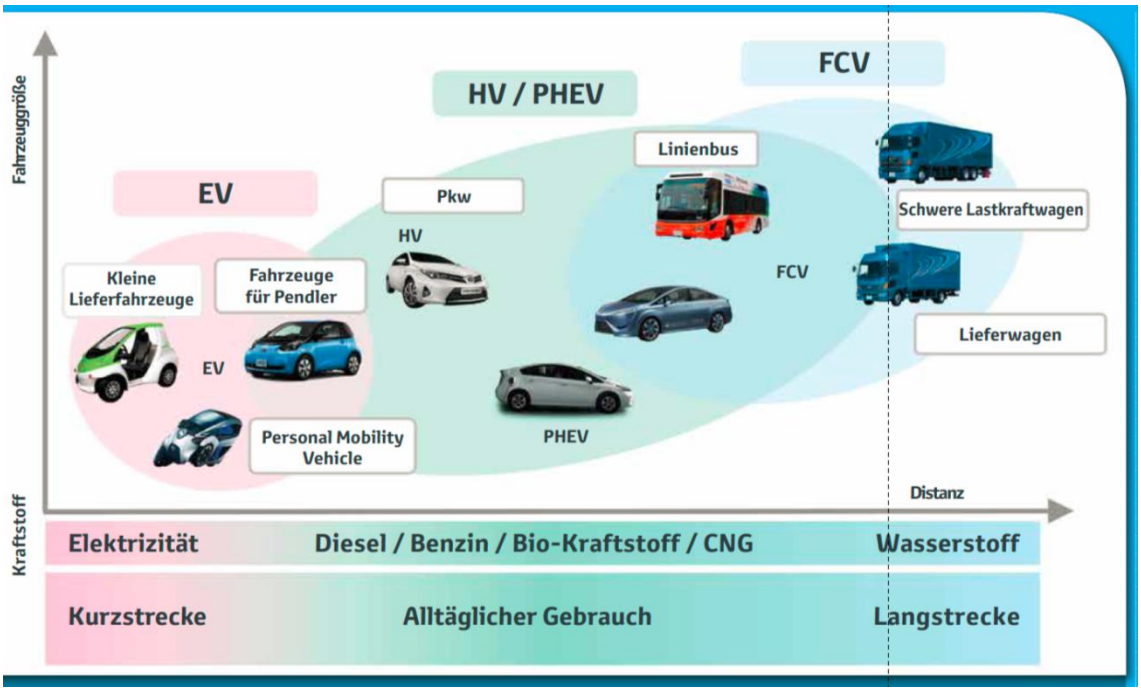
Für große Euphorie sorgte allerdings die Ankündigung des 2017 Toyota Prius Prime, des Nachfolgers des ersten PHEV des Toyota Prius (Toyota USA Newsroom 2016), der ab Februar 2017 beginnend in Japan seine Markteinführung erlebte (Toyota Motor 2017). Er soll den Vorgänger bei weitem überragen und die Abhängigkeit des Unternehmens von HEV zumindest abfedern (Green Car Reports 2016-1).

4.3.2.1.2 Die „TOYOTA Roadmap"

Zur Internationalen Automobilausstellung in Paris (frz. „Mondial de l'Automobile") im Jahr 2014 veröffentlichte die Toyota Motor Corporation ihre Vision für die Antriebstechnologien der Zukunft. Mit der sogenannten „TOYOTA Roadmap" wollte die TMC alle verfügbaren Energiequellen effizient nutzen, was bedeutet, dass konkrete Nutzungsprofile in den Vordergrund rückten (Toyota (GB) PLC 2014): Abhängig vom entscheidenden Faktor der zurückzulegenden Distanz stieg die einzusetzende Fahrzeug- bzw. Antriebsgröße und änderte sich der Kraftstoff, mit dem das jeweilige Modell betrieben werden sollte (Toyota Motor Europe 2014-1, Seite 11).

Elektromobilität mit einem vollständig elektrifizierten Antriebsstrang wurde von der TMC ausschließlich auf der Kurzstrecke erwartet, wo kleine Lieferfahrzeuge, Fahrzeuge für Pendler oder sogenannte (Klein-)Fahrzeuge für persönliche Mobilität (engl. „personal mobility vehicles“, Abkürzung PMV) zum Einsatz kommen (Abbildung 34). HEV bzw. PHEV mit den Kraftstoffen Benzin, Diesel, Biokraftstoff, Autogas bzw. Erdgas (engl. „compressed natural gas“, Abkürzung CNG) sollten dann den alltäglichen Gebrauch bzw. die Mittelstrecken abdecken, also Distanzen, die heute im Alltag bereits herkömmliche Automobile mit Verbrennungsmotor oder Linienbusse abfahren. Auf Langstrecken sah die TMC ausschließlich Wasserstoff als eingesetzten Kraftstoff in FCEV, Lieferwagen und schweren Lastkraftwagen.

Abbildung 34: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio der Toyota Motor Corporation mit dem Ziel, sämtliche Nutzerprofile abzudecken.



Quelle: Toyota Motor Europe 2014-1, Seite 10f.

Interessant an dieser Darstellung ist die gestiegene Bedeutung der individuellen Mobilität im städtischen Raum, welche laut der TMC durchaus rein elektrisch betrieben wird – auch wenn hinter der Serienproduktion des Toyota i-Road noch immer ein großes Fragezeichen steht (Wirtschaftswoche 2014-1), weil er nach wie vor nur im Testbetrieb (im Rahmen eines einjährigen Alltagstestprojekts in Tokio und eines Carsharing-Testbetriebs in Grenoble) befindlich ist (Green Car Congress 2015) und der Toyota Scion iQ sogar ganz eingestellt wurde (Bloomberg Business 2015). Im März 2017 präsentierte TMC allerdings das „i-TRIL“-Konzept für ein Elektrofahrzeug, das im städtischen Umfeld eingesetzt werden soll (Toyota Motor Europe 2017).

Dies steht auch im Kontrast zur Beendigung der Kooperation zwischen der TMC mit Tesla Inc., was als endgültige Abkehr von BEV gewertet wurde (manager magazin online 2014-1): Mit der Kooperation hatte es eine Zeit lang so gewirkt, als wollte sich die TMC zumindest die Option auf eigene BEV offen halten, weil ursprünglich beide Unternehmen gemeinsam an der

Antriebsstrangtechnologie arbeiten wollten. Statt aber auf den reinen Batterieantrieb zu setzen, bot die TMC ihren mit dem Toyota Prius perfektionierten Hybridantrieb in sämtlichen Baureihen an, auch PHEV wurden Teil des Angebots. Statt reiner BEV rückte die TMC allerdings ihre FCEV ins Rampenlicht – von ihrer Langstreckentauglichkeit her sah die TMC eindeutig die Brennstoffzelle im Vorteil.

Insgesamt und insbesondere auch unter Berücksichtigung des aktuellen Elektrofahrzeug-Modellportfolios der TMC im Jahr 2015 (Tabelle 14) wird deutlich, welche Bedeutung die TMC ihren eigenen HEV auch weiterhin beimisst, welche gerade im Hinblick auf die Umwelt sowie auf die schwindenden Energiereserven die beste technologische Antwort auf die Mobilitätsanforderungen der Zukunft darstellen sollen (Toyota Motor Europe 2014-1, Seite 11). Didier Leroy, damaliger Präsident und CEO von Toyota Motor Europe, bezeichnete die Hybride als Hauptstütze der Unternehmensstrategie:

> „We expect this to be the powertrain of choice, for the majority of customers. Because it is clean and efficient, it is affordable to buy and run, and well adapted to today's congested traffic. Yet it is flexible enough to deal with a wide range of uses." (Toyota Motor Europe 2014-2)

Karl Schlicht, Executive Vice President von Toyota Motor Europe, gab im gleichen Kontext seiner Überzeugung Ausdruck, dass HEV der nächsten Generation nach wie vor großes Optimierungspotenzial hinsichtlich ihrer Effizienz bieten (Auto Express 2014) und verteidigte damals noch den Verzicht der TMC auf große Investitionen in die PHEV-Technologie mit dem Hinweis auf Verkaufszahlen in den USA, die zeigen würden, dass Kunden Fahrzeuge mit Stromstecker nicht explizit bevorzugten. Auch Mitsuhisa Kato, Executive Vice President der TMC, bekräftigte mögliche Effizienzsteigerungen und gab als Ziel wieder, mittelfristig in jedem Segment ein HEV-Modell anzubieten (Auto Motor und Sport 2014). Aus dieser Perspektive hätte sich für die TMC die Chance ergeben können, von den kommerziell noch erfolgreichen HEV direkt auf die zukünftigen FCEV überzugehen (Transport Evolved 2014-1).

Davon ist die TMC in der Zwischenzeit allerdings spätestens mit der oben genannten Ankündigung des 2017 Toyota Prius Prime, des Nachfolgers des ersten PHEV des Toyota Prius, deutlich abgewichen (Toyota USA Newsroom 2016). Der Sinneswandel resultierte vielleicht doch daraus, dass der Sprung von HEV zu FCEV temporär als zu groß anmutete und das Unternehmen eine Art Übergangskonzept zwischen dem statistisch belegten Zugpferd unter den Elektrofahrzeugen der Vergangenheit (HEV) und dem mutmaßlich neuen Zugpferd unter den Elektrofahrzeugen der Zukunft (FCEV) benötigen würde. Zur Internationalen Automobilausstellung in Paris im Jahr 2016 hörte sich die Botschaft der TMC bezüglich der PHEV jedenfalls deutlich anders an: Mit der Europa-Premiere einer aktualisierten, effizienteren Version des ersten Prius PHEV der TMC (Toyota Motor Europe 2016) gab Dr. Johan Van Zyl, heutiger Präsident and CEO von Toyota Motor Europe ein Interview, in welchem er deutlich bekräftigte, dass die TMC ihre Skepsis abgelegt habe und die PHEV-Technologie sogar in weiteren Segmenten ausrollen wolle (Handelsblatt 2016-2). BEV sind in den Plänen der TMC erst vor ganz kurzer Zeit bzw. Ende des Jahres 2016 höher priorisiert worden.

4.3.2.1.3 SOLL: Pionier und Innovationsführer in FCEV

Am 15. Dezember 2014 veröffentlichte die Toyota Motor Corporation (TMC) mit dem Toyota Mirai das weltweit erste in Serienproduktion hergestellte FCEV (Toyota Motor 2014): Es signalisierte dem Unternehmen zufolge den Beginn einer ganz neuen Zeitrechnung mit Elektrofahrzeugen, welche Wasserstoff als für die Zukunft wichtige Energiequelle als Kraftstoff nutzen, um elektrische Energie zu erzeugen. Den größten Vorteil eines FCEV auf Wasserstoff-Basis stellt die Tatsache dar, dass die einzige Emission Wasserdampf ist und der Toyota Mirai damit als sogenanntes Nullemissionsfahrzeug (engl. „zero emission vehicle", Abkürzung ZEV) durchgehen kann, was für das Unternehmen insbesondere angesichts der neuen Gesetzgebung für schadstofffreie Fahrzeuge in Kalifornien bzw. den USA ungeheuer wertvoll ist (ARB 2014). Inklusive aller nationalen Subventionen kostete das FCEV in Japan umgerechnet 44.806 Euro (MarkLines 2015).[32]

Als erstes Verkaufsziel für den Zeitraum bis Ende 2015 wurden 400 Einheiten in Japan ausgegeben.[33] Die TMC verzeichnete 1.500 Bestellungen, davon vierzig Prozent bzw. 600 Bestellungen von Privatkunden (Toyota Deutschland 2015-1). Damit ging die stufenweise Erhöhung der Produktionskapazitäten von 700 im Jahr 2015 auf rund 3.000 Einheiten im Jahr 2017 einher (Toyota Deutschland 2015-2), wofür die TMC etwa 152,23 Millionen Euro investierte (Nikkei Asian Review 2014).[34] Der Marktstart für Europa bzw. Großbritannien, Deutschland und Dänemark war für September 2015 eingeplant. Die TMC wollte hier als erstes Verkaufsziel zwischen 50 und 100 Einheiten pro Jahr im Jahr 2015 und 2016 erzielen.[35] Der Preis wurde mit etwa 66.000 Euro (exkl. MwSt.) angegeben (Toyota Motor Europe 2014-3). Für die USA wurden als erstes Verkaufsziel 3.000 Einheiten bis Ende 2017 eingeplant, der Preis könnte hier inklusive aller nationalen und bundesstaatlichen Subventionen auf umgerechnet 41.517 Euro fallen (Toyota USA Newsroom 2014-3).[36]

Die Bedeutung der Brennstoffzellentechnologie für die Elektromobilität der Zukunft unterstrich Bob Carter, Senior Vice President - Automotive Operations von Toyota Motor Sales U.S.A., Inc. zu Beginn des Jahres 2015 mit der Aussage, dass Wasserstoff aus Sicht der TMC der wichtigste Brennstoff für die nächsten 100 Jahre sein wird (Toyota USA Newsroom 2014-4). Die TMC sieht den Toyota Mirai dabei als hochrisikobehaftete Wette ähnlich wie einst den Toyota Prius, der ebenfalls mit hohen Kosten und komplett im eigenen Unternehmen entwickelt wurde. Das Unternehmen erkennt dabei die beiden großen Herausforderungen hinsichtlich Infrastrukturaufbau und Kundenakzeptanz für diese „neue" Form der Elektromobilität an. Hinsichtlich der notwendigen Infrastruktur kooperiert das Unternehmen deshalb u. a. mit L'air Liquide S.A. in den USA (Air Liquide 2016), einem Unternehmen, das weltweit

[32] Der Umrechnungskurs am 14. November 2016 betrug gerundet: 1 JPY = 0,0086 EUR.

[33] Dieses Ziel wurde mit 418 in Japan zwischen Dezember 2014 bis Ende des Jahres 2015 verkauften FCEV auch erreicht (MarkLines 2017).

[34] Der Umrechnungskurs am 14. November 2016 betrug gerundet: 1 USD = 0,9226 EUR.

[35] Dieses Ziel stellt sich vorläufig noch als ambitioniert heraus (MarkLines 2017).

[36] Der Umrechnungskurs am 14. November 2016 betrug gerundet 1 USD = 0,9226 EUR.

bzw. auch in Deutschland über die sogenannte „H2 Mobility Initiative“ (NOW 2015) am Aufbau einer wasserstoffbasierten Industrie arbeitet. Auch in Japan (Electric Cars Report 2014) wird eine entsprechende Infrastruktur getestet bzw. aufgebaut. Weil die TMC fest an den Gewinn der oben angesprochenen Wette glaubt und die FuE an FCEV beschleunigen möchte, hat sie außerdem mehr als 5.600 der Patente zu entsprechenden Schlüsseltechnologien während der Einführungszeit des Toyota Mirai bis zum Jahr 2020 freigegeben, um die FCEV-Technologie im Rahmen von Kooperationen mit anderen Fahrzeugherstellern und Energieversorgern weiter zu etablieren bzw. zu verbreiten (Toyota Deutschland 2015-3; Toyota USA Newsroom 2015). Kritische Stimmen interpretierten dies allerdings als ein Zeichen der Schwäche, die TMC könne nicht den ganzen FuE-Aufwand selbst tragen und brauche deshalb weitere Partner, gerade auch beim flächendeckenden Aufbau einer Ladeinfrastruktur für FCEV (manager magazin online 2015-2). Außerdem wird angemerkt, dass besonders die effiziente und kostengünstige Herstellung und Bereitstellung von Wasserstoff nach wie vor eine große Herausforderung darstellen (Los Angeles Times 2015). Zumindest im Rahmen der u. a. Brennstoffzellen-basierten Kooperation zwischen der BMW Group und TMC (BMW Group 2013-1) könnte ein BMW i5 auf der Basis einer Wasserstoff-Brennstoffzelle entstehen (Car and Driver 2016). Die BMW Group hat dies bereits früher bestätigt (Wirtschaftswoche 2014-2).

Teil der weiteren Strategie der TMC ist das Ziel, die Kosten des nächsten Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebs weiter drastisch zu senken, auf zwischen einem Drittel und einem Viertel der Kosten des aktuellen System im Toyota Mirai in den nächsten fünf bis sechs Jahren (Automotive News 2014-2; Transport Evolved 2014-2). In diesem Zusammenhang sollen auch die Stückzahlen an verkauften Toyota Mirai deutlich ansteigen, auf mehr als 30.000 im Jahr 2020 im Rahmen der jüngst vorgestellten Nachhaltigkeitsziele 2050 (Automobil Produktion 2015; Toyota Motor 2015-2).

Die TMC beteiligt sich auch an der „Clean Energy Partnership CEP“ (NOW 2017), der „Fuel Cell Commercialization Conference of Japan (FCCJ)“ (FCCJ 2012) und der „Fuel Cell & Hydrogen Energy Association FCHEA“ (FCHEA 2017).

Ob die TMC ihre Wette auf FCEV gewinnen wird, werden die nächsten Jahre zeigen. Sie ist heute jedenfalls der Elektrofahrzeughersteller, der am besten aufgestellt ist, um diese Wette tatsächlich zu gewinnen. Weiterhin beobachtet werden muss aber auch, ob und wie TMC seine Strategie angesichts neuer Regulierungsmaßnahmen aus China bzw. einem der größten Automobilmärkte der Welt anpasst, nach denen HEV ohne Lademöglichkeit über die Steckdose gar nicht als Elektrofahrzeuge anerkannt werden sollen (Thomson Reuters 2017). Dann würde TMC Gefahr laufen, ohne PHEV oder BEV die im Raum stehenden Verkaufsquoten für Elektrofahrzeuge nicht erfüllen zu können und keine Kreditpunkte zu sammeln, welche quasi als Umweltausgleich für den Verkauf herkömmlicher Automobile mit Verbrennungsmotor notwendig sind. Diese jüngste Entwicklung hat die führenden Manager von TMC alarmiert wie oben bereits geschildert (Toyota Motor 2016-3) und könnte schon kurzfristig zu einem auch öffentlich kommunizierten Strategiewechsel führen.

4.3.2.2 Fallstudie/Profil 2: Tesla Inc.

4.3.2.2.1 IST: Mit BEV den herkömmlichen Automobilmarkt angreifen

Tesla Inc. hat im Jahr 2015 insgesamt 43.859 Elektrofahrzeuge verkauft und war damit der von den verkauften BEV her größte Elektrofahrzeughersteller, der seinen Weltmarktanteil noch steigern konnte (Tabelle 8). Der Erfolg ist vor allem auf das Tesla Model S zurückzuführen, das in den USA (26.800) den mit Abstand größten Absatz fand, gefolgt von Norwegen (4.039), Dänemark (2.724), den Niederlanden (1.891), Kanada (1.673), Deutschland (1.582) und der Schweiz (1.556) mit mehr als 1.500 Exemplaren (Tabelle 15).

Tabelle 15: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio von Tesla Inc. im Jahr 2015.

Marke	**Typ**	**Modell**	**Antrieb**	**2015 verkauft**
Tesla	**Cars**	**Model S**	**EV**	**43.592**
Tesla	Cars	Model X	EV	208
Tesla	Cars	N/A	EV	59
TOTAL				43.859

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von MarkLines 2017 (Stand: August 2016).

Tesla Inc. möchte nicht nur mit Elektrofahrzeugen den Übergang zu einer nachhaltigen Mobilität bewerkstelligen, sondern auch mit fortschrittlichen Energiespeicherlösungen eine nachhaltige Energiegewinnung und -versorgung unterstützen. Das macht die ambitioniert formulierte, offizielle Unternehmensvorstellung von Tesla Inc. deutlich:

> „Tesla wurde 2003 von einer Gruppe mutiger Silicon Valley-Ingenieure gegründet, die beweisen wollten, dass Elektrofahrzeuge herkömmlichen Kraftfahrzeugen überlegen sind. […] Tesla ist [aber] mehr als ein Autohersteller, nämlich ein Technologie- und Design-konzern, der sich innovativen Energielösungen verschrieben hat.“ (Tesla 2016-1)

Das erste in Serie produzierte Elektrofahrzeug von Tesla Motors war der Tesla Roadster, der im Jahr 2008 seine Markteinführung erlebte und seit dem Jahr 2012 nicht mehr verkauft wird:

> „Mit einer Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in 3,9 Sekunden und einer Batteriereichweite von 394 km setzte der Roadster einen neuen Maßstab für Elektromobilität. Heute sind mehr als 2400 Roadster in über 30 Ländern auf der Straße.“ (Tesla 2016-1)

Diese selbst für heutige Elektrofahrzeuge nach wie vor große Reichweite bei gleichzeitiger Emissionsfreiheit sorgte damals für großes Aufsehen, der Startpreis von rd. 100.000 Euro hob ihn jedoch deutlich vom Automobil-Massenmarkt ab. Ende des Jahres 2014 kündigte Tesla Inc. ein Paket an Reichweiten-vergrößernden Verbesserungen für Besitzer von Tesla Roadster-Elektrofahrzeugen an, das die Reichweite auf über 400 Meilen (etwa 644 Kilometer)

erhöhen sollte (Tesla 2014-1). Das als „Roadster 3.0“ bezeichnete Upgrade auch der integrierten Batteriezelltechnologie verzögerte sich allerdings ordentlich, erst im September 2015 wurden Details wie die letztlich verfügbare Reichweite von 330 Meilen bzw. 531 Kilometern oder der Preis von 26.755,40 Euro[37] bekannt (Green Car Reports 2015), und erst im Juli 2016 begann die Auslieferung (Green Car Reports 2016-2).

Das zweite von Tesla Inc. in Serie produzierte reine Elektromobil, das im Jahr 2012 in den Markt eingeführte Model S, übertraf jedoch schon im ersten Jahr die Anzahl der insgesamt verkauften Tesla Roadster. Und spätestens als von der viertürigen Limousine im Jahr 2013 plötzlich über 20.000 Elektrofahrzeuge verkauft wurden (MarkLines 2017), gehörte Tesla Inc. nicht nur die Aufmerksamkeit der breiten Öffentlichkeit, sondern insbesondere auch der bereits etablierten Unternehmen in der Automobilindustrie, deren Aktivitäten im Bereich Elektromobilität bis dahin noch nicht so weit gediehen waren. Das Tesla Model S kann mit vier verschiedenen Energiespeicher-Ausstattungen gekauft werden, wobei die Reichweite mindestens 480 Kilometer und maximal 632 Kilometer beträgt (Tesla 2017-1). Der günstigste Barzahlungspreis eines Tesla Model S wird vom Unternehmen mit rd. 80.000 Euro angegeben.

Im November 2015 startete der Verkauf des Tesla Model X, eines elektrifizierten Geländewagens (engl. „sports utility vehicle“, Abkürzung SUV), der ebenfalls in vier verschiedenen Energiespeicher-Ausstattungen mit Reichweiten zwischen 417 und 565 Kilometern zur Verfügung steht (Tesla 2017-2). Der günstigste Barzahlungspreis eines Tesla Model X wird vom Unternehmen mit rd. 97.000 Euro angegeben. Im Gegensatz zum Tesla Model S häuften sich beim Tesla Model X allerdings die Probleme im Jahr 2016, insbesondere die hinteren, auch als „Falcon Wings“ bezeichneten Türen des Tesla Model X verursachten sogar Rechtsstreitigkeiten zwischen Tesla Inc. und dem schweizerischen Automobilzulieferer Hoerbiger Holding AG (Automobil Produktion 2016-2). Elon Musk als CEO von Tesla Inc. äußerte sich kurz darauf wie folgt:

> „Rückblickend betrachtet, wäre es eine bessere Entscheidung gewesen, weniger Neuerungen mit der ersten Version des Model X einzuführen und anschließend in den darauffolgenden Jahren neue Technologien und Funktionen zu implementieren. Ich denke es war eine gewisse Selbstüberschätzung mit dem Model X.“ (Teslamag 2016)

Dazu kam im April 2016 ein Rückruf von Tesla Model X-Elektrofahrzeugen, deren hintere Sitzreihe bei einem Unfall unzuverlässig reagierte (Automobilwoche 2016-1). Weil Tesla Inc. Anfang April 2016 mit dem Tesla Model 3 sein erstes Mittelklasse-Elektrofahrzeug vorgestellt hat, dafür in Rekordzeit 325.000 Vorbestellungen erhielt und es ab Ende des Jahres 2017 ausliefern wollte (Tesla 2016-2, Seite 4), müsste das Unternehmen vorab dringend seine Fähigkeit zur fehlerfreien Massenproduktion demonstrieren. Zumindest offiziell ist das der Fall: Ende des Jahres 2016 ließ Tesla Inc. verlauten, dass alles auf dem Weg sei für den eingeschränkten Tesla Model 3-Produktionsbeginn im Juli 2017 und eine entsprechende Produktionsausweitung in den darauffolgenden Monaten (Tesla 2017-3, Seite 1).

[37] Der Umrechnungskurs am 14. November 2016 betrug gerundet: 1 USD = 0,9226 EUR.

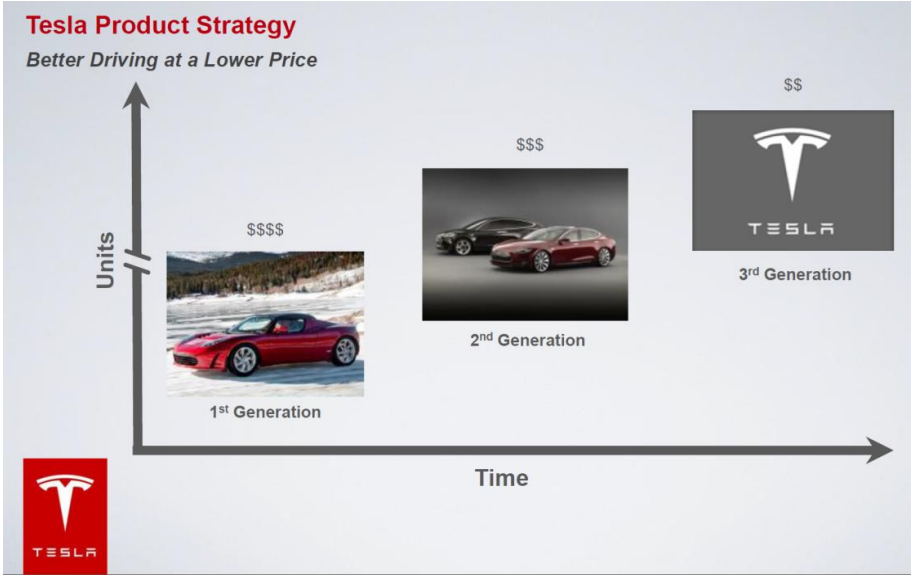
4.3.2.2.2 Strategie: Absatzsteigerung durch Preissenkung

Elon Musk, Mitbegründer und CEO von Tesla Inc., formulierte das übergreifende Ziel im Hinblick auf die Elektromobilität wie folgt:

> „Our goal when we created Tesla a decade ago was the same as it is today: to drive the world's transition to electric mobility by bringing a full range of increasingly affordable electric cars to market." (Tesla 2014-2, Seite 4)

Daraus wird auch die Unternehmensstrategie ersichtlich: Die Konzentration rein auf BEV erfolgt aus der vollen Überzeugung, dass die gesamte Welt und damit auch die herkömmliche Automobilindustrie in Zukunft auf Elektromobilität umschwenken und Tesla Inc. mit einer breiten Produktpalette zunehmend günstiger Elektrofahrzeuge aufwarten und den Umstieg ermöglichen wird. Während der Tesla Roadster die erste Generation eines unternehmenseigenen BEV darstellte, gehören Tesla Model S und Tesla Model X zur zweiten Generation, das Tesla Model 3 bildet die dritte Generation (Abbildung 35).

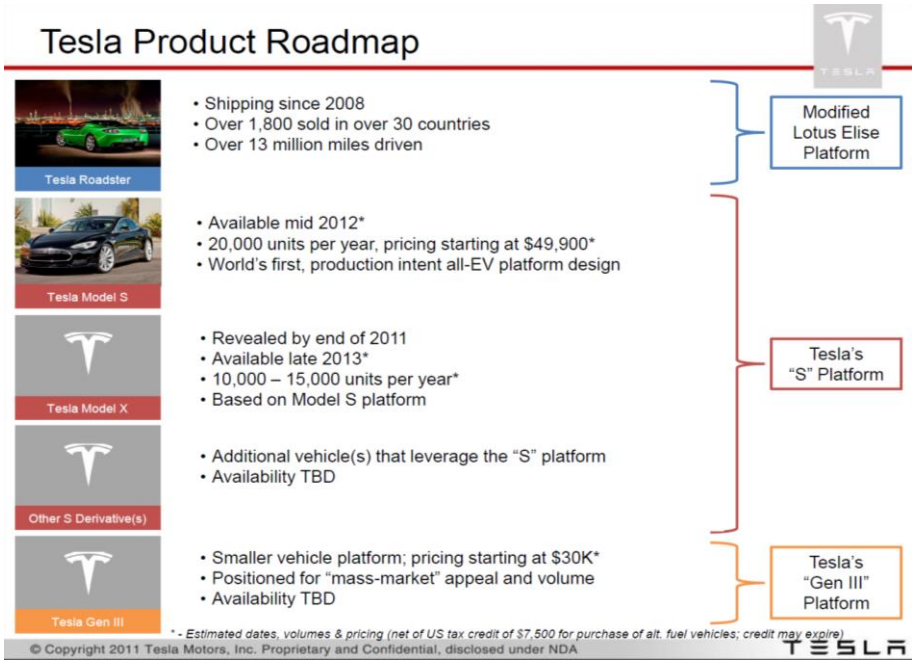
Abbildung 35: Die Produkt-Strategie von Tesla Inc.



Quelle: Tesla 2014-2, Seite 19.

Die Definition der drei Generationen hängt eng zusammen mit den Produktionsplattformen, auf denen sie produziert werden: Als Vertreter der ersten Generation war der Tesla Roadster als Einstiegsmodell in den Automobilmarkt für Tesla Inc. gedacht und wurde von den Einheiten her nur in einer Kleinserie auf einer modifizierten Plattform des Lotus Elise gebaut (Abbildung 36). Tesla Model S und Tesla Model X sollten in höheren Stückzahlen produziert werden und eine größere Kundengruppe ansprechen, weshalb für sie eine eigene Produktionsplattform konzipiert wurde, welche auch für Modellvarianten zur vollen Ausnutzung der Produktionsplattform vorgesehen ist. Das Tesla Model 3 bildet die dritte Generation, die deutlich günstiger werden und das Unternehmen zum Elektrofahrzeughersteller für die breite Masse machen sollte. Diese dritte Generation erhält eine eigene Produktionsplattform.

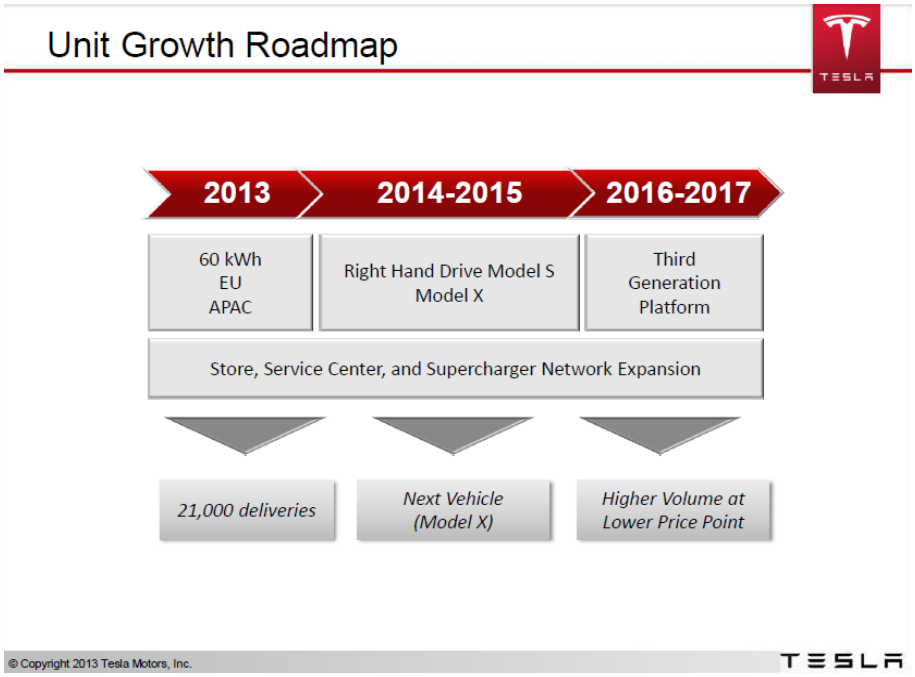
Abbildung 36: Die Produkt-Roadmap von Tesla Inc. aus dem Jahr 2011.



Quelle: Tesla 2011, Seite 4.

Tesla Inc. plante die Fertigstellung der Produktionsplattform für die dritte Generation für die Jahre 2016 und 2017 (Abbildung 37) und sieht sich auf einem guten Weg dahin (Tesla 2016-2, Seite 1). Gleichzeitig sind auch die Ausweitung der Vertriebsstrukturen mit Verkaufsstandorten, Service-Einrichtungen und der Ausbau der notwendigen Ladeinfrastruktur geplant.

Abbildung 37: Die Produkt-Roadmap von Tesla Inc. aus dem Jahr 2013.



Quelle: Tesla 2013, Seite 16.

4.3.2.2.3 Maßnahmen: Der unkonventionelle Angreifer

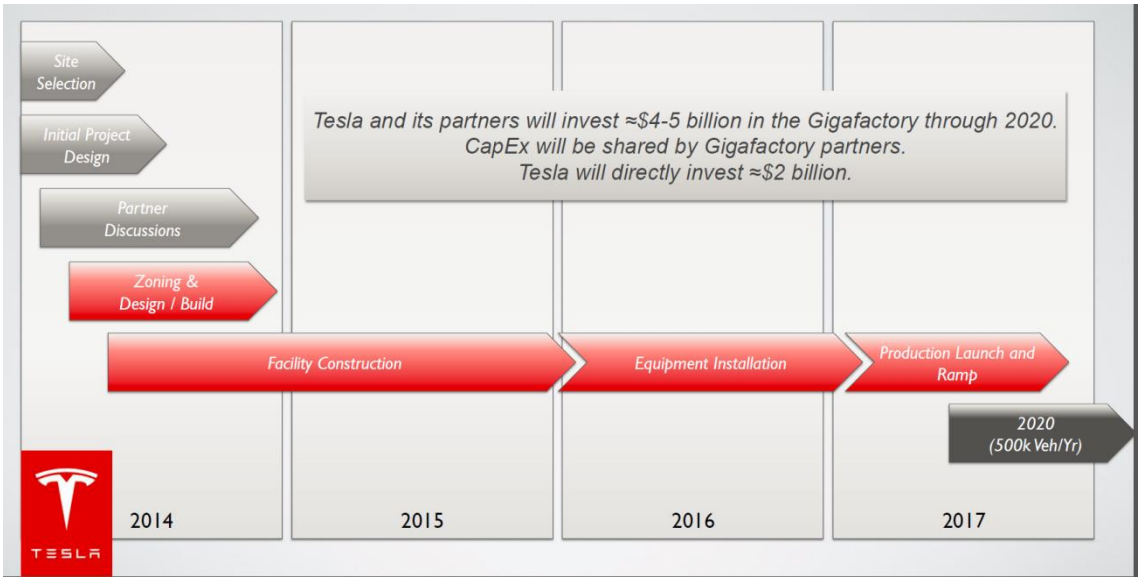
Im Juni 2014 ging Tesla Inc. den unkonventionellen Schritt und gab das Versprechen, dass das Unternehmen gegen die freie Nutzung der eigenen Patente nicht klagen würde (Tesla 2014-3). Begründet wurde dies damit, dass das Unternehmen zur breiten Durchsetzung von nachhaltiger Mobilität gegründet worden war und die eigenen Patente bzw. die Schutzfunktion, welche sie ausüben, es anderen allerdings nicht verwehren sollten, dieses Ziel zum Wohle aller Menschen ebenfalls zu verfolgen. Diese Maßnahme sorgte weltweit für ein großes Echo und wurde sogar als PR-Manöver bezeichnet (manager magazin online 2014-2). Die Offenlegung der Patente sei ein Eingeständnis von Schwäche, denn neben dem immensen Aufwand für FuE könne Tesla Inc. auch den Aufbau von flächendeckender Ladeinfrastruktur nicht komplett alleine stemmen, weshalb eine kritische Masse von Elektromobilen auf den Straßen unterwegs sein sollte, damit neben dem Einstieg weiterer Unternehmen nicht nur die öffentliche Aufmerksamkeit für die Elektrofahrzeuge und damit das Portfolio von Tesla Inc. größer wird, sondern ggf. auch die öffentliche Hand die Notwendigkeit zur Unterstützung des Ladeinfrastrukturaufbaus erkenne (Bloomberg Business 2014).

Darüber hinaus unkonventionell ist das Vertriebsmodell des Unternehmens: Anders als viele Automobilunternehmen verkauft es seine Elektrofahrzeuge nicht über ein unabhängiges Netz von Handelsunternehmen, sondern in seinen eigenen Vertriebsstandorten (FAZ 2014). Nachdem Autohändler vor allem in den USA dies nicht gerne sahen und der Direktverkauf von Tesla Inc. in manchem Bundesstaaten für einige Jahre unter starkem Beschuss stand, sind die Verkaufsläden, Service-Einrichtungen und Ladestationen des Unternehmens heute weltweit vorhanden (Tesla 2016-3).

Unkonventionell ist auch der Schritt von Tesla Inc., mit einer unternehmenseigenen Batteriefabrik die Kosten von Energiespeichern für die Elektromobilität durch eine Massenproduktion deutlich zu senken. In Zusammenarbeit mit strategischen Partnern wie der Panasonic Corporation entsteht die sogenannte „Gigafactory“ im US-amerikanischen Reno/Nevada, um die Kosten von LIB für den Erfolg des Tesla Model 3 deutlich zu reduzieren (Tesla 2016-1). Im Jahr 2020 soll die Gigafactory voraussichtlich ihre volle Kapazität erreichen und mit insgesamt 35 Gigawattstunden pro Jahr für ungefähr 500.000 Elektrofahrzeuge mehr LIB produzieren, als im Jahr 2013 weltweit hergestellt wurden (Tesla 2014-4, Seite 1). Würde das Unternehmen es schaffen, die Batteriekosten auf oder unter 100 USD pro Kilowattstunde zu drücken (was die Kostenparität zwischen einem Elektromobil und einem Automobil mit Verbrennungsmotor darstellt), würde ihm dies einen Trumpf im Wettrennen zur breiten Durchsetzung von Elektromobilität in die Hand geben. Zusammen mit der Panasonic Corporation hat Tesla Motors ein Tochterunternehmen gegründet, das als Panasonic Energy Corporation of North America seinen Sitz am Standort der Gigafactory hat und für die Produktion der LIB zuständig ist (Panasonic 2014). Die Massenproduktion von Batteriezellen hat ganz offiziell zu Beginn des Jahres 2017 begonnen (Tesla 2017-4).

Aus der Roadmap zum Aufbau der Gigafactory (Abbildung 38) geht hervor, dass der Produktionsbeginn im Jahr 2017 stattfinden soll, was sich mit den jüngsten Bekanntmachungen deckt (Tesla 2017-3, Seite 1).

Abbildung 38: Die Roadmap zum Aufbau der Gigafactory von Tesla Inc.



Quelle: Tesla 2014-7, Seite 5.

Ambitioniert und unkonventionell geht Tesla Inc. gewissermaßen auch beim Aufbau der Ladeinfrastruktur für die eigenen Elektrofahrzeuge vor: Ziel ist es, die sogenannten „Supercharger“ weltweit zu installieren, es gibt heute 848 Supercharger-Stationen mit 5.487 Supercharger-Ladeplätzen in Nordamerika, Europa und Asien/Pazifik (Tesla 2016-4) (Stand: Mai 2017). Sie entstehen entlang der wichtigsten Verkehrsrouten und stellen eine schnelle „Betankung“ bereit. Dazu kommt das sogenannte „Destination Charging“, also eine Kooperation zwischen Tesla Inc. und beispielsweise Einkaufszentren oder Restaurants, wo das Laden für Tesla-Kunden möglich sein soll (Tesla 2016-5).

Hinsichtlich der Ladeinfrastruktur ergeben sich zwei sehr große Herausforderungen für das Unternehmen: Der Aufbau einer eigenen, weltweit verfügbaren Ladeinfrastruktur kostet sehr viel und schmälert die Gewinne von Tesla Inc. bzw. verschiebt die Profitabilität des Unternehmens wiederholt in die Zukunft (manager magazin online 2015-3). Jüngste Entwicklungen zeigen außerdem, dass der Ausbau des Supercharger-Netzwerks schon seit dem zweiten Quartal 2015 nicht mehr mit dem Wachstum der Tesla-Elektrofahrzeugflotte mithalten kann, woraus die Frage resultiert, ob eine Überfüllung zu erwarten ist, wenn das Tesla Model 3 für den Massenmarkt eingeführt wird (electrek 2016-1). Auch die Tatsache, dass Neukunden ab dem Jahr 2017 das Supercharger-Netzwerk nicht mehr kostenlos nutzen dürfen (Handelsblatt 2016-3), wird vermutlich nur eine geringe Entspannung mit sich bringen: Zahlungskräftige Kunden werden den Zugang zum Supercharger-Netzwerk auch zukünftig je nach Bedarf einfach dazu buchen (electrek 2016-2).

4.3.2.2.4 SOLL: Weltmarktführer in BEV

Die Ambitionen von Tesla Inc. wurden spätestens nach der erfolgreichen Markteinführung und breiten Kundenakzeptanz des Model S von der gesamten Automobilbranche wahrgenommen und mit großer Aufmerksamkeit honoriert.

Die teilweise sehr ambitionierten Zielvorgaben des Unternehmens (Süddeutsche 2015) sind allerdings nur schwer als realistisch zu bezeichnen, wenn man die seit Jahren fast konsistente Entwicklung des Unternehmens mit einbezieht (siehe Tabelle 16). Der Umsatz steigt von Jahr zu Jahr, allerdings bis 2015 bei geringer werdendem Umsatzwachstum. Erst 2016 stieg der Umsatz wieder höher, auch durch die Akquise des Solarenergie-Unternehmens SolarCity Corp. Der Jahresfehlbetrag ist mit Ausnahme des Jahres 2013 beträchtlich, wobei immerhin dessen Wachstum seit dem Jahr 2014 zurückgeht. Die hohen Jahresfehlbeträge der Jahre 2015 und 2016 entstanden u. a. aus den hohen Investitionen in den Aufbau der Gigafactory sowie die damit verbundenen Vorbereitungen von Produktion und Vertrieb des Tesla Model 3. Dazu kommen die notwendigerweise hohen Investitionen des Unternehmens in die Bereitstellung einer weltweit flächendeckenden Ladeinfrastruktur.

Tabelle 16: Geschäftszahlen von Tesla Inc. in den Jahren 2012 bis 2015 in Mio. USD

	2012	**2013**	**Veränd. Vorjahr**	**2014**	**Veränd. Vorjahr**	**2015**	**Veränd. Vorjahr**	**2016**	**Veränd. Vorjahr**
Umsatz	413	2.014	387,65 %	3.198	58,79 %	4.046	26,52 %	7.000	73,01 %
Jahres-übersch.	-396	-74	-81,31 %	-294	297,30 %	-889	202,38 %	-675	-24,08 %

Quelle: boerse.de 2017.

Den großen Unterschied zwischen der hohen Bewertung am Aktienmarkt (Handelsblatt 2017-1) und dem geringen Ausliefervolumen sowie den tatsächlich ausgewiesenen Verlusten bei gleichzeitig hohen staatlichen und bundesstaatlichen Zuwendungen bezeichnete das Wall Street Journal bereits im Februar 2015 als „das Tesla-Paradox“ (Wall Street Journal 2015). Angesichts dieser komplexen Situation gilt heute genauso wie im November 2014, dass die Entscheidung über eine Investition in Tesla Inc. der Beantwortung einer Glaubensfrage gleich kommt (Handelsblatt 2014-1). Kritisch zu sehen ist angesichts der 43.859 im Jahr 2015 verkauften Elektrofahrzeuge auch das Ziel von Tesla Inc., spätestens ab dem Jahr 2020 mehr als 500.000 Elektrofahrzeuge pro Jahr zu produzieren (manager magazin online 2014-3), das zuletzt sogar auf 2018 vorgezogen wurde (Thomson Reuters 2016-3). Im ersten Quartal des Jahres 2017 produzierte Tesla Inc. zum ersten Mal über 25.000 Elektrofahrzeuge (Tesla 2017-5), was hochgerechnet auf das Gesamtjahr 2017 über 100.000 Elektrofahrzeugen entspräche, nach 83.922 Elektrofahrzeugen im Gesamtjahr 2016 (Tesla 2016-6).

Tesla Inc. wird in jedem Fall auch weiterhin möglichst schnell wachsen müssen, um in die Volumenproduktion von preisgünstigen Elektrofahrzeugen vordringen zu können. Ob bzw. wann die Profitabilität des Unternehmens erreicht wird, ist gleichzeitig eine entscheidende Frage: Sollte der Prozess für eine signifikante Anzahl von Aktionären zu lange dauern, könnte Tesla Inc. angesichts seiner großen Ziele die Luft ausgehen.

4.3.2.3 Fallstudie/Profil 3: BMW Group

4.3.2.3.1 IST: Die ersten erfolgreichen BEV und PHEV des Premium-Automobilherstellers

Die BMW Group hat im Jahr 2015 insgesamt 28.172 Elektrofahrzeuge verkauft und war damit der erfolgreichste Elektrofahrzeughersteller aus Deutschland (Tabelle 17). Das verkaufsstärkste Modell war dabei mit Abstand das BEV i3, dessen Markteinführung in Deutschland im November 2013 erfolgte (BMW Group 2013-2). Es war das erste elektrisch angetriebene Serienfahrzeug der im Februar 2011 gegründeten BMW-Submarke BMW i (BMW Group 2011) und sollte neben Behörden- und Privatkunden auch Flottenkunden ansprechen, die im Stadtgebiet auf Elektromobilität setzen. Das in Hinblick auf die Verkaufszahlen nächstbeste PHEV i8 wurde ab Juni 2014 in Europa ausgeliefert (BMW Group 2014-1).

Tabelle 17: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio der BMW Group im Jahr 2015.

Marke	**Typ**	**Modell**	**Antrieb**	**2015 verkauft**
BMW	**Cars**	**i3**	**BEV**	**21.708**
BMW	**Cars**	**i8**	**PEHV**	**5.289**
BMW	**Cars**	**X5**	**PHEV**	**849**
Zinoro	Cars	Zinoro 1E	BEV	258
BMW	Cars	3, 4	HEV	30
BMW	Cars	5	HEV	26
BMW	Cars	7	HEV	12
TOTAL				28.172

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von MarkLines 2017 (Stand: August 2016).

Im Rahmen einer Phase der Plug-in-Hybridisierung seines Modellportfolios ging die BMW Group einen ersten absolut naheliegenden Schritt:

> „Um den Umstieg günstiger zu machen, will der Hersteller auf das für die i-Modelle entwickelte Baukastensystem zurückgreifen. Auf einer Produktionslinie sollen künftig die Batteriemodule für den Hybrid-Sportwagen BMW i8 und den halbelektrischen SUV BMW X5 gebaut werden.“ (Handelsblatt 2014-2)

Dazu kam ein auf dem BMW X1 basierendes BEV mit dem Namen Zinoro 1E, das die BMW Group ausschließlich in China im Rahmen des JV BMW Brilliance Automotive Ltd. mit dem

Partner Brilliance China Automotive Holdings Ltd. und ausschließlich für Flottenbetreiber angeboten hat (Automobil Produktion 2014).

Zum aktuellen Zeitpunkt (Stand: Mai 2017) sind also neben den BMW i-Modellen i3 und i8 sieben BMW iPerformance-Modelle (PHEV) verfügbar, der BMW 225xe iPerformance Active Tourer, die BMW 330e iPerformance Limousine, die BMW 530e iPerformance Limousine, der BMW X5 xDrive40e iPerformance sowie die 7er-BMW in drei PHEV-Versionen mit kurzem Radstand (740e iPerformance), als Langversion (740Le iPerformance) und als Langversion mit Allradantrieb (740Le xDrive iPerformance) (BMW Group 2016-1).

International hatte die BMW Group gleich ihr erstes, für das Jahr 2014 ausgegebene Absatzziel von 10.000 BMW i3 erreicht (manager magazin online 2014-4; MarkLines 2017, Stand: August 2016). Mittlerweile gibt es den BMW i3 gegen einen Aufpreis von 4.500 Euro mit Range Extender, so dass ein zusätzlicher Verbrennungsmotor bei Bedarf die Energiespeicher nachlädt – die Reichweite liegt damit zwischen minimal 170 und maximal 330 Kilometern (BMW Group 2016-2). Sollte die Batterie allerdings unterwegs leer gefahren und der Betrieb des BMW i3 auf den (im Vergleich zum Elektromotor mit 125 kW bzw. 170 PS deutlich schwächeren) Verbrennungsmotor (mit 25 kW bzw. 34 PS) umgestellt werden, bricht die Leistungsfähigkeit des Elektrofahrzeugs deutlich ein und seine primäre Eignung für Autofahrten in der Stadt wird offensichtlich (Zeit Online 2014-1). Im November 2016 wurde bekannt, dass die BMW Group dem BMW i3 im Jahr 2017 ein Update zugedacht hat (Die Welt 2016).

Beim BMW i8 überschritt die Nachfrage deutlich das Angebot bzw. die Produktionskapazitäten, weshalb Kunden zwischenzeitlich sogar 18 Monate auf ihr Fahrzeug warten mussten (Automobilwoche 2014). Der BMW i8 sollte die Kombination aus einem Sportwagen bzgl. der Fahrleistung mit einem Kleinwagen bzgl. des Verbrauchs darstellen (Zeit Online 2012), kommt elektrisch allerdings nur auf eine Reichweite von rd. 35 Kilometern.

Insgesamt hat die BMW Group bereits über 100.000 Elektrofahrzeuge auf die Straße gebracht (Stand: November 2016), davon mehr als 60.000 BMW i3, mehr als 10.000 BMW i8 und mehr als 30.000 PHEV im Rahmen des Technologietransfers von BMW i auf das BMW iPerformance-Label (BMW Group 2016-3). Die Bedeutung dieses Technologietransfers für die BMW Group kann gar nicht stark genug betont werden:

> „Darüber hinaus setzt BMW i mit umfangreichem Technologietransfer zu den weiteren Marken der BMW Group maßgebliche Impulse für überdurchschnittlich große Markterfolge auf dem Gebiet der nachhaltigen Mobilität. Seit März 2017 wird die ursprünglich für BMW i Automobile entwickelte BMW eDrive Antriebstechnologie bereits in sechs BMW Modellreihen sowie erstmals auch in einem MINI eingesetzt.“ (BMW Group 2017-1)

4.3.2.3.2 Strategie der BMW Group: Innovation und Nachhaltigkeit

Die Elektromobilität als solches stellt eines von zehn Nachhaltigkeitszielen der BMW Group im Bereich „Produkte und Dienstleistungen“ für das Jahr 2020 dar:

> „Die BMW Group ist führend mit ihrem ganzheitlichen Ansatz für Premium-Elektromobilität." (BMW Group 2015, Seite 26)

Interessant ist dabei, dass sich die BMW Group nicht wie die Toyota Motor Corporation (TMC) oder Tesla Inc. auf bestimmte Elektrofahrzeug-Antriebe konzentriert, sondern sich von Beginn an alle Optionen offen hielt (Abbildung 39) und nach wie vor offen hält. Ob Optimierung bzw. Steigerung der Effizienz bereits vorhandener Technologien wie im Falle der herkömmlichen Verbrennungsmotoren, HEV, PHEV, BEV oder FCEV, die Intention der BMW Group ist offensichtlich, auf allen Technologiefeldern mit zur Spitze der technologischen FuE zu gehören, um dann, wenn sich ggf. eine Technologie durchzusetzen scheint, über eine gute Positionierung mit hervorragenden Erfolgsaussichten zu verfügen:

> „Im Rahmen seines Vortrags […] stellte Klaus Fröhlich, Mitglied des Vorstands der BMW AG, Entwicklung, jetzt die gesamte Palette künftig möglicher Antriebstechnologien vor. […] Eine der Kernaussagen [ist] dabei, dass die Abdeckung aller relevanten Anforderungen von Kunden wie Gesetzgebern eine hohe Angebotsvielfalt an unterschiedlichen Antrieben erfordert. „Eine 'one-fits-all'-Lösung wird es nicht geben. Wir sehen diese Vielfalt der verschiedenen Technologien über viele Jahre" […]." (BMW Group 2016-4)

Die angesprochene Technologievielfalt kann wie folgt charakterisiert werden:

> „Der Verbrennungsmotor wird zwar mittelfristig in seiner Bedeutung abnehmen, er wird aber noch lange notwendig sein und hat mit zusätzlichen Investitionen noch Potenzial. […] Das Batterie-Elektrische-Fahrzeug (BEV) wird in den nächsten Jahren noch nicht die allumfassende Lösung für alle Kunden und Fahrzeugklassen sein. […] Für mittlere Fahrstrecken und Fahrzeuggrößen bietet die BMW Group ein breites Angebot an Plug-In Hybrid Modellen (PHEV) an. Mit diesen Allroundern beginnt in vielen Segmenten die kundenrelevante E-Mobilität. Für hohe Reichweiten und hohe Fahrwiderstände ist das Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrischen-Fahrzeug (FCEV) die alltagstaugliche, Zero-Emission-Lösung." (BMW Group 2016-4)

Die dazu relevanten Aktivitäten der BMW Group werden unter der Marke BMW i gebündelt:

> „Mit project i entwickeln wir seit 2007 völlig neue Konzepte für die individuelle Mobilität, Fahrzeugarchitektur und -produktion. Sie integrieren den Nachhaltigkeitsansatz in der gesamten Wertschöpfungskette noch innovativer. Bei den Modellen der Marke BMW i wurde nicht der Verbrennungsmotor gegen einen Elektromotor ausgetauscht (Conversion-Ansatz). Vielmehr planten wir die Modelle von Anfang an als neue und eigenständige Fahrzeugkonzepte (Purpose-Build-Ansatz), da nur so das gesamte Potenzial dieser Antriebskonzepte erschlossen und für den Kunden nutzbar gemacht werden kann." (BMW Group 2013-3, Seite 46)

Zahlreiche Maßnahmen zu diesem Ansatz erlauben eine deutlich verbesserte Nachhaltigkeit, die sich schon sehr früh mit konkreten Erfolgen beispielhaft abzeichnete:

„Bei der BMW i Produktion stößt das Werk [Leipzig] in punkto Nachhaltigkeit in neue Dimensionen vor: Der spezifische Wasserverbrauch konnte um 70 Prozent reduziert werden, der Energiebedarf um 50 Prozent.“ (BMW Group 2014-2, Seite 17)

Abbildung 39: Die Vision der BMW Group für nachhaltige Mobilität in verschiedenen Phasen.

Verbrennungs-motor	Hybrid-technologie	Elektrofahrzeug	Wasserstoff
- Optimierung von Kraftstoff-verbrauch und Emissionen - Leichtbau	- Voll- und Teil-hybrid Fahrzeuge - Erste Schritte zur Elektrifizierung des Antriebs-strangs	- Erste limitierte Elektrofahrzeug-Produktion in 2008 - Stufenweise Um-setzung seit 2009 - Start Produktion des Megacity Vehicles in 2013	- Entscheidung für und Überprüfung der Technologie. - Optimierung des BMW H2 ICE. - Verbesserung von Wasserstoff-speicherung und -effizienz.
heute	heute	heute/morgen	übermorgen

Quelle: BMW Group 2010-1, Seite 22.

Im November 2016 verkündete die BMW AG in Person des seit Mai 2015 amtierenden Vorstandsvorsitzenden Harald Krüger, dass die BMW Group im Jahr 2017 insgesamt 100.000 Elektrofahrzeuge verkaufen möchte, was in etwa der seit dem Jahr 2013 überhaupt verkauften Anzahl von Elektrofahrzeugen entspräche (Handelsblatt 2016-4). Bekräftigt wurde diese ambitionierte Erwartungshaltung mit der Bilanz des ersten Quartals im Jahr 2017:

„Seit Beginn des Jahres wurden nahezu 20.000 elektrifizierte Fahrzeuge an Kunden in der ganzen Welt ausgeliefert; das sind doppelt so viele wie im Vorjahreszeitraum. Die Produktion elektrifizierter Fahrzeuge im ersten Quartal belief sich auf über 24.000 Einheiten. […] In den meisten Märkten wurde im März auch der Plug-in-Hybrid BMW 530e iPerformance eingeführt. Dieses Modell soll – ebenso wie der MINI Cooper S E Countryman ALL4 Plug-in-Hybrid, dessen Auslieferung im Juni beginnt – zu einem starken Wachstumstreiber für den Absatz elektrifizierter Fahrzeuge werden.“ (BMW Group 2017-2)

4.3.2.3.3 Maßnahmen: Große Investitionen als Wette auf die Zukunft

Die BMW Group musste von Beginn an zahlreiche große Investitionen tätigen, um sich auf die Elektromobilität erfolgreich einlassen zu können:

> „Rund drei Milliarden Euro haben die Bayern Branchenkreisen zufolge in die gesamte Elektro-Strategie gesteckt. Laut BMW hat der Konzern allein 600 Millionen Euro für die Entwicklung des i3 ausgegeben, davon 400 Millionen für neue Produktionsstätten in Leipzig […]. Der zweitgrößte Posten beim i3 ist mit 70 Millionen Euro eine Fabrik für Karbonfasern im US-Bundesstaat Washington. Dazu kommen Entwicklungskosten in unbekannter Höhe." (FOCUS Online 2013)

In Moses Lake, Washington State/USA, baute die BMW Group 2010 und 2011 zusammen mit JV-Partner SGL Carbon für rund 70 Millionen Euro ein hochautomatisiertes Karbonfaserwerk, wo die Karbonfasern für die Fahrgastzelle des i3 hergestellt werden (FOCUS Online 2013). Die Produktionskapazität dieses Werks wurde zwischenzeitlich deutlich vergrößert:

> „In die Erweiterung des Standorts fließen 200 Millionen US-Dollar, zusätzlich zu den bislang bereits investierten 100 Millionen US-Dollar. Der Ausbau des Werks soll Anfang 2015 abgeschlossen sein. Damit wird das Werk in Moses Lake zum weltweit größten Karbonfaserwerk." (BMW Group 2014-3)

Auch entlang der weiteren Wertschöpfungskette wurden Investitionen notwendig, zum Beispiel im Werk Wackersdorf, wo die Karbonfasern aus Moses Lake weiterverarbeitet werden (BMW Group 2014-4, Seite 2):

> „Die BMW Group investierte über 20 Millionen Euro in die 8.250 Quadratmeter große Fertigungshalle und eine neu entwickelte CFK-Stackanlage. [Dadurch] verdoppelt sich zunächst die Produktionskapazität." (BMW Group 2014-5)

Auch in den Werken Dingolfing und Landshut hat die BMW Group für die Elektromobilität investiert, beginnend im Jahr 2010 mit rd. 40 Millionen Euro in den Ausbau der bestehenden CFK-Komponentenproduktion im Werk Landshut (BMW Group 2010-2). Im Jahr 2012 folgten 125 Millionen Euro für die Produktion weiterer Komponenten für die BMW i-Modellreihe:

> „So entstehen beispielsweise für den neuen BMW i3 die Batterie, das E-Getriebe und die Aluminium-Struktur des Chassis in Dingolfing. Auch für den BMW i8 fertigt der Standort Strukturteile wie Vorderachsträger, Vorderwagen- und Hinterwagenmodul. Das BMW Werk Landshut wird die Elektromotoren und Range Extender zur Reichweitenverlängerung, aber auch Hochvoltspeicher sowie Motor-Getriebe-Einheiten für die BMW i Modelle produzieren. […] Neben den Elektroantriebsmodulen werden in Landshut auch Karosserieteile aus dem ultraleichten Hightech-Werkstoff CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, kurz: Carbon) für die BMW i Modelle gefertigt. Schließlich liefert das niederbayerische Komponentenwerk auch Umfänge für das Kunststoff-Exterieur der BMW i Fahrzeuge sowie das Cockpit und Gussteile." (BMW Group 2012)

Weitere Investitionen folgten in Dingolfing zum 40-jährigen Produktionsjubiläum (BMW Group 2013-4), und neue Fertigungslinien wurden ein Jahr später in Betrieb genommen:

> „Das Werk Dingolfing wird damit zum Kompetenzzentrum der BMW Group für die Fertigung von E-Antriebssystemen ausgebaut. Schon heute liefert der Standort Hochvoltspeicher

> sowie weitere Fahrwerks- und Antriebskomponenten für die BMW i Modelle ins BMW Werk Leipzig. Auch die Speicher der ersten BMW Hybridmodelle, BMW Active Hybrid 3, 5 und 7 werden in Dingolfing gebaut.“ (BMW Group 2014-6)

Im Oktober 2016 wurde im Werk Landshut außerdem noch ein Leichtbauzentrum eröffnet, in welches die BMW Group rund 20 Millionen Euro investiert hat (BMW Group 2016-5). Für den Standort Dingolfing verkündete die BMW Group im Mai 2017:

> „Bereits seit 2013 werden in Dingolfing Hochvoltspeicher für die BMW i-Modelle gebaut, in den letzten Jahren sind darüber hinaus neue Fertigungslinien für die Produktion der Hochvoltspeicher und Elektromotoren der Plug-in-Hybride der BMW Group entstanden. In Dingolfing laufen zudem die Plug-in-Hybrid Versionen des BMW 5er und BMW 7er vom Band. Ab 2021 wird dann mit dem BMW iNEXT auch ein voll elektrisches Fahrzeug am Standort produziert. Nach Leipzig wird Dingolfing der zweite Standort der BMW Group sein, der ein voll elektrisches BMW i-Fahrzeug produziert.“ (BMW Group 2017-3)

Die BMW Group arbeitet seit dem Jahr 2009 mit Samsung SDI als Zulieferer von LIB-Zellen für Elektrofahrzeuge zusammen, und hat die Kooperation im Juli 2014 intensiviert:

> „Samsung SDI wird die BMW Group in den kommenden Jahren mit Batteriezellen für den BMW i3, BMW i8 und zusätzliche Hybridmodelle beliefern. Die wichtigsten Bestandteile der Vereinbarung sind die mittelfristige Erhöhung der Stückzahl durch die steigende Nachfrage nach Elektromobilität und die technologische Weiterentwicklung der Batteriezellen.“ (BMW Group 2014-7)

Zu einer eigenen Batteriezellproduktion konnte sich die BMW Group noch nicht entscheiden (Stand: Dezember 2016), lehnt es aber nicht prinzipiell ab (Süddeutsche 2016-1).

Zum Serienproduktionsstart des BMW i3 im September 2013 gab die BMW Group bekannt, nur im Werk Leipzig bereits rd. 400 Millionen Euro investiert zu haben (BMW Group 2013-5). Im Werk Leipzig werden die BMW i-Elektrofahrzeuge montiert:

> „Die CFK-Verbundbauteile werden schließlich in Leipzig in der BMW i Karosseriebauhalle zusammengefügt. Hier entsteht die Grundstruktur des Life Moduls für den BMW i8 und den BMW i3.“ (BMW Group 2014-4, Seite 4)

Auch die weiteren Produktionsschritte finden im Werk Leipzig statt:

> „Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit selbsttragender Karosserie besteht die Life-Drive Architektur beim BMW i8 einerseits aus einer CFK-Zelle sowie andererseits aus einem Vorder- und Hinterbau aus Aluminium, die die Antriebsumfänge beherbergen. Der Hochvoltspeicher befindet sich für einen optimalen Fahrzeugschwerpunkt unterhalb der CFK-Zelle. Vom Karosseriebau gelangt die CFK-Fahrgastzelle in die Montagehalle. Sie erhält dort auf dem Montageband die kundenspezifische Ausstattung. Im sogenannten Aufrüstband erfolgt die Vormontage der Antriebskomponenten und des Hochvoltspeichers. Die gesamte Antriebseinheit wird dann […] bei der „Hochzeit“ mit der CFK-Zelle verschraubt. Erst danach erhält der BMW i8 sein finales äußeres Kunststoffkleid. Zuletzt durchläuft der

> Sportwagen – zusammen mit dem i3 und den anderen in Leipzig gefertigten BMW Fahrzeugen – den abschließenden Finish-Bereich mit umfassenden Qualitätskontrollen." (BMW Group 2014-4, Seite 8)

Interessant ist hinsichtlich des eingesetzten modularen Baukasten-Fertigungssystems noch die folgende Erläuterung des Vorstandes für Produktion der BMW Group, Oliver Zipse:

> „Künftig gestalten wir das BMW Produktionssystem so, dass wir in den [Produktionsstandorten] gleichzeitig Modelle mit Verbrennungsmotor, Plug-in-Hybrid oder einem voll elektrischen Antrieb bauen können. Damit erreichen wir eine einzigartige Flexibilität und sind auf der Kostenseite optimal aufgestellt." (BMW Group 2017-3)

Dies verdeutlicht, dass sich die BMW Group absolut gewappnet sieht, die oben beschriebene Zukunft mit großer Technologievielfalt in Angriff zu nehmen.

4.3.2.3.4 SOLL: PHEV in der gesamten Produktpalette, Digitalisierung und Ausbau der Mobilitätsdienstleistungen

Das gesamte Produktportfolio der BMW Group soll einer Elektrifizierung unterzogen werden (Automobil Produktion 2016-3), was der Vorstandsvorsitzende der BMW Group, Harald Krüger, auf der Bilanzpressekonferenz im März 2017 bekräftigte:

> „Der Antrieb der Stunde ist der Plug-in-Hybrid. BMW ist hier klar die Nummer 1 der Premiummarken. Unser BMW i3 gehört zu den Top 3 der meistverkauften Elektrofahrzeuge weltweit. Dies zeigt: Wir sind richtig aufgestellt – und gehen weiter voran: 2017 wollen wir 100.000 elektrifizierte Fahrzeuge verkaufen. 2025 sollen E-Modelle und Plug-in-Hybride 15 bis 25 Prozent unseres Absatzes ausmachen. Dazu werden alle Konzernmarken und Baureihen elektrifiziert. Unser Ziel ist die nachhaltige Mobilität. […]" (BMW Group 2017-4)

Dazu wurde die Strategie der BMW Group bereits ein Jahr früher hinsichtlich der Technologieführerschaft und die inhaltlichen Ausrichtung des „project i" deutlich angepasst:

> „Unter dem Titel BMW iNEXT bietet die BMW Group ihren Kunden neue Maßstäbe beim Mobilitätserlebnis, indem sie neue Formen des automatisierten Fahrens und digitaler Vernetzung mit der nächsten Generation der Elektromobilität sowie zukunftsweisendem Interieur, Design und Leichtbau verbindet. […] Diese Entwicklung wurde maßgeblich durch das project i ermöglicht, mit dem sich die BMW Group zum Vorreiter der nachhaltigen Mobilität gemacht hat. Damit hat sich das Unternehmen frühzeitig für die Elektromobilität befähigt und deren Industrialisierung sichergestellt. Diesen Pfad schlägt die BMW Group mit project i 2.0 nun für das automatisierte und vollvernetzte Fahren ein. Das project i 2.0 bündelt die Möglichkeiten der Digitalisierung optimal, um auch in diesem Zukunftsfeld die Position der BMW Group als Technologieführer nachhaltig zu sichern. Der Schwerpunkt liegt auf den Bereichen hochpräzise digitale Karten, Sensorik, Cloud-Technologie und künstliche Intelligenz, die über den Erfolg […] entscheiden." (BMW Group 2016-6)

Nach dem Jahr 2020 (Automobil Produktion 2017) bzw. bis ins Jahr 2021 will die BMW Group ein Automobil vorstellen, das weitestgehend autonom fahren kann. Es wird bereits spekuliert, dass es sich dabei um den BMW i5 handeln könnte (Autobild 2017):

> „Die drei Unternehmen kündigten am Freitag in München an, zusammen die Technik für hoch- und vollautonomes Fahren entwickeln und sie innerhalb der nächsten fünf Jahre in die Serienproduktion bringen zu wollen. Um einen Industriestandard zu setzen, werde eine offene Plattform geschaffen. Diese soll anderen Autobauern und anderen Branchen zugänglich sein. In Kürze werde ein hochautomatisiert fahrender Prototyp vorgestellt. 2017 sollen die Tests auf autonome Flotten ausgeweitet werden.“ (Handelsblatt 2016-5)

Auch bei den Mobilitätsdienstleistungen schreitet die BMW Group voran und präsentiert sich nicht mehr nur als Elektrofahrzeughersteller, sondern als Mobilitätsanbieter, u. a. mit dem App- und Web-basierten Parkassistenten ParkNow, dem Car-Sharing-Service DriveNow der BMW Group und SIXT SE, dem App- und Web-basierten Ladestationsassistenten ChargeNow sowie der hauseigenen Risikokapitalgesellschaft BMW i Ventures, mit der weitere Mobilitätsdienstleistungen an den Markt herangeführt werden sollen (BMW Group 2016-7).

Daneben investiert die BMW Group auch in den Aufbau von Ladeinfrastruktur, z. B. zusammen in einem Konsortium mit der Daimler AG, der Volkswagen AG mit den Marken Audi und Porsche sowie der Ford Motor Company (Handelsblatt 2017-2). Damit würde auch ein Alternativprodukt zum Supercharger-Netzwerk von Tesla Inc. entstehen (siehe Kapitel 4.3.2.2.3).

Insgesamt zeigt sich, dass die BMW Group die Unternehmenstransformation Schritt für Schritt in Angriff nimmt, allerdings auch Zeit zur Umgewöhnung benötigt (Zeit Online 2016-2). Die international erworbene Vorreiterposition mit dem BMW i3 stärkt das Unternehmen.

4.3.2.3.5 Kooperation: BMW Group und Toyota Motor Corporation

Bereits seit dem Jahr 2003 kooperieren Toyota Motor Corporation (TMC) und BMW Group. Interessant wird die Partnerschaft für die vorliegende Dissertation mit einer im Juni 2012 unterzeichneten Absichtserklärung (engl. „Memorandum of Understanding“, MoU), die die begonnene Zusammenarbeit im Bereich der nachhaltigen Mobilität ausbauen sollte und auf eine langfristige strategische Zusammenarbeit abzielte (Handelsblatt 2012-2). Der letztlich im Januar 2013 unterzeichnete Kooperationsvertrag beinhaltete vier wesentliche, im Vergleich zum MoU leicht geänderte Punkte, wobei der vierte Punkt die Post-LIB betrifft:

> „4. Post-Lithium Batterie-Technologie – Die Unternehmen beginnen ihre gemeinsame Forschung mit dem Ziel, eine Lithium-Air Batterie zu entwickeln, deren Energiedichte weit über der der aktuellen Lithium-Ionen Batterien liegt.“ (BMW Group 2013-6)

Gerade bezüglich der genannten Technologie ist noch viel FuE bis zur Markteinführung konkreter Produkte notwendig, weshalb sich beide Partner die Kosten sicher gerne teilen.

5 Die Funktionale Dynamik des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität

Die funktionale Dynamik der TIS in den sechs betrachteten Ländern steht im Mittelpunkt des fünften Kapitels. In Schritt 2 der Analyse wird das funktionale Muster im TIS ermittelt (5.1), wobei der Fokus auf den sieben Funktionen Einfluss auf die Suchrichtung (5.1.1), Wissensentwicklung (5.1.2), Unternehmerisches Experimentieren (5.1.3), Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte (5.1.4), Legitimität (5.1.5), Ressourcenmobilisierung (5.1.6) und Marktentstehung (5.1.7) liegt.

Dazu werden die strukturellen Komponenten des TIS wie Akteure, Netzwerke und Institutionen natürlich durchgehend berücksichtigt.

5.1 Schritt 2: Festlegung des funktionalen Musters im TIS

Der dritte Schritt des ursprünglichen Vorgehens besteht darin, das funktionale Muster des TIS aufzuzeichnen, also zu analysieren, wie das TIS sich in Bezug auf eine Reihe von Schlüsselprozessen verhält (Bergek et al. 2008, Seite 414). Dabei geht es ganz bewusst noch nicht darum, die „Stärke“ des aktuellen funktionalen Musters zu bestimmen, was später geschehen wird (siehe Kapitel 4.4). Das funktionale Muster eines TIS wird sich höchstwahrscheinlich von dem funktionalen Muster anderer TIS abheben und sich über die Zeit ändern. Deshalb sollte das Konzept nicht implizieren, dass sich ein funktionales Muster fortlaufend wiederholt oder optimal ist.

Ein Vorschlag für die Reihenfolge und den Zuschnitt der Funktionen im Rahmen dieser Dissertation baut auf dem bereits früher entwickelten Ranking auf (siehe Kapitel 2.3.2, Tabelle 1). Die Wissensentwicklung wird im Rahmen dieser Dissertation als eigenständige Funktion aufgefasst, und die Entwicklung positiver externer Effekte mit der Wissensverbreitung zu einer eigenen Funktion zusammengelegt.

Die im Rahmen der vorliegenden Dissertation gewählte Reihenfolge der Funktionen ergibt sich wie folgt: Aus gesellschaftlicher bzw. politischer Perspektive wird auf den Einfluss auf die Suchrichtung (engl. „influence on the direction of search“) als wichtigste Funktion gesetzt, welche in einer starken Wechselbeziehung sowohl mit der klassischen Wissensentwicklung (engl. „knowledge development“) aus wissenschaftlicher Perspektive als auch dem Unternehmerischen Experimentieren (engl. „entrepreneurial experimentation“) aus industrieller Perspektive stehen. Die Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte (engl. „knowledge diffusion/development of positive externalities“) folgt und sollte mit der Legitimität (engl. „legitimation“) einhergehen. Diese beiden Funktionen stellen die Grundlage zur Ressourcenmobilisierung (engl. „resource mobilization“) dar und damit in letzter Konsequenz auch für die Marktentstehung (engl. „market formation“). Beispielhaft lässt sich diese Reihenfolge für das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität nachvollziehen (Tabelle 18). Auf die einzelnen Funktionen wird dann im Folgenden detailliert eingegangen.

Tabelle 18: Die Funktionen eines TIS mit ihrer Erklärung und einem Beispiel aus dem TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität.

Funktion	**Erklärung**	**Beispiel: Energiespeicher für die Elektromobilität**
Einfluss auf die Suchrichtung	Anreiz oder Druck, damit sich Akteure außerhalb eines TIS für den Eintritt entscheiden sowie Akteure innerhalb des TIS aktiv innovieren	EU-Verordnung zur Verminderung der CO_2-Emissionen von (neuen) Personenkraftwagen (Europäisches Parlament 2014)
Wissensentwicklung	Entwicklung von Breite und Tiefe der aktuellen Wissensbasis eines TIS sowohl auf globaler als auch lokaler (bzw. nationaler) Ebene	Energiespeicher-Veröffentl. in internationalen Journals, NPE-Statusberichte zur Einführung von Elektrofahrzeugen in Deutschland (NPE 2017-2)
Unternehmerisches Experimentieren	Für ein TIS jederzeit charakteristisches unternehmerisches Experimentieren mit neuen Technologien und Anwendungen	Umsetzung des Konzepts BMW i durch die BMW AG in BMW i3 und BMW i8 (BMW Group 2016-1)
Wissensverbreitung/ Entwicklung positiver externer Effekte	Verbreitung und Neukombination des vorhandenen Wissens durch Austausch über Kanäle und/oder Netzwerke sowie Dienstleistungen der unterschiedlichen Akteure	Austausch über das KLiB und das Batterieforum Deutschland (KLiB 2017-2); BMW i Mobilitätsdienstleistungen (BMW Group 2016-7)
Legitimität	Lobbyarbeit für neue Technologie, der Anerkennung durch Schlüsselakteure und erforderliche Unterstützung fehlt	Pressemitteilung des KLiB (KLiB 2015), Forderungen Bundesverband eMobilität e.V. (BEM 2017)
Ressourcen-mobilisierung	Mobilisierung versch. Ressourcen über die Entstehung eines TIS hinweg, z. B. Kompetenz/Humankapital	Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ (2008-2015) (MEET 2011)
Marktentstehung	Entstehung geschützter Märkte für eine neue Technologie, die z. B. bezüglich der Kosten gegenüber etablierten Alternativen im Nachteil sein kann	„Privatwirtschaftliche und kommunale Kaufförderung von Elektrofahrzeugen“ dar (BEM 2013); Elektromobilitätsgesetz (Bundesrat 2015)

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Hekkert et al. 2007, Seite 421ff.; Bergek et al. 2008-1, Seite 414ff. sowie den angegebenen Quellen.

Neben der Erfüllung jeder einzelnen der genannten Systemfunktionen ist auch die dynamische Wechselwirkung zwischen ihnen von Bedeutung (Hekkert et al. 2009, Seite 587). Positive Wechselwirkungen zwischen den Systemfunktionen können zu sich selbst verstärkenden Effekten innerhalb eines TIS führen und so tugendhafte Zyklen (engl. „virtuous cycles“) initiieren, die zur Diffusion einer neuen Technologie führen. „Teufelskreise“ (engl. „vicious cycles“) wiederum können allerdings auch zum genauen Gegenteil führen, wenn Systemfunktionen nicht vollständig erfüllt werden und zu reduzierten Aktivitäten und damit negativen Wechselwirkungen führen, die den Fortschritt bremsen oder sogar vollständig zum Erliegen bringen. Ein Beispiel für einen solchen Zyklus wird innerhalb der Entwicklung Erneuerbarer Energietechnologien regelmäßig auftauchen: Er beginnt mit dem Einfluss auf die Suchrichtung, wenn gesellschaftliche Probleme identifiziert und von Regierungen Ziele gesetzt werden, um Umweltschäden zu begrenzen. Diese Ziele wiederum legitimieren die Ressourcenmobilisierung, was zur Wissensentwicklung führt und wiederum den Einfluss auf die Suchrichtung konkretisiert bzw. die Erwartungen an die technologischen Optionen erhöht.

5.1.1 Einfluss auf die Suchrichtung

Im Folgenden wird auf die Funktion des Einflusses auf die Suchrichtung eingegangen, die Indikatoren zur Messung des Einflusses auf die Suchrichtung im definierten TIS (siehe Kapitel 4.2) in den Ländern Japan, Korea, China, den USA, Frankreich und Deutschland untersucht und eine Zusammenfassung erstellt bzw. ein vorläufiges Fazit gezogen.

5.1.1.1 Theoretische Grundlage und Indikatoren

Aus der gesellschaftlichen Perspektive ist die Auswahl einer konkreten Suchrichtung von hoher Bedeutung: Während z. B. die Funktion der Wissensentwicklung (siehe Kapitel 5.1.2) eher auf den Lernfortschritt einer Gesellschaft eingeht, ohne eine spezifische Richtung auf einem technologischen Feld vorzugeben, deutet die Funktion des Einflusses auf die Suchrichtung an, dass technologischer Wandel nicht autonom erfolgt, sondern wechselnde Präferenzen einer Gesellschaft z. B. aufgrund praktisch immer begrenzter Ressourcen die Prioritätensetzung in FuE beeinflussen und so auch die Richtung des technologischen Wandels verändern können (Hekkert et al. 2007, Seite 423f.). Die Prioritätensetzung kann durch eigentlich alle strukturellen Komponenten des TIS vorgenommen werden, allerdings ist es gerade in demokratischen Gesellschaften oft nicht eine scharfe Auswahl z. B. einer einzigen zu verfolgenden Technologieoption, sondern der interaktive und allmählich zunehmende Prozess des Ideenaustausches zwischen zahlreichen Akteuren, aus welchem sich schließlich eine oder mehrere Technologien als zielführend herauskristallisieren.

Indikatoren zur Messung des Einflusses auf die Suchrichtung sind:

- Offen kommunizierte und langfristig orientierte Ziele, welche durch die Regierung eines Landes oder Unternehmen einer Wirtschaftsbranche gesetzt werden und die Erreichung eines bestimmten Zielzustandes in der Zukunft anvisieren,
- Die Anzahl von wissenschaftlichen Artikeln in professionellen Veröffentlichungen, welche die Erwartungen bezüglich neuer technologischer Entwicklungen erhöhen. Eine

laufende Debatte kann dabei so erfasst werden, dass eher positiv gestimmte Artikel die Entwicklung einer Technologie beschleunigen und eher negativ gestimmte Artikel die Entwicklung einer Technologie behindern.

Noch unreife Technologiekonzepte werden oft erst durch Unternehmerisches Experimentieren erprobt (siehe Kapitel 5.1.3), ihr Erfolg oder Versagen an andere Akteure kommuniziert (siehe Kapitel 5.1.4) und so nicht nur die Anzahl der zur Verfügung stehenden Technologiekonzepte, sondern auch der (wahrgenommene) Grad an Unsicherheit reduziert. Dadurch entstehende Erwartungen werden wiederum durch ihren Einfluss auf die Suchrichtung an alle strukturellen Komponenten kommuniziert.

Zur weiteren Entwicklung eines TIS wiederum kann der Einfluss auf die Suchrichtung auch als Summe von Anreiz- oder Druckmaßnahmen aufgefasst werden, die Akteure außerhalb eines TIS zum Eintritt bewegt und Akteure innerhalb des TIS aktiv innovieren lässt (Bergek et al. 2008-1, Seite 416f.).

Indikatoren zur Messung des Einflusses auf die Suchrichtung sind deshalb auch:

- Der Glaube an Wachstumspotenzial, welcher z. B. in öffentlich verfügbaren Marktstudien durch u. a. Forschungsinstitute oder Unternehmensberatungen dokumentiert und untermauert wird,
- Anreize aus der Entwicklung von Faktor-/Produktpreisen, welche teilweise sekundengenau öffentlich einsehbar sind und nachvollzogen werden können,
- Regulatorischer Druck sowie Steueranreize, welche eine Regierung setzt, um Einfluss auf die Suchrichtung zu nehmen.

5.1.1.2 TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität

Im Folgenden werden die Indikatoren zur Messung des Einflusses auf die Suchrichtung in der oben genannten Reihenfolge diskutiert.

5.1.1.2.1 Durch die Regierung eines Landes gesetzte Ziele

Japan

In Japan haben die Energiespeicher für die Elektromobilität schon seit viel längerer Zeit eine sehr hohe Bedeutung im Rahmen der Wirtschaftspolitik als beispielsweise in Deutschland:

> „Die japanische Regierung betrachtet seit den 1970er Jahren die Energiespeicher-Technologie als eine der Schlüsseltechnologien im Energie- und Transportbereich. Die ursprüngliche Motivation hierfür war es, die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern. Seit 1974 initiierte die japanische Regierung unterschiedliche FuE-Programme, um neue Energiegewinnungsmethoden und Energiespeicher zu erforschen.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 53)

Ein wesentlicher Meilenstein war die Gründung der „New Energy Development Organisation“ (NEDO) durch das japanische Wirtschaftsministerium „Ministry of Economy, Trade and Industry“ (METI) im Jahr 1980:

> „[Sie] ist seitdem Japans größte öffentliche Organisation für das Management von FuE geworden. 1988 wurde die FuE-Förderung industrieller Technologien hinzugefügt, weshalb die NEDO in „New Energy and Industrial Technology Development Organisation“ umbenannt wurde. NEDO bereitet FuE-Planungen vor, kündigt neue Projekte an, wählt die Projektteilnehmer aus, formt die benötigten Konsortien für die Zusammenarbeit und führt die Projekte durch. […] Die NEDO fördert seitdem die angewandte Forschung der Energietechnologien, wie Brennstoffzellen- und Batterieforschung und erstellt für alle diese Technologien bereits seit langem Roadmaps.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 54)

Mit den industriepolitischen Plänen der NEDO und den in den Batterie-Roadmaps festgelegten Entwicklungszielen sind offen kommunizierte und langfristig orientierte Ziele der japanischen Regierung und Unternehmen bekannt:

> 1. „Erweiterung der Leistungsgrenzen der Lithium-Ionen-Batterien,
> 2. Entwicklung der Post-LIB,
> 3. Beschleunigung der Anwendung von Batteriesystemen,
> 4. Unterstützung der Standardisierung durch internationale Kooperationen,
> 5. Schaffung einer neuen Batterie Community durch nationale Projekte.
>
> Die Ziele der NEDO FuE-Tätigkeiten zielen neben dem Hintergrund des Klimawandels auf die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und den Aufbau einer neuen Batterieindustrie in Japan ab ([NEDO 2011, Seite 24]).“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 56)

Daneben wurde aber auch die Kommerzialisierung der genannten Technologien in konkreten Anwendungen nicht aus den Augen verloren:

> „Die „Next Generation Auto Strategy 2010“, die im April 2010 vom METI angekündigt wurde, […] besteht aus sechs Teilstrategien:
>
> 1. Gesamtstrategie,
> 2. Batterie-Strategie,
> 3. Ressourcen-Strategie,
> 4. Strategie für die Verbesserung der Infrastruktur,
> 5. Gesamtsystem-Strategie,
> 6. Strategie zur internationalen Standardisierung.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 56)

In diesem Rahmen wurden auch vier Roadmaps entwickelt, davon eine zur Batterie-FuE. In den folgenden Jahren implementierte die japanische Regierung zahlreiche Maßnahmen wie z. B. Demonstrationsprojekte, um die Verbreitung der Elektromobilität möglichst ganzheitlich zu gewährleisten: Die Marktnachfrage wurde angekurbelt, die Ladeinfrastruktur verbessert, Aufklärung rund um und Werbung für Elektrofahrzeuge geleistet und letztlich auch die Kundenzufriedenheit evaluiert (Fraunhofer ISI 2013, Seite 57).

Korea

Korea stieg erst deutlich später als Japan in die FuE an großformatigen Energiespeichern für die Elektromobilität ein, vergleichbar mit beispielsweise Deutschland:

> „Im Januar 2009 startete die Regierung in Südkorea wegen der Finanzkrise den sog. „Green New Deal“ mit dem Ziel, Arbeitsplätze zu generieren und die Wirtschaft wieder anzukurbeln. Das [damalige Wirtschaftsministerium] „Ministry of Knowledge Economy“ (MKE) [betrachtete] die Batterien als Schlüsseltechnologie für die Entwicklung umweltfreundlicher Autos und [wollte] damit die eigene Automobilindustrie unterstützen (UNEP 2010[, Seite 15]). Die politischen Fördermaßnahmen bzw. -programme werden von der Zentralregierung bestimmt, wobei sich die Industrien sehr stark am Entscheidungsprozess beteiligen bzw. diesen mit beeinflussen.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 58)

Im Rahmen des „Green New Deal“ wurden Fördermittel im Bereich niedrig CO_2-emittierender Fahrzeuge (engl. „low carbon vehicles“) investiert, in “grüne” Automobile (engl. „green cars“) und wiederaufladbare Batterien (engl. „secondary batteries“). Bis zum Jahr 2015 wollte die koreanische Regierung bis zu zehn Prozent der in Korea eingesetzten PKW mit Elektrofahrzeugen ersetzen, und bis zum Jahr 2020 bis zu zwanzig Prozent mit dem Ziel, einen globalen Marktanteil von zehn Prozent bei Elektrofahrzeugen zu realisieren und damit der viertgrößte Markt für Elektrofahrzeuge weltweit zu werden (Virtanen et al. 2010, Seite 2ff.).

Gerade das MKE ergriff unterschiedliche Maßnahmen:

> „a. Unterstützung von FuE-Tätigkeiten: […] In Hinsicht auf die FuE-Förderung von Energiespeichern [standen LIB] im Fokus […] Nach dem 2010 veröffentlichten Strategieplan des MKE [wollte] das „Rechargeable Battery Development Committee“, bestehend aus Regierung, Forschungsinstituten, Universitäten und Unternehmen, die Fördermittel nun gezielt für die Produktion von mittel- bis großformatigen Batterien und die Material- sowie Komponentenentwicklung einsetzen, um die Positionierung Südkoreas als größtem Batteriehersteller weltweit zu erreichen. […] Hierbei [sollten] mindestens zehn global wettbewerbsfähige Materialhersteller aus Südkorea hervorgehen (MKE 2010). […]
>
> b. Flankierende Maßnahmen zur Batteriefertigungs- und Materialentwicklungsstrategie: Maßnahmen zum Fachkräfteaufbau, der Sicherstellung des Zugriffs auf Rohstoffe zur Batterieproduktion und zur internationalen Zusammenarbeit mit Japan und China bei der Festlegung von Normen und Standards [wurden] ergriffen, um Schwächen Koreas wie den Fachkräftemangel, einen kleinen Binnenmarkt und geringe eigene Rohstoffvorkommen auszugleichen (MKE 2010).[…]
>
> c. Industrienahe Entwicklungsprojekte: Das MKE förderte bis 2013 zwei Projekte. […]
>
> d. Infrastrukturaufbau: […] Neben der Batterietechnologie werden die weitere Entwicklung von Elektromotoren und von Schlüsselkomponenten sowie die Standardisierung der Technologien angestrebt. Ab 2011 will die Regierung auch Maßnahmen zum Ankurbeln der Marktnachfrage durchführen, wie z.B. die Beschaffung von Elektrofahrzeugen seitens des öffentlichen Sektors, die Subventionierung sowie die Steuerbefreiung von privat gekauften Elektrofahrzeugen (Frost & Sullivan 2011).“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 59f.)

Durch die intensive Zusammenarbeit zwischen wenigen, aber sehr großen und finanzstarken Industriekonglomeraten und der koreanischen Regierung hat das Land schnell aufgeholt:

> „Südkorea ist mit einigen wenigen Unternehmen heute das zweitwichtigste Herstellerland von [LIB. Schon im Jahr 2012 hatte] Südkorea einen Gesamtmarktanteil über die Wertschöpfungsstufen der Komponenten und Zellfertigung von etwa 20% bis 30%, obwohl die koreanischen Unternehmen ihre Aktivitäten im Bereich der Batteriefertigung für die Elektromobilität [vor nicht allzu langer Zeit] begonnen haben. Mit der Verbesserung der Produkte, der Produktionsprozesse, der Schaffung von Skaleneffekten und der damit einhergehenden rasanten Entwicklung der südkoreanischen Batterie-Industrie [zeigte sich Südkorea] selbstbewusst [als Verfolger (engl.] „second mover"[)] hinter Japan und [rechnete] damit, in den kommenden Jahren eine Führungsposition in der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge auf- und auszubauen." (Fraunhofer ISI 2013, Seite 61f.)

China

China ist im internationalen Vergleich sehr früh, allerdings erst nach Japan aktiv geworden:

> „China unterstützt die Entwicklung der Energiespeicher und „Power-Batterien" bereits seit 1986. Zu diesem Zeitpunkt hatte das „Ministry of Science and Technology" (MOST) in seinem „863-Program" den Schwerpunkt jedoch lediglich auf Wasserstoff [bzw. Wasserstoffspeichermaterialien (engl. „hydrogen storage materials")] und NiMH-Batterien gelegt. […] In dem 8. Fünfjahresplan ([engl. „Five year plan", Abkürzung FYP]) für den Zeitraum 1991 bis 1995 hatte die chinesische Regierung zum ersten Mal die Entwicklung der LIB ins Auge gefasst. Zwischen 1996 [und] 2000 im dem 9. FYP wurden NiMH-Batterien und LIB gleichzeitig als Schlüsselprojekte definiert. Neben dem „863-Programm" wurde weiterhin im März 1997 das „973-Programm" […] ins Leben gerufen und [befasste] sich mit der Grundlagenforschung der „Green Batteries" und der hierfür relevanten Materialien. Seit dem Jahr 2000 hat die Förderung für das Programm „Elektromobilität" begonnen, da nach mehrjährigen Entwicklungen der chinesischen Automobilindustrie die chinesische Regierung die Entwicklung von EV als Chance sah, eine Aufholjagd gegenüber den führenden Autoherstellern zu starten." (Fraunhofer ISI 2013, Seite 62)

Das MOST verfolgte in seiner FuE-Strategie ursprünglich alle maßgeblichen Antriebskonzepte von Elektrofahrzeugen, nämlich HEV, PHEV/BEV und FCEV. Erst ab April 2012 wurden HEV ausgeschlossen, weil sie aufgrund ihres Beitrags zur Kraftstoffeinsparung nur noch als energieeffiziente Fahrzeuge galten, nicht mehr als Elektrofahrzeuge. Für die verbliebenen „Neueenergiefahrzeuge" (engl. „new energy vehicles", Abkürzung NEV) galt:

> „[Die] entsprechenden Schlüsseltechnologien wie Batterien, Elektromotoren und Leistungselektronik [werden] gezielt gefördert und entwickelt [(MOST 2010, Seite 6; UN DESA 2011, Seite 2f.)]. Darüber hinaus hat die chinesische Regierung auch vor, mit dem Programm „Elektromobilität" die nachhaltigkeitbezogenen Probleme wie Klimawandel, Energieversorgungssicherheit und die (fossile) Ressourcenknappheit zu lösen." (Fraunhofer ISI 2013, Seite 63)

In diesem Sinne wurden im Rahmen des „863-Programms" auch während dem 10. (2001-2005) und dem 11. FYP (2006-2010) die FuE an entsprechenden Technologien unterstützt

(UN DESA 2011, Seite 8), im 12. FYP (2011-2015) die FuE-Schwerpunkte dann mehr in Richtung einer Massenproduktion orientiert:

> „Die Erhöhung der Produktionsfähigkeit und -menge unter einheimischen Produzenten und die Schaffung von Skaleneffekten in der LIB-Produktion sind zentral. Inhalte dieser Schwerpunkte sind die:
>
> 1. Entwicklung von LIB-Modulen mit hoher Energiedichte und LIB-Systemen mit hoher Energiedichte sowie hoher Leistungsdichte, wobei die Schlüsselmaterialien auch in China hergestellt werden sollen,
> 2. Entwicklung von Lösungen zur Massenproduktion und Kostenkontrolle von LIB, LIB-Modulen und LIB-Systemen,
> 3. Entwicklung von Produktionsanlagen für die Massenproduktion von LIB,
> 4. Forschung bzgl. Batterie- und Systemtests,
> 5. Entwicklung von Recyclingtechnologien.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 63)

Maßgeblich ist ein spezifischer Entscheidungsfindungsprozess in China:

> „Ein zentrales Merkmal für China ist hierbei aber ein stattfindender Top-Down-Entscheidungsprozess der Regierung. Der State Council, die Exekutive, legt den Rahmen fest, in dem die „National Development and Reform Commission“ (NDRC) die Weichen für die als strategisch wichtig identifizierten Technologien und Industriebranchen stellt.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 63)

Die Förderung von z. B. FuE übernehmen dann mehrere Ministerien und Institutionen:

> „Neben dem MOST, die zuständig für die FuE-Tätigkeiten entlang der Wertschöpfungskette der Elektromobilität ist, spielt das „Ministry of Industry and Information Technology“ (MIIT) auch eine ausschlaggebende Rolle beim Programm „Elektromobilität“ [(Fraunhofer ISI 2012-4, Seite 2ff.)]. Das MIIT ist zuständig für die relevante Industriepolitik zur Vorbereitung der Marktrahmenbedingungen. […] Das MIIT arbeitet auch eng mit den in der Branche aktiven Unternehmen zusammen, wie z.B. über die „China Industrial Association of Power Sources“ [(CIAPS)]. Weitere relevante Behörden sind das „Ministry of Finance“ (MOF), die „National Standardization Administration of China“ (SAC) und die lokalen Regierungen bzw. lokalen Finanzbehörden. Aufgrund der zahlreichen involvierten Institutionen zeigt sich oftmals eine mangelhafte Effizienz der politischen Koordination und z.T. sogar Uneinigkeit, wie die Elektromobilität im Einzelnen gefördert werden soll.“

Deshalb ist Abstimmungsbedarf oft an der Tagesordnung und benötigt Zeit, z. B. bei der Frage, wie viele Elektrofahrzeuge bis 2015 und 2020 auf den Straßen befindlich sein sollen. Auf der anderen Seite zeigte z. B. das „Ten Cities, Thousand Vehicles“-Programm von MOST, MIIT, MOF sowie anderen Organisationen und lokalen Regierungen, welche Durchschlagskraft ein Verbund all der beteiligten Institutionen erreichen kann (Stanford Social Innovation Review 2013, Seite 53ff.). In den untergeordneten Pilotprojekten werden z. B. Elektrofahrzeuge zu Demonstrationszwecken im öffentlichen wie privaten Alltagsgeschehen eingesetzt und Ladeinfrastruktur aufgebaut. Insgesamt herrscht in China großer Optimismus:

„Die Erfolgschancen für die Entwicklung der EV werden ebenfalls als gut eingeschätzt, da bereits heute 140 Millionen elektrisch betriebene Zweiräder in China vorhanden sind. Neben dem positiven Skaleneffekt ist die Beschleunigung der technologischen Lernkurven erheblich. Dabei ist es für China unerheblich, dass die funktionalen Spezifikationen unterhalb der Zielvorgaben Deutschlands bleiben, denn die Elemente der positiven Skaleneffekte und die damit zwangsläufig forcierte Standardisierung liefern eine gute Grundlage für zukünftige Entwicklungen ([NPE 2010-2, Seite 44]).“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 66)

USA

In den USA wurden Energiespeicher für die Elektromobilität ungefähr zeitgleich wie in Korea und Deutschland wieder interessant:

„Unter der [Obama-Administration] gewann die „Clean Energy Economy“ in den USA erneut an Bedeutung. Präsident Obama legte das Ziel fest, bis 2015 eine Million [Elektrofahrzeuge auf die Straßen der USA] zu bringen. Im Februar 2009 unterzeichnete [er] das Konjunkturpaket „American Recovery and Reinvestment Act of 2009 (ARRA)“ […]. Das Budget des ARRA für Klima- und Energieprogramme [verteilte] sich zwar auf [mehrere] Ministerien wie das U.S. Department of Transportation, das [U.S. Department of Energy (Abkürzung DOE) war] jedoch für den größten Teil der energiebezogenen Investitionen zuständig [(Pew Center 2011, Seite 2ff.)].“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 68)

Zu den Zielen des DoE ist festzuhalten:

„Das DOE [setzte] die FuE-Tätigkeiten für die [Elektrofahrzeug-Technologien], insbesondere für das Vorantreiben der Produktion von Batterien fort. Das Hauptziel [war] es, eine hohe Marktdurchdringung zu schaffen. [Diese] hängt wiederum stark von den Kosten und der Leistung der Batterien ab. Daher [beinhalteten] die Forschungsschwerpunkte […] die Reduzierung der Kosten und Verbesserung der Leistungsparameter der LIB […].

Innerhalb des DOE sind drei Abteilungen für die Elektromobilität von Bedeutung. Die erste ist das „Office of Science/Basic [Energy] Sciences“ (BES), das für [Grundlagenforschung] wie Nanotechnologie, Charakterisierungsmethoden, Chemie-/Materialwissenschaften und Schnittstellentechnologien zuständig ist. Die zweite ist die 2007 gegründete „Advanced Research Projects Agency-Energy“ (ARPA-E). Die ARPA-E […] fördert neue und revolutionäre Forschungsansätze, die großes Potenzial und signifikante kommerzielle Effekte haben könnten, aber auch ein hohes [Erfolgsrisiko] mit sich bringen. Hierin wird die Batterieforschung […] gefördert. Die letzte ist das „Office of Electricity/Energy Efficiency & Renewable Energy“ (EERE), welches […] die FuE-Tätigkeiten zu Batterien fördert, um die Marktdurchdringung der EV zu ermöglichen. Von Bedeutung ist [unter] EERE das „Vehicle Technology Program“ (VTP). Das Programm zielt darauf ab, durch die Entwicklung der LIB der dritten Generation und die Verbesserung der Produktionsprozesse, die Kosten der Batterien weiter zu senken (DOE 2011, Seite 5ff.).“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 68f.)

Insgesamt wurden zahlreiche Milliarden USD durch die US-Regierung investiert:

> „Im Kontext der Elektromobilität stellte das DOE unter ARRA bislang insgesamt 2,4 Mrd. USD zur Unterstützung der Entwicklung von Elektrofahrzeugen bereit. Es werden 48 von der Industrie beantragte Projekte in 20 Bundesstaaten gefördert, um die Entwicklung dieser Branche in Fahrt zu bringen. Darunter werden 1,5 Mrd. USD für Forschung, Entwicklung, Produktion und Recycling von Batterien bereitgestellt. Die konkreten Ziele sind die Verdoppelung der Energiedichte und eine Kostensenkung um 70% von Batterien für PHEV und BEV mit hoher Reichweite bis 2015. Bis dahin sollen eine Million PHEV und BEV auf Amerikas Straßen fahren.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 72)

Insbesondere die Akteure im TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität wurden schon zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung ihrer Industrie stark unterstützt, um möglichst schnell möglichst große Marktanteile zu sichern:

> „Die USA setzen somit auf den Aufbau einer amerikanischen Wertschöpfungskette für LIB und versprechen sich über 7.000 direkte und indirekte neue Jobs durch eine [LIB-Industrie für Elektrofahrzeuge] (CGGC 2010[, Seite 7ff.])." (Fraunhofer ISI 2013, Seite 72)

Auch die FuE zu Komponenten für den Antriebsstrang wurde gefördert, und Fördermittel für die Entwicklung mehrerer tausend PHEV für Demonstrationszwecke, die Installation von Ladestationen, und die Ausbildung von Personal für die Elektromobilität bereitgestellt (Congressional Research Service 2013, Seite 15).

Deutschland

Auch in Deutschland nahm die Bundesregierung Einfluss auf die Suchrichtung, allerdings erst mit Korea und den USA, als Japan und China bereits relativ weit enteilt waren. Mit dem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ aus dem Jahr 2009 wurde das ambitionierte Ziel der Bundesregierung bekannt, eine Million Elektrofahrzeuge sollten bis zum Jahr 2020 auf Deutschlands Straßen fahren (Bundesregierung 2009, Seite 2). Der Entscheidungsfindungsprozess in Deutschland verläuft anders als z. B. in China:

> „Im sogenannten Ressortkreis Elektromobilität, dessen Aufgabe die Fortschreibung und Begleitung der Umsetzung des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität war, erfolgte eine übergreifende Kooperation und Koordination von im Wesentlichen vier Bundesministerien, welche die Verwirklichung der Elektromobilität nach wie vor maßgeblich fördern: Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit (BMU, heute Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMU), das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS; heute Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, BMVI) sowie das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi; heute Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). Daneben gibt es die sogenannte Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), welche von BMVBS und BMWi Anfang 2010 eingerichtet wurde, um die Aufgaben der Bundesregierung im Bereich Elektromobilität zu bündeln und zu koordinieren [(DLR 2010)].“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 74)

In den folgenden Jahren entstand die deutsche Förderung von FuE:

„Insgesamt hat die deutsche Bundesregierung in den letzten Jahren ausgehend von den im Rahmen des Konjunkturpaketes II (BMVBS 2009, Seite 3ff.) in den Jahren 2009 und 2010 bereitgestellten Mitteln […] schon eine Vielzahl politischer Fördermaßnahmen für die Entwicklung und Verwirklichung der Elektromobilität in Deutschland etabliert. […]

Neben der Grundlagenforschung durch die DFG im Bereich der Batterien zählen die Förderung des BMBF im Rahmen der Innovationsallianz „LIB 2015“ und des Vorhabens Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität STROM zu den zentralen FuE-Fördermaßnahmen der Lithium-Ionen-Batterien der dritten Generation sowie Post-LIB für die Elektromobilität. Auf der Basis der Fördermaßnahmen und die neue Aufmerksamkeit für die Batterieforschung in den vergangenen Jahren konnten universitäre/akademische ([z. B. Batterie-Verbünde] Nord und Süd) aber auch industrielle (z.B. [KLiB]) Verbünde und Netzwerke initiiert werden.“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 75)

Frankreich

Praktisch zeitgleich mit Deutschland begann auch Frankreich, aktiv zu werden:

„Frankreich setzt sehr stark auf regierungsgestützte Marktanreizprogramme und einen massiv subventionierten Infrastrukturausbau für die Elektromobilität. Die französische Regierung hat am 09.02.2009 den „Pacte Automobile“ veröffentlicht, welcher Ziele und konkrete Zahlen zu den geplanten Fördergeldern enthält [(MRP 2010)].“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 77)

Hier wurde z. B. die Entwicklung „dekarbonisierter Fahrzeuge“ (ohne Verbrennungsmotor) bzw. von Elektrofahrzeug-Prototypen und -Vorführmodellen anvisiert. Dazu wurde das französische Ministerium für nachhaltige Entwicklung (frz. „Ministère Français de l'Ecologie et du Développement Durable“, Abkürzung MEDD) aktiv:

„Das Ministerium […] hat am 01.10.2009 einen nationalen Plan mit 14 konkreten Aktionspunkten erstellt, der die Entwicklung von BEV und PHEV vorantreiben soll (Ambafrance 2011[, Seite 2f.]).“ (Fraunhofer ISI 2013, Seite 77)

Die Liste umfasste folgende Aspekte:

1. Beginn der Probephase für die Ladeinfrastruktur im Jahr 2010,
2. Integration der dekarbonisierten Fahrzeuge in die neuen Mobilitätslösungen,
3. Erschaffung eines Batteriesektors,
4. Großeinkauf von Elektrofahrz. durch Unternehmen und Verwaltung bis 2015,
5. Gewährung einer Kaufprämie von 5.000 Euro beim Kauf eines Fahrz. bis 2012,
6. Eine Standardsteckdose zum Aufladen des Fahrzeugs,
7. Ladesteckdosen in neuen Wohngebäuden,
8. Einräumung eines „Zugangsrechts“ für Besitzer von Eigentumswohnungen,
9. Ladestellen für das Fahrz. am Arbeitsplatz und in öffentlichen Einrichtungen,
10. Standardisierung einer europaweit genormten Steckdose,
11. Unterstützung der Gemeinden bei der Einrichtung der öffentl. Ladeinfrastruktur,

12. Org. der Entfaltung des Stromnetzes (für ein flächendeckendes Angebot),
13. Sicherstellung von Prod. nichtfossiler Energie für dekarbonisierte Fahrzeuge,
14. Einrichtung eines „2nd life“ für die Batterie und ihre Komponenten.

(MDE 2012-1)

Im Jahr 2012 wurde dieser nationale Plan um einen „Automobilplan“ ergänzt, in dem u. a. auch Kaufanreize für potenzielle Kunden sowie eine bessere Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen des Sektors sowie mit den örtlichen Behörden angeraten werden (MDE 2012-2). Konkret sollten sich im Jahr 2015 mehr als 100.000 Elektrofahrzeuge auf Frankreichs Straßen befinden, und bis zum Jahr 2020 sogar zwei Millionen Elektrofahrzeuge. Sowohl die geringen Verkaufszahlen insgesamt als auch der geringe Anteil privater Käufer deuteten aber in den letzten Jahren schon darauf hin, dass für eine weitere Verbreitung von Elektrofahrzeugen zusätzliche bzw. intensivere Maßnahmen notwendig sind.

5.1.1.2.2 Anzahl von wissenschaftlichen Artikeln in Veröffentlichungen

Das Ziel des Indikators sowie die Vorgehensweise zur Messung wie folgt:

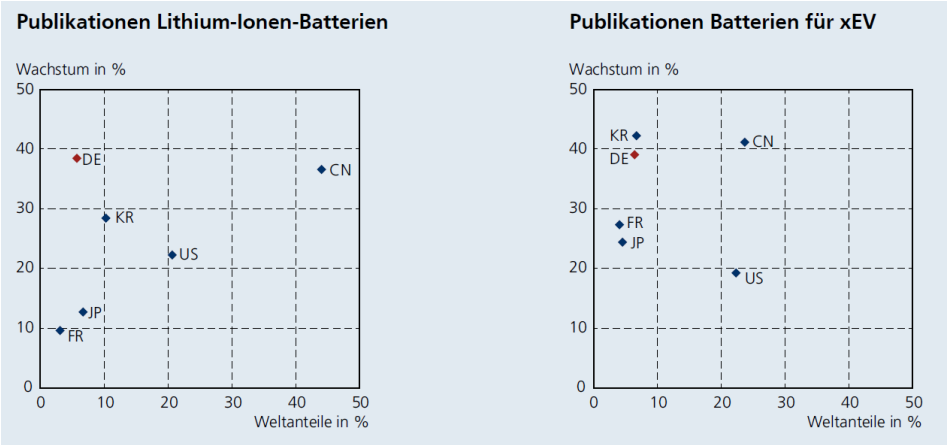
> „Ziel ist es, die Wissensbasis eines Landes als Hinweis auf die langfristig zu erwartende Innovationsfähigkeit zu messen. […] Gemessen werden für den Zeitraum der letzten fünf Jahre (2011–2015) der Weltanteil und das Wachstum der wissenschaftlichen Arbeiten (Publikationen) der Länder im Vergleich […]. Es werden Suchstrategien zu Batterien für elektromobile Anwendungen (xEV) sowie im Bereich der Lithium-Ionen-Batterieforschung (LIB) als Schlüsseltechnologie für Elektrofahrzeuge betrachtet. Damit werden sowohl Batteriematerial, -komponenten und -zellforschung als auch die Forschung im Bereich der Fahrzeugintegration der Batterien berücksichtigt.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 54)

Im Vergleich der Ergebnisse zeigen sich interessante Unterschiede (Abbildung 40):

> „Der Ländervergleich zeigt anhand der Weltanteile, dass China und die USA in den vergangenen fünf Jahren eine vergleichsweise große Wissensbasis aufgebaut haben, welche im Fall Chinas weiterhin dynamisch wächst (rd. 40 Prozent jährliches Wachstum der Publikationen). Deutschland baut weiterhin Know-how in der Batterieforschung auf (ebenfalls rd. 40 Prozent Wachstum, allerdings im Vergleich zu China auf geringerem Niveau). Nach China und den USA liegt Deutschland insgesamt mit Korea und Japan auf gleichem Niveau gemessen an den Weltanteilen. Frankreich ist Schlusslicht unter den sechs Ländern.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 54)

Keine der sechs analysierten Nationen betreibt also keine FuE an elektrochemischen Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität. Alle versuchen stattdessen, die eigene Position im Rennen um Leitanbieterschaft und Leitmarkt zu verbessern. In dieser Hinsicht ist die Elektrifizierung der individuellen Mobilität im Sinne der PHEV und BEV als eine Art „Megatrend“ für die Zukunft nicht nur für die großen Industriestaaten nicht mehr zu ignorieren.

Abbildung 40: Die Publikationen zu LIB im Allgemeinen (links) und zu Batterien für Elektrofahrzeuge im Besonderen (rechts).



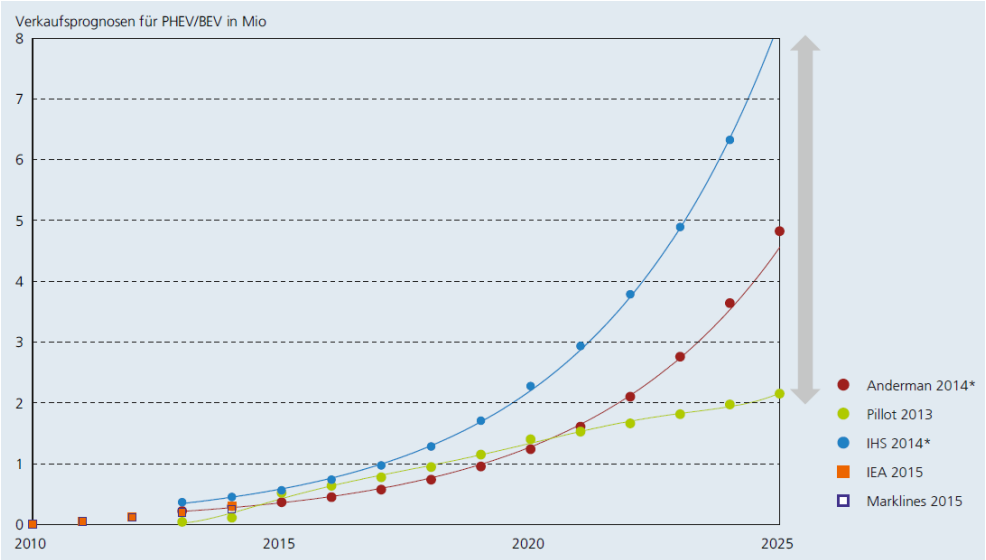
Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 54.

5.1.1.2.3 Wachstumspotenzial in öffentlich verfügbaren Marktstudien

Das Wachstumspotenzial für PHEV und BEV ist bereits weithin, in zahlreichen öffentlich verfügbaren Marktstudien dokumentiert worden:

> „Prognosen für die Entwicklung der weltweiten BEV- und PHEV-Verkäufe bis 2025 liegen gegenüber den rund 0,5 Millionen im Jahr 2015 bei 1 bis 2 Millionen oder mehr in 2020 und 2 bis 8 Millionen in 2025 (Abbildung [41]).“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 18)

Abbildung 41: Weltweite Verkaufsprognosen für PHEV/BEV in Millionen bis 2025.[38]



Quelle: Fraunhofer ISI 2015, Seite 18.

[38] „Anderman 2014“ ist Anderman 2013, „Pillot 2013“ ist Avicenne 2013, „Marklines 2015“ ist MarkLines 2016. // * Werte für 2015 bis 2020 wurden fortgeschrieben.

Unabhängig von der breiten Streuung dieser Prognosen ist ein großes Wachstumspotenzial gegeben, seine genaue Ausprägung allerdings von zahlreichen Annahmen bzgl. Faktoren wie z. B. Anreizen aus der Entwicklung von Faktor-/Produktpreisen (siehe Kapitel 5.1.1.2.4) abhängig, die in der vorliegenden Dissertation ebenfalls als Indikatoren untersucht werden.

Als Markttreiber von Seiten der Gesellschaft bzw. Politik gelten z. B. die strenge CO_2-Umweltregulierung sowie das Ansinnen zahlreicher Länder, die eigene Energiesicherheit sicherzustellen und insbesondere Erdöl-Importe zu senken (Anderman 2013, Seite 132ff.). Auf der Kundenseite steht die Einsparung von Kraftstoffausgaben im Vordergrund, dazu kommt die attraktivere Fahrweise elektrischer Antriebe. Unternehmen wiederum achten auf ihre industrielle Wettbewerbsfähigkeit in einer globalen Wirtschaft sowie auf ihre Reputation. Als Marktrisiken gelten die Fortschritte in FuE z. B. an Dieselfahrzeugen, der abfallende Preis von Erdöl sowie der Rückgang von Bedenken über die Energiesicherheit, die Entspannung der Umweltregulierung durch eher kurzfristig planende Regierungen sowie Herausforderungen für die FuE an Energiespeichern für die Elektromobilität, um Leistungsparameter wie eine lange Lebensdauer, hohe Sicherheit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

Je nachdem, wie optimistisch oder pessimistisch die Herausgeber einer Marktstudie die genannten und weitere Annahmen interpretieren, fällt ihre weltweite Verkaufsprognose für PHEV und BEV im Allgemeinen größer oder kleiner aus. Allerdings bleibt festzuhalten, dass sich in den letzten Jahren eine zunehmende Anzahl von Automobilherstellern in allen sechs im Rahmen der vorliegenden Dissertation analysierten Ländern dahingehend positioniert hat, welche Fahrzeugmodelle mit einem mehr oder weniger elektrifizierten Antriebsstrang sie auf den Markt bringen möchten und wie viele Fahrzeuge sie davon verkaufen möchten. Der oben angesprochene „Megatrend“ der Elektromobilität ist also schon längst in Bewegung und beginnt die Märkte weltweit nachhaltig umzuwälzen.

5.1.1.2.4 Anreize aus der Entwicklung von Faktor-/Produktpreisen

Rohöl, Benzin und Strom

Bevor die Entwicklung von Faktor-/Produktpreisen hinsichtlich der elektrochemischen Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität behandelt wird, muss an dieser Stelle auf den Preis eines ganz anderen Rohstoffs eingegangen werden, dessen günstige Verfügbarkeit den erfolgreichen Markthochlauf der Elektromobilität außerordentlich beeinflusst: Der Preis von Rohöl. Der Verbrennungsmotor hatte sich besonders in den Anfangstagen des Automobils auch deshalb so unaufhaltsam durchgesetzt, weil die benötigten (fossilen) Kraftstoffe in immer größerem Maße und damit sehr billig verfügbar wurden. Auf der anderen Seite zeigten insbesondere die politisch begründeten Ölkrisen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, dass immer in Phasen eines deutlich erhöhten Ölpreises nicht nur verstärkt über Maßnahmen nachgedacht wurde, den Energieverbrauch einzelner Staates zu senken, sondern auch über Wege, sowohl in der individuellen als auch in der massentauglichen Mobilität auf andere Energieträger auszuweichen. Seit der Jahrtausendwende stieg der Weltmarktpreis für Rohöl mit nur einer wesentlichen Ausnahme, der Weltwirtschaftskrise 2008 (siehe Abbildung 42).

Grundsätzlich ist zur Entwicklung des Ölpreises und seine Einwirkung auf die Entwicklung der Elektromobilität anzumerken, dass mit steigendem Preis auch der Preis für Mobilität allgemein steigt. Im Allgemeinen gilt also, dass je höher der Ölpreis ausfällt, desto intensiver auch an der FuE von alternativen Antrieben gearbeitet wird. Weil nicht damit zu rechnen ist, dass sich diese generelle Entwicklung unabhängig von kleineren Preisabsenkungen umdrehen wird, geht auch die Suche nach möglichen Alternativen weiter. Es ist zwar zuhöchst umstritten, wann die der Menschheit auch im Zuge des technischen Fortschritts noch zunehmend zugänglichen Rohölvorkommen endgültig ausgeschöpft sein werden. Die Zahl derer, welche bezweifeln, dass die Menschheit aber bereits über die Hälfte des zur Verfügung stehenden Rohöls erschöpft hat, ist jedoch geringer. Und daran, dass der Weltmarktpreis für das zunehmend knappere Gut Rohöl bis zum Ende hin immer weiter ansteigen wird, zweifelt praktisch niemand.

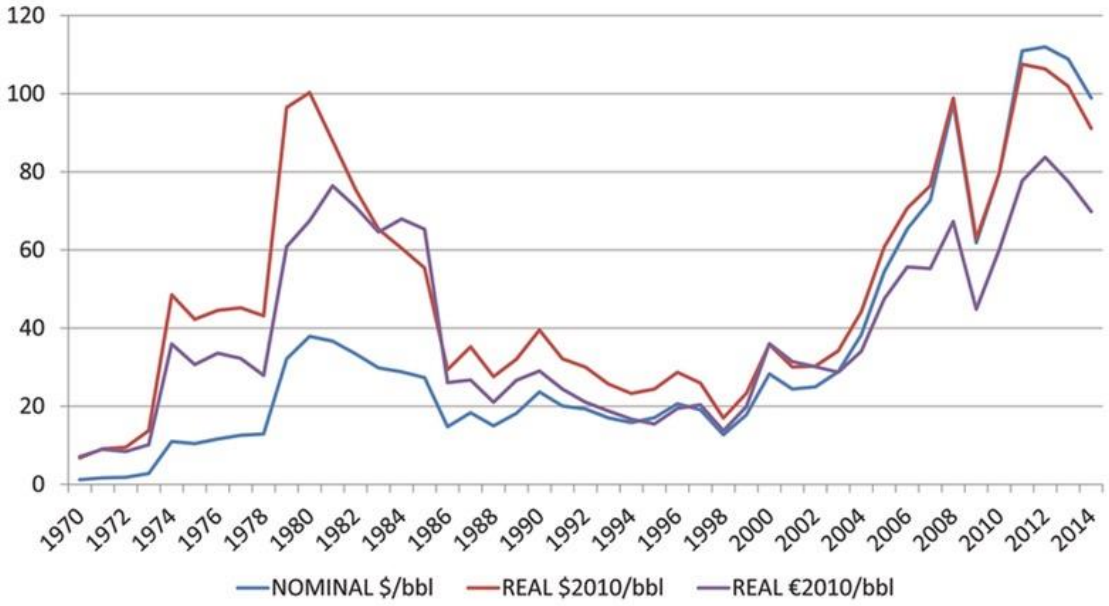
Im Sommer 2014 allerdings begann ein ebenfalls politisch begründeter Trend, der völlig konträr zu allen üblicherweise getroffenen (und oben geschilderten Annahmen) steht: Der Ölpreis sank von etwa 110 USD pro Barrel auf unter 40 USD pro Barrel zum Jahreswechsel auf 2016 und steht aktuell (Stand: Mai 2017) bei knapp mehr als 50 USD pro Barrel (Abbildung 43).

Weil diese Preisentwicklung zeitlich mit den noch recht niedrigen Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen weltweit zusammenfällt, werden die beiden Entwicklungen gerne in einen einzigen Zusammenhang gebracht. Der Zusammenhang ist jedoch nicht vorhanden: Elektrofahrzeuge sind aktuell im Vergleich zu ähnlichen Modellen mit Verbrennungsmotor noch um so viel teurer, dass sie nicht gerade für günstige Mobilität stehen – und wenn ein Kunde dann doch für viel Geld zugreift, steht die Ersparnis an der Ladesäule eher nicht im Vordergrund (The Economist 2015). Um Elektrofahrzeuge massenmarkttauglich werden zu lassen, dürfte eher ein preissenkender Durchbruch z. B. in der Energiespeichertechnologie notwendig sein. Eine Analyse der Ölpreisentwicklung und von Verkaufszahlen von PHEV zwischen Dezember 2010 und November 2014 kam ebenfalls auf das Ergebnis, dass bis dato keinerlei Korrelation vorlag (Plug In America 2014). Weil interessanterweise die Verkaufszahlen von HEV zurückgingen, während die Verkaufszahlen von BEV gleichzeitig anstiegen, lässt sich zumindest feststellen, dass in einem sehr kleinen Nischenmarkt nicht zu viel in kleine Stückzahlen – fallend oder steigend – hineininterpretiert werden sollte (Slate 2015).

Die Preisentwicklung von Rohöl und insbesondere ihre Auswirkung auf die Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen werden aber in jedem Fall auch weiterhin beobachtet werden müssen, zuletzt sind die Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen aber deutlich angestiegen, obwohl der Rohölpreis niedrig geblieben ist. Dieses (zunehmend theoretische) Hemmnis für Elektromobilität wird nach wie vor genannt, wenn die Chancen der Elektromobilität diskutiert werden. Weil aber zu erwarten ist, dass der Rohölpreis wieder steigt, werden einzelne Staaten oder Staatsgemeinschaften als Ganzes nicht einfach aufhören, auch unabhängig vom weit verbreiteten Wunsch nach CO_2-Vermeidung über Alternativen nachzudenken. Es gibt dementsprechend nur wenige verlässliche Angaben zu einem möglichst exakten Preis für ein Barrel Rohöl, ab dem es sich für einen Staat lohnt, in die Elektromobilität zu investieren, oder bis zu dem es sich eben nicht mehr lohnt. Die übergreifende CO_2-Problematik wird ohnehin bleiben,

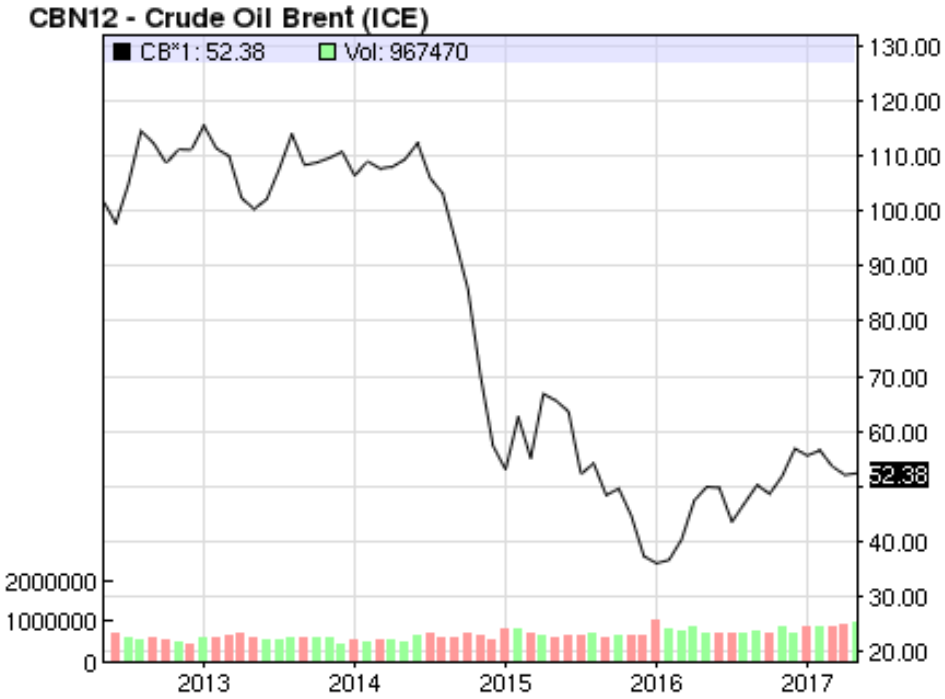
und zunehmend mehr Menschen zum Umdenken bewegen bzw. umweltbewusste Menschen veranlassen, ihren Rohölverbrauch zu senken.

Abbildung 42: Nominale und reale Entwicklung des Ölpreises von 1970 bis 2015.



Quelle: et-energie online 2015.

Abbildung 43: Preisentwicklung für Brent-Rohöl in den letzten fünf Jahren.



Quelle: NASDAQ OMX 2016.

Am Beispiel des Benzinpreises in Deutschland ist somit beispielhaft festzuhalten:

> „Der Benzinpreis liegt heute/2015 bei 1,30-1,60 € pro Liter. Liegt er auch langfristig noch in diesem Bereich, könnte sich dieser Aspekt hemmend auf die Elektromobilität auswirken, da besonders im Kraftstoffverbrauch geringe Fahrzeuge ein sehr günstiges und evtl. mit dem Tanken von Strom vergleichbares Preisniveau hätten […]. Steigt der Benzinpreis über 1,80 € pro Liter und ggf. noch viel höher, so würde sich das förderlich auswirken, da Elektrofahrzeuge sich über ihre Lebensdauer hinweg immer besser rechnen und dies bereits bei den Kosten für das Tanken (Benzin vs. Strom) direkt spürbar wird.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 27)

Interessant bleibt allerdings auch die Frage, wie die deutsche Bundesregierung reagieren wird, wenn durch einen breiten Markthochlauf der Elektromobilität eine große Senkung der Staatseinnahmen durch die Mineralölsteuer entstehen und ein Loch in den Bundeshaushalt reißen würden. Die möglichen Szenarien umfassen auch eine Energiesteuer auf die an Ladestationen von Elektrofahrzeugen eingespeicherte Energie. Das ist heute noch kein Thema:

> „Der Strompreis liegt heute/2015 auf einem Mittelwert von 0,29 € pro Kilowattstunde für Privathaushalte. Bliebe er auch langfristig auf diesem Niveau, könnte sich dieser Aspekt förderlich auf die Elektromobilität auswirken, steigt er über 0,30 € pro Kilowattstunde bzw. deutlich höher, könnte sich dies hemmend auswirken […]. Allerdings wird sich der Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen zukünftig noch stark verbessern, so dass es wahrscheinlich ist, dass selbst bei gleichbleibenden Benzinpreisen und steigenden Strompreisen Elektrofahrzeuge bzgl. der Kosten für 100 Kilometer Reichweite immer besser abschneiden werden als Benziner.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 27)

Rohstoffe für Batteriezellen

Weil die Kosten großformatiger Batteriesysteme einen wesentlichen Teil des Preises eines Elektrofahrzeuges ausmachen, spielt der Produktpreis von Batteriezellen bzw. seine Senkung die mit Abstand größte Rolle für den erfolgreichen Markthochlauf der Elektromobilität. Weil die Batterien bzw. elektrochemischen Energiespeichertechnologien aus zahlreichen Einzelmaterialien bestehen, sind die Faktorpreise dieser Rohstoffe entscheidend dafür, welche Batterietechnologie sich mittel- bzw. langfristig und vor allem im Massenmarkt durchsetzen wird. Die Preisentwicklung geht dabei damit einher, wie lange die Ressourcen und Reserven der jeweiligen Rohstoffe vorhanden sein werden.

Einer dieser Rohstoffe ist Lithium. Die Situation bzgl. dieses Rohstoffs sieht wie folgt aus:

> „Die Schlussfolgerung ist, dass selbst unter extremen Annahmen in den nächsten vier Jahrzehnten nicht mit einer Knappheit der Lithium-Reserven zu rechnen ist. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Lithium-Reserven sich auf wenige Länder fokussieren und einige wichtige davon derzeit nicht zu den geopolitisch stabilen Regionen zu zählen sind (z. B. Bolivien). Auch wird beim Abbau von Lithium in bislang weitgehend unberührte Ökosysteme, beispielsweise die Salzseen in Südamerika und China, eingegriffen.“ (Fraunhofer ISI 2009-1, Seite 1f.)

Während also eine große theoretisch verfügbare Menge an Lithium dafür sorgen sollte, dass der Rohstoff zu günstigen Preisen verfügbar bleibt, könnten politische Risiken oder die Einpreisung des Umweltschutzes dafür sorgen, dass der Lithium-Preis steigt. Allgemein ist Lithium allerdings recht günstig, eine Tonne Lithiumcarbonat-Äquivalent kostete in den Jahren 2012 und 2013 zwischen 5.500 und 5.800 USD.[39]

Ein weiterer wichtiger Rohstoff ist Kupfer:

> „Auf Basis des Kupferinhalts der derzeitigen Kupfererzproduktion liegt die statische Reichweite der Reserven bei knapp über 30 Jahren, die der Reservenbasis bei knapp über 60 Jahren." (Fraunhofer ISI 2009-2, Seite 244)

Weil sich der Preisanstieg von Kupfer und die Ausweitung seiner Reserven in etwa die Waage halten, blieb die Reichweitenprognose seit Jahren in etwa konstant. Es zeigt sich aber auch, dass die Kupfernachfrage durch die Verbreitung von Elektrofahrzeugen eher gering beeinflusst wird (Fraunhofer ISI 2010, Seite 37). Die Vorkommen sind zudem auf mehrere Länder verteilt, was z. B. das geopolitische Risiko begrenzt.

Auch Kobalt wird in LIB verwendet:

> „Die Weltproduktion an raffiniertem Kobalt betrug 67.500 t im Jahr 2006. Bezogen auf diese Produktionsmenge errechnet sich eine statische Reichweite der Reserven von gut 100 Jahren und eine Ressourcenreichweite von 220 Jahren." (Fraunhofer ISI 2009-2, Seite 258)

Weil der mit Abstand größte Teil des Kobalts allerdings in einer politisch instabilen Region abgebaut wird, ist der Rohstoff knapp und damit teuer, weshalb sich Recycling prinzipiell empfiehlt (Fraunhofer ISI 2009-2, Seite 259). Die Rückgewinnung von Kobalt aus elektrochemischen Energiespeichertechnologien ist allerdings aufwändig und teuer, weshalb in der FuE schon seit Jahren versucht wird, den Anteil von Kobalt nach und nach zu reduzieren. Die Nachfrage dürfte besonders im Falle eines erfolgreichen Markthochlaufes der Elektromobilität aber trotzdem noch deutlich zunehmen.

Die Versorgungssituation bei Titan sieht mit einer Reservenreichweite von neunzig Jahren bei sehr großen Ressourcen im Allgemeinen nicht schlecht aus (Fraunhofer ISI 2009-2, Seite 265). Auch Titan gilt aber u. a. aufgrund des Produktionsprozesses als teures Metall.

Die sogenannten Seltenen Erden wie z. B. Scandium, Yttrium oder Neodym weisen eine sehr gute Versorgungssituation auf: Die Reserven und Ressourcen sind dabei nicht nur sehr groß, sondern auch weit über die Erde verteilt (Fraunhofer ISI 2009-2, Seite 303ff.). Weil China aber das mit deutlichem Abstand größte Förderland ist, hat es die Möglichkeit, den Zugang zu den Seltenen Erden für andere Länder künstlich zu verknappen, was auch zu hohen Preisanstiegen führen kann.

---

[39] Weil es keinen börsennotierten Handelsplatz für Lithium-Chemikalien gibt, werden die Preise immer wieder neu in der Verhandlung zwischen Produzenten und Kunden aufbauend auf den kundenspezifischen Anforderungen festgelegt (Orocobre 2012).

Auch hinsichtlich Rohstoffen wie Blei, Eisen und Nickel ergibt sich selbst nach einem teilweise hohen Rückgang seit dem Jahr 1972 im Vergleich mit dem Jahr 2004 noch eine relativ hohe Reichweite in Jahren für die Reserven und insbesondere die Ressourcen (RWI Essen 2006, Seite 17). Die hohen Preise bzw. temporäre Preisanstiege für Kupfer und Nickel geben Anlass zur Sorge über potentielle Versorgungsengpässe, der allerdings die Grundlage fehlt.

Weil beispielsweise nickelbasierte Energiespeicherkonzepte (siehe Kapitel 3.3.4.3.2) LIB allerdings schon heute im Kostenvergleich unterliegen und Kobalt als Bestandteil von Kathodenmaterialien der ersten drei Generationen von LIB eigentlich zu teuer ist (siehe Kapitel 3.3.4.2), wird der Einsatz dieser Rohstoffe immer weiter reduziert.

Hinsichtlich der Produktion von und dem Handel mit Rohstoffen sind die sechs im Rahmen dieser Innovationssystem-Analyse betrachteten Nationen unterschiedlich aufgestellt:

> „Ziel [des Indikators] ist es, die Abhängigkeit des Heimatmarktes vom Außenhandel aufzuzeigen, als Hinweis auf das Potenzial, sich am Anfang der Wertschöpfungskette der LIB beteiligen zu können. [Dazu] werden mit den Rohstoffen Kobalt, Lithium, Mangan und Nickel die wichtigsten LIB-spezifischen Rohstoffe analysiert. Diese machen knapp 50 Prozent der für die LIB-Produktion notwendigen Kathodenmaterialien aus. Andere Rohmaterialien wie Eisen werden vernachlässigt. Zur Analyse der Rohstoffproduktion werden die Minenproduktionen im eigenen Land […] für die Jahre 2011 bis 2013 [sowie] die Beteiligungen an ausländischen Minen bzw. Raffinerien angegeben in Produktionsmengen betrachtet. […] Hohe Produktionsmengen werden hierbei positiv bewertet. Bei der Analyse des Rohstoffhandels werden die Importe der zu untersuchenden Länder und mögliche Exporte dieser in LiB-produzierende Länder […] zusammengestellt. Dazu werden die spezifischen Handelscodes von CoO_2, Li_2CO_3 und LiOH, MnO und MnO_2 sowie $NiCl_2$ und Ni_2O_3 bezgl. der Rohstoffäquivalente zu den Ländern aus der Datenbank ausgewertet. Um anthropogene Rohstoffbestände auszuschließen, werden gemittelte Werte über die Jahre 2013 bis 2015 verwendet. Dabei wird ein niedriger Importwert gut bewertet, während beim Export hohe Werte gut bewertet werden. Dies drückt eine höhere Beteiligungswahrscheinlichkeit an der LiB-Wertschöpfungskette aus. Darauf aufbauend wird die Handelspartner-Konzentration untersucht und mit dem Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) illustriert. Ein hoher Wert ist nun negativ, da mit monopolistischen Partnerschaften Risiken verbunden sind.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 47)

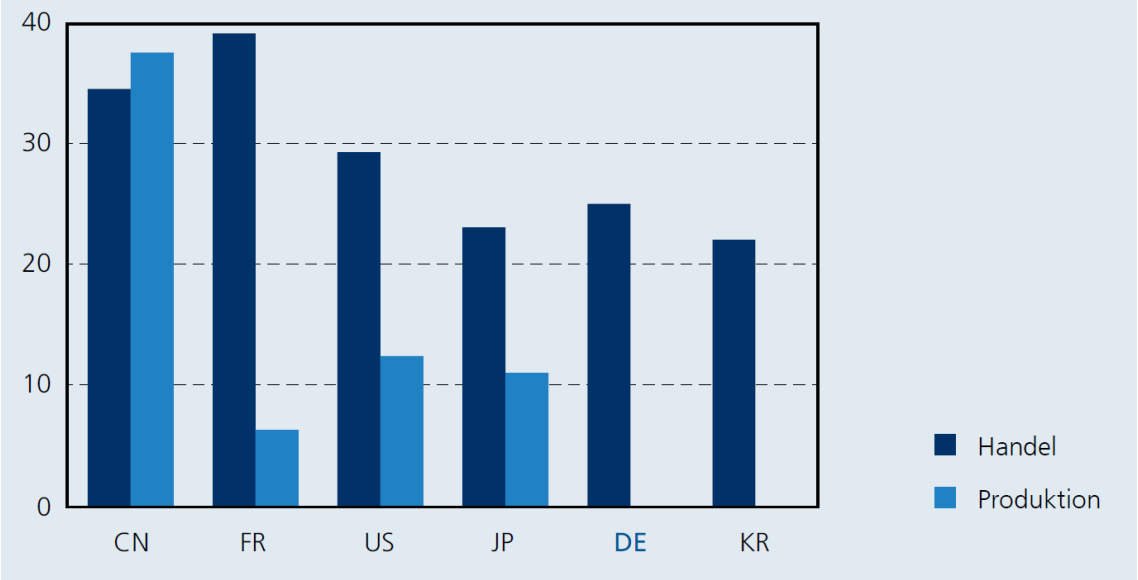
Im Ergebnis zeigt sich (Abbildung 44):

> „Insbesondere weist China bei der Produktion einen klaren Wettbewerbsvorteil auf. Dies resultiert aus der Rohstoffpolitik Chinas.[40] Im Gegensatz zu den anderen Ländern kann es bei allen betrachteten Rohstoffen eigene Minen oder ausländische Beteiligungen aufweisen. Insbesondere Deutschland und Korea haben hier Schwächen bei der „Produktion“.

[40] „Die Rohstoffmarktstruktur ändert sich nur langsam, weshalb das Ergebnis ähnlich zu dem Ergebnis [in (Fraunhofer ISI 2014, Seite 38)] ist.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 74)

Der Handel von Rohstoffen ist allgemein ausgewogener verteilt. Frankreich und China zeigen hier Stärken, gefolgt von den USA.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 47)

Abbildung 44: Normierte gewichtete Bewertungsergebnisse zu Produktion und Handel von LIB-spezifischen Rohstoffen.[41]



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 47.

Kosten und Preis von Batteriezellen und -systemen insgesamt

Übergeordnet und noch wichtiger als die Rohstoffpreise sind nur die Kosten und der Preis von Batteriezellen insgesamt, die letztlich in den Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen sollen. Im Jahr 2013 lag der Preis pro gespeicherte Kilowattstunde in einer LIB zwischen 500 und 650 USD, womit die Batterie einen großen Anteil an den Elektrofahrzeugkosten hatte, je nach Größe des Batteriepacks (IEA 2013, Seite 25). Damit kosteten die 24 KWh-Batterien eines Nissan Leaf mit ungefähr 12.000 USD fast ein Drittel des Elektrofahrzeug-Verkaufspreises. PHEV konnten mit zwei eingebauten Antriebssträngen sogar noch mehr kosten und komplexer gebaut sein als vergleichbare BEV. Weil staatlich finanzierte Kaufanreize diese Mehrkosten im Vergleich zu herkömmlichen Automobilen mit Verbrennungsmotoren nicht auffangen konnten und ohnehin nur für ein paar Jahre galten, war vollkommen offensichtlich, dass signifikante Kostensenkungen erreicht werden mussten.

Schon über die letzten Jahre konnten die Kosten signifikant gesenkt werden. Das U.S. Department of Energy (U.S. DOE) ging davon aus, dass die Batteriekosten aufgrund umfassender Förderung von FuE von 1.000 USD pro gespeicherter Kilowattstunde im Jahr 2008 auf 485 USD pro gespeicherter Kilowattstunde Ende des Jahres 2012 gesunken waren (IEA 2013, Seite 6). Es würde zwar noch dauern, bis die Industrie diese Ersparnisse in konkreten Batteriesystemen für den Einsatz am Massenmarkt umsetzen könne, aber der Trend sei damit bereits deutlich absehbar (Abbildung 45). Im Idealfall sinken die Batteriekosten aber nicht nur

[41] Die für die Analyse herangezogenen Quellen sind in (Fraunhofer ISI 2016, Seite 74) einzusehen.

in absoluten Werten, sondern auch relativ zu den Kosten von Elektrofahrzeugen, damit Letztere wiederum deutlich im Preis gesenkt werden können.

In der Zwischenzeit hat sich geändert, dass die für die breite Kommerzialisierung von BEV im Massenmarkt bzw. in Konkurrenz zu herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor notwendigerweise zu erreichende Kostengrenze nicht mehr bei 300 USD liegen muss, sondern in Abhängigkeit von z. B. den Kraftstoffkosten (bzw. dem oben besprochenen Rohölpreis) zwischen 250 USD (bei aktuellen Konditionen) und 400 USD (falls der Rohölpreis wieder steigt) liegen sollte (Nature Climate Change 2015, Seite 330).

Weil BEV selbst bei den aktuellen Konditionen hinsichtlich ihrer Verkaufszahlen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor allerdings bestenfalls ein Nischenprodukt darstellen, müssen die Batteriekosten vermutlich doch deutlich niedriger und z. B. auf 150 USD pro Kilowattstunde sinken, um den Massenmarkt erfolgreich zu durchdringen. Dazu kommen öffentliche Kaufanreize, eine lokal und regional gut ausgebaute Ladeinfrastruktur sowie im besten Fall nationale BEV-produzierende Unternehmen, um den Konsumenten Elektromobilität auf einem breiten Fundament anziehend zu gestalten.

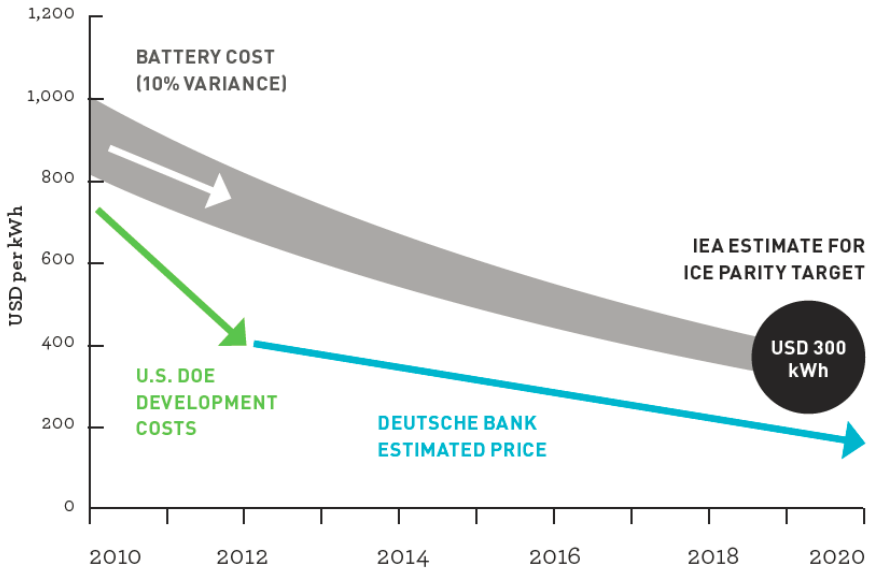
In einer im Frühjahr 2015 veröffentlichten und mit viel Aufmerksamkeit bedachten Studie wurden über 80 verschiedene Abschätzungen aus den Jahren 2007 bis 2014 systematisch erfasst, um die Kosten von LIB-Packs für BEV-produzierende Unternehmen abzubilden (Abbildung 46). Die Resultate konnten dabei sogar in Werte für die Industrie im Allgemeinen und für die marktführenden Unternehmen im Besonderen unterteilt werden.

Darin zeigte sich, dass die Kosten zwischen den Jahren 2007 und 2014 von über 1.000 USD pro Kilowattstunde industrieweit auf etwa 410 USD pro Kilowattstunde gesunken sind. Die marktführenden BEV-produzierenden Unternehmen haben mit 300 USD pro Kilowattstunde sogar deutlich geringere Kosten für ihre Batteriepacks. In den Jahren 2017 und 2018 könnten die Kosten dann industrieweit bei 230 USD pro Kilowattstunde liegen, was allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet ist und mit deutlich mehr Datenpunkten hinsichtlich der Beurteilung spezifischer Batterietechnologien unterlegt werden müsste.

Vollkommen deutlich ist, wie genau die jährliche Kostensenkung von etwa acht Prozent unter den marktführenden Unternehmen auch weiterhin fortschreiten kann:

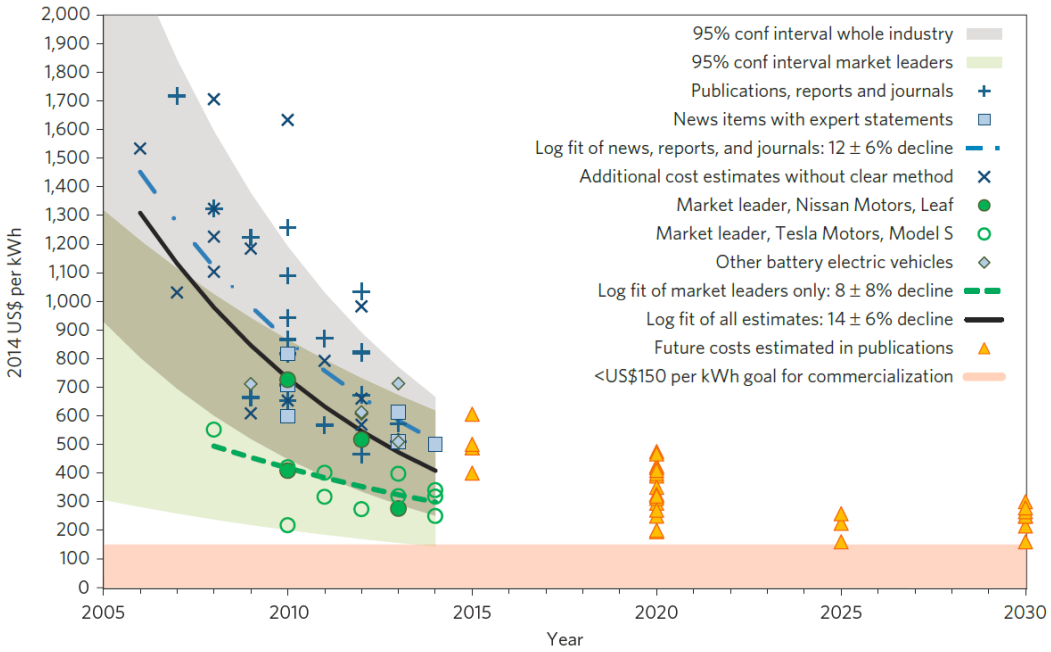
> „Der Fokus auf Kostensenkung ist aber in der gesamten Produktion von Batteriesystemen wiederzufinden, auf jeder Wertschöpfungsstufe auch jenseits der Material- und Komponentenherstellung. Verbindungstechnik, Schweißverfahren spielen z.B. sowohl in Pouch- als auch in prismatischen Zellen eine große Rolle und tragen zu Kostensenkungspotenzialen bei. Durch Prozessoptimierung sollen die Kosten sinken, der Durchsatz steigen, Synergien in der Wertschöpfungskette realisiert und ein attraktives, produktionsoptimiertes Design durchgesetzt werden. Eine stärkere Manufacturing-Betrachtung (inkl. Kostenoptimierung auf den unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen) und eine Hochskalierung der Produktion ebenso eine Kostensenkung durch Standardisierung dürften zu den anvisierten Kostenzielen der kommenden Jahre hinführen.“ (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 8)

Abbildung 45: Geschätzte Kosten von Elektrofahrzeugbatterien bis zum Jahr 2020.[42]



Quelle: IEA 2013, Seite 17.

Abbildung 46: Kosten von Lithium-Ionen-Batteriesystemen in BEV.[43]



Quelle: Nature Climate Change 2015, Seite 330

---

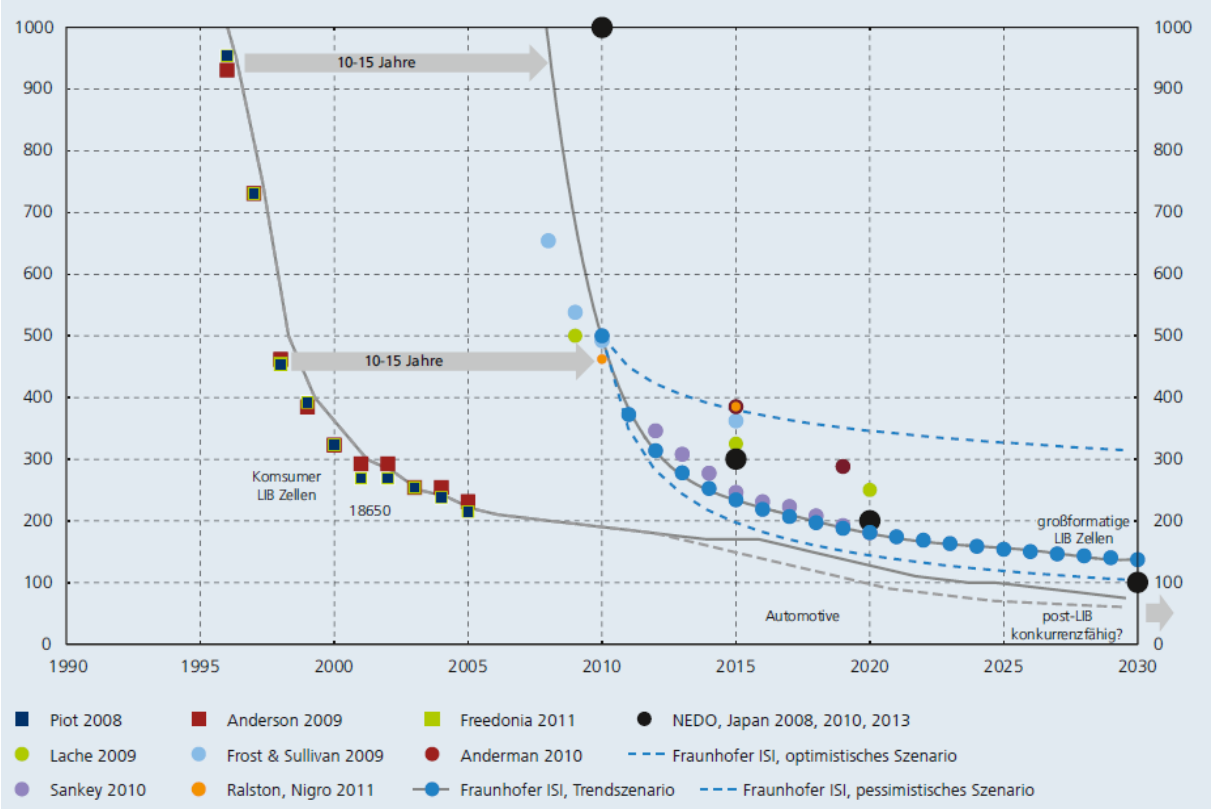
[42] Basierend auf der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate der Lernkurve, welche die Kostensenkung von Batterien durch Skaleneffekte beschreibt

[43] Die Daten stammen aus verschiedenen Quellen und dokumentieren die Kosten für die Industrie insgesamt sowie die Kosten für die marktführenden Unternehmen. Sollten Kosten von 150 USD erreicht werden, gilt dies im Allgemeinen als der Punkt der Kommerzialisierung von BEV.

Zum oben genannten Batteriepreis von rd. 300 USD oder 300 Euro pro Kilowattstunde für Endkunden oder höher (Stand: Dezember 2015) ist festzuhalten:

> „Jedoch liegen die Einkaufspreise der OEM bei weniger als 200 € pro Kilowattstunde (gemeint sind hier Zellpreise, diese sind aufgrund aktueller Überkapazitäten auf einem extrem niedrigen Niveau). Sinken diese Batteriepreise nicht weiter, so könnte sich dieser Aspekt hemmend auf die Elektromobilität auswirken. Es ist aber zu erwarten, dass die an Endkunden weiter gegebenen Preise weiterhin sinken werden und selbst die Zellpreise im Einkauf von Zellherstellern ein Kostensenkungspotenzial bis auf 100 €/kWh und darunter bis 2030 aufweisen, so dass sich die Preisentwicklung der Batterien förderlich auf die Verbreitung der Elektromobilität auswirken wird. Denn mit der [Entwicklung] der Batteriepreise werden auch die Preise für Elektrofahrzeuge deutlich sinken. Dieser Trend […] zeichnet sich seit Einführung der ersten Elektrofahrzeugmodelle schon ab und wird sich weiterhin fortsetzen." (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 27f.)

Abbildung 47: Entwicklung der Zellkosten in Euro pro Kilowattstunde.[44]



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 12.

Für einen Blick in die Zukunft ist die Analyse von Lernkurven interessant (Abbildung 47):

> „Lernkurven aus der historischen Entwicklung kleinformatiger LIB (Batteriezellen für Konsumelektronikgeräte) zeigen auf, wie diese Potenziale in den nächsten 10 bis 20 Jahren

[44] Die in der Grafik genannten Quellen der Meta-Analyse über zahlreiche öffentlich verfügbare Marktstudien hinweg können in (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 37f.) eingesehen werden.

auf großformatige LIB-Zellen übertragen werden können, wobei aber auch für kleinformatige Zellen […] noch Optimierungspotenziale bestehen (sowohl durch Materialinnovationen wie für großformatige Zellen als auch durch Skaleneffekte in der Massenproduktion).

[…] Zellkosten für kleinformatige LIB liegen schon heute deutlich unter 200 €/kWh. Erwartungen von Tesla […] Inc. (mit Inbetriebnahme der Tesla Gigafactory in Sparks, Nevada/USA) gehen von einer Kostenreduktion bis unter 100 €/kWh (bzw. 100 US$/kWh) in den kommenden 5 bis 10 Jahren aus […]. Die Herstellungskosten für großformatige Zellen dürften heute bei 200-250 €/kWh liegen, wenn auch aktuell z.T. von Zellherstellern mit OEM deutlich unter 200 €/kWh ausgehandelt werden (sogenannte OEM-Preise). Damit folgen die Lernkurven für großformatige Zellen den Entwicklungen der Kosten kleinformatiger Zellen mit 10 bis 15 Jahren Abstand und Zellkosten unter 100 €/kWh dürften [deshalb] um 2030 erreichbar sein." (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 10)

5.1.1.2.5 Regulatorischer Druck sowie Steueranreize

Im Folgenden werden zahlreiche regulatorische Maßnahmen besprochen, wobei zwischen den sechs im Rahmen der vorliegenden Dissertation analysierten Ländern zu unterscheiden ist. Den Anfang macht nach einer allgemeinen Einordnung die Umweltgesetzgebung:

„In der Regulierung/Gesetzgebung sind nationale Bestimmungen (z. B. Sonderrechte für Elektromobile im Verkehr) von internationalen Bestimmungen auf EU-Ebene (z. B. bzgl. CO_2-Emissionen) und im globalen Umfeld (z. B. hinsichtlich Batterietransporten) zu unterscheiden. Die CO_2-Gesetzgebung in der EU spielt schon heute eine förderliche Rolle: Der Neuwagen-Flottendurchschnitt von 130 g CO_2/km in 2015 stellt die Ausgangssituation dar und gibt den Automobilherstellern in Europa einige Jahre Zeit, sich auf den Neuwagen-Flottendurchschnitt von 95 g CO_2/km in 2021 vorzubereiten. Da die Automobilindustrie praktisch vollständig globalisiert ist, muss auch die Gesetzgebung auf anderen Kontinenten beachtet werden und dort gesetzte, ggf. noch stärkere Anreize zur Produktion emissionsarmer bzw. elektromobiler Fahrzeuge beeinflussen auch die Forschung und Entwicklung in Europa sowie letztlich das Fahrzeugangebot auf dem europäischen Markt (European Commission 2015). Langfristig und angesichts des fortschreitenden Klimawandels ist eine weitere Verschärfung der europäischen CO_2-Flottengrenzwerte für PKW zu erwarten." (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 26)

Das Ziel des Indikators für umweltpolitische PKW-Regulierungsmaßnahmen sowie die Vorgehensweise zu seiner Messung sieht wie folgt aus:

„Ziel ist es, die Schaffung regulativer Vorteile zu vergleichen. Regulative Vorteile für die Durchdringung der Elektromobilität fördern die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und damit Batterien. […] Je strenger die Umweltstandards sind, desto mehr xEV müssen die OEMs produzieren, um die Obergrenze des Kraftstoffverbrauchs bzw. der CO_2-Emissionen nicht zu überschreiten. Aus diesem Grund wird diese Maßnahme als regulativer Standortvorteil verstanden. Es werden daher […] insbesondere der Kraftstoffverbrauch bis 2015 (in Liter pro 100 Kilometer, Einheit: l/100 km) sowie die CO_2-Emissionen bis 2015 (in Gramm

pro Kilometer, Einheit: g/km) verglichen. Die Rangfolge (Ranking) wird nach dem Grad des umweltpolitischen Anspruchs festgelegt […]“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 42)

Das Ergebnis überrascht aus europäischer Sicht nicht (Abbildung 48):

„Die EU hat nach wie vor die strengsten umweltschonenden Standards festgelegt, weshalb Deutschland und Frankreich das Ranking anführen. [Geringfügig] ambitionierter ist mittlerweile sogar Korea, das bis 2020 den gleichen Kraftstoffverbrauch und nur leicht höhere CO_2-Emissionen erreichen möchte. Die USA fordern ähnliche Werte erst bis zum Jahr 2025, weshalb sie den zweiten Platz belegen. Japan fällt auf den dritten Platz zurück, weil insbesondere der bis 2020 zu erreichende Kraftstoffverbrauch [und] die erlaubten CO_2-Emissionen höher liegen. Chinas Normen sind nach wie vor am einfachsten zu erreichen, weshalb das Land auf dem vierten Platz stehen bleibt.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 42)

Abbildung 48: Umweltpolitische PKW-Regulierungsmaßnahmen im Ländervergleich.[45]

Faktoren	Japan	China	Korea	USA	Frankreich	Deutschland
Kraftstoffverbrauch (bis 2020, l/100 km)	4,9	5	4,1	4,2**	4,1	4,1
CO_2-Emission (bis 2020, g/km)	105	117*	97	97 (bis 2025)	95 (bis 2021)	95 (bis 2021)
Ranking	**3**	**4**	**1**	**2**	**1**	**1**

* Chinas Zielwert berücksichtigt nur Benzinfahrzeuge. Das Ziel könnte höher sein, wenn auch xEV berücksichtigt werden.

** US-amerikanische Klimagas-Standards werden von der Environmental Protection Agency (EPA) festgelegt, welche von den Kraftstoffverbrauchsstandards aufgrund niedriger Globaler Klimaerwärmungspotenzial-Credits für die eingesetzten Kühlmittel abweichen.

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 42.

Neben der Umweltgesetzgebung gibt es allerdings noch weitere Aspekte, mit denen die Regierung eines Landes Einfluss auf die Suchrichtung nehmen kann, wenn man das Wort „Steueranreize“ im Sinne der „Anreize zur Steuerung“ eines TIS auffasst. Der Indikator kann dann wie folgt aufgefasst und gemessen werden:

„Ziel ist es, die politische Unterstützung zum Ankurbeln der Marktnachfrage nach Elektromobilität und damit einer höheren Batterienachfrage vergleichend zu bewerten. […] Die Nachfrage nach Batterien ist eine von der Nachfrage nach xEV abgeleitete Nachfrage. Alle sechs Länder wurden in vier Kategorien möglicher Marktanreize untersucht: Direkte Subventionierung des privaten Erwerbs (quantitativ) [Kategorie I], Indirekte Steuerbefreiungen für den privaten Erwerb (qualitativ) [Kategorie II], Sonstige Privilegien für xEV-Nutzer (qualitativ) [Kategorie III], Infrastrukturausbau (qualitativ) [Kategorie IV].[46] Mit Ausnahme der ersten Kategorie, wo die Länder auf der Basis von Kaufprämien quantitativ verglichen und gerankt werden können, sind die Bewertungen in den anderen drei Kategorien schwieriger: Politische Maßnahmen wie z. B. die Befreiung von Staugebühren in Korea

45 Die für die Meta-Analyse herangezogenen Quellen können in (Fraunhofer ISI 2016, Seite 73) eingesehen werden.

46 Die für die Meta-Analyse herangezogenen Quellen können in (Fraunhofer ISI 2016, Seite 72f.) eingesehen werden.

(fallen je nach Fahrprofil unterschiedlich häufig an) oder die Zulassungsvorteile für xEV in China sind ohnehin überwiegend qualitativer Natur und lassen sich nicht einfach pauschal quantifizieren. Die Bewertung […] der sechs Länder untereinander erfolgt in diesen drei Kategorien nach einem dreiteiligen Ranking der Spitzengruppe, der Mittelgruppe und der Schlussgruppe." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 40)

In Kategorie I wird das Ranking eindeutig von Korea angeführt (Abbildung 49):

„Hier führt Korea (wobei allerdings nur 3000 BEV und 30 000 HEV gefördert werden) das Ranking deutlich vor China an. Die USA, Frankreich und Japan folgen vor Deutschland (geringer Umweltbonus Elektromobilität seit 2016). […] Hohe Subventionen in Korea sind nicht nur für eine begrenzte Anzahl von xEV verfügbar, sondern sollen auch bis zum Jahr 2020 gesenkt werden. In China hat ein Strategiewechsel der Zentralregierung dazu geführt, dass auch hier die Subventionen zwischen 2017 und 2020 reduziert und danach sogar ganz eingestellt werden sollen. Auch in den USA ist der föderale Einkommenssteuernachlass von 7500 US-Dollar auf 200 000 xEV pro Hersteller begrenzt. Frankreich hat seit dem Jahr 2016 ein ausgeklügeltes Bonus-Malus-System etabliert, Japan hat noch eine Kaufprämie für BEV und PHEV, richtet den Fokus aber immer stärker auf FCEV. In Deutschland fällt der Umweltbonus Elektromobilität selbst in Kooperation mit der Industrie am geringsten aus." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 40f.)

In Kategorie II wiederum führen China und Japan in der Ergebnisliste (Abbildung 49):

„In diesem Ranking liegen China und Japan in der Spitzengruppe, Deutschland und Frankreich in der Mittelgruppe, Korea und die USA [liegen zurück.] China führt dieses Ranking deutlich an, mit zahlreichen Steueranreizen sowohl für Einzelverbraucher und Flottenbetreiber. Auch Japan bietet Steuerbefreiungen, z. B. bei der Kfz-Steuer, die von der Höhe des Kraftstoffverbrauchs und der Art des Fahrzeugs abhängt. Deutschland und Frankreich liegen ungefähr gleich auf, wobei die Steuervorteile teilweise auch erst seit dem Jahr 2016 in Kraft getreten sind. In Korea liegt der nationale Fokus deutlich auf direkten Subventionen, Steuervorteile spielen eine untergeordnete Rolle. In den USA gibt es auf nationaler Ebene lediglich einen föderalen Einkommenssteuernachlass." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 40f.)

Abbildung 49: Länderübersicht in Kategorie I und II von möglichen Marktanreizen.

Land	Kategorie I: Direkte Subventionierung des privaten Erwerbs (quantitativ, in Euro)[67], [Rang]	Kategorie II: Indirekte Steuerbefreiungen für den privaten Erwerb (qualitativ), [Rang]
China	4704–8064*, [2]	Umfassende Anreize als Teil des „NEV Policy Support System", [1]
Deutschland	1500 (PHEV) oder 2000 (BEV), [6]	Steuervorteile u.a. bei Kfz- und Einkommenssteuer, [2]
Frankreich	1000 (PHEV) oder 6300 (BEV), [4]	Steuervorteile in der Dienstwagen- und Zulassungsbesteuerung, [2]
Japan	5280**, [5]	Steuerbefreiungen schon seit vielen Jahren, z.B. Kfz-Steuer, [1]
Korea	12064***, [1]	Steuervorteile spielen eine untergeordnete Rolle, unterschiedlich zwischen Regionen und Städten, [3]
USA	6525****, [3]	Nur ein föderaler Einkommenssteuernachlass (siehe Kat. I), [3]

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 40.

In Kategorie III führen ebenfalls asiatische Länder (Abbildung 50):

> „China [und Korea] bilden die Spitzengruppe, Deutschland und Frankreich befinden sich in der Mittelgruppe, Japan und die USA in der Schlussgruppe. […] China führt auch hier aufgrund der Zulassungsvorteile für xEV, welche nicht an der staatlichen Nummernschild-Lotterie für herkömmliche Automobile teilnehmen müssen. In Korea sind eigentlich „nicht-monetäre" Privilegien oft wieder (geldwerte) Befreiungen von Gebühren wie z. B. für Luftverschmutzung oder Stau. Deutschland und Frankreich befinden sich eher in der Mittelgruppe, weil die Regierungen Gesetze erlassen haben, mit denen Bundesländer und Regionen sowie einzelne Kommunen Privilegien für xEV erlassen können und diese Möglichkeit auch zahlreich in Anspruch genommen wird. In Japan und den USA ist Letzteres eher nicht der Fall." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 40f.)

Abbildung 50: Länderübersicht in Kategorie III und IV von möglichen Marktanreizen.

Land	Kategorie III: Sonstige Privilegien für xEV-Nutzer (qualitativ), [Rang]	Kategorie IV: Infrastrukturausbau (qualitativ), [Rang]
China	Zulassungsvorteile für xEV spielen eine überragende Rolle, [1]	Grundlegende Herausforderung des Platzbedarfs in Großstädten, [3]
Deutschland	National keine bekannt, auf regionaler Ebene ja (viele!), [2]	Finanzielle Unterstützung von Ausbauprogrammen (300 Mio € Programm), [2]
Frankreich	National keine bekannt, auf regionaler Ebene ja (einige), [3]	Deutlich geringere finanzielle Unterstützung öffentlicher, mehr häusliche Infrastruktur, [3]
Japan	National keine bekannt, auf regionaler Ebene ja, [3]	Weltweit führend im Ladeinfrastrukturausbau, [1]
Korea	Zahlreiche Privilegien wie z.B. keine Staugebühren, reduzierte Parkgebühren und Strompreise, [1]	Finanzielle Unterstützung von Ausbauprogrammen, [2]
USA	National keine bekannt, auf Ebene der Bundesstaaten ja, [2]	Große Pläne aufgestellt, abhängig von der Trump-Administration, [1]

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 41.

In Kategorie IV führt neben Japan auch die USA (Abbildung 50):

> „Hier führen Japan [und die USA] deutlich vor Deutschland und Korea. China und Frankreich bilden die Schlussgruppe. […] In Japan ist der Infrastrukturausbau aufgrund der früh begonnenen, langfristigen Planungen der Regierung am weitesten fortgeschritten. In den USA hat die Obama-Administration im Jahr 2016 milliardengroße Pläne geäußert, deren Durchführung sehr stark von der Trump-Administration abhängig ist. Deutschland und Korea haben auch Ausbaupläne formuliert und mit deutlich geringeren Budgets als die USA versehen. Frankreich steht finanziell gesehen vor einer großen Herausforderung und fördert den Aufbau von häuslicher mehr als von öffentlicher Ladeinfrastruktur. China bildet noch das Schlusslicht, weil die Regierung insbesondere in den Großstädten Platzprobleme lösen muss." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 40f.)

Angesichts dieser umfassenden politischen Unterstützung der Verbreitung von Elektrofahrzeugen und damit auch einer höheren Nachfrage nach elektrochemischen Energiespeichertechnologien scheint die Suchrichtung über alle analysierten Länder hinweg zumindest grob vorgegeben und der unterschiedlich starke Einfluss der Regierungen wird sichtbar.

5.1.1.3 Zusammenfassung bzw. Fazit

In diesem Abschnitt zur Funktion des Einflusses auf die Suchrichtung wurden folgende Schwächen und Stärken der TIS aufgezeigt:

- Den Vergleich der durch die Regierung eines Landes gesetzten Ziele (siehe Kapitel 5.1.1.2.1) muss keine Regierung scheuen, es gibt sie in allen Ländern. Japans Regierung sticht die anderen Länder allerdings durch die viel früher getroffene Entscheidung aus, die Energiespeichertechnologie als eine der Schlüsseltechnologien im Energie- und Transportbereich einzustufen. China und Korea folgten dem viel später nach, mit einem deutlichen technologischen Rückstand, den es zuerst aufzuholen galt. Die USA, Frankreich und Deutschland sprangen erst dann auf den Zug auf, als der Klimawandel nicht mehr aus der öffentlichen Aufmerksamkeit wich und CO_2-Emissionen eingespart werden mussten. Mit der Elektromobilität wurde dann auch ein entsprechend großer Markt für Energiespeicher diskutiert, den es nun zu erobern gilt.
- Hinsichtlich der Anzahl von wissenschaftlichen Artikeln in Veröffentlichungen (siehe Kapitel 5.1.1.2.2) ist mit der Publikationsdynamik auch ihre -anzahl deutlich angestiegen. Es führen sowohl bei Energiespeichern für die Elektromobilität im Allgemeinen als auch bei LIB im Besonderen China und die USA mit den größten Weltanteilen, das größte Wachstum weisen China, Deutschland und Korea auf.
- Das Wachstumspotenzial ist in öffentlich verfügbaren Marktstudien (siehe Kapitel 5.1.1.2.3) dokumentiert worden und für alle Länder riesig: Über die nächsten Jahrzehnte hinweg könnten Energiespeicher für die Elektromobilität in praktisch allen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zum Einsatz kommen, die heute noch mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren angetrieben werden.
- Eine Schwäche ergibt sich auf Basis der Anreize aus der Entwicklung von Faktor-/ Produktpreisen (siehe Kapitel 5.1.1.2.4), denn der Ölpreis wird zumindest kurzfristig sehr niedrig bleiben. Stiege er deutlich an, würde die Suche nach Alternativen deutlich intensiver stattfinden. Auf der anderen Seite sind alle wichtigen Rohstoffe für Energiespeicher für die Elektromobilität schon heute relativ günstig, und lediglich mit einigen politischen Risiken behaftet. Die Kosten von Elektrofahrzeugbatterien im Allgemeinen und LIB-Systemen im Besonderen sind noch zu hoch und damit eine weitere Schwäche, werden allerdings in den nächsten Jahren deutlich sinken und ihre Leistungs-fähigkeit wird steigen, was die Attraktivität von Elektrofahrzeugen bzw. Elektromobilität erhöhen wird. Im Hinblick auf die Rohstoffverteilung und den Zugriff darauf ist China am besten aufgestellt, besonders Deutschland und Korea liegen dahinter weit zurück.
- Der regulatorische Druck sowie Steueranreize (siehe Kapitel 5.1.1.2.5) weisen in eine klare Richtung: Die Elektromobilität kommt, in allen Ländern. Im Bereich der Umweltgesetzgebung gehen Deutschland und Frankreich mit den stärksten Vorschriften voran, Chinas Regulierung weist noch Optimierungspotenzial auf. Bei den in mehrere Kategorien zu differenzierenden Marktanreizen sind die asiatischen Länder deutlich großzügiger als die westlichen Wettbewerbsnationen.

5.1.2 Wissensentwicklung

Im Folgenden wird auf die Funktion der Wissensentwicklung detailliert eingegangen, die Indikatoren zur Messung der Wissensentwicklung im definierten TIS (siehe Kapitel 4.2) in den Ländern Japan, Korea, China, den USA, Frankreich und Deutschland untersucht und eine Zusammenfassung erstellt bzw. ein vorläufiges Fazit gezogen.

5.1.2.1 Theoretische Grundlage und Indikatoren

Schon ganz früh in der Entwicklung der theoretisch-methodischen Grundlagen von Innovationssystemen wurde festgehalten, dass Wissen die grundlegendste Ressource in der modernen Wirtschaft ist und dementsprechend das Lernen den wichtigsten Prozess darstellt (Lundvall 1992, Seite 1). Deshalb ist auch klar, dass FuE sowie die daraus entstehende Wissensentwicklung zentrale Voraussetzung für jedes Innovationssystem ist (Hekkert et al. 2007, Seite 422). Die Funktion umfasst sowohl Lernen durch Suche (engl. „learning by searching“) und Lernen durch Handeln (engl. „learning by doing“).

Indikatoren zur Messung der Wissensentwicklung sind:

- Forschungsprojekte, z. B. Anzahl und Umfang sowie inhaltliche Schwerpunkte,
- Patente, z. B. Anzahl und inhaltliche Schwerpunkte,
- Investitionen in FuE, z. B. inhaltliche Schwerpunkte und Umfang,
- Lernkurven, welche im Gegensatz zu den ersten drei Indikatoren nicht nur die Wissensentwicklung an und für sich, sondern auch die Entwicklung technologischer Leistungsfähigkeit über die Zeit hinweg feststellen.

Impliziert wird damit die Entwicklung von Breite und Tiefe der aktuellen Wissensbasis eines TIS sowohl auf globaler als auch lokaler Ebene und über die Zeit (Bergek et al. 2008-1, Seite 414f.). Unterschieden werden kann zwischen verschiedenen Arten des Wissens (z. B. produktionsbezogen, technologisch, wissenschaftlich) und verschiedenen Quellen des Wissens (z. B. FuE, neue Anwendungen, Produktion).

Indikatoren zur Messung der Wissensentwicklung sind deshalb auch:

- Bibliometrie, z. B. Zitationen, Umfang von Publikationen und inhaltliche Schwerpunkte,
- Professoren, z. B. Anzahl und Schwerpunkte ihrer Arbeit,
- Beurteilungen durch Projektmanager und andere Verantwortliche.

5.1.2.2 TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität

Hinsichtlich des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität lässt sich festhalten, dass die weltweit relevanten Länder auch in der Wissensentwicklung sehr aktiv sind, wenn auch mit unterschiedlichen Schwerpunkten: Publikationen weisen dabei auf die wissenschaftlichen Aktivitäten, Patente auf die Technologieentwicklung in Richtung potenzieller Märkte hin. Es ist anzumerken, dass die Aktivitäten im Bereich der Wissensentwicklung direkt mit dem Einfluss auf die Suchrichtung (siehe Kapitel 5.1.1) zusammenhängen und

dadurch sehr stark mitbestimmt werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden auch einige Male auf die dort bereits beobachteten Indikatoren verwiesen.

5.1.2.2.1 Förderprogramme und Forschungsprojekte

Auf große Förderprogramme und einzelne Forschungsprojekte in den sechs Ländern wird bereits oben im Rahmen der durch die Regierung eines Landes gesetzten Ziele detailliert eingegangen (siehe Kapitel 5.1.1.2.1).

Interessant ist angesichts der zahlreichen Aktivitäten in allen sechs der im Rahmen der vorliegenden Dissertation analysierten Länder vor allem die Frage, ob es sich quasi um einmalige Strohfeuer handelt oder ob sich die jeweilige Regierung langfristig und nachhaltig engagiert:

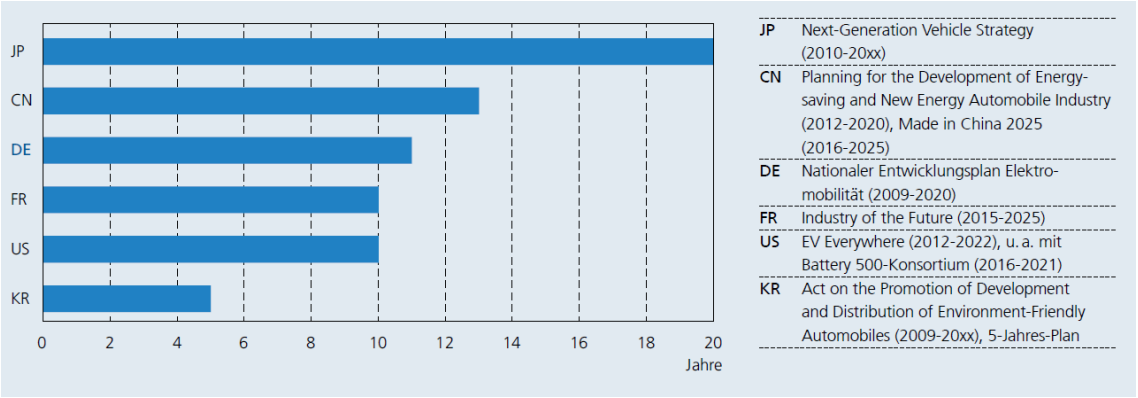
> „Ziel [des Indikators] ist es, Dauer und Kontinuität des politischen Engagements im Ländervergleich hier auch quantitativ einzuschätzen. […] Die „Masterplanung" spiegelt die Dauer und Kontinuität des politischen Engagements wider. Bei diesem Indikator wird allerdings nicht auf die Historie eingegangen, weil diese nicht im Vordergrund steht. Stattdessen soll vorausgeschaut werden: Seit 2009 haben nach mehrjährigen Diskussionen über politische Maßnahmen zum Umweltschutz und zur Nachhaltigkeit Regierungen weltweit im Zusammenhang mit der globalen Finanzkrise erneut Impulse bekommen und ihre nationalen Zielwerte für die Markteinführung und -diffusion von xEV angekündigt. Obwohl alternative Technologien wie die Brennstoffzellentechnologie auch in die Diskussionen mit einbezogen sind, werden LIB als die Energiespeicherlösung für die zeitnahe Marktdurchdringung der Elektromobilität gesehen. Vor diesem Hintergrund werden hier die aktuellsten Masterpläne der sechs betrachteten Länder berücksichtigt und gemäß ihrer Planungsfristen bewertet." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 57)

Im Ergebnis zeigt sich, dass Japan nicht nur seit langer Zeit schon an Energiespeichern für die Elektromobilität arbeitet, sondern auch das langfristigste und nachhaltigste Engagement aufweist (Abbildung 51). Danach folgen China und Deutschland:

> „Japans langfristig angelegte „Next-Generation Vehicle Strategy" (2010) wurde mit der „Japan Revitalization Strategy" (2013) untermauert, bis 2030 sollen xEV 50 bis 70 Prozent Anteil an allen Neuzulassungen im Land ausmachen. Koreas Masterplanung begann mit dem „Act on the Promotion of Development and Distribution of Environment-Friendly Automobiles" (2009) ein Jahr früher, die FuE an sogenannten „Green Cars" ab 2011. Die Ziele für 2020 wurden zwischenzeitlich nach unten korrigiert, seit Ende 2015 läuft ein 5-Jahres-Plan, mit dem xEV bis 2020 einen Anteil von 20 Prozent der Neuzulassungen erreichen sollen. Das Projekt „Battery 2020" wurde zwischenzeitlich eingestellt. Deutschland hält an den Zielen aus dem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität" fest, der bis 2020 angelegt ist. Eine Million xEV sind in den USA nicht mehr für 2015, sondern für 2020 vorgesehen. Im gleichen Zug sollen die Batteriekosten deutlich sinken. Auch China hält am Entwicklungsplan zur Elektromobilität fest, der auch Entwicklungsziele für die einzusetzenden Energiespeicher vorsieht. Dazu kommt das „Made in China 2025"-Programm, welches auch ein Upgrade für die Batterie- und xEV-Industrie vorsieht. Frankreich plant im Rahmen

einer großen Industriekampagne zum „Neuen industriellen Frankreich“ einen großen Schritt in die Zukunft.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 57)

Abbildung 51: Überblick über die Fristen der Masterplanung.[47]



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 57.

5.1.2.2.2 Publikations- und Patentanalysen

Hinsichtlich einer Publikationsanalyse sei auf die oben im Rahmen der Anzahl von wissenschaftlichen Artikeln in Veröffentlichungen (siehe Kapitel 5.1.1.2.2) hingewiesen. Die Aussagekraft einer Patentanalyse verändert sich vor allem durch den anderen Zeithorizont:

„Ziel [des Indikators] ist es, die technologische Wissensbasis eines Landes als Hinweis auf die kurz- bis mittelfristig zu erwartende Innovationsfähigkeit und ggf. auch Marktvorbereitung zu messen. […] Untersucht werden für den Zeitraum der letzten fünf Jahre (2009–2013) der Weltanteil und das Wachstum technologischer Innovationen (Patente) der Länder im Vergleich […]. Es werden Suchstrategien zu Batterien für elektromobile Anwendungen (xEV) sowie im Bereich der Lithium-Ionen-Batterieforschung (LIB) als Schlüsseltechnologie für Elektrofahrzeuge betrachtet. Damit werden sowohl Batteriematerial, -komponenten und -zellentwicklung als auch die Entwicklung im Bereich der Fahrzeugintegration der Batterien berücksichtigt.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 55)

Das Ergebnis von Publikations- und Patentanalyse unterscheidet sich stark (Abbildung 52):

„Japan zeigt sich sowohl im Bereich der Lithium-Ionen-Batterieentwicklung als auch Fahrzeugintegration der Batterien weiterhin als klarer Technologieführer mit den deutlich größten Weltanteilen. Die Patentanmeldedynamik hat allerdings gegenüber dem Energiespeicher-Monitoring 2014 von 30 bis 40 Prozent auf 15 bis 25 Prozent abgenommen und liegt etwa auf gleichem Niveau wie die Patentdynamik von China, Korea und Frankreich. Die Patentanteile dieser Länder sind allerdings geringer als die Anteile Japans. Auffällig ist, dass die Patentanmeldedynamik der USA und Deutschlands auf unter 10 Prozent gesunken ist. Beide Länder weisen ähnliche Weltanteile auf und sind zusammen mit Korea die

[47] Die für die Meta-Analyse herangezogenen Quellen können in (Fraunhofer ISI 2016, Seite 75) eingesehen werden.

weltweit größten Anmeldeländer nach Japan. Dennoch bleibt für Deutschland festzuhalten, dass gerade im Bereich der FuE zu LIB der Weltanteil im Vergleich zum Monitoring 2014 von etwas über 5 Prozent auf 15 Prozent gesteigert werden konnte." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 55)

Wichtig ist angesichts der Publikations- und Patentanalysen allerdings auch die Untersuchung, wie hoch die Anteil der Unternehmen an der quasi „nationalen" FuE ist:

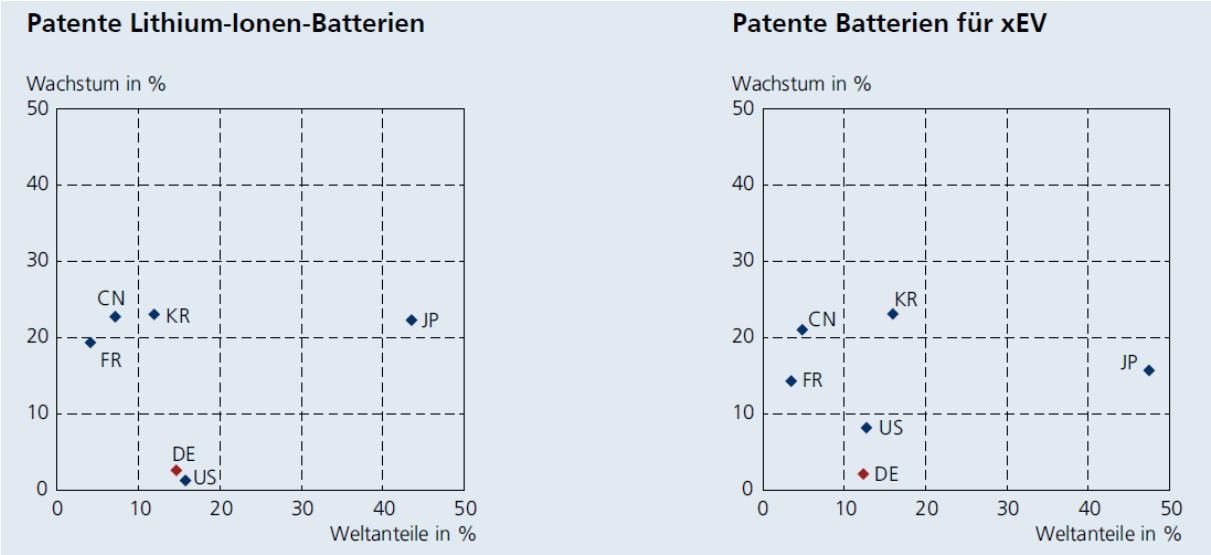
„Ziel [des Indikators] ist es, den Grad der FuE-Anstrengungen von Unternehmen abzuschätzen. Dies gibt einen Hinweis darauf, wie intensiv die Industrie mittel- bis langfristig innoviert, um sich für Zukunftsmärkte vorzubereiten. […] Gemessen wird der Anteil der Unternehmenspublikationen und -patentanmeldungen in einem Land […]. Publikationen geben eine Auskunft über stärker forschungsorientierte und längerfristige Aktivitäten und Patentanmeldungen über eher mittelfristige und marktnahe Entwicklungsarbeiten. Es werden jeweils die aktuellsten Jahre betrachtet. Publikationen (2011–2015) wurden auf Basis einer Schlagwortsuche zu „Lithium-Ionen Batterien" (LIB) sowie „Batterieforschung mit dem Einsatzzweck in elektromobilen Anwendungen" (xEV) im Web of Science (WoS [2017]) ermittelt. Patentanmeldungen (2011–2013) wurden auf Basis einer IPC-Abgrenzung ermittelt, welche LIB-Patentanmeldungen in Unterklassen der H01M sowie Batteriepatentanmeldungen im Bereich der Fahrzeuge (xEV) in den Unterklassen von H01M und B60 erfasst. Die Recherche erfolgte mit der Patentdatenbank PATSTAT [(EPO 2017-1)]." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 52)

Bei dem Anteil der Unternehmenspublikationen bei „Batterien für xEV" führt Deutschland, bei dem Anteil der Unternehmenspatente liegt Deutschland in der Spitze (Abbildung 53):

„Gerade deutsche Unternehmen stechen (wie auch schon im Zeitraum 2009–2013) durch intensive Forschungsanstrengungen hervor, was für eine langfristige Vorbereitung der Industrie spricht. An etwa 30 Prozent der Publikation zu „Batterien für xEV" sind deutsche Unternehmen beteiligt. Japan, Frankreich, Korea und die USA folgen mit abfallender Forschungsintensität der Unternehmen. Im Bereich der LIB zeigen sich Unternehmen in Japan im Ländervergleich deutlich forschungsintensiver und auf ähnlichem Niveau wie auch für Batterien in xEV (rd. 18 bis 19 Prozent Unternehmensbeteiligung). Bei Patentanmeldungen zeigen sich insgesamt typische hohe Anteile von meist über 90 Prozent (Japan, Korea, Deutschland). In den USA und China liegt der Anteil der Unternehmenspatente bei rd. 75 Prozent.[48] Einzig Frankreich sticht mit einem sehr geringen Anteil von Unternehmenspatenten mit weniger als 50 Prozent der Batterie- und Fahrzeugindustrie hervor. Marktnahe Entwicklungsaktivitäten von Forschungseinrichtungen spielen hier offenbar eine zentrale Rolle." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 52)

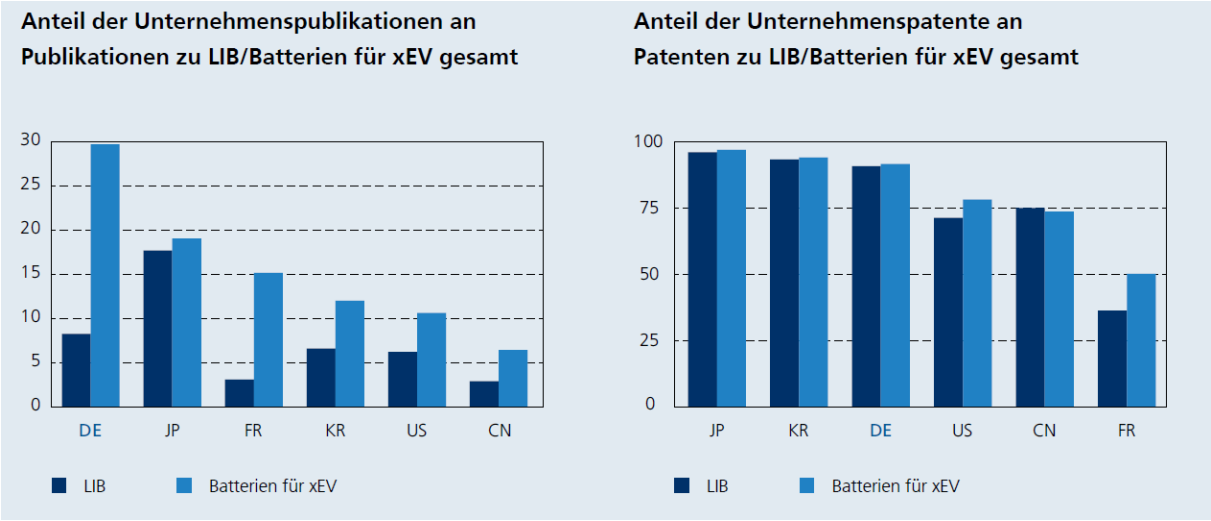
48 „Öffentliche FuE-Einrichtungen und Universitäten sind in den USA stärker aktiv, in China ist zu berücksichtigen, dass die Anmeldezahlen der Weltpatente insgesamt geringer sind." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 74)

Abbildung 52: Die Patente zu LIB im Allgemeinen (links) und zu Batterien für Elektrofahrzeuge im Besonderen (rechts).



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 55.

Abbildung 53: Der Anteil der Unternehmenspublikationen (links) und der Unternehmenspatente (rechts) Publikationen und Patenten insgesamt.[49]



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 52.

5.1.2.2.3 Lernkurven

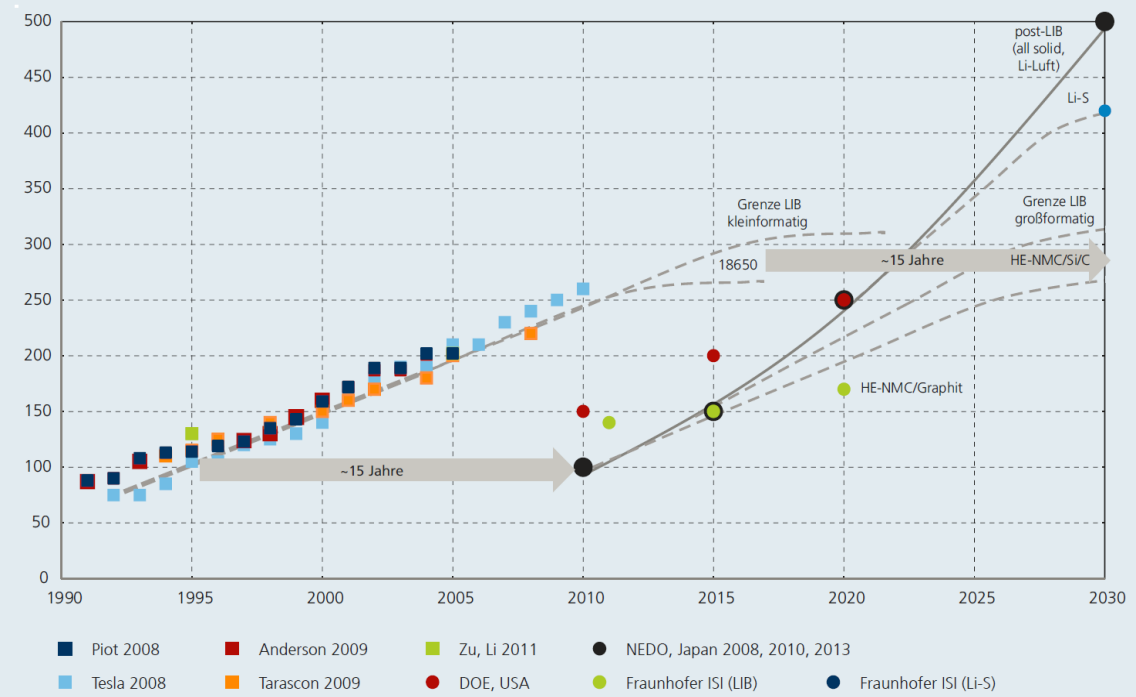
Die Lernkurve zur Entwicklung der Zellkosten wurde bereits im Abschnitt zu Anreizen aus der Entwicklung von Faktor-/Produktpreisen (siehe Kapitel 5.1.1.2.4) abgehandelt. An dieser

[49] „Während die Suche „Batterien für xEV“ eher die ingenieurstechnischen bzw. im Kontext der Elektrofahrzeuge spezifischen Veröffentlichungen identifiziert gibt die Suche zu „LIB“ Aufschluss über Batterie-FuE-Aktivitäten und wird tendenziell auch die Grundlagenforschung in diesem Bereich stärker berücksichtigen.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 74)

Stelle wird ein weiteres Beispiel für eine Lernkurve analysiert, die Lernkurve bezüglich der Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte (Abbildung 54):

> „Heute mit kleinformatigen Zellen erreichte gravimetrische Energiedichten bis 250 oder 270 Wh/kg könnten noch mit optimierter Zellchemie wie für großformatige Batterien auf über 300 Wh/kg gesteigert werden […]. Eine Übertragung auf großformatige Zellen dürfte mit rund 15 Jahren Abstand bis 2030-2040 erfolgen. Dann wäre die Entwicklung der LIB-Technologie nach 50 Jahren schließlich ausgereizt. Post-LIB wie z. B. Lithium-Schwefel (Li-S)-Batterien […] könnten schließlich […] noch höhere gravimetrische Energiedichten erzielen und sich in diesem langfristigen Zeitraum zur Marktreife für die Elektromobilität entwickeln.“ (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 11)

Abbildung 54: Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von LIB-Zellen (Wh/kg).



Quelle: Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 10.

Interessant ist deshalb auch ein Vergleich der Zielvorgaben bzgl. der Batterieparameter. Denn so lassen sich nicht nur die Zielparameter in den Verlauf der oben genannten Lernkurven einsortieren, sondern es zeigt sich auch, welches Land die größten Ambitionen hat, die Zielwerte auch tatsächlich zu erreichen:

> „Ziel des Indikators [ist es,] Zielvorgaben bezüglich der Entwicklung von Batterieparametern als Hinweis auf anvisierte FuE-Fortschritte [zu vergleichen]. Um die Marktdurchdringung der xEV zu beschleunigen, spielen zwei Eigenschaften von Batterien eine wichtige Rolle: Batteriekosten und -leistung. Aus diesem Grund haben die meisten Länder in ihren Batterieentwicklungs-Roadmaps Zielvorgaben bzgl. der Energiedichte (in Wh/kg,

zunehmend auch volumetrisch in Wh/l) und Zellkosten festgelegt.[50] Dies weist auf den erwünschten Forschungsoutput hin und reflektiert gleichzeitig die politische Ambition, die FuE zu Batterien im Land intensiv voranzutreiben. Da die betrachteten Länder unterschiedliche Ausgangssituationen besitzen, wird der Indikator durch den zwischen 2015 und 2020 zu erzielenden Verbesserungsfaktor gemessen […] (Betrachtung jeweils der Zellebene)." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 60)

Das Ergebnis überrascht auf der einen Seite, weil sich die wesentlichen Zielvorgaben für alle Länder mehr oder weniger gleich gestalten (Abbildung 55). Auf der anderen Seite sind die maßgeblichen Roadmaps vor allem von der NEDO in Japan in der Batterie-Community weltweit bestens bekannt und dienen als Orientierungspfeiler für alle Wettbewerber:

„Der internationale Benchmark in der Energiedichte von großformatigen LIB-Zellen liegt bei >150 Wh/kg. Die Roadmaps der Regierungen bzw. Erwartungen der OEM haben sich in den letzten Jahren international angeglichen. Weiterhin gibt die NEDO Roadmap (aktuellste Version aus 2013) aus Japan Orientierung. In einem Papier der Europäischen Kommission (EU) aus 2016 werden ähnliche Ziele für die wichtigsten Leistungsparameter zusammengestellt (für FR und DE in Klammern angegeben). Somit liegen insgesamt die sechs Länder mit ihren Zielen die Energiedichte zu verbessern gleich auf. Die Ziele bis 2030 betreffen offensichtlich post-LIB-Technologien für welche die produktionstechnische Umsetzung und damit auch Preisvorstellungen noch unklar sind. Hingegen gelten die Ziele in der Kostenreduktion jeweils für optimierte LIB, deren erreichbare Grenzen in der Energiedichte bei etwa 300 Wh/kg liegen dürften. Auch bzgl. der Kostenentwicklung werden gemäß der Roadmaps (insbesondere aber der Erwartungen der OEM an die asiatischen Zellproduzenten) ambitionierte Ziele von <100 €/kWh bereits im Zeitraum zwischen 2020 und 2030 erwartet.[51]" (Fraunhofer ISI 2016, Seite 60)

Abschließend bleibt diesbezüglich festzuhalten, dass auch das Potenzial der Länder, diese Leistungsparameter tatsächlich zu erreichen, bereits empirisch untersucht wurde:

„Ziel [des Indikators war] es, als Hinweis auf das Anbieterpotenzial die Chancen bzw. Potenziale der Länder einzuschätzen, Fortschritte hinsichtlich zentraler Leistungsparameter der Batterietechnologien zu erreichen. […] Dazu [wurden] die Einschätzungen [von] Experten bzgl. der Frage wiedergegeben, welche Potenziale den jeweiligen Ländern zugetraut werden, die besten Leistungsparameter bei Energiedichte, Lebensdauer, Sicherheit, Kosten schon kurzfristig zu erreichen.[52]"

Im Ergebnis stand auch hier Japan ganz vorne:

---

50 Die für die Meta-Analyse herangezogenen Quellen können in (Fraunhofer ISI 2016, Seite 75) eingesehen werden.

51 „Für die Entwicklung von Energiedichten (Wh/kg, Wh/l) sowie Zellkosten (€/kWh) vgl. auch [(Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 10ff.)]." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 75)

52 „Das Projektteam des Fraunhofer ISI führte in den Jahren 2012 und 2013 eine internationale Umfrage unter Beteiligung von über neunzig Batterieexperten und -expertinnen aus bzw. in den sechs untersuchten Ländern durch." (Fraunhofer ISI 2014, Seite 66)

„Japan wird bzgl. des Erreichens besserer Energiedichten, Lebensdauern und Sicherheit mit deutlichem Vorsprung jeweils vor dem klassischen „second mover“ Korea, im Falle der Sicherheit vor Deutschland, das höchste Potenzial zugetraut. Deutschlands Stärken liegen in der Lebensdauer und Sicherheit, bzgl. [der] Energiedichte und bei den Kosten [muss Deutschland [aufholen]. China liegt bei der Einschätzung Batterien mit niedrigsten Kosten anzubieten deutlich vorne, vor Korea.“ (Fraunhofer ISI 2014, Seite 47)

Abbildung 55: Überblick über die Zielvorgaben bzgl. der Batterieparameter.[53]

Faktoren	Japan	Korea	China	USA	Frankreich (EU)	Deutschland (EU)
Energiedichte (bis 2015, Wh/kg)	>150	>150	>150	>150	>150	>150
Energiedichte (bis 2020, Wh/kg)	250	250	300	250	k. A. (350)	250 (350)
Verbesserung Faktor x	1,7	1,7	2	1,7	k. A.	1,7
Energiedichte (bis 2030, Wh/kg)	500	k. A.	k. A.	500	k. A. (>400)	<300 (>400)
Kosten/Pack (bis 2015, €/kWh)	<300	<300	<250	<300	<300	<300
Kosten/Pack (bis 2020, €/kWh)	100–200	100–150	100–150	100–150	k. A. (90)	100–150
Verbesserung Faktor x	bis 3	bis 3	bis 2,5	bis 3	k. A.	bis 3
Kosten/Pack (bis 2030, €/kWh)	<100	<100	<100	k. A.	k. A. (75)	<100

Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 60.

5.1.2.2.4 Zusammenfassung bzw. Fazit

In diesem Abschnitt zur Funktion der Wissensentwicklung wurden folgende Schwächen und Stärken der TIS aufgezeigt:

- Hinsichtlich der Förderprogramme und Forschungsprojekte (siehe Kapitel 5.1.2.2.1) sind in jedem Land umfassende Aktivitäten zu verzeichnen, Unterschiede sind diesbezüglich höchstens bezüglich der Förderdauer, des -volumens und der -schwerpunkte auszumachen. Gerade Japan hat allerdings die von ihrer Nachhaltigkeit am langfristigsten ausgelegte Masterplanung.
- Hinsichtlich der Publikationsanalysen ist auf die Anzahl von wissenschaftlichen Artikeln in Veröffentlichungen (siehe Kapitel 5.1.1.2.2) hinzuweisen, wo in beiden Bereichen China und die USA über die größten Weltanteile verfügen und China, Deutschland und Korea das größte Wachstum aufweisen. Bei den Patentanalysen (siehe Kapitel 5.1.2.2.2.) liegt Japan anteilsbezogen mit riesigem Abstand sowohl bei Energiespeichertechnologien für die Elektromobilität im Allgemeinen als auch bei LIB im Besonderen vorne, während China, Frankreich und Korea wenigstens eine starke Wachstumsdynamik erzeugt haben, sind Deutschland und die USA auch hier weit abgeschlagen.
- Aus den Lernkurven (siehe Kapitel 5.1.2.2.3) wird ersichtlich, dass die Trends in der Energiedichte (nach oben) und bei den Kosten (nach unten) in jeweils eine ganz klare

[53] Die für die Meta-Analyse herangezogenen Quellen können in (Fraunhofer ISI 2016, Seite 75) eingesehen werden.

Richtung zeigen. Während sich die auch aus den Lernkurven resultierenden, ambitionierten Zielvorgaben über alle analysierten Länder hinweg ähneln, wird Japan das größte Potenzial zugemessen, höhere Energiedichten und längere Lebensdauern in den Leistungsparametern vor Korea tatsächlich zu erreichen, im Falle größerer Sicherheit vor Deutschland. China liegt bei Energiedichte, Lebensdauer und Sicherheit deutlich abgeschlagen, Deutschland bei den Kosten.

5.1.3 Unternehmerisches Experimentieren

Die oben dargestellte Wissensentwicklung kann verschiedene Quellen haben, z. B. FuE, das Lernen von neuen Anwendungen, aus der Produktion etc. und Imitation, wobei vor allem die letzten beiden Quellen in der Form des Unternehmerischen Experimentierens ablaufen (Bergek et al. 2008, Seite 415f.). Hinsichtlich Letzterem geht es allerdings weniger um seinen Beitrag zur bzw. die Resultate der Wissensentwicklung, als dass der Fokus vielmehr auf den die Unsicherheit reduzierenden Effekten der Experimente liegt. Der Term „unternehmerisch“ (engl. „entrepreneurial“) bezieht sich deshalb auch nicht nur auf neue gegründete, kleine Unternehmen (engl. „start-ups“), sondern mehr auf die allgemeine Auffassung des österreichischen Wirtschaftswissenschaftlers Joseph Alois Schumpeter der „unternehmerischen Funktion“ (engl. “entrepreneurial function”), also der Neukombinierung ggf. sogar schon vorhandener Technologien oder Produkte, was jeder Akteur eines TIS und vor allem jedes interessierte Unternehmen leisten kann. Im Folgenden wird auf die Funktion des Unternehmerischen Experimentierens detailliert eingegangen.

5.1.3.1 Theoretische Grundlage und Indikatoren

Die Rolle von Unternehmern bzw. unternehmerischer Aktivität für ein TIS kann nicht überschätzt werden: Unternehmern kommt die Rolle zu, das Potenzial neuen Wissens, neuer Netzwerke und Märkte in konkrete Maßnahmen umzusetzen, um neue Geschäftsmöglichkeiten zu generieren und wahrzunehmen (Hekkert et al. 2007, Seite 421f.). Ihre oft risikoreichen Experimente sind notwendig, um als Gesellschaft mit der hohen Unsicherheit resultierend aus der Neukombination von technischem Wissen, Anwendungen und Märkten umzugehen und wieder und wieder über Erfolg und Misserfolg auf verschiedene Arten einen sozialen Lernprozess zu durchlaufen.

Indikatoren zur Messung der unternehmerischen Aktivität sind:

- Die Anzahl neuer Marktteilnehmer,
- Maßnahmen zur Diversifizierung des Portfolios etablierter Akteure,
- Die Anzahl von Experimenten mit der neuen Technologie.

Ein TIS ohne hohes Unternehmerisches Experimentieren wird stagnieren (Bergek et al. 2008-1, Seite 415f.).

Indikatoren zur Messung der unternehmerischen Aktivität sind deshalb auch:

- Die Vielfalt von Experimenten mit der neuen Technologie,

- Die Anzahl verschiedener Typen von neuen Anwendungen,
- Die Breite von Technologien, welche in den Anwendungen eingesetzt werden und ihr Charakter von komplementären oder konkurrierenden Technologien.

5.1.3.2 TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität

Hinsichtlich der unternehmerischen Aktivität lässt sich aufzeigen, dass in allen der sechs hauptsächlich analysierten Länder teilweise weitgehende Fortschritte erreicht wurden, was die Abdeckung der Wertschöpfungskette im Land betrifft. Dieser Faktor kann nicht nur als Hinweis auf die Vernetzung der heimischen Industrie gewertet werden, sondern auch aufzeigen, wo in der Wertschöpfungskette genau Unternehmerisches Experimentieren stattfindet:

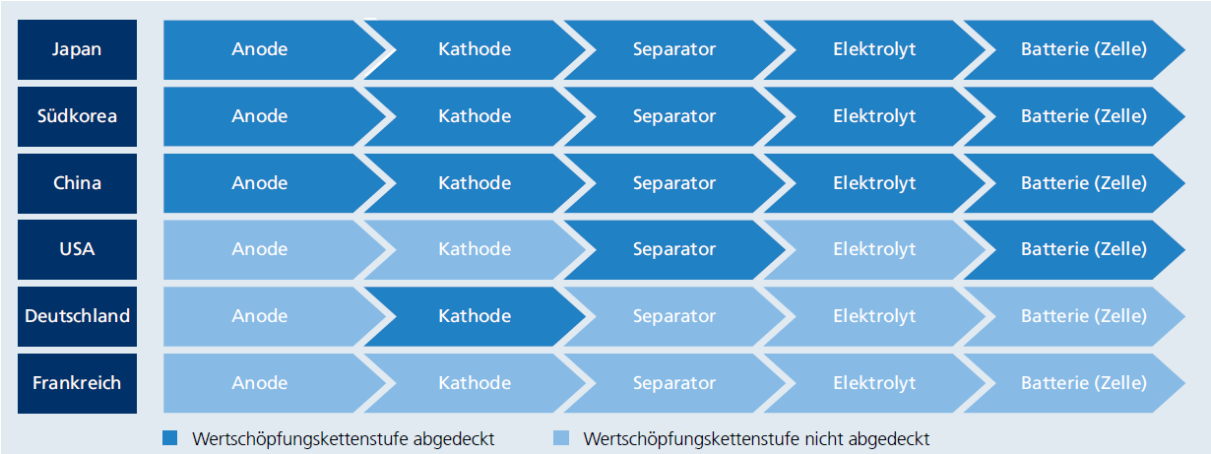
> „Ziel [des Indikators] ist es, die Abdeckung der Wertschöpfungskette als Hinweis auf die Vernetzung der heimischen Industrie im Ländervergleich zu bewerten. […] Ein Teilmarkt gilt als abgedeckt, sofern ein Unternehmen aus einem Land mehr als ein Prozent Marktanteil in diesem Teilmarkt erreicht […]." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 46)

Auch hier führen Japan, Korea und China vor ihren Wettbewerbern (Abbildung 56):

> „Die asiatischen Länder sind in allen Wertschöpfungsstufen dominierend aufgrund ihrer starken Komponenten- bzw. Zulieferindustrie. Vereinzelt haben sich Konzerne durch Tochterunternehmen Zugang zu mehreren Wertschöpfungsstufen verschafft wie z. B. der chinesische Hersteller BYD, der mehrere Stufen abdeckt (sogar bis zum Elektrofahrzeug) oder der koreanische Anbieter LG Chem. Eine Integration kann große Wettbewerbsvorteile mit sich bringen. So sind zellfertigende Unternehmen, die über Kompetenzen in der Komponentenproduktion verfügen, tendenziell im Vorteil, da sie über eine größere Kontrolle hinsichtlich der Technologie verfügen und die Transaktionskosten senken können. Insgesamt decken Japan, China und Korea die gesamte Wertschöpfungskette ab. In den USA erreichen Anoden-, Kathodenmaterial und Elektrolythersteller nicht die ein Prozent Grenze. Unter den deutschen Unternehmen erreicht BASF Toda als Kathodenmaterialhersteller die ein Prozent Grenze. BASF ist zwar auch Anbieter von Elektrolytmaterialien, hier aber in 2015 als Zulieferer an Zellhersteller (LG, SDI, Lishen) im Bereich der Konsumelektronik bzw. kleinformatigen Gerätebatterien (nicht für großformatige Zellen) aktiv.[54] Es besteht damit aber das Potenzial, künftig die Wertschöpfung zu beiden Komponenten abzudecken. Bei der Zellfertigung haben die in 2015 noch durch die Li-Tec verkauften Zellen (rd. 50 MWh) in Deutschland nicht mehr ausgereicht, die ein Prozent Grenze von rd. 150 MWh zu erreichen, weshalb diese Wertschöpfungsstufe nach den hier zu Grunde gelegten Kriterien nicht abgedeckt ist. In Frankreich wird nach diesen Kriterien keine der Wertschöpfungsstufen abgedeckt." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 46)

54 Die für die Meta-Analyse herangezogenen Quellen können in (Fraunhofer ISI 2016, Seite 73) eingesehen werden.

Abbildung 56: Abdeckung der Wertschöpfungskette (Kriterium mindestens 1 Prozent Marktanteil für xEV in 2015)



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 46.

Dieses Bild vervollständigt sich, wenn man weitere Indikatoren wie die Anzahl der großen Unternehmen in jedem Land (Fraunhofer ISI 2016, Seite 44) sowie die Weltmarktanteile der Länder (Fraunhofer ISI 2016, Seite 66) in einzelnen Teilmärkten z. B. für Anoden oder Kathoden miteinander vergleicht. Die asiatischen Länder haben in der Reihenfolge Japan, China und Korea jeweils einen deutlichen Vorsprung auf die USA, Deutschland und Frankreich.

Verschiebungen der Weltmarktanteile könnten sich allenfalls unter den asiatischen Ländern ergeben (Fraunhofer ISI 2016, Seite 67), so China und Korea ihren Rückstand auf den Marktführer Japan immer weiter aufholen.

5.1.3.2.1 Anzahl neuer Marktteilnehmer und Maßnahmen zur Diversifizierung des Portfolios etablierter Akteure

Hinsichtlich der Bedeutung des Wortes „neu“ muss gesagt werden, dass insbesondere bei den Energiespeichern für die Elektromobilität nicht unbedingt komplett „neue“ Marktteilnehmer aufgetreten sind, sondern vor allem in der Batteriezellproduktion bereits seit längerer Zeit etablierte Unternehmen ihr Portfolio ausgeweitet und ihre Fühler über ggf. neu gegründete Tochterunternehmen oder JV in Richtung „neuer“ Anwendungen ausgestreckt haben.

Im Falle der Elektromobilität im Allgemeinen gibt es tatsächlich „neue“ Marktteilnehmer wie Tesla Inc. (siehe Kapitel 4.3.2.2). Und vor allem in China drängen zunehmend Unternehmen auf den Markt, die Elektrofahrzeuge herstellen und den Wettbewerb verschärfen: Eher bekannte Beispiele mit höherem Absatz sind BYD Auto Company oder Geely Holding Group, eher unbekannte Beispiele mit niedrigerem Absatz sind Chongqing Changan Automobile Company oder Zotye International Automobile Trading Company. Dazu kommen JV zwischen chinesischen Unternehmen und ausländischen Automobilherstellern wie im Fall von BMW Brilliance Automotive oder der Shenzhen BYD Daimler New Technology Company.

Gerade weil der Markt für Elektromobilität im Jahr 2017 aber nicht mehr wirklich neu ist, steigt die Anzahl der jährlich „neuen“ Marktteilnehmer nicht mehr maßgeblich.

Als sich der Markt der Energiespeicher für die Elektromobilität allerdings zwischen den Jahren 2007 und 2012 formte, ergab sich schnell eine hohe Dynamik, was Markteintritte und die Verkündung sowie Auflösung von Unternehmenskooperationen und dabei insbesondere JV zwischen Automobilherstellern und -zulieferern, Batterieherstellern und Energie- bzw. Stromversorgungsunternehmen anbelangte. Beispielhaft zeigt das eine Abbildung zum weltweiten Technologischen Innovationssystem für kohlenstoffarme Automobile in (Köhler et al. 2013, Seite 183): Viele der dort noch verzeichneten, zahlreichen JV gibt es allerdings nicht mehr. Als Beispiel kann das von Automobilzulieferer Robert Bosch GmbH und Batteriezellher-steller Samsung SDI im Jahr 2008 gegründete JV SB LiMotive Company gelten, das schon im Jahr 2012 wieder aufgelöst wurde (Fraunhofer ISI 2013, Seite 25). Diese Dynamik hat in den letzten Jahren wieder deutlich nachgelassen, weil sich die maßgeblichen Akteure in der Elektromobilität ggf. auch in einer mehrparteiischen Kooperation etabliert haben.

Der Konsolidierungsprozess der letzten Jahre lieferte Ergebnisse, nach denen sich die Wettbewerbsverhältnisse zunehmend manifestieren. Eine Vertiefungsanalyse zu den Marktstrukturen zeigt deutlich die Überlegenheit der asiatischen Länder, deren Unternehmen die Weltmärkte für Zellen und Komponenten im Wesentlichen bereits unter sich aufgeteilt haben:

> „Japan schneidet im Bereich Marktstrukturen weiterhin am besten ab. Ein zentraler Vorteil ist der reife Markt, gekennzeichnet durch zahlreiche, große Unternehmen, welche alle Bereiche der Wertschöpfungskette abdecken. Lediglich im Bereich Produktion und Handel von Rohstoffen zeigt Japan Schwächen. […] Chinas Markt zeigt eine hohe Dynamik mit ebenfalls zahlreichen, aber im Vergleich zu Japan und Korea meist kleineren Firmen und einer etwas geringeren Marktkonzentration als in Japan. […] Eine Stärke von China im Bereich der Markstrukturen ist weiterhin der Rohstoffzugang im eigenen Land und die Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette […]. Derzeit bestehen noch spezifische Schwächen hinsichtlich der Umweltbewertung und Regierungsführung. […] Korea nimmt hinsichtlich der Markstrukturen eine stabile Position im Mittelfeld ein. Im Vergleich zu Japan sind deutlich weniger, aber große Firmen am Markt aktiv. […] Eine weitere Stärke Koreas ist wie auch in Japan und China die Abdeckung der Wertschöpfungskette im eigenen Land. Durch die fehlende Rohstoffproduktion ist Korea aber wie Deutschland bei der Ressourcenverfügbarkeit stark abhängig vom Weltmarkt. […] Die USA liegen mit Korea im Mittelfeld. Die Abdeckung der Wertschöpfungskette von Komponenten bis Zellfertigung für Elektroautos mit dem Kriterium >1 Prozent Marktanteil auf den jeweiligen Stufen ist in den USA nicht gegeben. Die USA gleichen an anderer Stelle z. B. durch starke Patentaktivitäten im Bereich Recycling aus und halten sich somit vor Deutschland und Frankreich. […] Deutschland nimmt eine Spitzenposition hinsichtlich Regierungsführung, allgemeiner Wettbewerbsfähigkeit ein, liegt aber insgesamt in der Kategorie Markstrukturen nur im unteren Mittelfeld.

> Im Vergleich zu den asiatischen Ländern kann Deutschland [viele] Bereiche […] in der Wertschöpfungskette nur in geringem Maße abdecken […]. Jedoch sind sowohl Materialhersteller als auch die OEM selbst in der Entwicklung und Produktion von Lithium-Ionen-Batteriekomponenten sowie der Fahrzeugintegration aktiv. Insbesondere durch die enge Einbindung in die Automobilindustrie ist dies weiterhin eine gute Ausgangsbasis für die weitere Entwicklung. Hinsichtlich der Rohstoffe ist Deutschland wie Korea stark vom Weltmarkt abhängig. […] Frankreich nimmt den letzten Platz ein, da hier ähnlich wie in Deutschland nur einzelne Akteure aktiv sind. […] Frankreich schneidet hinsichtlich der allgemeinen politischen Rahmenbedingungen und Umweltfaktoren (hier führend) ähnlich gut wie die allgemein führenden Länder ab. Die allgemeine Wettbewerbsfähigkeit wird jedoch etwas schlechter bewertet.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 23)

Weil sich die analysierten Teilmärkte u. a. aufgrund der notwendigen, sehr hohen Investitionen nicht sehr schnell umverteilen lassen, ist davon auszugehen, dass die asiatischen Länder den Vorteil der wirtschaftlichen Stärke ihrer TIS im Bereich der Energiespeicher für die Elektromobilität eher noch weiter ausbauen als verlieren werden.

„Neue“ Marktteilnehmer nicht nur aus anderen Ländern haben es deshalb sehr schwer, in diese bereits verteilten Weltmärkte einzusteigen. Zumindest brauchen sie jedoch einen langen Atem, große Finanzkraft und im besten Fall einen scharfen Blick für attraktive Nischen, um im Wettbewerb gegen die bereits etablierten großen Unternehmen tatsächlich erfolgreich zu werden. Diese Voraussetzungen treffen dabei nicht nur auf Start-ups, sondern auch auf sehr große Unternehmen zu, die ggf. ihr Portfolio diversifizieren möchten. Für Letztere ist der Einstieg noch schwieriger, weil mit der Verbreitung der Elektromobilität in Richtung eines Massenmarktes noch immer eine gewisse Unsicherheit einhergeht. Die Änderung einer Unternehmensstrategie sowie damit ggf. verbundene Risiken müssen z. B. den auf kurzfristige Gewinne fokussierten Aktionären eines börsennotierten Unternehmens zuerst erklärt und sie von der Notwendigkeit überzeugt werden.

5.1.3.2.2 Anzahl und Vielfalt von Experimenten mit der neuen Technologie

Hinsichtlich der in BEV angewendeten Batterietechnologien gibt es mittlerweile zahlreiche Experimente mit einer breiten Vielfalt von Zellchemien (Abbildung 57). Weitere Informationen zum State of the Art: Lithium-Ionen-Batterie (LIB) finden sich oben (siehe Kapitel 3.3.4.1).

In Fahrzeugmodellen wie z. B. dem Nissan Leaf, Tesla Model S und Renault ZOE kommen LIB-Zellen der zweiten Batteriegeneration zum Einsatz:

> „Anoden aus Graphit werden teilweise mit [Lithium-Manganoxid (LMO)] oder [Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC)] versetzt und mit Kathoden aus [Lithium-Nickel-Kobaltaluminium (NCA)], LMO oder NMC in prismatischen oder Beutelzellen kombiniert.“ (VDMA Batterieproduktion 2014, Seite 22)

Abbildung 57: Leistungsparameter von in kommerziell verfügbaren BEV eingesetzten LIB-Zellen, einschließlich Zellchemien.

Zell-hersteller	Chemie	Kapazität	Form	Spannung	Gewicht	Volumen	Energie-dichte	Spezifische Energie	Anwendung in:	
	Anode/ Kathode	Ah		V	kg	l	Wh/l	WH/kg	Firma	Modell
AESC	G/LMO-NCA	33	Pouch	3,75	0,80	0,40	309	155	Nissan	Leaf
LG Chem	G/NMC-LMO	36	Pouch	3,75	0,86	0,49	275	157	Renault	Zoe
Li-Tec	G/NMC	52	Pouch	3,65	1,25	0,60	316	152	Daimler	Smart
Li Energy Japan	G/LMO-NMC	50	Prismatisch	3,7	1,70	0,85	218	109	Mitsubishi	i-MiEV
Samsung	G/LMO-NMC	64	Prismatisch	3,7	1,80	0,97	243	132	Fiat	500
Lishen Tianjin	G-LFP	16	Prismatisch	3,25	0,45	0,23	226	116	Coda	EV
Toshiba	LTO-NMC	20	Prismatisch	2,3	0,52	0,23	200	89	Honda	Fit
Panasonic	G/NCA	3,1	Zylindrisch	3,6	0,045	0,018	630	248	Tesla	Model S

Quelle: VDMA Batterieproduktion 2014, Seite 22 auf Basis von Anderman 2013, Seite 109.

Abbildung 58: Leistungsparameter von in kommerziell verfügbaren PHEV eingesetzten LIB-Zellen, einschließlich Zellchemien.

Zell-hersteller	Chemie	Kapazität	Form	Spannung	Gewicht	Spezifische Energie
	Anode/ Kathode	Ah		V	kg	Wh/kg
Sanyo	NMC	22	Prismatisch	3,68	0,73	112
Samsung	NMC-LMO	26	Prismatisch	3,7	0,85	113
LEJ	LFP	21	Prismatisch	3,3	0,64	108
LG	LMO-NMC	15	Pouch	3,7	0,38	148
A123	LFP	20	Pouch	3,3	0,49	135
AESC	LMO-NCA	23	Pouch	3,75	0,57	151

Quelle: VDMA Batterieproduktion 2014, Seite 22 auf Basis von Anderman 2013, Seite 110.

Bei den in PHEV eingesetzten Batterietechnologien kommen weitgehend ähnliche Zellchemien zum Einsatz, mit niedrigerer Kapazität, z. B. im Chevy Volt, Toyota Prius PHEV und Mitsubishi Outlander PHEV (Abbildung 58).

Entsprechend der weiter folgenden FuE bzw. dem technologischen Fortschritt werden weitere Materialien durchgetestet und zum Einsatz kommen, sowie es das chemische Elementarsystem erlaubt und der Markt die neuen Anwendungen annimmt. Die wesentlichen Richtungen in FuE zu elektrochemischen Energiespeichertechnologien stehen aber fest, Überraschungen sind weitestgehend ausgeschlossen: Auch alle komplementären oder konkurrierenden Technologien sind bekannt und befinden sich entweder bereits im Einsatz

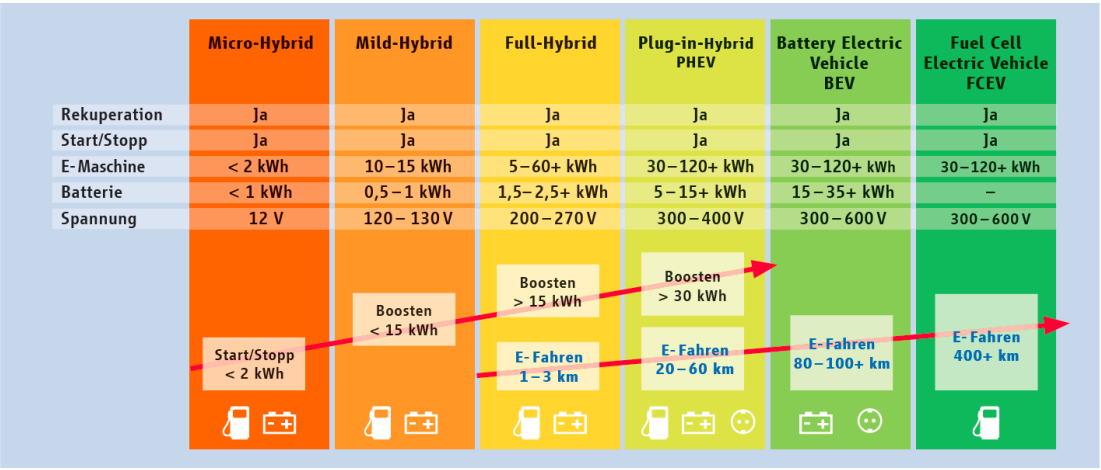
oder sind kurz davor, in den Markt eingeführt zu werden. Und auch auf der Anwendungsebene sind alle relevanten Typen von Elektrofahrzeugen bzw. Antriebssträngen ermittelt worden.

Änderungen und Experimente gibt es allerdings auch da, wo es um die konkreten Geschäftsmodelle zur Vermarktung von Energiespeichern für die Elektromobilität geht, denn technologische FuE und ökonomischer Vertrieb gehen Hand in Hand:

> „Aber auch Finanzmodelle für Batteriepacks, als Ausweg für eine noch unzureichende Lebensdauer und noch (zu) hohe Kosten am Elektrofahrzeug könnten eine Möglichkeit darstellen, um der noch nicht vollständig ausgereiften Technologie zu einem (breiteren, schnelleren) Markteintritt bzw. der Diffusion zu verhelfen. Mit Leasingmodellen für Fahrzeugbatterien (beispielsweise praktiziert beim Renault ZOE) kann z. B. die Zeit überbrückt werden, in welcher der Markthochlauf stattfinden soll, obwohl die [Technologie] noch nicht [massenmarkttauglich] ist (d. h. hohe Reichweite zu ähnlichen Preisen wie die herkömmlichen Automobile mit [Verbrennungsmotor]). Gerade der aktuelle Trend mehrerer Automobilhersteller zu höheren Reichweiten mit ca. 500 km und folglich höheren Batteriekosten am Elektrofahrzeug könnte damit wirtschaftlicher dargestellt werden. Gute Geschäftsmodelle bzw. Vermarktungsinstrumente können daher auch ein Schlüssel zum Massenmarkt werden.“ (Fraunhofer ISI 2015-2, Seite 8f.)

5.1.3.2.3 Breite von Technologien in neuen Anwendungen

Abbildung 59: Anforderungs- und Nutzungsprofile des Elektroantriebs.[55]



Quelle: ZVEI 2012, Seite 10.

Elektrochemische Energiespeichertechnologien können in mehreren Fahrzeugkonzepten der Elektromobilität eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.3.1). Ein Vergleich der Anforderungs- und Nutzungsprofile des Elektroantriebs zeigt, welche Bedeutung der in den neuen Anwendungen eingebauten Technologien zukommt (Abbildung 59). Im Allgemeinen gilt: Je größer der in ein Elektrofahrzeug eingebaute Energiespeicher ausfällt, desto weiter kann es elektrisch fahren. Damit wird deutlich, dass nicht ein- und dieselbe elektrochemische Energiespeichertechno-

[55] REEV reihen sich zwischen PHEV und BEV ein.

logie in die jeweilige Anwendung eingebaut werden kann oder muss. Weil z. B. verschiedene Batterietechnologien verschiedene Eigenschaften mit sich bringen (siehe Kapitel 3.3.4), gibt es ganz unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten.

5.1.3.3 Zusammenfassung bzw. Fazit

In diesem Abschnitt zur Funktion des Unternehmerischen Experimentierens wurden folgende Schwächen und Stärken der TIS aufgezeigt:

- Die Anzahl neuer Marktteilnehmer und Maßnahmen zur Diversifizierung des Portfolios etablierter Akteure (siehe Kapitel 5.1.3.2.1) hat sich insbesondere in den Jahren der anfänglichen Formierung eines Marktes der Energiespeicher für die Elektromobilität zwischen den Jahren 2007 und 2012 deutlich erhöht bzw. wurden durchgeführt. Es entstand eine hohe Dynamik, was Markteintritte und die Verkündung sowie Auflösung von Unternehmenskooperationen und dabei insbesondere JV anbelangte. In der folgenden Konsolidierungsphase hielten sich vor allem die großen Industriekonglomerate aus den asiatischen Ländern, welche die mit Abstand größten Marktanteile aufweisen. In den nächsten Jahren ist allenfalls mit einer Verschiebung der Weltmarktanteile zwischen den drei Ländern bzw. in Richtung Chinas und Koreas zu rechnen.
- Die Anzahl und Vielfalt von Experimenten mit der neuen Technologie (siehe Kapitel 5.1.3.2.2) läuft nach wie vor, es wird eine breite Vielfalt von Zellchemien eingesetzt, aus der allerdings einige wenige öfter favorisierte Zellchemien herausstechen. Vorteile liegen auch hier auf Seiten der asiatischen Hersteller aus Japan, Korea und China.
- Die Breite von Technologien in neuen Anwendungen (siehe Kapitel 5.1.3.2.3) ist ebenfalls relativ groß, PHEV und BEV stellen die bisher wichtigsten Beispiele dar. In Führung liegt in der Automobilindustrie/Elektrofahrzeughersteller (siehe Kapitel. 4.3.2) China, gefolgt von Frankreich/Japan und den USA.

5.1.4 Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte

Gerade das Muster der Wissensverbreitung und damit auch der Entwicklung positiver externer Effekte ändert sich gerne, während TIS wachsen und reifen (Bergek et al. 2008-2, Seite 585ff.). In der formenden Phase (engl. „formative phase“), wenn sich die Akteure, Netzwerke und Institutionen aufstellen und positionieren und ggf. mehrere TIS noch überlappen, treten positive externe Effekte sogar zwischen verschiedenen TIS auf und nicht nur innerhalb einem einzigen TIS. Die Ausnutzung dieser Überschneidungen kann einen starken Aufwärtsprozess (engl. „bottom up process“) des Wachstums eines spezifischen TIS auslösen. Deshalb dürfen nicht nur Überschneidungen durch Wissensabfluss (engl. „knowledge spillover“) berücksichtigung werden, sondern auch die Verbundenheit hinsichtlich aller strukturellen Komponenten. Bis hin zu einer vollständig gleichberechtigten Teilung struktureller Komponenten können verbundene TIS beid- bzw. gegenseitig von den Funktionen profitieren, die diese Komponenten formen. Die Stärkung von einer Funktion in einem TIS mag also die Entwicklung positiver externer Effekte stimulieren, die zum Aufbau der strukturellen

Komponenten in einem anderen TIS beitragen. Gleiches gilt natürlich auch für die Entwicklung negativer externer Effekte.

Später bzw. in der Wachstumsphase (engl. „growth phase“) ist das Wissen dann oft schon so spezialisiert, dass seine Verbreitung und die Entwicklung positiver externer Effekte vor allem in einem einzigen TIS stattfindet. Im Folgenden wird auf die Funktion der Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte detailliert eingegangen.

5.1.4.1 Theoretische Grundlage und Indikatoren

Wissensverbreitung ist wichtig, weil der Austausch von Informationen über Erfolge wie Misserfolge eine Grundlage für den Fortschritt einer Gesellschaft insgesamt darstellt. Politische Entscheidungen sollten immer Bezug nehmen auf die neuesten technologischen Erkenntnisse und Ziele von FuE sollten durch wechselnde Normen und Werte beeinflusst werden (Hekkert et al. 2007, Seite 423). Aktivitäten in Netzwerken können deshalb auch als eine Art Lernen durch Interaktion (engl. „learning by interacting“) bzw. Lernen durch Nutzung (engl. „learning by using“) betrachtet werden, weil die Verbreitung und Neukombination des vorhandenen Wissens durch den Austausch sowie Dienstleistungen der beteiligten Akteure erfolgt.

Indikatoren zur Messung der Wissensverbreitung sind:

- Workshops und Konferenzen, z. B. Anzahl, Umfang und inhaltliche Schwerpunkte,
- Netzwerke, z. B. Anzahl und Umfang sowie Intensität des Austausches.

Dazu kommt aber auch die Generierung positiver externer Effekte als Schlüsselprozess der Entstehung und des Wachstums eines TIS durch den Eintritt neuer Akteure (Bergek et al. 2008-1, Seite 418). Neue Akteure stärken die funktionelle Dynamik eines TIS durch die Generierung positiver externer Effekte, wovon alle anderen Akteure des TIS profitieren – was die Funktion als solche nicht unabhängig sein lässt, sondern durch die Stärkung der anderen sechs Funktionen wirken lässt.

Indikatoren zur Messung der positiven externen Effekte sind:

- Positive externe Effekte, z. B. in der Form der Auflösung von Unsicherheit und politischer Macht der etablierten Industrie, Legitimität sowie Fluss von Informationen und Wissen jeglicher Art, z. B. über einheitliche Arbeitsmärkte.

5.1.4.2 TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität

Dadurch, dass Regierungen weltweit und insbesondere in den sechs im Rahmen dieser Dissertation analysierten Ländern in den letzten Jahren heftigen Einfluss auf die Suchrichtung genommen haben, haben sich die Aktivitäten hinsichtlich FuE sowohl im öffentlichen als auch im privaten Bereich so deutlich verstärkt, dass sich das Wissen über elektrochemische Energiespeichertechnologien und damit nicht nur Batterien, sondern auch Brennstoffzellen, weit verbreitet hat (Köhler et al. 2013, Seite 183f.). Es gibt auch ein recht großes Stellenangebot

für Arbeitskräfte, besonders vor dem Hintergrund der Größe und Bedeutung der Automobilindustrie insgesamt, z. B. in Deutschland.

Die Wissensverbreitung hinsichtlich der Integration von Batterietechnologien in konkrete Anwendungen der Elektromobilität findet besonders intensiv vor allem durch das Eingehen von strategischen Partnerschaften durch die Hauptakteure statt, wobei das weltweite TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität kein wirklich einfach zugängliches Netzwerk darstellt, innerhalb dessen unzählige Unternehmen mit einer weiten Bandbreite von technischen Lösungen konkurrieren. Auch die eingesetzten Batterietechnologien sind eher konvergent (siehe Kapitel 5.1.3.2.2), genau wie auch die Anzahl der „neuen" Anwendungen hinsichtlich Fahrzeugkonzepten der Elektromobilität deutlich beschränkt ist (siehe Kapitel 3.3.1; 5.1.3.2.3). Vor diesem Hintergrund ist offensichtlich, dass die Elektrofahrzeughersteller (zusammen mit ihren Zulieferunternehmen) mehr oder weniger alle an den gleichen Antriebssträngen für die gleichen Typen von Elektrofahrzeugen arbeiten, mit unterschiedlichen strategischen Schwerpunkten (siehe Kapitel 4.3.2) (Köhler et al. 2013, Seite 183f.). Dadurch ist das Wissen über den Einsatz großformatiger Batterien in Elektrofahrzeugen auf eher wenige große Unternehmen beschränkt statt weitflächig verbreitet.

5.1.4.2.1 Anzahl, Umfang und Inhalte von Workshops und Konferenzen

Leitmessen für elektrochemische Energiespeichertechnologien gibt es mittlerweile auf praktisch allen Kontinenten bzw. in allen sechs analysierten Ländern. In Europa bzw. Frankreich ist das vor allem die im Herbst in Nizza stattfindende und alljährlich fortlaufend organisierte „Batteries"-Konferenz (Batteries Event 2017). Das ebenfalls im Herbst stattfindende Äquivalent in Deutschland ist die „World of Energy Solutions" in Stuttgart, welche mit „BATTERY+STORAGE", „f-cell" und „e-mobility solutions" drei Ausstellungsbereiche aufweist (World of Energy Solutions 2017). Dazu kommt das rein auf Batterietechnologien ausgerichtete „Batterieforum Deutschland", welches im Frühjahr in Berlin stattfindet (KLiB 2017-2).

In den USA sorgt vor allem die alljährlich im Sommer in Detroit, Michigan, stattfindende „advanced automotive batteries conference" (aabc) für Aufsehen (aab 2017-1). In den letzten Jahren bekam sie auch ein immer zu Jahresbeginn in Mainz bzw. Deutschland stattfindendes Äquivalent, die „aabc europe" (aab 2017-2). Dazu kommt „The Battery Show", welche immer in Novi, Michigan/USA, stattfindet (Smarter Shows 2017).

In Asien macht die „Int'l Rechargeable Battery Expo BATTERY JAPAN" im Frühjahr eines jeden Jahres große Schlagzeilen (Reed Exhibitions 2017-1), die nur eine von zahlreichen Begleitmessen unter dem Dach der zwei Mal im Jahr in Osaka und Tokio stattfindenden „World Smart Energy Week" ist (Reed Exhibitions 2017-2). In Korea findet die größte Konferenz zu großformatigen Energiespeichern für die Elektromobilität alljährlich im Herbst in Seoul statt, die „InterBattery", welche u. a. von der „Korea Battery Industry Association (KBIA)" organisiert wird (Interbattery 2017).

Die immer im Jahreswechsel im Sommer in Peking oder Shenzhen stattfindende „China International Battery, Raw Material, Producing Equipment and Battery Parts Fair (CIBF)" ist

Chinas größte Konferenz in diesem Bereich (BHOEC 2016). Insbesondere in China gibt es aber in praktisch allen großen Metropolen weitere Konferenzen zu Elektromobilität im Allgemeinen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien im Besonderen. Das Prestige dieser Konferenzen soll manchmal auch auf kleinere Städte bzw. eher unbekannte Regionen des Landes ausstrahlen, um interessierte Investoren aufmerksam zu machen.

Nicht nur innerhalb der sechs betrachteten Ländern sondern in vielen weiteren Ländern weltweit sind neben den oben genannten großen Leitmessen viele weitere kleine Ausstellungen und Konferenzen entstanden, die regelmäßig stattfinden und sich ggf. auch nur einem einzigen Aspekt der Elektromobilität (z. B. der Ladeinfrastruktur) oder bestimmten elektrochemischen Energiespeichertechnologien (z. B. Lithium-Schwefel-Batterien) widmen. Auf dieser Ebene findet dementsprechend ein reger Austausch zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft statt.

Neben Fachtagungen, Kongressen und Konferenzen bieten auch Seminare und Technikforen sowie Lehrgänge und Schulungen die Möglichkeit, eine Fortbildung hinsichtlich der Elektromobilität im Allgemeinen und elektrochemische Energiespeichertechnologien im Besonderen wahrzunehmen. In Deutschland aktiv sind z. B. der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) sowie der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE).

International ist das israelische Unternehmen Shmuel De-Leon Energy Ltd. ein weithin präsenter Anbieter von u. a. Newslettern, Beratungsdienstleistungen, aber auch Energiespeicher-Seminaren und Datenbanken z. B. der US-amerikanischen Batterie- und Brennstoffzellen-Patente (Shmuel De-Leon 2017). Seminare werden weltweit in Kooperation mit den unterschiedlichsten Partnern organisiert.

Auch in den anderen Ländern Frankreich, den USA, China, Japan und Korea sind entsprechende Unternehmen in den Markt eingetreten, um den mit dem Fortschritt des Markthochlaufes der Elektromobilität wachsenden Fortbildungsbedarf für Fachkräfte zu Energiespeichern für die Elektromobilität zu decken.

5.1.4.2.2 Anzahl, Umfang und Intensität von Netzwerken

Auch Netzwerke gibt es zahlreiche, sowohl zu Elektrofahrzeugen bzw. zur Elektromobilität als auch für die darin eingesetzten Energiespeichertechnologien, europa-, weltweit und in den sechs im Rahmen dieser Dissertation insbesondere analysierten Ländern.

Deutschland

Der Bundesverband eMobilität e.V. (BEM) setzt sich dafür ein, die Mobilität mit dem Einsatz Erneuerbarer Energien auf Elektromobilität umzustellen. Auch die Verbände der bereits etablierten Automobilindustrie wie z. B. der Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) oder der Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller e.V. (VDIK) steuern dazu bei und bringen ihre Position sowohl in die öffentliche Diskussion als auch in die entsprechenden Fachgremien ein, z. B. die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) mit dem Ziel, Deutschland bis zum Jahr 2020 zum Leitanbieter und Leitmarkt zu machen sowie eine Stückzahl von einer Million

Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu erreichen (NPE 2017-3). Der Bundesverband Solare Mobilität e.V. (BSM) vertritt Deutschland in “The European Association for Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicles” (AVERE).

Hinsichtlich der Energiespeicher versammelt der Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES) Institutionen und Unternehmen unter einem Dach, die mit allen Aspekten vor allem rund um stationäre Energiespeicherlösungen im Kontext der Energiewende arbeiten. Konkret in Bezug auf die Lithium-Ionen-Batterie haben sich zahlreiche Industrieunternehmen und anwendungsnahe Forschungsinstitute zum „Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien“ (KLiB) zusammengeschlossen (KLiB 2017-3), das die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands verbessern möchte. Bezüglich der energieumwandelnden Brennstoffzelle gibt es eigene Industrieverbände, auf welche an dieser Stelle allerdings nicht detailliert eingegangen wird.

Zahlreiche weitere Industrieverbände informieren ihre Mitglieder über neue Entwicklungen in der Elektromobilität und bei elektrochemischen Energiespeichertechnologien, insofern es das Tagesgeschäft der jeweiligen Unternehmen kurz-, mittel- oder langfristig betreffen könnte und nehmen dazu sowohl intern als auch extern Stellung. Beispielhaft erledigt dies der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) mit seinem Forum E-MOTIVE, innerhalb dessen interdisziplinär an Aspekten zu Anwendungen und Technik von Elektromobilität gearbeitet wird (VDMA 2017-1). Innerhalb des Forums E-MOTIVE stehen beim VDMA-Industriekreis Batterieproduktion ganz explizit die großformatigen Energiespeichersysteme für mobile und stationäre Anwendungen im Vordergrund (VDMA 2017-2).

Der Austausch bezüglich Elektromobilität und Energiespeichern findet allerdings auch unterhalb der Bundesebene statt, wo es z. B. schon auf Länderebene zahlreiche weitere Cluster, Foren und Netzwerke gibt. In Baden-Württemberg trifft dies auf das Cluster Elektromobilität Süd-West zu, das von der e-mobil BW GmbH, der Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg, koordiniert wird (e-mobil BW 2017). Auch auf der Ebene von größeren Demonstrationsprojekten hat sich ein reger Austausch mit regelmäßigen Konferenzen und Meetings aller Beteiligten entwickelt, zum Beispiel im Rahmen des Förderprogramms „Schaufenster Elektromobilität“ (Deutsches Dialog Institut 2017).

Japan

In Japan arbeitet die „Association for the Promotion of Electric Vehicles“ (APEV) an der flächendeckenden Verbreitung von Elektromobilität. Mitglieder umfassen neben zahlreichen Unternehmen aus dem In- und Ausland und Forschungseinrichtungen auch Präfekturregierungen (APEV 2017). Auch die Industrieverbände der etablierten Automobilindustrie mischen mit, z. B. die Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. (JAMA), aber auch zahlreiche Verbände von Zulieferunternehmen.

Im Bereich der Energiespeicher für die Elektromobilität spielt die Battery Association of Japan (BAJ) eine große Rolle mit dem Ziel, FuE von Batterien und Batterie-anwendenden Produkten, Umweltschutz, Recycling, Qualität und Leistungsverbesserung sowie Produktsicherheit voranzutreiben (BAJ 2017).

Im Falle Japans ist eine Besonderheit zu beachten:

> „Die Entwicklung von Batterieforschung wird auch in Japan sowohl von Seiten der Regierung als F&E-Förderung als auch von industrieller Seite finanziert. Industriegeförderte F&E-Aktivitäten sind in der Regel geheim und werden häufig erst vor Beginn einer Serienproduktion durch eine Pressemitteilung in der Öffentlichkeit bekannt gemacht oder durch die Anmeldung von Patenten. […] Durch die praktizierte Geheimhaltung ist die Höhe des zur Verfügung stehenden F&E-Budget für industriell geförderte Batterieforschung im Automobil-Bereich weitgehend unbekannt.“ (VDI/VDE-IT 2014, Seite 37)

Durch diese enorme Geheimhaltung ist es schwierig, eine enge Zusammenarbeit zwischen z. B. zwei batterieherstellenden Unternehmen auf horizontaler Ebene vorzufinden. Viel enger kooperieren Unternehmen in Japan vertikal bzw. entlang einer Wertschöpfungskette bzw. innerhalb von Lieferbeziehungen zwischen Automobilherstellern und Zulieferern, wo die Bindungen über viele Jahrzehnte entstanden und äußerst stark sind.

Korea

Das Ziel der Verbreitung von Elektrofahrzeugen wird in Korea von der „Korea Electric Vehicle Industry Association“ (KEVIA) vorangetrieben. Die „Korea Automobile Manufacturers Association“ (KAMA) repräsentiert die Interessen der Automobilhersteller in Korea. KAMA engagiert sich auch in dem durch das Ministry of Knowledge Economy (MKE; heute „Ministry of Trade, Industry and Energy“, MOTIE) im Jahr 2010 initiierte Forum zur „Green Car Strategy“, in welchem sich mehr als 500 Regierungsvertreter, Repräsentanten der Automobilindustrie und unabhängige Experten einbringen und ihre Ideen teilen (The Korea Times 2010).

Rund um elektrochemische Energiespeichertechnologien ist die „Korea Battery Industry Association“ (KBIA) zuständig, die im Jahr 2011 gegründet wurde und die koreanische Batterieindustrie in der Öffentlichkeit mit einer Stimme vertreten sowie die Wettbewerbsfähigkeit des nationalen Industriestandortes sicherstellen soll (KBIA 2017).

In Korea betreibt außerdem „The Korean Society of Automotive Engineers“ (KSAE) (KSAE 2017) das Sekretariat der „Electric Vehicle Association of Asia Pacific“ (EVAAP) (EVAAP 2017), die im Jahr 1990 als internationaler Verbund von Institutionen und Organisationen aus China, Hong Kong, Japan und Korea gegründet wurde, um die Entwicklung und Verbreitung von Elektrofahrzeugen in Asien und der Pazifikregion zu unterstützen. EVAAP ist wie AVERE auch ein Mitglied in der “World Electric Vehicle Association” (WEVA) (WEVA 2017).

China

Die „China Electric Vehicle Association“ (CEVA) wurde im Jahr 2004 gegründet und versucht, ein Intermediär für die gesamte Elektrofahrzeug-Industrie zu sein (CEVA 2017). Auch die „China Association of Automobile Manufacturers“ (CAAM) hat ein eigenes Komitee für sogenannte „New Energy Vehicles“ und zahlreiche Mitgliedsunternehmen, die bereits Elektrofahrzeuge herstellen (CAAM 2013). In der „China Industrial Association of Power Sources“ (CIAPS) dreht sich alles um elektrochemische Energiespeichertechnologien.

USA

In den USA stellt die „Electric Drive Transportation Association“ (EDTA) diejenige Handelsorganisation dar, welche Batterie-, Hybrid-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzelltechnologien für elektrische Antriebe und Infrastruktur unterstützt und der einzige Verbund ist, der nach eigenen Aussagen die gesamte Wertschöpfungskette von elektrischen Antrieben abdeckt (EDTA 2016). Die EDTA ist auch Mitglied in der WEVA. Daneben ist auch die bereits etablierte Automobilindustrie mit den „Global Automakers“ vertreten, ein Verbund der in den USA vertretenen internationalen Automobilhersteller (Global Automakers 2016). Auch die „Alliance of Automobile Manufacturers“ (Auto Alliance) möchte als eine Stimme für die vereinte Automobilindustrie sprechen (Auto Alliance 2017). Weil in der Auto Alliance zahlreiche Automobilhersteller aus dem Ausland mitwirken, haben sich die drei einheimischen Automobilhersteller FCA US LLC, Ford Motor Company und General Motors Company im sogenannten „American Automotive Policy Council“ (AAPC) zusammengeschlossen, um ihre Politikempfehlungen spezifisch für die USA zu entwerfen und zu kommunizieren (AAPC 2017).

Es gibt daneben noch zahlreiche weitere Industrieverbünde in den USA, welche sich an der breiten Durchsetzung von Elektromobilität beteiligen, z. B. die „Automotive Parts Remanufacturers Association“ (APRA) oder „Original Equipment Suppliers Association“ (OESA) mit allen untergeordneten Verbänden und Vertretungen im Ausland.

Es gibt in den USA mehrere Organisationen, die sich elektrochemischen Energiespeichertechnologien verschrieben haben, dabei sind aber auch einige Netzwerke, die sich rein auf Blei-Säure-Batterien und den Handel derselben fokussiert haben. Deutlich weitergehend ist das Profil der „National Alliance for Advanced Transportation Batteries“ (NAATBatt), mit deren Gründung im Jahr 2008 die Erschaffung eines Forschungs- und Entwicklungskonsortiums von Unternehmen zur Unterstützung der Produktion von LIB und anderen fortgeschrittenen Batterietechnologien in den USA anvisiert wurde (NAATBatt 2017). Die Mission von NAATBatt war dabei ausdrücklich, im Laufe des Markthochlaufes der Elektromobilität sicherzustellen, dass die Abhängigkeit der US-amerikanischen Fahrzeugflotte von ausländischem Benzin nicht einfach in eine Abhängigkeit von ausländischen Batterien eingetauscht würde.

Bereits im Jahr 1991 gegründet, vom Ziel her aber weitgehend gleich vereint auch die im Jahr 2009 in „The Rechargeable Battery Association“ (PRBA) umbenannte Organisation zahlreiche Industrieunternehmen, Batteriehersteller und Nutzer von großformatigen LIB und Nickel-Metallhydrid-Batterien (PRBA 2017). Und die in den USA beheimatete „Energy Storage Association“ (ESA) hat mit all ihren Mitgliedsunternehmen die Vision, eine kräftige Stimme und unverzichtbare Ressource für die gesamte globale Industrie rund um Energiespeichertechnologien jeden Typs zu sein (ESA 2017).

Es gibt zahlreiche weitere Energiespeicherverbünde in den USA, die auf Ebene der Bundesstaaten versuchen, Energiespeicher flächendeckend einzusetzen. Auf diese Netzwerke soll an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen werden.

Frankreich

In Frankreich kümmert sich die Organisation „Association nationale pour le développement de la mobilité électrique“ (AVERE-France) auf nationaler Ebene um die Entwicklung der Elektromobilität (AVERE-France 2017). Sie vertritt Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette aber auch aus dem Handel, darüber hinaus u. a. auch Forschungseinrichtungen und private wie öffentliche Nutzer von Elektrofahrzeugen. AVERE-France vertritt Frankreich in AVERE. Ebenfalls engagiert in dieser Hinsicht ist die „Association pour l'Avenir du Véhicule Electrique Méditerranéen“ (AVEM), die den Schwerpunkt aber deutlich auf die Vermittlung von Informationen zwischen Elektrofahrzeugherstellern, -Importeuren und anderen legt (AVEM 2017). Auch die etablierte Automobilindustrie bringt sich ein, etwa das „Comité des Constructeurs Français d’Automobiles“ (CCFA), der Verband der (französischen) Automobilhersteller oder die „Fédération des Industries des Équipements pour Véhicules“ (FIEV), der Verband der Zulieferindustrie.

Es fällt allerdings auf, dass es keinen französischen Verband oder ein Netzwerk auf nationaler Ebene zu geben scheint, das sich ausschließlich und eigens mit elektrochemischen Energiespeichertechnologien auseinandersetzt. Dadurch bleibt es den entsprechenden Forschungseinrichtungen und Unternehmen selbst überlassen, sich ggf. in internationale Fachgremien einzubringen.

Es gibt zahlreiche weitere Organisationen rund um die Elektromobilität, welche unterhalb der nationalen Ebene an der möglichst flächendeckenden Verbreitung von Elektromobilität arbeiten, z. B. die „Agence des Mobilités Electriques“ (AME) in Paris.

5.1.4.2.3 Positive externe Effekte

Nicht nur der Arbeitsmarkt rund um die Automobilindustrie und ihre Zulieferer entlang der Wertschöpfungskette ist riesig, auch der Arbeitsmarkt rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität wächst beständig:

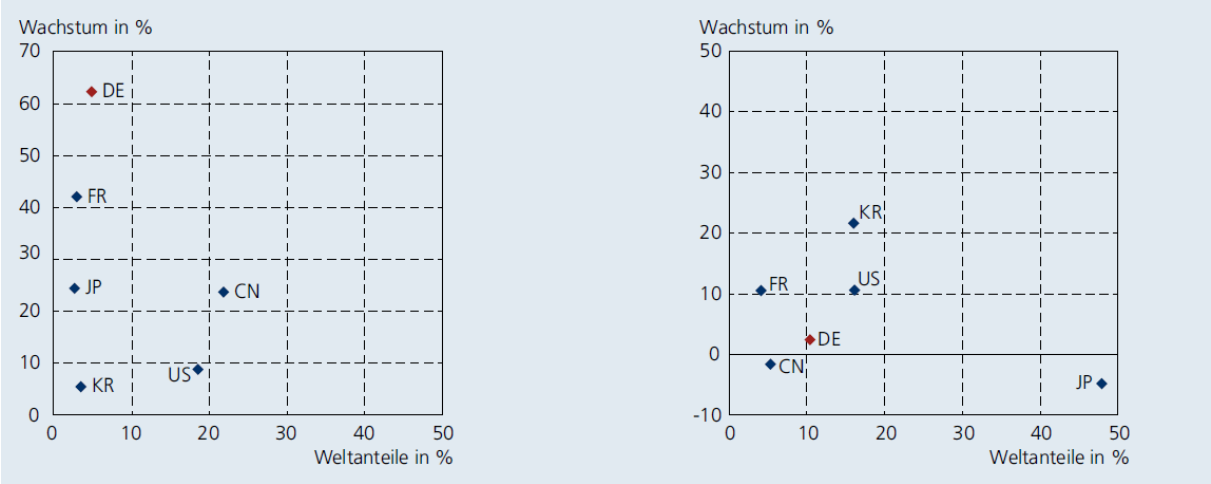
> „Ziel [des Indikators] ist es, das Humankapital bzw. Fachkräfte und Nachwuchs zu ermitteln. Dies dient als Hinweis darauf, ob und wie sich die Länder die für eine industrielle Verankerung wichtigen personellen Ressourcen aufbauen. […] Gemessen wird der Anteil der Autoren wissenschaftlicher Arbeiten (Publikationen) und Erfinder technologischer Innovationen (Patente) sowie die Zunahme der Autoren und Erfinder in den aktuellsten drei Jahren (Patente 2011–2013, Publikationen 2013–2015) im Ländervergleich [..] Basis sind die [oben] vorgestellten Suchstrategien zu Batteriepublikationen und -patenten mit Fokus hier auf elektromobilen Anwendungen (xEV). Publikationen und Patente erfassen somit typischerweise Naturwissenschaftler bzw. Ingenieure im Bereich der Batterie- und Automobil-FuE und weniger technische Fachkräfte.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 53)

Das Ergebnis überrascht bei den Publikationen, bei den Patenten eher nicht:

> „Vor allem hinsichtlich der Patente weist Japan auch im Vergleich zum Energiespeicher-Monitoring 2014 den mit deutlichem Abstand höchsten Anteil an Erfindern im Bereich der

„Batterieentwicklung für die Elektromobilität“ auf. Japan ist traditionell und mit Blick auf die marktnahe Entwicklung extrem gut durch erfahrene Experten aufgestellt. Allerdings liegt das Wachstum mittlerweile im negativen Bereich und Länder wie Korea oder die USA bauen (zwar auf niedrigerem Niveau) neues Humankapital auf. Ein hohes wissenschaftliches Humankapital gemessen anhand der Autorenanzahl bei Publikationen weisen insbesondere die USA und China auf. Deutschland weist hier aktuell aber die höchste Dynamik auf, gefolgt von Frankreich, Japan und China.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 53)

Abbildung 60: Autoren internationaler Publikationen (Batterien für xEV; links) und internationale Erfinder von Patenten (Batterien für xEV; rechts).



Quelle: Fraunhofer ISI 2016, Seite 53.

Der Arbeitsmarkt ist dabei stark in Bewegung, wenn auch nicht besonders transparent. Beispiele für Letzteres tauchen unregelmäßig in der öffentlichen Presse auf, z. B. dass Tesla Inc. von Apple Inc. Arbeitnehmer zu stehlen versuchte (Business Insider 2015). Apple Inc. wiederum warb Batterieexperten von der Samsung Group ab (The Korea Times 2015). Diese „Arbeitnehmerbewegungen“ zeigen, dass der Arbeitsmarkt sehr flexibel ist und durchaus arbeitnehmerfreundlich. So sollen auch ältere, teilweise zwangsläufig verrentete Arbeitnehmer aus Japan nach Korea umziehen, weil sie dort noch in den Ruhestand hinein als Ratgeber mitarbeiten und Geld verdienen dürfen. Auch in Deutschland wechseln Batterieexperten hin und wieder die Unternehmen, nicht nur bei Übernahmen oder Umstrukturierungen.

Auch mit der großen Anzahl von Workshops und Konferenzen in praktisch allen relevanten Ländern weltweit (siehe Kapitel 5.1.4.2.1) sowie den entsprechenden Netzwerken rund um elektrochemische Energiespeichertechnologien und Elektromobilität (siehe Kapitel 5.1.4.2.2) wird deutlich, dass zahlreiche positive externe Effekte realisiert werden. Die Auflösung von Unsicherheit wird dabei nicht nur darin deutlich, dass auch die etablierte Industrie auf die neue, fortgeschrittene Technologie eingehen musste, sondern auch dadurch, dass die Legitimität (siehe Kapitel 5.1.5) sowie der Fluss von Informationen und Wissen z. B. über einheitliche Arbeitsmärkte bereits stattfindet und kontinuierlich anwächst.

Elektrochemische Energiespeichertechnologien treiben die FuE zahlreicher Anwendungen sowohl im mobilen als auch im stationären Bereich, von kleinen Zweirädern bis hin zu containergroßen Speichern. Die großen Erwartungen hinsichtlich des zukünftigen Markthochlaufs in der Elektromobilität und dem damit verbundenen signifikanten Wachstum des Energiespeichermarktes sorgen dafür, dass sich kein Unternehmen weltweit mehr aus den genannten Industrien vor den entsprechenden Trends verschließen kann.

5.1.4.2.4 Zusammenfassung bzw. Fazit

In diesem Abschnitt zur Funktion der Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte wurden folgende Schwächen und Stärken der TIS aufgezeigt:

- Die Anzahl, der Umfang und die Inhalte von Workshops und Konferenzen (siehe Kapitel 5.1.4.2.1) sind in allen sechs der im Rahmen dieser Dissertation besonders detailliert analysierten Länder gestiegen bzw. umfangreicher geworden. Gerade zu Beginn der Entstehung des TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität versuchten auch zahlreiche Akteure z. B. aus anderen TIS in der Automobil-, Chemie- oder Maschinenbauindustrie, sich im neuen TIS zu etablieren und die Aufstellung neuer Geschäftsfelder auszuloten, was in einem aktiven Wissensaustausch über mehrere Industriesparten hinweg resultierte und über die Jahre bzw. mit dem einsetzenden Konsolidierungsprozess wieder zurückgegangen ist. Die Entwicklung positiver externer Effekte hat es allerdings entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Energiespeicher für die Elektromobilität gegeben und ist auch weiterhin notwendig, z. B. wenn es ganz konkret darum geht, die elektrochemischen Energiespeichertechnologien in großen Batteriesystemen in Elektrofahrzeuge zu integrieren.
- Die Anzahl, der Umfang und die Intensität von Netzwerken (siehe Kapitel 5.1.4.2.2) sind in allen sechs der im Rahmen dieser Dissertation besonders detailliert analysierten Länder gestiegen bzw. gewachsen. Über die Jahre bzw. mit dem oben genannten Konsolidierungsprozess haben sich die entstandenen Netzwerke verdichtet, so dass die Intensität des Austausches innerhalb eines Netzwerkes im Schnitt eher gewachsen ist. Interessant ist auch die Beobachtung, dass die Netzwerke aus anderen TIS bzw. vor allem in der Automobilindustrie immer wieder den regen Austausch mit Netzwerken aus dem TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität suchen, was Sinn macht, aber dennoch bemerkenswert bleibt und fortlaufend geschehen muss.
- Die positiven externen Effekte (siehe Kapitel 5.1.4.2.3) sind messbar und schlagen sich u. a. in einem beständig wachsenden Arbeitsmarkt rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität nieder. Den größten Vorteil hinsichtlich der Patente, welche für eine deutlich bessere Positionierung am tatsächlichen Markt stehen, hat anteilsmäßig mit weitem Abstand Japan, gefolgt von Korea und den USA, die ein relativ starkes Wachstum bei den Patenten aufweisen. Hinsichtlich der vom Schwerpunkt her weiter vom tatsächlichen Markt entfernten Publikationen haben anteilsmäßig China und die USA den größten Anteil, gefolgt von Deutschland und Frankreich mit hohem Wachstum.
- Die Auflösung von Unsicherheit und politischer Macht der etablierten Industrie ist nicht messbar, aber angesichts der Wissensentwicklung (siehe Kapitel 5.1.2) und dem

Unternehmerischen Experimentieren (siehe Kapitel 5.1.3) nicht von der Hand zu weisen. Die Legitimität wird deutlich vergrößert (siehe Kapitel 5.1.5), und sowohl Informationen als auch Wissen jeglicher Art werden heute nicht nur grenz-, sondern auch TIS-übergreifend transferiert. Den mit Abstand größten Vorteil weisen die asiatischen Länder auf, die teilweise weit vor Deutschland, Frankreich und den USA rangieren.

5.1.5 Legitimität

Wie die Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte (siehe Kapitel 5.1.4) kann auch die Legitimität z. B. durch Lobbyismus von Akteuren und Netzwerken im TIS selbst, aber auch durch strukturelle Komponenten in anderen TIS geformt werden. Gerade in der formenden Phase (engl. „formative phase“) spielt die Legitimität eine große Rolle, denn für eine ggf. neue Technologie muss Akzeptanz geschaffen werden, damit sie als erstrebenswerte und realistische Alternative zu den etablierten Substituten gilt (Bergek et al. 2008-2, Seite 416f.). Die frühzeitige Beurteilung der Legitimität einer Technologie durch entsprechende Experten hängt dabei aber von den sich verändernden Problemen auf der gesellschaftlichen Agenda ab, von der Unsicherheit, die aus Unterschieden in der Abwägung zwischen verschiedenen Leistungskriterien durch Akteure auf Basis voneinander abweichender Rahmenbedingungen und von unterschiedlichen Beurteilungen auf Basis anderer methodischer Vorgehensweisen kommt. Legitimität baut jedoch nicht nur auf der Beurteilung durch Experten auf, sondern auch auf der zunehmenden Ansammlung von Akteuren in einem TIS, der Erfahrung und Ungezwungenheit im Umgang mit einer neuen Technologie sowie dem Vertrauen verschiedener Akteure, die sie unterstützen. Im Folgenden wird auf die Funktion der Legitimität detailliert eingegangen.

5.1.5.1 Theoretische Grundlage und Indikatoren

Um sich nachhaltig und zeitnah zu entwickeln, muss eine Technologie Teil einer etablierten Ordnung werden oder sie sogar umstürzen (Hekkert et al. 2007, Seite 425). Dazu gibt es sowohl Befürworter als auch Gegner, die jeweils fest begründete Interessen haben. Befürwortende Interessengruppen können dabei eine Art Katalysator-Funktion übernehmen, sie setzen eine neue Technologie auf die Agenda (siehe Kapitel 5.1.1), mobilisieren Ressourcen (siehe Kapitel 5.1.6) und werben z. B. für Steueranreize (siehe Kapitel 5.1.7), womit sie nach und nach eine immer höhere Legitimität für die jeweilige Technologie schaffen. Falls sie Erfolg haben, wächst sowohl ihre Größe als auch ihr Einfluss.

Indikatoren zur Messung der Legitimität sind:

- Interessengruppen, z. B. Anzahl, Entstehung und Größe sowie ihre Lobby-Aktivitäten nach Häufigkeit und Methodik.

Der Prozess zur Legitimität kann erhebliche Zeit in Anspruch nehmen, und wird durch die ablehnenden Interessengruppen, welche häufig Schlüsselakteure im etablierten TIS sind oder vertreten, torpediert (Bergek et al. 2007, Seite 417). Zu den üblichen Vorgehensweisen gehört es z. B., die üblichen Spielregeln z. B. regulatorischen Ursprungs auf einem bestimmten Markt

zu manipulieren oder Konformität vorzutäuschen, indem einem etablierten Produktstandard gefolgt wird.

Indikatoren zur Messung der Legitimität sind bzw. weiteres Verständnis dieser Funktion kann gewonnen werden aus:

- Der Stärke der Legitimität des TIS bzw. wie gut es bzw. die zu Grunde liegende Technologie in die aktuelle Gesetzgebung und Wertebasis von Industrie und Gesellschaft hineinpasst,
- Wie die Legitimität einer Technologie ihre Nachfrage, die Gesetzgebung und das Unternehmensverhalten beeinflusst,
- Was oder wer die Legitimität beeinflusst und wie (siehe oben).

5.1.5.2 TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität

Im Folgenden werden die Indikatoren zur Messung der Legitimität in der oben genannten Reihenfolge diskutiert.

5.1.5.2.1 Anzahl, Entstehung und Größe von Interessengruppen

Hinsichtlich Interessengruppen gibt es zahlreiche Netzwerke in den sechs im Rahmen dieser Dissertation ausführlich analysierten Ländern, welche die Interessen von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft entsprechend ihrer Repräsentation vertreten (siehe Kapitel 5.1.4.2.2).

Die Dynamik in der Entstehung neuer Interessengruppen hat mit dem Voranschreiten des Markthochlaufes der Elektromobilität abgenommen, alle beteiligten Forschungseinrichtungen, Industrieunternehmen und auch die Politik scheinen die aus der jeweiligen Perspektive notwendigen Gremien und damit einhergehenden Möglichkeiten zur Mitbestimmung und Konsensfindung etabliert zu haben.

5.1.5.2.2 Stärke der Legitimität des TIS

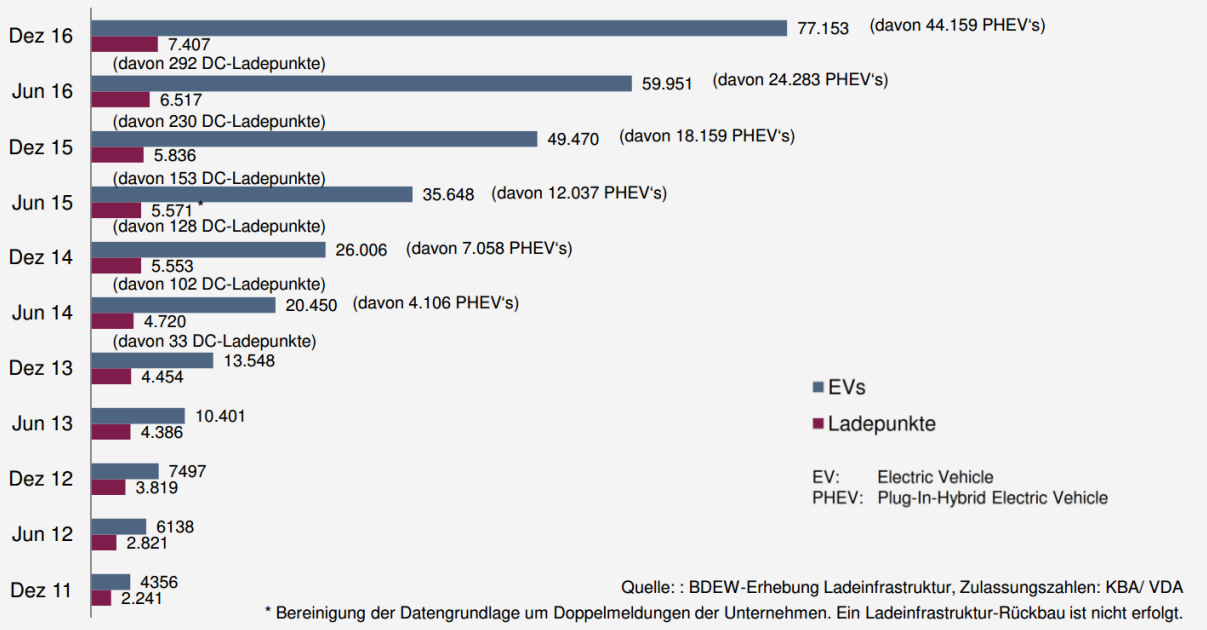
Prinzipiell gibt es für die Elektromobilität im Allgemeinen und Energiespeicher für die Elektromobilität im Besonderen kein wirklich großes Legitimitätsproblem. Elektrofahrzeuge fahren sich im Großen und Ganzen wie Automobile mit Verbrennungsmotor, sehen Letzteren fast immer sehr ähnlich und fügen sich ohne größere Probleme in die aktuell gültige, öffentliche Straßenverkehrsordnung ein. Potenzielle Käufer bzw. Besitzer von Automobilen mit Verbrennungsmotor können ohne größeren Umstiegsaufwand auch Elektrofahrzeuge fahren.

Große Probleme hinsichtlich der Sicherheit gibt es auch nicht, und mit zunehmender Anzahl an Elektrofahrzeugen bzw. Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb und Energiespeicher auf den Straßen nehmen auch diese Befindlichkeiten in der Bevölkerung ab.

Probleme hinsichtlich der Legitimität gibt es dort, wo die Elektrofahrzeuge noch nicht als Standardlösung für den Alltag eingesetzt werden können. Potenzielle Kunden haben häufig noch die sogenannte „Reichweitenangst“, welche ihnen angesichts des nur sehr schleppend

voranschreitenden Ladeinfrastrukturausbaus (Abbildung 61) auch nicht einfach genommen werden kann (Köhler et al. 2013, Seite 182f.).

Abbildung 61: Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen und Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladepunkte im Vergleich.[56]



Quelle: BDEW 2017-1, Seite 1.

Der weitere Ausbau von Ladeinfrastruktur muss schneller verlaufen bzw. Schritt halten mit der Anzahl an Elektrofahrzeugen z. B. auf Deutschlands Straßen:

> „Aktiv werden hier vor allem Supermärkte bzw. Tankstellen oder Freizeiteinrichtungen welche ihre Kunden damit „anziehen“ möchten. Industrieunternehmen oder Energieversorger investieren allerdings höchstens im Rahmen von Demonstrationsprojekten, was auch auf die öffentliche Hand zutrifft. Weil der Ausbau nicht schnell genug läuft, sind kurzfristig Engpässe hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Ladekapazität zu erwarten. Dieser Aspekt gilt vorerst noch als neutral für die Marktentwicklung der Elektromobilität, denn nur weil z. B. der lokale Supermarkt eine Ladestation für Elektrofahrzeuge anbietet, wird ein Käufer nicht den Mehrpreis im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor bezahlen. Diese Wahrnehmung wird sich aber über die Jahre bzw. langfristig mit der zunehmenden Flächenabdeckung einer problemlos zugänglichen Infrastruktur ändern, insbesondere auch dann, wenn der Kauf und Betrieb eines Elektromobils für breite Kundenschichten wirtschaftlich wird. […]

56 „EV“ bedeutet BEV und zu den „Definitionen >> Ein Normalladepunkt ist ein Ladepunkt, an dem Strom mit einer Ladeleistung von höchstens 22 Kilowatt an ein Elektromobil übertragen werden kann. >> Ein Schnellladepunkt [engl. „DC-charging point“] ist ein Ladepunkt, an dem Strom mit einer Ladeleistung von mehr als 22 Kilowatt an ein Elektromobil übertragen werden kann. >> Ein Ladepunkt gilt als öffentlich zugänglich, wenn er sich entweder im öffentlichen Straßenraum oder auf privatem Grund befindet, sofern der zum Ladepunkt gehörende Parkplatz von einem unbestimmten oder nur nach allgemeinen Merkmalen bestimmbaren Personenkreis tatsächlich befahren werden kann.“ (BDEW 2017-2)

Öffentliche Ladestationen gelten als förderlicher Aspekt, nicht zuletzt, weil sie die Aufmerksamkeit für bzw. Wahrnehmung der Elektromobilität stärken. Der Aufbau einer halböffentlichen und der öffentlichen Ladeinfrastruktur mit einem nennenswerten Umfang wird erst mittelfristig beginnen und langfristig ausgebaut werden, er stellt die Grundlage zur Erleichterung des Betriebs von Elektrofahrzeugen in Deutschland dar. Die Verzögerung im Aufbau ist u. a. auch auf Haftungsfragen bei Unfällen z. B. mit dem Ladekabel zurückzuführen, weshalb eine flächendeckende private Ladeinfrastruktur erst langfristig zu erwarten ist und mit einem erfolgreichen Markthochlauf der Elektromobilität einhergeht.

Ein breiterer Ausbau öffentlicher Schnellladestationen ist ebenfalls ab 2020 zu erwarten und stellt einen förderlichen Aspekt für die Elektromobilität dar. Mit einer Verbreitung bereits angekündigter Elektrofahrzeuge mit 500 Kilometer Reichweite wird die Nachfrage nach bzw. Erwartung an deutlich geringere Lade- bzw. Wartezeiten steigen. […] Die hohen Investitionskosten schrecken allerdings heute noch viele potenzielle Investoren ab.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 28f.)

Die Herausforderung des flächendeckenden Ausbaus einer Ladeinfrastruktur in Deutschland bzw. weltweit muss dringend gelöst werden, um die große Schwäche der Legitimität des TIS zu beseitigen und der Elektromobilität zu einem Durchbruch in den Massenmarkt hinein zu verhelfen. Aus Sicht der Kundenakzeptanz gilt:

„Sobald sich Kosten, Reichweite und Ladeinfrastruktur (inkl. Strom laden) [für Elektrofahrzeuge] gleichzeitig in eine mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbare Dimension entwickeln kann schließlich ein Massenmarkt (jenseits 2030) entstehen.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 30)

Neue Designs wie z. B. das des Renault Twizy (Renault Deutschland 2017) provozieren schon heute eine große Bandbreite von Reaktionen potenzieller Kunden, denen die Vorstellung fehlt, alle Besorgungen in einem Elektrofahrzeug mit diesem Aussehen und mit dieser Ausstattung zu verrichten. Um eine möglichst breite Anzahl von Kunden zu erreichen, muss die Automobilindustrie das Modellangebot also deutlich ausweiten, was die Ankündigungen (Stand: Mai 2017) für die nächsten Jahre auch erwarten lassen.

5.1.5.2.3 Beeinflussung von Nachfrage, Gesetzgebung und Unternehmensverhalten bezüglich einer Technologie durch ihre Legitimität

Die Legitimität von Elektrofahrzeugen bzw. der darin eingebauten Energiespeichertechnologien heute ist groß (Stand: Mai 2017) und beeinflusst ihre Nachfrage überhaupt nicht bzw. nicht messbar. Die Nachfrage wird eher durch Anreize aus der Entwicklung von Faktor- und Produktpreisen beeinflusst (siehe Kapitel 5.1.1.2.4), ein stark steigender Benzinpreis z. B. sie deutlich erhöhen. Auf der anderen Seite dürfte die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen noch so lange stagnieren bzw. nur sehr langsam ansteigen, so lange z. B. die Batterie- bzw. Elektrofahrzeugpreise auf dem aktuellen Niveau bleiben.

Die Legitimität des TIS beeinflusst allerdings die Gesetzgebung und resultiert in weiterem regulatorischem Druck sowie Steueranreizen (siehe Kapitel 5.1.1.2.5), wodurch auch die

Nachfrage nach Elektrofahrzeugen steigt. Bedingt durch den Klimawandel müssen die im gesamten Transportsektor nach wie vor steigenden CO_2-Emissionen gesenkt werden (OECD 2015, Seite 1), weshalb durch die Absenkung der Grenzwerte für CO_2-Emissionen auch das Angebot von Elektrofahrzeugen steigt, weil automobilherstellende Unternehmen nur so die ihnen vor-gegebenen Flottengrenzwerte erreichen. Und wenn gleichzeitig Kommunen und Städte z. B. die Umweltzonen nur noch für wirklich umweltfreundliche Elektrofahrzeuge öffnen, dürfte deren Nachfrage erneut deutlich ansteigen.

Die Legitimität beeinflusst auch das Unternehmensverhalten und damit die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen. Standen die Automobilhersteller mit ihren anfänglichen Bemühungen um die Elektromobilität noch eher unter dem Eindruck des sogenannten „Greenwashing“ (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2010), so wurden die Anstrengungen über die Jahre auch deshalb besser, weil zunehmend darauf geachtet wird, ob Unternehmen ihrer Verantwortung gerecht werden, was ökologische und soziale Anforderungen teilweise sogar über gesetzlich verankerte Minimum hinaus anbelangt (PwC 2015). Der Trend zur Elektromobilität lässt sich nicht mehr leugnen, der Markthochlauf schreitet voran und mit zunehmender Anzahl von Elektrofahrzeugmodellen im Angebot der Automobilhersteller weltweit wird auch immer deutlicher, dass das Unternehmensverhalten ebenfalls dem angesprochenen Trend folgt. Die Unternehmen, welche jetzt noch zu viel Angst vor Fehlinvestitionen haben, könnten eines Tages die Unternehmen sein, welche für die vielversprechenden Märkte der Elektromobilität weltweit falsch bzw. gar nicht positioniert sind.

5.1.5.2.4 Beeinflussung der Legitimität

Die Legitimität wird hauptsächlich durch die bereits genannten Interessengruppen bzw. Netzwerke in allen sechs im Rahmen dieser Dissertation ausführlich analysierten Ländern beeinflusst, welche die Interessen von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft entsprechend ihrer Repräsentation vertreten (siehe Kapitel 5.1.4.2.2).

Die Rahmenbedingungen für einen flächendeckenden, großvolumigen Markthochlauf der Elektromobilität im Allgemeinen und damit auch der Energiespeichertechnologien im Besonderen verbessern sich ständig, weshalb auch die Legitimität immer größer wird.

5.1.5.3 Zusammenfassung bzw. Fazit

In diesem Abschnitt zur Funktion der Legitimität wurden folgende Schwächen und Stärken der TIS aufgezeigt:

- Die Anzahl, Entstehung und Größe von Interessengruppen (siehe Kapitel 5.1.5.2.1) ist in allen sechs analysierten Ländern angestiegen bzw. umfangreicher geworden. Die Dynamik in der Entstehung neuer Interessengruppen hat in den letzten Jahren allerdings abgenommen, was auch daran liegen dürfte, dass mit dem Voranschreiten des Markthochlaufes der Elektromobilität die maßgeblichen Anwendungen für elektrochemische Energiespeichertechnologien fester Bestandteil in der öffentlichen Aufmerksamkeit und daher nicht mehr „ungewohnt“ sind. Dazu kommt, dass sich Elektrofahrzeuge im Prinzip

wie Automobile mit Verbrennungsmotor fahren, Letzteren fast immer ähnlich sehen und sich ohne weiteres in die aktuell gültige, öffentliche Straßenverkehrsordnung einfügen. Potenzielle Käufer bzw. Besitzer von Automobilen mit Verbrennungsmotor können ohne größeren Umstiegsaufwand auch ein Elektrofahrzeug fahren.

- Die Stärke der Legitimität des TIS (siehe Kapitel 5.1.5.2.2) ist entsprechend groß, Probleme hinsichtlich der Legitimität gibt es ausschließlich dort, wo die Elektromobilität noch nicht als Standardlösung für den Alltag eingesetzt werden kann.
- Die Beeinflussung von Nachfrage, Gesetzgebung und Unternehmensverhalten bezüglich einer Technologie durch ihre Legitimität (siehe Kapitel 5.1.5.2.3) verhält sich unterschiedlich: Die Nachfrage wird nicht bzw. nicht messbar beeinflusst, die Gesetzgebung dagegen sehr stark und das Unternehmensverhalten zunehmend deutlich und in allen sechs im Rahmen dieser Dissertation detailliert analysierten Ländern.
- Die Beeinflussung der Legitimität (siehe Kapitel 5.1.5.2.4) erfolgt hauptsächlich durch die bereits genannten Interessengruppen bzw. Netzwerke (siehe Kapitel 5.1.4.2.2), sie wird auch durch die ständige Verbesserung der Rahmenbedingungen für einen flächendeckenden, großvolumigen Markthochlauf der Elektromobilität im Allgemeinen und damit auch der Energiespeichertechnologien im Besonderen immer größer.

5.1.6 Ressourcenmobilisierung

Wie Fallstudien zeigen, spielt die Ressourcenmobilisierung eine große Rolle (Hekkert et al. 2009, Seite 591). Durch ihre Bereitstellung durch die öffentliche Hand werden Projekte zur Wissensentwicklung (siehe Kapitel 5.1.2) begonnen, was oftmals einfacher von statten geht und von der Regierung und privaten Investoren eher geleistet wird, als mit größerer Marktnähe und oftmals auch höherem Risiko Produktionsstätten zu planen und aufzubauen. Die Zurückhaltung privater Investoren hängt aber oft direkt zusammen mit der politischen Unsicherheit, welche durch den Einfluss auf die Suchrichtung (siehe Kapitel 5.1.1) reduziert werden könnte. Während große Ressourcen zur Marktentstehung (siehe Kapitel 5.1.7) investiert werden, fehlt hingegen die stabile politische Verpflichtung, diese Investitionen auch nachhaltig zu unterstützen. Dadurch entstehen Brüche in der Förderpolitik bzw. Verlagerungen in der Ressourcenmobilisierung, welche für die Entwicklung eines TIS nicht förderlich sind. Im Folgenden wird auf die Funktion der Ressourcenmobilisierung detailliert eingegangen.

5.1.6.1 Theoretische Grundlage und Indikatoren

Umfangreiche Ressourcen sowohl finanzieller Natur als auch von Humankapital sind als grundlegender Input notwendig für alle Aktivitäten in einem TIS, z. B. die Wissensentwicklung (siehe Kapitel 5.1.2) (Hekkert et al. 2007, Seite 425).

Indikatoren zur Messung der Ressourcenmobilisierung sind:

- Interviews, z. B. mit Schlüsselakteuren aus der Industrie, um die Frage nach der Verfügbarkeit von ausreichenden Ressourcen zu klären.

Besonders in Hinblick auf die Verfügbarkeit von hinreichend ausgebildetem Humankapital muss ein Analyseschwerpunkt auf Bildung und Ausbildung in spezifischen wissenschaftlichen und technologischen Feldern sowie u. a. in Entrepreneurship und Management liegen (Bergek et al. 2008-1, Seite 417f.). Daneben spielt auch das finanzielle Kapital eine große Rolle, stehen Start- und Risikokapital zur Verfügung und kann auf komplementäre Vermögenswerte wie Produkte, Dienstleistungen, Netzwerkinfrastruktur zurückgegriffen werden?

Indikatoren zur Messung der Ressourcenmobilisierung sind deshalb auch:

- Ein anwachsendes Kapitalvolumen,
- Ein steigendes Volumen von Start- und Risikokapital,
- Eine Änderung des Volumens und der Qualität von Humankapital (z. B. in Form der Anzahl von Absolventen und universitären Abschlüssen),
- Eine Änderung von komplementären Vermögenswerten.

5.1.6.2 TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität

Im Folgenden werden die Indikatoren zur Messung der Ressourcenmobilisierung in der oben genannten Reihenfolge diskutiert.

5.1.6.2.1 Steigendes Kapitalvolumen

Das Kapitalvolumen im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität ist insbesondere in den asiatischen Ländern sowie in den USA in den letzten Jahren deutlich angewachsen, was z. B. der massive Anstieg der LIB-Zellproduktionskapazitäten belegt, der sich auch in den nächsten Jahren fortsetzen wird (Abbildung 62).

In Frankreich und Deutschland dagegen ist das eingesetzte Kapital eher zurückgegangen, was vor allem an der Auflösung einiger JV gelegen hat. Die Energiespeicher-Industrie, die es in diesen beiden Ländern gibt, bedient vor allem Nischenmärkte und spielt damit für das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität keine Rolle.

Insgesamt ist weltweit genügend Start- und Risikokapital vorhanden und hohe Investitionen werden getätigt, aber gerade in den europäischen Ländern Frankreich und Deutschland wird es nur sehr konservativ vergeben bzw. investiert.

Abbildung 62: LIB-Zellproduktionskapazitäten in GWh für elektromobile und stationäre Anwendungen heute und Ausbau-Ankündigungen bis 2020 und 2025.[57]

Zellhersteller	Firmensitz	Produktionsstandort	2016	2020	2025
BYD	China	China	4,0	20,0	20,0
BAIC	China	China	0,2	0,2	0,2
BAK Battery	China	China	0,2	0,2	0,2
Boston Power	China	China	1,0	11,0	11,0
BPP (Bejing Pride Power)	China	China	0,3	0,3	0,3
CALB	China	China	0,4	12,0	12,0
CATL	China	China	1,5	6,5	6,5
FDG	China	China	0,8	0,8	0,8
Guoxuan High-Tech	China	China	1,2	1,2	1,2
Lishen	China	China	1,4	1,4	1,4
MGL	China	China	0,2	0,2	0,2
OPTIMUM	China	China	1,1	1,1	1,1
Suzhou Higer	China	China	0,2	0,2	0,2
Wanxiang	China	China	0,5	1,2	1,2
Wanxiang (A123)	China	USA	0,3	0,3	0,3
Wina Battery	China	China	0,4	0,4	0,4
Yinlong Group	China	China	0,3	0,3	0,3
Yutong Battery	China	China	0,3	0,3	0,3
AESC, Nissan	Japan	Japan	2,2	2,2	2,2
AESC, Nissan	Japan	USA	4,0	4,0	4,0
AESC, Nissan	Japan	UK	2,0	2,0	2,0
Blue energy	Japan	Japan	0,2	0,2	0,2
Hitachi	Japan	Japan	0,2	0,2	0,2
Kokam	Japan	Russland	0,0	0,1	0,1
Lithium Energy Japan/ GS Yuasa	Japan	Japan	2,3	2,3	2,3
Panasonic (18650-Format)	Japan	Japan	7,0	7,0	7,0
Panasonic	Japan	China	0,0	4,0	4,0
Panasonic-Sanyo Electric	Japan	Japan	1,0	1,0	1,0
Panasonic/Tesla (21700-Format)	Japan	USA	0,0	21,0	35,0
Toshiba	Japan	Japan	0,3	0,3	0,3
LG Chem	Süd Korea	Süd Korea	3,3	3,3	3,3
LG Chem	Süd Korea	China	3,0	7,0	7,0
LG Chem	Süd Korea	Polen	0,0	6,9	6,9
LG Chem	Süd Korea	USA	1,6	1,6	1,6
Samsung SDI	Süd Korea	Süd Korea	2,8	2,8	2,8
Samsung SDI	Süd Korea	China	2,0	5,6	5,6
Samsung SDI	Süd Korea	Ungarn	0,0	2,8	2,8
SK Innovation	Süd Korea	Süd Korea	0,8	1,0	1,0
Dow Kokam	USA	USA	0,6	0,6	0,6
EnerDel	USA	USA	0,3	0,3	0,3
JCI	USA	USA	1,7	1,7	1,7
Sonstige			2,0	2,0	2,0
Summe		GWh	51,8	137,5	151,5

Quelle: VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 17.[58]

[57] Sortiert nach „Zellherstellern, deren Sitz und Standorten der Zellproduktion; Basisszenario der heute vorhandenen und bekannten geplanten Produktionskapazitäten; Hersteller mit <100 MWh Zellproduktion unter Sonstige gelistet.“ (VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 17)

[58] Die für die Meta-Analyse herangezogenen Quellen können in (VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 74f.) eingesehen werden.

5.1.6.2.2 Humankapital

Das Humankapital wurde im Ländervergleich bereits analysiert (siehe Kapitel 5.1.4.2.3; Abbildung 60). In Marktnähe bzw. bei den Patenterfindern hat insbesondere Japan große Stärken, gefolgt von Korea und den USA mit dem höchsten Wachstum. Weiter entfernt vom Markt bzw. bei den Publikationsverfassern führt China gefolgt von den USA, wobei insbesondere Deutschland vor Frankreich das mit Abstand höchste Wachstum aufweist.

5.1.6.2.3 Komplementäre Vermögenswerte

Wie oben dargestellt, sind mit dem vorhandenen bzw. eingesetzten Kapitalvolumen im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität auch die komplementären Vermögenswerte wie z. B. Produktionsanlagen vor allem in den asiatischen Ländern sowie in den USA angestiegen (siehe Kapitel 5.1.6.2.1). Weil in Frankreich und Deutschland die ganz grundlegende Entscheidung zur einheimischen Batterieproduktion für den Massenmarkt der Elektromobilität noch aussteht, sind hier nur geringe komplementäre Vermögenswerte vorhanden, was auch an der Auflösung einiger JV liegt. FuE-Einrichtungen wie das Batterieforschungszentrum am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) in Ulm stellen eine Ausnahme dar, wurden aber durch öffentliche Mittel finanziert.

5.1.6.2.4 Zusammenfassung bzw. Fazit

In diesem Abschnitt zur Funktion der Ressourcenmobilisierung wurden folgende Schwächen und Stärken der TIS aufgezeigt:

- Ein steigendes Kapitalvolumen (siehe Kapitel 5.1.6.2.1) ist insbesondere in den asiatischen Ländern sowie in den USA in den letzten Jahren zu beobachten gewesen. In Deutschland und Frankreich ist das eingesetzte Kapital eher zurückgegangen. Weltweit ist genügend Start- und Risikokapital vorhanden und hohe Investitionen werden getätigt, aber gerade in den europäischen Ländern Deutschland und Frankreich wird es nur sehr konservativ vergeben bzw. investiert.
- Das Humankapital (siehe Kapitel 5.1.6.2.2) ist in allen sechs im Rahmen dieser Dissertation ausführlich analysierten Ländern angewachsen. Den größten Vorteil hinsichtlich der Patente, welche für eine deutlich bessere Positionierung am tatsächlichen Markt stehen, hat anteilsmäßig mit weitem Abstand Japan, gefolgt von Korea und den USA, die ein relativ starkes Wachstum bei den Patenten aufweisen. Hinsichtlich der vom Schwerpunkt her weiter vom tatsächlichen Markt entfernten Publikationen haben anteilsmäßig China und die USA den größten Vorteil, gefolgt von Deutschland und Frankreich mit hohem Wachstum.
- Die Komplementären Vermögenswerte (siehe Kapitel 5.1.6.2.3) sind insbesondere in den asiatischen Ländern sowie in den USA deutlich angestiegen. Weil in Frankreich und Deutschland die ganz grundlegende Entscheidung zur einheimischen Batterieproduktion für den Massenmarkt der Elektromobilität allerdings noch aussteht, sind hier nur geringe komplementäre Vermögenswerte vorzufinden, z. B. Produktionsanlagen, welche rein der FuE in Wirtschaft und Wissenschaft dienen.

5.1.7 Marktentstehung

Gerade die Marktentstehung hat im Normalfall eine große Bedeutung: Aufkommenden Technologien wird nicht zugetraut, sich auf den bereits vorhandenen Märkten gegenüber vorhandenen Technologien durchzusetzen (Suurs et al. 2009-2, Seite 9641). Gerade im Fall der TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität ist das allerdings nicht einmal angedacht worden, weil die Energiespeicher zwecks der Vermeidung von CO_2-Emissionen in exakt den Anwendungen zum Einsatz kommen sollen, in denen heute herkömmliche Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Im Folgenden wird auf die Funktion der Marktentstehung detailliert eingegangen.

5.1.7.1 Theoretische Grundlage und Indikatoren

Weil eine neue, relativ unreife Technologie oft mit bereits etablierten, relativ reifen Technologie in den Wettbewerb gehen muss, kann es sich als wichtig herausstellen, einen geschützten Marktplatz für diese Technologie einzurichten (Hekkert et al. 2007, Seite 424). Eine Möglichkeit dazu stellen temporäre Nischenmärkte für spezifische Anwendungen einer Technologie dar, innerhalb deren Umgebung neue Akteure lernen können, neue Erwartungen entwickelt werden (siehe Kapitel 5.1.1) und in denen Wissen entsteht und verbreitet werden kann (siehe Kapitel 5.1.2 und 5.1.3). Eine andere Möglichkeit stellen temporär eingerichtete Wettbewerbsvorteile z. B. durch Steueranreize oder Minimal-Verbrauchsquoten dar.

Indikatoren zur Messung der Marktentstehung sind:

- Die Anzahl eingerichteter Nischenmärkte,
- Spezifische Steuervorteile für neue Technologien,
- Neue Umweltstandards, welche die Durchsetzungschancen für neue (und umweltfreundliche) Technologien erhöhen.

Für ein aufkommendes oder sich in Transformation befindendes TIS mögen Marktplätze auch gar nicht existieren oder weitgehend unterentwickelt sein, und z. B. potenzielle Kunden ihre Nachfrage noch nicht zum Ausdruck gebracht haben (Bergek et al. 2008-1, Seite 416). Aus diesem Grund sind entsprechend gestaltete Rahmenbedingungen essentiell, um die nachhaltige und zeitnahe Entwicklung der Marktplätze hin zu großvolumigen Massenmärkten zu ermöglichen. Um zu verstehen, in welchem Entwicklungsstadium sich ein Marktplatz befindet, müssen sowohl die tatsächliche Marktentwicklung als auch die Treiber für die Marktentstehung analysiert werden.

Indikatoren zur Messung der Marktentstehung sind deshalb auch:

- (Quantitative) Marktstudien z. B. hinsichtlich Marktgröße und Kundengruppen, woraus Aussagen über die Phase der Marktentwicklung abgeleitet werden können. Sind die Nachfrageprofile potenzieller Kunden offensichtlich bekannt bzw. erforscht?
- (Qualitative) Marktstudien z. B. zu Strategien der beteiligten Akteure oder zur Beurteilung der Beschaffungsprozesse potenzieller Kunden,

- Beurteilung, ob öffentliche Anreize zur Marktentstehung gesetzt werden müssen oder eine Änderung der Rahmenbedingungen notwendig ist,
- Die Rolle von Standardisierung.

5.1.7.2 TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität

Im Folgenden werden die Indikatoren zur Messung der Legitimität in der oben genannten Reihenfolge diskutiert.

5.1.7.2.1 Neue Nischenmärkte

Neue Nischenmärkte gibt es für elektrochemische Energiespeichertechnologien natürlich im Allgemeinen und z. B. in der stationären Energiespeicherung, aber nicht in der Elektromobilität abseits der etablierten Segmentierung im Besonderen: Energiespeicher für die Elektromobilität im Sinne der xEV und vor allem PHEV und BEV müssen sich in allen denkbaren Anwendungen gegen die bereits etablierten Antriebe basierend auf herkömmlichen Verbrennungsmotoren bewähren – in allen nicht bereits durch Automobile gefüllten Nischen haben sich auch Elektrofahrzeuge z. B. aufgrund ihrer hohen Kosten nicht durchsetzen können. In der Diskussion war so z. B. der Einsatz kleiner Elektrofahrzeuge für den sogenannten letzten Kilometer (engl. „last mile“), also den Weg, welchen ein/e Passagier/in von einem Transportknotenpunkt bis zu ihrem/seinem Zuhause zurücklegen muss. Zu einem flächendeckenden Einsatz dieser Elektrofahrzeuge ist es allerdings nicht gekommen.

Schon in einer ganz frühen Fallstudie zu Elektrofahrzeugen wurde zwar festgestellt, dass Elektrofahrzeuge eine potenziell disruptive Technologie sind und dass Elektrofahrzeuge zwar in der Regel nicht in Hauptanwendungen eingesetzt werden dürfen, weil sie die grundlegenden Leistungsanforderungen dieser Märkte nicht erfüllen, was sich in der Zwischenzeit angesichts der Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen als falsch herausgestellt hat, aber es wurde auch nicht abseits von einigen Spekulationen versucht, ernsthafte Vorschläge für Nischenmärkte zum Markteintritt zu unterbreiten (Christensen 1997, Seite 240ff.). Gerade weil zahlreiche Experimente in möglichen Nischenmärkten nicht aufgegangen sind, wird nun die FuE intensiviert, um den leistungsbezogenen Rückstand von Elektrofahrzeugen auf herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor aufzuholen. Auch deshalb verläuft der Markthochlauf so schleppend bzw. verschiebt sich die Erwartung eines Massenmarktes für Elektromobilität nicht nur in Deutschland, sondern weltweit um einige Jahre bzw. wenige Jahrzehnte bis nach dem Jahr 2030 hinaus.

5.1.7.2.2 Öffentliche Anreize wie Steuervorteile, Abschreibungen

Öffentliche Anreize wie Regulatorischer Druck sowie Steueranreize wurden bereits unter der Funktion „Einfluss auf die Suchrichtung“ untersucht (siehe Kapitel 5.1.1.2.5). Dieser Einfluss von Seiten der Politik ist aufgrund seines fraglichen Nutzens allerdings heftig umstritten: Die Nachhaltigkeit solcher Förderinstrumente ist sofort gefährdet, wenn die von ihnen unterstützte Technologie bzw. Produkte nicht von der Gesellschaft angenommen werden, weil sie gegenüber etablierten Technologien bzw. Produkten schlechtere Leistungsparameter aufweist.

Vor allem Rufe nach direkten, finanziellen Kaufanreizen sind deshalb eigentlich nur mit Vorsicht zu befolgen und eine Änderung der Rahmenbedingungen ggf. so lange auszusetzen bzw. in FuE zu investieren, bis Elektrofahrzeuge den Rückstand auf herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor weitgehend aufholen konnten. Eine dann eingerichtete Kaufprämie könnte einen nachhaltigen, rasanten Markthochlauf nach sich ziehen.

Es gibt durchaus interessante Förderinstrumente für die Elektromobilität:

> „Sonderrechte (kommunal, Leuchttürme) gelten als förderlicher Aspekt für die Elektromobilität. Das im Jahr 2014 verabschiedete Elektromobilitätsgesetz gibt Kommunen die Möglichkeit, jeweils auf die lokale Situation angepasste Anreize für an Elektrofahrzeugen interessierte Kunden zu setzen, z. B. durch kostenfreies Parken oder spezielle Zufahrtsrechte für diese Fahrzeuge [(BMUB 2014).] Wesentlicher Regelungsinhalt des Gesetzes sind die Definition der möglicherweise zu privilegierenden Elektrofahrzeuge, die Kennzeichnung über das Nummernschild, die Park- und Halteregelungen, die Nutzung von Busspuren und die Aufhebung von Zufahrtsverboten. Langfristig bzw. wenn viele Kommunen aktiv geworden sind und die Sonderrechte im besten Fall allgemein gelten, wird ihre fördernde Wirkung wieder abnehmen. Eine „Zero Emission Vehicle"-Gesetzgebung wie im US-amerikanischen Kalifornien stellt für Deutschland bzw. Europa keine Alternative dar (Stichwort: Verkaufsverbote für Fahrzeuge mit zu hohen Emissionen) [(CEPA 2015).] In diesem Kontext wurde allerdings das Instrument der „Super credits" für weitgehend schadstofffreie Fahrzeuge mit unter 50 g CO_2/km in der flottenweiten Anrechnung von Elektromobilen auf die CO_2-Zielwerte insgesamt eingerichtet. Solche Elektromobile wurden gleich mehrfach gezählt und ihre Herstellung hätte damit als Ausgleichsmaßnahme für die Herstellung anderer Fahrzeuge mit höheren Emissionen dienen können [(European Commission 2015).] Weil dieses Angebot in seiner ersten Phase allerdings nicht besonders stark durch die Automobilhersteller in Anspruch genommen wurde, wird es auch in einer zweiten Phase von 2020 bis 2023 wieder gelten. Die Maßnahme sollte einen stark förderlichen Aspekt für die Elektromobilität z. B. zur Bereitstellung eines breiten Fahrzeugangebotes darstellen." (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 26f.)

5.1.7.2.3 Neue Umweltstandards

Es gibt nicht nur neue Umweltstandards, sondern die CO_2-Gesetzgebung wird angesichts des fortschreitenden Klimawandels mit allen ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen zunehmend schärfer (siehe Kapitel 5.1.1.2.5). Zumindest von dieser Seite wird deutlich, dass die Elektromobilität mittel- und langfristig das Maß aller Dinge sein wird, wenn Mobilität insgesamt so wichtig für die Menschheit bleibt. Die Kernfrage ist, wie schnell die Umweltstandards angezogen werden können, ohne zahlreiche Arbeitsplätze in allen industrialisierten Ländern weltweit zu gefährden und gleichzeitig eine preisgünstige, umweltfreundliche Mobilität für eine wachsende Weltbevölkerung bzw. Milliarden von Menschen zu gewährleisten. In Bezug auf die Umweltstandards sind aber nicht nur die neuen Emissionsgrenzwerte, sondern z. B. auch der Umgang mit wertvollen Ressourcen im Rahmen eines Batterie-Recylings zu beachten (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 27).

5.1.7.2.4 Qualitative/Quantitative Marktstudien

Hinsichtlich der Energiespeicher für die Elektromobilität gibt es ein sehr großes Marktpotenzial, welches bereits oben angeklungen ist (siehe Kapitel 5.1.1.2.3):

> „Die mit Abstand interessantesten Wachstumsmärkte für LIB-Zellen stellen BEV und PHEV (weniger HEV) im PKW-Markt sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge (z. B. LKW, Busse) dar. Selbst bei schweren Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie oder z. B. Oberleitungs-LKW würden immer auch LIB unterstützend eingesetzt werden […]. Deutlich klarer bzw. eindeutiger abschätzbar ist hier jedoch sicherlich der Bereich von Fahrzeugen mit 10–100 kWh Batteriegröße, in welchen LIB als Energiespeicher zur Traktion die besten Vorteile mit sich bringen. Gegenüber einem Markt von rund 10 GWh in 2015 wird für 2025 ein Markt von 100 bis ggf. 300 GWh für BEV und PHEV erwartet. Die TWh-Grenze jährlicher Nachfrage nach LIB-Zellen könnte eventuell bis 2030 erreicht sein.“ (Fraunhofer ISI 2015-3, Seite 18ff.)

Die für die Elektromobilität bzw. PHEV und BEV in Frage kommenden Kundengruppen wurden in Studien zu Erstanwendern (engl. „early adopters“) bzw. Erstnutzern in Deutschland bereits ausgiebig analysiert: Es sind vor allem in Vollzeit arbeitende Männer mit Familien, welche die Umwelt und neue Technologien wertschätzen und eine signifikante Anzahl von Kilometern an jährlichen Pendelstrecken zurücklegen, weil sie in Vororten oder ländlichen Gegenden wohnen (Plötz et al. 2014-1, Seite 96). Dazu kommen kommerzielle Fahrzeugflotten und Dienstfahrzeuge (Plötz et al. 2014-2, Seite 3), wobei sich die Handlungsempfehlungen für die Politik für die drei Gruppen unterscheiden. Analysiert wurde auch die Kundenakzeptanz von Elektromobilität, ohne die eine erfolgreiche Markteinführung der Elektromobilität nicht möglich wäre (Fraunhofer ISI 2012-3, Seite 28). Viele dieser Ergebnisse lassen sich aus dem TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland auch auf die TIS in anderen Ländern wie China, Japan und Korea sowie Frankreich und den USA übertragen, wo Menschen hinsichtlich ihrer Mobilität mit neuen Elektrofahrzeugen vor ähnlichen Herausforderungen stehen.

Wesentlich schwieriger ist es, qualitative Marktstudien z. B. zu den Strategien der beteiligten Akteure oder zur Beurteilung der Beschaffungsprozesse potenzieller Kunden durchzuführen, weil die Elektromobilität im Allgemeinen bzw. elektrochemische Energiespeichertechnologien im Besonderen noch nicht allzu lange aus dem Stadium der Marktvorbereitung entlassen wurden. Ein Überblick über die Energiespeicher-Industrie/Batteriezellhersteller (siehe Kapitel 4.3.1) sowie die Automobilindustrie/Elektrofahrzeughersteller (siehe Kapitel 4.3.2) wurde gegeben, und Fallstudien zur Toyota Motor Corporation (siehe Kapitel 4.3.2.1), Tesla Inc. (siehe Kapitel 4.3.2.2) und der BMW Group (siehe Kapitel 4.3.2.3) erlauben Einblicke in die Strategien ausgewählter Akteure.

Die Beschaffungsprozesse öffentlicher Institutionen verändern sich gerade von Grund auf und werden auch in Zukunft zunehmend auf die Anschaffung möglichst emissionsfreier Elektrofahrzeuge ausgerichtet (BMWi 2013, Seite 1).

5.1.7.2.5 Standardisierung

Im Bereich der Normen und Standards ist international schon einige Abstimmung erfolgt, was sich zum Beispiel in Kontinenten-spezifischen Einigungen auf bestimmte Ladestecker-Formate an Ladestationen ausdrückt:

> „Aus dem globalen Umfeld der Elektromobilität resultieren auch Normen/Standards, welche bis hinunter auf die nationale Ebene bzw. von der Fahrzeugindustrie in einem Land umzusetzen sind. Schon kurzfristig wird deshalb die Ladestecker-/Sicherheitsnorm förderlich für die Elektromobilität, denn sie wird für private Kunden einfacher handhabbar, wenn für das Laden eines Elektromobils an unterschiedlichen Ladesäulen bzw. zu Hause ein und dasselbe Ladestecker-Format eingesetzt werden kann.
>
> Genormte Zellen für HEV-/PHEV-/BEV-Batteriemodule könnten eine wichtige Voraussetzung dafür sein, die Produktionskosten für die deutschen Automobilhersteller in Zusammenarbeit mit ihren zumeist asiatischen Zulieferern niedrig zu halten. Sie stellen heute/2015 allerdings noch eine enorme Herausforderung für die Automobilindustrie dar, denn die Frage ist, wie genau der Weg hin zu einer standardisierten Batterie für eine konkrete Anwendung aussieht: Welches nationale oder internationale Gremium befasst sich damit, wie und bis wann?“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 29f.)

Wirklich vollständig standardisierte Batteriezellen sind deshalb nicht kurzfristig zu erwarten, weil sie ähnlich wie die Verbrennungsmotoren in den herkömmlichen Automobilen sozusagen ein „Alleinstellungsmerkmal“ jedes einzelnen Elektrofahrzeugherstellers bzw. der Batteriehersteller sind.

Der Vorteil von Standardisierung insbesondere in der Produktion ist dabei aber unumstritten:

> „Durch Schaffung gemeinsamer Standards können […] Industrie-übergreifend große Volumina erschlossen werden, die sich durch Skaleneffekte auch positiv auf automobile Anwendungen auswirken können.“ (Roland Berger 2012, Seite 3)

Ideal wäre eine möglichst umfassende bzw. weltweite Standardisierung:

> „Eine Harmonisierung der Gesetzgebung bzw. von Normen/Standards zwischen maßgeblichen Märkten auf verschiedenen Kontinenten könnte sich [sofort förderlich] für die Marktentwicklung der Elektromobilität auswirken[,] wenn Schritte zur Harmonisierung eingeleitet werden.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 30)

Im Bereich der Standardisierung sind deshalb noch einige Fortschritte zu erwarten:

> „Eine Bestandsaufnahme und Neubewertung vorhandener Normen/Standards sowie eine eventuell notwendige Anpassung der Batterienormen ist langfristig anzuraten und würde sich förderlich für die Elektromobilität auswirken. Die Automobilhersteller werden bis dahin zahlreiche Erfahrungen mit neuen Batteriesystemen in ihren Elektromobilen in bis dann vielen Millionen Elektrofahrzeugen auf den Straßen gesammelt haben.“ (Fraunhofer ISI 2015-1, Seite 30)

5.1.7.2.6 Zusammenfassung bzw. Fazit

In diesem Abschnitt zur Funktion der Marktentstehung wurden folgende Schwächen und Stärken der TIS aufgezeigt:

- Neue Nischenmärkte (siehe Kapitel 5.1.7.2.1) sind in allen sechs detailliert analysierten Ländern für elektrochemische Energiespeichertechnologien im Allgemeinen und z. B. in der stationären Energiespeicherung zu finden, aber nicht in der Elektromobilität im Besonderen: Sie müssen sich hier in allen denkbaren Anwendungen gegen die bereits etablierten Antriebe basierend auf herkömmlichen Verbrennungsmotoren bewähren – in allen nicht bereits durch Automobile gefüllten Nischen haben sich auch Elektrofahrzeuge z. B. aufgrund ihrer hohen Kosten nicht durchsetzen können.
- Öffentliche Anreize wie Steuervorteile, Abschreibungen (siehe Kapitel 5.1.7.2.2) wurden bereits unter der Funktion „Einfluss auf die Suchrichtung“ untersucht (siehe Kapitel 5.1.1.2.5). Der damit verbundene Einfluss von Seiten der Politik auf die Marktentstehung ist aufgrund der oft mangelhaften Nachhaltigkeit ergriffener Maßnahmen in der öffentlichen Diskussion heftig umstritten.
- Neue Umweltstandards (siehe Kapitel 5.1.7.2.3) sind der Treiber für die Elektromobilität im Allgemeinen und elektrochemische Energiespeichertechnologien im Besonderen: Es gibt nicht nur neue Umweltstandards, sondern die CO_2-Gesetzgebung wird angesichts des fortschreitenden Klimawandels mit allen ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen zunehmend schärfer (siehe Kapitel 5.1.1.2.5). Zumindest von dieser Seite wird deutlich, dass die Elektromobilität mittel- und langfristig das Maß aller Dinge sein wird und kein Weg an ihr vorbeiführt.
- Qualitative/quantitative Marktstudien (siehe Kapitel 5.1.7.2.4) sind vorhanden und bilden das große Potenzial für die Elektromobilität und elektrochemische Energiespeichertechnologien ab, sowohl in Bezug auf die Marktentwicklung als auch die dafür in Frage kommenden Kundengruppen. Viele dieser Ergebnisse lassen sich aus dem TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland auch auf die TIS in anderen Ländern wie China, Japan und Korea sowie Frankreich und den USA übertragen, wo Menschen hinsichtlich ihrer Mobilität mit neuen Elektrofahrzeugen vor genau den gleichen Herausforderungen stehen. Auch zu den Strategien der beteiligten Akteure zeigen insbesondere die drei Fallstudien zur Toyota Motor Corporation (siehe Kapitel 4.3.2.1), Tesla Inc. (siehe Kapitel 4.3.2.2) und der BMW Group (siehe Kapitel 4.3.2.3), wie unterschiedlich mögliche Strategien maßgeblicher Akteure in den drei verschiedenen Ländern Japan, den USA und Deutschland ausfallen können. Die Beschaffungsprozesse öffentlicher Institutionen verändern sich und werden zunehmend auf die Anschaffung möglichst emissionsfreier Fahrzeuge ausgerichtet, nicht nur in Deutschland.
- Standardisierung (siehe Kapitel 5.1.7.2.5) ist gerade in Deutschland bzw. der Europäischen Union (EU) schon deutlich vorangekommen, ihre Bedeutung ist allerdings nicht deutlich genug herauszustellen – je mehr und je früher weitere Standardisierung ihren Einzug in das TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität hält, desto besser.

6 Die Schlüsselfaktoren der Entwicklung des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität

Im sechsten Kapitel folgt Schritt 3 der Analyse, die Beurteilung der Funktionalität (a) und die Festlegung von Prozesszielen (b) des TIS in Deutschland (6.1). Anschließend werden fördernde und hemmende Schlüsselfaktoren identifiziert (6.2), bevor die politischen Schlüsselfaktoren abgeleitet und beantwortet werden (6.3). Der Fokus liegt in diesem Kapitel aus naheliegenden Gründen auf Deutschland, das sich nicht nur hinsichtlich der inländischen Großindustrie in der Elektromobilität allgemein, sondern ganz spezifisch auch bezüglich der darin eingesetzten Energiespeicher positionieren möchte und muss.

6.1 Schritt 3: Beurteilung der Funktionalität (a) und Festlegung von Prozesszielen (b)

Auf Basis der Beschreibung des funktionellen Musters im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität entlang von sieben Schlüsselfunktionen kann nun die Beurteilung der Funktionalität (a) erfolgen, denn dazu wurden die Stärken und Schwächen der TIS aufgeschlüsselt (Bergek et al. 2008, Seite 419). Interessant ist allerdings, dass das funktionelle Muster allein keine Aussagen darüber treffen kann, ob ein TIS gut funktioniert oder nicht – weder eine schwach noch eine stark leistende Funktion kann per se als negativ oder positiv gelten. Dazu muss vielmehr die relative Güte eines spezifischen Funktionsmusters beurteilt werden, worin die hauptsächliche Herausforderung liegt und wofür zwei Grundlagen verwendet werden können: Die Entwicklungsphase eines TIS (1) und Systemvergleiche (2).

Wie bereits in der Definition des TIS im Fokus (siehe Kapitel 4.2) angemerkt, unterscheiden sich die im Rahmen der vorliegenden Dissertation analysierten TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität voneinander in Hinsicht auf ihre aktuelle Entwicklungsphase (1): Während sich Frankreich, die USA und Deutschland noch in der sogenannten formenden Phase (engl. „formative phase“) befinden, sind China, Japan und Korea bereits zur Wachstumsphase (engl. „growth phase“) fortgeschritten. Die Definition der „Funktionalität“ einer Funktion unterscheidet sich zwischen diesen beiden Phasen (Bergek et al. 2003, Seite 200f.; Jacobsson et al. 2004, Seite 815ff.) und es muss die Frage gestellt werden, ob sie dem Bedarf einer spezifischen Phase gerecht wird oder nicht und ob sie im zweiten Fall nicht eher darauf hinwirkt, dass sich das TIS in die nächste Phase weiterentwickelt.

Neben einer nur ansatzweise entwickelten Struktur deuten zahlreiche weitere Indikatoren auf die formende Phase hin, u. a. das Zeitfenster, in welchem erst über eine neue Technologie diskutiert wird, große Unsicherheiten z. B. in Hinblick auf die Anwendungen und Märkte, nicht voll ausgereizte Preis-/Leistungsverhältnisse, ein unterentwickeltes Marktvolumen und geringe ökonomische Aktivitäten, nicht ausformulierte Nachfrage und die Abstinenz von selbstverstärkenden Rückmeldungen und schwache positive externe Effekte.

Ein TIS in der formenden Phase darf nicht so bzw. mit den Kriterien analysiert werden, die für die Beurteilung eines TIS in der Wachstumsphase besser geeignet sind. In der formenden

Phase steht z. B. die Funktion der Wissensentwicklung gekoppelt mit dem Unternehmerischen Experimentieren im Vordergrund, ausgehend vom Einfluss auf die Suchrichtung und der Ressourcenmobilisierung, um eine breite Unterstützung zu gewährleisten. Starten muss in der formenden Phase die Funktion der Legitimität, um Schwächen einer neuen Technologie hinsichtlich ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz einzuordnen und zur Etablierung der relevanten Akteure beitragen sowie vielleicht einen institutionellen Wandel einleiten. Auch die Marktentstehung kann in dieser Phase einsetzen.

Mit dem Wechsel in die Wachstumsphase gewinnt die Funktion der Marktentstehung deutlich an Bedeutung, sowie die Ressourcenmobilisierung zur Ausweitung neuer Märkte (Bergek et al. 2008, Seite 420). Auch das Unternehmerische Experimentieren bleibt wichtig, genau wie die Legitimität. Weil das funktionale Muster allerdings von TIS zu TIS unterschiedlich sein mag, kann die Bedeutung der einen oder anderen Funktion in der einen oder anderen Phase deutlich unterschiedlich ausfallen. Auch die Festlegung von Prozesszielen (b) sollte fairerweise so erfolgen, dass sie der spezifischen Entwicklungsphase eines TIS gerecht wird.

Systemvergleiche (2) zwischen TIS in mehreren Ländern sind wichtig, um das Verständnis von z. B. potenziellen Fördermaßnahmen unter politischen Akteuren zu verbessern. Wichtig ist dabei, insbesondere der Leistungsfähigkeit anderer Innovationssysteme Rechnung zu tragen und festzustellen, welches die kritischen Funktionen sind und welche Entwicklung für das TIS im Fokus erwartet werden kann.

Basierend auf der Phasenanalyse und/oder einem oder mehr Systemvergleichen können vorläufige Schlussfolgerungen hinsichtlich der „Funktionalität“ eines TIS und seiner weiteren Entwicklung gezogen werden. Damit ist es dann auch möglich, politische Ziele so zu spezifizieren, dass sich das funktionale Muster verbessert bzw. einer Zielvorstellung annähert. Solche Prozessziele können in Bezug auf die sieben Schlüsselfunktionen ausgedrückt werden, was sie von übergeordneten Zielen für das gesamte TIS differenziert. Damit bieten Prozessziele auch den Vorteil, dass sie die Bewertung vereinfachen, ob spezifische politische Maßnahmen zur ihrer Erreichung wirken oder nicht. Gerade zu Beginn der Entwicklung eines TIS, wenn es aufgrund hoher Unsicherheit praktisch noch unmöglich ist, realistische, umfassende Gesamtziele für ein TIS zu definieren, können diese Prozessziele hilfreich sein.

Die Bundesregierung hat mit der deutschen Industrie das übergeordnete Ziel formuliert, dass Deutschland weiterhin Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität werden soll:

> „Die Leitanbieterschaft bezieht sich insbesondere auf Schlüsseltechnologien der Elektromobilität. […] Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen mit Fokus auf Plug-in Hybride (PHEV) und reine batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sind optimierte Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in absehbarer Zukunft die erste und einzige Wahl. Mit ihr wird sich der globale Markthochlauf und vermutlich auch die Diffusion und Erschließung der Massenmärkte in den kommenden Dekaden vollziehen. […] Ein Leitmarkt definiert sich dabei durch eine frühe Nachfrage: Wo sind die heutigen und zukünftigen Märkte für Batterietechnologien und welches Land hat somit große Chancen, dass sich dort entsprechende Industrien ansiedeln, also Marktstrukturen aufbauen, und vor allem auch Arbeitsplätze geschaffen werden?

> Der Leitanbietergedanke bezieht sich eher darauf, wer heute oder in naher Zukunft die zuerst im Leitmarkt gehandelten Produkte herstellt, erfolgreich exportiert und dadurch eine hohe inländische Wertschöpfung erzielen kann. Die industrielle Verankerung heute und Forschung und Technologie als Basis für die Zukunft sind entsprechende Leitanbieter-kategorien.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 3)

Hinsichtlich des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland, das sich in der formenden Phase befindet und sich damit im internationalen Vergleich vor allem mit Nachbarland Frankreich sowie den Vereinigten Staaten von Amerika vergleichen muss, ergeben sich auf dieser Basis verschiedene Stärken und Schwächen (Tabelle 19).

Auf die Festlegung von Prozesszielen (b) wird später im Kontext der politischen Schlüssel-fragen eingegangen (siehe Kapitel 6.2).

Tabelle 19: Überblick über die Schwächen und Stärken des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland entlang der sieben analysierten Funktionen.

Funktion	Schwächen	Stärken
Einfluss auf die Suchrichtung	• Eine einheimische Batteriezellproduktion wurde in Hinblick auf die Konsumelektronik als nicht lohnenswert erachtet/ kaum gefördert, die heutige Batterieindustrie musste sich für Elektromobilität praktisch komplett neu entlang einer unbekannten Wertschöpfungskette formieren, • Geringer Anteil bei Publikationen zu LIB im Allgemeinen und zu Batterien für die Elektromobilität im Besonderen, • Deutschlands Rohstoffarmut sorgt z. B. bei Kobalt und Seltenen Erden für Handelsbedarf mit ggf. sogar politisch instabilen Ländern, die den Rohstoffzugang regulieren, • Die Bundesregierung setzte erst zögerlich monetäre Kaufanreize, wodurch die Nachfrage nach Elektromobilität (und damit auch nach Energiespeichern) schnell steigen könnte (Vermutung: Davon könnte zwar die deutsche Automobilindustrie über ihre Elektrofahrzeugmodelle profitieren, die Energiespeicher dafür werden allerdings vor allem von ausländischen Unternehmen hergestellt).	• Es ist ein offen kommuniziertes/langfristig orientiertes Ziel der Bundesregierung, Deutschland zum Leitmarkt und Leitanbieter für die Elektromobilität zu machen. Dazu gehören im Rahmen der Hightech-Strategie 2020 auch neue Energiespeicherkonzepte, • Hohes Wachstum bei Publikationen zu LIB im Allgemeinen und zu Batterien für die Elektromobilität im Besonderen, • Das Wachstumspotenzial in öffentlich verfügbaren Marktstudien ist groß, praktisch der gesamte PKW-Bestand in Deutschland könnte durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden (wodurch die Nachfrage nach Energiespeichern stiege), • Starke Anreize aus der Entwicklung von Faktor-/ Produktpreisen, Deutschlands Rohstoffarmut macht Ausstieg aus teurem Erdöl bei gleichzeitig kontinuierlich sinkenden Batteriepreisen verlockend, • Hoher regulatorischer Druck (Stichwort: CO_2-Emissionen) sowie Steueranreize sorgen dafür, dass die Nachfrage nach Elektromobilität und Energiespeichern steigt, • Interessenartikulation durch die wichtigsten Kunden findet statt, sowohl die Elektromobilität als auch die Energiespeicher dafür sind Teil der öffentlichen Diskussion.

Wissens-entwicklung	• Geringer Weltanteil bei Publikationen und Patenten zu LIB im Allgemeinen und zu Batterien für die Elektromobilität im Besonderen, • Mit der geringen Anzahl von Patenten einhergehend eher geringes marktbezogenes Wissen, Verbesserung langsam absehbar, • Auch das deutsche TIS kann in Bezug auf die Personalkosten nicht mit Niedriglohnländern mithalten, höhere Kosten bringen großen Innovationsbedarf mit sich.	• Zahlreiche große Forschungsprogramme und -projekte wurden gestartet, um Deutschlands Rückstand in LIB im Allgemeinen und Batterien für die Elektromobilität im Besonderen aufzuholen, • Hohes Wachstum bei Publikationen und Patenten zu LIB im Allgemeinen und zu Batterien für die Elektromobilität im Besonderen, • Unternehmensinvestitionen in FuE resultieren in Deutschland in einem relativ hohen Unternehmensanteil an Publikationen und Patenten, • Die Lernkurven zeigen auch in Deutschland bzw. für deutsche Forschungseinrichtungen und Unternehmen in eindeutige Richtungen, nach oben (Energiedichte) und nach unten (Kosten).
Unternehmerisches Experimentieren	• Aufgrund der hohen zu tätigenden Grundinvestitionen keine Start-ups/kleine Unternehmen, • Zahlreiche Joint Ventures gegründet und aufgelöst, • Konsolidierungsprozess bei Technologievielfalt am Markt zu beobachten, neue Experimente kommen kaum gegen Erwartungsdruck an und werden ggf. „verbrannt“/ihm zu früh ausgesetzt – es bleibt die Optimierung vorhandener Zellchemien.	• Zahlreiche neue Marktteilnehmer auch in Deutschland entlang der gesamten Wertschöpfungskette rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität aktiv, • Überwiegend etablierte mittelständische und Großunternehmen ggf. mit neuem Geschäftszweig in Portfolio, • Hohe Anzahl von Experimenten mit der neuen Technologie, siehe unterschiedliche Zellchemien, • Hohe Anzahl verschiedener Typen von neuen Anwendungen für unterschiedliche Einsatzszenarien, • Vielfältige Breite an Technologievielfalt bzw. von Zellchemien am Markt in Anwendungen erhältlich.

Wissensverbreitung/ Entwicklung positiver externer Effekte	• Die Unsicherheit vor allem hinsichtlich der konkret zu erwartenden Marktentwicklung ist sehr hoch, • Politische Macht der etablierten Industrie noch hoch, z. B. die Erdölindustrie und der Teil der Automobilindustrie, der auf die Optimierung und den Weiterverkauf herkömmlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor setzt, • Unternehmenskooperation in Bezug auf Technologien eher nicht frei möglich, sondern vor allem im Rahmen von Joint Ventures und viel quasi „Produktwerbung“ auf öffentlichen Veranstaltungen.	• Zahlreiche, inhaltlich vielfältige nationale/internationale Workshops und Konferenzen aller Größen in Deutschland, • Netzwerke rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität vorhanden, regelmäßige Abstimmung zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft u. a. durch breit angelegte und durch Begleitmaßnahmen untermauerte Forschungsprojekte, • Positive externe Effekte allenthalben, Unsicherheit hinsichtlich Technologie verschwindet nach und nach, Legitimität steigt deutlich und einheitlicher Arbeitsmarkt vorhanden.
Legitimität	• Die Größe der Interessengruppen im Vergleich zur etablierten Lobby ist noch eher gering, • Das öffentliche Bild von Energiespeichern für die Elektromobilität wie für alle neue Technologien ist eher durchwachsen, einige wenige Negativbeispiele wie Batteriebrände sorgen für überhöhten Sicherheitsbedarf, dazu kommen Phänomene wie die „Reichweitenangst“.	• Zahlreiche Interessengruppen resultierend aus Bedeutung von Klimawandel für die Gesellschaft, • Die Legitimität des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität ist groß bzw. die neue Technologie passt sehr gut zur aktuellen Gesetzgebung und Wertebasis, • Die Legitimität beeinflusst Nachfrage von Energiespeichern, Gesetzgebung und Unternehmensverhalten unterschiedlich, aber gering bzw. indirekt über Faktor-/Produktpreise, Regulierung von CO_2-Emissionen, Kundennachfrage.

Ressourcen-mobilisierung	• Ein deutlich anwachsendes Kapitalvolumen ist in Deutschland für das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität nicht festzustellen, was auch mit dem Ausbleiben des Aufbaus einer nationalen Batteriezellproduktion zusammenhängt, • Das verfügbare Start- und Risikokapital wird durch die Akteure im analysierten TIS nicht abgerufen, • Komplementäre Vermögenswerte sind überwiegend in Besitz von Universitäten oder marktnahen Forschungseinrichtungen, was große Anliegen bzw. Projekte der Industrie in FuE nicht leichter durchführbar macht.	• Ausreichend verfügbare Ressourcen für die FuE sind vorhanden, sowohl aus der öffentlichen Hand als auch in der Industrie, • Start- und Risikokapital sind vorhanden und wachsen, • Das Volumen und die Qualität des Humankapitals wachsen bzw. steigen Jahr für Jahr weiter an.
Markt-entstehung	• Es gibt keine Nischenmärkte für Elektrofahrzeuge, die neue Energiespeichertechnologie muss sich gegen die bereits weithin etablierten Technologien bewähren, • Öffentliche Anreize vor allem indirekt über Erhöhung der Nachfrage nach Elektrofahrzeugen, nicht wie bei Geschäftsmodellen rund um Batterien in der stationären Energiespeicherung, • Hohe Unsicherheit in Bezug auf die konkrete Marktentwicklung für die Elektromobilität, • Normungs- und Standardisierungsaktivitäten schreiten um die Energiespeicher herum (Stichwort: Ladeinfrastruktur) schneller voran.	• Die neue Technologie von allein gegen die etablierten Technologien durchsetzen, das ist eine Herausforderung, • Öffentliche Anreize wie Steuervorteile, Abschreibungen gibt es in Bezug auf die Elektromobilität und damit indirekt auch für die darin eingesetzten Energiespeicher, • Neue Umweltstandards (Stichwort: CO_2-Emissionen) erhöhen die Durchsetzungschancen für die Elektromobilität und damit auch für die Energiespeicher, • Qualitative/Quantitative Marktstudien sind vorhanden und bilden das große Potenzial für die Elektromobilität und elektrochemische Energiespeichertechnologien ab, • Normungs- und Standardisierungsaktivitäten kommen voran.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der vorangegangenen Analyse.

6.2 Fördernde und hemmende Schlüsselfaktoren

Es gibt zahlreiche mögliche fördernde und hemmende Schlüsselfaktoren für die Entwicklung eines neuen, aufkommenden TIS, wobei der Fokus in der Fachliteratur auf Letzteren liegt (Bergek et al. 2008-1, Seite 420ff.). Diese scheinen in der Mehrheit zu sein, weshalb TIS eine schwache funktionale Dynamik aufzeigen und sich nur relativ langsam oder gehemmt entwickeln können. Die Schlüsselfaktoren können dabei aus dem eigentlich analysierten TIS, oder aus einem das TIS umgebenden Bereich stammen. Gerade der Klimawandel und die öffentliche Reaktion darauf dient als ein Beispiel, wie externe Faktoren zahlreiche TIS beeinflussen und ihre interne funktionale Dynamik verändern.

In der Literatur gefundene Beispiele für hemmende Schlüsselfaktoren sind:

- Die Organisation der Befürworter einer neuen Technologie mag zu schwach sein, als dass sie zur Legitimität beitragen und sich für den Erfolg der neuen Technologie gut aufstellen können. Daraus resultierend mag die Funktion der Marktentstehung leiden, was wiederum Auswirkungen auf den Einfluss auf die Suchrichtung und das Unternehmerische Experimentieren hat.
- Auch unterentwickelte Kompetenzen von potenziellen Kunden mögen zu einer Abwesenheit oder einem dürftigen Ausdruck von Nachfrage führen, was die oben beschriebenen Resultate zeigen kann.
- Netzwerke können neuen Technologien ggf. nicht auf die Sprünge helfen, weil die Verbundenheit zwischen den Akteuren zu schwach ausfällt. Enge Netzwerke etablierter Technologen wiederum mögen den engl. „lock-in effect“ verstärken, wenn sie den Einfluss auf die Suchrichtung von potenziellen Zulieferern und Kunden weg von der neuen Technologie auslegen.

Gerade die Vielfalt von fördernden und hemmenden Schlüsselfaktoren kann in der formenden Phase (engl. „formative phase“) ein Problem für die Entwicklung des neuen, aufkommenden TIS darstellen. Manche Schlüsselfaktoren fördern oder hemmen darüber hinaus auch gleich mehrere Funktionen. Im Folgenden sind die fördernden und hemmenden Schlüsselfaktoren für das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität als Treiber und Blockaden dargestellt (Tabelle 20), abgeleitet aus der vorherigen Analyse von Schwächen und Stärken des TIS und der Beurteilung seiner Funktionalität. Daneben sind die betroffenen Funktionen dokumentiert und politische Schlüsselfragen werden formuliert.

Tabelle 20: Überblick über die Treiber (fördernde Schlüsselfaktoren) und Blockaden (hemmende Schlüsselfaktoren) im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland entlang der sieben analysierten Funktionen.

Treiber	**Betroffene Funkt.**	**Blockaden**	**Politische Schlüsselfragen**
• Langfristig angelegte Förderprogramme der Bundesregierung zur FuE, aber auch zu Produktions-, Prüf- und Testzwecken, • Riesiges Wachstumspotenzial zieht große Aufmerksamkeit und Interesse auf sich, • Hoher regulatorischer Druck sowie Steueranreize sorgen für Nachfrage nach Elektrofahrzeugen.	• Einfluss auf die Suchrichtung, • Wissensentwicklung, • Unternehmerisches Experimentieren, • Marktentstehung.	• Seitens der Industrie noch keine nationale Batteriezellproduktion vorhanden.	• Braucht Deutschland eine nationale Batteriezellproduktion? • Muss diese in einheimischem Besitz sein (Stichworte: Ganze Wertschöpfungskette in Deutschland abbilden, Arbeitsplätze sichern)?
• Starke Anreize aus der Entwicklung von Faktor-/Produktpreisen.	• Einfluss auf die Suchrichtung, • Wissensentwicklung, • Unternehmerisches Experimentieren, • Legitimität.	• Politische Instabilität bzw. Unsicherheit in Ländern, die den Rohstoffzugang regulieren.	• Wie sichert Deutschland den Zugang zu den für die Energiespeicher für die Elektromobilität benötigten Rohstoffen (bzw. welchen politischen Preis haben diese Aktivitäten)?
• Hohe Unternehmensinvestitionen in FuE, • Die Lernkurven zeigen in Deutschland bzw. für deutsche Forschungseinrichtungen und Unternehmen in eindeutige Richtungen.	• Wissensentwicklung, • Unternehmerisches Experimentieren, • Ressourcenmob., • Marktentstehung.	• Geringes marktbezogenes Wissen/hohe Unsicherheit, Verbesserung nur langsam absehbar, • Hoher Innovationsbedarf bringt hohe Forschungs- und Entwicklungskosten mit sich.	• Wie kann die Transition von herkömmlicher Mobilität zur Energiespeicher-basierten Elektromobilität erfolgen, ohne dass massenhaft Arbeitsplätze verloren gehen?

• Zahlreiche neue Marktteilnehmer auch in Deutschland, • Hohe Anzahl von Experimenten mit der neuen Technologie und hohe Anzahl verschiedener Typen von neuen Anwendungen für unterschiedliche Einsatzszenarien, • Vielfältige Breite an Technologievielfalt bzw. von Zellchemien am Markt in Anwendungen erhältlich.	• Unternehmerisches Experimentieren, • Wissensverbreitung/ Entwicklung positiver externer Effekte, • Legitimität, • Marktentstehung.	• Hohe Grundinvestitionen halten Start-ups/kleine Unternehmen ab, • Zahlreiche Joint Ventures gegründet und aufgelöst, • Konsolidierungsprozess bei Technologievielfalt am Markt zu beobachten.	• Wie gewährleistet Deutschland den Marktzugang auch für kleine Akteure? • Wie vergrößert Deutschland die Energiespeicher-Technologievielfalt zur Durchsetzung der Elektromobilität?
• Zahlreiche Workshops und Konferenzen in Deutschland, • Netzwerke sind vorhanden, regelmäßige Abstimmung zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, • Positive externe Effekte z. B. hinsichtlich einem einheitlichen Arbeitsmarkt.	• Wissensverbreitung/ Entwicklung positiver externer Effekte • Legitimität • Ressourcenmob. • Marktentstehung	• Hohe Unsicherheit hinsichtlich der konkret zu erwartenden Marktentwicklung, • Politische Macht der etablierten Industrie noch hoch, • Unternehmenskooperation in Bezug auf Technologien vor allem im Rahmen von rechtlichen Konstruktionen wie z. B. JV	• Wie kann das Marktwachstum für die Elektromobilität bzw. die dafür notwendigen Energiespeicher angeregt werden? • Wie werden möglichst viele Synergien in der Unternehmenskooperation realisiert?
• Zahlreiche Interessengruppen resultierend aus Bedeutung von Klimawandel für die Gesellschaft, • Legitimität des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität ist groß.	• Legitimationseinfluss, • Ressourcenmob., • Einfluss auf die Suchrichtung, • Marktentstehung.	• Größe der Interessengruppen, • Öffentliches Bild von Energiespeichern für die Elektromobilität wie für alle neuen Technologien eher durchwachsen.	• Wie kann der Legitimationseinfluss weiter vergrößert werden, für eine schnellere Durchsetzung von Elektromobilität?

• Zukunftstrend Verstädterung schreitet auch in Deutschland voran, • Lokale Verschmutzung steigt (Stichworte: Feinstaub, Lärm).	• Legitimationseinfluss, • Ressourcenmobilisierung, • Einfluss auf die Suchrichtung, • Marktentstehung.	• Vorhandene Infrastruktur (Stichwort: Verkehrswegeausbau) kann das Wachstum kaum tragen, • Zuerst die Nachfrage nach Elektromobiliät oder die Infrastruktur?	• Wie können Deutschlands Städte mittels Elektromobilität auch in Zukunft lebenswert bleiben?
• Ausreichend verfügbare Ressourcen für die FuE sind vorhanden, • Start- und Risikokapital sind vorhanden und wachsen, • Volumen und Qualität des Humankapitals wächst bzw. steigt Jahr für Jahr.	• Ressourcenmobilisierung, • Marktentstehung, • Legitimationseinfluss.	• Kapitalvolumen im TIS in Deutschland wächst nicht stark, • Verfügbares Start- und Risikokapital nicht abgerufen, • Kompl. Vermögenswerte nicht in Unternehmensbesitz.	• Wie sind die Ressourcen der öffentlichen Hand bereitzustellen, damit ihr Einsatz den größten Nutzen in Hinblick auf die später zu erwartenden Märkte bringt?
• Keine Nischenmärkte vorhanden, neue Energiespeichertechnologien müssen sich „selbst“ durchsetzen, • Öffentliche Anreize sind vorhanden, • Qualitative Marktstudien bestätigen Kundenpotenzial, • Normungs- und Standardisierungsaktivitäten laufen, • Zukunftstrend Elektromobilität in Startposition.	• Marktentstehung, • Einfluss auf die Suchrichtung, • Legitimationseinfluss, • Ressourcenmobilisierung.	• Keine Nischenmärkte für neue Energiespeichertechnologien, • Öffentliche Anreize sind vorhanden und rufen ggf. nicht gewollte Konsumentscheidungen hervor, • Hohe Unsicherheit hinsichtlich konkreter Marktentwicklung, • Normungs- und Standardisierungsaktivitäten um die Energiespeicher herum schneller, • Kundenakzept. verbessert sich.	• Wie sind die Ressourcen der öffentlichen Hand einzusetzen, damit ihr Einsatz den größten Nutzen in Hinblick auf die später zu erwartenden Märkte bringt?

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der vorangegangenen Analyse.

6.3 Politische Schlüsselfragen

Schlussendlich ist es sehr wichtig, die politischen Schlüsselfragen hinsichtlich der Mechanismen zu spezifizieren, welche die Ausbildung eines wünschenswerten funktionellen Musters im analysierten TIS behindern oder fördern (Bergek et al. 2008-1, Seite 423). Die politischen Entscheidungen sollten dabei so gefällt werden, dass sie schlechtere Funktionalität in einem TIS durch die Stärkung von fördernden Mechanismen und Schwächung von blockierenden Mechanismen zu verbessern suchen. Interessant ist dabei, dass es viel weniger um die weniger leicht aufzuhebenden strukturellen Defizite eines TIS als vielmehr die schneller zu verbessernde funktionelle Dynamik eines TIS geht.

Im Rahmen der Analyse von fördernden und hemmenden Schlüsselfaktoren wurden bereits mehrere politische Schlüsselfragen gefunden (siehe Kapitel 6.2), welche im Folgenden auskommentiert werden.

1. Braucht Deutschland eine nationale Batteriezellproduktion?

Der Vergleich des TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland mit den entsprechenden, aber in einer anderen Entwicklungsphase befindlichen TIS in China, Japan und Korea ergibt eine hohe Notwendigkeit einer Batteriezellproduktion in Deutschland oder in Deutschlands Nachbarländern. Ersteres wird natürlich von nationalen Netzwerken wie dem Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e.V. (KLiB) betont, aber auch von der Bundesministerin für Bildung und Forschung, Prof. Dr. Johanna Wanka so unterstützt:

> „Damit Deutschland eine führende und wettbewerbsfähige Position in der Elektromobilität und Speicherung regenerativer Energien einnehmen kann, ist der Aufbau einer Großserien-Fertigung durch deutsche Unternehmen unablässig“. (KLiB 2015, Seite 1)

Gerade auch die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) steht zu diesem Ziel:

> „Die Versorgung mit Li-Ionen-Zellen für die Batterieproduktion in Deutschland erfolgt derzeit vor allem durch Lieferanten aus Asien. Aktuell ist dies kein Hemmnis für den Markthochlauf der Elektromobilität in Deutschland. Der Produktionsanteil hierzulande hergestellter Li-Ionen-Zellen am Gesamtmarkt ist momentan nur gering. […] Bei Eintritt des angestrebten Markthochlaufes in Deutschland, aber auch weltweit, müssen rasch weitere Fertigungskapazitäten aufgebaut werden. Ab diesem Zeitpunkt ist eine Zellproduktion in Deutschland sinnvoll, um an dem weltweit wachsenden Markt für Li-Ionen-Batterien als Wirtschaftsstandort zu partizipieren und die prognostizierten positiven Beschäftigungseffekte zu erzielen. Dadurch wird die derzeitig geografisch einseitig ausgerichtete Versorgungskette global besser balanciert. Dies gilt nicht nur für die Zelle selbst, sondern für die gesamte Wertschöpfungskette.“ (NPE 2014, Seite 59ff.)

Im Januar 2016 legte die NPE dann auch die „Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland“ vor, in der sie die Ansiedlung einer Batteriezellproduktion in Deutschland propagiert und auch exemplarisch den Aufbau einer Zellproduktion beschreibt (NPE 2016,

Seite 6ff.). Eine Batteriezellproduktion müsste aber nicht ausdrücklich in Deutschland angesiedelt sein – Unternehmen könnten sich mit einer umfassenden Standortplanung auch dafür entscheiden, sie in europäischen Nachbarländern aufzubauen und zu betreiben:

> „Deutsche bzw. europäische OEM werden zukünftig großvolumig Elektrofahrzeuge bauen, sodass sich zukünftig auch in Europa alleine aus Transport- und logistischen Gründen eine Batterieproduktion ansiedeln muss." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 33)

Die alles entscheidende Frage wird deshalb sein, welche Unternehmen die Fabrikanlagen aufbauen und damit essenzielles Know-how zur Batterieproduktion aufbauen und sich mittel- und langfristig Anteile des vielversprechenden Marktes sichern möchten.

2. Muss diese in einheimischem Besitz sein (Stichworte: Ganze Wertschöpfungskette in Deutschland abbilden, Arbeitsplätze sichern)?

Die oben erwähnten positiven Beschäftigungseffekte ließen sich zumindest in einem geringeren Umfang auch durch eine in asiatischem Besitz befindliche Batterieproduktion in Deutschland realisieren, weshalb die Frage der Notwendigkeit des einheimischen Besitzes noch nicht abschließend geklärt wurde.

> „Asiatische Unternehmen errichten dabei in Europa bereits Produktionsstätten oder planen dies [(VDMA Batterieproduktion 2016, Seite 18f.).] Eine heimische Batterieproduktion wird in Zukunft am wahrscheinlichsten durch einen finanzstarken Automobilhersteller bzw. Tier 1-Unternehmen zu realisieren sein („Marktmacht"), welcher sowohl die nötige Nachfrage erzeugen als auch klare Anforderungen hinsichtlich Kosten, Leistungsparameter, Zellformat, Zellchemie, Zelldesign etc. formulieren kann (weniger in einem Konsortium mit vielen Unternehmen). […] Nach nun einigen Jahren mit Versuchen eine deutsche (global wettbewerbsfähige) Zellfertigung aufzubauen scheint [die von der Volkswagen AG geplante Pilotanlage] aktuell der realistischste Einstieg in eine heimische großvolumige Zellfertigung zu sein. Klar wird aber, dass dies politisch kaum gesteuert werden kann sondern aus Initiative der Unternehmen (OEM) kommen muss, um dann unterstützt werden zu können." (Fraunhofer ISI 2016, Seite 33)

Mit einer in asiatischem Besitz befindlichen Batterieproduktion in Europa bzw. Deutschland würde jedoch die Vormachtstellung asiatischer Batteriezellhersteller untermauert werden:

> „Bereits existierende asiatische Zellproduktionen würden für die in Europa errichteten als Blaupause dienen. Eine Beteiligung deutscher Unternehmen würde dadurch erschwert. Dies würde zu einem deutlich geringeren Beschäftigungseffekt führen. Die aktuell zu beobachtende Rückwärtsintegration (Materialproduktion) und Vorwärtsintegration (Batterieproduktion) asiatischer Zellhersteller verschärft zusätzlich den Standortnachteil Deutschlands." (KLiB 2013, Seite 3)

In einer in deutschem Besitz befindlichen Batterieproduktion würde deshalb eine große Chance für den deutschen Anlagen- und Maschinenbau sowie Mittelstand insgesamt liegen.

Aber auch auf das Szenario einer nicht im einheimischen Besitz befindliche Batteriezellproduktion muss die deutsche Industrie vorbereitet sein:

> „Schließlich müssen die deutschen Marktteilnehmer auch ohne eine heimische Zellproduktion wettbewerbsfähig bleiben und dies in Strategien einbeziehen. Hohe Wertschöpfungspotenziale ergeben sich für materialanbietende Unternehmen, modul- und packherstellende Unternehmen (z. B. Tier 1 oder OEM selbst) bis hin zu den OEM, die Zulieferindustrie insgesamt eingeschlossen. Es wäre wichtig, auch die Hebeleffekte einer Zellproduktion in Deutschland bzw. Europa realistisch einzuschätzen und herauszufinden, ob diese wirklich entscheidend sind. Längst gilt es nicht mehr als zutreffend, dass gesamte Wertschöpfungsketten-Strukturen inländisch oder innereuropäisch zwingend abgedeckt sein müssen und starke materialherstellende Unternehmen und systemintegrierende Unternehmen können eventuell größere Hebeleffekte erzielen als eine schwache Zellproduktion. Es zeigt sich aber auch, dass sich in den letzten Jahren zunehmend Systemintegratoren und Dienstleister am Zukunftsmarkt Energiespeicher für Elektroautos sowie für stationäre Anwendungen bis hin zu Second Life Konzepten positioniert haben und versuchen ihre Wettbewerbsfähigkeit auszubauen. Auch wenn hier eine künftige Konsolidierung normal sein wird, ergeben sich dennoch zunehmend Fragen, welche Geschäftsmodelle und Dienstleistungskonzepte sich künftig etablieren und behaupten können werden und wie stark sich eine Abhängigkeit deutscher Unternehmen von asiatischen Zellherstellern auswirken wird.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 34)

Daneben ergibt sich eine gleichbedeutend wichtige Chance, wenn die Wertschöpfung aus anderen Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität wie z. B. im Leichtbau oder in der Leistungselektronik konsequent in Deutschland realisiert wird. Dazu müssten gerade die schon bisher erfolgreichen Branchen wie z. B. die Chemieindustrie, der Anlagen- und Maschinenbau sowie die deutsche Automobilindustrie breit gefördert werden.

3. Wie sichert Deutschland den Zugang zu den für die Energiespeicher für die Elektromobilität benötigten Rohstoffen?

Deutschland wird auch in Zukunft hervorragende diplomatische Beziehungen mit politisch ggf. nicht besonders stabilen oder nicht demokratisch organisierten Staaten pflegen müssen, die hinsichtlich der in Energiespeichern für die Elektromobilität eingesetzten Rohstoffe führend sind. Im Vergleich der entsprechend analysierten TIS besteht diese Herausforderung auch für hinsichtlich der Batterietechnologie führende Länder wie Japan und Korea, die selbst über kaum Rohstoffe im eigenen Land verfügen. Deshalb wäre es ratsam, die folgenden Schritte schnell einzuleiten:

> „Eine (bundesweite) Rohstoffstrategie für Deutschland hat daher für das übergreifende Thema der Elektromobilität in Deutschland langfristig eine hohe Bedeutung. Da eine Rohstoffstrategie auf Bundesebene zu kleinteilig ausfallen könnte, wäre ggf. auch eine spezifisch für das Thema Elektromobilität entworfene europäische Rohstoffstrategie zu verfolgen, welche die bisherigen Aktivitäten auf EU-Ebene zuspitzt. In der Europäischen Union könnte so eine kritische Masse erreicht werden, welche die Ausgestaltung einer solchen

Strategie für die Elektromobilität tatsächlich lohnenswert erscheinen ließe. Ein weiteres Argument für eine EU-weite Strategie liegt darin, dass kein einzelnes europäisches Land hinsichtlich aller Rohstoffe optimal versorgt ist und im Verbund zahlreiche Synergien genutzt werden könnten. Vor diesem Hintergrund könnten die EU-Mitglieder mit hoher Kaufkraft nach außen auftreten und so eine günstige Position auf den globalen Rohstoffmärkten einnehmen. Im Innenraum könnte dann der jeweils eigene Zugang eines Landes zu den Rohstoffen hinten angestellt und dafür der Handel mit weiter aufbereiteten Produkten forciert werden. Eine solche Strategie müsste dabei mehrere Risikofaktoren adressieren wie z. B.: Welche Zelltechnologie und Zellchemie wird sich im Massenmarkt durchsetzen und welchen Rohstoffverbrauch nach sich ziehen? Wie verändert der Technologiewandel (z. B. Co-reduzierte NMC Materialien, höhere Energiedichten, verbesserte Produktion, geringerer Ausschuss) den Rohstoffbedarf? Wann ergibt sich ein hinreichend großer Rücklauf von Fahrzeugbatterien und wie sind Recycling vs. Second Life Konzepte u. a. ökonomisch in der Zukunft zu bewerten? Standardisierung, Preisentwicklung, Skale-up der Produktion, Lebensdauer, Anwendungen und Geschäftsmodelle hängen hier künftig eng zusammen und benötigen eine ganzheitliche systemische Betrachtung. Deutschland bzw. Europa könnten sich zukünftig evtl. zu einem Leitanbieter für das Recycling von Batterie-Rohstoffen und -Komponenten entwickeln.“ (Fraunhofer ISI 2016, Seite 31)

Daraus wird deutlich, dass Rohstoff- und Recyclingstrategie miteinander einhergehen müssen, um die Versorgung der deutschen Industrie mit wertvollen Rohstoffen auch langfristig sicherzustellen.

4. Wie kann die Transition von herkömmlicher Mobilität zur Energiespeicher-basierten Elektromobilität erfolgen, ohne dass Arbeitsplätze gefährdet werden?

Dieser politischen Schlüsselfrage kommt größte gesellschaftspolitische Bedeutung zu, wogegen die Antwort eher trivial anmuten mag: Die Transition kann dann erfolgreich ausfallen, wenn der technologische Wandel zum einen von Seiten der Industrie nicht verschlafen, sondern proaktiv ausgestaltet wird, was gerade auch in Bezug auf die oben angesprochene Bedeutung einer in einheimischem Besitz befindlichen nationalen Batterieproduktion gilt. Zum anderen wird es wichtig sein, den technologischen Wandel auch mit immer fortlaufender Qualifikation über Aus- und Weiterbildung der deutschen Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer einhergehen zu lassen.

5. Wie gewährleistet Deutschland den Marktzugang auch für kleine Akteure?

Die Bundesregierung wird sich auch in den nächsten Jahren dafür einsetzen müssen, deutsche Start-ups an der Elektromobilität teilhaben zu lassen. Einen ersten Schritt ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) bereits mit dem Online-Informations- und Vernetzungsportal „StartGreen“ gegangen, welches auch grünen Start-ups im Bereich der Elektromobilität offen steht (StartGreen 2016). Damit es bei Start-ups wie zum Beispiel ubitricity Gesellschaft für verteilte Energiesysteme mbH im Bereich der Infrastruktur oder e-Motion Line GmbH im Bereich der Mobilitätskonzepte nicht bleibt, werden Maßnahmen wie Existenzgründerwettbewerben eine große Bedeutung

zukommen. Daneben wird allerdings auch das Risikokapital (engl. „venture capital“) deutlich ausgeweitet werden müssen, was Start-ups im Bereich der Energiespeichertechnologien zu Gute kommen würde, wo gleich zu Beginn hohe Investitionen getätigt werden müssen.

6. Wie vergrößert Deutschland die Energiespeicher-Technologievielfalt zur Durchsetzung der Elektromobilität?

Als größte Herausforderungen in der FuE an Energiespeichertechnologien im Allgemeinen bzw. der LIB im Besonderen gelten die zu senkenden Kosten und die gleichzeitig zu erhöhende Energiedichte, beides würde den Markthochlauf der Elektromobilität fördern und ihre Verbreitung beschleunigen (NPE 2014, Seite 57). Die NPE gab folgende Ziele vor:

- „Lade[zyklen]anzahl: Mindestens 1.200 Zyklen sind sicherzustellen.
- Schnellladefähigkeit: Eine 80-prozentige Aufladung sollte in weniger als 15 Minuten erreicht werden.
- Batteriematerialien sollten zukünftig [z. B. Hochvoltspinelle] einsetzbar machen.
- „Intelligente“ Zellchemie: Forschung und Entwicklung hin zu additivierten Elektrolyten, Festkörperionik und Festkörperelektrolyten lenken.
- Kathoden: Material für Tieftemperaturperformance mit höherer Energie- und Leistungsdichte entwickeln.
- Trotz sinkender Preise und steigender Energiedichte für Li-Ionen-Batterien ist die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Batteriesystemen auch weiterhin auf hohem Industriestandard zu halten.
- Das Recycling der heutigen Batterien ist sichergestellt. Im Fokus auf neue Zell- und Batterieprozesse sind Recyclingprozesse weiter zu erforschen, zu optimieren und entsprechende Nachnutzungskonzepte zu berücksichtigen.
- Die Standardisierungen von Zellmodulen werden im Rahmen der Aktivitäten durch den VDA weiter vorangetrieben.“ (NPE 2014, Seite 58)

Mit Bekanntmachungen wie der des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Förderung von „Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen (Batterie 2020)“ vom 30. Juli 2014 (BMBF 2014) sowie der erneuten Ausschreibung am 25. Januar 2016 (BMBF 2016-2) unterstützt die Bundesregierung die Technologievielfalt:

> „Die Bundesregierung unterstützt daher seit mehreren Jahren die Forschung an elektrochemischen Energiespeichern als einen wichtigen Baustein für die Elektromobilität und die Energiewende. Dabei stehen neben dem Aufbau elektrochemischer Kompetenzen in Forschungseinrichtungen und Industrie die Steigerung der Energiedichte von Batteriesystemen, deren Sicherheit sowie die notwendigen Prozess- und Produktionsparameter zur Herstellung im Vordergrund. […] Die mit dieser Bekanntmachung angesprochenen Batteriesysteme fokussieren auf Lithium-Ionen-, Metall-Ionen-, -Metall-Schwefel- und Metall-Luft/Sauerstoff-Systeme. In Abgrenzung zu anderen Fördermaßnahmen des BMBF werden keine Vorhaben zu Redox-Flow-Batterien oder Doppelschichtkondensatoren gefördert. Die adressierten Material- oder Prozessentwicklungen sollen im Systemzusammenhang erfolgen und zu deutlichen, quantifizierbaren Verbesserungen von Eigenschaften wie

beispielsweise Energiedichte, Leistungsdichte, Schnellladefähigkeit, Lebensdauer, -Sicherheit, Alterung und Kosten führen. Untersuchungen zu Mechanismen sollen im Hinblick auf eine zielgerichtete Verbesserung der Prozesstechnik und des Materials durchgeführt werden." (BMBF 2016-2)

7. Wie kann das Marktwachstum für die Elektromobilität bzw. die dafür notwendigen Energiespeicher angeregt werden?

Die Diskussionen der letzten Jahre um eine weitergehende finanzielle Förderung der Elektromobilität über die steuerliche Förderung hinaus wurde von der Bundesregierung im Juni 2016 vorläufig beendet: Der Kauf von Elektrofahrzeugen wird nun direkt subventioniert (BAFA 2016), wobei darauf geachtet wurde, dass die Subvention zu gleichen Teilen vom Staat und dem jeweiligen Automobilunternehmen bzw. Elektrofahrzeughersteller kommt und zu teure Elektrofahrzeuge von der Förderung ausgenommen sind.

Der Blick auch auf andere Länder zeigt jedoch, dass es viele weitere Möglichkeiten gibt, sinnvolle Anreize für den Kauf eines Elektrofahrzeugs zu setzen (siehe Kapitel 5.1.1.2.5).

Ein weiteres Problem liegt allerdings tiefer: Die mittlerweile erstklassige Batterie-FuE in Deutschland trägt für die deutschen Unternehmen kaum Früchte bzw. der damit erzielte Umsatz wird vor allem im Ausland gemacht (Zeit Online 2014-2). Um dies zu verhindern bzw. den Trend umzukehren, muss die Bundesregierung z. B. der Automobilindustrie auch weiterhin helfen, kostspielige Experimente zur Umsetzung von nicht ganz praxisnahen Innovationen in Bezug auf die Elektromobilität zu realisieren, und es auch konsequent einfordern.

8. Wie werden möglichst viele Synergien in der Unternehmenskooperation realisiert?

Unternehmenskooperationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette gilt es für die Bundesregierung auch in Zukunft zu fördern, wobei es sowohl um die Einrichtung von JV als auch um den Aufbau von Lieferbeziehungen gehen kann. Eine Basis dafür ist die Förderung der alljährlich stattfindenden Kongresse sowohl der Automobilindustrie in Bezug auf die Elektromobilität als auch der Batterieindustrie in Bezug auf die Energiespeicher.

9. Wie kann die Legitimität für eine schnellere Durchsetzung von Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeichertechnologien weiter vergrößert werden?

Die Legitimität von Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeichertechnologien könnte schon heute gar nicht größer sein: Der Klimawandel ist Realität, insbesondere im Verkehrssektor weltweit sind CO_2-Emissionen einzusparen und somit zunehmend strengere Regulierung zu erwarten, Erdöl ist ohnehin endlich und seine Preissteigerung auf hohe Niveaus nur eine Frage der Zeit. Allerdings verbrauchen auch die Herstellung und der Betrieb von Elektrofahrzeugen im Moment noch CO_2-Emissionen, weil die dafür eingesetzte Energie zumindest teilweise aus fossilen Energiequellen kommt. Der Energiemix in Deutschland wird noch nicht vollständig von Erneuerbaren Energien eingenommen, wodurch die Legitimität der Elektromobilität allerdings deutlich vergrößert werden könnte.

Vergrößert werden kann die Legitimität außerdem durch fortlaufend intensive FuE an den Energiespeichern für die Elektromobilität, denn je nahtloser Elektrofahrzeuge herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ersetzen, desto besser und desto schneller wird die Verbreitung von Elektrofahrzeugen ablaufen, wenn sie eines Tages ähnlich leistungsfähig und ggf. ähnlich teuer wie die herkömmlichen Fahrzeuge sind.

10. Wie können Deutschlands Städte mittels Elektromobilität auch in Zukunft lebenswert bleiben?

Diese Frage entfernt sich zu weit vom Thema der vorliegenden Dissertation und ist eher eine Aufgabenstellung für Stadt- bzw. Verkehrsplanung, die sich mit Elektromobilität als einem wichtigen Zukunftstrend befassen müssen. In Deutschland wurden hier erste Erfahrungen insbesondere im Rahmen der sogenannten „Modellregionen Elektromobilität“ als Förderprogramm des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gesammelt:

> „Alle [Aktivitäten] verfolgen das Ziel, die Elektromobilität alltagstauglich und anwendungsorientiert schrittweise in unseren Alltag zu verankern. Ideen und Modelle sind dabei vielfältig. So wurden in den vergangenen Jahren innovative Geschäftsmodelle entwickelt, Carsharing-Flotten "elektrifiziert", Elektrobusse eingesetzt und Ladeinfrastruktur im Stadtraum oder in Mobilitätspunkten verankert.“ (DIfU 2014)

Seine Fortsetzung erlebte das Förderprogramm, als vier sogenannte „Schaufenster Elektromobilität“ ausgewählt wurden wie folgt:

- „LivingLab BWe mobil (Baden-Württemberg),
- Internationales Schaufenster Elektromobilität Berlin-Brandenburg,
- Unsere Pferdestärken werden elektrisch (Niedersachsen),
- ELEKTROMOBILITÄT VERBINDET (Bayern-Sachsen).

In den vier Schaufensterregionen werden zwischen 2012 und 2016 90 Verbundprojekte mit 334 Teilvorhaben durch die Bundesregierung sowie weitere Projekte durch Landesregierungen und weitere Partner unterstützt.“ (Deutsches Dialog Institut 2017)

11. Wie sind die Ressourcen der öffentlichen Hand bereitzustellen, damit ihr Einsatz den größten Nutzen in Hinblick auf die später zu erwartenden Märkte bringt?

Die Antwort auf diese Frage ergibt sich aus den bisher gegebenen Antworten, z. B. die Antwort auf Frage 5 und Frage 7.

7 Zusammenfassung und Diskussion

Im siebten und letzten Kapitel werden zentrale Ergebnisse der vorliegenden Dissertation in einer Zusammenfassung geschildert (7.1) und in einer Diskussion eingeordnet (7.2).

7.1 Zusammenfassung

Die Elektromobilität erfuhr ein erneutes Aufleben, seit die Menschheit mit der jüngsten Jahrtausendwende realisierte, dass der fortschreitende Klimawandel u. a. auf das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2) zurückzuführen ist, welches auch durch den Verkehr emittiert wird. Innerhalb des Verkehrssektors wuchsen insbesondere die CO_2-Emissionen durch die Mobilität auf der Straße, weshalb der Fokus auf Elektrofahrzeuge und dabei vor allem Plug-in-Hybridfahrzeuge (engl. „plug-in hybrid electric vehicles“, Abkürzung PHEV) und batterieelektrischen Fahrzeugen (engl. „battery electric vehicles“, Abkürzung BEV) fiel. Für die Verwirklichung von Elektromobilität stellen elektrochemische Energiespeicher vor allem angesichts ihres wesentlichen Wertschöpfungsbeitrages eine Schlüsseltechnologie dar, weshalb ein internationales Wettrennen einsetzte, um möglichst früh große Marktanteile zu sichern.

Als Methodik zur Analyse, welche Länder weltweit die besten Voraussetzungen für diese Konkurrenz aufweisen, wurden die Grundlagen zu Technologischen Innovationssystemen (TIS) in den Erneuerbaren Energietechnologien ausgewählt, dokumentiert und ausführlich diskutiert. Der TIS-Ansatz entwickelte sich evolutionär über verschiedene Ansätze der Innovationssystemforschung hinweg und erlaubt heute nicht nur eine funktionale Analyse von TIS, sondern bietet auch ein Phasenmodell zur Entwicklung von TIS, für das in der vorliegenden Dissertation eine Erweiterung vorgeschlagen wird. Eine Untersuchung relevanter Fallstudien in den Erneuerbaren Energietechnologien nach den drei Kriterien Hypothese, Ergebnis und Lesson learned erlaubte es, bewährte Vorgehensweisen für die folgende, detailliert vergleichende Innovationssystem-Analyse abzuleiten.

Ein umfassendes Roadmapping bis zum Jahr 2030 zeigt auf, welche technologischen Entwicklungspfade zur Verfügung stehen, welche Anwendungsvielfalt und Marktentwicklung zu erwarten ist und welche Herausforderungen konkret zu lösen sind, um den technischen Fortschritt mit der marktbezogenen Nachfrage in Einklang zu bringen:

> „Die Roadmaps zeigen, dass kostenoptimierte Elektrofahrzeuge in den kommenden Jahren nur für bestimmte Zielgruppen und Einsatzzwecke attraktiv sind. Durch die schrittweise Reichweitensteigerung mittels einer verbesserten Batterietechnologie sowie eines optimierten Energieverbrauchs können bis zum Jahr 2030 aber kostenoptimierte Fahrzeugmodelle entwickelt werden, die Reichweiten herkömmlicher Automobile mit Verbrennungsmotor erreichen und sich in kurzer Zeit aufladen lassen. Ein vollständiger Wechsel in eine rein elektrifizierte Mobilität kann also aus technischer Sicht zwischen 2030 und 2050 nach einem Markthochlauf bis 2030 gelingen – und zwar allein auf Basis einer optimierten Lithium-Ionen-Batterietechnologie.“ (Fraunhofer ISI 2015-4)

Aus den beiden oben genannten, innerhalb der politischen Rahmenbedingungen wirklich zukunftsfähigen Fahrzeugkonzepten der Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeicher resultieren verschiedene Anforderungen und zentrale Leistungsparameter, welche vor allem die ausführlich diskutierte LIB erfüllt.

Vor diesem Hintergrund also wurde in dieser Dissertation das Technologische Innovationssystem (TIS) rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität auf Systemebene (die sogenannten „Batteriesysteme“) bzw. noch vor der Integration in spezifische Fahrzeugkonzepte in Deutschland im Kontext der Europäischen Union analysiert und in Vergleich mit den vergleichbaren TIS in den Ländern China, Japan, Korea, den USA und Frankreich gesetzt. Diese sechs Länder wurden im Rahmen einer Patentanalyse als führend bestimmt, wobei insbesondere Japan nach anfänglicher Führung durch die USA in den 80er Jahren heute mit weitem Abstand unumstrittener Technologieführer ist.

Die Analyse begann mit den maßgeblichen strukturellen Komponenten und zuerst der Energiespeicher-Industrie/Batteriezellhersteller, wo Unternehmen aus den asiatischen Ländern Japan, China und Korea über alle Komponenten hinweg dominieren. Ein leicht abweichendes Bild ergibt sich in der Automobilindustrie/Elektrofahrzeughersteller, wo bei PHEV mit der BYD Auto Company China ein chinesisches Unternehmen deutlich führt, vor zwei US-amerikanischen und einem japanischen Unternehmen. Bei BEV wiederum führt mit der Renault-Nissan Alliance ein französisch-japanisches Joint Venture vor einem US-amerikanischen und zwei chinesischen Unternehmen. Mit den drei Unternehmen Toyota Motor Corporation (Pionier und Innovationsführer in HEV → Pionier und Innovationsführer in FCEV), Tesla Inc. (vom Angreifer zum Weltmarktführer in BEV) und der BMW Group (Plug-in-Hybridisierung der Produktpalette auf dem Weg zum BEV-Premiumhersteller) wurden drei vollkommen abweichende Unternehmensstrategien in detaillierten Fallstudien analysiert.

Anschließend wurde das funktionale Muster des TIS in den sechs führenden Ländern analysiert, entlang der sieben Schlüsselprozesse bzw. Funktionen des Einflusses auf die Suchrichtung, der Wissensentwicklung, des Unternehmerischen Experimentierens, der Wissensverbreitung/Entwicklung positiver externer Effekte, der Legitimität, der Ressourcenmobilisierung und der Marktentstehung. Dabei wurden die strukturellen Komponenten eines TIS berücksichtigt: Akteure und Netzwerke z. B. durch den Blick auf die Entstehung und Abwicklung zeitweiliger Unternehmenszusammenschlüsse zur Entwicklung von PHEV und BEV weltweit, der zeigte, welche Dynamik zwischenzeitlich in der Netzwerkbildung herrschte, und wie die Konsolidierung vorangeschritten ist. Zu den strukturellen Komponenten zählen auch nicht-technische Institutionen/Rahmenbedingungen wie z. B. die Regulierung/Gesetzgebung und Kundenakzeptanz, die über den zukünftigen Erfolg oder Misserfolg der Elektromobilität und den Markthochlauf sowie die Diffusion von Elektrofahrzeugen entscheiden.

In Bezug auf den Einfluss auf die Suchrichtung muss keine Regierung der sechs untersuchten Länder den Vergleich scheuen, es wurden in allen Ländern Ziele gesetzt und Maßnahmen ergriffen. Japans Regierung stach die anderen Länder allenfalls durch eine viel früher getroffene Entscheidung aus. Hinsichtlich der Anzahl von wissenschaftlichen Artikeln in Veröffentlichungen führen sowohl bei Energiespeichern für die Elektromobilität im Allgemeinen

als auch bei LIB im Besonderen China und die USA mit den größten Weltanteilen, das größte Wachstum weisen Deutschland und Korea auf. Das Wachstumspotenzial ist für Unternehmen aus allen führenden Ländern gleich groß bzw. riesig, wobei China und die USA über die größten Binnenmärkte verfügen und hier Vorteile haben. Schwächen für die elektrochemischen Energiespeichertechnologien ergeben sich auf Basis der Anreize aus der Entwicklung von Faktor-/Produktpreisen, z. B. der Ölpreis könnte niedrig bleiben. Und während alle wichtigen Rohstoffe für Energiespeicher für die Elektromobilität schon heute relativ günstig und allenfalls mit einigen politischen Risiken behaftet sind, liegen die Batteriekosten insgesamt noch zu hoch und sollen in den nächsten Jahren deutlich sinken, bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungsfähigkeit. Im Hinblick auf die Rohstoffverteilung und den Zugriff darauf ist China am besten aufgestellt, Deutschland und Korea liegen dahinter weit zurück. Der regulatorische Druck sowie Steueranreize weisen aber in eine klare Richtung bzw. lassen den niedrigen Ölpreis irrelevant werden: Die Elektromobilität kommt, in allen Ländern. Vor diesem Hintergrund wird auch hinsichtlich der Interessenartikulation durch die wichtigsten Kunden deutlich, dass es gar nicht darauf ankommt, wer tatsächlich die wichtigsten Kunden sind: Die Elektromobilität wird von den potenziellen Kunden in allen möglichen Segmenten interessiert aufgenommen, allerdings noch nicht zu den verfügbaren – teuren – Konditionen.

In der Wissensentwicklung sind in jedem Land umfassende Aktivitäten zu verzeichnen, die Förderprogramme und Forschungsprojekte unterscheiden sich aber in Förderdauer, -volumen und -schwerpunkten. Die Ergebnisse einer Publikationsanalyse wurden bereits oben genannt, wo China und die USA den größten Weltanteil aufweisen, in einer Patentanalyse liegt Japan anteilsbezogen mit riesigem Abstand vorne. Aus den beiden untersuchten Lernkurven wird ersichtlich, dass die Trends in der Energiedichte (nach oben) und bei den Kosten (nach unten) in jeweils eine ganz klare Richtung zeigen. Japan wird in der Energiedichte, bei der Lebensdauer und in der Sicherheit mit deutlichem Vorsprung jeweils vor dem klassischen Verfolger Korea, im Falle der Sicherheit vor Deutschland, das höchste Potenzial zugetraut, die besten Leistungsparameter zu erreichen.

Die Anzahl neuer Marktteilnehmer und Maßnahmen zur Diversifizierung des Portfolios etablierter Akteure hat sich insbesondere in den Jahren der anfänglichen Formierung eines Marktes der Energiespeicher für die Elektromobilität zwischen den Jahren 2007 und 2012 deutlich erhöht bzw. wurden durchgeführt. Es entstand weltweit eine hohe Dynamik, was Markteintritte und die Verkündung sowie Auflösung von Unternehmenskooperationen und dabei insbesondere JV zwischen Automobilherstellern und -zulieferern, Batterieherstellern und Energie- bzw. Stromversorgungsunternehmen anbelangte. In der folgenden Konsolidierungsphase hielten sich allerdings vor allem die großen Industriekonglomerate aus Asien und vor allem Japan, welche die mit Abstand größten Marktanteile aufweisen.

Beim Unternehmerischen Experimentieren läuft nach wie vor eine hohe Anzahl und Vielfalt von Experimenten mit der neuen Energiespeichertechnologie, es wird eine breite Vielfalt von Zellchemien eingesetzt. Vorteile liegen hier auf der Seite der asiatischen Hersteller aus Japan, gefolgt von China und Korea. Die Breite von Technologien in neuen Anwendungen ist ebenfalls relativ groß, PHEV (chinesisches Unternehmen führend) und BEV (französisch-japanisches Unternehmen führend) stellen die bisher wichtigsten Beispiele dar.

In der Wissensverbreitung ist die Anzahl von Workshops und Konferenzen weltweit gestiegen. Gerade zu Beginn der Entstehung des TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität versuchten zahlreiche Akteure z. B. aus anderen TIS, sich im neuen TIS zu etablieren und die Aufstellung neuer Geschäftsfelder auszuloten, was in einem aktiven Wissensaustausch über mehrere Industriesparten hinweg resultierte und über die Jahre bzw. mit dem einsetzenden Konsolidierungsprozess wieder zurückgegangen ist. Die Entwicklung positiver externer Effekte hat es allerdings entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Energiespeicher für die Elektromobilität gegeben und ist auch weiterhin notwendig. Dabei hilft die große Anzahl von Netzwerken in allen sechs führenden Ländern, die intensiven Austausch ermöglicht. Die Entwicklung positiver externer Effekte ist messbar und schlägt sich u. a. in einem beständig wachsenden Arbeitsmarkt rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität nieder. Die Auflösung von Unsicherheit und politischer Macht der etablierten Industrie ist nicht messbar, aber angesichts der Wissensentwicklung und dem Unternehmerischen Experimentieren nicht von der Hand zu weisen.

Bei der Legitimität ist die Anzahl, Entstehung und Größe von Interessengruppen in den analysierten Ländern angestiegen bzw. umfangreicher geworden. Die Dynamik in der Entstehung neuer Interessengruppen hat in den letzten Jahren allerdings abgenommen, was auch daran liegen dürfte, dass mit dem Voranschreiten des Markthochlaufes der Elektromobilität die maßgeblichen Anwendungen für elektrochemische Energiespeichertechnologien fester Bestandteil in der öffentlichen Aufmerksamkeit und daher nicht mehr zwingend „ungewohnt“ sind. Dazu kommt, dass sich Elektrofahrzeuge im Großen und Ganzen wie Automobile mit Verbrennungsmotor fahren, Letzteren fast immer sehr ähnlich sehen und sich ohne größere Probleme in die aktuell gültige, öffentliche Straßenverkehrsordnung einfügen. Potenzielle Käufer bzw. Besitzer von Automobilen mit Verbrennungsmotor können ohne größeren Umstiegsaufwand auch ein Elektrofahrzeug fahren. Die Stärke der Legitimität des TIS ist entsprechend groß, Probleme hinsichtlich der Legitimität gibt es ausschließlich dort, wo die Elektromobilität noch nicht als Standardlösung für den Alltag eingesetzt werden kann. Hinsichtlich der Beeinflussung von Nachfrage, Gesetzgebung und Unternehmensverhalten bezüglich einer Technologie durch ihre Legitimität ist festzustellen, dass die Nachfrage von anderen Faktoren deutlich stärker beeinflusst wird, die Gesetzgebung und das Unternehmensverhalten dagegen sehr stark von der Legitimität abhängt. Die Beeinflussung der Legitimität erfolgt hauptsächlich durch die bereits genannten Interessengruppen bzw. Netzwerke.

Hinsichtlich der Ressourcenmobilisierung ist ein steigendes Kapitalvolumen insbesondere in den asiatischen Ländern sowie in den USA in den letzten Jahren zu beobachten gewesen. In Deutschland und Frankreich ist das eingesetzte Kapital eher zurückgegangen. Weltweit ist genügend Start- und Risikokapital vorhanden und hohe Investitionen werden getätigt, aber gerade in den europäischen Ländern Deutschland und Frankreich wird es nur sehr konservativ vergeben bzw. investiert. Das Humankapital ist in allen sechs Ländern angewachsen, die beste Position hat dabei Japan gefolgt von Korea und den USA bei den Patenten, bei den Publikationen China und die USA gefolgt von Deutschland und Korea. Die komplementären Vermögenswerte sind in den asiatischen Ländern sowie in den USA deutlich angestiegen.

In der Marktentstehung sind neue Nischenmärkte in keinem der sechs Länder für elektrochemische Energiespeichertechnologien zu finden, sie müssen sich hier in allen denkbaren Anwendungen gegen die bereits etablierten Antriebe basierend auf herkömmlichen Verbrennungsmotoren bewähren. Öffentliche Anreize wurden in allen sechs Ländern in unterschiedlicher Höhe und Vielfalt gesetzt, sind aber aufgrund der oft mangelhaften Nachhaltigkeit ergriffener Maßnahmen in der öffentlichen Diskussion heftig umstritten. Neue Umweltstandards sind der Treiber für die Elektromobilität im Allgemeinen und elektrochemische Energiespeichertechnologien im Besonderen. Qualitative/quantitative Marktstudien sind vorhanden und bilden das große Potenzial ab, sowohl in Bezug auf die Marktentwicklung als auch die dafür in Frage kommenden Kundengruppen. Die Beschaffungsprozesse öffentlicher Institutionen verändern sich gerade und werden zunehmend auf die Anschaffung möglichst emissionsfreier Fahrzeuge ausgerichtet. Die Standardisierung ist gerade in Deutschland bzw. der Europäischen Union schon deutlich vorangekommen, ihre Bedeutung ist allerdings nicht deutlich genug herauszustellen – je mehr und je früher weitere Standardisierung ihren Einzug in das TIS rund um Energiespeicher für die Elektromobilität hält, desto besser.

Insgesamt resultiert aus diesen Ergebnissen ein Vorsprung der asiatischen Länder Japan vor China und Korea, vor den USA, Frankreich und Deutschland, der zwar kleiner wird, aber immer noch nicht aufgeholt ist. Für den Moment produzieren die asiatischen Batteriehersteller großformatige Zellen für die Abnehmer im eigenen Land und international.

Vor diesem Hintergrund wurde abschließend die Funktionalität des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland beurteilt, das sich in der formenden Phase befindet und sich damit im internationalen Vergleich vor allem mit Nachbarland Frankreich sowie den Vereinigten Staaten von Amerika vergleichen muss. Aus den Stärken und Schwächen wurden die fördernden und hemmenden Schlüsselfaktoren für das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität abgeleitet und als Treiber und Blockaden dargestellt. Daraus resultierten politische Schlüsselfragen, die es für die weitere Positionierung des deutschen Automobilstandorts hinsichtlich der Elektromobilität im Allgemeinen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien im Besonderen zu beantworten gilt.

7.2 Diskussion

Arbeiten wie (Covert et al. 2016) zeigen, dass fossile Brennstoffe für den Betrieb von herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor noch auf Jahrzehnte, vielleicht sogar Jahrhunderte hinaus günstig und ausreichend zur Verfügung stehen werden – dem noch vor einigen Jahren weithin verbreiteten Glauben widersprechend, zum Beispiel Erdöl sei nur noch begrenzt verfügbar und der Faktorpreis würde in naher Zukunft schon deutlich ansteigen. Es ist also vor allem eine einzige Kernfrage, welche die Menschheit weltweit beantworten muss: Wie heiß soll es auf der Erde werden? Der Klimawandel durch den Treibhauseffekt führte deshalb bereits weltweit zu vielfältigen Maßnahmen, welche ein gemeinsames Ziel haben: Die fossilen Brennstoffe in der Erde zu belassen und nicht zu verbrennen. Darunter fallen auch starke Regulierungsmaßnahmen im Verkehrssektor weltweit, die einen klaren Trend für die Mobilität der Zukunft vorgeben: Der Megatrend der Elektromobilität ist nicht mehr wegzudiskutieren, genau wie bei den beiden vorherigen Versuchen Ende des 19. Jahrhunderts und in

der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, Elektromobilität zu etablieren, liegt zwar immer noch Erdöl in großen Mengen und zu günstigen Preisen vor, aber die bereits heute eintretenden Folgewirkungen des Klimawandels lassen keinen Zweifel daran, dass die Mobilität auf der Straße und auf der Basis von fossilen Brennstoffen an ihr Ende kommt. Eine Grundsatzentscheidung muss ggf. nur noch bezüglich der Frage getroffen werden, ob sie auf Basis der Brennstoffzellen- oder elektrochemischer Energiespeichertechnologien durchgesetzt werden soll. Beide elektrischen Antriebstechnologien benötigen eine eigenständige, Wasserstoff- oder Strom-basierte Ladeinfrastruktur, die sich von der bereits etablierten Tankstellen-Infrastruktur komplett unterscheidet und deshalb umfänglich neu aufgebaut werden muss, verbunden mit hohen Kosten z. B. bei der großvolumigen Aufbereitung von Wasserstoff und technischen Herausforderungen z. B. in der ganzheitlichen Standardisierung über alle Elektrofahrzeughersteller hinweg. Weil die Brennstoffzellen-basierte Elektromobilität z. B. von Letzteren in großem Maßstab schon seit Jahren immer wieder angekündigt, in der Zwischenzeit aber nur sehr zögerlich bzw. vereinzelt umgesetzt wurde, sind Zweifel angebracht, ob sie sich angesichts der genannten Herausforderungen tatsächlich durchsetzen kann.

Die vorliegende Dissertation analysiert die funktionelle Dynamik von Technologischen Innovationssystemen im Bereich der Erneuerbaren Energietechnologien am Beispiel der weltweiten Durchsetzung von batteriebetriebenen Fahrzeugen und Plug-in-Hybridfahrzeugen. Auch wenn die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen in den letzten Jahren deutlich gestiegen ist, so verblieb sie dennoch unter den vielfach in qualitativen und quantitativen Marktstudien dokumentierten Erwartungen. Die breite Durchsetzung hin zu einem Massenmarkt hängt nun genau davon ab, wann ein Elektrofahrzeug zum ersten Mal wirtschaftlicher zu betreiben ist als ein herkömmliches Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Wenn Elektrofahrzeuge für Flottenbetreiber „günstiger“ sind, könnte die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen sprunghaft steigen, und der Wachstumstrend würde sogar konsolidiert werden, wenn auch private Konsumenten aufspringt. Für Letztere muss allerdings auch die notwendige Ladeinfrastruktur flächendeckend zur Verfügung stehen, wovon die Flottenbetreiber nicht so abhängig sind, weil sie die Lademöglichkeiten selbst anbieten bzw. aufbauen können. Besonders für in Mietwohnungen lebende Menschen in großstädtischen Ballungsgebieten ist das heute noch ein nicht mit vertretbarem Aufwand zu überwindendes Hindernis.

Dass die massenhafte Durchsetzung von Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeichertechnologien noch immer auf sich warten lässt, ist für sie selbst kein Fehler. Noch immer sind die im Alltag erzielbaren Reichweiten mit den kommerziell verfügbaren Elektrofahrzeugen gering im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Weil die Plattformtechnologie der Lithium-Ionen-Batterie aber noch ein hohes Optimierungspotenzial bietet, haben bereits mehrere Elektrofahrzeughersteller Modelle mit höheren Reichweiten für die Markteinführung in den nächsten Jahren angekündigt. Gleichzeitig fallen die Preise für die Batteriesysteme, was sich auf die vergleichsweise hohen Preis für Elektrofahrzeuge auswirkt, die sinken werden – und die bereits angesprochene, für den Markterfolg besonders kritische Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen zum Positiven verändern.

Dass die massenhafte Durchsetzung von Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeichertechnologien noch immer auf sich warten lässt, ist aber auch für die etablierte Automobilindustrie kein Fehler. Durch den Umstieg von herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auf Elektrofahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebssystem fallen Komponenten weg, zu deren Entwicklung und Produktion zum Beispiel tausende Mitarbeiter angestellt sind. Weil die Herstellung eines Elektrofahrzeugs weniger Arbeitskraft benötigt als die Herstellung eines herkömmlichen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor, wird sich nicht nur für die deutsche Automobilindustrie die Frage stellen, welche Zukunft die verbleibenden Arbeitskräfte haben werden (Süddeutsche 2016-2). Eine gewisse Übergangszeit deutet sich an, aber spätestens dann, wenn der Massenmarkt zu einem hohen Anteil Elektrofahrzeuge nachfragt, müssen sich die Automobilhersteller dieser Herausforderung stellen. Durch Trends wie die Digitalisierung könnten auch neue Jobs entstehen, aber für diese sind anders qualifizierte Arbeitskräfte notwendig. Gebraucht wird also neben einer Elektromobilitätsstrategie auch eine Personal- und Qualifizierungsstrategie. Interessant sind aber auch Aussagen, die eine Neuordnung der Zuständigkeiten entlang der gesamten Wertschöpfungskette andeuten (heise online 2016). Wenn Aufgaben, die durch die Elektrifizierung neu entstehen, primär von den Elektrofahrzeugherstellern selbst erledigt werden, bleibt weiter hinten in der Wertschöpfungskette plötzlich viel weniger Arbeitsvolumen für die Zulieferindustrie übrig. Diese Neuordnung könnte eine Disruption der Automobilindustrie nach sich ziehen und Auswirkungen bis tief hinein in die Gesellschaft zeigen.

Der Bundesrat erörterte zuletzt, Benzin- und Dieselautos ab dem Jahr 2030 nicht mehr zuzulassen (Automobilwoche 2016-2). Sowohl in Europa als auch weltweit gibt es viele weitere Länder, die über einen solchen Schritt ebenfalls debattieren (Automobilwoche 2016-3). Angesichts dessen wird deutlich, warum die deutschen Unternehmen in der Automobilindustrie dringend aktiv werden müssen und am besten auch in der Elektromobilität die Führung übernehmen sollten. Wie die vorliegende Dissertation ausführlich und detailliert erörtert, ist dies noch nicht der Fall und es sind aktuell Unternehmen aus anderen Ländern führend.

Dass die massenhafte Durchsetzung von Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeichertechnologien noch immer auf sich warten lässt, ist aber auch angesichts des aktuellen deutschen Strommix noch kein Fehler. Mit etwa 188 Milliarden Kilowattstunden lieferten Erneuerbare Energietechnologien im Jahr 2016 nur 29 Prozent der deutschen Bruttostromerzeugung, ihr Anteil am Stromverbrauch lag bei 32 Prozent (AEE 2017). Elektromobilität ist aber nur dann umweltfreundlicher als die Mobilität auf Basis herkömmlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, wenn die elektrochemischen Energiespeichertechnologien mit Erneuerbarer Energie aufgeladen werden. Mit Energie aus Erdgas, Braun- und Steinkohle wäre ein geringerer Ausstoß von CO_2-Emissionen mit Elektrofahrzeugen sicherlich nicht zu erreichen. Um dies sicherzustellen, muss die deutsche Energiewende weiter vorangetrieben und der Anteil der Erneuerbaren Energietechnologien am aktuellen deutschen Strommix weiter erhöht werden.

Nicht zuletzt stellt auch die noch immer fehlende, flächendeckende Infrastruktur ein Problem zur massenhaften Durchsetzung von Elektromobilität auf Basis elektrochemischer Energiespeichertechnologien dar: Es fehlen die Lademöglichkeiten insbesondere für Stadtbewohner, die noch zur Miete leben und ggf. keinen Stellplatz mit Steckdose in der Tiefgarage vorweisen können. Dazu kommt die Frage, wo genau ein Elektrofahrzeug unterwegs aufgeladen werden soll, und vor allem, wie viel Zeit dieser Vorgang in Anspruch nehmen darf. Herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor können in wenigen Minuten vollgetankt werden, weshalb auch Elektrofahrzeugen nicht viel mehr Zeit zur Verfügung stehen wird. Eine Infrastruktur mit Schnellademöglichkeit ist allerdings deutlich teurer, und auch hier stellt sich also die Frage, wer die daraus entstehenden Kosten trägt.

Es gibt also zahlreiche Argumente, warum es kein Fehler ist, dass bis zur massenhaften Durchsetzung der Elektromobilität noch einige Jahre zur Verfügung stehen, um diese und weitere Herausforderungen zu lösen. Deutlich wird allerdings eine sehr hohe Dynamik, gerade im Bereich der elektrochemischen Energiespeichertechnologien. Es gilt, auch in den nächsten Monaten und Jahren genau zu beobachten, welche Entwicklungen und Fortschritte es in den asiatischen Ländern und insbesondere China, Japan und Korea gibt, die sowohl wissenschaftlich als auch wirtschaftlich im Moment einen deutlichen Vorsprung vor den westlichen Industrieländern wie den USA, Frankreich und Deutschland zu haben scheinen.

Wie die vorliegende Dissertation zeigt, schließt sich das Zeitfenster zur Errichtung einer großen Batteriezellproduktion in Deutschland und in deutschem Besitz bereits wieder, weil die asiatischen Unternehmen die größten Marktanteile „unter sich“ verteilt haben und in einem harten Wettbewerb zu verteidigen versuchen. Sie positionieren sich teilweise strategisch, um auf dem Weg zur global elektrifizierten Mobilität zu den Marktführern zu gehören. Sie können Lieferverträge mit allen großen Elektrofahrzeugherstellern vorweisen, produzieren schon längst nicht mehr nur in ihren eigenen Ländern Batteriezellen, sondern bauen Produktionskapazitäten z. B. in Osteuropa auf.

Mittelfristig könnte sich das wieder ändern, wenn die Batteriekosten so niedrig ausfallen, dass die deutsche Automobilindustrie wieder mit Qualität und Sicherheit glänzen kann. Das Beispiel der Daimler Group und ihrer Unternehmenstochter Li-Tech Battery GmbH zeigte schon einmal, dass Daimler seine eigenen Zellen produzieren könnte, die damals als qualitativ hochwertig genug galten, aber noch viel zu teuer waren. Wenn die deutsche Automobilindustrie sich aus den Lieferverträgen mit den asiatischen Unternehmen emanzipiert und wieder selbst industriell aktiv werden möchte, könnte das auch für den deutschen Wirtschaftsstandort sehr viel wert sein. Heute investiert die Daimler Group schon wieder viele Millionen Euro in ihren Standort zur Batteriesystemfertigung in Kamenz/Sachsen, wo eines Tages ggf. auch Batteriezellen hergestellt werden könnten. Auch die Volkswagen Group plant anscheinend eine große Batteriezellproduktion in Deutschland (FAZ 2017), und dazu kommt ein Konsortium um die thyssenkrupp AG (Tagesspiegel 2017).

In jedem Fall bleibt die funktionale Dynamik von Technologischen Innovationssystemen im Bereich der Erneuerbaren Energietechnologien hoch, und das Beispiel der weltweiten Durchsetzung von batteriebetriebenen Fahrzeugen und Plug-in-Hybridfahrzeugen wird auch in den nächsten Jahren noch zahlreiche Erkenntnisse und Überraschungen bieten.

Anhang I

Tabelle 21: Ausführliche Ergebnisliste für die erste Abfrage.[59]

Zitat.	Autor(en)	Titel	Inhalt	Aufn.
469	Malerba et al. 2002	Sectoral systems of innovation and production	SIS	Nein
424	Furman et al. 2002	The determinants of national innovative capacity	NIS	Nein
338	Acs et al. 2002	Patents and innovation counts as measures of regional production of new knowledge	RIS	Nein
304	**Hekkert et al. 2007**	**Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change**	**TIS**	**Ja, #1**
267	**Carlsson et al. 2002**	**Innovation systems: analytical and methodological issues**	**TIS**	**Ja, #2**
255	Jensen et al. 2007	Forms of knowledge and modes of innovation	Wissensmanagement	Nein
253	**Jacobsson et al. 2000**	**The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research**	**TIS**	**Ja, #3**
249	Chow 2010	A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology	Technologieüberblick	Nein
246	Morgan 2004	The exaggerated death of geography: learning, proximity and territorial innovation systems	Geografie	Nein
235	**Bergek et al. 2008-1**	**Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis**	**TIS**	**Ja, #4**

[59] Suchterm <<technolog* „innovati* system*">> unter dem Kriterium „Topic“ im Zeitraum „All years“. Nur die als relevant eingestuften und fett markierten Fallstudien wurden ins Quellenverzeichnis der vorliegenden Dissertation aufgenommen bzw. sind dort enthalten.

217	Bunnell et al. 2001	Spaces and scales of innovation	Geografie	Nein
214	Liu et al. 2001	Comparing innovation systems: a framework and application to China's transitional context	NIS	Nein
163	Markard et al. 2008	Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework	Integration von TIS & Transitionen	Nein
160	Schuster et al. 2009	Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications	Ingenieurwissenschaften	Nein
152	Smith et al. 2010	Innovation studies and sustainability transitions: The allure of the multi-level perspective and its challenges	Transitionen	Nein
150	Hessels et al. 2008	Re-thinking new knowledge production: A literature review and a research agenda	Wissensmanagement	Nein
146	Mowery et al. 1995	Inward technology-transfer and competitiveness – the role of national innovation systems	NIS	Nein
143	Schartinger et al. 2002	Knowledge interactions between universities and industry in Austria: sectoral patterns and determinants	Wissensmanagement	Nein
142	Carlsson 2006	Internationalization of innovation systems: A survey of the literature	NIS	Nein
135	Hjalager 2010	A review of innovation research in tourism	Tourismus-Management	Nein

Anhang II

Tabelle 22: Ausführliche Ergebnisliste auf die zweite Abfrage.[60]

Zitat.	Autor(en)	Titel	Inhalt	Aufn.
304	**Hekkert et al. 2007**	**Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change**	**TIS**	**Ja, #1**
235	**Bergek et al. 2008-1**	**Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis**	**TIS**	**Ja, #4**
163	Markard et al. 2008	Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework	Integration von TIS & Transitionen	Nein
146	Mowery et al. 1995	Inward technology-transfer and competitiveness – the role of national innovation systems	NIS	Nein
133	**Foxon et al. 2005**	**UK innovation systems for new and renewable energy technologies: drivers, barriers and systems failures**	**TIS**	**Ja, #5**
88	Oinas et al. 2002	The evolution of technologies in time and space: From national and regional to spatial innovation systems	NIS/RIS/SIS	Nein
83	Nelson et al. 2002	Technology, institutions, and innovation systems	Erkenntnistheorie	Nein
65	Motohashi 2005	University-industry collaborations in Japan: The role of new technology-based firms in transforming the National Innovation System	NIS	Nein

[60] Suchterm <<technolog* „innovati* system*"">> unter dem Kriterium „Title" im Zeitraum „All years". Nur die als relevant eingestuften und fett markierten Fallstudien wurden ins Quellenverzeichnis der vorliegenden Dissertation aufgenommen.

65	Martin et al. 1999	Technology foresight for wiring up the national innovation system - Experiences in Britain, Australia, and New Zealand	NIS	Nein
61	**Hekkert et al. 2009**	**Functions of innovation systems as a framework to understand sustainable technological change: Empirical evidence for earlier claims**	**TIS**	**Ja, #6**
54	**Bergek et al. 2008-2**	**'Legitimation' and 'development of positive externalities': two key processes in the formation phase of technological innovation systems**	**TIS**	**Ja, #7**
44	Mas-Verdu 2007	Services and innovation systems: European models of Technology Centres	Dienstleistungswirtschaft	Nein
36	Alcorta et al. 1998	Innovation systems and technological specialization in Latin America and the Caribbean	NIS	Nein
33	Ekboir 2003	Research and technology policies in innovation systems: zero tillage in Brazil	NIS	Nein
29	**Markard et al. 2009**	**Prospective analysis of technological innovation systems: Identifying technological and organizational development options for biogas in Switzerland**	**Integration von TIS & Transitionen**	**Ja, #8 (als Ausn.)**
26	**Mondal et al. 2010**	**Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh-An innovation system analysis**	**TIS**	**Ja, #9**

26	**Suurs et al. 2009-1**	**Competition between first and second generation technologies: Lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands**	**TIS**	**Ja, #10**
25	**Negro et al. 2008**	**Explaining the success of emerging technologies by innovation system functioning: the case of biomass digestion in Germany**	**TIS**	**Ja, #11**
24	**Dewald et al. 2011**	**Market Formation in Technological Innovation Systems: Diffusion of Photovoltaic Applications in Germany**	**TIS**	**Ja, #12**
20	Weber et al. 2012	Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: Combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive 'failures' framework	Integration von TIS & Transitionen	Nein
20	**Suurs et al. 2010**	**Understanding the formative stage of technological innovation system development: The case of natural gas as an automotive fuel**	**TIS**	**Ja, #13**
20	Van Looy et al. 2006	Scientific capabilities and technological performance of national innovation systems: An exploration of emerging industrial relevant research domains	NIS	Nein

Quellenverzeichnis

aab 2017-1: Cambridge Innovation Institute (2017). 17th Annual advanced automotive battery conference. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://advancedautobat.com/us/

aab 2017-2: Advanced Automotive Batteries (2017). 8th International advanced automotive battery conference. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.advancedautobat.com/europe/

AAPC 2017: American Automotive Policy Council, Inc. (AAPC) (2017). About AAPC. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://americanautocouncil.org/about-aapc

Acs et al. 2002: Elsevier B.V. (2002). Patents and innovation counts as measures of regional production of new knowledge. Acs, Z. J.; Anselin, L.; Varga, A. im Journal of Research Policy, Volume 31, Issue 7, September 2002, Seiten 1069-1085

AEE 2017: Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE) (2017). Strommix in Deutschland 2016. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/der-strommix-in-deutschland-im-jahr-2016

Air Liquide 2016: L'air Liquide S.A. (2016). Air Liquide announces locations of several hydrogen fueling stations in northeast U.S.A. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.airliquide.com/united-states-america/air-liquide-announces-locations-several-hydrogen-fueling-stations-northeast

Ambafrance 2011: Botschaft der französischen Republik in Österreich (2011). Frankreich und die Elektromobilität (Juli 2011). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.ambafrance-at.org/Frankreich-und-die

Anderman 2013: Advanced Automotive Batteries (2013). Assessing the Future of Hybrid and Electric Vehicles: The xEV Industry Insider Report (2nd Edition). Studie liegt vor

Anderman 2016: Total Battery Consulting, Inc. (2016). The xEV Industry Insider Report (June 2016 Edition). Studie liegt vor

APEV 2017: Association for the Promotion of Electric Vehicles (APEV) (2017). List of Members. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.apev.jp/news/en/member.html#navi01/

ARB 2014: California Environmental Protection Agency Air Resources Board (2014). Zero Emission Vehicle (ZEV) Program. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm

Asheim et al. 2002: Springer Science+Business Media LLC (2002). Regional Innovation Systems: The Integration of Local ‚Sticky' and Global ‚Ubiquitous' Knowledge. Von Asheim,

B. T.; Isaksen, A. im Journal of Technology Transfer, Volume 27, Issue 1, Januar 2002, Seiten 77-86

Asheim et al. 2005: Oxford University Press (2005). The geography of innovation: regional innovation systems. Von Asheim, B. T.; Gertler, M. S. in Fagerberg, J.; Mowery, D.; Nelson, R. (Eds.), „The Oxford Handbook of Innovation“, ISBN 0-19928-680-9

Auto Alliance 2017: Alliance of Automobile Manufacturers (2017). We are the voice for a united auto industry. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://autoalliance.org/about-the-alliance/

Autobild 2017: Axel Springer Auto Verlag GmbH (2017). BMW i5 (2020): Vorschau – BMWs Tesla-Gegner fährt allein. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.autobild.de/artikel/bmw-i5-2020-vorschau-5724265.html

Auto Express 2014: Dennis Publishing, Ltd. (2014). Toyota promises big efficiency gains for next-gen hybrids. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.autoexpress.co.uk/toyota/88865/toyota-promises-big-efficiency-gains-for-next-gen-hybrids

Automobil Produktion 2014: verlag moderne industrie GmbH (2014). BMW’s China-E-Auto Zinoro im diplomatischen Dienst. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.automobil-produktion.de/2014/11/bmws-china-e-auto-zinoro-im-diplomatischen-dienst/

Automobil Produktion 2015: verlag moderne industrie GmbH (2015). Nachhaltigkeitsziele veröffentlicht – Toyota will 2020 mehr als 30.000 Brennstoffzellen-Autos verkaufen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/toyota-will-2020-mehr-als-30-000-brennstoffzellen-autos-verkaufen-126.html

Automobil Produktion 2016-1: verlag moderne industrie GmbH (2016). Vorstellung Strategie 2025 – VW-Müller: „Selbstgefälligkeit in Konzern eingeschlichen“. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/vw-mueller-selbstgefaelligkeit-in-konzern-eingeschlichen-308.html

Automobil Produktion 2016-2: verlag moderne industrie GmbH (2016). Klage eingereicht – Tesla zofft sich mit Falcon-Wing-Zulieferer. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/tesla-zofft-sich-mit-falcon-wing-hersteller-126.html

Automobil Produktion 2016-3: verlag moderne industrie GmbH (2016). Deutlicher Strategieschwenk – BMW will gesamte Fahrzeugpalette elektrifizieren. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/bmw-will-gesamte-fahrzeugpalette-elektrifizieren-110.html

Automobil Produktion 2017: verlag moderne industrie GmbH (2017). Elektromobilität – BMW bringt nächstes neues i-Modell erst nach 2020. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von

der Webseite: https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/bmw-bringt-naechstes-neues-i-modell-erst-nach-2020-241.html

Automobilwoche 2014: Crain Communications GmbH (2014). Medienbericht – BMW könnte i8-Produktion steigern. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.automobilwoche.de/article/20141121/NACHRICHTEN/141129989/1276/medienbericht-bmw-konnte-i8-produktion-steigern

Automobilwoche 2016-1: Crain Communications GmbH (2016). Probleme mit den Sitzen: Tesla ruft Model X zurück. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.automobilwoche.de/article/20160412/NACHRICHTEN/160419985/probleme-mit-den-sitzen-tesla-ruft-model-x-zuruck

Automobilwoche 2016-2: Crain Communications GmbH (2016). Stellungnahme des Bundesrats: Keine Neuzulassungen von Benzin- und Dieselautos ab 2030? Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.automobilwoche.de/article/20161009/AGENTURMELDUNGEN/310089996/stellungnahme-des-bundesrats-keine-neuzulassungen-von-benzin--und-dieselautos-ab

Automobilwoche 2016-3: Crain Communications GmbH (2016). Weltweite Diskussion: Das Ende der Verbrennungsmotoren? Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.automobilwoche.de/article/20161024/AGENTURMELDUNGEN/310249997/weltweite-diskussion-das-ende-der-verbrennungsmotoren

Automotive News 2014-1: Crain Communications, Inc. (2014). Can Prius set the pace again? – Brand that popularized hybrid vehicles now finds itself lost in a crowd. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.autonews.com/article/20140921/RETAIL03/309229993/can-prius-set-the-pace-again

Automotive News 2014-2: Crain Communications, Inc. (2014). Toyota's fuel cell goal: Big cost cutting. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.autonews.com/article/20141124/OEM06/311249976/toyotas-fuel-cell-goal-big-cost-cutting

Auto Motor und Sport 2014: Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG (2014). Toyota Entwicklungschef Kato im Interview – „Der nächste Prius muss mehr Fahrspaß bieten". Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.auto-motor-und-sport.de/news/mitsuhisa-kato-im-interview-der-naechste-prius-muss-mehr-fahrspass-bieten-8841861.html

AVEM 2017: Association pour l'Avenir du Véhicule Electrique Méditerranéen (AVEM) (2017). Association AVEM – Qui sommes nous? Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.avem.fr/index.php?page=histoire

AVERE-France 2017: Association nationale pour le développement de la mobilité électrique (2017). Nos missions. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=5860&from_espace_adherent=0

Avicenne 2013: avicenne ENERGY (2013). The Worldwide rechargeable Battery Market 2012 – 2025 (22nd Edition). Präsentation liegt vor, der dazugehörige Vortrag von Christopher Pillot, Partner und Direktor von avicenne ENERGY auf der BATTERIES 2013 vom 14.-16. Oktober 2013 in Nizza zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.avicenne.com/articles_energy.php

B3 Corporation 2015: B3 Corporation (2015). LIB Cell Materials Market Bulletin (15Q3), Chapter 5. Von Takeshita, H. Studie liegt vor

B3 Corporation 2016: B3 Corporation (2016). LIB Cell Materials Market Bulletin (16Q1), Chapter 11. Von Takeshita, H. Studie liegt vor

BAFA 2016: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (2016). Elektromobilität (Umweltbonus). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/elektromobilitaet_node.html

BAFA 2017: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2017). Elektromobilität (Umweltbonus) – Zwischenbilanz zum Antragstand vom 30. Juni 2017. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_zwischenbilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=9

BAJ 2017: Battery Association of Japan (BAJ) (2017). Objective of the Battery Association of Japan (BAJ). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.baj.or.jp/e/about/overview.html

Batteries Event 2017: Hopscotch Congrès (2017). Batteries 2017 – www.batteriesevent.com. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.batteriesevent.com/

BDEW 2017-1: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2017). Faktenüberblick zur Erhebung Ladepunkte – Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladepunkte. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bdew.de/internet.nsf/id/320126DFE9EFDC67C12580ED002FEE9D/$file/Praesentation_Erhebung_Ladepunkte31.12.2016.pdf

BDEW 2017-2: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2017). Neue BDEW-Zahlen zur Weiterentwicklung der Elektromobilität: Zahl der Stromtankstellen steigt. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20170324-pi-zahl-der-stromtankstellen-steigt-de?open&ccm=900010020010

Beerepoot et al. 2007: Elsevier B.V. (2007). Government regulation as an impetus for innovation: Evidence from energy performance regulation in the Dutch residential building

sector. Von Beerepoot, M.; Beerepoot, N. im Journal of Energy Policy, Volume 35, Issue 10, Oktober 2007, Seiten 4812-4825

Beirat beim BMWi 2016: Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016). Zur Förderung von Elektroautos (Brief). Dokument liegt vor

BEM 2012: Bundesverband eMobilität e.V. (BEM) (2012). Der Hype ist vorbei. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bem-ev.de/der-hype-ist-vorbei/

BEM 2013: Bundesverband eMobilität e.V. (2013). Die Praxis in Deutschland - Privatwirtschaftliche und kommunale Kaufförderung von Elektrofahrzeugen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bem-ev.de/die-praxis-in-deutschland/

BEM 2017: Bundesverband eMobilität e.V. (BEM) (2017). Verband – Ziele des BEM: Faszination & Begeisterung für eine Neue Mobilität. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bem-ev.de/verband/

Bergek et al. 2003: BertelsmannSpringer Science + Business Media GmbH (2003). The emergence of a growth industry: a comparative analysis of the German, Dutch and Swedish wind turbine industries. Von Bergek, A.; Jacobsson, S. in Metcalfe, J. S.; Cantner, U. (Eds.), „Change, Transformation and Development“, ISBN 3-7908-1545-4

Bergek et al. 2008-1: Elsevier B.V. (2008). Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. Von Bergek, A.; Jacobsson, S.; Carlsson, B.; Lindmark, S.; Rickne, A. im Journal of Research Policy, Volume 37, Issue 3, April 2008, Seiten 407-429

Bergek et al. 2008-2: Taylor & Francis Group (2008). ‘Legitimation’ and ‘development of positive externalities’: two key processes in the formation phase of technological innovation systems. Von Bergek, A.; Jacobsson, S.; Sandén, B. A. im Journal of Technology Analysis & Strategic Management, Volume 20, Issue 5, September 2008, Seiten 575-592

BHOEC 2017: Beijing Huaxing Orient Exhibition Co. (2017). BATTERY CHINA 2017 – The 13th China International Battery, Raw Material, Producing Equipment and Battery Parts Fair. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bhoec.com/batterychina/default_en.asp

Binz et al. 2016: Science Policy Research Unit (SPRU) (2016). Global Innovation Systems - towards a conceptual framework for innovation processes in transnational contexts. Von Binz, C.; Truffer, B.; Coenen, L., Paper zur 50th SPRU Anniversary Conference vom 7.-9. September 2016 in Brighton, England

Blanchard et al. 2006: Pearson Education, Inc. (2006). Systems Engineering and Analysis. Von Blanchard, B. S.; Fabrycky, W.J., ISBN 0-13-196326-0

Bloomberg Business 2014: Bloomberg L.P. (2014). Why Elon Musk Just Opened Tesla’s Patents to His Biggest Rivals. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite:

http://www.bloomberg.com/bw/articles/2014-06-12/why-elon-musk-just-opened-teslas-patents-to-his-biggest-rivals

Bloomberg Business 2015: Bloomberg L.P. (2015). Toyota to Drop Scion iQ as Smallest Car Fails to Win U.S. Buyers. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-01-16/toyota-to-drop-scion-iq-as-smallest-car-fails-to-win-u-s-buyers

BMBF 2007: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2007). Bekanntmachung „(...) von Richtlinien über die Förderung zum Themenfeld ‚Lithium-Ionen-Batterie (LIB2015)'". Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bmbf.de/foerderungen/11799.php

BMBF 2010-1: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2010). Elektromobil in die Zukunft – Batterieforschung als Schlüssel. Publikation liegt vor

BMBF 2010-2: Informationen aus den der gedruckten Ausgabe beiliegenden Projektbeschreibungen in „Elektromobil in die Zukunft – Batterieforschung als Schlüssel". Veröffentlichung des BMBF, vergleiche BMBF 2010-1

BMBF 2010-3: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2010). Bekanntmachung „(...) von Richtlinien über die Förderung zum Themenfeld ‚Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)'". Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-527.html

BMBF 2014: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2014). Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Förderung von „Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen (Batterie 2020)" (Vom 30. Juli 2014). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php?B=957

BMBF 2015: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2015). Forschung zu Batteriefertigung – Pressemitteilung 082/2015. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://bmbf.de/de/forschung-zu-batteriefertigung-118.html

BMBF 2016-1: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2016). Von der Batterieforschung zur Batteriefertigung in Deutschland. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmbf.de/de/von-der-batterieforschung-zur-batteriefertigung-in-deutschland-2650.html

BMBF 2016-2: Bundesministerium für Bildung und Forschung (2016). Bekanntmachung – Richtlinie zur Förderung "Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen (Batterie 2020)". Bundesanzeiger vom 18.02.2016 (Vom 25. Januar 2016). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php?B=1146

BMUB 2007: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2007). Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm. Publikation liegt vor

BMUB 2014: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014). Gemeinsame Pressemitteilung mit dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – Kabinett verabschiedet Elektromobilitätsgesetz. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/kabinett-verabschiedet-elektromobilitaetsgesetz/

BMVBS 2009: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2009). Auszug aus dem Bericht an den Haushaltsausschuss Konjunkturpaket II, Ziffer 9 Fokus „Elektromobilität“ – Gemeinsamer Bericht von BMWi, BMVBS, BMU, BMBF, BMELV. Publikation liegt vor

BMVBS 2011: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011). Elektromobilität – Deutschland als Leitmarkt und Leitanbeiter. Publikation liegt vor

BMW Group 2010-1: BMW Group (2010). BMW Group und Nachhaltigkeit. “In Zukunft wird Premium auch über Nachhaltigkeit definiert werden.“ Präsentation von Dr. Rainer Feurer, Senior Vice President Konzernstragie und -planung, auf dem 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung vom 28.-29. Oktober 2010 in Berlin

BMW Group 2010-2: BMW Group (2010). Leichtbau für Elektromobilität. Standorte Landshut und Wackersdorf in Vorbereitung für die Produktion des Megacity Vehicles. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=leichtbau-f%C3%BCr-elektromobilit%C3%A4t-standorte-landshut-und-wackersdorf-in-vorbereitung-f%C3%BCr-die-produktion&outputChannelId=7&id=T0082562DE&left_menu_item=node__4088

BMW Group 2011: BMW Group (2011). Corporate News. Archiv 2011. Neue BMW Submarke heißt BMW i. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0097759DE/neue-bmw-submarke-heisst-bmw-i?language=de

BMW Group 2012: BMW Group (2012). Niederbayerische BMW Werke starten in das Zeitalter der E-Mobilität. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0128311DE/niederbayerische-bmw-werke-starten-in-das-zeitalter-der-e-mobilit%E3%A4t

BMW Group 2013-1: BMW Group (2013). BMW Group und Toyota Motor Corporation unterzeichnen Vertrag über vertiefte Zusammenarbeit. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von

der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0136503DE/bmw-group-und-toyota-motor-corporation-unterzeichnen-vertrag-ueber-vertiefte-zusammenarbeit?language=de

BMW Group 2013-2: BMW Group (2013). Pressemeldung – Marktstart für BMW i3. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=marktstart-f%C3%BCr-bmw-i3&outputChannelId=7&id=T0155911DE&left_menu_item=node__803

BMW Group 2013-3: BMW Group (2013). Zusammen Wirken – Sustainable Value Report 2013. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2013/termine-und-events/BMW_Group_SVR2013_DE.pdf

BMW Group 2013-4: BMW Group (2013). „40 Jahre Zukunft“ – BMW Werk Dingolfing feiert Jubiläum und verkündet weitere Investitionen in E-Komponenten. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0148184DE/40-jahre-zukunft-%E2%80%93-bmw-werk-dingolfing-feiert-jubil%E3%A4um-und-verk%E3%BCndet-weitere-investitionen-in-e

BMW Group 2013-5: BMW Group (2013). Beginn einer neuen Ära: BMW Group startet Serienproduktion des Elektrofahrzeugs BMW i3 in Leipzig. / Erstmalig Industrialisierung des Werkstoffes CFK im Automobilbau. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0145644DE/beginn-einer-neuen-%E3%84ra-bmw-group-startet-serienproduktion-des-elektrofahrzeugs-bmw-i3-in-leipzig

BMW Group 2013-6: BMW Group (2013). BMW Group und Toyota Motor Corporation unterzeichnen Vertrag über vertiefte Zusammenarbeit. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0136503DE/bmw-group-und-toyota-motor-corporation-unterzeichnen-vertrag-ueber-vertiefte-zusammenarbeit?language=de

BMW Group 2014-1: BMW Group (2014). Auslieferungen des BMW i8 starten im Juni. Fahrleistungs- und Verbrauchswerte nochmals deutlich verbessert - Praxisverbrauch erreicht Kleinwagenniveau – Weltweit erstes Serienfahrzeug mit innovativem Laserlicht. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=auslieferungen-des-bmw-i8-starten-im-juni-fahrleistungs-und-verbrauchswerte-nochmals-deutlich&outputChannelId=7&id=T0171007DE&left_menu_item=node__5248

BMW Group 2014-2: BMW Group (2014). Pressemappe BMW Group Produktion. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0195342DE/pressemappe-bmw-group-produktion?language=de

BMW Group 2014-3: BMW Group (2014). BMW Group und SGL Group verdreifachen Produktionskapazität im Karbonfaserwerk Moses Lake. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=bmw-group-und-sgl-group-verdreifachen-produktionskapazit%C3%A4t-im-karbonfaserwerk-moses-lake&outputChannelId=7&id=T0179312DE&left_menu_item=node__5248

BMW Group 2014-4: BMW Group (2014). Die BMW i8 Produktion. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0178337DE/die-bmw-i8-produktion?language=de

BMW Group 2014-5: BMW Group (2014). Weltweit einmalige CFK-Stackanlage geht nach Rekordzeit in Betrieb. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=weltweit-einmalige-cfk-stackanlage-geht-nach-rekordbauzeit-in-betrieb&outputChannelId=7&id=T0190324DE&left_menu_item=node__4088

BMW Group 2014-6: BMW Group (2014). Hochvoltspeicher und E-Motoren für neue Plug-in-Hybride von BMW kommen ab 2015 aus Dingolfing. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=hochvoltspeicher-und-e-motoren-f%C3%BCr-neue-plug-in-hybride-von-bmw-kommen-ab-2015-aus-dingolfing&outputChannelId=7&id=T0194316DE&left_menu_item=node__4088

BMW Group 2014-7: BMW Group (2014). BMW Group und Samsung SDI bauen Partnerschaft auf. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=bmw-group-und-samsung-sdi-bauen-partnerschaft-aus&outputChannelId=7&id=T0187782DE&left_menu_item=node__5248

BMW Group 2015: BMW Group (2015). Sustainable Value Report 2015 – Nachhaltig handeln, Ziele erreichen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup_com/responsibility/downloads/de/2015/BMW_SVR_2015_RZ_DE.pdf

BMW Group 2016-1: BMW Group (2016). Elektrisiert. Die BMW iPerformance und die BMW i Modelle. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://m.bmw.de/de/topics/faszination-bmw/elektromobilitaet/modelle-mit-edrive.html

BMW Group 2016-2: BMW AG (2016). Jetzt 4.000 EUR Umweltbonus* nutzen. Beim Kauf eines BMW i3. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/finanzieren.html

BMW Group 2016-3: BMW Group (2016). Drei Jahre Marktstart BMW i. 100.000 elektrifizierte BMW auf der Straße. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite:

https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0265529DE/drei-jahre-marktstart-bmw-i-100-000-elektrifizierte-bmw-auf-der-strasse

BMW Group 2016-4: BMW Group (2016). Aachener Kolloquium 2016: Fahrfreude der Zukunft. Klaus Fröhlich, Mitglied des Vorstands der BMW AG, Entwicklung, zeigt auf, welche Antriebstechnologien uns demnächst vorwärts bringen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0264776DE/aachener-kolloquium-2016-fahrfreude-der-zukunft-klaus-fr%E3%B6hlich-mitglied-des-vorstands-der-bmw-ag

BMW Group 2016-5: BMW Group (2016). BMW Group eröffnet neues Leichtbauzentrum. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0265275DE/bmw-group-eroeffnet-neues-leichtbauzentrum

BMW Group 2016-6: BMW Group (2016). BMW Group gestaltet Transformation der individuellen Mobilität mit Strategy NUMBER ONE > NEXT. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0258269DE/bmw-group-gestaltet-transformation-der-individuellen-mobilitaet-mit-strategy-number-one-next?language=de

BMW Group 2016-7: BMW Group (2016). Intelligente Lösungen für den mobilen Alltag. BMW i Mobilitätsdienstleistungen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://secure.bmw.com/com/de/insights/corporation/bmwi/mobility_services.html

BMW Group 2017-1: BMW Group (2017). BMW i baut Erfolgsbilanz und Marktanteile stetig aus. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0270115DE/bmw-i-baut-erfolgsbilanz-und-marktanteile-stetig-aus

BMW Group 2017-2: BMW Group (2017). BMW Group mit bestem Absatz aller Zeiten für März und das erste Quartal. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0269751DE/bmw-group-mit-bestem-absatz-aller-zeiten-fuer-maerz-und-das-erste-quartal

BMW Group 2017-3: BMW Group (2017). BMW Group setzt beim Ausbau der Elektromobilität auf Innovationskraft der deutschen Produktionsstandorte. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0270203DE/bmw-group-setzt-beim-ausbau-der-elektromobilitaet-auf-innovationskraft-der-deutschen-produktionsstandorte

BMW Group 2017-4: BMW Group (2017). Rede und Präsentation von Harald Krüger, Vorsitzender des Vorstands der BMW AG, Bilanzpressekonferenz 2017. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0268845DE/rede-und-praesentation-von-harald-krueger-vorsitzender-des-vorstands-der-bmw-ag-bilanzpressekonferenz-2017?language=de

BMWi 2013: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2013). Allianz für eine nachhaltige Beschaffung – Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie an den Chef des Bundeskanzleramtes (14. Oktober 2013). Publikation liegt vor

BMWi 2016: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016). Bundesbericht Energieforschung 2016 – Forschungsförderung für die Energiewende. Publikation liegt vor

BMWi 2017-1: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2017). Automobilindustrie. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html

BMWi 2017-2: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016). Rahmenbedingungen und Anreize für Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/rahmenbedingungen-und-anreize-fuer-elektrofahrzeuge.html

Boulding 1985: Sage Publications, Inc. (1985): The World as a Total System. Von Boulding, K. E., ISBN 0-8039-2443-7

boerse.de 2017: boerse.de Finanzportal GmbH (2017). Tesla Motors Aktie. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.boerse.de/fundamental-analyse/Tesla-Motors-Aktie/US88160R1014

bpb 2010: Bundeszentrale für politische Bildung (bpb) (2010). Internationale Verträge – Das Kyoto-Protokoll. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52817/internationale-vertraege

Braczyk et al. 1998: UCL Press Ltd. (1998). Regional Innovation Systems – The Role of Governances in a Globalized World. Von Braczyk, H.-J.; Cooke, P.; Heidenreich, M., ISBN: 0-203-33023-4

Breschi et al. 1997: Pinter Publishers Ltd. (1997). Sectoral systems of innovation: technological regimes, Schumpeterian dynamics and spatial boundaries. Von Breschi, S.; Malerba, F. in Edquist, C. (Ed.), „Systems of Innovation: Technologies, Institutions, and Organizations“, ISBN 1-85567-452-1

Breschi et al. 2000: Royal Economic Society (2000). Technological regimes and Schumpeterian patterns of innovation. Von Breschi, S.; Malerba, F.; Orsenigo, L. im The Economic Journal, Volume 110, Issue 463, April 2000, Seiten 388-410

BSM 2016: Bundesverband Solare Mobilität e.V. (BSM) (2016). Entwurf einer Ladesäulen-VO führt auf Sonderweg. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bsm-ev.de/emog/lsv-jan15

Bundesrat 2015: Bundesrat (2015). Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Elektromobilitätsgesetz - EmoG). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.bundesrat.de/SharedDocs/beratungsvorgaenge/2015/0001-0100/0080-15.html/

Bundesregierung 2009: Die Bundesregierung (2009). Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Publikation liegt vor

Bundesregierung 2011: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) / Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) / Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2011). Regierungsprogramm Elektromobilität. Publikation liegt vor

Bundesregierung 2015: Die Bundesregierung (2015). Elektromobilität – Neue Regeln für E-Fahrzeuge. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/05/2015-05-27-kabinett-elektromobilitaet-verordnung.html

Business Insider 2015: Business Insider, Inc. (2015). Tesla is trying to steal Apple's employees. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://uk.businessinsider.com/tesla-apple-hiring-spree-150-2015-2

BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2010: BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (2010). Greenwashing in der Industrie. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.gruene.de/themen/wirtschaft-arbeit/greenwashing-in-der-industrie.html

Bünger et al. 2011: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (2011). Well-to-Wheel-Analyse von Elektrofahrzeugen. Von Bünger, U.; Weindorf, W. als im Rahmen des Innovationsreports „Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt" für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) in Auftrag gegebenes Gutachten, siehe TAB 2012

CAAM 2013: China Association for Automobile Manufacturers (2013). Departments under Secretariat. Zuletzt abgerufen am 25.05.2017 von der Webseite: http://www.caam.org.cn/Overview/20100824/1305044682.html

Car and Driver 2016: Hearst Communications, Inc. (2016). BMW i Chief: Larger i Models Will Offer Optional Range-Extender. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://blog.caranddriver.com/bmw-i-chief-i5-ev-model-coming-will-offer-optional-range-extender/

Carlsson et al. 1991: Springer Science+Business Media LLC (1991). On the nature, function and composition of technological systems. Von Carlsson, B.; Stankiewicz, R. im Journal of Evolutionary Economics, Volume 1, Issue 2, Juni 1991, Seiten 93-118

Carlsson et al. 1995: Springer Science+Business Media LLC (1995). On the Nature, Function and Composition of Technological Systems. Von Carlsson, B.; Stankiewicz, R. in Carlsson, B. (Ed.), „Technological Systems and Economic Performance: The Case of Factory Automation“, ISBN 0-79233-512-0

Carlsson et al. 2002: Elsevier B.V. (2002). Innovation systems: analytical and methodological issues. Von Carlsson, B.; Jacobsson, S.; Holmén, M.; Rickne, A. im Journal of Research Policy, Volume 31, Issue 2, Februar 2002, Seiten 233-245

CEPA 2015: California Environmental Protection Agency (2015). Zero Emission Vehicle (ZEV) Program. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm

CEVA 2017: China Electric Vehicle Association (2017). About Us – Introduction. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.ceva.org.cn/EN/aboutus/index.htm

CGGC 2010: Center on Globalization, Governance & Competitiveness (2010). Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles – The U.S. Value Chain. Von Lowe, M.; Tokuoka, S.; Trigg, T.; Gereffi, G. Studie liegt vor

Christensen 1997: HarperCollins Publishers, Inc. (1997). The Innovator’s Dilemma. Von Christensen, C. M., ISBN: 0-06-052199-6

Coenen et al. 2010: Elsevier B.V. (2010). Comparing systems approaches to innovation and technological change for sustainable and competitive economies: an explorative study into conceptual commonalities, differences and complementarities. Von Coenen, L.; López, F. J. D. im Journal of Cleaner Production, Volume 18, Issue 12, August 2010, Seiten 1149-1160

Congressional Research Service 2013: Congressional Research Service (2013). Battery Manufacturing for Hybrid and Electric Vehicles – Policy Issues. Von Canis, B. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.fas.org/sgp/crs/misc/R41709.pdf

Cooke et al. 1997: Elsevier B.V. (1997). Regional innovation systems – Institutional and organisational dimensions. Von Cooke, P.; Uranga, M. G.; Etxebarria, G. im Journal of Research Policy, Volume 26, Issue 4-5, Dezember 1997, Seiten 475-491

Covert et al. 2016: American Economic Association (2016). Will We Ever Stop Using Fossil Fuels? Von Covert, T.; Greenstone, M.; Knittel, C. R. im Journal of Economic Perspectives, Volume 30, Issue 1, Winter 2016, Seiten 117-138

Deutsches Dialog Institut 2017: Deutsches Dialog Institut GmbH (2017). Über das Programm – Das Schaufensterprogramm. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://schaufenster-

elektromobilitaet.org/de/content/ueber_das_programm/foerderung_schaufensterprogramm/foerderung_schaufensterprogramm_1.html

Deutscher Bundestag 2016: Bundesanzeiger Verlag GmbH (2016). Maßnahmen der Bundesregierung zur Unterstützung der Marktentwicklung der Elektromobilität (Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Stephan Kühn (Dresden), Dr. Julia Verlinden, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/080/1808009.pdf

Dewald et al. 2011: Taylor & Francis Group (2011). Market Formation in Technological Innovation Systems: Diffusion of Photovoltaic Applications in Germany. Von Dewald, U.; Truffer, B. im Journal of Industry and Innovation, Volume 18, Issue 3, April 2011, Seiten 285-300

Die Welt 2016: WeltN24 GmbH (2016). BMW verpasst seinem Elektroauto i3 eine Auffrischung. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.welt.de/wirtschaft/article159782990/BMW-verpasst-seinem-Elektroauto-i3-eine-Auffrischung.html

DIfU 2014: Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (2014). Difu-Berichte 1/2014 – Elektromobilität in der Stadt- und Verkehrsplanung – Herausforderung für Politik, Verwaltung und Bürger. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.difu.de/publikationen/difu-berichte-12014/elektromobilitaet-in-der-stadt-und-verkehrsplanung.html

DLR 2010: Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (2010). Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) nimmt Fahrt auf – Gemeinsame Pressemitteilung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie und des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.pt-em.de/de/801.php

DOE 2011: Department of Energy (DOE) (2011). US Department of Energy Vehicle Battery R&D: Current Scope and Future Directions. Von Howell, D.; Davis, P.; Danielson, D.; Horton, L.; Vetrano, J.

Doloreux 2002: Elsevier B.V. (2002). What we should know about regional systems of innovation. Von Doloreux, D. im Journal for Technology in Society, Volume 24, Issue 3, August 2002, Seiten 243-263

Doloreux et al. 2005: Elsevier B.V. (2005). Regional innovation systems: Current discourse and unresolved issues. Von Doloreux, D.; Parto, S. im Journal for Technology in Society, Volume 27, Issue 2, April 2005, Seiten 133-153

Dosi et al. 1988: Pinter Publishers Ltd. (1988). Technological Change and Economic Theory. Von Dosi, G.; Freeman, C.; Nelson, R. R.; Silverberg, G.; Soete, L. (Eds.), ISBN: 978-0-8618-7949-6

DPM 2017: Deutsches Patent- und Markenamt (2017). Patente und Gebrauchsmuster. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.dpma.de/service/klassifikationen/ipc/

Dudenhöffer 2010: ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e. V. (2010). Batteriespitzentechnologie für automobile Anwendungen und ihr Wertschöpfungspotenzial für Europa. Von Dudenhöffer, F. im ifo Schnelldienst 11/2010, 63. Jahrgang, Ausgabe 11, November 2010, Seiten 13-18

Edquist 1997: Pinter Publishers Ltd. (1997). Systems of Innovation Approaches – Their Emergence and Characteristics. Von Edquist, C. in Edquist, C. (Ed.), „Systems of Innovation: Technologies, Institutions, and Organizations“, ISBN 1-85567-452-1

Edquist 2001: DRUID Conference, Aalborg (2001). The Systems of Innovation Approach and Innovation Policy: An account of the state of the art. Von Edquist, C., „Lead paper presented at the DRUID Conference, Aalborg, June 12-15, 2001, under theme F: 'National Systems of Innovation, Institutions and Public Policies', Draft of 2001-06-01“

Edquist 2005: Oxford University Press (2005). Systems of Innovation: Perspectives and Challenges. Von Edquist, C. in Fagerberg, J.; Mowery, D.; Nelson, R. (Eds.), „The Oxford Handbook of Innovation“, ISBN 0-19928-680-9

EDTA 2017: Electric Drive Transportation Association (2017). About EDTA. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://electricdrive.org/ht/d/sp/i/2324/pid/2324

electrek 2016-1: 9to5 network (2016). Tesla now has 34 vehicles in its fleet for each Supercharger – A look at the network's growth ahead of the Model 3. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://electrek.co/2016/08/17/tesla-supercharger-network-growth-data-model-3/

electrek 2016-2: 9to5 network (2016). Tesla Model 3 will have Supercharger access but as an optional package, says Musk. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://electrek.co/2016/06/01/tesla-model-3-supercharger-access-but-as-an-optional-package-says-musk/

Electric Cars Report 2014: GreenCarsMedia.com (2014). Toyota to Test Expansion of Charging Infrastructure in Japan. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://electriccarsreport.com/2014/10/toyota-test-expansion-charging-infrastructure-japan/

e-mobil BW 2015: e-mobil BW GmbH (2015). Strukturstudie BWe Mobil 2015 – Elektromobilität in Baden-Württemberg. Von Bauer, W.; Rothfuss, F.; Dungs, J.; Hermann, F.; Cacilo, A.; Schmidt, S.; Brand, M.; Klausmann, F.; Borrmann, D. Studie liegt vor

e-mobil BW 2017: e-mobil BW GmbH (2017). Cluster Elektromobilität Süd-West. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.e-mobilbw.de/de/aufgaben/cluster-elektromobilitaet-sued-west.html

EPO 2017-1: Europäische Patentorganisation (EPO) (2017). PATSTAT. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.epo.org/searching-for-patents/business/patstat_de.html#tab1

EPO 2017-2: Europäische Patentorganisation (EPO) (2017). Glossar. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.epo.org/service-support/glossary_de.html#p

ESA 2017: Energy Storage Association (2017). About ESA – Mission and Vision. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://energystorage.org/about/mission-and-vision

ESRC 2016: Economic and Social Research Council (2016). What we do. Zuletzt abgerufen am 22.7.2017 von der Webseite: http://www.esrc.ac.uk/about-us/what-we-do/

et-energie online 2015: EW Medien und Kongresse GmbH (2015). Zukunftsfragen – Niedrige Ölpreise: Ursachen, Wirkungen und Risiken. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://et-energie-online.de/Zukunftsfragen/tabid/63/NewsId/1356/Niedrige-Olpreise-Ursachen-Wirkungen-und-Risiken.aspx#fn:1

European Commission 2015: European Commission (2015). Reducing CO2 emissions from passenger cars - Policy. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm

Europäisches Parlament 2013: Europäisches Parlament (2013). Parlament stimmt für Verbot von Cadmium in Batterien für Elektrofahrzeuge. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20131004IPR21519/html/Parlament-stimmt-f%C3%BCr-Verbot-von-Cadmium-in-Batterien-f%C3%BCr-Elektrowerkzeuge

Europäisches Parlament 2014: Europäisches Parlament (2014). Begrenzung der CO2-Emissionen von Pkw. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/20140221IPR36626/begrenzung-der-co2-emissionen-von-pkw

eurostat 2017: Europäische Kommission (2017). NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics – Overview. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/overview

EVAAP 2017: Electric Vehicle Association of Asia Pacific (2017). Electric Vehicle Association of Asia Pacific. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.evaap.org/

FAZ 2014: Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH (2014). In Texas, Arizona und New Jersey – Tesla darf seine Autos nicht selbst verkaufen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/tesla-darf-seine-elektroautos-nicht-selbst-verkaufen-12844041.html

FAZ 2017: Frankfurter Allgemeine Zeitung (2017). Elektromobilität – Volkswagen plant offenbar gigantische Batteriefabrik. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/volkswagen-plant-offenbar-gigantische-batteriefabrik-14254250.html

FCCJ 2012: Fuel Cell Commercialization Conference of Japan (2012). Organization. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://fccj.jp/eg/page03-3.html

FCHEA 2017: Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (2017). Members. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.fchea.org/members/

Feinson 2003: Consortium for Science, Policy, and Outcomes / Arizona State University (2003). National Innovation Systems Overview and Country Cases. Von Feinson, S. in Bozeman, B.; Sarewitz, D.; Feinson, S.; Foladori, G.; Gaughan, M.; Gupta, A.; Sampat, B.; Zachary, G. (Project members), „Knowledge Flows and Knowledge Collectives: Understanding The Role of Science and Technology Policies in Development – Synthesis Report on the Findings off a Project for the Global Inclusion Program of the Rockefeller Foundation“. Studie liegt vor

Financial Times 2015: The Financial Times Ltd. (2015). Falling oil prices threaten electric cars and biofuels – Competition increases as petrol-fuelled cars become cheaper to run. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.ft.com/content/73087796-9e79-11e4-a37e-00144feab7de

Fleck 1993: John Wiley & Sons, Inc. (1993). Configurations: Crystallizing contingency. Von Fleck, J. im International Journal of Human Factors in Manufacturing, Volume 3, Issue 1, 1993, Seiten 15-36

FOCUS Online 2013: FOCUS Magazin Verlag GmbH/ TOMORROW FOCUS News+ GmbH (2013). Markteinführung des i3 – BMWs Multi-Millionen-Wette auf das Elektroauto. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.focus.de/finanzen/news/tid-34030/markteinfuehrung-des-i3-bmws-multi-millionen-wette-auf-das-elektroauto_aid_1125140.html

Forum Elektromobilität 2017: Forum Elektromobilität e.V. (2017). Nationale Plattform Elektromobilität. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://web.forum-elektromobilitaet.de/flycms/de/web/146/-/Nationale+Plattform+Elektromobiltaet.html

Foxon et al. 2005: Elsevier B.V. (2005). UK innovation systems for new and renewable energy technologies: drivers, barriers and systems failures. Foxon, T. J.; Gross, R.; Chase, A.; Howes, J.; Amalf, A.; Anderson, D. im Journal of Energy Policy, Volume 33, Issue 16, November 2005, Seiten 2123-2137

Foxon et al. 2010: Elsevier B.V. (2010). Developing transition pathways for a low carbon electricity system in the UK. Von Foxon, T. J.; Hammond, G. P.; Pearson, P. J. G. im Journal of Technological Forecasting and Social Change, Volume 77, Issue 8, Oktober 2010, Seiten 1203-1213

Fraunhofer ISI 2009-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2009). Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Von Angerer, G.; Marscheider-Wiedemann, F.; Wendl, M.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2009-2: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2009). Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Von Angerer, G.; Marscheider-Wiedemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2010-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2010). Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Von Thielmann, A.; Isenmann, R.; Wietschel, M., ISSN 2192-3981. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2010-2: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2010). Kupfer für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Von Angerer, G.; Mohring, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2012-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2012). Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Von Thielmann, A.; Sauer, A.; Isenmann, R.; Wietschel, M.; Plötz, P., ISSN: 2192-3981. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2012-2: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2012). Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Von Thielmann, A.; Sauer, A.; Isenmann, R.; Wietschel, M., ISSN: 2192-3981. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2012-3: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2012). Roadmap zur Kundenakzeptanz. Von Dütschke, E.; Schneider, U.; Sauer, A.; Wietschel, M.; Hoffmann, J., ISSN: 2192-3981. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2012-4: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2012). Electric Mobility in China – A policy review. Von Tagscherer, U. in Fraunhofer ISI Discussion Papers Innovation Systems and Policy Analysis No. 30, ISSN 1612-1430. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2013: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2013). Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR) – Länderbericht. Von Fan, C.; Friedrichsen, N.; Gnann, T.; Hüttemann, P.; Sauer, A.; Thielmann, A.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2014: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2014). Energiespeicher für die Elektromobilität – Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter? Von Thielmann, A.; Fan, C.; Friedrichsen, N.; Gnann, T.; Hettesheimer, T.; Hummen, T.; Marscheider-Wiedermann, F.; Reiß, T.; Sauer, A.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2015-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015). Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Von Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2015-2: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015). Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Von Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2015-3: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015). Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Von Thielmann, A.; Sauer, A.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2015-4: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2015). Eine global elektrifizierte Mobilität bis 2050 ist möglich – auf Basis optimierter Lithium-Ionen-Batterien. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/service/presseinfos/2015/presseinfo-37-2015-lithium-ionen-batterien-roadmaps.php

Fraunhofer ISI 2016-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2016). Energiespeicher-Monitoring 2016 – Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter? Von Thielmann, A.; Friedrichsen, N.; Hettesheimer, T.; Hummen, T.; Sauer, A.; Schneider, C.; Wietschel, M. Studie liegt vor

Fraunhofer ISI 2016-2: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2016). In-house Datenbank Elektrofahrzeuge – enthält modellaufgelöst u. a. Absatzzahlen, Absatzländer, Produktionsstandorte, OEM, kWh-Kapazität, Zellhersteller, Zellchemie.

Fraunhofer ISI 2017-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2017). Technologie-Roadmapping am Fraunhofer ISI: Konzepte – Methoden – Praxisbeispiele. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/v/publikationen/Technologie-Roadmapping.php

Fraunhofer ISI 2017-2: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2017). LIB 2015-Roadmapping. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/at-lib-2015-roadmapping.php

Freeman 1987: Pinter Publishers Ltd. (1987). Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan. Von Freeman, C., ISBN: 0-86187-928-7

Freeman 1995: Academic Press Ltd. (1995). The ‚National System of Innovation' in historical perspective. Von Freeman, C. im Cambridge Journal of Economics, Volume 19, Issue 1, im Jahr 1995, Seiten 5-24

Fritsch et al. 2004: Elsevier B.V. (2004). Innovation, regional knowledge spillovers and R&D cooperation. Von Fritsch, M.; Franke, G. im Journal of Research Policy, Volume 33, Issue 2, März 2004, Seiten 245-255

Frost & Sullivan 2011: Frost & Sullivan (2011). Strategic Analysis of Battery Technologies for Electric and Hybrid Vehicles in South Korea. Studie liegt vor

Furman et al. 2002: Elsevier B.V. (2002). The determinants of national innovative capacity. Von Furman, J. L.; Porter, M. E.; Stern, S. im Journal of Research Policy, Volume 31, Issue 6, August 2002, Seiten 899-933

Geels 2002: Elsevier B.V. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. Von Geels, F. W. im Journal of Research Policy, Volume 31, Issue 8-9, Dezember 2002, Seiten 1257-1274

Geels 2004: Elsevier B.V. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. Von Geels, F.W. im Journal of Research Policy, Volume 33, Issue 6-7, September 2004, Seiten 897-920

Geels 2005: Edward Elgar Publishing Ltd. (2005). Technological Transitions and System Innovations: A Co-evolutionary and Socio-technical Analysis. Von Geels, F.W., ISBN 1-84542-009-8

Global Automakers 2016: Global Automakers (2016). Issues in Action – Energy & Environment. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.globalautomakers.org/issues/energy-environment

Green Car Congress 2015: BioAge Group, LLC (2015). Toyota adds two-seater model to i-Road trials in Japan. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.greencarcongress.com/2015/11/20151120-toyota.html

Green Car Reports 2015: High Gear Media, Inc. (2015). Tesla Roadster 3.0's $29,000 Battery Upgrade: 330 Miles Or More Of Range. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.greencarreports.com/news/1099868_tesla-roadster-3-0s-29000-battery-upgrade-330-miles-or-more-of-range

Green Car Reports 2016-1: High Gear Media, Inc. (2016). Green Car Reports 2017 Best Car To Buy nominee: Toyota Prius Prime. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.greencarreports.com/news/1106876_green-car-reports-2017-best-car-to-buy-nominee-toyota-prius-prime

Green Car Reports 2016-2: High Gear Media, Inc. (2016). Tesla Roadster 3.0 340-mile battery upgrade now shipping. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.greencarreports.com/news/1104981_tesla-roadster-3-0-340-mile-battery-upgrade-now-shipping

Grin et al. 2010: Routledge Chapman & Hall Ltd. (2010). Transitions to Sustainable Development: New Directions in the Study of Long Term Transformative Change. Von Grin, J.; Rotmans, J.; Schot, J., ISBN 0-41587-675-3

Grupp 1997: Springer-Verlag GmbH (1997). Messung und Erklärung des Technischen Wandels – Grundzüge einer empirischen Innovationsökonomik. Von Grupp, Hariolf, ISBN 978-3-642-59027-6

Handelsblatt 2012-1: Handelsblatt GmbH (2012). 15 Jahre Toyota Prius – Vom Technik-Experiment zum Öko-Bestseller. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/auto/test-technik/15-jahre-toyota-prius-vom-technik-experiment-zum-oeko-bestseller/6080246.html

Handelsblatt 2012-2: Handelsblatt GmbH (2012). Kooperation – BMW und Toyota schmieden Zukunftsallianz. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/kooperation-bmw-und-toyota-schmieden-zukunftsallianz/6815536.html

Handelsblatt 2014-1: Handelsblatt GmbH (2014). Elektroauto-Spezialist – Tesla ist eine Glaubensfrage. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektroauto-spezialist-tesla-ist-eine-glaubensfrage/10940122.html

Handelsblatt 2014-2: Handelsblatt GmbH (2014). Plug-In-Offensive – BMW wird halbelektrisch. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/plug-in-offensive-bmw-wird-halb-elektrisch/11057798.html

Handelsblatt 2016-1: Handelsblatt GmbH (2016). Elektroauto-Studie – Deutschland wird abgehängt. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/elektroauto-studie-deutschland-wird-abgehaengt/12885262.html

Handelsblatt 2016-2: Handelsblatt GmbH (2016). Toyota-Europachef Johan van Zyl –„Wir müssen die Ärmel hochkrempeln“. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/toyota-europachef-johan-van-zyl-wir-muessen-die-aermel-hochkrempeln/14643124.html

Handelsblatt 2016-3: Handelsblatt GmbH (2016). Teslas „Supercharger“ – Neukunden tanken nicht mehr kostenlos. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/teslas-supercharger-neukunden-tanken-nicht-mehr-gratis/14808110.html

Handelsblatt 2016-4: Handelsblatt GmbH (2016). BMW-Plan für 2017 – Krüger will 100.000 E-Autos verkaufen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/bmw-plan-fuer-2017-krueger-will-100-000-e-autos-verkaufen/14837792.html

Handelsblatt 2016-5: Handelsblatt GmbH (2016). Kooperation mit Intel und Mobileye – BMW will bis 2021 selbstfahrende Autos bauen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der

Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/kooperation-mit-intel-und-mobileye-bmw-will-bis-2021-selbstfahrende-autos-bauen/13819180.html

Handelsblatt 2017-1: Handelsblatt GmbH (2017). Tesla – Der wertvollste Autohersteller der USA. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/tesla-der-wertvollste-autohersteller-der-usa/19615694.html

Handelsblatt 2017-2: Handelsblatt GmbH (2017). Daimler, BMW, VW – Deutsche Autohersteller planen Schnellladenetz für E-Autos. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/daimler-bmw-vw-deutsche-autohersteller-planen-schnellladenetz-fuer-e-autos/14907786.html

Hauschildt et al. 2011: Verlag Franz Vahlen GmbH (2011). Innovationsmanagement. Von Hauschildt, J.; Salomo, S., ISBN 978-3-8006-4353-0

heise online 2016: Heise Medien GmbH & Co. KG (2016). Daimler-Betriebsratschef: Jobverluste durch E-Autos. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.heise.de/autos/artikel/Daimler-Betriebsratschef-Jobverluste-durch-E-Autos-3492379.html

Hekkert et al. 2007: Elsevier B.V. (2006). Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. Von Hekkert, M. P.; Suurs, R. A. A.; Negro, S. O.; Kuhlmann, S.; Smits, R. E. H. M. im Journal of Technological Forecasting & Social Change, Volume 74, Issue 4, Mai 2007, Seiten 413–432

Hekkert et al. 2009: Elsevier B.V. (2009). Functions of innovation systems as a framework to understand sustainable technological change: Empirical evidence for earlier claims. Von Hekkert, M.; Negro, S. O. im Journal of Technological Forecasting & Social Change, Volume 76, Issue 4, Mai 2009, Seiten 584-594

Howells 1999: Cambridge University Press (1999). Regional systems of innovation? Von Howells, J. in Archibugi, D.; Howells, J.; Michie, J. (Eds.) in „Innovation Policy in a Global Economy“, ISBN 0-52163-361-3

Hughes 1987: MIT Press (1987). The evolution of large technological systems. Von Hughes, T.P. in Bijker, W. E.; Hughes, T. P.; Pinch, T. J. (Eds.) in „The Social Construction of Technological Systems“, ISBN 0-262-52137-7

IEA 2013: International Energy Agency (IEA) (2013). Global EV Outlook – Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. Studie liegt vor

IEA 2015: International Energy Agency (IEA) (2015). Global EV Outlook 2015 – Key takeaways. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.cleanenergyministerial.org/Portals/2/pdfs/EVI-GlobalEVOutlook2015-v14-landscape.pdf

ifeu 2011: Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2011). UMBReLA – Umweltbilanzen Elektromobilität (Wissenschaftlicher Grundlagenbericht). Von Helm, H.; Jöhrens, J.; Hanusch, J.; Höpfner, U.; Lambrecht, U.; Pehnt, M. Studie liegt vor

IHS 2014: IHS Global Inc. (2014). November 2014 – Green Automotive Future. Von Scott, B. Studie liegt vor

Interbattery 2017: Coex Co. Ltd. (2017). About InterBattery. Zuletzt abgerufen am 24.05.2017 von der Webseite: http://interbattery.or.kr/overview/

International Business Times 2014: IBT Media, Inc. (2014). Why Toyota Prius Lost The Top Slot As California's Best-selling Car. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.ibtimes.com/why-toyota-prius-lost-top-slot-californias-best-selling-car-1585815

IPCC 2014: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). Climate Change 2014 – Synthesis Report. Studie liegt vor

IPCC 2017: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2017). Fifth Assessment Report (AR5). Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.ipcc.ch/report/ar5/

Jacobsson et al. 2000: Elsevier B.V. (2000). The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research. Von Jacobbson, S.; Johnson, A. im Journal of Energy Policy, Volume 28, Issue 9, Juli 2000, Seiten 625-640

Jacobsson et al. 2004: Elsevier B.V. (2004). Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology. Von Jacobsson, S.; Bergek, A. im Journal of Industrial and Corporate Change, Volume 13, Issue 5, Mai 2004, Seiten 815-849

Johnson 2001: DRUID's Nelson-Winter Conference (1998). Functions in innovation system approaches. Von (ledig Johnson bzw.) Bergek, A., „Paper for DRUID's Nelson-Winter Conference"

Jossen et al. 2006: Reichardt Verlag (2006). Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Von Jossen, A.; Weydanz, W. (Autoren), ISBN 978-3-939359-11-1

KBIA 2017: Korea Battery Industry Association (2017). About KBIA – Greetings from chairman. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.k-bia.or.kr/?module=Html&action=SiteEnComp&sSubNo=1

Kemp et al. 2006: Edward Elgar Publishing Ltd. (2006). Transition management: A Reflexive Governance Approach. Von Kemp, R.; Loorbach, D. in Voss, J.-P.; Bauknecht, D.; Kemp, R. (Eds.), „Reflexive Governance for Sustainable Development", ISBN 1-84720-026-5

Kemp et al. 2007: Erasmus Research Institute of Management (ERIM) (2007). Transition management as a model for managing processes of co-evolution towards sustainable development. Von Kemp, R.; Loorbach, D.; Rotmans, J. im Intern. Journal of Sustainable Development & World Ecology, Volume 14, Issue 1, Februar 2007, Seiten 78–91

Klein et al. 2016: Fakultät Wirtschafts- und Sozialwissenschaften/Universität Hohenheim. Celebrating 30 years of Innovation System research: What you need to know about Innovation Systems. Von Klein, M.; Sauer, A. in Hohenheim Discussion Papers in Business, Economics and Social Sciences, Oktober 2016

KLiB 2013: Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (2013). KLiB-Positionspapier zur Batteriezellfertigung. Publikation liegt vor

KLiB 2015: Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e.V. (2015). Pressemitteilung (Berlin, 26. Januar 2015) – Kongress Batterieforum Deutschland betont die Bedeutung des Aufbaus einer deutschen Batteriezellfertigung. Publikation liegt vor

KLiB 2017-1: Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e.V. (2017). Über KLiB. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.klib-org.de/ueber-klib/

KLiB 2017-2: Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (2017). Batterieforum Deutschland. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.batterieforum-deutschland.de/

KLiB 2017-3: Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (2017). Willkommen bei KLiB – Industrieübergreifender Verbund für Lithium-Ionen-Batterien. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://klib-org.de/

Koschatzky 2001: LIT Verlag GmbH (2001). Räumliche Aspekte im Innovationsprozess – Ein Beitrag zur neuen Wirtschaftsgeographie aus Sicht der regionalen Innovationsforschung. Von Koschatzky, K., ISBN 3-8258-5651-8

Köhler et al. 2013: Elsevier B.V. (2013). Leaving fossil fuels behind? An innovation system analysis of low carbon cars. Von Köhler, J.; Schade, W.; Leduc, G.; Wiesenthal, T.; Schade, B.; Espinoza, L. T. im Journal of Cleaner Production, Volume 48, Sonderausgabe, Juni 2013, Seiten 176-186

KSAE 2017: The Korean Society of Automotive Engineers (2017). About KSAE – Introduction. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.ksae.org/eng/about/index.html?subid=1

Kuhlmann et al. 2001: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI & Technopolis Ltd. (2001). RCN in the Norwegian Research and Innovation System. Von Kuhlmann, S.; Arnold, E. in „Reports in the evaluation of the Research Council of Norway“, Hintergrundbericht Nr. 12

Lindner et al. 2016: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI (2016). Addressing directionality: Orientation failure and the systems of innovation heuristic.

Towards reflexive governance. Von Lindner, R.; Daimer, S.; Beckert, B.; Heyen, N.; Koehler, J.; Teufel, B.; Warnke, P.; Wydra, S. in Fraunhofer ISI Discussion Papers „Innovation Systems and Policy Analysis“ No. 52, ISSN 1612-1430

List 1838: J. F. Hammerich Verlag (1838). Das deutsche National-Transport-System: in volks- und staatswirthschaftlicher Beziehung beleuchtet. Von List, F. Exemplare verschiedener Auflagen erhältlich z. B. über Antiquariatsbuchhandlungen, es wurde damals noch keine ISBN-Nummer vergeben

List 1844: J. G. Cotta'scher Verlag (1844). Das nationale System der politischen Ökonomie. Von List, F. in neuer, unveränderter Auflage. Exemplare verschiedener Auflagen erhältlich z. B. über Antiquariatsbuchhandlungen, es wurde damals noch keine ISBN-Nummer vergeben

Liu et al. 2001: Elsevier B.V. (2001). Comparing Innovation Systems: A Framework and Application to China’s Transitional Context. Von Liu, X; White, S. im Journal of Research Policy, Volume 30, Issue 7, August 2001, Seiten 1091-1114

Los Angeles Times 2015: Los Angeles Times (2015). CES 2015: Toyota opens patents on hydrogen fuel cell technology. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.latimes.com/business/autos/la-fi-hy-ces-2015-toyota-patent-hydrogen-fuel-cell-20150104-story.html

Lundvall 1985: Aalborg University Press (1985). Product Innovation and User-Product Interaction. Von Lundvall, B-Å. in Industrial Development Research Series No. 31, ISBN 87-7307-304-0

Lundvall 1992: Pinter Publishing Ltd. (1992). National Systems of Innovation – Toward a Theory of Innovation and Interactive Learning. Von Lundvall, B.-Å. (Ed.), ISBN 1-85567-063-1

Lundvall et al. 2002: Elsevier B.V. (2002). National Systems of Production, Innovation and Competence Building. Von Lundvall, B.-Å.; Johnson, B.; Andersen, E. S.; Dalum, B. im Journal of Research Policy, Volume 31, Issue 2, Februar 2002, Seiten 213-231

Lundvall 2010: Anthem Press (2010). National Systems of Innovation – Toward a Theory of Innovation and Interactive Learning. Von Lundvall, B.-Å. (Ed.), ISBN 1-84331-882-2

Malerba 2002: Elsevier B.V. (2002). Sectoral systems of innovation and production. Von Malerba, F. im Journal of Research Policy, Volume 31, Issue 2, Februar 2002, Seiten 247-264

Malerba 2004: Cambridge University Press (2004). Sectoral Systems of Innovation: Concepts, issues and analyses of six major sectors in Europe. Von Malerba, F. (Ed.), ISBN 0-521-83321-3

Malerba 2005-1: Taylor & Francis Group (2005). Sectoral systems of innovation: A framework for linking innovation to the knowledge base, structure and dynamics of sectors.

Von Malerba, F. im Journal of Economics of Innovation and New Technology, Volume 14, Issue 1-2, Januar-März 2005, Seiten 63-82

Malerba 2005-2: Oxford University Press (2005). Sectoral systems: how and why innovation differs across sectors. Von Malerba, F. in Fagerberg, J.; Mowery, D.; Nelson, R. (Eds.), „The Oxford Handbook of Innovation“, ISBN 0-19928-680-9

manager magazin online 2014-1: manager magazin new media GmbH (2014). Autohersteller – Toyota wendet sich von Elektroautos ab. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/auto-zukunft-toyota-forciert-brennstoffzelle-statt-reine-elektroautos-a-971114.html

manager magazin online 2014-2: manager magazin new media GmbH (2014). Tesla gibt Patente frei – Die riskante Patent-Wette des Elon Musk. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/analyse-patentfreigabe-tesla-riskante-wette-des-elektroautobauers-a-975009.html

manager magazin online 2014-3: manager magazin new media GmbH (2014). Tesla-Chefentwickler Jerome Guillen – „Wir wollen 500.000 Autos im Jahr verkaufen“. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/tesla-chefentwickler-jerome-guillen-im-interview-a-998892-3.html

manager magazin online 2014-4: manager magazin new media GmbH (2014). Elektroautos – BMW fährt i3-Produktion um 40 Prozent hoch. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/elektroautoherstellung-bmw-faehrt-i3-produktion-um-40-prozent-hoch-a-964633.html

manager magazin online 2015-1: manager magazin new media GmbH (2015). Batteriefabrik von Li-Tec auf der Resterampe – Hier verscherbelt Daimler eine deutsche Industrie-Hoffnung. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/daimler-verscherbelt-li-tec-das-ende-einer-deutschen-industrie-hoffnung-a-1053709.html

manager magazin online 2015-2: manager magazin new media GmbH (2015). Kostenlose Patentnutzung bis 2020 – Toyota gibt tausende Brennstoffzellen-Patente frei - mit einem Hintergedanken. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/brennstoffzellen-auto-mirai-toyota-gibt-5700-patente-bis-2020-frei-a-1011472.html

manager magazin online 2015-3: manager magazin new media GmbH (2015). Aktie stürzt – Tesla fährt bis 2020 ohne Gewinn – Probleme in China. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/tesla-bleibt-noch-bis-2020-ohne-gewinn-a-1012851.html

Markard et al. 2008: Elsevier B.V. (2008). Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework. Von Markard, J.; Truffer, B. im Journal of Research Policy, Volume 37, Issue 4, Mai 2008, Seiten 596-615

Markard et al. 2009: Elsevier B.V. (2009). Prospective analysis of technological innovation systems: Identifying technological and organizational development options for biogas in Switzerland. Von Markard, J.; Stadelmann, M.; Truffer, B. im Journal of Research Policy, Volume 38, Issue 4, Mai 2009, Seiten 655–667

MarkLines 2015: MarkLines Co., Ltd. (2015). Toyota launches Mirai fuel cell vehicle in December 2014. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.marklines.com/en/report/rep1359_201412?rf=mail

MarkLines 2017: MarkLines Co., Ltd. (2017). Automotive Industry Portal. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.marklines.com/en/

Maskell et al. 1999: Oxford University Press (1999). Localised learning and industrial competitiveness. Von Maskell, P.; Malmberg, A. im Cambridge Journal of Economics, Volume 23, Issue 2, im Jahr 1999, Seiten 167-185

MDE 2012-1: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MDE) (2012). Le plan véhicules électriques et hybrides – Présentation détaillée des 14 actions. Zuletzt abgerufen am 18.11.2016 von der Webseite: http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-detaillee-des-14,26839.html

MDE 2012-2: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MDE) (2012). Le plan véhicules électriques et hybrides – Le plan national d'action pour développer les véhicules propres. Zuletzt abgerufen am 18.11.2016 von der Webseite: http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-plan-national-d-action-pour.html

MEET 2011: MEET Münster Electrochemical Energy Technology / Institut für Physikalische Chemie der Universität Münster (2011). Innovationsallianz "Lithium Ionen Batterie LIB 2015". Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.lib2015.de/

Metcalfe 1998: Taylor & Francis Group (1998). Evolutionary Economics and Creative Destruction. Von Metcalfe, J. S., ISBN 0-415-15868-0

METI 2010: Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) (2010). Japanese Automobile Industry and Automobile Industry Policy. Präsentation von Shigeaki Tanaka, Director Automobile Division, Manufacturing Industries Bureau, auf dem Seminar „Towards the Improvement of the Green Car Environment: Latest Policy Developments and Possibility for Cooperation between EU and Japan“ am 26. Oktober 2010 in Tokio/Japan

Meyer-Krahmer 1998: Elsevier B.V. (1998). Science-based technologies: university–industry interactions in four fields. Von Meyer-Krahmer, F.; Schmoch, U. im Journal of Research Policy, Volume 27, Issue 8, Dezember 1998, Seiten 835-851

Michaelis et al. 2014: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Scientific Publishing (2014). Vergleich alternativer Antriebstechnologien – Batterie-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug. Von Michaelis, J.; Plötz, P.; Gnann, T.; Wietschel, M. in Jochem, P.; Poganietz, W.-R.; Grunwald, A.; Fichtner, W. (Hrsg.), „Alternative Antriebskonzepte bei

sich wandelnden Mobilitätsstilen“ (Tagungsbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT, Karlsruhe), ISBN 3-86644-944-5. Tagungsband liegt vor

Miyazaki et al. 2007: Elsevier B.V. (2007). Nanotechnology systems of innovation – An analysis of industry and academia research activities. Von Miyazaki, K.; Islam, N. im Journal of Technovation, Volume 27, Issue 11, November 2007, Seiten 661-675

MKE 2010: Ministry of Knowledge Economy (MKE) (2010). Plans to strengthen the competitiveness on rechargeable batteries. Strategiedokument/Roadmap liegt vor

Moallemi et al. 2014: Elsevier B.V. (2014): Understanding systemic analysis in the governance of sustainability transition in renewable energies: The case of fuel cell technology in Iran. Von Moallemi, E. A.; Ahamdi, A.; Afrazeh, A.; Moghaddam, N. B. im Journal of Reneweable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, Mai 2014, Seiten 305-315

Mondal et al. 2010: Elsevier B.V. (2010). Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh – An innovation system analysis. Von Mondal, A. H.; Kamp, L. M.; Pachova, N. I. im Journal of Energy Policy, Volume 38, Issue 8, August 2010, Seiten 4626-4634

MOST 2010: Ministry of Science and Technology (MOST) (2010). The Status and Future of Electric Vehicles in China. Präsentation von Zhang Zhihong auf dem „U.S.-China Electric Vehicle and Battery Technology Workshop“ vom 30. August bis 1. September 2010 in Argonne/Illinois

Mowery et al. 1995: Oxford University Press (1995). Inward technology transfer and competitiveness: the role of national innovation systems. Von Mowery, D. C.; Oxley, J. E. im Cambridge Journal of Economics, Volume 19, Issue 1, 1995, Seiten 67-93

Möhrle et al. 2007: Springer-Verlag GmbH (2007). Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. Von Möhrle, M.; Isenmann, R., ISBN 3540747559

MRP 2010: Ministère du Redressement productif (MRP) (2010). Secteurs industriels: automobile – Le pacte automobile et autres mesures générales. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/enjeux/auto/auto-pacte.html

Musiolik et al. 2012: Elsevier B.V. (2012). Networks and network resources in technological innovation systems: Towards a conceptual framework for system building. Von Musiolik, J.; Markard, J.; Hekkert, M. im Journal of Technological Forecasting and Social Change, Volume 79, Issue 6, Juli 2012, Seiten 1032-1048

NAATBATT 2017: National Alliance for Advanced Transportation Batteries (NAATBATT) International (2017). History. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://naatbatt.org/about/history/

NADAguides 2017: National Appraisal Guides, Inc. (2017). Toyota Prius Models and Prius History. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.nadaguides.com/Cars/Toyota/Prius/Model-History

NASDAQ OMX 2016: NASDAQ OMX Group, Inc. (2016). Crude Oil Brent – Latest Price & Chart for Crude Oil Brent. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.nasdaq.com/markets/crude-oil-brent.aspx?timeframe=5y

Nature Climate Change 2015: Macmillan Publishers Ltd. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. Von Nykvist, B.; Nilsson, M. in Nature Climate Change, Volume 5, Issue 4, April 2015, Seiten 329-332

NEDO 2011: New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) (2011). R&D of High-performance Batteries for Next-generation Vehicles in NEDO. Präsentation von Takeshi Sato, Smart Community Department, auf der 7th International Energy-Efficiency and New Energy Vehicles Innovation Development Forum and Exhibition vom 6.-10. September 2011 in Peking/China

Negro et al. 2008: Taylor & Francis Group (2008). Explaining the success of emerging technologies by innovation system functioning: the case of biomass digestion in Germany. Von Negro, S. O.; Hekkert, M. P. im Journal of Technology Analysis & Strategic Management, Volume 20, Issue 4, Juli 2008, Seiten 465-482

Nelson et al. 1993: Oxford University Press, Inc. (1993). Technical Innovation and National Systems. Von Nelson, R. R.; Rosenberg, N. in „National Innovation Systems – A Comparative Analysis“ von Nelson, R. R. (Ed.), ISBN 0-19-507616-8

Nelson 1995: American Economic Association (1995). Recent Evolutionary Theorizing About Economic Change. Von Nelson, R. R. im Journal of Economic Literature, Volume 33, Issue 1, März 1995, Seiten 48-90

Nikkei Asian Review 2014: Nikkei, Inc. (2014). Toyota to triple output capacity for fuel cell vehicles. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://asia.nikkei.com/Business/Companies/Toyota-to-triple-output-capacity-for-fuel-cell-vehicles

Niosi et al. 1993: Elsevier B.V. (1993). National systems of innovation: in search of a workable concept. Von Niosi, J.; Saviotti, P.; Bellon, B.; Crow, M. im Journal of Technology in Society, Volume 15, Issue 2, 1993, Seiten 207-227

NOAA 2017: U.S. Department of Commerce | National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) | Earth System Research Laboratory | Global Monitoring Division (2016). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Full Mauna Loa CO2 record. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html

NOW 2015: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (2015). Aufbau Wasserstoff-Tankstellennetz – Aufbau eines Wasserstoff-Tankstellennetzes für Brennstoffzellenfahrzeuge in Deutschland. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.now-gmbh.de/de/nationales-innovationsprogramm/aufbau-wasserstoff-tankstellennetz

NOW 2017: Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (2017). Clean Energy Partnership CEP . Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://cleanenergypartnership.de/home/

NPE 2010-1: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2010). Bericht der AG-2 Batterietechnologie für den Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Studie liegt vor

NPE 2010-2: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2010). Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Studie liegt vor

NPE 2011: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2011). Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Studie liegt vor

NPE 2012: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2012). Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht). Studie liegt vor

NPE 2014: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2014). Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung. Studie liegt vor

NPE 2015: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2015). Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland – Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015. Studie liegt vor

NPE 2016: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) (2016). Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. Studie liegt vor

NPE 2017-1: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2017). Mit Elektromobilität nach vorn. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/

NPE 2017-2: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2017). Die Nationale Plattform Elektromobilität – Publikationen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/die-npe/publikationen/

NPE 2017-3: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2017). Erfahren Sie mehr über Motivation und Ziele. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/hintergrund/die-ziele/

NZZ 2016: NZZ Mediengruppe (2016). Elektroauto-Boom – Flurbereinigung in Chinas E-Automarkt. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.nzz.ch/mobilitaet/auto-mobil/elektroauto-boom-flurbereinigung-in-chinas-e-automarkt-ld.113594

OECD 1999: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (1999). Managing National Innovation Systems. Publikation liegt vor

OECD 2005: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) / Statistical Office of the European Communities (EUROSTAT) (2005). Oslo Manual – Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data. Publikation liegt vor

OECD/IEA 2015: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)/International Energy Agency (IEA) (2015). CO2 Emissions from Fuel Combustion Highlights – 2015 Edition. Publikation liegt vor

OECD 2015: Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2015). OECD Multilingual Summaries – ITF Transport Outlook 2015 – Summary in English. Publikation liegt vor

Oltander et al. 2005: Chalmers University of Technology (2005). A survey of the Swedish security industry and an innovation system analysis of the Swedish security sensor industry. Von Oltander, G.; Vico, E. P. als Masterarbeit erstellt

Oltra et al. 2009: Elsevier B.V. (2009). Sectoral systems of environmental innovation: an application to the French automotive industry. Von Oltra, V.; Maïder, S. J. im Journal of Technological Forecasting and Social Change, Volume 76, Issue 4, Mai 2009, Seiten 567-583

Orocobre 2012: Orocobre Ltd. (2012). Lithium Market – Lithium Prices. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.orocobre.com/the-markets/lithium/

Panasonic 2014: Panasonic Corporation (2014). Panasonic announces the establishment of Panasonic Energy Corporation of North America, a new manufacturing company of lithium-ion batteries at the Tesla Gigafactory. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://news.panasonic.com/press/news/official.data/data.dir/2014/10/en141003-5/en141003-5.html/

Pew Center 2011: Pew Center on Global Climate Change (2011). U.S. Department of Energy's Recovery Act Spending. Von Wurzelmann, S. Publikation liegt vor

Plötz et al. 2014-1: Elsevier B.V. (2014). Who will buy electric vehicles? Identifying early adopters in Germany. Von Plötz, P.; Schneider, U.; Globisch, J.; Dütschke, E. im Journal of Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 67, September 2014, Seiten 96-109

Plötz et al. 2014-2: Fraunhofer ISI (2014). Modelling Market Diffusion of Electric Vehicles with Real World Driving Data – Part I: Model Structure and Validation. Von Plötz, P.;

Gnann, T.; Wietschel, M. (Working Paper Sustainability and Innovation No. S 4/2014). Studie liegt vor

Plug In America 2014: Plug In America (2014). Do Gas Prices Correlate With Plug-in Vehicle Sales? Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.pluginamerica.org/drivers-seat/do-gas-prices-correlate-plug-vehicle-sales/

PRBA 2017: The Rechargeable Battery Association (PRBA) (2017). About PRBA. Zuletzt aufgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.prba.org/about-prba/

PwC 2015: PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftprüfungsgesellschaft (2015). Vorsicht, Greenwashing: Konsumenten blicken hinter die grüne Fassade. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.pwc.de/de/nachhaltigkeit/vorsicht-greenwashing-konsumenten-blicken-hinter-die-gruene-fassade.html

Reed Exhibitions 2017-1: Reed Exhibitions Japan Ltd. (2017). 9th Int'l Rechargeable Battery Expo BATTERY JAPAN. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.batteryjapan.jp/en/Home/

Reed Exhibitions 2017-2: Reed Exhibitions Japan Ltd. (2017). Tokyo – World Smart Energy Week 2018. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.wsew.jp/en/

Renault Deutschland 2017: Renault Deutschland AG (2017). Renault Deutschland – Twizy. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.renault.de/renault-modellpalette/ze-elektrofahrzeuge/twizy/twizy/

Rickne 2000: Chalmers University of Technology (2000). New Technology-Based Firms and Industrial Dynamics Evidence from the Technological System of Biomaterials in Sweden, Ohio and Massachusetts. Von Rickne, A., ISBN: 91-7197-975-1

Rodríguez-Pose et al. 2008: Taylor & Francis Group (2008). Research and Development, Spillovers, Innovation Systems, and the Genesis of Regional Growth in Europe. Von Rodriguez-Pose, A.; Crescenzi, R. im Journal of Regional Studies, Volume 42, Issue 1, Februar 2008, Seiten 51-67

Roland Berger 2012: Roland Berger Strategy Consultants/Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2012). Zukunftsfeld Energiespeicher – Marktpotenziale standardisierter Lithium-Ionen-Batteriesysteme. Von Schlick, T.; Hagemann, B.; Kramer, M.; Garrelfs, J.; Rassmann, A.

Rotmans et al. 2001: Emerald Group Publishing Ltd. (2001). More evolution than revolution: transition management in public policy. Von Rotmans, J.; Kemp, R.; van Asselt, M. im Journal of Foresight, Volume 3, Issue 1, im Jahr 2001, Seiten 15-31

RWI Essen 2006: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (2006). Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht des

Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung (RWI Essen), des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Von Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M. Studie liegt vor

Sapsed et al. 2007: Elsevier B.V. (2007). A bridge over troubled waters: Bridging organisations and entrepreneurial opportunities in emerging sectors. Von Sapsed, J.; Grantham, A.; DeFillippi, R. im Journal of Research Policy, Volume 36, Issue 9, November 2007, Seiten 1314-1334

Sauer 2011-1: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2011). Entwicklung einer Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030 (Diplomarbeit). Von Sauer, A. Publikation liegt vor

Sauer 2011-2: Lehr- und Forschungsgebiet Elektrochemische Energiewandlung & Speichersystemtechnik / Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) / Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen (2011). Überblick über die Speichertechnologien. Präsentation von Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer zum Fachgespräch der Bundestagesfraktion BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN zum Thema „Die Speicherfrage – Stolperstein für die Energiewende?“ am 9. November 2011 in Berlin. Vortrag liegt vor

Sauer et al. 2016: Elsevier B.V. (2016). Modularity in Roadmapping – Integrated foresight of technologies, products, applications, markets and society: The case of “Lithium Ion Battery LIB 2015”. Von Sauer, A.; Thielmann, A.; Isenmann, R. in Technological Forecasting and Social Change (in Kürze erscheinend), online verfügbar seit 27.08.2016

Schumpeter 1912: Verlag Duncker & Humblot GmbH (2006). Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung – Nachdruck der 1. Auflage von 1912. Von Schumpeter, J., ISBN 978-3-4281-1746-8

Shmuel De-Leon 2017: Shmuel De-Leon Energy Ltd. (2017). Shmuel De-Leon Energy Introduction Video. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.sdle.co.il/

Slate 2015: The Slate Group LLC (2015). Auto Save – Low gas prices are bad news for hybrid vehicles. But they won’t harm the rise of all-electric cars. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.slate.com/articles/business/the_juice/2015/02/low_gas_prices_and_electric_cars_why_tesla_and_other_companies_aren_t_vulnerable.html/

Smarter Shows 2017: Smarter Shows Ltd. (2017). The Battery Show Exhibition & Conference. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.thebatteryshow.com/

Smith et al. 2005: Elsevier B.V. (2005). The governance of sustainable socio-technical transitions. Von Smith, A.; Stirling, A.; Berkhout, F. im Journal of Research Policy, Volume 34, Issue 10, Dezember 2005, Seiten 1491-1510

Smith et al. 2010: Elsevier B.V. (2010). Innovation studies and sustainability transition s: The allure of the multi-level perspective and its challenges. Von Smith, A.; Voß, J.-P.; Grin, J. im Journal of Research Policy, Volume 39, Issue 4, Mai 2010, Seiten 435-448

Springer Fachmedien 2013: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2013). Motorentechnik – Teil 14: Thermomanagement im elektrifizierten Antrieb. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.springerprofessional.de/mtz-wissen-teil-14/4569448.html

Springer Fachmedien 2016: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (2016). Daimler baut globalen Produktionsverbund für Lithium-Ionen-Batterien auf. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.springerprofessional.de/unternehmen---institutionen/batterie/daimler-baut-globalen-produktionsverbund-fuer-lithium-ionen-batt/10960518

Stanford Social Innovation Review 2013: Leland Stanford Jr. University (2013). China's Quest to Adopt Electric Vehicles. Von Marquis, C.; Zhang, H.; Zhou, L. Ausgabe Spring 2013, Seiten 52-57

StartGreen 2016: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH (2016). Unter Strom: Elektromobilität als Chance für grüne Start-ups. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://start-green.net/aktuelles/nachrichten/elektromobilitaet-chance-fuer-gruene-startups/

Statistisches Bundesamt 2016: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2016). Verkehr – Verkehr im Überblick 2015. Publikation liegt vor

Stuttgarter Zeitung 2016: Stuttgarter Zeitung Verlagsgesellschaft mbH (2016). Daimler-Tochter Accumotive – Daimler verdoppelt Mitarbeiterzahl in Batteriefabrik. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.daimler-tochter-accumotive-daimler-verdoppelt-mitarbeiterzahl-in-batteriefabrik.0ea89a0c-7610-4c20-8628-d71083b94693.html

Suurs et al. 2009-1: Elsevier B.V. (2009). Competition between first and second generation technologies: Lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands. Von Suurs, R. A. A.; Hekkert, M. P. im Journal of Energy, Volume 34, Issue 5, Mai 2009, Seiten 669-679

Suurs et al. 2009-2: Elsevier B.V. (2009). Understanding the build-up of a technological innovation system around hydrogen and fuel cell technologies. Von Suurs, R. A. A.; Hekkert, M. P.; Smits, R. E. H. M. im International Journal of Hydrogen Energy, Volume 34, Issue 24, Dezember 2009, Seiten 9639-9654

Suurs et al. 2010: Elsevier B.V. (2010). Understanding the formative stage of technological innovation system development: The case of natural gas as an automotive fuel. Von Suurs, R. A. A.; Hekkert, M. P.; Kieboom, S.; Smits, R. E. H. M. im Journal of Energy Policy, Volume 38, Issue 1, Januar 2010, Seiten 419-431

Süddeutsche 2015: Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH (2015). So groß wie Apple. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.sueddeutsche.de/auto/tesla-chef-elon-musk-so-gross-wie-apple-1.2348086/

Süddeutsche 2016-1: Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH (2016). BMW will Batteriezellen selbst produzieren. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/elektromobilitaet-bmw-will-batteriezellen-selbst-produzieren-1.3279082

Süddeutsche 2016-2: Süddeutsche Zeitung Digitale Medien GmbH (2016). 250 000 Arbeitsplätze in Gefahr. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/autobranche-arbeitsplaetze-in-gefahr-1.3268664

TAB 2008: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2008). Energiespeicher – Stand und Perspektiven (Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“, Arbeitsbericht Nr. 123 von Februar 2008). Von Oertel, D. Studie liegt vor

TAB 2012: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (2012). Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt (Innovationsreport, Arbeitsbericht Nr. 153 von Oktober 2012). Von Peters, A.; Doll, C.; Kley, F.; Möckel, M.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W.; Thielmann, A.; Wietschel, M.; Zanker, C. Studie liegt vor

Tagesspiegel 2017: Verlag Der Tagesspiegel GmbH (2017). Elektromobilität – Neue Firmenallianz will Batteriezellen in Deutschland produzieren. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/elektromobilitaet-neue-firmenallianz-will-batteriezellen-in-deutschland-produzieren/19304568.html

Teslamag 2016: Theodoros Katsimpouras (2016). Musk zum Model X: „Ich bin nicht sicher, ob Tesla noch einmal so ein Auto baut“. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://teslamag.de/news/musk-model-x-ich-tesla-7009

Tesla 2011: Tesla Inc. (2011). Tesla Motors Company Overview. Publikation liegt vor

Tesla 2013: Tesla Inc. (2013). Tesla Motors Investor Presentation. Präsentation von Jeff Evanson, Vice President Investor Relations, in 2013. Publikation liegt vor

Tesla 2014-1: Tesla Inc. (2014). Roadster 3.0. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.teslamotors.com/blog/roadster-30

Tesla 2014-2: Tesla Inc. (2014). Tesla Motors Investor Presentation. Präsentation von Jeff Evanson, Vice President Investor Relations, im Januar 2014. Publikation liegt vor

Tesla 2014-3: Tesla Inc. (2014). All Our Patent Are Belong To You. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.teslamotors.com/blog/all-our-patent-are-belong-you

Tesla 2014-4: Tesla Inc. (2014). Gigafactory. Publikation liegt vor

Tesla 2016-1: Tesla Inc. (2016). Über Tesla. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.teslamotors.com/de_DE/about

Tesla 2016-2: Tesla Inc. (2016). Tesla First Quarter 2016 Update. Publikation liegt vor

Tesla 2016-3: Tesla Inc. (2016). Uns finden. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.tesla.com/de_DE/findus/list

Tesla 2016-4: Tesla Inc. (2016). Supercharger. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.tesla.com/de_DE/supercharger

Tesla 2016-5: Tesla Inc. (2016). Destination Charging. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.tesla.com/de_DE/destination-charging

Tesla 2016-6: Tesla Inc. (2016). Tesla Q4 2016 Production and Deliveries. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://ir.tesla.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=1006161

Tesla 2017-1: Tesla Inc. (2017). Model S. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.tesla.com/de_DE/models

Tesla 2017-2: Tesla Inc. (2017). Model X. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.tesla.com/de_DE/modelx

Tesla 2017-3: Tesla Inc. (2017). Tesla Fourth Quarter & Full Year 2016 Update. Publikation liegt vor

Tesla 2017-4: Tesla Inc. (2017). Battery Cells Production Begins at the Gigafactory. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://www.tesla.com/de_DE/blog/battery-cell-production-begins-gigafactory?redirect=no

Tesla 2017-5: Tesla Inc. (2017). Tesla Q1 2017 Vehicle Production and Deliveries. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://ir.tesla.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=1019685

The Economist 2015: The Economist Newspaper Ltd. (2015). The Economist explains – Why the low oil price will not harm sales of electric cars. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.economist.com/blogs/economist-explains/2015/02/economist-explains-21

The Korea Times 2010: The Korea Times Co. (2010). Korea Aims to Be Top 4 Green Car Maker. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.koreatimes.co.kr/www/news/biz/2010/04/123_62095.html

The Korea Times 2015: The Korea Times Co. (2015). Apple lures Samsung's tech experts. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.koreatimes.co.kr/www/news/tech/2015/02/133_173951.html

Thomson Reuters 2016-1: Thomson Reuters (2016). Toyota sharpens focus on electric cars through new in-house unit. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.reuters.com/article/us-toyota-electric-idUSKBN13C0HW

Thomson Reuters 2016-2: Thomson Reuters (2016). Toyota chief shifts gear, to boost electric vehicle division. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.reuters.com/article/us-toyota-electric-idUSKBN13P11J

Thomson Reuters 2016-3: Thomson Reuters (2016). Tesla puts pedal to the metal, 500,000 cars planned in 2018. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.reuters.com/article/us-tesla-results-idUSKCN0XV2JL

Thomson Reuters 2017: Thomson Reuters (2017). Hybrid blues: China policies force Toyota into electric U-turn. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.reuters.com/article/us-autoshow-shanghai-electric-idUSKBN17L1VC

Toyota Deutschland 2015-1: Toyota Deutschland GmbH (2015). Erfolgreicher Start für Brennstoffzellenauto Toyota Mirai – 1.500 Bestellungen innerhalb des ersten Verkaufsmonats. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.toyota-media.de/blog/toyota-modelle/artikel/erfolgreicher-start-fur-brennstoffzellenauto-toyota-mirai

Toyota Deutschland 2015-2: Toyota Deutschland GmbH (2015). Toyota erhöht Produktion seines Brennstoffzellenautos – Stufenweiser Ausbau bis zum Jahr 2017. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.toyota-media.de/blog/toyota-modelle/artikel/toyota-erhoht-produktion-seines-brennstoffzellenautos

Toyota Deutschland 2015-3: Toyota Deutschland GmbH (2015). Freie Fahrt für Brennstoffzellenfahrzeuge. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.toyota-media.de/blog/toyota-modelle/artikel/freie-fahrt-fur-brennstoffzellenfahrzeuge

Toyota Deutschland 2016-1: Toyota Deutschland GmbH (2016). Prius – Wegweisend. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.toyota.de/automobile/prius/index.json

Toyota Deutschland 2016-2: Toyota Deutschland GmbH (2016). Toyota ist unangefochtener Patent-Weltmeister – Jedes vierte Patent kommt von dem japanischen Konzern. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.toyota-media.de/blog/technik/artikel/toyota-ist-unangefochtener-patent-weltmeister

Toyota Motor 2014: Toyota Motor Corporation (2014). Toyota Ushers in the Future with Launch of ‚Mirai' Fuel Cell Sedan. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/4198334

Toyota Motor 2015-1: Toyota Motor Corporation (2015). With 8 Million Units Sold, Toyota Proves Hybrids Have Staying Power. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/9163695/

Toyota Motor 2015-2: Toyota Motor Corporation (2015). Toyota Unveils Bold New Environmental Targets. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/mail/9889509

Toyota Motor 2016-1: Toyota Motor Corporation (2016). Worldwide Sales of Toyota Hybrids Surpass 9 Million Units. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/12077091

Toyota Motor 2016-2: Toyota Motor Corporation (2016). Worldwide Sales of Toyota Hybrids Surpass 10 Million Units. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/14940871

Toyota Motor 2016-3: Toyota Motor Corporation (2016). TMC Announces Executive and Personnel Changes. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/14364352/

Toyota Motor 2017: Toyota Motor Corporation (2017). Toyota Launches Redesigned “Prius PHV” in Japan. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/15055900

Toyota (GB) PLC 2014: Toyota (GB) PLC (2014). TOYOTA powertrain Roadmap – Matching technology to usage. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://media.toyota.co.uk/2014/10/toyota-powertrain-roadmap/

Toyota Motor Europe 2014-1: Toyota Motor Europe S.A./N.V. (2014). PARIS – TOYOTA PRESS KIT 2014. Publikation liegt vor

Toyota Motor Europe 2014-2: Toyota Motor Europe S.A./N.V. (2014). Toyota On-Stand Press Conference Paris Motor Show – Octover 2014. Zuletzt abgerufen am 13.11.2016 von der Webseite: http://newsroom.toyota.eu/newsrelease.do?&id=4069&allImage=1&teaser=toyota-stand-press-conference-paris-motor-show-october&mid=158

Toyota Motor Europe 2014-3: Toyota Motor Europe S.A./N.V. (2014). Toyota Ushers in the Future with Launch of ‘Mirai’ Fuel Cell Sedan. Zuletzt abgerufen am 14.11.2016 von der Webseite: http://newsroom.toyota.eu/newsrelease.do?&id=4124

Toyota Motor Europe 2016: Toyota Motor Europe S.A./N.V. (2016). Toyota at the 2016 Mondial de l'Automobile. Zuletzt abgerufen am 13.11.2016 von der Webseite: http://newsroom.toyota.eu/pressrelease/5264/1690/toyota-2016-mondial-de-l%E2%80%99automobile

Toyota Motor Europe 2017: Toyota Motor Europe S.A./N.V. (2017). Toyota i-TRIL Concept Car – Toyota's vision on urban mobility in 2030. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://newsroom.toyota.eu/toyota-i-tril-concept-car/

Toyota USA Newsroom 2011: Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc. (2011). Toyota Introduces 2012 Prius Plug-in Hybrid. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://toyotanews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+introduces+2012+prius+plug-in+hybrid.htm

Toyota USA Newsroom 2014-1: Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc. (2014). Worldwide Sales of Toyota Hybrids Top 6 Million Units. Zuletzt abgerufen am 22.07.2016 von der Webseite: http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/worldwide+toyota+hybrid+sales+top+6+million.htm

Toyota USA Newsroom 2014-2: Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc. (2014). Toyota is Global Hybrid Leader with Sales of 7 Million – Recent million-unit milestone achieved in record time. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://pressroom.toyota.com/releases/toyota+global+hybrid+leader+sales+7mm.htm

Toyota USA Newsroom 2014-3: Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc. (2014). The Toyota Mirai Brings the Future to Your Driveway. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://toyotanews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+mirai+fcv+future+nov17.htm

Toyota USA Newsroom 2014-4: Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc. (2014). 2015 Toyota CES Press Preview – Bob Carter. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://toyotanews.pressroom.toyota.com/releases/2015+toyota+ces+press+preview+carter.htm

Toyota USA Newsroom 2015: Toyota Motor Sales U.S.A., Inc. (2015). Toyota Opens the Door and Invites the Industry to the Hydrogen Future. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+fuel+cell+patents+ces+2015.htm?view_id=35924

Toyota USA Newsroom 2016: Toyota Motor Sales U.S.A., Inc. (2016). Prime Mover: Toyota Maxes Out Tech and Style in the World's Best-Selling Hybrid to Create the 2017 Prius Prime. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://toyotanews.pressroom.toyota.com/releases/prime-mover-toyota-creates-2017-prius-prime.htm

Transport Evolved 2014-1: Transport Evolved (2014). Toyota Defends Focus on Hybrids Without Plugs and Hydrogen Fuel Cell Technology. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von

der Webseite: https://transportevolved.com/2014/10/07/toyota-defends-focus-hybrids-without-plugs-hydrogen-fuel-cell-technology/

Transport Evolved 2014-2: Transport Evolved (2014). Toyota Admits Cutting Costs of Hydrogen Fuel Cell Technology Further Will Be Tough. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://transportevolved.com/2014/11/25/toyota-admits-cutting-costs-hydrogen-fuel-cell-technology-will-tough/

Tushman et al. 1986: Sage Publications, Inc. (1986). Technological Discontinuities and Organizational Environments. Von Tushman, M.; Anderson, P. in Administrative Science Quarterly, Volume 31, No. 3, September 1986, Seiten 439-465

Umweltbundesamt 2012: Umweltbundesamt (2012). Batterien und Akkus – Ihre Fragen - Unsere Antworten zu Batterien, Akkus, Umwelt. Von Petrikowski, F.; Kohlmeyer, R.; Jung, M.; Steingrübner, E.; Leuthold, S. Publikation liegt vor

UN DESA 2011: United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA) (2011). Electric Vehicles in the Context of Sustainable Development in China. Von Earley, R.; Kang, L.; An, F.; Green-Weiskel, L. Studie der Commission on Sustainable Development, Nineteenth Session in New York vom 2. bis 13 Mai 2011, Background Paper No. 9, CSD19/2011/BP9. Studie liegt vor

UNEP 2010: United Nations Environment Programme (UNEP) (2010). Overview of the Republic of Korea's National Strategy for Green Growth. Studie im Rahmen der „Green Economy Initiative" liegt vor

VDI/VDE-IT 2014: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH und Deutsche IHK Japan (2014). Trendbericht: Elektromobilität in Japan. Studie liegt vor

VDMA Batterieproduktion 2014: VDMA Verlag GmbH (2014). Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Von Maiser, E.; Michaelis, S.; Müller, D.; Kampker, A.; Deutskens, C.; Heimes, H.; Sarovic, N.; Klusmann, N.; Thielmann, A.; Sauer, A. Studie liegt vor

VDMA Batterieproduktion 2016: VDMA Verlag GmbH (2016). Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 – Update 2016. Von Michaelis, S.; Maiser, E.; Kampker, A.; Heimes, H.; Lienemann, C.; Wessel, S.; Thielmann, A.; Sauer, A.; Hettesheimer, T. Studie liegt vor

VDMA 2017-1: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (2017). E-MOTIVE – gebündelte Kompetenz für die Elektromobilität. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://elektromobilitaet.vdma.org/viewer/-/article/render/15157759

VDMA 2017-2: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) (2017). Wer wir sind... Batterieproduktion und Maschinenbau optimal vernetzen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://battprod.vdma.org/article/-/articleview/7962887

Virtanen et al. 2010: Finpro (2010). Electric Vehicles South Korea. Von Virtanen, A.; Lee, Y.-M. Studie liegt vor

Wall Street Journal 2015: Dow Jones & Company, Inc. (2015). The Tesla Paradox – Visions of a $700 billion market cap but still living off subsidies. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.wsj.com/articles/the-tesla-paradox-1423786534

Warnke et al. 2016: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI (2016). Opening up the innovation system framework towards new actors and institutions. Von Warnke, P.; Koschatzky, K.; Dönitz, E.; Zenker, A.; Stahlecker, T.; Som, O.; Cuhls, K.; Güth, S. in Fraunhofer ISI Discussion Papers „Innovation Systems and Policy Analysis“ No. 49, ISSN 1612-1430

WEVA 2017: World Electric Vehicle Association (2017). Electric Drive. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.worldelectricvehicleassociation.info

Wietschel et al. 2008: etv Energieverlag GmbH (2008). Quo vadis Elektromobilität? Von Wietschel, M.; Dallinger, D. in Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 58. Jahrgang (2008), Heft 12, Seiten 8-15

Wietschel et al. 2010: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2010). Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für FuE (Technologienbericht). Von Wietschel, M.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Krewitt, W.; Markewitz, P.; Möst, D.; Scheufen, M., ISBN: 3-8396-0102-9

Wikipedia 2017: Wikimedia Foundation, Inc. (2017). NUTS. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: https://en.wikipedia.org/wiki/Nomenclature_of_Territorial_Units_for_Statistics

Wirtschaftswoche 2014-1: Handelsblatt GmbH & Co. KG (2014). Toyota i-Road – Der elektrische Alien. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.wiwo.de/technologie/auto/toyota-i-road-der-elektrische-alien/10708438.html

Wirtschaftswoche 2014-2: Handelsblatt GmbH & Co. KG (2014). Toyota – Brennstoffzellenauto Mirai kostet 79.000 Euro. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/toyota-bennstoffzellenauto-mirai-kostet-79-000-euro-/10981440.html

World of Energy Solutions 2017: Peter Sauber Agentur Messen und Kongresse GmbH (2017). Internationale Messe, Konferenz und Networking-Event. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.world-of-energy-solutions.de/

WoS 2017: Thomson Reuters (2017). Web of Science. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://apps.webofknowledge.com

Wuppertal Institut 2012: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (2012). Ökobilanzierung der Elektromobilität – Themen und Stand der Forschung. Teilbericht im Rahmen der Umweltbegleitforschung Elektromobilität im Förderschwerpunkt „Modellregionen Elektromobilität“. Von Ritthoff, M.; Schallaböck, K. O. Studie liegt vor

Zeit Online 2012: ZEIT ONLINE GmbH (2012). BMW-Chef Norbert Reithofer – „Da hilft keine Rumeierei“. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.zeit.de/2012/44/BMW-Norbert-Reithofer/komplettansicht

Zeit Online 2014-1: ZEIT ONLINE GmbH (2014). BMW i3 – Das neue Gesicht der Elektromobilität. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-02/elektroauto-bmw-i3-test/komplettansicht

Zeit Online 2014-2: ZEIT ONLINE GmbH (2014). Batterien – Die Deutschen forschen, das Ausland macht Geld damit. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-05/elektromobilitaet-foschung-batterien/komplettansicht

Zeit Online 2016-1: ZEIT ONLINE GmbH (2016). Elektromobilität: VW will eigene Batteriefabrik bauen. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.zeit.de/wirtschaft/unternehmen/2016-05/elektromobilitaet-volkswagen-salzgitter-elektroautos-investition-batteriefabrik

Zeit Online 2016-2: ZEIT ONLINE GmbH (2016). BMW: Bitte nicht so schnell. Zuletzt abgerufen am 22.07.2017 von der Webseite: http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/bmw-bitte-nicht-so-schnell-1.2909871

ZSW 2016: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) (2016). Presseinformation 05/2016 - Zahl der Elektroautos weltweit auf 1,3 Millionen gestiegen – Neue ZSW-Analyse: Produktion wächst 2015 um fast 70 % auf 550.000 Pkw / Stärkstes Wachstum in China. Publikation liegt vor

ZVEI 2012: ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (2012). Fünf offene Fragen und Antworten – Elektromobilität: Eine Positionsbestimmung. Von Korthauer, R.; Fischer, H.-M.; Funke, C. (alle ZVEI); Demmer, K.; Kann, G. (beide IKB Deutsche Industriebank AG); Brockmann, K. L. (KfW Bankengruppe). Publikation liegt vor

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Atmosphärisches CO_2, gemessen am Mauna Loa-Observatorium. ..5

Abbildung 2: Direkte und indirekte Treibhausgasemissionen nach Wirtschaftssektoren. 6

Abbildung 3: CO_2-Emissionen aus dem Verkehr. 7

Abbildung 4: Weltweiter Bestand von Elektrofahrzeugen. 10

Abbildung 5: Weltweite Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen. 10

Abbildung 6: Entwicklung des LIB-Zellbedarfs bis zum Jahr 2015 nach Fahrzeugkonzepten der Elektromobilität. 11

Abbildung 7: Entwicklung des LIB-Zellbedarfs bis zum Jahr 2015 kumuliert.....11

Abbildung 8: Grafische Illustration eines Systems.....18

Abbildung 9: Modell eines Nationalen Innovationssystems. 27

Abbildung 10: Visuelle Abgrenzung der verschiedenen Typen von Innovationssystemen. 35

Abbildung 11: Funktionen und Beispiele für Indikatoren, welche den Erfüllungsgrad einer Funktion in einem TIS reflektieren, pro Säule. 42

Abbildung 12: Das Schema zur Innovationssystemanalyse. 43

Abbildung 13: Übersicht der im Projekt LIB 2015-Roadmapping zur Erstellung geplanten und mit Stand von Januar 2016 veröffentlichten Roadmaps. 57

Abbildung 14: Die vollständige Ansicht der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2011 bis 2015.....60

Abbildung 15: Die vollständige Ansicht der Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2015 bis 2030.....61

Abbildung 16: Die vollständige Ansicht der Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2015 bis mittelfristig. 65

Abbildung 17: Die vollständige Ansicht der Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2020 bis 2030.....66

Abbildung 18: Die vollständige Ansicht der Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2015 bis mittelfristig. 70

Abbildung 19: Die vollständige Ansicht der Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030, 2020 bis über 2030 hinaus....71

Abbildung 20: Klassifizierung gängiger Energiespeichertechnologien. 73

Abbildung 21: Elektromobile Antriebskonzepte im Vergleich zum konventionellen Antrieb. 77

Abbildung 22: Key-Performance-Parameter aus Sicht der Kunden/OEM für BEV. 83

Abbildung 23: Spezifische Energie- und spezifische Leistungsdichten für ausgewählte Batterietechnologien. 86

Abbildung 24: Entwicklung einer Roadmap für Zelltechnologie 2015 bis 2030....88

Abbildung 25: Ausgewählte Eigenschaften verschiedener Antriebskonzepte. 98

Abbildung 26: Das Schema zur Innovationssystemanalyse in der vorliegenden Dissertation.....100

Abbildung 27: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 1980 und 1989 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen. 103

Abbildung 28: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 1990 und 1999 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen. 103

Abbildung 29: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 2000 und 2009 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen. 104

Abbildung 30: Transnationale Patentanmeldungen zu LIB zwischen 2010 und 2013 von Einzelerfindern und institution. Anmeldern, inkl. Ko-Patentierungen. 104

Abbildung 31: Das TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität. ..106

Abbildung 32: Marktanteile in den Teilmärkten im Jahr 2015. 109

Abbildung 33: Veränderung der Marktanteile in den Teilmärkten 2015-2017.....109

Abbildung 34: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio der Toyota Motor Corporation mit dem Ziel, sämtliche Nutzerprofile abzudecken. 121

Abbildung 35: Die Produkt-Strategie von Tesla Inc. 127

Abbildung 36: Die Produkt-Roadmap von Tesla Inc. aus dem Jahr 2011. 128

Abbildung 37: Die Produkt-Roadmap von Tesla Inc. aus dem Jahr 2013. 128

Abbildung 38: Die Roadmap zum Aufbau der Gigafactory von Tesla Inc. 130

Abbildung 39: Die Vision der BMW Group für nachhaltige Mobilität in verschiedenen Phasen. 135

Abbildung 40: Die Publikationen zu LIB im Allgemeinen (links) und zu Batterien für Elektrofahrzeuge im Besonderen (rechts). 152

Abbildung 41: Weltweite Verkaufsprognosen für PHEV/BEV in Millionen bis 2025. 152

Abbildung 42: Nominale und reale Entwicklung des Ölpreises von 1970 bis 2015. 155

Abbildung 43: Preisentwicklung für Brent-Rohöl in den letzten fünf Jahren.....155

Abbildung 44: Normierte gewichtete Bewertungsergebnisse zu Produktion und Handel von LIB-spezifischen Rohstoffen. 159

Abbildung 45: Geschätzte Kosten von Elektrofahrzeugbatterien bis zum Jahr 2020.....161

Abbildung 46: Kosten von Lithium-Ionen-Batteriesystemen in BEV. 161

Abbildung 47: Entwicklung der Zellkosten in Euro pro Kilowattstunde. 162

Abbildung 48: Umweltpolitische PKW-Regulierungsmaßnahmen im Ländervergleich. 164

Abbildung 49: Länderübersicht in Kategorie I und II von möglichen Marktanreizen. 165

Abbildung 50: Länderübersicht in Kategorie III und IV von möglichen Marktanreizen. 166

Abbildung 51: Überblick über die Fristen der Masterplanung. 170

Abbildung 52: Die Patente zu LIB im Allgemeinen (links) und zu Batterien für Elektrofahrzeuge im Besonderen (rechts). 172

Abbildung 53: Der Anteil der Unternehmenspublikationen (links) und der Unternehmenspatente (rechts) Publikationen und Patenten insgesamt. 172

Abbildung 54: Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von LIB-Zellen (Wh/kg). 173

Abbildung 55: Überblick über die Zielvorgaben bzgl. der Batterieparameter. 175

Abbildung 56: Abdeckung der Wertschöpfungskette (Kriterium mindestens 1 Prozent Marktanteil für xEV in 2015) 178

Abbildung 57: Leistungsparameter von in kommerziell verfügbaren BEV eingesetzten LIB-Zellen, einschließlich Zellchemien. 181

Abbildung 58: Leistungsparameter von in kommerziell verfügbaren PHEV eingesetzten LIB-Zellen, einschließlich Zellchemien. 181

Abbildung 59: Anforderungs- und Nutzungsprofile des Elektroantriebs. 182

Abbildung 60: Autoren internationaler Publikationen (Batterien für xEV; links) und internationale Erfinder von Patenten (Batterien für xEV; rechts). 191

Abbildung 61: Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen und Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladepunkte im Vergleich. 195

Abbildung 62: LIB-Zellproduktionskapazitäten in GWh für elektromobile und stationäre Anwendungen heute und Ausbau-Ankündigungen bis 2020 und 2025. 200

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der von verschiedenen Autoren als grundlegend identifizierten Funktionen von Innovationssystemen, die inhaltlich übereinstimmenden Funktionen sind farblich einheitlich gekennzeichnet.…41

Tabelle 2: Gekürzte Ergebnisliste auf die erste Abfrage. 46

Tabelle 3: Gekürzte Ergebnisliste auf die zweite Abfrage. 47

Tabelle 4: Analyse aller fünfzehn als relevant identifizierten Fallstudien entsprechend der drei Kriterien Hypothese, Ergebnis, Lesson learned.....48

Tabelle 5: Technologischer Überblick über die gängigen Zellkonfigurationen der Generation 1 und 2 von LIB.....90

Tabelle 6: Technologischer Überblick über die gängigen Zellkonfigurationen der Generation 3 und 4 von LIB.....91

Tabelle 7: Technologischer Überblick über die gängigen Zellkonfigurationen der Generation 5 von LIB. 92

Tabelle 8: Übersicht zur Analyse der Transnationalen Patentanmeldungen zu LIB zwischen 2010 und 2013.....105

Tabelle 9: Märkte für LIB-Zellen für PHEV und BEV nach Zellherstellern oder zeitweiligen Unternehmenszusammenschlüssen in Mio. USD.....110

Tabelle 10: Märkte für LIB-Zellen für HEV nach Zellherstellern in Mio. USD.....111

Tabelle 11: Die zehn marktführenden PHEV-Hersteller im Jahr 2015 plus Unternehmen aus Deutschland. 112

Tabelle 12: Die zehn marktführenden BEV-Hersteller im Jahr 2015, deutsche Unternehmen sind enthalten. 114

Tabelle 13: Aktuelle (gelb) und angekündigte (rot) Modelle der zehn marktführenden Elektrofahrzeughersteller im Jahr 2015 (sortiert nach verkauften Elektrofahrzeugen) plus Unternehmen aus Deutschland. 117

Tabelle 14: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio der Toyota Motor Corporation im Jahr 2015.....119

Tabelle 15: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio von Tesla Inc. im Jahr 2015. ..125

Tabelle 16: Geschäftszahlen von Tesla Inc. in den Jahren 2012 bis 2015 in Mio. USD 131

Tabelle 17: Das Elektrofahrzeug-Modellportfolio der BMW Group im Jahr 2015.....132

Tabelle 18: Die Funktionen eines TIS mit ihrer Erklärung und einem Beispiel aus dem TIS der Energiespeicher für die Elektromobilität. 141

Tabelle 19: Überblick über die Schwächen und Stärken des TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland entlang der sieben analysierten Funktionen. 211

Tabelle 20: Überblick über die Treiber (fördernde Schlüsselfaktoren) und Blockaden (hemmende Schlüsselfaktoren) im TIS rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität in Deutschland entlang der sieben analysierten Funktionen. 216

Tabelle 21: Ausführliche Ergebnisliste für die erste Abfrage. 235

Tabelle 22: Ausführliche Ergebnisliste auf die zweite Abfrage. 237

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Elektrofahrzeug mit reinem Batterieantrieb, engl. „battery electric vehicle“
bzw.	beziehungsweise
bzgl.	bezüglich
ca.	circa
engl.	englisch
etc.	et cetera
FCEV	Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug, engl. „fuel cell electric vehicle“
FuE	Forschung und Entwicklung
ggf.	gegebenenfalls
HEV	Hybridelektrisches Fahrzeug, engl. „hybrid electric vehicle“
JV	Zeitweilige Unternehmenszusammenschlüsse, engl. „joint venture“
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
PKW	Personenkraftwagen
PHEV	Plug-in-hybridelektrisches Fahrzeug, engl. „plug-in hybrid electric vehicle“
rd.	rund
REEV	Elektrofahrz. mit Reichweitenverl., engl. „range extended electric vehicle“
u. a.	unter anderem
USD	US-Dollar
xEV	Kategoriebezeichnung für Konzepte von Elektrofahrzeugen (engl. „electric vehicle“, Abkürzung EV) mit einem höher elektrifizierten, Batterie-basierten Antriebsstrang bzw. zumeist PHEV und BEV
z. B.	zum Beispiel

Eidesstattliche Versicherung

Anlage 2

Eidestattliche Versicherung

gemäß § 8 Absatz 2 Buchstabe b) der Promotionsordnung der Universität Hohenheim zum Dr. oec. Und Dr. rer. soc.

1. Bei der eingereichten Dissertation zum Thema

   Funktionale Dynamik von Technologischen Innovationssystemen im Bereich der Erneuerbaren Energietechnologien: Das Beispiel der weltweiten Durchsetzung von batteriebetriebenen Fahrzeugen und Plug-in-Hybridfahrzeugen

   handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.

2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner unzulässigen Hilfe Dritter bedient. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht.

3. Ich habe nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung oder -beratung in Anspruch genommen.

4. Die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und der strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt.

Die Richtigkeit der vorstehenden Erklärung bestätige ich. Ich versichere an Eides Statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erklärt und nichts verschwiegen habe.

_____ _____

Ort, Datum Unterschrift

Stand: 07/2015. Alle personenbezogenen Aussagen gelten stets für Frauen und Männer gleichermaßen. 5 I 8

Anlage 3

Eidesstattliche Versicherung

gemäß § 8 Absatz 2 Buchstabe b) der Promotionsordnung der Universität Hohenheim zum Dr. oec. und Dr. rer. soc.

Belehrung

Die Universität Hohenheim verlangt eine Eidesstattliche Versicherung über die Eigenständigkeit der erbrachten wissenschaftlichen Leistungen, um sich glaubhaft zu versichern, dass die Promovendin bzw. der Promovend die wissenschaftlichen Leistungen eigenständig erbracht hat.

Weil der Gesetzgeber der Eidesstattlichen Versicherung eine besondere Bedeutung beimisst und sie erhebliche Folgen haben kann, hat der Gesetzgeber die Abgabe einer falschen eidesstattlichen Versicherung unter Strafe gestellt. Bei vorsätzlicher (also wissentlicher) Abgabe einer falschen Erklärung droht eine Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder eine Geldstrafe.

Eine fahrlässige Abgabe (also Abgabe, obwohl Sie hätten erkennen müssen, dass die Erklärung nicht den Tatsachen entspricht) kann eine Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder eine Geldstrafe nach sich ziehen.

Die entsprechenden Strafvorschriften sind in § 156 StGB (falsche Versicherung an Eides Statt) und in § 161 StGB (Fahrlässiger Falscheid, fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt) wiedergegeben.

§156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

§161 StGB: Fahrlässiger Falscheid, fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt:

Absatz 1: Wenn eine der in den §§ 154 und 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

Absatz 2: Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Absätze 2 und 3 gelten entsprechend.

Ich habe die Belehrung zur Eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

_____ _____

Ort, Datum Unterschrift

Stand: 07/2015. Alle personenbezogenen Aussagen gelten stets für Frauen und Männer gleichermaßen. 6 I 8

Danksagung

Am Ende der Erstellung dieser Dissertation möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, deren fachliche oder moralische Unterstützung von unschätzbarem Wert war.

Ohne meinen Doktorvater und späteren Erstgutachter an der Universität Hohenheim, Herrn Prof. Dr. Alexander Gerybadze, und ohne die Übernahme meiner akademischen Betreuung als externem Doktorand an seinem Lehrstuhl wäre die vorliegende Dissertation nicht entstanden. Von ihm kamen zur Entwicklung, Definition und Abgrenzung des eigentlichen Themas äußerst hilfreiche Impulse, die er mir auch in den folgenden Jahren im Rahmen inspirierender Gespräche bis zur Fertigstellung der Dissertation gab.

Auch meinem Zweitgutachter, Herrn Prof. Dr. Rüdiger Hahn, möchte ich für seine Zeit danken, die er zur Prüfung meiner Dissertation und Abnahme meiner Verteidigung investiert hat. Komplettiert wurde die Prüfungskommission durch den Vorsitzenden, Herrn Prof. Dr. Andreas Pyka, der dieses Mandat kurzfristig angetragen bekommen und dankenswerter Weise äußerst spontan übernommen hat.

Danken möchte ich auch Herrn Dr. Malte Klein, der parallel zu mir ebenfalls Doktorand am Lehrstuhl von Herrn Prof. Dr. Alexander Gerybadze war. Im Rahmen einer Forschungskooperation haben wir uns die Grundlagen zur Innovationssystemforschung erarbeitet und dann auf die in unseren jeweiligen Dissertationen behandelten Technologien angewandt. Die Ergebnisse dieser fruchtbaren Kooperation haben wir veröffentlicht.

Am Fraunhofer ISI gebührt mein Dank Herrn Dr. Axel Thielmann, Stellvertretender Leiter des Competence Centers „Neue Technologien“. Zwischen ihm und mir entwickelte sich ein hervorragendes Arbeitsverhältnis, das mich in einer engen und vertrauensvollen Zusammenarbeit rund um die Energiespeicher für die Elektromobilität die gleichzeitige Entstehung und das rasante Wachstum einer Energiespeicher-Community nicht nur in Baden-Württemberg und Deutschland, sondern weltweit, verfolgen und in den folgenden Jahren das ganze Spannungsfeld mit all seinen Facetten zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft kennenlernen ließ. Wesentliche Inhalte der vorliegenden Dissertation gehen auf unseren Austausch von Ideen und Erfahrungen und z. B. über beobachtete Trends zurück.

Dank gebührt in diesem Kontext auch Herrn Dr. Thomas Reiß, Leiter des Competence Centers „Neue Technologien“, für seine fortlaufende Unterstützung, was zum Beispiel meine internationalen Aktivitäten, die Teilnahme an der KIC InnoEnergy PhD School, oder Reisen nach Brasilien und China z. B. für Interviews, Vorträge und Workshops anbelangte.

Explizit erwähnen möchte ich auch Herrn Prof. Dr. habil. Ralf Isenmann, der mit Herrn Dr. Axel Thielmann und mir aus unserer gemeinsamen Roadmapping-Projektarbeit heraus das Paper „Modularity in Roadmapping – Integrated foresight of technologies, products, applications, markets and society: The case of “Lithium Ion Battery LIB 2015” entwickelt hat und mich über den gesamten Prozess hinweg bis hin zur Veröffentlichung im Dezember 2017 im Journal for Technological Forecasting and Social Change unterstützte.

Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Karin Herrmann, die mir als erfahrene Assistentin zur Seite stand.

Weil ich an dieser Stelle bei weitem nicht alle Personen der Universität Hohenheim und des Fraunhofer ISI nennen kann, die zur Dissertationserstellung beigetragen haben, möchte ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls von Herrn Prof. Dr. Alexander Gerybadze an der Universität Hohenheim und des Fraunhofer ISI für die gute Zusammenarbeit danken, und insbesondere den anderen Doktoranden, die ein Stück des angesprochenen Weges mit mir geteilt haben, und auch den Praktikanten und Hilfswissenschaftlern, die ich betreuen durfte.

Eminent wichtig im Rahmen meiner Dissertationserstellung war auch immer der Austausch mit meiner Ehefrau, meiner Familie und insbesondere meiner Mutter sowie meinen Freunden. Ihr habt meinen Blick stets nach vorne gerichtet und euch den Glauben in mich und die Fertigstellung der Dissertation nie erschüttern lassen.

_____

Karlsruhe, im November 2018