

Ökonomische Bewertung der „Doppelernte“ von Getreidekörnern mit den Reststoffen Spreu und Stroh

Dissertation zur Erlangung des
Doktorgrades der Agrarwissenschaften (Dr. sc. agr.)

**Fakultät Agrarwissenschaften
Universität Hohenheim**

Institut für Agrartechnik

vorgelegt von
Jörg Ortmaier

aus Backnang
2021

Die vorliegende Arbeit wurde am 15.11.2021 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Dekan:	Prof. Dr. Ralf Vögele
Tag der mündlichen Prüfung:	05.09.2022
Leitung der Prüfung:	Prof. Dr. Martin Hasselmann
Berichterstatter, 1. Prüfer:	Prof. Dr. Karlheinz Köller
Mitberichterstatter, 2. Prüfer:	Prof. Dr. Heinrich Schüle
3. Prüfer:	Prof. Dr. Joachim Müller

Vorwort und Danksagung

Im Alter von etwa 15 Jahren war es mein Ziel, eine landwirtschaftliche Ausbildung zu absolvieren. Nun mit 30 Jahren habe ich meine Doktorarbeit fertig, was nicht mein Ziel war, aber durch die Leidenschaft zur Landwirtschaft begründet ist. Jedoch wäre es ohne die Unterstützung und Motivation meines Umfelds nicht so weit gekommen. Die fachliche Arbeit ist und bleibt für mich äußerst spannend, aber es sind die Menschen um mich herum, die die zurückliegende Zeit so wertvoll für mich gemacht haben und worüber ich sehr glücklich bin.

Speziell für diese Dissertation gebührt gleichermaßen großer Dank meinen Betreuern, Prof. Karlheinz Köller und Prof. Heinrich Schüle für die Motivation, die oftmals langen, ausufernden Gespräche und die Unterstützung vieler meiner Ideen über die Doktorarbeit hinaus. Die vergangenen Jahre der intensiven Zusammenarbeit waren eine große persönliche Bereicherung für mich.

Meinen Eltern Elke und Günter danke ich für alles in den vergangenen Jahren. Besonders aber, dass sie meinen damals eher unpopulären Ausbildungswunsch zum Landwirt als Grundlage für das (damals noch nicht in Erwägung gezogene) Studium und die Begeisterung für die Agrarwissenschaften bei allen Bedenken unterstützt haben.

Der Amazone-Stiftung, den Mitarbeitern und Juroren der Stiftung sowie der Familie Dreyer bin ich ebenfalls sehr dankbar für die Auszeichnung meiner Masterarbeit auf der Agritechnica 2017. Der Preis hat mich sehr motiviert und die interessanten Gespräche nach der Verleihung haben mich weiter inspiriert.

Der H. Wilhelm Schaumann-Stiftung danke ich für die schnelle und unkomplizierte finanzielle Unterstützung, die ich für Reisekosten und Demonstrationsversuche im Rahmen dieser Arbeit nutzen durfte. Diese Versuche konnten dankenswerter Weise bei Simon Rauch vom Energiepark Hahnennest durchgeführt werden, zusammen mit dem Lohnbetrieb der Gebrüder Deifel.

Vielen Dank an meinen Ausbilder Wolfgang Müller und Stephanie Franck von der Pflanzenzucht Oberlimpurg für die schöne und lehrreiche Zeit in meinem letzten Ausbildungsjahr.

Darüber hinaus bin ich dankbar, dass ich viele Menschen mit Vorbildcharakter für mich kennenlernen und mit ihnen arbeiten durfte. Dazu zählen u.a. Johann Rumpler, Rüdiger Klamroth und Johannes Munz. Außerdem sind damit alle Kolleginnen und Kollegen sowie Agrarwirtschaft-Professorinnen und Professoren der HfWU Nürtingen angesprochen, besonders aber Angelika Thomas und Prof. Jürgen Braun.

Meinen Freunden, die ich z.T. kenne seit ich denken kann, danke ich für die vielen schönen Momente und die Loyalität über so viele Jahre, ebenso wie meiner Familie und besonders meiner wundervollen Partnerin Annika.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	I
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
1.3 Vorgehensweise	5
2 Spreu und Stroh	6
2.1 Quantitative Einordnung der Spreu	8
2.2 Qualitative Einordnung von Spreu	9
2.3 Verwendung und Nutzungsmöglichkeiten	9
2.3.1 Futter und Einstreu	9
2.3.2 Biogassubstrat und Brennstoff.....	11
2.3.3 Bioökonomie und industrielle Verwendungen	12
2.4 Entwicklung der mechanisierten Getreideernte mit Fokus auf Spreu und Stroh.....	13
2.4.1 Die Häckseldrusch-Ernteverfahren	13
2.4.2 Das Mähdrusch-Ernteverfahren.....	14
2.4.3 Der Mähdrescher	15
2.4.4 Grenzen des Mähdruschs und Folgerungen.....	15
2.4.5 Entwicklung der Spreugewinnung	17
2.5 Aktueller Stand Spreu- und Strohernteverfahren	17
2.5.1 Ballenpressen als separates Verfahren.....	17
2.5.2 „Direct Bale“ – Verfahren.....	18
2.5.3 Spreusammelwagen oder Chaffcarts	19
2.5.4 Doppelernteverfahren – die Kompakternte	19
2.6 Wirtschaftlichkeit der Spreuernte	21
3 Material und Methoden	22
3.1 Einführung in die Berechnungsmethode	22
3.2 Hinterlegte Maschinendaten	23
3.2.1 Vorsatz- und Arbeitsgeräte	23
3.2.2 Hauptmaschinen mit Motorantrieb	25

3.2.3	Zusatzmaschinen.....	26
3.3	Modellierung Biomasseerträge und -volumina.....	27
3.3.1	Annahme und Begründung Strohertrag und -ernte	27
3.3.2	Annahme und Begründung Spreuerträge.....	28
3.3.3	Sonstige, allgemeine Annahmenbegründung	30
3.3.4	Zusammenfassung der Annahmen	32
3.4	Modellierung und Definition der Ernteverfahren.....	32
3.4.1	Praxisversuch Feldhäckseldrusch.....	34
3.4.2	Feldhäckseldrusch „FHD“	37
3.4.3	Mähdrescher Ernteverfahren „MD“	43
3.4.4	Kompakternteverfahren „KPE“	47
3.4.5	Ladewagen-Schwadernteverfahren „LDW“	52
3.4.6	Ährenstripper Ernteverfahren „Strip“	55
3.5	Erstellung der Verfahren in Excel	58
4	Ergebnisse und Vergleich.....	59
4.1	Investitionsausgaben	59
4.2	Einordnung der Investitionsausgaben	61
4.3	Ergebnisse der Mähdruschverfahren	63
4.4	Ergebnisse Kompakternte- und Feldhäckseldruschverfahren.....	67
4.5	Ergebnisse Ladewagen-Schwadernte und Ährenstripper	72
4.6	Vergleich mit Mähdrusch ohne Biomasseernte.....	74
4.7	Sensitivitätsanalyse	75
4.7.1	Veränderung Biomassepreis auf 40 €/t	76
4.7.2	Veränderung Biomassepreis auf 120 €/t	81
4.7.3	Veränderung Kornpreis	82
4.7.4	Veränderung Feldentfernung.....	84
5	Bewertung und Diskussion.....	88
5.1	Ladewagen-Schwadernteverfahren	88
5.1.1	Stationäre Separation LDW.....	91
5.1.2	Einfluss auf Bewirtschaftung und Nachhaltigkeit LDW	92
5.1.3	Abschließende Beurteilung LDW-Verfahren	96
5.2	Ährenstripper Ernteverfahren „Strip“	97
5.2.1	Stationäre Separation Ährenstripperernte	97
5.2.2	Einfluss auf Bewirtschaftung und Nachhaltigkeit Strip-Verfahren.....	98
5.2.3	Beurteilung Strip-Verfahren	99

5.3	Feldhäckseldrusch.....	100
5.3.1	Stationäre Separation FHD	101
5.3.2	Bewertung FHD	102
5.4	Kompakternteverfahren.....	102
5.4.1	Einfluss auf Bewirtschaftung und Nachhaltigkeit KPE	103
5.4.2	Stationäre Separation KPE.....	104
5.4.3	Beurteilung KPE	106
5.5	Mähdruschverfahren.....	106
5.6	Berechnungsmethodik, Annahmen und	
	Forschungsbedarf.....	107
5.7	Ausblick	109
6	Zusammenfassung.....	111
7	Summary	113
8	Literatur- und Bildquellenverzeichnis.....	115
9	Erklärung.....	125

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Bestandteile von Getreidepflanzen	7
Abbildung 2: Wasseraufnahmevermögen von Spreu in Prozent des Eigengewichtes	10
Abbildung 3: Kompakternte-Demonstrationsmaschine auf Basis eines Arcus Mäh- dreschers für die Korn-Spreu-Stroh-Ernte.....	20
Abbildung 4: Demonstration des Feldhäckseldruschs von Weizen mit moderner Technik – Claas Jaguar 840 mit Direktschneidwerk und großvolumiger Häckselwagen.....	34
Abbildung 5: Stationäre Trennung von Korn und Biomasse mit dem Mähdrescher zu Versuchszwecken.....	35
Abbildung 6: Siebabgang des stationären Mähdreschers.	36
Abbildung 7: Gutfluss im Feldhäcksler – das Erntegut (blau) wird gemäht, gehäckselt und gemeinsam in das Transportfahrzeug befördert.....	37
Abbildung 8: Gutströme im Mähdrescher mit Spreusammelwagen	44
Abbildung 9: Gutfluss des Kompakternters mit Beschriftung.....	48
Abbildung 10: Gutfluss der Erntegutaufnahme mit dem Ladewagen	53
Abbildung 11: Doppelernteverfahren für Getreidekörner und -spreu mit Ährenstripper am Traktor und Zwischenbunkerwagen	55
Abbildung 12: Investitionsausgaben der Ernteverfahren in Euro	59
Abbildung 13: Kostenstruktur und Vergleich der Mähdruschverfahren in €/ha	63
Abbildung 14: Gegenüberstellung der gesamten Kosten der Mähdruschverfahren in Gelb und den jeweiligen, monetären Leistungen aus der geernteten Nicht-Korn-Biomasse in Blau	64
Abbildung 15: Vergleich der gesamten, monetären Leistungen der MD-Verfahren und der erntekostenfreien Leistungen	66
Abbildung 16: Kostenstruktur und Vergleich verschiedener Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (KPE und FHD) in €/ha	67
Abbildung 17: Vergleich der monetären Leistungen aus der mitgeernteten Biomasse und der Gesamtkosten verschiedener Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (KPE und FHD) in €/ha	69
Abbildung 18: Vergleich der gesamten monetären Leistungen und die EKFL mehrerer Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (KPE und FHD) in €/ha.....	70
Abbildung 19: Vergleich der monetären Leistungen aus Nicht-Korn-Biomasse und den Kosten verschiedener Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (LDW und Strip) in €/ha.....	72
Abbildung 20: Vergleich der monetären Leistungen und EKFL mehrerer Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (LDW und Strip) in €/ha.....	73
Abbildung 21: Monetäre Biomasseleistungen und Verfahrenskosten bei vermindertem Biomassepreis in €/ha	76
Abbildung 22: Gesamte Leistungen und EKFL der Ernteverfahren in €/ha bei 40 €/t Biomassepreis.....	79

Abbildung 23: Gesamte Leistungen und EKFL der Ernteverfahren in €/ha bei 120 €/t Biomassepreis.....	81
Abbildung 24: Leistungen und EKFL bei Kornpreisen von 100 €/t.....	82
Abbildung 25: Leistungen und EKFL bei Kornpreisen von 300 €/t.....	83
Abbildung 26: Kostenstruktur in €/ha bei 5 km Feldentfernung	84
Abbildung 27: Kostenstruktur in €/ha bei 20 km Feldentfernung.....	85
Abbildung 28: Leistungen und EKFL bei 20 km Transportentfernung	86
Abbildung 29: Agrar-LKW mit Ladewagen	90
Abbildung 30: Korn-Spreu-Stroh-Gemisch beim Feldhäckseldrusch	101
Abbildung 31: Demonstration der Kompakternte-Separationseinheit, bestehend aus Siebband (rechts) und Windsichter.....	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorsatz- und Arbeitsgeräte mit zugehörigen Berechnungsparametern	23
Tabelle 2: Prozentuale Fahrgeschwindigkeitsreduktion in Abhängigkeit vom Kornertrag in t/ha	24
Tabelle 3: Ausschnitt hinterlegter Daten der Hauptmaschinen	25
Tabelle 4: Auflistung von Angaben zu Spreuerträgen jeweils mit Literaturquelle bzw. Autor	29
Tabelle 5: Angenommene Spreuerträge in Abhängigkeit vom Kornertrag.....	29
Tabelle 6: Die wesentlichen Annahmewerte und deren Bezeichnungen.....	32
Tabelle 7: Parameter und Annahmen für das gewählte Strukturszenario	33
Tabelle 8: Erntegutparameter verschiedener Optionen der Kompakternte.....	49
Tabelle 9: Strohanteile der vier KPE-Optionen und damit verbundene, errechnete Humusreproduktionskosten	51
Tabelle 10: Maschineneingabe mit Auswahlliste in das Berechnungsmodell	58
Tabelle 11: Mögliche Erlöse der CO ₂ -Speicherung in Abhängigkeit von CO ₂ -Preis und Art der Verwertung, nach vorhergehender Beschreibung und Quellen.....	95

Abkürzungsverzeichnis

ADF	Acid Detergent Fibre
AEK	Arbeitserledigungskosten
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	circa
cm	Zentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum (in Leipzig)
d.h.	das heißt
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
dt	Dezitonne
€	Euro
EKFL	erntekostenfreie Leistungen
etc.	et cetera
FAO	Food and Agricultural Organization
FHD	Feldhäckseldrusch
ggf.	gegebenenfalls
h	Stunde
ha	Hektar
HAFL	Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften
HfWU	Hochschule für Wirtschaft und Umwelt
inkl.	inklusive
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KPE	Kompakternte (-verfahren)
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LDW	Ladewagen (-ernteverfahren)
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft (Bayern)
LKW	Lastkraftwagen
LWF	Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (Bayern)
m	Meter

m ³	Kubikmeter
Ma.	Massenanteil
max.	maximal
MC	microbielle Carbonisierung
MD	Mähdrusch (-verfahren)
mg	Milligramm
Min.	Minuten
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarden
NAWARO	nachwachsende Rohstoffe
o.g.	oben genannt
o. J.	ohne Jahr
oTS	organische Trockensubstanz
u.a.	unter anderem
PKW	Personenkraftwagen
PS	Pferdestärken
S.	Seite
Std.	Stunde
Strip	Ährenstripper (-verfahren)
t	Tonne
TS	Trockensubstanz
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
v.a.	vor allem
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
%	Prozent

1 Einleitung

Die Landwirtschaft ist durch ihre kontinuierlichen und andauernden Produktivitätssteigerungen imstande, immer mehr Menschen zu ernähren. So konnte der prozentuale Anteil der hungern- den Menschen weltweit seit 1990 fast halbiert werden, auf unter 10 % (statista, 2021c). Dabei verdreifachte sich die Weltbevölkerung von etwa 2,53 Mrd. im Jahr 1950 auf etwa 7,79 Mrd. in 2020 (statista, 2020b) und der Fleischkonsum innerhalb dieses Zeitraums nahm stark zu (statista, 2020a) – mit dem sich daraus ergebenden, größeren Flächenbedarf je produzierter Einheit Energie und Eiweiß für die Humanernährung. Jedoch stellt sich immer öfter die Frage, wie lange das Monopol für die Welternährung bei den aktuellen Entwicklungen in der Ernäh- rungsbranche noch der Landwirtschaft zusteht. Denn Fleischersatzprodukte und In-Vitro Fleisch erfreuen sich schon jetzt großer Beliebtheit und steigenden Marktanteilen (Dierig, 2020). Molkereien sowie große Milcherzeuger beschäftigen sich mit Milchalternativen, Milcher- satz und mit der „künstlichen Produktion“ von Milch (Dürr, 2019). Hochwertige Sonderkulturen können schon jetzt unter kontrollierten Bedingungen in „Vertical Farming“-Anlagen erfolgreich angebaut werden und die Unternehmen SolarFoods (Finnland) und AirProtein (Kanada) stel- len Proteinpulver aus Luft her, das zum Verzehr geeignet sein soll (Pluta, 2019). Ergänzend können zunächst einfache Kohlenhydrate wie Zucker, ferner auch komplexere Kohlenhydrate wie Stärke künstlich aus atmosphärischem Kohlenstoff synthetisiert werden um den weltwei- ten Kalorienbedarf zu decken (Dinger und Platt, 2020).

Die ausgewählten Beispiele, mit denen sich Forschung, Start-ups, Investoren und große Le- bensmittelkonzerne derzeit beschäftigen, zeigen, dass die Nahrungsmittelherstellung zukünf- tig auch in Teilen ohne die Landwirtschaft erfolgen kann. Dennoch werden aufgrund der prog- nostizierten Zunahmen von Fleischkonsum um 76 % bis 2050 und Bevölkerungswachstum auf über 10 Mrd. Menschen vor 2100 weiterhin Produktivitätssteigerungen nötig sein, um den zu- nehmenden Bedarf landwirtschaftlicher Produkte decken zu können (statista, 2021d und sta- tista, 2021e). Zudem wird durch die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Rohstoffen davon ausgegangen, dass diese zunehmend durch nachwachsende Rohstoffe für die stoffliche und energetische Nutzung substituiert werden müssen (BMEL, 2021).

Zum Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen fordert das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: *„Ihr Anbau darf aber nicht zu Lasten der globalen Nahrungsmittelversor- gung gehen – daher zählen für das Bundeslandwirtschaftsministerium (BMEL) nachhaltige Konzepte: Möglichst viele Bestandteile einer Pflanze verarbeiten, biobasierte Produkte mehr- fach und in Kaskaden nutzen, erst danach zur Energiegewinnung einsetzen“* (BMEL, 2021).

1.1 Problemstellung

Basierend auf der zitierten Forderung des BMEL stellt sich besonders die konsequente Verwertung von Reststoffen der Getreideproduktion als Problem heraus. Bei diesen Reststoffen handelt es sich um Stroh und Spreu. Das Stroh wird bereits in einigen Fällen zumeist für die Tierhaltung in einem zusätzlichen Ernteschritt mit der sogenannten Ballenkette geborgen, wobei einerseits teils große Verluste auftreten und andererseits nicht von allen Flächen das Stroh geborgen wird. Die Spreu kann mit dem Mähdrusch bisher nur mit großem Aufwand geborgen werden und wird nach der Trennung vom Korn im Mähdröschler von diesem auf das Feld zurückgeführt und verteilt. Dabei kann die Spreu inhaltsstofflich sowie qualitativ hochwertiger als Stroh eingeordnet werden, u.a. aufgrund des niedrigeren Ligningehalts, wie es in den Kapiteln 2.2 und 2.3 näher erläutert wird. Zudem fällt Spreu jährlich in großen Mengen von mehreren Millionen Tonnen an, wie Kapitel 2.1 zeigt. In Summe resultiert daraus die Problemstellung, dass das Reststoffpotential der Getreideproduktion sowohl qualitativ als auch mengenmäßig nicht annähernd ausgeschöpft wird, zum Nachteil der Ressourceneffizienz.

Zurückzuführen ist dies auf das seit mehreren Dekaden eingesetzte Verfahren der Getreideernte und somit auf den Mähdröschler als etablierte Schlüsseltechnologie, die die wirtschaftliche Ernte der Reststoffe und insbesondere der Spreu bisher nicht flächendeckend ermöglicht. So stößt der Mähdröschler nach dem Ausdrusch und der Separation der Körner alle anderen Pflanzenbestandteile unter hohem Energieeinsatz wieder aus. Die gesamte Spreu und Anteile des Strohs können so trotz konzentrierter Schwadablage bisher nicht geerntet werden, ohne dafür großen Aufwand zu betreiben, wie z.B. energieintensives Ballenpressen oder eine zusätzliche Erntelogistikette, die im Falle des losen Spreutransports mit nur etwa 50 kg/m³ nicht ansatzweise die möglichen Nutzlasten ausschöpfen kann (vgl. Kapitel 2.4).

Durch die weit verbreitete Rückführung der Spreu auf die Getreidestoppeln ergeben sich weitere Herausforderungen für die gesamte Bewirtschaftung durch einzelne, in der Spreu enthaltene Bestandteile wie Unkrautsamen und Getreidekörner, die in der Reinigung des Mähdröschlers verloren gehen und als Erntegutverlust auf das Feld zurück gelangen. Wenn Samen und Körner unkontrolliert keimen und damit die Gefahr besteht, die nachfolgende Nutzpflanzenkultur im Wachstum zu stören, ist die Eindämmung der unerwünschten Pflanzen erforderlich (vgl. Dierauer, 2019). Diese Bekämpfung kann mechanisch durch mehrmalige Bodenbearbeitung erfolgen, wodurch die Samen und Körner zunächst zum Keimen angeregt und nach der Keimung in den Boden eingearbeitet werden. Jedoch wird durch die Intensivierung der Bodenbearbeitung u.a. das Bodenleben gestört oder die unerwünschte Bodenerosion gefördert (vgl. oekolandbau.de, 2020). Alternativ können chemische Pflanzenschutzmaßnahmen

durchgeführt werden, was aber z.B. wegen ökologischer Bedenken zunehmend in Frage gestellt wird (Umweltbundesamt, 2018).

Neben der potentiellen Erhöhung der monetären Leistungen pro Hektar in Form von Steigerungen der Reststoffqualität und Reststoffmenge können durch andere Ernteverfahren und Erntetechnologien der Aufwand und damit die Kosten sowohl für die Getreideernte als auch für die Bewirtschaftung der Folgekulturen reduziert werden (vgl. Kapitel 2.4.4). Die Vorzüglichkeit neuer Ernteverfahren ist dann im Besonderen gegeben, wenn die von Herlitzius (2013) erwarteten, überproportional höheren Kosten und Gewichte der selbstfahrenden Mähdrescher eintreten, die demnach für eine weitere Erhöhung von Produktivität und Kundennutzen anfallen.

Deshalb bieten sich sogenannte Doppelernteverfahren für die Ernte eines Gemischs aus Korn, Spreu und einem verfahrensabhängig mehr oder weniger flexibel hohen Anteil Stroh an, da sich dieses Erntegutgemisch selbst verdichtet und so nur eine Logistikkette erforderlich macht. Das Problem dabei ist jedoch, dass diese Logistikkette wesentlich größere Volumina bewegen muss, was die aktuelle Maschinenausstattung von landwirtschaftlichen Betrieben oft nicht zulässt. Anschließend müssen die Körner stationär aus dem Erntegut heraus separiert werden, um diese vermarkten zu können. Dabei ist eine besondere Herausforderung die Abtrennung des Strohs sowie die anschließende Lagerung und/oder Weiterverarbeitung der verschiedenen Fraktionen und die Nutzung im großen Maßstab. Denn die neuen Erntetechnologien können nur zum Einsatz kommen, sofern sich für die Landwirte Vorteile in vielschichtiger Weise ergeben. Dies wäre besonders die zusätzliche Wertschöpfung durch den neuen Rohstoff Spreu, was jedoch von Marktseite für die weitere Verwendung nachgefragt werden muss, oder der Landwirt muss eine eigene, innerbetriebliche Wertschöpfungsquelle integrieren, z.B. die Nutzung der Spreu in einer Biogasanlage, um ökonomische Vorteile für sich generieren zu können.

Bei der Gesamtproblematik der Reststoffnutzung darf der Boden nicht außen vor gelassen werden. Die Reststoffe, die mit Doppelernteverfahren geerntet werden können, stehen dem Boden nicht mehr zum Humuserhalt und -aufbau zur Verfügung. So ist in jedem Fall eine Systembetrachtung notwendig, die beginnend mit der Wirtschaftsweise des Betriebs inklusive Fruchtfolge und Kulturen, über die Lösungen für Logistik und Erntegutnachbereitung bis hin zur Verwendung der Reststoffe alle Punkte berücksichtigt, die von der Spreuernte positiv oder negativ beeinflusst werden.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Um die einleitend geforderte, konsequente Verwertung von landwirtschaftlichen Reststoffen zu ermöglichen, wird besonders der Reststoff Getreidespreu, aber auch das Stroh untersucht. Die Untersuchung ist weniger stofflich oder qualitativ, sondern die Gewinnung und Quantität des Reststoffs Spreu steht im Fokus. Begründet auf der bereits angesprochenen Notwendigkeit von Nahrungsmittel- und NAWARO-Produktionssteigerungen in den kommenden Jahrzehnten müssen Lösungen gefunden werden, die beiden genannten Produktionsrichtungen zuträglich sind. Die Spreu als Reststoff aus der Getreideproduktion für die Humanernährung ist dafür optimal geeignet.

So soll zunächst evaluiert werden, welche Maschinenkonzepte für die Doppelernte von Korn und Reststoffen eingesetzt werden können und welche technischen Modifikationen dafür notwendig sind. Darauf basierend werden die je nach Verfahren unterschiedlichen Ansprüche an Transport, Lagerung und Nacherntetechnologie zur Separation und Weiterverarbeitung betrachtet. Alle behandelten Ernteverfahren sollen mit den anfallenden Kosten in einem Berechnungsmodell dargestellt werden, um jedes Verfahren ökonomisch unter identischen strukturellen Bedingungen im Vergleich zum Mähdrusch als Referenzverfahren bewerten zu können.

Das Ziel der Arbeit ist es, die beiden aus der Problemstellung resultierenden, wesentlichen Forschungsfragen zu überprüfen. Erstens, in welcher Höhe durch den Einsatz von Doppelernteverfahren die erwartete, höhere Menge an Reststoffen pro Hektar geborgen werden kann und zu welchen höheren monetären Leistungen dies führt. Zweitens, ob und in welcher Intensität die prognostizierten, niedrigeren Kosten verschiedener Doppelernteverfahren im Vergleich zum Mähdruschverfahren eintreten. So sollen alle Kosten und Erlöse der Ernteverfahren berechnet werden, um die Verfahren einer vergleichenden, ökonomischen Bewertung zu unterziehen.

Um die Zielsetzung abzugrenzen, wird die Möglichkeit der im Vergleich zu Stroh höheren Erlöse der Spreuvermarktung aufgrund der höheren, inhaltsstofflichen Qualität nicht in die Berechnungen mit einbezogen. Ebenso werden die monetären Auswirkungen der Spreubergung auf die Bewirtschaftung der Folgekulturen nicht in den Berechnungen berücksichtigt. Begründet wird die Vernachlässigung dieser Punkte mit den zu erwartenden, sehr hohen regionalen Unterschieden was Spreuvermarktung und Auswirkungen auf die Bewirtschaftungskosten anbelangt. Diese lassen sich nicht ausreichend begründen oder monetär quantifizieren und die Ergebnisse könnten durch diese weiteren, volatilen Einflussfaktoren in ihrer Aussagekraft eingeschränkt werden.

1.3 Vorgehensweise

Nach der Beschreibung der Hintergründe in der Einleitung mit Problemstellung und der darauf aufbauenden Zielsetzung wird im Zusammenhang mit der Literaturrecherche zur Thematik im folgenden Kapitel 2 die Spreu als zentrales Element der Arbeit definiert, stofflich beschrieben, das Potential und die Verwendungsmöglichkeiten abgeschätzt sowie die Geschichte der Spreubergung und ihre Herausforderungen bis hin zum aktuellen Stand der Technik aufgezeigt.

Im Methodenteil werden zunächst Spreu- und Stroherträge, die Volumina der Erntegüter und die Verluste der verschiedenen Spreuerntemethoden als essentielle Berechnungsgrundlagen auf Basis von Literaturangaben und Annahmen modelliert. Anschließend werden die unterschiedlichen Verfahren detailliert hergeleitet, beschrieben und technologisch bewertet. Zuletzt werden Annahmen für mögliche Betriebsszenarien ausgewählt bevor die Vorgehensweise der Berechnungen erläutert wird.

Neben der theoretischen Auseinandersetzung in Form der Literaturrecherche und der Erstellung der Berechnungen, werden die dadurch erlangten Erkenntnisse in Fachgesprächen mit verschiedenen Akteuren geteilt und die im Gegenzug erhaltenen Einschätzungen der Experten in die weiteren Überlegungen aufgenommen. Dazu zählen besonders praktizierende Landwirte und mittelständische Landtechnikunternehmer, die verschiedene Aspekte der praktischen Anwendung der neuen Erntetechnologien beurteilen können. Zudem wurden Gespräche mit Vertretern von Ministerien durchgeführt und potentielle Abnehmer für die neuen Spreurohstoffe nach ihren Einschätzungen befragt. Auf Messen und Vortragsveranstaltungen konnten bei der Vorstellung der Thematik viele Eindrücke und Einschätzungen von Personen gewonnen werden, die sich zuvor nicht intensiv mit den Möglichkeiten der Doppelernte befasst haben.

Über die gesamte Bearbeitungszeit konnten zudem zwei von vier behandelten Doppelernteverfahren im praktischen Einsatz begutachtet werden. So wurde in der Ernte 2019 ein eigener Durchführungsversuch zur Demonstration des Feldhäckseldruschs mit anschließender, stationärer Ernteguttrennung durchgeführt und gleichzeitig Daten z.B. zu den Kornverlusten erhoben. Die Entwicklung des Kompakternteverfahrens wurde im kontinuierlichen, gegenseitigen Austausch begleitet. Ebenfalls 2019 fand zur Demonstration der Kompakternte ein Feldtag statt. Als Ergebnisse werden in Kapitel 4 die erntekostenfreien Leistungen vergleichend visualisiert, bewertet und im Anschluss diskutiert. Ein abschließender Ausblick soll zeigen, welche Vor- und Nachteile die Doppelernteverfahren langfristig mit sich bringen können, bevor die wesentlichen Elemente und Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst werden.

2 Spreu und Stroh

Die Spreu ist im deutschsprachigen Raum durch die Redewendung „die Spreu vom Weizen trennen“ bekannt. Gemeint ist damit, das Gute, für Menschen bekömmliche Getreidekorn, vom Schlechten, der weniger zur Humanernährung geeigneten Spreu, zu trennen. Die Spreu ist dem Sprichwort nach minderwertig gegenüber dem Korn. Nachfolgend sind verschiedene Definitionen aus unterschiedlichen Blickwinkeln zitiert.

Von Jeroch et al. (2008) werden Stroh und Spreu aus Sicht der Futtermittelkunde wie folgt beschrieben:

"Als Stroh werden die ausgewachsenen oberirdischen Teile verschiedener Kulturpflanzen (Getreide, Leguminosen, Ölfrüchte, Gräser) bezeichnet, deren Samen durch Dreschen entfernt wurden.

Die beim Druschvorgang ebenfalls anfallende Spreu (Spelzen, Schalen, Hülsen) bildet bei der heute üblichen Mähdreschertechnologie keinen eigenständigen Ernterückstand mehr. Der jährliche Strohanfall beläuft sich in Deutschland auf etwa 30 Mio. t, von dem derzeitig nur noch ein geringer Teil als Futtermittel verwendet wird" (Jeroch et al., 2008, S. 184).

Marti et al. teilen den folgenden Bestandteilen der Spreu nachstehende prozentuale Gewichtsanteile zu: Spelzen 64 %, Ährenanteile 6 %, Blätter und Stängelteile 24 %, Verlustkörner und Unkrautteile <4 %, (Marti et al., 2013).

Die beschriebenen Bestandteile sind in Abbildung 1 am Beispiel von Grannenweizen beschriftet. Ergänzt wurden die Grannen, die bei den in Deutschland verbreitetsten Weizensorten eine untergeordnete Rolle spielen. Es ist davon auszugehen, dass in der Beschreibung von Marti et al. die Knoten in den Stängelteilen beinhaltet sind.

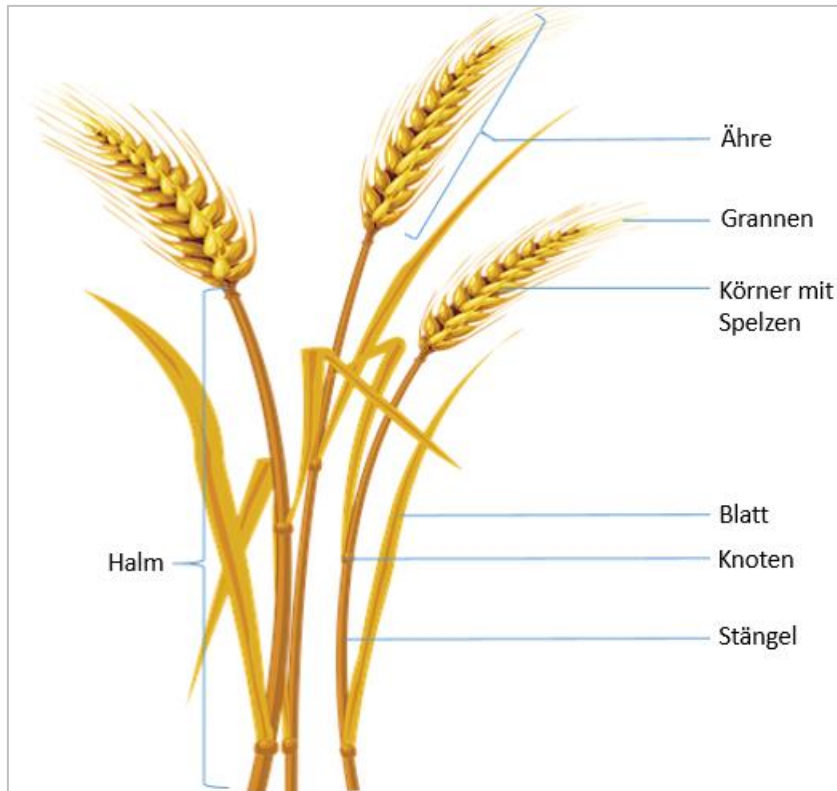


Abbildung 1: Bestandteile von Getreidepflanzen

Quelle: Verändert nach pixabay (2021)

Während die Spreu somit überwiegend aus feinen, brüchigen Bestandteilen besteht, sind die größeren Pflanzenteile des Halms wie Blätter und Stängel mit Knoten der Strohfraktion zuzuordnen.

Bei Spreu und Stroh wird im alltäglichen, landwirtschaftlichen Wortgebrauch und somit auch hier, der jeweilige Ernterest von voll- oder totreifem, geernteten Getreide angesprochen. Die Definition von Spreu geht für die vorliegende Arbeit mit verfahrenstechnischem Fokus jedoch über die bereits zitierten Definitionen hinaus. Denn selbst bei modernen Mähdruschern wird bei der Abscheidung der Spreu vom Korn ein je nach Druschbedingungen niedrigerer oder höherer einstelliger Prozentsatz der Körner mit der Spreu aus der Maschine ausgestoßen und landet wie die Spreu unwiederbringlich als Ernterest auf dem Acker. Außerdem sind in der Spreu auch Bruchkorn und Unkrautsamen enthalten. Für die vorliegende Arbeit ist die Spreu gleichzusetzen mit den gesamten Siebabgängen als Gutstrom des Mähdruschs bestehend aus Spelzen, Schalen, Hülsen, Grannen, Kurzstroh- und Feinstrohanteile, Staub, Verlustkorn sowie Bruchkorn, Schmachtkorn und Unkrautsamen (vgl. Dierauer, 2019; Marti et al., 2013; Siemens und Hulick, 2008; Jerock et al., 2008).

Die Betrachtung als technisch bedingter Gutstrom bedeutet auch, dass den genannten Bestandteilen keine festen Anteile wie bei Marti et al. zugewiesen werden können, sondern dass sich die Volumen- und Gewichtsanteile schon durch die Druschbedingungen ändern, wenn z.B. die Körnerverluste zunehmen. Je nach Erfassungs- und Betrachtungsmethode kommen so sehr hohe Schwankungen für Ertragsangaben von Spreu zustande. Die Erträge von Spreu liegen in Deutschland zwischen 1 und 2 t/ha. Die Spreu- und Stroherträge werden in Kapitel 3.3 für die Berechnungen in Abhängigkeit vom Getreideertrag detailliert auf Basis von Literaturangaben modelliert.

2.1 Quantitative Einordnung der Spreu

Die mengenmäßige Einordnung der jährlich als Nebenprodukt der Getreideproduktion anfallenden Spreu wird am Beispiel des Weizens vorgenommen, da zu diesem Getreide valide Literaturdaten vorliegen. Im Speziellen handelt es sich um die Daten zu den Hektarerträgen der Spreu, welche in Kapitel 3.3.2 behandelt werden. Dort wird auch begründet, wieso für die hier vorgenommene, quantitative Einordnung für Europa 1,5 t/ha angenommen werden und im weltweiten Durchschnitt 2 t/ha.

Die Weizenanbaufläche in Deutschland liegt in den vergangenen Jahren bei rund 3 Millionen Hektar (statista, 2021b). Bei dem angenommenen Hektarertrag von 1,5 t/ha Spreu besteht demnach ein Reststoffpotential von 4,5 Millionen Tonnen Spreu jährlich.

In Europa beträgt die Weizenanbaufläche rund 26 Millionen Hektar (statista, 2019). Bei 1,5 t/ha ergibt sich für Europa ein theoretisches Potential von 39 Millionen Tonnen Spreu pro Jahr.

Die weltweite Anbaufläche von Weizen beläuft sich auf etwa 222 Millionen Hektar (statista, 2021a). Durch die im globalen Durchschnitt höheren, durchschnittlichen Spreuerträge von angenommenen 2 t/ha beläuft sich das weltweite Potential der Weizenspreu auf 444 Millionen Tonnen jährlich.

Dabei sind die Reststoffe anderer Getreidearten und Feldfrüchte wie z.B. Raps, Mais oder Reis nicht berücksichtigt, die die Verfügbarkeit von Reststoffen weiter erhöhen können, wie auch die Bereitstellung zusätzlicher Reststoffe wie z.B. das Stroh der jeweiligen Nutzpflanzen. Da die Stroherträge im Getreide wesentlich höher sind als die Spreuerträge, kann das berechnete, verfügbare Reststoffpotential der Spreu mindestens verdreifacht werden, was in Kapitel 3.3.3 begründet wird.

2.2 Qualitative Einordnung von Spreu

Die Studie von Rumpler (2016) über Wertschöpfungsmöglichkeiten der Spreu beschreibt deren qualitative Eigenschaften im Vergleich zu Stroh.

„Grundsätzlich unterscheiden sich Spreu und Stroh nicht nur inhaltsstofflich, sondern auch hinsichtlich der Faserqualitäten und der äußeren Anhaftungen. Letzteres hat dann erheblichen Einfluss auf das vermahlene Produkt. Diese Unterschiede bestehen in gleicher Weise aber auch in den Stängeln und Halmen der Pflanzen selbst, das heißt die Qualitäten erhöhen sich von Ackerboden zum Fruchtstand hin signifikant“ (Rumpler, 2016).

Die zunehmende Biomassequalität zum Fruchtstand hin ist eine wichtige Erkenntnis, die die Überlegungen zu den Doppelernteverfahren fördern. Daher wird im weiteren Verlauf der Abhandlung regelmäßig auf diese Feststellung verwiesen.

2.3 Verwendung und Nutzungsmöglichkeiten

Die Verwendung der Spreu und deren Nutzungsmöglichkeiten können grundsätzlich in etwa vier Nutzungspfade unterteilt werden, wobei die Übergänge zumeist fließend sind. Die Nutzungspfade sind die innerbetriebliche Verwertung in der Landwirtschaft, Energieproduktion, Fasernutzung, Ausgangsstoff für Rohstoffe und Chemikalien und weitere bioökonomische Möglichkeiten. Zudem können verschiedene Nutzungspfade in einigen Beispielen mehrfach nacheinander durchlaufen werden, als sogenannte Kaskadennutzung. Aufgrund des Umfangs der Nutzungsmöglichkeiten kann darauf nicht im Detail eingegangen werden.

2.3.1 Futter und Einstreu

Wie bei der Nutzung von Stroh ist auch die Spreu grundsätzlich als Einstreu geeignet und kann mit betriebsüblicher Technik dafür genutzt werden. Besonders spricht für die Spreu, dass das Wasseraufnahmevermögen als sehr hoch eingestuft wird (Berger et al., 2010).

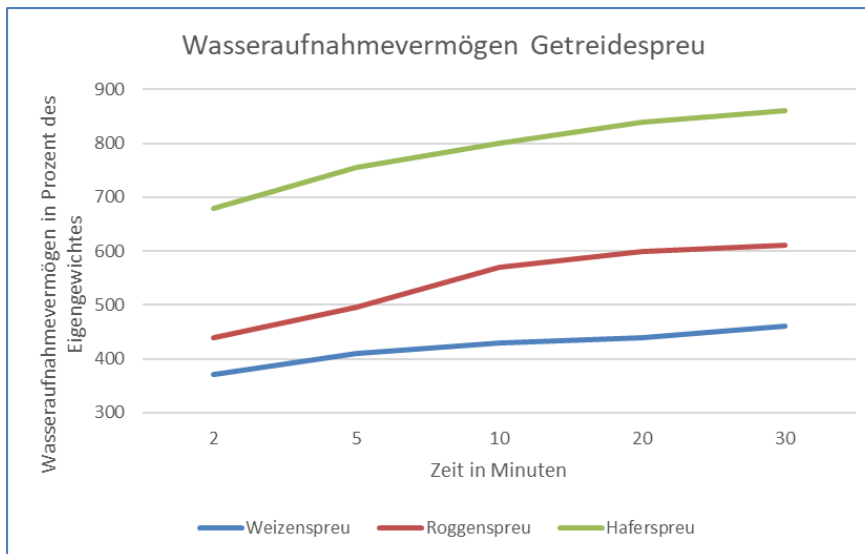


Abbildung 2: Wasseraufnahmevermögen von Spreu in Prozent des Eigengewichtes

Quelle: Eigene Darstellung nach Berger et al. (2010)

Abbildung 2 zeigt das Wasseraufnahmevermögen von Weizen-, Roggen- und Haferspreu in Prozent des Eigengewichts und in Abhängigkeit der Zeit, die in fünf Stufen zwischen 2 und 30 Minuten angegeben ist. Das größte Wasseraufnahmevermögen hat dabei die Haferspreu, gefolgt von Roggenspreu. Das niedrigere Wasseraufnahmevermögen der in Abbildung 2 dargestellten Weizenspreu von >450 % des Eigengewichts ist im Vergleich zu Stroh jedoch wesentlich höher als dessen Wasseraufnahmevermögen. Das Aufnahmevermögen beträgt bei gehäckseltem Stroh nur etwa 280 % des Eigengewichts (Zehner et al., 1986). Aus anderer Quelle wird der Spreu ebenfalls „eine wesentlich bessere Saugfähigkeit als Stroh“ bescheinigt (Dierauer, 2019).

Konkrete Beispiele für Spreu-Einstreu sind die Kälberhaltung oder Geflügelhaltung, um die für die Tiergesundheit problematischen Holzspäne zu substituieren. Zudem würde die Spreu in der Viehhaltung beim Einstreuen weniger Probleme in den Güllekanälen und bei deren Ausbringung verursachen (Berger et al., 2010).

Bei der Verwendung von Spreu als Futter für Nutztiere ist wie bei der Verwendung als Einstreu zunächst darauf zu achten, dass die Spreu von gesunden Pflanzenbeständen (v.a. frei von Mykotoxinen) stammt und trocken geerntet wurde (Rumpler, 2016).

Auf Grundlage der veröffentlichten Daten von McChartney et al. (2006) kann eingeschätzt werden, dass sich die Spreu vergleichsweise besser zu Futterzwecken eignet als Stroh. So ist am Beispiel von Weizen der Proteingehalt mit 6,1 % in der Spreu höher als die 4,3 % im Stroh. Zudem ist der Anteil von schwerer verdaulicher Zellulose und Lignin (ADF – acid detergent

fibre) in der Spreu mit 39,5 % niedriger als der Anteil im Stroh mit 47,1 %, was auf eine höhere Verdaulichkeit der Spreu schließen lässt.

Garmasch (1960) ordnet die Futtereignung der Spreu wie folgt ein:

„Die Vorzüge der Spreu gegenüber dem Stroh bei der Fütterung sind allgemein bekannt. Wer z.B. gehäckseltes Wintergetreidestroh anstelle der auf dem Felde verlorenen Spreu verwendet, ersetzt die Spreu durch Raufutter niedrigster Qualität“ (Garmasch, 1960).

Eine spätere Veröffentlichung aus Kanada bestätigt dies insofern, dass für das McLeod Ernteverfahren, einem vom Traktor gezogenen Mährescher für die Korn-Spreu-Ernte, ebenfalls die Spreu als Futter in der Rinderhaltung in seiner Wertigkeit mit Heu verglichen wird (Prentice et al., 1999).

2.3.2 Biogassubstrat und Brennstoff

In der Verwendung als Co-Substrat für landwirtschaftliche Biogasanlagen wird Spreu als „sehr wertvoll“ bezeichnet (Dierauer, 2019).

Wie im Beispiel der Fütterung ist für die Vergärung in der Biogasanlage ebenfalls davon auszugehen, dass die niedrigeren Zellulose- und Ligningehalte der Spreu vorteilhaft gegenüber Stroh sind. Außerdem ist durch die geringeren Partikelgrößen der Spreu von unter einem Zentimeter die „Angriffsfläche“ für den bakteriellen, biogenen Aufschluss im Verhältnis zum Gewicht größer, was eine schnellere und vollständigere Vergärung im Vergleich zu Stroh erwarten lässt.

„Die Gaserträge in Batch-Versuchen mit vorbehandeltem Stroh (optimalen Vergärungsbedingungen) erreichen mit ca. 230 - 270 (320) l Methan/kg oTS etwa 70 % des Gasertrages von Maissilage“ (Reinhold und Friedrich, 2012).

Darauf basierend können für die Spreu als Biogassubstrat höhere Methanerträge angenommen werden, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht detailliert beziffert werden können. Marti et al. beschreibt: *„aus 1 kg Spreu entstehen 1/3 m³ Gas (oder 0.5 kWh Energie)“* (Marti et al., 2013), was etwa 333 l/kg Spreu entspricht.

Bezüglich der Verwendung von Spreu als Brennstoff ist *„aus der thermischen Nutzung bekannt, dass Spreu durch wesentlich geringere Stoffanteile an Kalium und Chlor als typische Schlackebildner bessere Verbrennungseigenschaften als reines Stroh hat“* (Rumpler, 2016).

Dies wird von Abraham (2014) bestätigt, wobei im Detail auf die wichtigen Verbrennungsparameter eingegangen wird: *„Erste Forschungsergebnisse ergaben für Weizenspreu im Vergleich zu Weizenstroh eine höhere Ascheerweichungstemperatur (bei Spreu > 1.367 °C, Stroh mit 762 °C), einen niedrigeren Aschegehalt (Weizenspreu mit 9,3 Ma.-%, Weizenstroh 11,5 Ma.-*

%) sowie geringere Konzentrationen von Alkalien (z.B. Kalium 0,63 Ma.-% TS bei Spreu, 1,01 Ma.-% TS bei Stroh) und Chlor (Spreu 360-400 mg/kg TS, Stroh 1.900 mg/kg TS) bei ähnlichen Brennstoffumsetzungsgraden und Produktgasqualitäten, wodurch sich diese Reststoffe für die thermische Nutzung anbieten“ (Abraham, 2014).

Der Heizwert der Spreu beträgt nach Birth und Appelt (2016) etwa 14,56 MJ/kg Winterweizenspreu, bei Sommerweizenspreu sind es 15,31 MJ/kg, bei Gerste sind es 14,24 MJ/kg und der Heizwert von Rapsspreu beträgt in dieser Analyse 13,92 MJ/kg (Birth und Appelt, 2016).

2.3.3 Bioökonomie und industrielle Verwendungen

Nach der Definition der Bundesregierung umfasst der Begriff Bioökonomie *„die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen“* (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2020).

„Das Konzept der Bioökonomie umfasst danach alle Wirtschaftssektoren und ihre zugehörigen Dienstleistungsbereiche, die biogene (oder biotische) Rohstoffe – wie Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen und deren Produkte – erzeugen, be- und verarbeiten, nutzen oder damit handeln“ (BMEL, 2021).

Eine naheliegende Verwendung für die Spreu als Faserprodukt ist die reine Spreu selbst, die in aufbereiteter Form als Einblasdämmstoff genutzt werden kann. Ebenso ist es möglich, die Spreu als Dämmmaterial in modularen Wandbausystemen zu nutzen. Noch am Anfang steht die Verwendung von Pflanzenfasern für Kleidung, Verpackungen oder PKW-Innenverkleidungen, für die sich die Spreu als Rohstoff eignen kann (Rumpler, 2016).

Mittels Pyrolyse kann die Spreu zu Pflanzenkohle oder zu Koks gewandelt werden, so dass diese Produkte zur Düngung genutzt werden können. Phytomining, die Gewinnung von seltenen Erden oder Elementen wie Germanium über Nutzpflanzenbestandteile wie Spreu aus dem Boden ist *„wirtschaftlich hoch brisant“*, wenn die geförderten Materialien verwertbar gemacht werden. Ebenso können Spreu und Stroh zukünftig als Substitut zum Kohlenstoffträger Erdöl genutzt werden, einerseits in der Biochemie zur Erzeugung von Plattformchemikalien wie Bernsteinsäure, andererseits zur Herstellung von Biokraftstoffen wie z.B. Zellulose-Ethanol (Rumpler, 2016).

2.4 Entwicklung der mechanisierten Getreideernte mit Fokus auf Spreu und Stroh

Aufgrund des großen Umfangs der gesamten Geschichte der Getreideernte wird diese auf vollmechanisierte Ernteverfahren ohne Handarbeit eingeschränkt. Die Verfahren werden vorgestellt und erläutert, um in chronologischer Abfolge auf die heutigen Getreideernteverfahren inkl. Reststoffe (als weitere Einschränkung) überzuleiten. Das Kapitel soll lediglich einen Überblick über die Thematik der Ernteverfahren verschaffen ohne zu tief in die technischen Details einzuführen. Diese werden in den weiteren Kapiteln zielgerichtet erläutert.

2.4.1 Die Häckseldrusch-Ernteverfahren

Der Häckseldrusch ist eine Verbesserung und Weiterentwicklung des bis etwa 1950 traditionell angewandten Mähbinder-Verfahrens mit Einlagerung und Winterdrusch (Neumann, 1952). Dazu werden die gemähten Getreidebündel aufgestellt und in dieser Form eingefahren. So konnten die Bündel im Jahresverlauf nach Bedarf oder in der Winterzeit verarbeitet werden um Arbeitsspitzen abzufedern.

Im Vergleich zu diesem traditionellen Verfahren werden beim Häckseldrusch die gebundenen Getreidebündel nach der Ernte und dem Transport zum Hof mittels Schneid- oder Häckselgebläse und einer stationären Dreschanlage direkt weiterverarbeitet. Körner und die Reststoffe Spreu und Stroh sind somit voneinander getrennt und werden über Rohrleitungen mit Luftströmung eingelagert (Brenner, 1958 und Neumann, 1952).

Beim Häckseldruschverfahren wird das Erntegut nach dem Transport gehäckselt und voneinander getrennt eingelagert, der Winterdrusch entfällt dadurch. Somit ist eine negative Eigenschaft des (Hof-) Häckseldruschs, dass sich die Arbeitsspitze bei der Getreideernte weiter verschärfte, da die Weiterverarbeitung der Ernte nun vom arbeitsarmen Winter in die arbeitsintensive Erntezeit verlagert wurde. Dem konnte jedoch entgegengesetzt werden, dass die Getreidegarben nicht mehr ein- und ausgelagert werden mussten und so der Gesamtarbeitsaufwand niedriger war (Neumann, 1952).

Der Häckseldrusch konnte weiter vereinfacht dargestellt werden, indem der Mähbinder durch einen Feldhäcksler und vorhergehende Getreidemahd auf einen Schwad für den sogenannten Schwadhäckseldrusch ersetzt wurde (Brenner, 1958 und Neumann, 1952). Laut Brenner wurde der Schwadhäckseldrusch damals auf etwa 60 bis 80 Betrieben als Ernteverfahren eingesetzt.

Mit dem Schwadhäckseldrusch wird das Erntegut schütffähig ohne händisches Aufstellen des gebundenen Getreides eingebracht, direkt weiterverarbeitet und eingelagert. Durch die Kombination von Mähen und Häckseln wurde der Feldhäckseldrusch weiter verbessert und kann in dieser Form auch als Mähhäckseldrusch bezeichnet werden (Neumann, 1952). So wird der Mähhäckseldrusch nachfolgend gleichgesetzt mit dem Feldhäckseldrusch. Das Feldhäckseldruschverfahren kann ohne intensive Handarbeit wie bei den vorangegangenen Ernteverfahren bewerkstelligt werden. Spreu und Stroh konnten mit dem Verfahren gänzlich mitgeerntet und genutzt werden.

Problematische Punkte des Feldhäckseldruschs sind nach Brenner (1958), dass die hohe Erntegutvolumina ebenso große und gut geschlossene Anhängeraufbauten notwendig machen und die Anhänger oft gewechselt werden müssen. Zudem besteht Brandgefahr bei feuchter Einlagerung des Ernteguts durch Nacherwärmung.

Abschließend wird der Feldhäckseldrusch damals wie folgt ökonomisch eingeordnet:

„Beim Vergleich des beschriebenen Feldhäcksler-Ernteverfahrens für den gesamten biologischen Ertrag mit anderen Technologien hinsichtlich Arbeitsproduktivität und Kosten liegt es am günstigsten. Hinzu kommen die Vorteile bei Verwendung von Häckselstroh in der Innenwirtschaft“ (Buchmann, 1961).

2.4.2 Das Mähdrusch-Ernteverfahren

Den etwa 60 bis 80 Betrieben die zum damaligen Zeitpunkt das Schwadhäckseldrusch-Ernteverfahren angewandt haben, standen zur gleichen Zeit bereits rund 20.000 Maschinen, als Selbstfahrer oder vom Traktor gezogen, für den Mähdrusch im Bundesgebiet gegenüber. Gründe dafür sieht Brenner (1958) darin, dass mit dem Mähdruschverfahren auch bei schlechten Erntebedingungen die Ernte zuverlässig eingebracht werden kann und dass die Arbeitsspitze in der Ernte abgeflacht bzw. entzerrt wird, da zuerst das Korn und erst anschließend das Stroh geerntet wird. Zudem konnte die Stroh- und Spreuernte beim Mähdrusch gänzlich unterlassen werden (Brenner, 1958).

Neumann (1952) über das Mähdruschverfahren:

„Stroh- und Spreubergung erfordern einen starken Arbeits- und Maschinenaufwand. Die volle Ausnutzung der Ersparismöglichkeiten des Mähdreschers wird erst dann verwirklicht, wenn man bereit ist, allein das Korn zu bergen, die Spreu und das geschnittene Stroh aber einzuackern. Letzteres erscheint für unsere deutschen Verhältnisse befremdend“ (Neumann, 1952).

Neumann weiter zum Mähdrusch:

„Gebäude-, Maschinen- und Arbeitersparnisse, die durch Wegfall der gesamten Strohkette entstehen, rechtfertigen eine genauere Prüfung dieses Verfahrens. Eine große Kostenersparnis ergibt sich bereits dann, wenn nur die unbedingt notwendige Strohmenge geborgen wird“ (Neumann, 1952).

2.4.3 Der Mähdrescher

Der Mähdrescher besteht aus mehreren Baugruppen um das Erntegut zu verarbeiten. Mit Schneidwerk und Schrägförderer wird die Erntemasse vom Boden abgetrennt und dem Dreschwerk zugeführt. Dort werden die Körner ausgedroschen und zusätzlich mit den Hordenschüttlern vom Halm getrennt. Das abgesonderte Korn-Spreu-Gemisch wird von der Wind- und Siebreinigung voneinander getrennt. Die ausgedroschenen Körner werden im Mähdrescher in den Korntank befördert und die Reststoffe werden im hinteren Teil aus der Maschine ausgestoßen. Die Ausführung des Dreschwerks kann als Tangential- oder Axialdreschwerk ausgestaltet sein. Die wesentlichen Baugruppen (vgl. Estler und Keller, 1994) haben sich seit der Einführung des Mähdreschers lediglich in der Ausführung verändert, wie es sich anhand einer Veröffentlichung von Herbsthofer (1963) beispielhaft feststellen lässt.

Das Tangential-Dreschwerk ist dadurch gekennzeichnet, dass es quer zur Fahrtrichtung des Mähdreschers eingebaut ist. Da die Abscheidefläche unterhalb der Dreschtrommel für die vollständige Kornabscheidung zu gering ist, wird die Restkornabscheidung mit den Strohschüttlern durchgeführt. Das Axial-Dreschwerk ist hingegen längs in den Mähdrescher eingebaut und besitzt eine größere aktive Abscheidefläche durch die Rotation des Rotors, wodurch die Restkörner ausreichend abgeschieden werden. In den vergangenen Jahren ist der Trend hin zu Axialdreschwerken zu beobachten, da diese mit bis zu zwei Axialrotoren die höchsten Druschleistungen von bis zu 100 t/h aufweisen (Wilmer, 2020).

2.4.4 Grenzen des Mähdruschs und Folgerungen

Die Grenzen und Defizite des Mähdruschverfahrens und die davon abgeleiteten Folgerungen sind bereits aus der Anfangszeit des Mähdruschs bekannt. Die nachfolgenden Erkenntnisse von Buchmann (1961) und Garmasch (1960) haben zumeist noch immer Gültigkeit.

So beschreibt Buchmann (1961), dass Ernte mit dem Mähdrescher am rationellsten ist, wenn lediglich das Korn geerntet wird. Schon damals wird jedoch von Landwirten gefordert, das gesamte Erntegut zu ernten, was zu wesentlich höherem Aufwand und zur Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens führt. Dies wird auf die Komplexität der Maschine zurückgeführt. Als Hauptmängel des Mähdreschers werden der Bodendruck und der hohe Energieaufwand genannt. Außerdem der hohe Arbeitskraftbedarf für die Ernte der Körner und der

Reststoffe sowie die hohen Aufwendungen für den getrennten Transport inklusive der Be- und Entladevorgänge der drei Erntegüter Korn, Spreu und Stroh. Von diesen Erkenntnissen leitet Buchmann (1961) Forderungen an ein neues Ernteverfahren ab.

„Eine möglichst einfache, jedoch leistungsfähige Erntemaschine, die das gesamte Erntegut in einer für den Transport günstigen Form liefert und auch gleichzeitig auf den Wagen befördert.

Transportfahrzeuge mit großer Ladekapazität, die sich schnell entleeren lassen.

Eine möglichst automatisierte Trenn-, Reinigungs-, Trocknungs- und Förderanlage am Verbrauchsort von Stroh und Spreu. Das Ziel muß dabei sein, unangenehme körperliche Arbeit auszuschalten, so daß die Bedienungspersonen nur die Maschinen und Anlagen zu lenken und zu überwachen haben“ (Buchmann, 1961).

Die zitierten Forderungen zielen damals besonders auf den Feldhäckseldrusch als alternatives Getreideernteverfahren ab. Auch andere Autoren haben zu jener Zeit Vorschläge unterbreitet um die Getreideernte mit angepassten Verfahren zu optimieren. So werden die von Buchmann beschriebenen Defizite des Mähdruschs auch von Garmasch (1960) bemängelt, der ebenfalls den Vorschlag unterbreitet, Korn und Spreu gemeinsam zu transportieren und seine Erwartungen an neue Ernteverfahren für die Ganzpflanzenernte formuliert.

„Wenn das Getreide nicht mehr auf dem Felde gereinigt wird, ergeben sich folgende Vorteile:

- 1. Der Mechanisierungsgrad und die Arbeitsproduktivität aller Erntevorgänge werden erhöht.*
- 2. Es werden einfache, zuverlässige, billige und hochleistungsfähige Ernte- und Aufbereitungsmaschinen geschaffen.*
- 3. Die Korn- und Spreuverluste werden auf ein Minimum gesenkt; die Verunkrautung wird wirkungsvoll bekämpft und verschiedene agrotechnische und wirtschaftliche Forderungen werden besser erfüllt.*
- 4. Die Strohhäckselung zu Futterzwecken entfällt, weil dafür genügend Spreu zur Verfügung stehen wird.*
- 5. Gewicht und Energiebedarf der für die Getreideernte erforderlichen Maschinen werden merklich gesenkt“ (Garmasch, 1960).*

Auch die von Garmasch (1960) zitierten Ausführungen haben nicht an Bedeutung verloren. An Stelle der Strohhäckselung, die sich nicht langfristig durchgesetzt hat, kann stattdessen die Strohballenernte genannt werden, jedoch hat Stroh in der Fütterung zunehmend an Bedeutung verloren.

2.4.5 Entwicklung der Spreugewinnung

Die geschichtliche Entwicklung der Spreusammlung von Marti et al. (2013) zeigt mit Ausnahme des McLeod-Ernteverfahrens, einem gezogenen Mähdrescher ohne Kornreinigung für die Ernte eines Korn-Spreu-Gemischs aus Kanada, ausschließlich Lösungen, die auf dem Mähdrusch und der gesonderten Spreuernte basieren. Für die separate Spreubergung mit dem Mähdrescher sind großvolumige Auffangbehälter notwendig, teils mit eigenem Fahrwerk als Anhänger. Nach der Ernte auf dem Feld wird für die separierte Spreu eine zusätzliche Logistikkette erforderlich. Das McLeod-Verfahren für die Korn-Spreu-Ernte kann dem gegenüber als vereinfachendes Verfahren eingeordnet werden, da hier nur eine Logistikkette benötigt wird (vgl. McLeod Harvest, o. J.). Jedoch erfordert dies die Trennung von Korn und Spreu in einer stationären Anlage. In der Praxis hat das McLeod-Verfahren heute keine Bedeutung mehr (Rumpler, 2002). Marti et al. (2013) zeigt mit dem sowjetischen Rostselmash SK-4 und dem Bunkersystem HAFL (ehemals Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, heute BFH, Berner Fachhochschule) auf den Mähdrescher aufgebaute Lösungen zur Spreuernte. Außerdem hat die HAFL ein System entworfen, mit dem die Spreu auf dem Schwad abgelegt werden kann, um diese mit der nachfolgenden Ballenpresse aufnehmen zu können. An den Mähdrescher angehängte Spreuwagen sind von Claas und Redekop zu sehen. Die gezeigten Verfahren werden bisher nicht flächendeckend eingesetzt.

2.5 Aktueller Stand Spreu- und Strohernteverfahren

Ähnlich der geschichtlichen Entwicklung sollen die nachfolgenden aktuellen Verfahren lediglich einen einführenden Überblick über die Möglichkeiten der Spreu- und Strohernte aufzeigen. Das mobile Pelletieren der Reststoffe wird dabei nicht berücksichtigt. Die in der Arbeit behandelten Verfahren werden ab Kapitel 3.4 detailliert ausgewählt, definiert und beschrieben. Die Bedeutung und Dominanz des Mähdreschers wird nicht gesondert behandelt, sondern als gegeben und bekannt vorausgesetzt.

2.5.1 Ballenpressen als separates Verfahren

Für die Strohbergung ist die Strohballenernte mittels Quader- und Rundballenpressen das dominierende Verfahren. Es existiert derzeit kein anderes Verfahren zur Strohernte. Dies zeigen die VDMA-Verkaufszahlen von Ballenpressen in Deutschland mit über 2000 Einheiten insgesamt in der Saison 2012/2013 (Hünefeld, 2013). Es wird vermutet, dass darunter nur wenige Exemplare ausschließlich für den Einsatz als Grünlanderntemaschine angeschafft wurden, für die sich die Ballenpressen ebenfalls eignen, wodurch die jährliche Auslastung erhöht werden kann.

Für das gesamte Verfahren der Strohballenerntekette sind zusätzlich zum Mähdrusch folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Stroh pressen
- Strohballen aufladen
- Strohballen separat transportieren
- Strohballen abladen und einlagern
- Strohballen auslagern und zur Verwendung auflösen

Für die zusätzliche Spreuernte bietet der Hersteller „Thierart“ aus Frankreich die HAFL Lösung kommerziell an, um Spreu auf dem Strohschwad zu platzieren und damit in die Strohernte zu integrieren (ETS Thierart, 2021a). Bei der Aufnahme des Strohs mit der Ballenpresse können hohe Verluste auftreten. Zudem kann das Stroh durch die zwischenzeitliche Ablage auf dem Ackerboden mit Erde verunreinigt werden. Die Einrichtung zur Spreuablage auf dem Schwad beinhaltet ein Gebläse und Rohrleitungen. Mit dieser Technik wird die im Nachgang mit der Ballenpresse geerntete Biomasse inhaltsstofflich aufgewertet und die Erntemenge erhöht.

2.5.2 „Direct Bale“ – Verfahren

Das Direct Bale Verfahren beugt den bei der Schwadablage kritischen Punkten wie Verschmutzung und Verluste vor. Das Verfahren wird überwiegend in Australien auf großen Flächen mit niedrigen Erträgen eingesetzt. Für die Direct-Bale Ernte ist eine Quaderballenpresse an einen Mähdrescher angeschlossen, wodurch die gesamte vom Drescher ausgestoßene Biomasse aufgefangen und nahezu verlustfrei ohne Bodenkontakt an die Presse übergeben wird. Diese verarbeitet das eingeführte Spreu-Stroh-Gemisch direkt zu Großballen. Laut Videobeschreibung des Herstellers ist dieses Gerät jedoch nicht mehr erhältlich (GK Machine, 2021).

In Kombination mit einem Ballensammelwagen am Traktor kann die Strohballenernte gegenüber der zuvor beschriebenen Variante vereinfacht werden:

- Stroh pressen (am Drescher ohne zusätzlichen Traktor)
- Strohballen aufladen, transportieren, abladen und einlagern (3 in 1)
- Strohballen auslagern und zur Verwendung auflösen

Ballensammelwagen gibt es sowohl für Rund- als auch für Quaderballen, z.B. vom kanadischen Hersteller Anderson (vgl. Anderson Trailers, 2021). Mit den Ballensammelwagen lässt sich die Strohballenernte rationalisieren, da Teile der Stückgutlogistik vereinfacht werden.

Der auf die Spreuernte spezialisierte Hersteller von Maschinenmodifikationen ETS Thierart hat das Direct-Bale Verfahren zum Zweck der Spreugewinnung getestet, wie aus einem Video des

Herstellers hervorgeht (ETS Thierart, 2021c). Jedoch befindet sich auch die darin gezeigte Maschinenkombination heute nicht mehr im Produktportfolio des Anbieters.

2.5.3 Spreusammelwagen oder Chaffcarts

Spreusammelwagen oder Spreubunker sind nur vereinzelt im Einsatz in Europa vorzufinden. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass die Spreu am Feldrand auf den Boden gekippt und dann von anderen Maschinen wie Ballenpressen oder Radladern wieder aufgenommen werden muss, was sich als schwierig erweist. In Australien werden die dort als Chaffcarts bezeichneten Anhänger nicht zur Spreuernte, jedoch zur Konzentrierung der Spreu und v.a. der darin enthaltenen Unkrautsamen am Feldrand genutzt. Diese können dann verbrannt und damit unschädlich gemacht werden (Benjamin, 2014).

In Frankreich gibt es vom bereits erwähnten Hersteller Thierart einen Spreuwagen mit Überladeeinrichtung, die es ermöglicht die gesammelte Spreu während der Fahrt an ein Transportfahrzeug zu übergeben. Bodenkontakt und Aufnahmeverluste der Spreu am Feldrand werden so vermieden (ETS Thierart, 2021b). Die Lösung würde sich auch für die Ernte von Körnermaisspindeln eignen oder es könnte loses, gehäckseltes Stroh im gewünschten Maße aus dem Mähdrescher mit zur Spreu dosiert werden, um die geerntete Biomassemenge zu erhöhen.

In der Türkei gibt es einige Firmen, die Modifikationen für das Mähdrescherheck anbieten. Damit werden Spreu und Stroh gehäckselst und auf einen gezogenen Anhänger befördert. Ist dieser Anhänger voll, wird er getauscht bzw. umgehängt (vgl. Çınarlar patoz, 2021).

2.5.4 Doppelernteverfahren – die Kompakternte

Als Doppelernteverfahren werden in der Arbeit alle Verfahren definiert, bei denen das Haupterntegut (Körner) und Erntenebenprodukte (Reststoffe wie Spreu und Stroh) gemeinsam als Gemisch geerntet und transportiert werden. Dazu zählen der bereits erwähnte Feldhäckseldrusch aber auch das Kompakternteverfahren.



Abbildung 3: Kompakternte-Demonstrationsmaschine auf Basis eines Arcus Mähdreschers für die Korn-Spreu-Stroh-Ernte

Foto: Eigen, am 25.07.2019

Der Kompakternte in Abbildung 3 ähnelt in der grundsätzlichen Funktionsweise dem Mähdrescher. Das Erntegut wird abgemäht und ausgedroschen. Im Gegensatz zum Standardmähdrescher besitzt die Kompakterntemaschine jedoch keine Reinigungseinheit, um Korn und Spreu voneinander zu trennen. Stattdessen wird das Korn-Spreu-Gemisch geerntet, dem je nach individuellem Bedarf ein variabler Anteil des ausgedroschenen Strohs in gehäckselter Form hinzudosiert werden kann. So ist es einerseits möglich, lediglich Korn und Spreu im Gemisch zu ernten und das gesamte Stroh zurück auf das Feld zu befördern. Im anderen Extremfall kann die gesamte in die Maschine beförderte Strohmasse mitgeerntet werden. Der Anteil ist beliebig einstellbar, wodurch das Verfahren eine hohe Flexibilität bezogen auf Erntemenge der Biomasse, Qualität, Humuserhalt und Transportwürdigkeit aufweist, wie bereits in der zitierten Literatur gefordert (Rumpler und Rudolph, 2016).

Das Kompakternteverfahren befindet sich in der Entwicklung und wird derzeit noch nicht kommerziell eingesetzt. In der Abbildung ist die Demonstrationsmaschine des Kompakternteverfahrens als „Vorgänger“ für einen im Bau befindlichen Prototypen zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, wie das Korn-Spreu-Stroh-Gemisch auf den angehängten Wagen befördert wird. In dieser Demonstration wurden etwa 30 % des Strohs mitgeerntet. Die verbleibenden 70 % des Strohs werden gut ersichtlich in gehäckselter Form mittig aus beiden Seiten der Maschine

ausgestoßen. Nach der Ernte erfolgen der Transport und die stationäre Separation von Korn und Biomasse (Agronym e.V. und Scholta, 2019).

Ohne Reinigungseinheit ist die Maschine leichter und verursacht geringere Verluste als der Mähdrusch. Dabei ist eine großvolumige Transportkette erforderlich. Durch die lediglich einmalige Überfahrt wird der Boden geschont und die von der Maschine aufgenommenen Unkrautsamen werden mit dem Erntegut vom Feld entfernt (Rumpler und Rudolph, 2016).

2.6 Wirtschaftlichkeit der Spreuernte

Nach der Untersuchung von Olfert et al. in 50 landwirtschaftlichen Betrieben in Saskatchewan, Kanada, ist die Spreuernte eine Möglichkeit zur wirtschaftlichen Bereitstellung von Futter für Wiederkäuer. Je nach Ernteverfahren erstrecken sich die Kosten für die Spreubergung von 15,1 bis 33,2 Dollar pro Tonne Spreu (Olfert et al., 1991).

Unger und Glasner (2019) haben vier Verfahren der Spreuernte auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht. Die Kosten pro Tonne Spreu belaufen sich je nach Verfahren auf 62,94 bis 208,53 €/t. Den potentiellen Erlösen gegenübergestellt sind die Verfahren mit Spreuwagen nicht wirtschaftlich, da die Bergelkosten höher sind als die möglichen Erlöse. Mit dem Kompakternteverfahren sind etwa 110 €/t Gewinn möglich (Unger und Glasner, 2019).

Der Erfinder des Kompakternteverfahrens stellt 2010 in Aussicht, dass die konsequente betriebliche Umstellung auf das Kompakternteverfahren ersten Annahmen zufolge einen monetären Mehrerlös von 150 €/ha einbringen kann (Rumpler, 2010). Die in Kapitel 2.5.3 vorgestellten Spreuerntelösungen des französischen Herstellers Thierart zeigen nach Abzug der Erntekosten, die der Spreu zugeschrieben werden können, Mehrerlöse im Falle der Spreuernte. Im Detail sind es 39,40 €/ha Vorteil bei Nutzung des Spreusammelwagens und 25,86 €/ha zusätzlich, wenn die Spreu auf das Strohschwad abgelegt und zusammen mit der Strohhallenkette geborgen wird (Suardi et al., 2020b).

Die Literaturangaben zur Wirtschaftlichkeit der Spreuernte mit angehängtem Sammelwagen sind demnach widersprüchlich, was mit großer Wahrscheinlichkeit auf die sehr unterschiedlichen Standorte und Erhebungsbedingungen der Daten zurückzuführen ist. Das Kompakternteverfahren zeigt eine einheitliche Tendenz zu deutlichen Mehrerlösen.

Die Bergungskosten von Stroh sind in KTBL (2021) für verschiedene Verfahren und Betriebsstrukturen dargestellt. Bei einem Strohertrag von 4 t/ha, 2 ha Feldgröße und 2 km Hof-Feldentfernung liegen die Bergungskosten von Ballen mit 1,5 m Durchmesser bei etwa 45 €/ha für das Pressen und weiteren 30 €/ha für den Transport der Strohhallen (KTBL, 2021, S. 194).

3 Material und Methoden

Die grundsätzliche methodische Vorgehensweise ist aufgrund der neu entwickelten Berechnungsform und der Vielzahl der möglichen Variablen und Verfahren vergleichsweise komplex und umfangreich. Daher wird für das Verständnis der methodischen Erläuterung zunächst ein einführender Überblick in die Berechnungen gegeben.

3.1 Einführung in die Berechnungsmethode

Die Berechnungen beinhalten einen Vergleich zwischen Mähdruschverfahren und Doppelernteverfahren. Das Berechnungsmodell ist so aufgebaut, dass wesentliche Punkte der Kostenbeeinflussung wie u.a. die Feldlänge und -breite sowie Transportentfernungen angepasst werden können. Mit diesen Daten sowie mit Maschinendaten wie Arbeitsbreite und -geschwindigkeit, wird zunächst die Flächenleistung des Ernteverfahrens berechnet, d.h. wie viel Zeit pro Feld inklusive aller Rüst- und Verlustzeiten benötigt wird und welche Kosten dies mit sich bringt. Mit angenommenen Erträgen und den darauf basierenden, modellierten Erntegutgewichten und -volumina wird unter Einbeziehung der Transportstrecke der Bedarf an Transportfahrzeugen inklusive Kosten ermittelt. Diese Berechnungen werden in einer ersten Berechnungsstufe für den primären Arbeitsgang wie Mähdrusch und Abtransport durchgeführt und in einer zweiten Berechnungsstufe für den anschließenden Arbeitsgang wie Ballenpressen und Ballentransport oder die stationäre Erntegutnachbereitung bei Doppelernteverfahren. Alle anfallenden Kosten pro Feld werden zunächst addiert und dann zur Vergleichbarkeit auf die Einheitsgröße von einem Hektar umgelegt.

Da sich das eingesetzte Ernteverfahren nicht nur auf die Kosten, sondern auch auf die Erlöse aus Korn und Biomasse auswirkt, wird den Kosten die Wertschöpfung, d.h. Ertrag pro Hektar \times Preis, jeweils für Korn und Biomasse und anschließende Addition beider, des jeweiligen Ernteverfahrens gegenübergestellt. Dazu werden die Verluste der einzelnen Verfahren modelliert und die bereits angedeuteten Biomasseertragsmodellierungen miteinbezogen.

So werden die erntekostenfreien Leistungen (EKFL) je Hektar ermittelt, d.h. der gesamte monetäre Erlös pro Hektar abzüglich der gesamten Erntekosten pro Hektar. Je größer dieser Wert ist, desto besser ist dies für den Landwirt, da ihm dieser Betrag zur Deckung aller anderen Produktionskosten zur Verfügung steht. Je mehr Biomasse vom Feld geerntet wird, desto höhere zusätzliche Kosten für die Humusreproduktion werden dem jeweiligen Verfahren angelastet, die langfristig nicht vernachlässigt werden dürfen.

Alle Berechnungen, Modellierungen und Maschinendatenbanken sind in einem Microsoft-Excel Dokument miteinander verknüpft und soweit wie möglich automatisiert bzw. durch Auswahllisten vereinfacht. So können in kurzer Zeit Berechnungen für unterschiedliche strukturelle Bedingungen vorgenommen werden – d.h. beispielhaft vom 40 Hektar-Betrieb in Baden-Württemberg bis zum 40.000 Hektar-Betrieb in Australien mit größeren Entfernungen und niedrigeren Erträgen. Jedes Ernteverfahren kann damit auf Kosten, Erlöse und andere Parameter hin untersucht werden.

3.2 Hinterlegte Maschinendaten

Die zugrundeliegenden Maschinendaten und -parameter sind auf drei Tabellen aufgeteilt, deren Daten für die Berechnungen mittels Auswahlliste und darauf basierender, automatischer Datenübernahme ins Berechnungsblatt erfolgen. Je nach Auswahlliste wird entsprechend das richtige Tabellenblatt zur Datenübernahme abgefragt. Der Aufbau und die Besonderheiten von jedem der drei Maschinendatenblätter wird in den direkt nachfolgenden drei Unterkapiteln erläutert.

3.2.1 Vorsatz- und Arbeitsgeräte

In dieser Maschinendatentabelle sind die Daten von Erntevorsätzen wie Schneidwerken hinterlegt, die für die Berechnung v.a. die Arbeitsbreite und die Arbeitsgeschwindigkeit bestimmen. Ebenso sind die Strohballenpressen in dieser Tabelle enthalten. Soweit möglich, wurden die Daten aus dem Buch des KTBL „Betriebsplanung Landwirtschaft 2020/21“ (KTBL, 2021) übernommen oder auf dessen Grundlage ermittelt.

Tabelle 1: Vorsatz- und Arbeitsgeräte mit zugehörigen Berechnungsparametern

Vorsatz- und Arbeitsgeräte	Grundpreis in Euro KTBL	Arbeitsbreite	max. Arbeitsgeschwindigkeit	Rüstzeit pro Feld	Feld zu Feld Transportzeit	Vorgewendefahrten	Lebensleistung	Reparatur und Verschleißkosten
€	m	km/h	Std.	Std.	Anzahl	ha	€/ha	
Schneidwerke KTBL	-	-	-	-	-	-	-	
SW 3 m	18.000	3	13	0,2	0,2	6	2000	5
SW 3,8 m	19.000	3,8	13	0,2	0,2	6	2400	5
SW 4,5 m	20.000	4,5	13	0,2	0,2	5	2800	5
SW 5 m	25.000	5	13	0,2	0,2	5	3100	5
SW 6 m	30.500	6	13	0,2	0,2	4	3700	5
SW 7,5 m	40.000	7,5	13	0,2	0,2	4	4300	5
SW 9 m	51.000	9	13	0,2	0,2	3	5000	5
SW 10,5 m	61.000	10,5	13	0,2	0,2	3	5800	5
SW 12 m	77.000	12	13	0,2	0,2	3	6700	5

Wie der Ausschnitt der Maschinendaten in Tabelle 1 zeigt, sind in den Zeilen untereinander aufgelistet u.a. Schneidwerke von 3 bis 18 m Arbeitsbreite, andere Ertevorsätze und Ballenpressen. In den Spalten sind von links beginnend verschiedene Kosten- und Leistungsparameter enthalten, wie zunächst die nicht verwechselbare Maschinenbezeichnung und der Grundpreis nach KTBL-Angaben oder davon abgeleiteten Annahmen.

Essentiell für die Berechnung der Flächenleistung pro Stunde sind Arbeitsbreite und Arbeitsgeschwindigkeit. Die Arbeitsbreite ist bei der einzelnen Maschine nicht veränderbar. Die Arbeitsgeschwindigkeit ist hier in der Tabelle als angenommene, technisch bedingte Höchstgeschwindigkeit aufgeführt. Z.B. bei Schneidwerken max. 13 km/h oder beim Ährenstripper 15 km/h. Diese Werte können ggf. manuell angepasst werden. Die maximale Arbeitsgeschwindigkeit ist jedoch meistens nicht möglich, beispielsweise bei hohen Erträgen. Diesbezüglich wird ein ertragsabhängiger Faktor miteinbezogen, um wie beim Einsatz einer realen Maschine bei höheren Erträgen eine niedrigere Geschwindigkeit für die Berechnung der Hektarleistung vorzugeben und umgekehrt.

Tabelle 2: Prozentuale Fahrgeschwindigkeitsreduktion in Abhängigkeit vom Kornertrag in t/ha

	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha
Kornertrag	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	
Fahrgeschwindigkeitsreduktionsfaktor	1,00	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76	

Die abnehmende Arbeitsgeschwindigkeit bei zunehmendem Kornertrag ist in Tabelle 2 für den Ausschnitt von 2,00 bis 5,00 t/ha dargestellt. Die gesamte Tabelle reicht bis 12,00 t/ha. In der mit 2,00 t/ha niedrigsten Ertragsstufe wird angenommen, dass die gerätespezifische, maximale Arbeitsgeschwindigkeit erreicht werden kann. Je 0,50 t/ha-Ertragsstufe nimmt der Fahrgeschwindigkeitsreduktionsfaktor um 0,04 ab. Das bedeutet, dass bei 0,50 t/ha Mehrertrag eine lineare Verringerung der Fahrgeschwindigkeit um 4 % angenommen wird. Diese Annahme wird nach einigen Annäherungsversuchen ausgewählt, da hierbei über die gesamte Ertragsspanne hinweg realistische Fahrgeschwindigkeitswerte generiert werden. Ein Standardschneidwerk mit 13 km/h maximaler, durchschnittlicher Arbeitsgeschwindigkeit erreicht diese bei einem Faktor von 1 in der Ertragsstufe von 2,00 t/ha. Nimmt der Ertrag auf 4,50 t/ha zu, werden mit dem Faktor 0,8 noch lediglich 80 % von 13 km/h, also 10,4 km/h Arbeitsgeschwindigkeit als Grundlage für die Flächenleistung angesetzt. Für die Strecke der Wendevorgänge werden konstant 8 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit angenommen. In zwei weiteren Spalten sind Transport- und Rüstzeit hinterlegt. Bei den Schneidwerken beträgt der Wert dafür 0,2 Stunden, was 12 Minuten entspricht.

In einer weiteren Spalte ist für jede Maschine die Anzahl der Vorgewendefahrten in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite hinterlegt. Bei 9 bis 12 m Arbeitsbreite sind es 3 Querfahrten am Vorgewende und bei 3 bis 4 m Arbeitsbreite sind es 6 Vorgewendefahrten je Vorgewende.

Für die Maschinen in dieser Tabelle ist die jeweilige Lebensleistung in Hektar hinterlegt und basiert auf KTBL-Werten. Das 3 m Schneidwerk hat 2000 ha Lebensleistung während das 12 m Schneidwerk 6700 ha aufweist. Mit der Lebensleistung und dem Anschaffungspreis werden später die Kosten pro Hektar ermittelt. U.a. werden darin auch die Reparatur und Verschleißkosten mitberücksichtigt, die in Euro pro Hektar für die vorliegende Tabelle aufgelistet sind. Bei allen Schneidwerken beträgt dieser Wert nach KTBL Angaben 5 €/ha.

Die Ballenpressen stellen einen Spezialfall dar. In den Reparatur- und Verschleißkosten sind zusätzlich die Kosten für Bindegarn und Folie enthalten und aufgrund berechnungstechnischer Notwendigkeit unter Einbeziehung des Ertrags in Euro je Kubikmeter gepresstem Erntegutvolumen angegeben. Diese werden für die Kostenberechnung in Euro pro Hektar umgerechnet.

3.2.2 Hauptmaschinen mit Motorantrieb

In dieser hinterlegten Maschinendatentabelle sind alle Maschinen für Feldarbeit und Logistik aufgelistet, die als Antriebsmaschine für den jeweiligen Arbeitsgang fungieren. Darunter Traktoren aller Leistungsklassen, Umschlagmaschinen, Feldhäcksler, Mähdrescher (unterteilt in Schüttler-, Rotor- und Hybridmodelle), Kompakternter und Lastwagen.

Tabelle 3: Ausschnitt hinterlegter Daten der Hauptmaschinen

Maschinenbezeichnung Hauptmaschinen	Grundpreis in Euro KTBL							
	€	PS	Bunkervolumen m ³	Arbeitsgeschw. km/h	Entleerungsz. Addition Min.	Erwartete Lebensleistung Std.	Reparatur und Verschleißkosten €/Std.	
Mähdrescher - Rotordrescher KTBL								
rMD 350 PS	324.000	350	10	-0,5	2	3.000	16,00	
rMD 400 PS	375.000	400	10,5	-0,5	2	3.000	18,00	
rMD 475 PS	430.000	475	12	-0,5	2	3.000	20,00	
rMD 550 PS	465.000	550	12	-0,5	2	3.000	22,00	

Vom zuvor beschriebenen Tabellenblatt für Arbeits- und Vorsatzgeräte unterscheidet sich die Tabelle 3 dadurch, dass in den Spalten andere Datensätze hinterlegt sind. So ist für die Hauptmaschinen hier jeweils die Motorleistung in PS angegeben, die in einem späteren Schritt für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs herangezogen wird. Für Traktoren und Lastwagen,

die für den Transport eingesetzt werden können, ist die maximale Transportgeschwindigkeit von 45 bzw. 80 km/h angegeben (in gezeigtem Tabellenausschnitt nicht sichtbar), die für die Berechnung mit einem festzulegenden Faktor zwischen etwa 0,5 und 0,8 zur Berechnung der durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit genutzt wird.

Für Mähdrescher ist außerdem das Bunkervolumen angegeben, das sich auf die Maschinenleistung auswirkt. Für Lastwagen ist es ebenfalls möglich, Transportvolumina zu hinterlegen, was hier jedoch nicht erforderlich ist, da lediglich Transportgespanne bestehend aus Traktor und Anhänger angenommen werden.

Neben der max. Transportgeschwindigkeit ist für die Feldarbeit ein maschinentypabhängiger Korrekturwert der Arbeitsgeschwindigkeit hinterlegt. Dieser liegt bei +2 km/h für Traktoren (bei Ährenstripperernte) und Feldhäcksler (Feldhäckseldrusch) und erhöht somit deren max. mögliche Arbeitsgeschwindigkeit um 2 km/h, ausgehend von den max. Arbeitsgeschwindigkeitsangaben der Erntevorsätze aus dem zuvor beschriebenen Tabellenblatt. Für Schüttler- und Rotormähdrescher liegt der Wert bei -0,5 und bei Hybridmähdreschern aufgrund der tendenziell höheren Leistung bei +0,5. Für die Kompakternte wird aufgrund der geringeren Komplexität ein Wert von +1 angenommen.

Die erwartete Lebensleistung nach KTBL wird bei den Maschinen im vorliegenden Tabellenblatt in Betriebsstunden angegeben. Bei Traktoren sind es 10.000 Std., bei den selbstfahrenden Arbeitsmaschinen jeweils 3.000 Std. und bei Lastwagen sind es 12.000 Betriebsstunden. Die Reparaturkosten werden folglich auch in Euro pro Betriebsstunde angegeben und erstrecken sich von etwa 5 €/Std. für einen kleinen Traktor bis hin zu 50 €/Std. für einen großen Feldhäcksler. Die Angaben auf Stundenbasis werden anhand der berechneten Arbeitsleistung pro Stunde (ha/Std.) für jeden Arbeitsgang individuell umgerechnet in Euro pro Hektar. Der Kraftstoffverbrauch und die damit verbundenen Kosten werden getrennt davon für jeden Arbeitsgang einzeln berechnet. Sonstige Kosten werden mit pauschal 1 €/Std. z.B. für Versicherung und Unterbringung veranschlagt.

3.2.3 Zusatzmaschinen

Anhänger und stationäre Separationsanlagen für Körner-Reststoffgemisch sind in einem weiteren Tabellenblatt mit den für die Berechnung benötigten Daten hinterlegt. Anhänger sind einerseits für Traktoren wie z.B. Kipper, Häckselwagen, Ladewagen und Ballenwagen, andererseits für LKW als Kippauflieger oder Schubbodenaufleger. Neben der Angabe der Ladevolumina von 25 bis 100 m³ ist die Besonderheit in diesem Tabellenblatt, dass verschiedene Entladezeiten für die Anhänger hinterlegt sind. Einmal ist die Entladezeit für den Logistikeinsatz als Annahme in Abhängigkeit vom Anhängertyp und Volumen angegeben und zudem die

Entladezeit beim Einsatz als Erntegutzwischenbunker, angehängt an ein Erntefahrzeug wie z.B. den Traktor mit Ährenstripper oder an den Kompakternter. Als Erntegutzwischenbunker erfolgt die Entladung auf ein Straßentransportfahrzeug mittels Überladevorrichtung wie z.B. einer Schnecke oder einem Förderband, weshalb hierfür Entladezeiten im Feldeinsatz angenommen werden.

Die Entladezeiten im Straßentransporteinsatz sind bei 3-4 Minuten für einen Entladevorgang. Bei einem Schubbodenaufleger sind es 10 Minuten und für das Entladen von Ballen werden je nach Anhängergröße 10-20 Minuten angenommen. Für Häckselwagen mit Kratzboden, die sich auch als Zwischenbunker hinter einem Erntefahrzeug eignen, betragen die Entladezeiten im Feldeinsatz 5-8 Minuten je nach Volumen. Diese Anhänger können als einzige gleichzeitig vom Erntefahrzeug vorn beladen werden und Erntegut hinten entladen, was eine leistungsfähige Ernte ohne Standzeiten zum Entladen ermöglicht.

Die erwartete Lebensleistung sowie die Reparatur- und Verschleißkosten werden in Stunden bzw. Euro je Stunde angegeben und basieren auf KTBL-Angaben. Des Weiteren sind die angenommenen, stationären Reinigungsanlagen mit Investitionsausgaben von 100.000 bis 400.000 €, 10.000 Std. erwarteter Lebensleistung und dazu stündlich anfallenden Betriebskosten von 20 bis 50 €/Std. in dieser Auflistung enthalten.

3.3 Modellierung Biomasseerträge und -volumina

Ausgehend vom Kornertrag von Weizen werden von diesem in einer Spanne von 2,00 t/ha bis 12,00 t/ha in jeweils 0,50 t/ha-Schritten die erforderlichen Spreu- und Strohdaten für die Berechnungen im jeweiligen Ertragsniveau abgeleitet. Dazu zählen die Erträge und die Volumina, sowohl für die einzelnen Fraktionen, als auch in unterschiedlichen Zusammensetzungen im Gemisch, wie es die verschiedenen Ernteverfahren zur Verfügung stellen.

Die Ertragsannahme von 7,50 t/ha liegt am nächsten bei den knapp 7,70 t/ha durchschnittlichem Weizenertrag in Deutschland von 2014 bis 2019 (BMEL, 2020). Daher wird diese Ertragsstufe von 7,50 t/ha beispielhaft für die Darstellung aller für die Berechnung davon abgeleiteten Parameter herangezogen.

3.3.1 Annahme und Begründung Strohertrag und -ernte

Durch das Korn-Stroh-Verhältnis von 1:0,8 kann der theoretische Strohertrag für die Ertragsannahmen vom Kornertrag abgeleitet werden (Schneider, 2011; LfL, 2013). Bei 7,50 t/ha Kornertrag beträgt der theoretische Strohertrag 6,00 t/ha.

Jedoch ist diese Annahme für die Berechnungen zu kurz gegriffen. Denn je nach Literaturangabe können u.a. aufgrund der Erntetechnik oder der Witterung nicht die kompletten 6,00 t/ha Stroh geerntet werden, sondern nur ein Anteil der in Prozent angegeben wird. Kolbe et al. (2015) geben nach Sünder et al. (2010) 42 – 71 % an, das DBFZ (2012) geht von max. 60 % bei Axialmähdreschern und bis zu 70 % erntbarem Stroh bei Tangentialmähdreschern aus. Schneider (2011) beziffert den Anteil auf 60 – 80 % und Weiser (2014) auf 58 – 61 %.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verbreitung seit Einführung von Axialmähdreschern und weil die Angabe von 60 % in allen vorliegenden Quellen übereinstimmend als realistisch in Betracht gezogen werden kann, wird für die Berechnungen die erntbare Strohmenge von 60 % für die Strohballenkette als Annahme angesetzt. Bei 7,50 t/ha Kornertrag mit einem Korn-Stroh-Verhältnis von 1:0,8, was 6,00 t/ha theoretischem Strohertrag entspricht, ergeben 60 % erntbarer Strohanteil eine erntbare Strohmenge von 3,60 t/ha. Die 2,40 t/ha bzw. 40 % des theoretischen Strohertrags, die nicht geerntet werden können, sind Aufnahmeverluste der Strohballenpresse.

3.3.2 Annahme und Begründung Spreuerträge

Die Literaturwerte zu Spreuerträgen sind unübersichtlich. Zumeist ist für die methodische Beschreibung der Erhebung die Spreu als Fraktion nicht eindeutig abgegrenzt, z.B. ob darin Verlustkörner enthalten sind oder nicht. Für Laborversuche auf Basis von Quadratmeterschnitten wird vermutet, dass darin keine Verlustkörner enthalten sind. Beim Auffangen der Spreu aus dem Mähdrescher im reellen Maßstab sind Verlustkörner mit großem Gewichtsanteil in der Spreu kaum zu vermeiden. Zudem kann die höhere Beanspruchung der Strohfraktion bei Axialmähdreschern einen höheren Übergang von Feianteilen in die Spreufraktion zufolge haben. Daneben sind verschiedene Einflüsse von Sorten und Pflanzenschutzanwendungen zu erwarten, die die Brüchigkeit des Strohs beeinflussen, wie auch der Feuchtegehalt des Ernteguts. Daher ist es nicht verwunderlich, dass Spreuerträge für Mitteleuropa zumeist mit etwa 1,00 – 2,00 t/ha beziffert werden, da keine einheitliche Definition vorliegt sowie aufgrund der genannten, multifaktoriellen Einflüsse auf den Spreuertrag.

Einige Daten konnten dennoch recherchiert und verwertet werden. Auffällig dabei ist, dass der Spreuertrag mit zunehmendem Kornertrag nicht ebenfalls zunimmt. Der Spreuertrag war bei zunehmenden Kornerträgen tendenziell rückläufig und umgekehrt. Tabelle 4 zeigt die Spreuertragsangaben mit den zugehörigen Quellen.

Tabelle 4: Auflistung von Angaben zu Spreuerträgen jeweils mit Literaturquelle bzw. Autor

Literaturquelle/Autor	Angabe Spreuertrag
Rumpler, 2015	1,00 – 2,00 t/ha, durchschnittlich 1,50 t/ha
Kolbe et al., 2015	ca. 1,50 t/ha
Marti et al., 2013	1,10 t/ha
Dierauer, 2019	1,00 – 2,00 t/ha
Sweedhart, 2021	2,30 t/ha
Malhi und Lemke, 2007	1,10 – 1,75 t/ha (bei Kornerträgen um lediglich ca. 3,00 t/ha)
Malhi et al., 2006	1,20 – 1,35 t/ha (bei Kornerträgen um 3,50 t/ha)
Siemens und Hulick, 2008	1,60 – 3,50 t/ha (bei Kornerträgen zwischen 3,30 und 6,40 t/ha), durchschnittlich 2,00 – 2,50 t/ha Spreu in 5 von 7 Erhebungen. Nur eine Erhebung unter 2,00 t/ha.

Während die vier zuerst genannten Quellen auf mitteleuropäische Ermittlungen zurückzuführen sind und etwa 1,00 – 2,00 t/ha Spreu mit einem Durchschnitt von 1,50 t/ha aufzeigen, sind die Angaben der internationalen, zuletzt genannten Quellen breit gestreut. Die Belege von Sweedhart und Siemens zeigen höhere Spreuerträge auf, wobei bei Siemens ein wesentlich niedrigeres Ertragsniveau als in Mitteleuropa vorherrscht. Besonders die begrannten Weizensorten, die in Mitteleuropa nicht sehr verbreitet sind, zeigen höhere Spreuerträge. Das niedrige Kornertragsniveau aus den Veröffentlichungen von Malhi zeigt vermutlich aufgrund einer anderen Erhebungsmethodik niedrigere Spreuerträge in der gemeinsamen Betrachtung. Werden die beiden Veröffentlichungen getrennt voneinander betrachtet, waren 2007 tendenziell höhere Spreuerträge bei niedrigeren Kornerträgen als 2006 erkennbar. Die Annahmen der Spreuerträge werden daher so getroffen, dass sich diese Menge stets zwischen 1,00 und 2,00 t/ha bewegt.

Tabelle 5: Angenommene Spreuerträge in Abhängigkeit vom Kornertrag

	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha	t/ha
Kornertrag	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50
Spreuertrag	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50

Im dargestellten Ausschnitt zeigt Tabelle 5 ausgehend von 1,50 t/ha Spreu bei einem durchschnittlichen Kornertrag von 7,50 t/ha, dass die Spreumenge bei niedrigeren Erträgen leicht zunimmt, z.B. auf 1,90 t/ha Spreu bei 3,50 t/ha Kornertrag. Umgekehrt werden bei höheren Kornerträgen niedrigere Spreuerträge linear zugeordnet hinterlegt. Beispielsweise 1,30 t/ha Spreu bei 9,50 t/ha Kornertrag.

3.3.3 Sonstige, allgemeine Annahmenbegründung

Das spezifische Gewicht der Weizenkörner wird mit einer gängigen Angabe von 750 kg/m^3 angenommen (vgl. Proplanta, 2021b und KTBL, 2021, S. 751).

Loses Stroh wird mit 60 kg/m^3 angenommen und mit diesem Wert für die Erntegutgemische der Doppelernteverfahren verrechnet (vgl. LfL, 2006 und KTBL, 2021, S. 752).

Wie schon bei der Ertragsannahme ist die Spreu aufgrund der unklaren Definition und der multifaktoriellen Einflüsse auch bei der Annahme für das spezifische Raumgewicht ein Sonderfall. Dierauer (2019) spricht von $25 - 50 \text{ kg/m}^3$, Marti et al. (2013) von 35 kg/m^3 , McChartney et al. (2006) von etwa 56 kg/m^3 , Suardi et al. (2020a) von 62 kg/m^3 und das KTBL (2021) sogar von $80 - 125 \text{ kg/m}^3$. Als Annahme werden 50 kg/m^3 für die Berechnungen festgelegt.

Die Pressdichte von Stroh wird für die angenommenen Rundballen auf 100 kg/m^3 festgesetzt. Begründet wird dies anhand der Angaben der LfL (2006) von 120 kg/m^3 und DLG Prüfberichten von Rundballenpressen, die teilweise Ballendichten von nur etwa 90 kg/m^3 aufzeigen (vgl. DLG, 2015 und DLG, 2013). In KTBL (2021) werden $100 - 120 \text{ kg/m}^3$ als mögliche Spanne angegeben.

Die Pressdichte von reiner Spreu wird hingegen mit 200 kg/m^3 angenommen. Dafür spricht, dass sich die Spreu nach Marti et al. (2013) auf bis zu 208 kg/m^3 wesentlich dichter zusammenpressen lässt als Stroh. Dafür spricht auch, dass Rumpler (2015) die Verdichtung des Gemischs aus Spreu und einem gewichtsmäßig ähnlichen Anteil Stroh im Folienschlauch auf bis zu 200 kg/m^3 beziffert, was auf die Rundballendichte übertragen werden kann. Die eigenen Annahmen für die Pressdichte von Gemischen aus Spreu und Stroh werden für Rundballen jedoch mit 150 kg/m^3 , exakt zwischen den Pressdichten reiner Spreu und des reinen Strohs angenommen. Diese Annahme gilt für alle verschiedenen Zusammensetzungen aus Spreu und Stroh, auch wenn die Anteile von 50:50 % (Spreu:Stroh) bis hin zu 10:90 % (Spreu:Stroh) je nach Ernteverfahren bzw. Strohmitnahmeanteil ausfallen können. Eine detailliertere Unterteilung kann auf Basis der Datenlage nicht vorgenommen werden und würde die Berechnungen und die Fehleranfälligkeit aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit falscher Eingaben erhöhen.

Die Annahmen für die Raumgewichte der einzelnen, ernteverfahrensabhängigen Erntegutgemische werden für die jeweiligen Verfahren nachfolgend angegeben. Im Falle der Korn-Spreu Ernte werden die beiden Volumina addiert. Im Falle der Korn-Spreu-Stroh Ernte werden lediglich die Volumina von Spreu und Stroh addiert. In diesem Fall ist das Volumen des Kornes unbedeutend aufgrund einer gewissen Selbstverdichtung des Ernteguts. Von Rumpler (2015) wird diese Eigenschaft mit der „volumetrischen Spreuformel“ begründet, die besagt, dass jeweils 500 cm^3 der drei Fraktionen Korn, Spreu und Stroh nur etwa 1.000 cm^3 Erntegutgemisch

zum Resultat haben. Die Volumina addieren sich nicht zu den erwarteten 1.500 cm³, sondern das Gemisch verdichtet sich selbst, dass aus den insgesamt 1.500 cm³ der getrennten Fraktionen 1.000 cm³ im Gemisch resultieren.

Mit dieser Vorgehensweise werden für die Doppelernte dennoch leicht niedrigere Erntegutdichten angenommen, als aus der Literatur ersichtlich. Z.B. gibt Rumpler (2015) für ein Erntegutgemisch bestehend aus Korn, Spreu und 25 % des Strohs etwa 250 kg/m³ Transportdichte an (bei 7,50 t/ha Kornertrag), wohingegen die eigens berechnete Dichteannahme in diesem Fall knapp 200 kg/m³ beträgt. Somit ist in der Annahme eine gewisse Sicherheit enthalten, die eine fehlerhafte Bevorzugung der Doppelernteverfahren gegenüber traditionellen Strohernteverfahren vermeidet, da die berechneten Annahmen leicht unterhalb der bisher wenigen empirischen Erkenntnisse liegen.

Im Gegensatz zur Strohballenernte ohne flexible Stroherntemenge wird die Biomasseernte für die Doppelernteverfahren in vier Stufen unterteilt, deren Transportvolumina für den Transport des Erntegutgemischs berechnet und für das jeweils in Frage kommende Verfahren angenommen werden kann:

- Korn + Spreu
- Korn + Spreu + 25 % des Strohs
- Korn + Spreu + 50 % des Strohs
- Korn + Spreu + 75 % des Strohs

Diese werden in den nachfolgenden Verfahrensbeschreibungen aufgegriffen und individuell erläutert. Zudem wird bei den Doppelernteverfahren für die Strohernte das tatsächliche Strohpotential als Grundlage genutzt und nicht die erntbare Strohmenge wie bei der Ballenkette. Denn bei der erntbaren Strohmenge sind bereits die Aufnahmeverluste durch die Schwadablage enthalten. Bei der Doppelernte wird das Erntegut nicht abgelegt und wiederaufgenommen, wodurch hierbei keine Verluste entstehen.

3.3.4 Zusammenfassung der Annahmen

Tabelle 6: Die wesentlichen Annahmewerte und deren Bezeichnungen

Bezeichnung der Annahme	Annahmewert
Strohertrag	80 % des Kornertrags
Erntbares Stroh	60 % des Strohertrags
Spreuertrag	1,50 t/ha bei 7,50 t/ha Kornertrag; Spreuertrag leicht abnehmend bei zunehmendem Kornertrag und umgekehrt
Dichte Weizenkörner	750 kg/m ³
Dichte Häckselstroh	60 kg/m ³
Dichte Spreu	50 kg/m ³
Dichte Strohballen	100 kg/m ³
Dichte Spreurundballen	200 kg/m ²
Dichte Spreu-Strohballen	150 kg/m ³
Berechnung Korn-Spreu-Gemisch	Volumen Korn + Volumen Spreu
Berechnung Korn-Spreu-Stroh-Gemisch	Volumen Spreu + Volumen Stroh

Die Tabelle 6 fasst alle in Kapitel 3.3.1 bis Kapitel 3.3.3 getroffenen Annahmen zusammen. Die Werte sind in den Berechnungen hinterlegt und bilden deren Grundlage. Der Kornertrag, von dem einige der Annahmen abgeleitet werden, wird zwischen 2,00 t/ha und 12,00 t/ha in 0,50 t/ha Schritten vorgegeben.

3.4 Modellierung und Definition der Ernteverfahren

In den kommenden Unterkapiteln werden die einzelnen Ernteverfahren definiert. Grundsätzlich können unterschiedliche Strukturszenarien für die Berechnungen angesetzt und im Anschluss miteinander verglichen werden. Für das hier gewählte Strukturszenario werden die Annahmen in Tabelle 7 aufgelistet. Diese Annahmen sind für alle im Anschluss definierten Ernteverfahren gültig, um die Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse zu gewährleisten. Für andere Strukturszenarien können die einzelnen Annahmewerte angepasst werden.

Tabelle 7: Parameter und Annahmen für das gewählte Strukturszenario

Parameter	Annahme (Begründung)
Kornertrag	6,50 t/ha
Feldlänge	600 m
Feldbreite	400 m
Feldgröße	24 ha
Feld zu Feld Transportzeit	0,2 Std. (= 12 Min., Rüstzeit individuell je Erntefahrzeug zugeordnet)
Hof- Feldentfernung	10 km
Logistikfaktor max. Transportgeschwindigkeit	0,7 (Faktor Maximalgeschwindigkeit = angenommene Durchschnittsgeschwindigkeit)
Maximale Nutzlast	25 t
Dieserverbrauch Transport	25 l/Std. (hier Pauschale; Feldarbeit exakt berechnet)
Tägliche Arbeitszeit	12 Std.
Arbeitskraftkosten	20 €/Std. (eigene Annahme)
Dieselpreis	1,25 €/l (eigene Annahme)
Zinsansatz	2 % (eigene Annahme)
Preis Körner	200 €/t (Annahme, vgl. Kaack Terminhandel GmbH, 2021, Weizen seit einigen Monaten deutlich über 200 €/t, zuvor eher niedriger)
Preis Biomasse	80 €/t (Annahme basierend auf Strohpreis, vgl. Proplanta, 2021a; Annahme niedrig gehalten – Vergleichsprodukt Dinkelspelzen laut KTBL S. 489 viel höher: ab 239 €/t)

Neben den Eingabewerten für das Strukturszenario aus der vorangegangenen Tabelle werden einheitliche Parameter innerhalb der verschiedenen Verfahren für eine hohe Vergleichbarkeit angenommen. Sowohl bei der Doppelernte, als auch bei den Mähdruschverfahren werden daher 9 m Arbeitsbreite festgelegt und die Logistik wird einheitlich bei allen Verfahren mit Traktoren durchgeführt, die das Erntegut während der Fahrt vom Erntefahrzeug aufnehmen, wodurch niedrigere Standzeiten resultieren.

Jedes Verfahren hat eine unverwechselbare Kennung, die sich aus den wesentlichen Variablen zusammensetzt. Diese wird für das jeweilige Verfahren im weiteren Verlauf angegeben. Dazu enthält der Aufbau der Kennung die Arbeitsbreite mit z.B. 9 m (4, 6, 12, 18 m optional, nicht in der Berechnung), das Ernteverfahrenskürzel wie z.B. FHD für den Feldhäckseldrusch, das Erntegut wie beispielsweise 50 % + Spreu (Korn wird immer als enthalten vorausgesetzt, die Prozentzahl beschreibt den Strohanteil) sowie die Logistik (Traktor fahrend) und die Biomasselagerung wie z.B. im Freilager für lose Biomasse ohne Lagerungskosten oder alternativ

„Multibaler stationär“, als stationär einsetzbare Rundballenpresse. Um die eindeutige Zuordenbarkeit in den mehr als 1.000 möglichen Verfahren sicherzustellen, werden die Kennungen z.T. mit uneinheitlich platzierten Leerzeichen ergänzt.

Für sich ist jedes der nachfolgend beschriebenen Ernteverfahren neu und besonders. Eine besondere Bedeutung wird dem Feldhäckseldrusch jedoch an erster Stelle zugewiesen, da für dieses Ernteverfahren ein Versuch durchgeführt wurde.

3.4.1 Praxisversuch Feldhäckseldrusch

Ziel des Praxisversuchs ist es, die Durchführung des Feldhäckseldruschs mit heutiger Mechanisierung zu demonstrieren und Daten zu erheben. Im August 2019 wurde dazu im Landkreis Ravensburg auf einem landwirtschaftlichen Betrieb ein Lohnunternehmen beauftragt, mit einem Feldhäcksler mit maximaler Schnittlängeneinstellung etwa 0,29 Hektar eines totreifen Weizenbestands zu häckseln und zu transportieren, wie Abbildung 4 zeigt.



Abbildung 4: Demonstration des Feldhäckseldruschs von Weizen mit moderner Technik – Claas Jaguar 840 mit Direktschneidwerk und großvolumiger Häckselwagen

Quelle: Eigen, am 26.08.2019

Zuvor wurden bereits die Vorernteverluste ermittelt, um Verlustquellen am Feldhäcksler auffindig zu machen. Auffällig wurde dabei im Anschluss an die Ernte eine verschlissene Gummichtung zwischen Direktschneidwerk und Häckselaggregat, die an einer Stelle etwa mittig am Fahrzeug eine „Verlustspur“ aus Körnern mit sich zog. Die Verluste waren dadurch unakzeptabel hoch bei über 6,50 dt/ha, jedoch muss dies aufgrund des Verschleißteils als nicht repräsentativ eingeordnet werden.

Quadratmeterschnitte direkt vor dem Ernteversuch ermöglichen eine theoretische Überprüfung der gewonnenen Daten. Diese bestätigen einen laut Landwirt ortsüblichen Kornertrag von etwa 108 dt/ha, einen sorten- und bestandesführungsbedingt niedrigen Strohertrag von knapp 42 dt/ha sowie einen Spreuertrag von knapp 18 dt/ha.



Abbildung 5: Stationäre Trennung von Korn und Biomasse mit dem Mähdrescher zu Versuchszwecken

Quelle: Eigen, am 29.08.2019

Die Erntegutnachbereitung zur Trennung von Korn und Biomasse wurde drei Tage nach der Ernte mit einem Mähdrescher durchgeführt, was jedoch für die breite Anwendung in der Praxis nicht zu empfehlen ist, da dies Verluste über den Siebabgang in Höhe von 5,6 % zur Folge hatte. Das aus dem Mähdrescher abgebunkerte Erntegut wies laut Landhandel etwa 7,5 % Bruchkornanteil auf. Jedoch waren darin lediglich die groben Anteile enthalten. Die Feianteile

des Bruchkorns wurden mit der Spreu über die Siebe des Mähdreschers abgesondert und gelangten somit in die Biomassefraktion. Laut Feiffer (2015) ist die Menge an Kleinkornanteilen, die den Mähdrescher über die Reinigung verlassen, in etwa so groß wie der Bruchkornanteil im Bunker. Insgesamt wären dies rund 11 - 15 % Bruchkornanteil beim Feldhäckseldrusch in diesem Versuch, was bei der Betrachtung der folgenden Abbildung 6 durchaus realistisch erscheint.



Abbildung 6: Siebabgang des stationären Mähdreschers

Quelle: Eigen, am 29.08.2019

Zu erkennen sind in Abbildung 6 die erwähnten Anteile an feinem Bruchkorn und kurzgehäckseltes Stroh als Resultat der Kornernte und -beanspruchung zunächst durch den Feldhäcksler und anschließend die Bearbeitung mit dem Mähdrescher zur Trennung von Korn und Biomasse.

Sowohl anhand der hohen gemessenen Bruchkornwerte, als auch durch die visuelle Begutachtung wird ersichtlich, dass das Erntegut die aus dem Mähdruschverfahren bekannten Eigenschaften von niedrigen Verlust- und Bruchkornanteilen nicht erfüllen kann. Für einen vermehrten Einsatz des Ernteverfahrens ist es essentiell, den Feldhäckseldrusch mit einer leistungsstarken und automatisierten, stationären Separationsanlage durchzuführen und größere

Häcksellängen für weniger Bruchkorn zu ermöglichen sowie Verlustquellen im Häcksler zu eliminieren.

Dann ergeben sich durch den Feldhäckseldrusch mit moderner Technik einige Vorteile. Das Ernteverfahren bietet die Möglichkeit einer raschen Ernte des Kornes einschließlich aller Nebenprodukte mit etablierter und leistungsstarker Technik wie im Biogasbereich. Zum Korn werden Spreu und Stroh ohne zusätzlichen Aufwand mitgeerntet und so zum günstigen Rohstoff. Da die Spreu neben Spelzen, Staub und Grannen auch die beim Mähdrusch anfallenden Verlustkörner sowie Bruchkorn und Unkrautsamen enthält, wird dadurch einerseits das Stroh als Biomasse inhaltsstofflich aufgewertet und andererseits eine Maßnahme gegen Unkraut und Ausfallgetreide durchgeführt, was zu einem niedrigeren Herbizideinsatz und niedrigerem Bodenbearbeitungsbedarf führen kann. Durch den erweiterten Einsatzbereich des Feldhäckslers und eine dadurch bedingte, höhere jährliche Auslastung der Erntemaschine können sich die Kosten der Erntetechnik verringern.

3.4.2 Feldhäckseldrusch „FHD“

Der Feldhäckseldrusch wird mit insgesamt zwei Verfahrensoptionen, die sich lediglich in der Art der Lagerung unterscheiden, definiert. Die beiden Verfahren können dann mit anderen Ernteverfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit verglichen werden. In den ersten Schritten unterscheiden sich die zu definierenden Feldhäckseldruschverfahren jedoch nicht.

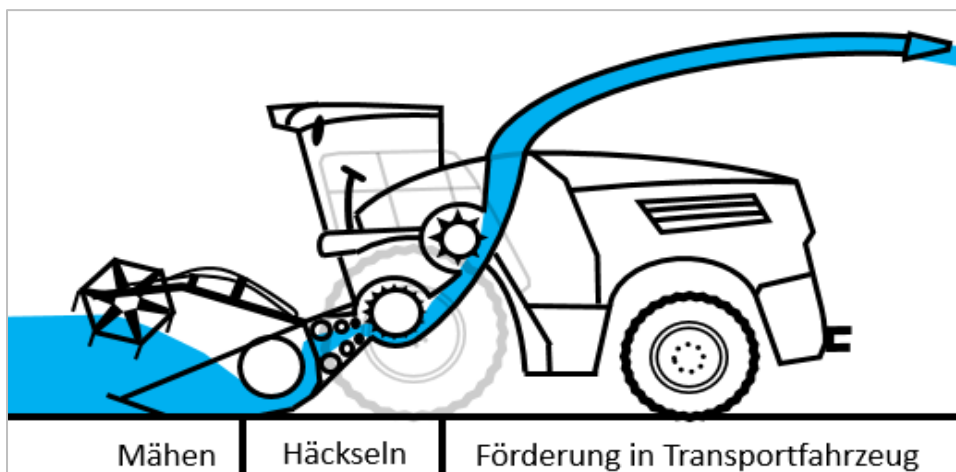


Abbildung 7: Gutfluss im Feldhäcksler – das Erntegut (blau) wird gemäht, gehäckselt und gemeinsam in das Transportfahrzeug befördert

Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildung 7 zeigt eine schematische Skizze eines Feldhäckslers inklusive des Gutflosses in der Maschine. Das gesamte Erntegut (blau) wird im Falle des Feldhäckseldruschs wie bei der Silageernte gemäht, gehäckselt und auf ein Transportfahrzeug übergeladen. Es finden

keine Selektionsprozesse wie z.B. der Ausdrusch und eine darauf basierende Aufteilung von Gutströmen in der Maschine statt.

Berechnung Hektarleistung und Kosten Feldhäcksler

Die Arbeitsbreite beträgt 9 m und wird mit einem Getreideschneidwerk dargestellt. Laut KTBL liegt dieses bei rund 50.000 Euro Anschaffungswert und kann etwa 5.000 Hektar genutzt werden. Eine hohe Auslastung wird angenommen und somit die Abschreibung nach Leistung berechnet. Reparatur- und Verschleißkosten belaufen sich auf 5 €/ha.

Ein Feldhäcksler mit 600 PS Leistung wird als Hauptmaschine angenommen. Die Investitionsausgaben für diese Maschine liegen laut KTBL bei knapp 500.000 Euro bei einer erwarteten Lebensleistung von 3.000 Stunden. Es wird angenommen, dass die Maschine ausgelastet ist und somit nach Leistung abgeschrieben wird. Reparatur- und Verschleißkosten belaufen sich auf 40 Euro je Betriebsstunde.

Es wird wie bei allen weiteren Verfahrensdefinitionen darauf geachtet, dass der Erntevorsatz und die Hauptmaschine bei einer realistisch hohen Motorauslastung von 80 % zueinander passen. Mit den Annahmen für die Arbeitsgeschwindigkeit wird aus den hinterlegten Daten für Maschinen und Erträge eine durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit von 9,60 km/h errechnet, die weiter in die Berechnung der Flächenleistung einfließt. Dazu sind Feldlänge und Feldbreite erforderlich. Außerdem fließen Wendezeiten und sonstige Verlustzeiten mit ein. Für dieses Feldhäckseldruschverfahren bei 6,50 t/ha Kornertrag werden somit 7,08 ha/Std. Flächenleistung erzielt. Es wird dafür angenommen, dass nur geringfügige Verzögerungen für den Transportfahrzeugwechsel anfallen und ansonsten kontinuierlich geerntet und übergeladen werden kann.

Berechnung Kraftstoffverbrauch Feldhäcksler

Anschließend wird für die Erntemaschine der Kraftstoffverbrauch errechnet. Darin fließen ein die Motorleistung, die Gesamtzeit pro 24-ha-Feld mit 3,39 Std., die Motorauslastung, die Feldeffizienz mit 0,83, wofür die Arbeitszeit inkl. aller Verlustzeiten durch die höhere, theoretische Hektarleistung aus Fahrgeschwindigkeit und Arbeitsbreite geteilt wird, sowie das spezifische Gewicht von Diesel mit 835 kg/m³ (vgl. Chemie.de, 2021). Daraus resultiert ein errechneter Dieselbedarf von 285 Liter für das gesamte Feld, was je Hektar 11,87 Litern entspricht, oder 0,99 Liter je Tonne Gesamterntegut. Diese und alle anderen variablen und fixen Kosten für Feldhäcksler und Schneidwerk werden für das ganze Feld berechnet und dann wieder auf die vergleichbare Einheit von einem Hektar umgelegt.

Berechnung Erntegutvolumina und -zusammensetzung FHD

Da die zu erntende Biomassemenge beim Feldhäcksler lediglich durch die Höhe des Schneidwerks beeinflusst werden kann, wird angenommen, dass neben der gesamten Spreu durchschnittlich 75 % des Strohpotentials mitgeerntet werden. Ausgehend von 6,50 t/ha Kornertrag werden somit 5,50 t/ha Biomasse mitgeerntet. In Form von Spreu 1,60 t/ha und 3,90 t/ha Stroh. Das gesamte Erntegutgemisch ergibt somit 12,00 t/ha. Die Dichte des Gemischs beträgt rund 123 kg/m³, was etwa 97 m³/ha entspricht. Bei 7 ha/Std. müssen für einen reibungslosen Ernttablauf somit rund 680 m³/Std. des voluminösen Ernteguts transportiert werden.

Berechnung Logistik FHD

Dazu werden zunächst die Transportfahrzeuge ausgewählt. In diesem Fall Traktoren mit je 250 PS und 60 m³ Kippanhänger. Mittels Hof-Feldentfernung (10 km), Durchschnittsgeschwindigkeit (31,50 km/h = Faktor 0,7 von max. 45 km/h), Feldtransportzeit (Annahme: 3 Minuten = Feldlänge/200), Beladezeit (etwa 11 m³/Min. = 5,50 Minuten für 60 m³) und vorgegebene Entladezeit (3 Min.) wird die Umlaufzeit je Transportfahrzeug ermittelt, hier knapp 50 Minuten. Durch Wendezeiten im Erntevorgang und geringfügige Verzögerungen beim Transportfahrzeugwechsel resultiert daraus, dass 9 Transportgespanne benötigt werden, um den Feldhäcksler stets bedienen zu können. Mit dieser Angabe werden dann wieder alle anfallenden Kosten je Fahrzeugkombination addiert und mit der Anzahl (9) multipliziert.

Die Nutzlast kann bei diesem Erntegutgemisch lediglich zu 30 % ausgenutzt werden. Die Menge geladener Trockenmasse sollte jedoch vergleichbar sein mit dem Transport von Getreideganzpflanzensilage bei 30 – 35 % Trockensubstanzgehalt. Nur wird hier bei trockenem Erntegut Luft anstatt Wasser transportiert, was für die Transporteffizienz in gleicher Weise negativ ist.

Zu beachten gilt es aus praktischer Sicht, dass es sich dabei um einen theoretischen Durchschnitt handelt. Bei geringeren Entfernungen sind weniger Transportfahrzeuge nötig, bei größeren Entfernungen werden zusätzliche Fahrzeuge benötigt.

Erntegut-Gemisch Separation FHD

Für die Trennung von Korn und Biomasse wird eine Separationseinheit mit hoher Leistung von etwa 10.000 m³ pro Tag angenommen, wobei die Erntemasse hier ca. 8.000 m³ pro Tag (12 Std.) beträgt. Für die noch nicht real existierende Anlage werden Anschaffungskosten von 400.000 € angenommen und 50 €/Std. für den Betrieb der Anlage. Pro Hektar ergibt dies 13,02 €/ha berechnete Reinigungskosten.

Die Zahl von 8.000 m³ pro Tag ist nicht unüblich, da Trommelsiebreiniger für Getreide bis zu 10.000 t Getreide in 24 Stunden verarbeiten können, was je nach Dichte über 12.000 m³ Getreidekörnern entspricht (vgl. MaWi Schütz GmbH, 2021, Listenpreis Hersteller: 95.000 € ohne Beschickungs- und Zuführungseinrichtungen). Das Feldhäckseldruscherntegut aus Körnern und Biomasse mit nur 120 kg/m³ würde bei den genannten Annahmen eine Tonnage von 1.000 Tonnen pro Tag nicht überschreiten. Es scheint realistisch, dass ein Siebtrommelreiniger mit weniger als 10 % seiner angegebenen Leistung auch die Erntegutgemische von Doppelernteverfahren mit sehr hohen Anteilen Biomasse von den darin enthaltenen Körnern separieren kann, was jedoch noch abschließend erforscht werden muss. Mittels Luft und Sieben in der rotierenden Trommel werden die Körner in mehreren Stufen von den Biomassebestandteilen mit einer Vorreinigungsleistung von Getreide nach dem Mähdrusch von bis zu 500 t/Std. getrennt.

„Reststoff-Endprodukt“ und Lagerung FHD

Die Berechnungsdefinitionen des Feldhäckseldruschs werden für den anschließenden Berechnungsteil in zwei Verfahren differenziert, indem unterschiedliche Biomasseendprodukte bzw. Lagerungsmöglichkeiten verglichen werden. Diese beiden Möglichkeiten werden hier stellvertretend für alle weiteren Verfahren vorgestellt, da neben unterschiedlichen Endprodukten auch andere Kosten anfallen.

Erläuterung zur nicht behandelten Folienschlauchlagerung der Biomasse

Eine dritte Lagerungslösung neben Rundballen und Freilager stellt der Folienschlauch dar, in dem das Erntegut der Doppelernteverfahren geschützt vor Witterung und Verschmutzung, die vom Untergrund ausgeht, konserviert werden kann. Das Biomasse-Erntegut kann darin mit einer Dichte von bis zu 200 kg/m³ gelagert werden (Rumpler, 2015). Jedoch stellt dies eine weitere Option und somit eine zusätzliche Variable für die Berechnungen dar, was die ohnehin große Komplexität weiter erhöhen würde. Daher und weil Literatur zu den Kosten der Schlauchlagerung aufgrund der geringeren Verbreitung rar ist, lassen sich nur sehr schwer Annahmen begründen. Die Schlauchlagerung wird in den eigenen Berechnungen somit nicht betrachtet. Es wird lediglich eingeschätzt, dass sich die Kosten in etwa zwischen denen der Freilagerung und denen des stationären Ballenpressens befinden.

Freilager FHD

Für diese Form der Lagerung wird in der Kostenberechnung angenommen, dass lediglich ein Traktor mit einer Leistung von 95 PS an der Einrichtung des Spreuhaufens beteiligt ist. Diese

Lagerungsform wird als „Freilager“ bezeichnet. Sie stellt lediglich einen nicht abgedeckten Haufen der Restbiomasse dar, die mit einem Traktor aufgeschoben wird.

Stationäres Rundballenpressen („Multibaler“) FHD

Auch dieses Verfahren wird hier stellvertretend für alle folgenden Doppelernteverfahren beschrieben. Der „Multibaler“ ist eine Rundballen-Press-Wickel-Kombination mit Vorbunker zur kontinuierlichen Erntegutaufnahme trotz technisch bedingtem, intervallmäßigem Ballenwickeln (Schweizer Landtechnik, 2021). V.a. gehäckseltes Erntegut wie Silomais soll damit verarbeitet werden, weshalb sich die Presse mit Riemen für Spreu eignet.

Für die Rundballen mit einer Größe von 120 cm Breite und 115 cm Durchmesser ergibt sich ein Ballenvolumen von je 1,25 m³. Für das darin gepresste Gemisch aus Spreu und Stroh werden 150 kg/m³ angenommen. Mit dem Biomasseertrag (Spreu und Stroh) von 5,50 t/ha (abgeleitet von 6,50 t/ha Kornertrag) ergibt sich ein gepresstes Volumen von knapp 37 m³/ha bzw. 30 der o.g. Rundballen pro Hektar. Um die Kosten bei anderen Dichten (Stroh 100 kg/m³ oder nur Spreu 200 kg/m³) berechnen zu können, werden zunächst die variablen Kosten pro Ballen berechnet und daraus die Kosten pro Kubikmeter abgeleitet. Denn die variablen Kosten für die Mantelfolie bei Rundballen sind ein großer Einflussfaktor auf die Kosten des Pressens. Statt Netzbindung wird die Ballenbindung mit Mantelfolie angenommen, um die Rieserverluste der sehr feinen Spreu zu reduzieren.

Je Ballen wird angenommen, dass 11 m Mantelfolie oder Netz benötigt werden (KTBL, 2021). Die Kosten der Mantelfolie belaufen sich auf 148 € für 1650 m (vgl. KTBL, 2021, S. 254), also 0,09 €/m und damit auf 1 € pro Rundballen. Zusätzliche variable Kosten belaufen sich auf 0,80 € pro Ballen, wodurch in Summe 1,80 € pro Ballen resultieren. Geteilt durch das Ballenvolumen ergeben sich somit 1,45 € Kosten je Kubikmeter gepresstem Material, was zur weiteren Kostenberechnung pro Hektar als Wert herangezogen wird. Zuzüglich Abschreibung, basierend auf 155.000 € Anschaffungskosten, laut KTBL etwa das 1,5-fache einer normalen Press-Wickelkombination ohne Vorbunker und stationärem Antrieb, sowie dem Zinsansatz werden bei den beschriebenen Annahmen etwa 70 €/ha Kosten für das stationäre Pressen der angegebenen Biomassemenge angesetzt. Zudem ist ein 150-PS-Traktor einkalkuliert, der die Ballen im Anschluss stapelt und Kosten von umgerechnet 6 €/ha aufweist.

Verlustannahme und „Übergang“ in die Biomasse FHD

Alle Ernteverfahren haben unterschiedliche Anteile an Verlusten bzw. einen Übergang von voll vermarktungsfähigen Körnern in die Biomasse. Aufgrund des hohen, anhand des eigenen Versuchs erläuterten Bruchkornanteils beim Feldhäckseldrusch ist dieser Kornübergang in die

Biomasse, also Bruchkorn das nicht mit den Körnern vermarktet werden kann, besonders hoch. Die Annahme ist mit 14 % angesetzt (vgl. Kapitel 3.4.1). Zudem ist pauschal 1 % Gesamtverlust aufgrund des kontinuierlichen Überladevorgangs angesetzt. Konkret bedeutet dies, dass von den 6,50 t/ha angesetztem Kornertrag lediglich 5,52 t/ha mit 200 €/t voll vermarktungsfähig sind. 0,07 t/ha gehen als Verlust verloren und 0,91 t/ha der Körner werden bei der stationären Separation nicht zu den Körnern sortiert, sondern der Biomassefraktion zugeteilt. Die Menge der Biomasse pro Hektar erhöht sich somit von ursprünglich 5,50 t/ha auf jetzt 6,41 t/ha, die mit 80 €/t vermarktet wird.

Für die Bruchkornanteile, die klein aber verhältnismäßig schwer sind, wird angenommen, dass sich trotz des so resultierenden, höheren Biomassegewichts das Volumen der gepressten Biomasse nicht zunimmt, wodurch die vorherige Kalkulation der stationären Presskosten nicht beeinflusst wird.

Humusreproduktionskosten Annahmen allgemein und FHD

Der Humus bzw. Kohlenstoff, der dem Boden durch die Abfuhr der Biomasse entzogen wird, soll dem Boden langfristig „zurückgegeben“ werden, um den Humusgehalt und damit die Bodenfruchtbarkeit nicht zu beeinträchtigen. Dafür wird angenommen, dass im Anschluss an die Ernte stets eine Zwischenfrucht ausgesät wird. Für die Aussaat, z.B. gemeinsam mit einer ersten, flachen Stoppelbearbeitung, werden Kosten von 45 €/ha angenommen. Dazu kommen die Saatgutkosten, die mindestens 30 €/ha betragen und die sich mit zunehmender Biomasseabfuhr vom Feld erhöhen. So wird eine höherwertige Zwischenfruchtmischung angenommen, die für den Boden wertvoller ist, um die höhere Kohlenstoffentnahme aus dem Boden in Form der höheren Biomasseabfuhr auszugleichen. Auch ohne direkten Zusammenhang wird dafür der dt/ha-Ertrag der Biomasse als Bezugsgröße herangezogen und davon die Saatgutkosten in €/ha in derselben Höhe wie der dt-Ertrag angenommen. Bei 55 dt/ha betragen die angenommenen Saatgutkosten 55 €/ha (vgl. de Witte und Latacz-Lohmann, 2014).

Die in diesem Fall resultierenden Kosten für den Humuserhalt in Höhe von 100 €/ha für Saatgut und Arbeiterleistung werden ebenso wie die Ernteverfahrenskosten von den monetären Leistungen von Körnern und Biomasse abgezogen und damit wie die individuellen Werte der anderen Verfahren in die Kalkulation eingerechnet.

Neben den Kosten zum Humuserhalt werden auch die Kosten der in der Biomasse enthaltenen Nährstoffe berücksichtigt, deren monetärer Düngewert von der Fläche entfernt und in anderer Form der Folgekultur zugeführt werden muss. Pro Tonne Biomasse werden dafür 22 € angenommen (vgl. Wochenblatt, 2013 und Schindler, 2021), was beim Feldhäckseldruschverfahren

121,00 €/ha verlorenem Düngewert entspricht. Dieser Betrag wird zusätzlich zu den Humusreproduktionskosten von den EKFL subtrahiert.

FHD zusammengefasst

Die beiden FHD-Ernteverfahren, die im weiteren Verlauf der Arbeit vergleichend zu anderen Verfahren herangezogen werden, werden mit folgenden Kurzbezeichnungen gekennzeichnet:

1. „9 FHD 75 % + Spreu, Traktor fahrend umladen, Freilager“
(Feldhäcksler + 3-in-1-Transport; Separation; Lagerung im Freien)
2. „9 FHD 75 % + Spreu, Traktor fahrend umladen, Multibaler stationär“
(Feldhäcksler + 3-in-1-Transport; Separation; Rundballenpressen stationär; Lagerung)

In dieser Bezeichnung sind alle verfahrensspezifischen Besonderheiten zur Abgrenzung enthalten. Dazu zählen die Arbeitsbreite, das Ernteverfahren, der Strohanteil, die Logistik und die Lagerung bzw. das Endprodukt. Zusammen mit den allgemeinen Annahmen wie Ertrag, Feldlänge, Preise, etc., die für alle Verfahren gelten, werden die Ergebnisse nach zuvor detailliert beschriebener Methodik weitgehend automatisiert und v.a. vereinheitlicht ermittelt. Damit sind mögliche Eingabefehler bei der Vielzahl an Verfahrensoptionen maximal reduziert und gleichzeitig ist eine möglichst genaue Vergleichbarkeit gegeben.

3.4.3 Mährescher Ernteverfahren „MD“

Die Mährescher-Ernteverfahren werden ebenfalls mit zwei Verfahrensoptionen definiert und anhand der Ergebnisse verglichen. Davon lassen sich später jedoch einige Kennzahlen für zwei weitere Mähdruschverfahren ableiten. Der erste Teil der Berechnung ist bei beiden MD Verfahren identisch, da es sich hierbei um den Mähdrusch und den anschließenden Korntransport handelt. Im zweiten Berechnungsschritt wird einmal die Ballenkette im Anschluss angenommen und einmal die Spreuernte mit dem Thierart Spreusammelwagen mit jeweils einer zusätzlichen, zweiten Logistikkette. Aus diesen Verfahren heraus können Rückschlüsse gezogen werden auf die Kosten des Mähdruschs ohne Biomasseernte und auf ein kombiniertes Ernteverfahren, bei dem sowohl die Ballenkette als auch die Spreuernte mit Sammelwagen gleichzeitig durchgeführt werden.

Wie für den Feldhäckseldrusch gelten für alle beschriebenen Verfahren die allgemeinen Annahmen (vgl. Tabelle 7) u.a. zu Erträgen und Feldgröße. Für den Mähdrusch mit anschließender, vielverbreiteter Ballenkette bedarf es keiner schematischen Darstellung. In Abbildung 8 ist jedoch der Mährescher mit angehängtem Spreusammelwagen und allen in der Maschine verlaufenden Gutströme in jeweils unterschiedlichen Farben dargestellt.

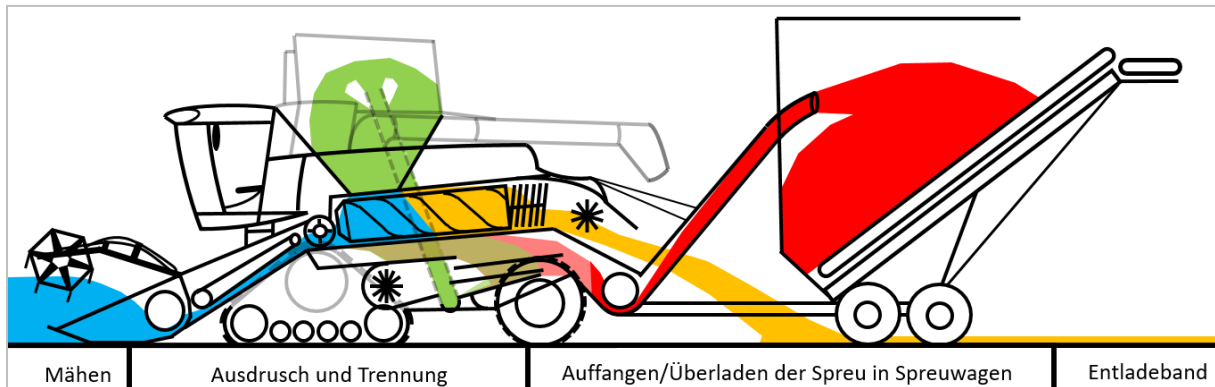


Abbildung 8: Gutströme im Mähdrescher mit Spreusammelwagen

Quelle: Eigene Darstellung

Das gesamte Erntegut (blau) wird zunächst ausgedroschen, wodurch die Strohfraktion (gelb) im Druschrotor zurückbleibt und anschließend gehäckselt oder in Schwadablage zurück auf den Acker geleitet wird. Das ausgedroschene Korn-Spreu-Gemisch (braun) fällt auf die Kornreinigung des Mähdreschers und wird mit den Sieben und dem Luftstrom in die Kornfraktion (grün) und die Spreufraktion (rot) separiert. Das Korn wird in den Korntank befördert und die Spreu wird mit einem Gebläse im Sammelwagen bis zur Übergabe an ein Transportfahrzeug zwischengelagert.

Berechnung Hektarleistung und Kosten des Mähdruschs

Als Erntevorsatz wird das gleiche Getreideschneidwerk mit 9 m Arbeitsbreite wie beim Feldhäckseldrusch angenommen. Der angenommene, dazu passende Mähdrescher mit Axialdruschwerk besitzt 475 PS Motorleistung, kostet in der Anschaffung etwa 435.000 Euro und wird über 3.000 Betriebsstunden nach Leistung abgeschrieben. Die Reparatur- und Verschleißkosten belaufen sich auf 20 Euro pro Betriebsstunde.

Die Arbeitsgeschwindigkeit wird mit Maschinenkorrektur- und Ertragsdaten auf genau 8 km/h errechnet, wodurch sich mit der Arbeitsbreite, Transport- und sonstigen Verlustzeiten eine Flächenleistung von 6,07 ha/Std. ergibt, bzw. 3,95 Stunden benötigte Zeit für das 24 Hektar große Feld. Dafür wird angenommen, dass das Erntegut während der Fahrt auf die Transportfahrzeuge übergeben wird und es daher nicht zu Verlustzeiten für den Mähdrescher als Schlüsselmaschine kommt. Allerdings wird die Erntegutübergabe nicht kontinuierlich wie beim Feldhäckseldrusch durchgeführt, sondern in Intervallen, wenn der Korntank voll ist.

Berechnung Kraftstoffverbrauch Mähdrescher

Der Kraftstoffverbrauch wird mit denselben Parametern wie beim Feldhäckseldrusch berechnet. Pro Hektar ergibt sich für den Mähdrescher ein Kraftstoffverbrauch von 11,28 Litern.

Berechnung Logistik MD

Angenommen werden für den Körnertransport dieselben Transportgespanne aus 250 PS Traktor und 60 m³ Kippanhänger wie beim FHD. Aufgrund der wesentlich höheren Dichte der reinen Körner ist hierbei die maximale Nutzlast von 25 t begrenzend für die Transportkapazität. Hof-Feld-Entfernung und andere allgemeine Annahmen sind identisch. Daraus ergibt sich auch die identische Fahrzeit für die Transportfahrzeuge von 41,1 Minuten. Um die insgesamt nur 7 benötigten Fahren innerhalb der etwa 4 Stunden bewältigen zu können, reichen demnach 2 Transportgespanne aus, die mit den zugehörigen Kosten in die weitere Berechnung einbezogen werden.

Berechnung Biomasseernte im Anschluss an den Mähdrusch

In diesem zweiten Berechnungsschritt im Anschluss an den Mähdrusch wird in zwei Verfahrensoptionen unterschieden:

1. Anschließende Strohballenkette zur Bergung des nach der Schwadablage erntbaren Strohanteils in Höhe von 3,12 t/ha in Form von Rundballen.
2. Thierart Spreusammelwagen, angehängt an den Mähdrescher für die Spreuernte in Höhe von 1,60 t/ha mit anschließender Freilagerung.

Berechnung Strohballenernte (1. Option MD)

Zum Ballenpressen wird eine Fahrzeugkombination aus 150 PS Traktor und Rundballenpresse mit 1,50 m Ballendurchmesser angenommen. Das Volumen bei 1,20 m Ballenbreite ergibt dann 2,10 m³ je Rundballen mit einer angenommenen Dichte bei reinem Stroh von 100 kg/m³. Bei 3,12 t/ha Stroh ergeben sich daraus 31,20 m³/ha gepresst. Je Ballen ergeben sich hier variable Kosten von 1,05 € unter Einbeziehung von Ballennetz, welches verglichen mit Mantelfolie günstiger ist. Das entspricht 0,50 €/m³ gepresstem Stroh. Wie die variablen Kosten betragen auch die Fixkosten nur rund ein Drittel der beim FHD stationär gepressten Ballen aufgrund der Investitionsausgaben von nur 45.000 € der weniger komplexen aufgebauten Rundballenpresse anstelle des Multibalers. Ein weiterer 150 PS Traktor wird zum Laden der Strohballen auf dem Feld angenommen.

Berechnung Strohballenlogistik (1. Option MD)

Die Fahrzeugkombinationen zum Strohttransport bestehen ebenfalls aus Traktoren mit 150 PS und Tiefladern, die es erlauben, 60 m³ in Form gepresster Ballen zu transportieren. Sowohl zur Beladung, als auch zur Entladung werden je 15 Minuten angenommen. Ansonsten wird der Strohttransport nach demselben Schema wie in den vorherigen Transportberechnungen durchgeführt, wodurch sich ein Bedarf von 4 Ballentransportgespannen ergibt. Pro Fuhre können etwa 6 Tonnen gepresste Ballen transportiert werden, was einer Ausnutzung der Nutzlast von nur 24 % entspricht. Neben dem Traktor zur Beladung wird in der Berechnung ein weiterer Traktor zum Entladen und Stapeln der Strohballen angenommen.

Berechnung Spreusammelwagen (2. Option MD)

Der bereits vorgestellte Spreusammelwagen von Thierart mit Überladevorrichtung ist an den Mähdrescher angehängt und wird mittels Zusatzgebläsen am Siebabgang des Mähdreschers mit loser Spreu befüllt. Die Kostenannahme beläuft sich auf 60.000 €. Das nutzbare Volumen beträgt 25 m³, womit etwa 1,25 Tonnen der losen Spreu geladen werden können.

Berechnung Spreulogistik (2. Option MD)

Für den losen Spreutransport werden wieder die 150 PS Traktoren angenommen, mit 60 m³ Kipper. Darauf können etwa 3 Tonnen Spreu transportiert werden, was einer Ausnutzung der Nutzlast von nur 12 % entspricht. Es werden 3 der Fahrzeugkombinationen benötigt um den Spreutransport sicherzustellen. Außerdem wird in die Berechnung ein Kleintraktor miteinbezogen, um die lose Spreueinlagerung zu unterstützen.

Verlustannahme und „Übergang“ in die Biomasse MD

Für den Mähdrescher wird angenommen, dass die Reinigungs- und Dreschwerksverluste je 1 % betragen und der Bruchkornanteil bei 1,5 % liegt. Daraus ergeben sich insgesamt 3,5 % Verluste bzw. 96,5 % voll vermarktungsfähige Körner (vgl. Rumpler, 2018; Rumpler, 2019; Spomer und Stiegemann, 2020; Feiffer, 2015; Walch, 2019).

In der 1. Option, der Ballenkette, bleiben von 6,50 t/ha Ertrag somit noch 6,27 t/ha voll vermarktungsfähig. Da die Spreu unter dem Stroh aus dem Mähdrescher ausgeschieden wird, ist diese unwiederbringlich auf dem Feld verloren, wodurch es keinen „Übergang“ von Korn in die Biomasse gibt. Die monetären Leistungen aus Stroh betragen 249,60 €/ha.

In der 2. Option, dem Mähdrescher mit Spreusammelwagen, werden hingegen Verlust- und Bruchkörner dem Spreuanteil hinzugefügt, der sich dadurch von 1,60 auf 1,80 t/ha erhöht. Die

monetären Leistungen dieser Biomasse belaufen sich auf 144,38 €/ha bei gleichem, angenommenen Verkaufspreis von 80 € pro Tonne wie beim Stroh. Hier ist eine weitere Annahme, dass das Stroh ohne zusätzliche Kosten gehäckselt und auf dem Feld verteilt wird.

Humusreproduktionskosten Annahmen MD

Die Arbeitserledigungskosten für die Zwischenfruchtaussaat sowie das Zwischenfruchtsaatgut beträgt bei beiden Mähdruschverfahren ca. 75 €/ha, angenommen nach gleicher methodischer Vorgehensweise wie beim FHD Verfahren (mit 100 €/ha) erläutert. Aufgrund der niedrigeren Biomasseentnahme vom Feld bei den Mähdruschverfahren wird davon ausgegangen, dass eine weniger hochwertige Zwischenfruchtmischung bereits den niedrigeren Kohlenstoffverlust ausgleichen kann. Die Nährstoffwerte der mitgeernteten Biomasse liegen bei 35,20 €/ha, bzw. bei 68,64 €/ha. Diese werden ebenfalls von den EKFL abgezogen.

Mähdruschverfahren zusammengefasst

Die beiden MD-Ernteverfahren, die im weiteren Verlauf der Arbeit vergleichend zu anderen Verfahren herangezogen werden, sind von nun an mit folgenden Kurzbezeichnungen gekennzeichnet:

1. „9 MD + Rundballen (= 60 % Stroh), Traktor, fahrend umladen“
(Mähdrusch + Transport; Ballenpressen + Transport inkl. auf- und abladen)
2. „9 MD + Thierart (nur Spreu lose), Traktor fahrend umladen, Freilager“
(Mähdrusch + Transport; Spreuernte mit Sammelwagen + Spreutransport)

In den Bezeichnungen sind wie schon beim Feldhäckseldrusch alle verfahrensspezifischen Besonderheiten zur Abgrenzung enthalten. Außerdem wurde in den Verfahren im ersten Berechnungsteil der Mähdrusch inkl. Transport berechnet, was ein weiteres Ernteverfahren darstellt. Für die Kosten und Erlöse der getrennten Spreu- und Strohernte mit Spreusammelwagen ohne Strohhäckseln und stattdessen Rundballen pressen, lassen sich im Ergebnis teil tendenzielle Aussagen ableiten.

3.4.4 Kompakternteverfahren „KPE“

Das in Kapitel 2.5.4 vorgestellte Kompakternteverfahren wird mit insgesamt vier Verfahrensoptionen definiert und anhand der Ergebnisse verglichen. Aufgrund der theoretisch hohen Flexibilität bezüglich des Anteils der Biomasse im Erntegut werden die vier Verfahren lediglich mit dieser Variablen verändert, was im Detail verschiedene Biomasseerntemengen für die Berech-

nungen bedeutet: ´nur´ Spreu sowie Spreu + 25, + 50 und + 75 % Strohhanteil. Die vier Kompakternteoptionen werden mit den identischen, allgemeinen Annahmen wie bei den bisher beschriebenen Ernteverfahren für u.a. Erträge und Feldlänge berechnet.

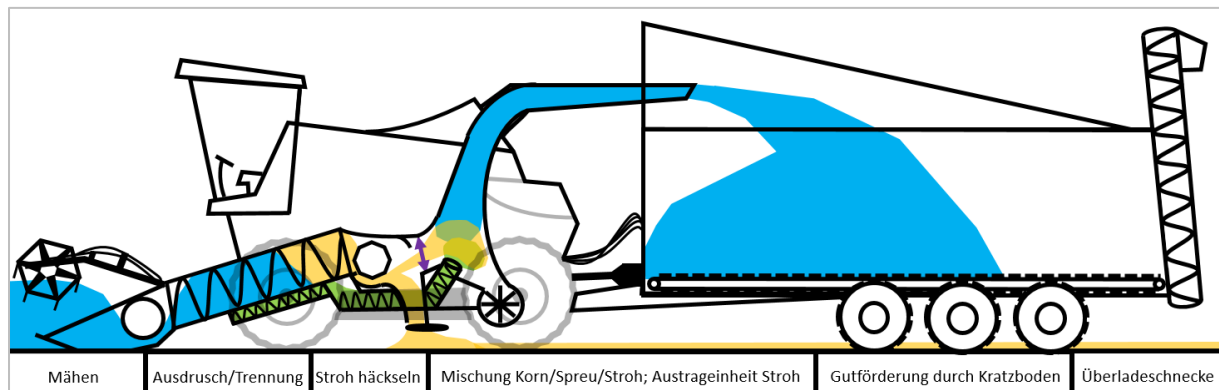


Abbildung 9: Gutfluss des Kompakternters mit Beschriftung

Quelle: Eigene Darstellung

Die schematische Abbildung 9 des Kompakternters zeigt, dass das Erntegut (blau) ausgedroschen wird, wodurch das Stroh (gelb) im Axialrotor zurückbleibt, welches zunächst gehäckseln wird. Das ausgedroschene Korn-Spreu-Gemisch (grün) wird in den hinteren Maschinenteil gefördert, von wo aus es in den Bunkerwagen befördert wird. Diesem Gutstrom kann die gewünschte Menge des gehäckselten Strohs flexibel hinzudosiert werden, z.B. 25 % der Strohfraction. Die übrigen 75 % gehäckseltes Stroh werden seitlich aus der Maschine befördert und auf dem Feld verteilt.

Berechnung Hektarleistung und Kosten der Kompakternte

Als Erntevorsatz wird das identische Getreideschneidwerk mit 9 m Arbeitsbreite wie bei den zuvor beschriebenen Verfahren angenommen. Für den fiktiv angenommenen, dazu passenden Kompakternter mit 400 PS werden mit 280.000 € etwas mehr als 3/4 des Anschaffungspreises eines Mähdreschers mit vergleichbarer Motorleistung angenommen. Der niedrigere Wert wird damit begründet, dass der Kompakternter weniger komplex aufgebaut ist als der Mähdrescher, da bei der Kompakternte die vibropneumatische Reinigung nicht benötigt wird. Außerdem ist auf der Maschine kein Korntank integriert, sondern das Erntegut wird auf einem 50 m³ Anhänger mit Kratzbodenförderung zwischengelagert und an die Transportfahrzeuge übergeben. Dieser Anhänger wird mit 70.000 € nach KTBL (2021) angegeben. Die Reparatur- und Verschleißkosten dieser Fahrzeugkombination belaufen sich auf etwa 21 Euro je Betriebsstunde und sind damit ähnlich denen eines vergleichbaren Mähdreschers.

Die Arbeitsgeschwindigkeit wird mit Maschinenkorrektur- und Ertragsdaten auf 8,96 km/h errechnet wodurch sich mit der Arbeitsbreite, Transport- und sonstigen Verlustzeiten eine Flächenleistung von 6,68 ha/Std. ergibt, bzw. 3,59 Stunden benötigte Zeit für das 24 Hektar große Feld. Dafür wird angenommen, dass das Erntegut während der Fahrt auf die Transportfahrzeuge übergeben wird und es daher nicht zu Verlustzeiten für den Kompakternter als Schlüsselmaschine dieser Erntekette kommt. Die Erntegutübergabe auf die Transportfahrzeuge wird wie beim zuvor beschriebenen Mähdruschverfahren in Intervallen durchgeführt, sobald der mitgeführte Häckselwagen als Zwischenbunker voll ist.

Berechnung Kraftstoffverbrauch Kompakternter

Der Kraftstoffverbrauch wird mit denselben Parametern wie bei den zuvor beschriebenen Ernteverfahren berechnet. Pro Hektar ergibt sich für den Kompakternter ein Kraftstoffverbrauch von 8,48 Litern.

Berechnung Erntegutvolumina und -zusammensetzung Kompakternte

Anders als beim Feldhäckseldrusch kann bei der Kompakternte der Biomasseanteil im Erntegut nicht nur durch die Höhe des Schneidwerks beeinflusst werden, sondern auch durch die Maschine selbst, wie in der schematischen Darstellung bereits gezeigt wurde. Im Detail kann das ausgedroschene und gehäckselte Stroh in seinem Anteil von 0 bis 100 % Strohmitnahme variiert werden, wobei auch hier 100 % Strohernte nicht in Betracht gezogen werden. Für den weiteren Vergleich werden vier Varianten von 0 % (nur Korn und Spreu) bis hin zu 75 % betrachtet, wie die nachfolgende Auflistung inklusive Erträge, spezifischen Gewichten und Volumina beim angenommenen Kornertrag von 6,50 t/ha zeigt.

Tabelle 8: Erntegutparameter verschiedener Optionen der Kompakternte

Strohanteil	Erntegut ges.	Dichte	Volumen ca.
0 %	8,10 t/ha	199 kg/m ³	41 m ³ /ha
25 %	9,40 t/ha	175 kg/m ³	54 m ³ /ha
50 %	10,70 t/ha	142 kg/m ³	75 m ³ /ha
75 %	12,00 t/ha	123 kg/m ³	97 m ³ /ha

Tabelle 8 zeigt die Erntegutparameter wie den jeweils vorgegebenen Strohanteil, die gesamte Erntegutmasse, dessen errechnete Dichte und gerundete Volumen für die vier Optionen der Kompakternte. Bei 6,68 ha/Std. müssen somit rund 270 bis 650 m³/Std. transportiert werden,

ähnlich der Volumina beim Feldhäckseldrusch. Bei diesem waren es im Vergleich zur Kompakternte 680 m³/Std., zurückzuführen auf die höhere Hektarleistung von 7,08 ha/Std. aufgrund der höheren Fahrgeschwindigkeit.

Berechnung Logistik Kompakternteverfahren

Angenommen werden für den Transport des „3-in-1“ Korn-Spreu-Stroh-Gemischs dieselben Transportgespanne aus 250 PS Traktor und 60 m³ Kippanhänger wie bei den anderen Ernteverfahren. Mit derselben Vorgehensweise bei der Berechnung der Anzahl der Transportfahrzeuge werden bei 75 % Strohmitnahme trotz Zwischenbunkerwagen wie beim Feldhäckseldrusch 9 Transportfahrzeuge benötigt. Bei 50 % Strohmitnahme sind es noch 7 Fahrzeuge, bei 25 % Stroh im Erntegut sind es 5 und ohne Stroh sind es lediglich 4 benötigte Transportfahrzeuge. Die Nutzlast von max. 25 Tonnen wird dabei zu 30 bis 48 % ausgenutzt. Entsprechend des beschriebenen Transportbedarfs werden die einzelnen Kosten der jeweiligen Verfahrensoption zugeordnet.

Erntegut-Gemisch Separation KPE

Für die Separation werden die gleichen Annahmen wie beim Feldhäckseldrusch zugrunde gelegt, wodurch sich Separationskosten von 13,02 €/ha ergeben. Die Separationskosten werden für alle vier KPE-Verfahren mit unterschiedlichen Strohmenen im Erntegut identisch angenommen, begründet durch den Berechnungsweg pro Hektar. In der Realität könnten die Kosten bei geringen Strohanteilen jedoch geringer sein. Allerdings sind die 13,02 €/ha nur ein geringer Anteil an den gesamten Verfahrenskosten, weshalb die Unterschiede dieses geringen Anteils vernachlässigt werden. Für niedrige Strohanteile wären andernfalls etwa 5 bis 7 €/ha realistisch. Wie bereits erwähnt wird der Automatisierung der Berechnungen zur Vereinheitlichung und Fehlervermeidung große Bedeutung zugemessen. Zusammen mit dem 95 PS Traktor für die Einrichtung der Freilagerung werden den vier Kompakternteverfahren für die stationäre Verarbeitung insgesamt jeweils 18,80 €/ha Kosten zugeteilt.

Verlustannahme und „Übergang“ in die Biomasse KPE

Für das Kompakternteverfahren werden Druschverluste in Höhe von 0,5 % angenommen, die mit der Rückführung des nicht geernteten Strohanteils zurück auf das Feld gelangen und verloren gehen. Außerdem werden 0,5 % Verluste durch den Überladevorgang während der Fahrt durch wesentlich schlechtere Sicht am Fahrzeugheck als beim Mähdrescher angenommen. Der Bruchkornanteil, der von der Kornfraktion in die Biomasse gelangt, wird mit 1 % angenommen. Dadurch sind noch 98 % der Körner voll vermarktungsfähig (vgl. Mähdrescher: 96,5 %

aufgrund von Reinigungsverlusten). Von den 6,50 t/ha können somit noch 6,37 t/ha zum vollen, angenommenen Preis von 200 €/t verkauft werden. Im Vergleich zum Feldhäckseldrusch ist die Erhöhung des Biomasseanteils durch nicht voll vermarktungsfähiges Bruchkorn um hier nur 70 kg/ha nicht relevant.

Wird lediglich die Spreu als Biomasse mitgeerntet, belaufen sich die Leistungen aus Biomasse mit der Preisannahme von 80 €/t auf 133,20 €/ha. Bei zusätzlich 25 % Strohmitnahme steigt die monetäre Biomasseleistung auf 237,20 €/ha. Bei 50 % Strohmitnahme sind es 341,20 €/ha und bei 75 % betragen die Erlöse aus der Biomasse 445,20 €/ha.

Zu den verfahrensindividuellen Biomasseerlösen werden die Erlöse der voll vermarktungsfähigen Körner addiert. Davon werden die Kosten, die für das jeweilige Verfahren nach obiger Vorgehensweise berechnet wurden, subtrahiert um so die individuellen, erntekostenfreien Leistungen EKFL der vier definierten Verfahren zu erhalten.

Humusreproduktionskosten Annahmen KPE

Die Humusreproduktionskosten werden wie zuvor anhand der vom Feld abgefahrenen Biomasse angenommen. Die Tabelle 9 zeigt die Optionen der Kompakternte bzgl. Strohanteil in der Biomassefraktion und die jeweils angenommenen Saatgut- sowie Arbeitserledigungskosten für die Humusreproduktion.

Tabelle 9: Strohanteile der vier KPE-Optionen und damit verbundene, errechnete Humusreproduktionskosten

KPE Verfahren	Biomasse	Annahme Saatgut	+ 45 €/ha AEK
0 % Stroh	1,60 t/ha	30 €/ha	75 €/ha
25 % Stroh	2,90 t/ha	30 €/ha	75 €/ha
50 % Stroh	4,20 t/ha	42 €/ha	87 €/ha
75 % Stroh	5,50 t/ha	55 €/ha	100 €/ha

Die so kalkulierte Humusreproduktionskostenannahme wird als vereinfachte Annahme (vgl. Humusreproduktion FHD) für die nachhaltige Bodennutzung mit den zugeordneten Werten von den EKFL des jeweiligen Kompakternteverfahrens abgezogen. Maximal sind dies 100 €/ha bei 75 % Strohernteanteil, was 5,50 t/ha entspricht. Die Nährstoffwerte der vom Feld abgefahrenen Biomasse liegen zwischen 35,20 und 121,00 €/ha und werden zusätzlich zu den Humusreproduktionskosten von den EKFL abgezogen.

Kompakternteverfahren KPE zusammengefasst

Die vier Kompakternteverfahren sind nachfolgend mit den nicht verwechselbaren Kurzbezeichnungen aufgelistet:

1. „9 KPE 75 % + Spreu, Traktor fahrend umladen, Freilager“
(Kompakternte + 3-in-1-Transport; Separation; Lagerung im Freien)
2. „9 KPE 50 % + Spreu, Traktor fahrend umladen, Freilager“
(Kompakternte + 3-in-1-Transport; Separation; Lagerung im Freien)
3. „9 KPE 25 % + Spreu, Traktor fahrend umladen, Freilager“
(Kompakternte + 3-in-1-Transport; Separation; Lagerung im Freien)
4. „9 KPE nur Spreu, Traktor fahrend umladen, Freilager“
(Kompakternte + 3-in-1-Transport; Separation; Lagerung im Freien)

3.4.5 Ladewagen-Schwadernteverfahren „LDW“

Wie der Feldhäcksler ist auch der Ladewagen als Ernteverfahren für die Silagebereitung im Grünland weit verbreitet. Neuerdings wird dieser jedoch zusätzlich zur Ernte von Körnermaisstroh als Reststoff für die Biogasnutzung eingesetzt (vgl. LfL, 2021). Daher liegt die Überlegung nahe, den Ladewagen für die Ernte von auf Schwad abgelegten, totreifen Getreideganzpflanzen zu nutzen.

Für die Durchführung der Doppelernte wird bei diesem Ladewagen-Schwadernteverfahren ein dreistufiger Ernteprozess angenommen.

1. Schwadmähen mit Getreideschneidwerk (9 m Arbeitsbreite).
2. Aufnahme und Transport mit dem Ladewagen, angehängt an einen Traktor.
3. Separation des Erntegutmischs.

Berechnung Hektarleistung und Kraftstoffverbrauch Schwadmähen LDW

Es wird angenommen, dass ein Traktor mit Rückfahreinrichtung ein Getreideschneidwerk mit 9 m Arbeitsbreite zum Schwadmähen betreibt (vgl. Agriexpo/Honeybee, 2021). Dafür wird ein Traktor mit 300 PS angenommen.

Die Arbeitsgeschwindigkeit beim Schwadmähen wird auf 9,60 km/h errechnet, wodurch sich unter Berücksichtigung der Arbeitsbreite und sämtlichen Verlustzeiten eine Flächenleistung von 7,08 ha/Std. ergibt. Das Schneidwerk wird wie bei den anderen Verfahren mit rund 50.000

€ Anschaffungskosten angenommen, der Traktor mit 245.000 € und jeweils entsprechenden variablen Kosten. Der Dieselbedarf pro Hektar wird für diesen Arbeitsgang auf 5,94 l/ha errechnet.

Berechnung Erntegutvolumina und -zusammensetzung LDW

Es wird angenommen, dass durch das Schwadmähen das Erntegut nicht selektiv abgelegt wird und so im Ganzen als Gemisch wieder vom Ladewagen aufgenommen wird. Der Strohhanteil im Erntegut wird wie beim Feldhäckseldrusch und bei einem der Kompakternteverfahren auf 75 % des gesamten Strohertrags angenommen. Anders als bei den FHD und KPE Verfahren kann das Erntegut im Ladewagen jedoch komprimiert werden.

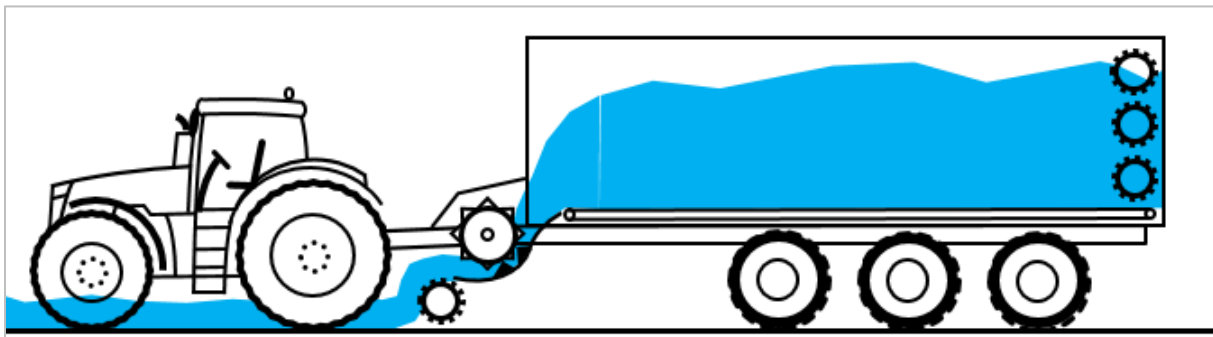


Abbildung 10: Gutfluss der Erntegutaufnahme mit dem Ladewagen

Quelle: Eigene Darstellung

Der in der Schemazeichnung (Abbildung 10) oberhalb der Pickup erkennbare Schneidrotor als zentrales Element des Ladewagens hat neben der Zerkleinerung die Funktion der Komprimierung des Ernteguts. Im Vergleich zur Silageernte ist die Verdichtung des Korn-Spreu-Stroh-Gemischs für die maximale Ausnutzung der Nutzlast noch interessanter. Der Rotor ähnelt zudem einem Verdichtungsrotor von Schlauchsilagemaschinen bei ähnlicher Funktionsweise (vgl. Eurobagging, 2021).

Rumpler (2015) gibt für ein Gemisch aus Korn, Spreu und Stroh nach der Verdichtung und Einlagerung im Siloschlauch eine Dichte von bis zu 550 kg/m³ an. Für die vorliegende Berechnung wird aufgrund des höheren Strohhanteils und unter Einbeziehung einer diesbezüglichen Sicherheitsmarge eine Dichte für den Transport im Ladewagen von 350 kg/m³ angenommen. Damit wird das Erntegutvolumen auf 34,29 m³ je Hektar reduziert.

Berechnung Logistik mit Ladewagen

Der Ladewagen mit 50 m³ Inhalt ist mit obigen Dichteangaben mit 70 % seiner maximalen Nutzlast ausgelastet. Er wird gezogen und angetrieben von einem weiteren, identischen 300

PS Traktor. Das Feld mit 24 Hektar ergibt somit 17 benötigte Fahren. Sollen diese im selben Zeitraum parallel zum Schwadmähen eingebracht werden, wären 5 Ladewagengespanne erforderlich. Bezüglich der Kosten spielt es jedoch keine Rolle, ob 5 Ladewagen in kurzer Zeit oder 1 Ladewagen in der fünffachen Zeit das Erntegut zur stationären Separation transportieren, da in jedem Fall von voll ausgelasteten Maschinen ausgegangen wird, die nach Nutzungsumfang abgeschrieben und darauf basierend berechnet werden. Die Kostenberechnung des Ladewagens wird auf Grundlage von KTBL Daten durchgeführt, wonach dieser 140.000 € in der Anschaffung kostet und etwa 17 €/Std. Reparatur- und Verschleißkosten anzusetzen sind.

Erntegut-Gemisch Separation Ladewagenernteverfahren

Für die Separation des Erntegutgemischs ergeben sich die identischen Separationskosten von 13,02 €/ha. Jedoch werden hier die doppelten Kosten von 26,05 €/ha angenommen, da die Körner des Ernteguts vermutlich nur zu einem geringen Anteil aus den Ähren herausgelöst sind, was eine zusätzliche Bearbeitung des Ernteguts erfordert. Zusammen mit dem 95 PS Traktor für die Einrichtung der Freilagerung belaufen sich die Kosten der Ladewagenernte für die stationären Arbeiten auf 30,78 €/ha.

Verlustannahme und „Übergang“ in die Biomasse LDW

Für die Ladewagenernte werden Bergeverluste des Schwads von 10 % angenommen (0,65 t/ha), die somit verloren sind. Jedoch wird eingeschätzt, dass dies stark von Reifegrad, Liegedauer und Feuchtegehalt abhängig ist. Weitere 5 % (0,33 t/ha) werden als mindere Qualität durch Beschädigungen angenommen und damit verbundenen Bruchkornanteilen durch den Schneidrotor des Ladewagens. Dieser Anteil ist jedoch nicht gänzlich verloren, sondern kann der Biomasse zugeteilt und mit dem niedrigeren Preisansatz von 80 €/t vermarktet werden. Somit bleiben lediglich 85 % (5,53 t/ha) der Körner zum Preis von 200 €/t voll vermarktungsfähig. Der resultierende Erlös aus Biomasse beträgt 466 €/ha.

Humusproduktionskosten Annahmen LDW

Wie bei den KPE und FHD Verfahren mit Spreu und 75 % Strohanteil in der Biomassefraktion, die vom Feld abgefahren wird, werden auch bei dieser Variante mit Ladewagen 100 €/ha für die Stoppelbearbeitung mit der Aussaat einer Zwischenfrucht als Maßnahme zur Humusregeneration angesetzt. Der Nährstoffwert der abgefahrenen Biomasse beträgt 121,00 €/ha. Die Beträge werden nach bekannter Vorgehensweise von den erntekostenfreien Leistungen abgezogen.

Zusammenfassung und Kurzbezeichnung des LDW Ernteverfahrens

Das Ladewagenernteverfahren ist denkbar einfach und mit vorhandener Technik weitestgehend lösbar. In der Praxis sind vermutlich die hohen Kornverluste abschreckend, jedoch sind die ökonomischen Ergebnisse im später folgenden Ergebnisteil vielversprechend. Das Verfahren wird mit nachfolgender Kurzbezeichnung in den Ergebnisdiagrammen dargestellt:

„9 LDW (Schwadmähen + Ladewagenaufnahme + Traktortransport = Spreu+Stroh 75 %), Freilager“

3.4.6 Ährenstripper Ernteverfahren „Strip“

Das vierte Doppelernteverfahren ist die Korn-Spreu-Ernte mit dem Ährenstripper, einem schneidwerksähnlichen Erntevorsatz für Mähdrescher, der kein Stroh aufnimmt sondern mittels rückwärtsrotierendem Fingerrotor lediglich die Ähren vom Getreidehalm abstreift und der Maschine zuführt. Dabei wird bereits ein Großteil der Körner aus dem Spelz herausgelöst. Die Getreidehalme bleiben in voller Länge auf dem Feld stehen, auch gefallenenes Lagergetreide kann damit „aufgekämmt“ und geerntet werden (vgl. Shelbourne Reynolds, 2021).

Mit der zunehmenden Verbreitung von Hanf als Nutzpflanze wird der Ährenstripper vermehrt zur Ernte der Hanfsamen eingesetzt. Dafür ist der Ährenstripper an ein Trägerfahrzeug wie z.B. einen Traktor gekoppelt und nimmt die entsprechenden Pflanzenteile auf. Nach diesem Prinzip wird für dieses Doppelernteverfahren die Ernte von Korn und Spreu angenommen, um die Ernte von Getreide und zusätzlicher Spreu als Rohstoff ohne Mähdrescher, sondern lediglich mit einem kostengünstigeren Traktor durchführen zu können.

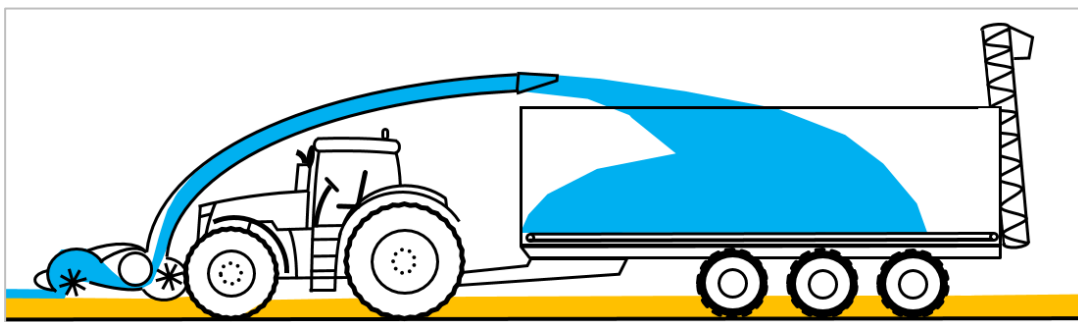


Abbildung 11: Doppelernteverfahren für Getreidekörner und -spreu mit Ährenstripper am Traktor und Zwischenbunkerwagen

Quelle: Eigene Darstellung

Wie in der Abbildung 11 dargestellt, werden die Ähren (Körner und Spreu in blau) von den Halmen (gelb) abgestreift. Es ist nicht möglich, Stroh mit zu ernten. Die Halme bleiben in ganzer Länge auf dem Feld stehen, was zu Vorteilen für den Boden und die Etablierung von Zwischenfrüchten durch die Beschattung führen kann.

Berechnung Hektarleistung und Kosten der Stripperernte

Bei diesem Doppelernteverfahren kommt statt dem Getreideschneidwerk der Ährenstripper mit 9 m Arbeitsbreite zum Einsatz. Da dieser das Erntegut vom Halm abstreift ist der Erntevor-satz nicht auf den am Standardschneidwerk eingesetzten Scherenschnitt angewiesen, wodurch höhere Arbeitsgeschwindigkeiten realisiert werden können. Die Arbeitsgeschwindigkeit des Strippers wird ertragsabhängig auf hier 10,88 km/h berechnet. Die Flächenleistung beträgt daher 7,83 ha/Std. bzw. es werden nur 3,07 Stunden für das 24 Hektar große Feld benötigt.

Angebaut ist der Ährenstripper an einen Traktor mit 300 PS, der wie der Kompakternter einen Anhänger als Erntegutzwischenbunker angehängt hat. Die Anschaffungskosten des Strippers werden auf 90.000 € geschätzt und mit diesem Wert für die weitere Berechnung angenommen. Der Kraftstoffverbrauch bei dieser Form der Getreideernte wird auf 5,24 l/ha errechnet und ist damit am niedrigsten im Vergleich zu den anderen Verfahren.

Berechnung Erntegutvolumina und -zusammensetzung Kompakternte

Der Ährenstripper lässt lediglich eine Variante an Erntegut zu: Korn und Spreu. Beim angenommenen Ertrag von 6,50 t/ha ergibt sich daraus ein Erntegutmisch mit einer Dichte von 200 kg/m³ und ein Volumen pro Hektar von 40 m³. Bei der oben angegebenen Flächenleistung sind dies etwa 310 m³ die pro Stunde von Feld abtransportiert werden müssen.

Berechnung Logistik Stripperernte

Die dafür erforderliche primäre Logistik wird mit den bekannten Transportkombinationen aus 250 PS Traktor und 60 m³ Kipper durchgeführt, die bei der vorliegenden Dichte mit 48 % ihrer maximalen Nutzlast beladen sind. Um die insgesamt knapp 200 Tonnen Erntegut vom 24 Hektar großen Feld innerhalb von 3 Stunden zu transportieren sind rechnerisch 5 dieser Transportgespanne notwendig, die die insgesamt 17 Fuhren vom Feld zur 10 km entfernten Separation bewerkstelligen. Entsprechend des beschriebenen Transportbedarfs werden die einzelnen Kosten dem Verfahren zugeordnet.

Erntegut-Gemisch Separation Ährenstripperernte

Im folgenden Berechnungsschritt wird die Kostenkalkulation für die Separation des Erntegutmischs vorgenommen. Weitere Logistikschritte sind nicht erforderlich. Für die Separation werden die gleichen Annahmen wie bei vorherigen Verfahren verwendet, wodurch sich hier aufgrund der höheren Hektarleistung der Erntemaschine pro Stunde Separationskosten von 11,78 €/ha ergeben.

Zwar ist es wesentlich einfacher, das Korn-Spreu-Gemisch in seine Bestandteile zu separieren als wenn darin wie bei den anderen Doppelernteverfahren noch Stroh enthalten ist. Jedoch ist der Ausdrusch durch den Ährenstripper nicht 100 %, wodurch eine Erntegutnachbearbeitung bei der Separation notwendig wird. Somit werden die 11,78 €/ha als passend für die hier benötigte Korn-Spreu-Separation angenommen. Zusammen mit dem 95 PS Traktor für die Einrichtung der Freilagerung werden für die stationären Arbeiten des Stripperernteverfahren 16 €/ha Kosten angenommen.

Verlustannahme und „Übergang“ in die Biomasse beim Stripperernteverfahren

Durch den rückwärts rotierenden Fingerrotor zum Abstreifen der Ähren vom Halm kommt es in Abhängigkeit von Feuchtegehalt und Abreife zu sogenannten Spritzverlusten beim Einsatz des Ährenstrippers. Die Höhe der Spritzverluste wird mit 2 % angenommen. Ebenso werden 2 % Bruchkorn angenommen, was v.a. bei trockenen Ernteverhältnissen auftreten kann. Somit sind 96 % (6,24 t/ha) der Körner voll vermarktungsfähig, 2 % (0,13 t/ha) gehen verloren und weitere 2 % (0,13 t/ha) gelangen bei der stationären Separation in den Spreuanteil. Bei 80 €/t für die Biomassefraktion ergeben sich 138,40 €/ha monetäre Leistungen. Die Kornfraktion kann 1248,00 €/ha Erlösen. Von der Summe der Erlöse werden die Erntekosten abgezogen woraus die erntekostenfreien Leistungen resultieren.

Humusreproduktionskosten Annahmen Stripperernte

Von den EKFL werden für den bei der Stripperernte nur geringen vom Feld entfernten Biomasseanteil weitere 75 €/ha subtrahiert um die Stoppelbearbeitung mit der kombinierten Aussaat einer Zwischenfrucht als Maßnahme zur Humusregeneration in die Berechnung mit einzubeziehen. Der Nährstoffwert der abgefahrenen Biomasse wird mit 35,20 €/ha beziffert.

Stripperernte zusammengefasst

Das Ernteverfahren mit dem Ährenstripper am Traktor wird nachfolgend mit seiner nicht verwechselbaren Kurzbezeichnung aufgelistet:

„9 Strip (Spreu), Traktor fahrend umladen, Freilager“
(Stripperernte + 2-in-1-Transport; Separation; Lagerung im Freien)

3.5 Erstellung der Verfahren in Excel

Um die Maschinen und deren hinterlegte Daten in die Berechnung mit großer Sicherheit ohne Fehler einzufügen und diese zu einem Verfahren zu kombinieren, können die Maschinen im Berechnungsmodell mit einer Auswahlliste ausgewählt werden, wie Tabelle 10 zeigt. In der ersten Spalte sind verschiedene Maschinenkategorien dargestellt, in den weiteren Spalten folgt in jeder Spalte ein Ernteverfahren, wie in der Tabelle an drei Strip-Verfahren mit unterschiedlicher Arbeitsbreite im beispielhaften Ausschnitt.

Tabelle 10: Maschineneingabe mit Auswahlliste in das Berechnungsmodell

	12Strip (Spreu), L	9Strip (Spreu), LK	6Strip (Spreu), LK
Hauptmaschine / Traktor	350 PS	300 PS	0 PS
Erntevorsatz / Bearbeitungsgerät	Strip 12 m	250 PS	Strip 6 m
BUNKER! (Zusatzausrüstung 1)		300 PS	
Zusatzausrüstung 2		350 PS	
Zusatzausrüstung 3		400 PS	
Zusatz X (Hauptmaschine)		450 PS	
		500 PS	
		600 PS	
		700 PS	

Die Maschinenkategorien beziehen sich auf die in den Kapiteln 3.2.1, 3.2.2 und 3.2.3 beschriebenen Maschinendatenbanken und sind mit der jeweiligen Datenbank verknüpft. Die Auswahlliste, in Tabelle 10 für die Hauptmaschinen geöffnet, ist identisch mit der Auflistung der Maschinen in den Datenbanken wie z.B. für die Hauptmaschinen in Tabelle 3. Für die Datenübernahme, beispielsweise der Reparatur- und Verschleißkosten wird nach der Maschinenauswahl, z.B. der Traktor mit der Kennung „300 PS“, in derselben Spalte weiter unten in der dafür vorgesehenen Zeile mit der „SVERWEIS“ Funktion in der Datenbank nach dem entsprechenden Wert gesucht. Diese Werte werden so für alle Maschinendaten automatisch an die jeweils benötigte Stelle in der Berechnung übernommen. Neben den Maschinendaten sind lediglich die Daten für Erträge, Raumgewichte und Volumina auszuwählen. Diese werden durch die manuelle Auswahl auf gleiche Weise an die richtigen Stellen in der Berechnung übernommen.

Die Berechnungen für die Verfahren erstrecken sich inklusive Leerzeilen über 850 Zeilen. Alle Zellen einer Zeile beinhalten die identischen Formeln für eine möglichst hohe Fehlervermeidung. Die Verfahren werden ausschließlich durch die oben beschriebenen Auswahlmöglichkeiten zusammengestellt. Die in Tabelle 7 hinterlegten, allgemeinen Annahmen wie u.a. Feldentfernung und Flächengröße gelten für alle Verfahren gleich. Am Ende der Berechnung werden die wichtigen Kennzahlen der Verfahren aufgelistet und automatisiert zur Visualisierung in Diagramme übernommen.

4 Ergebnisse und Vergleich

Die Berechnungsergebnisse werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert erläutert und visualisiert. Zunächst werden die Investitionsausgaben behandelt, bevor beginnend mit den beiden etablierten Mähdruschverfahren, deren Ergebnisse als Referenzwerte dienen, die insgesamt acht beschriebenen Doppelernteverfahren aufbauend aufeinander den vergleichenden Darstellungen hinzugefügt werden. Die Ergebnisse werden so hergeleitet, dass zunächst die Kostenseite der Verfahren betrachtet wird. Im Anschluss daran werden den Kosten die Erlöse aus der Biomassefraktion gegenübergestellt und zuletzt werden von den Gesamterlösen die anfallenden Kosten abgezogen, um mit den resultierenden Werten der erntekostenfreien Leistungen (EKFL) den Verfahrensvergleich abschließen zu können. Die Sensitivitätsanalyse wird durch die Variation einzelner Parameter durchgeführt.

4.1 Investitionsausgaben

In Abbildung 12 sind die Investitionsausgaben aller behandelten Mähdrusch- und Doppelernteverfahren dargestellt. Diese sind unterteilt in die Investitionsausgaben für die Arbeitsmaschinen im Feld inklusive stationär eingesetzter Technik in Gelb (unten) und in die Investitionen für die Logistik in Blau (oben).

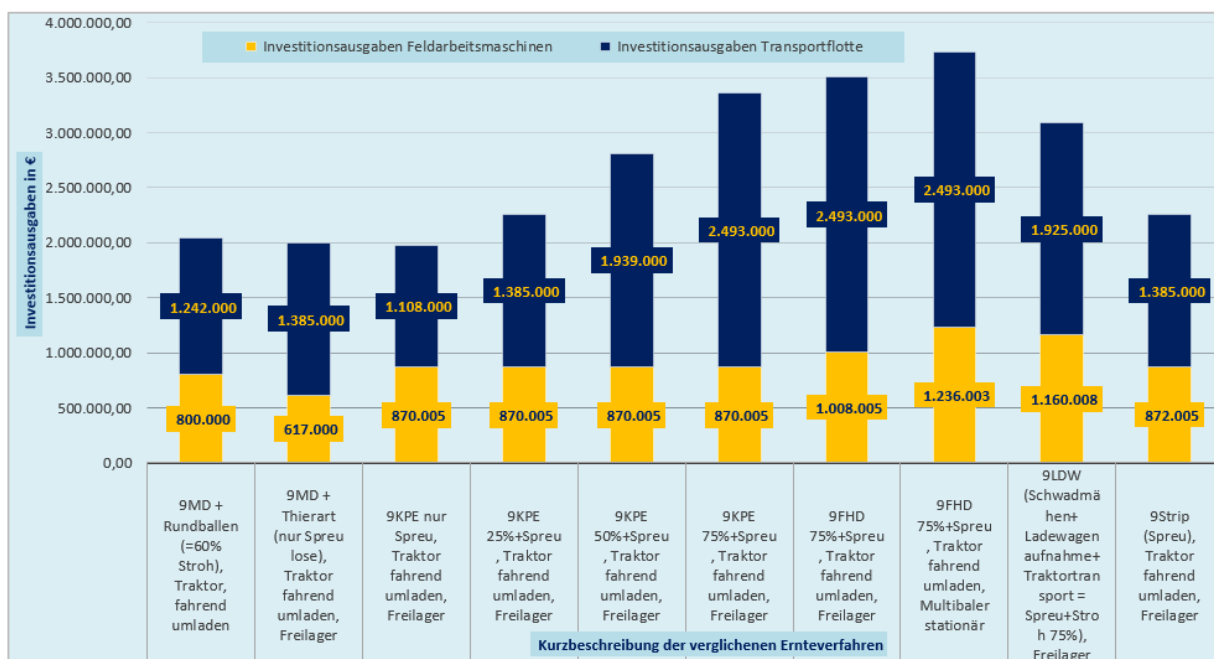


Abbildung 12: Investitionsausgaben der Ernteverfahren in Euro

Jeder der Balken stellt ein Ernteverfahren dar. Links steht zunächst das Mähdrusch-Ballen-ernteverfahren mit insgesamt 2.042.000 € Investitionsausgaben, gefolgt vom Mähdruschverfahren mit Thierart Spreusammelwagen, das bei 2.002.000 € benötigten Investitionsausgaben liegt. Die Verfahren sind jedoch unterschiedlich in der Aufteilung der genannten Ausgaben auf Logistik und Arbeitsmaschinen. Die Logistik benötigt beim Spreusammelverfahren höhere Ausgaben als bei der Rundballenernte, weshalb die Logistikkosten um 143.000 € für die Spreuernte erhöht sind.

Das dritte Verfahren von links ist das Kompakternteverfahren für die Ernte von Korn und Spreu ohne Strohanteil. Dessen Investitionsausgaben sind mit 1.978.005 € die niedrigsten im Vergleich mit allen anderen Verfahren, trotz der darin enthaltenen, hoch angenommenen stationären Reinigungsanlage mit 400.000 € Investitionsausgaben (vgl. Kapitel 3.4.2 – „Erntegut-Gemisch Separation“), die ein wesentlicher Bestandteil der in Gelb dargestellten Arbeitsmaschinen-Investitionsausgaben von 870.005 € sind. Die im Vergleich zu anderen Verfahren niedrigen Logistikausgaben von 1.108.000 € für den gemeinsamen Korn-Spreu-Transport zeigen in dieser Betrachtung einen Vorteil von 277.000 € gegenüber dem getrennten Transport von Korn und Spreu mit zwei Logistikketten des vorangegangenen Mähdrusch-Spreuernteverfahrens.

Die nächsten drei Verfahren in der Darstellung sind ebenfalls Kompakternteverfahren, bei denen der Strohernte-Anteil mit 25, 50 und 75 % zunehmend ist. Die Ausgaben für die Arbeitsmaschinen verändern sich dabei nicht. Allerdings muss das stark steigende Transportvolumen durch die zunehmende Strohmenge, sowohl insgesamt als auch in derselben Arbeitszeit, von der Logistik bewältigt werden, weshalb die Investitionsausgaben dafür beim KPE-Verfahren mit 75 % Strohanteil auf bis zu 2.493.000 € ansteigen.

Da in ähnlicher Zeit dieselbe Menge Erntegut auch bei den nächsten beiden FHD-Ernteverfahren transportiert werden muss, sind die Logistikausgaben dabei identisch. Jedoch sind die Arbeitsmaschinenausgaben höher, da der eingesetzte Feldhäcksler wesentlich höhere Anschaffungsausgaben mit sich bringt als der Kompakternter. Das zweite der FHD-Verfahren (3. von rechts) hat gegenüber dem anderen FHD-Verfahren (4. von rechts) höhere Investitionsausgaben, da mit dem Multibaler als zusätzlich benötigter Maschine die Rundballen stationär gepresst werden. Dieses Verfahren ist mit 3.729.003 € das Ernteverfahren mit dem größten Investitionsbedarf.

Das Ladewagenverfahren benötigt Investitionsausgaben von insgesamt 3.085.008 € und beim Stripper-Ernteverfahren sind es insgesamt 2.257.005 €, die für Investitionen in die erforderlichen Maschinen getätigt werden müssen. Bei den Investitionsausgaben des LDW-Verfahrens ist jedoch zu berücksichtigen, dass für die benötigte, intensivere Erntegutnachbereitung nicht

nur eine Einheit der 400.000 € in der Anschaffung kostenden Separationsmaschinen angenommen wurden, sondern zwei Stück dieser Art. Daher sind bereits 800.000 € der gesamten Investitionsausgaben auf die Erntegutseparation zurückzuführen. Erläutert wurde dies bereits in Kapitel 3.4.5 und zudem wird dies detailliert in der Diskussion in Kapitel 5.1.1 aufgegriffen.

4.2 Einordnung der Investitionsausgaben

Die Investitionsausgaben sind ein interessanter Anhaltspunkt für die Verfahrenskosten, die damit jedoch nicht endgültig bewertet werden können. Daher bedarf es einer Einordnung der Investitionsausgaben, um diese zu hinterfragen. Damit wird gleichzeitig die Notwendigkeit von weiteren Betrachtungsweisen herausgestellt, auf die im weiteren Verlauf des Kapitels eingegangen wird.

So wird für die Maschinenkosten angenommen, dass diese in einem Umfang an oder über der Auslastungsschwelle genutzt und daher mit einem einheitlichen Betrag je Betriebsstunde abgeschrieben werden. Jedoch ist die erwartete Lebensdauer unterschiedlich, auf die der gesamte Abschreibungsbetrag verteilt wird. Bei Traktoren sind es 10.000 Betriebsstunden und bei den selbstfahrenden Erntemaschinen 3.000 Betriebsstunden. Für die stationäre Reinigung werden 10.000 Stunden angenommen. Daher können die Investitionsausgaben nicht im gesamten herangezogen oder pro Hektar umgelegt werden.

Die in Kapitel 4.1 berechneten Investitionsausgaben, die für das jeweilige Ernteverfahren erforderlich sind, beinhalten die angenommenen Anschaffungspreise aller im Verfahren benötigten Maschinen. So ergeben sich sehr hohe Beträge. Die Investitionsausgaben für die Logistik sind in der Betrachtung wesentlich höher als die Investitionsausgaben für die Arbeitsmaschinen, was hinterfragt werden soll. Denn für Traktoren und Anhänger, die im Jahresverlauf nicht nur die Transporte in der Getreideernte durchführen, sondern im Wesentlichen andere Aufgaben erledigen, können diese Investitionsausgaben bei genauer Betrachtung nicht in vollem Umfang der Getreideernte angelastet werden. Das Beispiel des Feldhäckslers, der neben der Getreideernte auch in der Gras- und Maisernte zum Einsatz kommt, verdeutlicht ebenfalls, dass für eine abschließende Betrachtung dann nur schätzungsweise 10 bis 50 % der Investitionskosten für die Getreideernte veranschlagt werden könnten. Dieser Anteil der Getreideerntetätigkeit am gesamten Tätigkeitsumfang kann jedoch nicht genau beziffert werden und variiert von Betrieb zu Betrieb. Um vergleichen zu können wird die volle, jährliche Auslastung der Maschinen angenommen, wodurch die Maschinenkosten dann zulässiger Weise auf die Einheit von einem Hektar umgelegt werden können.

Die Kosten für die Abschreibung jeder benötigten Maschine sind nur über die genaue Berechnung der benötigten Stunden mit den hinterlegten Abschreibungskosten je Stunde möglich. Außerdem sind variable Kostenbestandteile wie Dieselkraftstoff oder die Arbeitskraftkosten in keiner Weise in den Investitionsausgaben berücksichtigt. Die fixe Kostenkomponente der Investitionsausgaben enthält zudem sprungfixe Kosten, z.B. beim Bedarf eines weiteren Transportfahrzeugs, die in der Investitionsausgabenbetrachtung einen Anstieg zumeist im Bereich von über 100.000 € mit sich bringen.

Besonders bei den Ernteverfahren mit hohem Strohanteil nehmen die Logistikinvestitionen stark zu, zurückzuführen auf die Anzahl an benötigten Transportfahrzeugen für einen ununterbrochenen Ernteablauf. Jedoch handelt es sich dabei um eine berechnete Anzahl bei der gegebenen, durchschnittlichen Transportentfernung von 10 km. In der praktischen Durchführung variieren die Entfernungen dann z.B. von 3 km bis 15 km Entfernung, wobei die Anzahl benötigter Transportfahrzeuge ebenso variiert. Entsprechend muss in der Realität auf die Entfernung reagiert werden, z.B. durch zusätzliche, flexibel eingesetzte Fahrzeuge von Lohnunternehmen oder Speditionen. Dies kann zur starken Minderung der Investitionsausgaben beitragen aber für die vereinheitlichte Berechnung mit der Durchschnittsentfernung nicht berücksichtigt werden.

4.3 Ergebnisse der Mähdruschverfahren

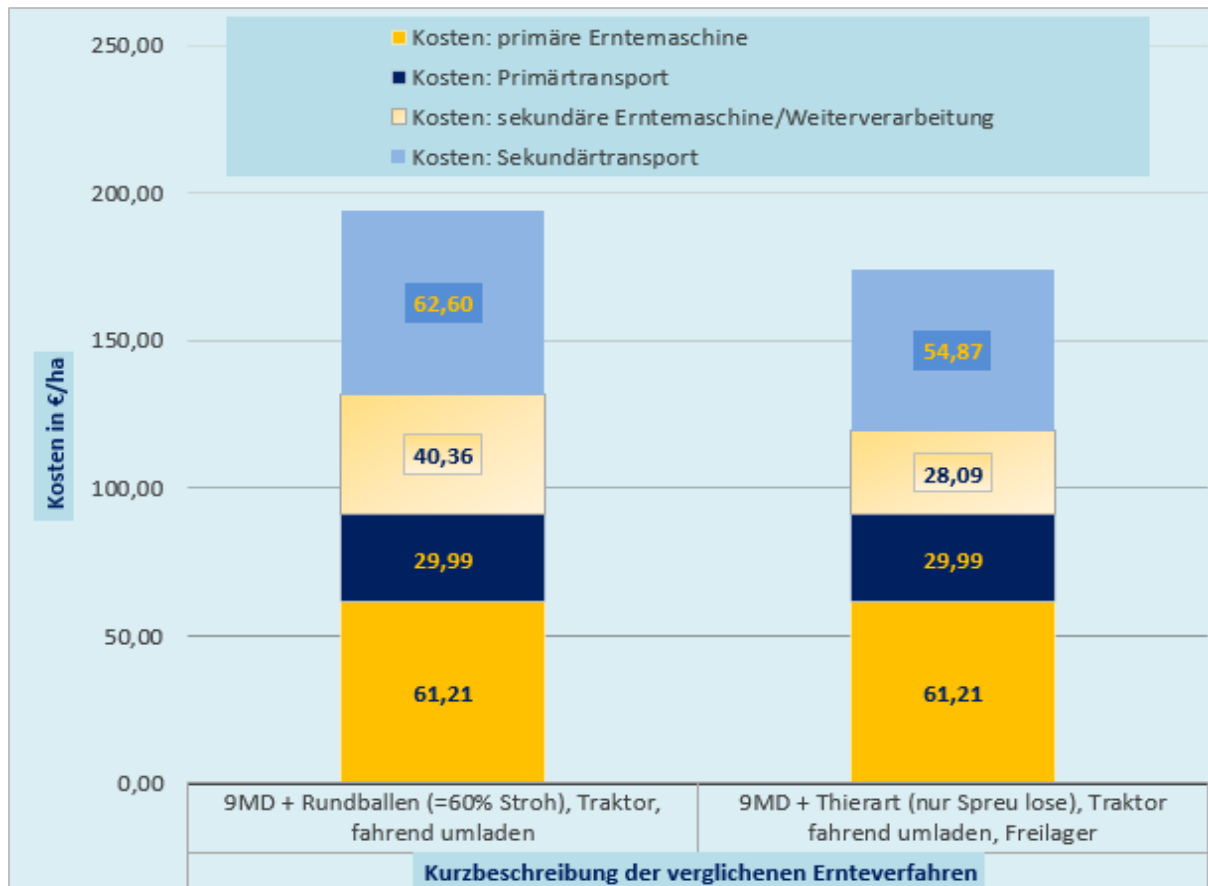


Abbildung 13: Kostenstruktur und Vergleich der Mähdruschverfahren in €/ha

In Abbildung 13 ist die Vollkostenstruktur der beiden Mähdruschverfahren dargestellt. Links der Mähdrusch mit anschließender Rundballenkette und rechts der Mähdrusch mit Spreuernte durch den angehängten Thierart Spreusammelwagen und Spreulogistik. Die Höhe der Balken zeigt die Höhe der Kosten für die einzelnen Ernteschritte. Die „primäre Erntemaschine“ (gelb, unten) stellt die Kosten des Mähdreschers dar und der „Primärtransport“ (blau, mittig) die Kosten der zugehörigen Körnerlogistik. Für den ganzen primären Ernteschritt sind die Kosten der beiden Mähdruschverfahren mit 91,20 €/ha identisch.

In den einzelnen Kostenblöcken sind jeweils alle für die Ernte anfallenden fixen und variablen Kostenbestandteile enthalten. Dazu zählen neben der Abschreibung auch die Kapitalkosten oder die Kosten für Dieselkraftstoff und benötigtes Personal für die Bedienung der Maschinen. Die „sekundäre Erntemaschine“ (hellgelb, mittig) ist beim Rundballenverfahren der Traktor mit Rundballenpresse und im anderen Verfahren der entsprechende Kostenaufwand für den an-

gehängten Spreusammelwagen. Der „Sekundärtransport“ (hellblau, oben) zeigt die Logistikkosten im jeweiligen Verfahren für die Rundballen bzw. für die lose Spreu. Rundballenernte und -transport kosten 102,96 €/ha und die Kosten des Spreusammelwagens inkl. Spreulogistik belaufen sich auf 82,96 €/ha. Die Spreuernte ist demnach exakt 20,00 €/ha günstiger als die Rundballenernte.

Die gesamten Kosten für Mähdrusch und Rundballenernte inkl. Logistik betragen 194,16 €/ha und für den Mähdrusch mit Spreuernte und Logistik fallen Kosten in Höhe von insgesamt 174,16 €/ha an.

Sollen Spreu und Stroh in Kombination mit den Mähdruschverfahren geerntet werden, kann dies berechnet werden, indem die sekundären Erntekosten für die Spreuernte den gesamten Kosten des Rundballenernteverfahrens hinzuaddiert werden. Die Kosten für die Spreu- und Strohernte liegen damit in Summe bei 277,12 €/ha.

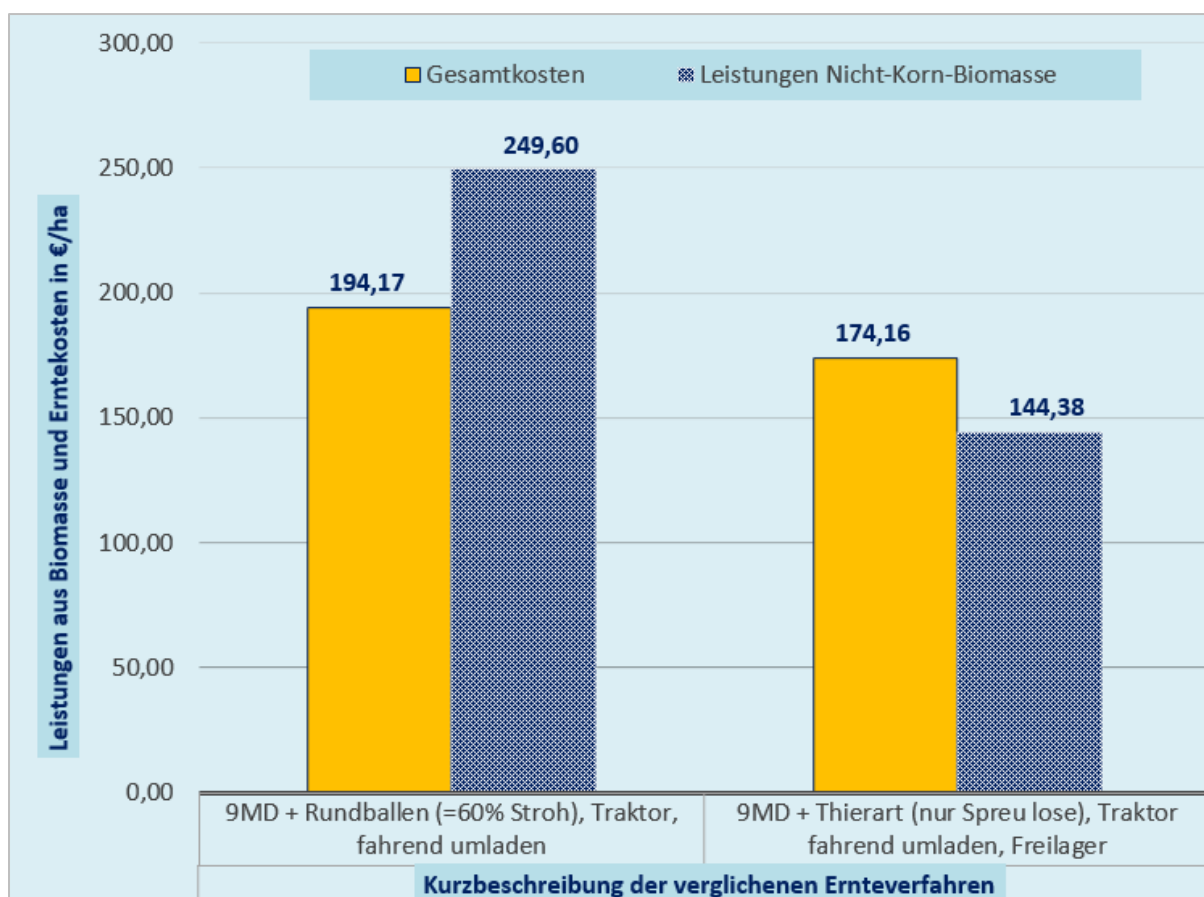


Abbildung 14: Gegenüberstellung der gesamten Kosten der Mähdruschverfahren in Gelb und den jeweiligen, monetären Leistungen aus der geernteten Nicht-Korn-Biomasse in Blau

Die in ihren einzelnen Bestandteilen gezeigten Kosten der Abbildung 13 sind in Abbildung 14 in Gelb als Kostensumme der jeweiligen Mähdruschverfahren dargestellt. Der jeweils rechts davon befindliche, blaue Balken zeigt die Höhe der monetären Leistungen aus den geernteten Reststoffen der beiden Verfahren, der Nicht-Korn-Biomasse, als Bezeichnung für Spreu und Stroh. Der dafür angenommene Erlös je Tonne Biomasse liegt bei 80 €.

Die höheren Kosten des MD-Rundballenernteverfahrens werden durch die Biomasseerlöse überschritten, die sich auf 249,60 €/ha belaufen. Nach dieser Betrachtung können 55,44 €/ha Gewinn durch die zusätzliche Strohernte erwirtschaftet werden. Jedoch ist diese Gegenüberstellung lediglich für den vorliegenden Vergleich relevant. Werden für eine exakte Betrachtung die Mähdrusch- und Kornlogistikkosten in Höhe von 91,20 €/ha miteinbezogen, die auch anfallen wenn keine Biomasse geerntet wird, sind es realistische 146,64 €/ha als positiver Beitrag zur Kostendeckung durch die Strohernte. Einfacher kann dieser Betrag ermittelt werden, wenn die Kosten für die zusätzliche Reststoffenernte in Höhe von 102,96 €/ha von den Biomasseerlösen mit 249,60 €/ha abgezogen werden. Wenn der resultierende Betrag wie hier positiv ist, ist die Schwelle zur Kostendeckung überschritten und je nach Betrachtungsweise für den Landwirt als ökonomisch vorteilhaft einzustufen. Unterhalb der Schwelle wäre die zusätzliche Strohernte mit Verlusten behaftet und somit keinesfalls lohnend.

Die um 20,00 €/ha niedrigeren Kosten des MD-Spreuernteverfahrens werden von den über 100 €/ha niedrigeren, monetären Erlösen aus der Spreu nicht komplett gedeckt. Bei dieser Betrachtung bleiben 29,78 €/ha zur Kostendeckung offen. Unter Einbeziehung der Mähdruschkosten von 91,20 €/ha wird jedoch trotzdem ein positiver Beitrag zur Kostendeckung von 61,42 €/ha durch die zusätzliche Spreuernte erreicht. Der zusätzliche Beitrag zur Kostendeckung durch die Reststoffenernte ist demnach bei den Strohballen mehr als doppelt so hoch wie für die Spreuernte mit dem Mähdrescher.

Noch nicht berücksichtigt sind bisher die Erlöse der Körner, die mit 200 €/t angenommen werden. Durch die Kornerlöse fließen somit auch die Kornverluste mit in die Berechnung ein, da nur vollvermarktungsfähige Körner mit dem genannten Betrag pro Tonne berücksichtigt werden. Beschädigte Bruchkörner gelangen bei den Doppelernteverfahren in die Reststofffraktion und werden mit dem dabei angenommenen Erlös von 80 €/t in die Berechnung miteinbezogen, die in Abbildung 14 bereits berücksichtigt sind. Die Erlöse der vollvermarktungsfähigen Körner fließen in die Gesamterlöse bzw. in die gesamten monetären Leistungen ein, die in Abbildung 15 dargestellt sind. Für die MD-Verfahren haben die Kornverluste monetär eine untergeordnete Bedeutung.

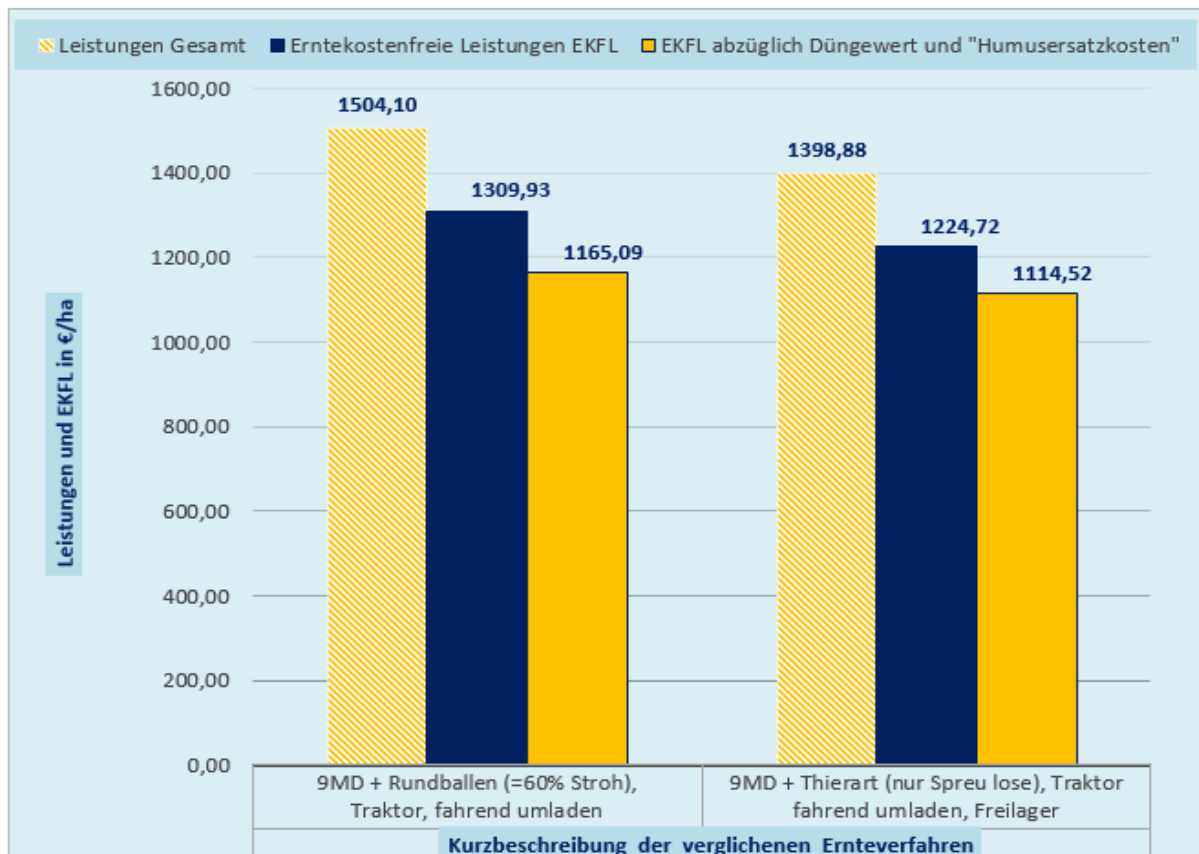


Abbildung 15: Vergleich der gesamten, monetären Leistungen der MD-Verfahren und der erntekostenfreien Leistungen

Im jeweils linken, gelb schraffierten Balken in Abbildung 15 sind die Erlöse aus der Biomasse und aus den Körnern für jedes MD-Verfahren summiert. Von diesen gesamten Erlösen, die auf ein Ernteverfahren zurückzuführen sind, werden die bereits erläuterten, gesamten Verfahrenskosten abgezogen. So ergeben sich die erntekostenfreien Leistungen EKFL, die im jeweils mittleren, blauen Balken dargestellt sind. Diese sind beim MD-Rundballenverfahren mit 1309,93 €/ha um 85,21 €/ha höher als beim MD-Spreuernteverfahren mit 1224,72 €/ha.

Die EKFL können als Grundlage für eine kurzfristige Kosten-Nutzen-Betrachtung herangezogen werden. Nicht berücksichtigt sind darin jedoch die langfristig relevanten Kosten für die Humusreproduktion und die entzogenen Nährstoffe durch die Biomasse, die den Folgekulturen anderweitig zur Verfügung gestellt werden müssen. Die dafür angenommenen Kosten in Abhängigkeit von der Höhe der Biomasseabfuhr sind in den rechten, gelben Balken für die beiden MD-Verfahren dargestellt. Werden diese Nährstoff- und Humusersatzkosten mitberücksichtigt, verringert sich die Differenz zwischen den MD-Verfahren auf 50,57 €/ha, wobei die hier abgebildeten, langfristigen EKFL bei der MD-Rundballenernte mit 1165,09 €/ha höher sind als bei der MD-Spreuernte mit 1114,52 €/ha.

4.4 Ergebnisse Kompakternte- und Feldhäcksel- druschverfahren

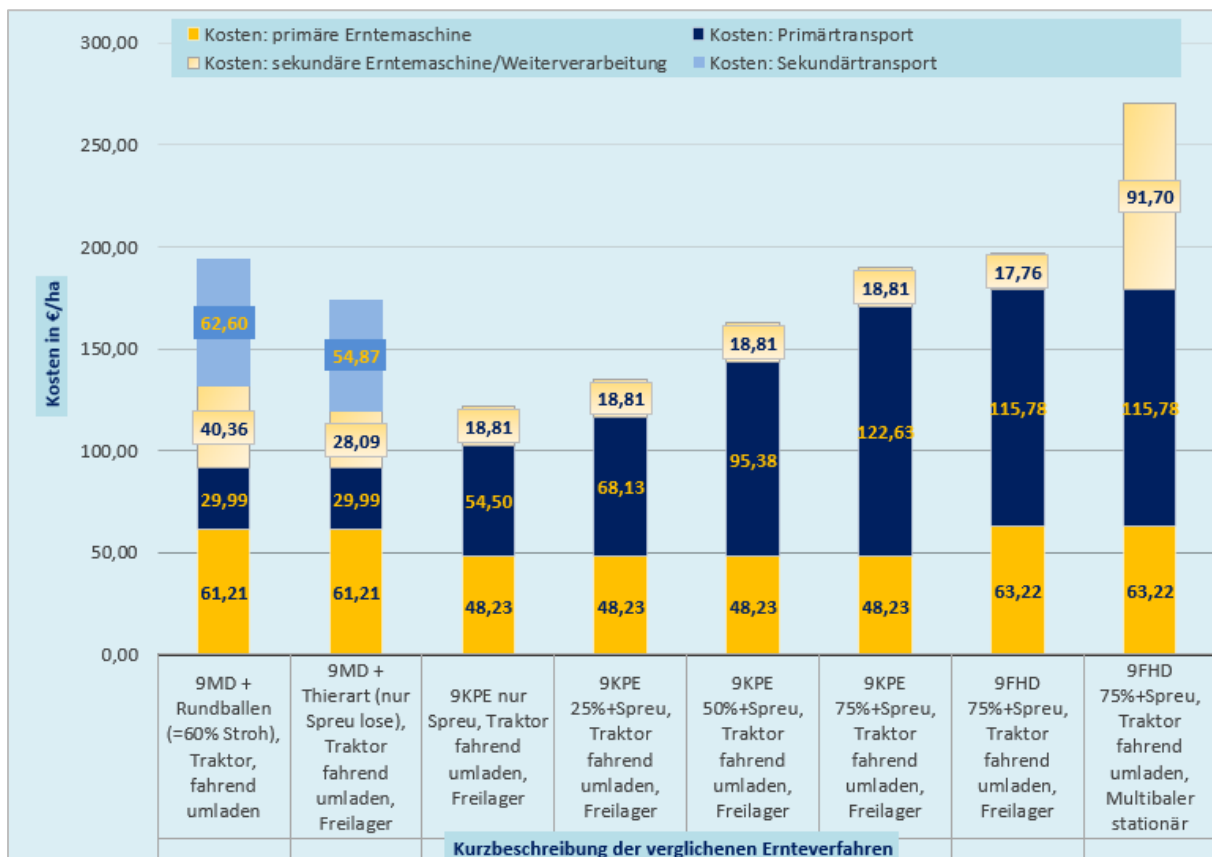


Abbildung 16: Kostenstruktur und Vergleich verschiedener Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (KPE und FHD) in €/ha

Abbildung 16 ist identisch aufgebaut wie Abbildung 13 mit der Kostenstruktur der Mähdruschverfahren. Die Mähdruschverfahren sind hier ebenfalls dargestellt, jedoch sind in Abbildung 16 als wesentliches Ergebnis der Untersuchung verschiedene Varianten der Doppelernteverfahren vergleichend mit abgebildet. Im Detail befinden sich rechts neben den beiden MD-Verfahren die vier definierten Kompakternteverfahren mit zunehmenden Strohmitnahmeanteilen von 0, 25, 50 und 75 %. Ganz rechts befinden sich zwei Varianten des Feldhäckseldruschverfahrens, die sich durch die Endprodukte und die Lagerung unterscheiden. Ein FHD-Verfahren stellt die Kosten der losen Biomasselagerung im Freien dar, das andere FHD-Verfahren zeigt die Kosten inkl. des stationären Pressens von Spreu-Stroh-Rundballen mit dem Multibaler.

Zunächst fällt auf, dass bei allen sechs Doppelernteverfahren keine sekundären Transportkosten existieren wie bei den MD-Verfahren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Doppelernteverfahren keine zweite Logistikkette benötigt wird, da sowohl Körner als auch Biomasse mit nur einer Ernte- und Logistikkette geerntet werden.

Bei den vier KPE-Verfahren sind für die Kosten der primären Erntemaschine mit 48,23 €/ha niedrigere Kosten dargestellt als beim Mähdrusch. Jedoch sind die primären Transportkosten bereits bei der Korn-Spreu-Ernte ohne Stroh deutlich über den Kosten des reinen Korntransports im Anschluss an den Mähdrusch mit 29,99 €/ha. Beim KPE-Verfahren beginnen die Transportkosten bei 54,50 €/ha bei 0 % Strohmitnahme und erhöhen sich mit zunehmendem Strohmitnahmeanteil auf bis zu 122,63 €/ha bei 75 % Strohmitnahme. Im Gegensatz zu den MD-Verfahren stellen die sekundären Erntekosten bei den Doppelernteverfahren die Kosten für die „Weiterverarbeitung“ in der stationären Separationsanlage zur Trennung von Korn und Biomasse dar. Diese sind bei allen vier KPE-Verfahren mit 18,81 €/ha angegeben.

Bei den FHD-Verfahren sind die primären Erntemaschinenkosten um 14,99 €/ha höher als bei den KPE-Verfahren. Die primären Transportkosten sind jedoch um 6,85 €/ha niedriger als beim vergleichbaren KPE-Verfahren mit 75 % Strohanteil, der auch für beide FHD-Verfahren angenommen wird. Die niedrigeren FHD-Transportkosten sind auf die höhere Flächenleistung und die daraus resultierenden, kürzeren Befüllzeiten der Transportfahrzeuge zurückzuführen. Die Kosten für die Weiterverarbeitung des Ernteguts sind bei der Freilagerung um 1,05 €/ha geringer als beim Kompakternteverfahren, ebenfalls aufgrund der höheren Flächenleistung des Feldhäckseldruschs. Denn für dieselbe Fläche mit 24 Hektar wird weniger Zeit benötigt, wodurch der 95 PS-Traktor zur Einrichtung des Biomassehaufens ebenso weniger Zeit mit der Einlagerung der Reststoffe eines Hektars verbringt. Wird die Biomasse jedoch stationär mittels Multibaler zu Rundballen gepresst, fallen statt 17,76 €/ha bei der Freilagerung dann 91,70 €/ha Kosten für die Rundballen an.

Die gesamten Verfahrenskosten bei den KPE-Verfahren steigen von 121,54 €/ha bei 0 % Strohanteil auf 189,67 €/ha bei 75 % Strohanteil im Erntegut an. Die KPE-Verfahren sind damit günstiger als die MD-Rundballenernte mit 194,17 €/ha. Das FHD-Verfahren mit Freilagerung hat ähnliche Kosten in Höhe von 196,76 €/ha. Sollen im Anschluss an den FHD jedoch stationär Rundballen gepresst werden, steigen die Kosten des Verfahrens auf 270,69 €/ha. Sollen die gesamten Reststoffe des KPE-Verfahrens mit 75 % Strohernte in Rundballen gepresst werden, würden dessen Verfahrenskosten um einen ähnlichen Betrag ansteigen wie im Vergleich der FHD-Verfahren dargestellt. Wenn geringere Reststoffanteile gepresst werden sollen, z.B. beim KPE-Verfahren mit 25 % Strohanteil, verringern sich die Presskosten mit abnehmender Biomassemenge.

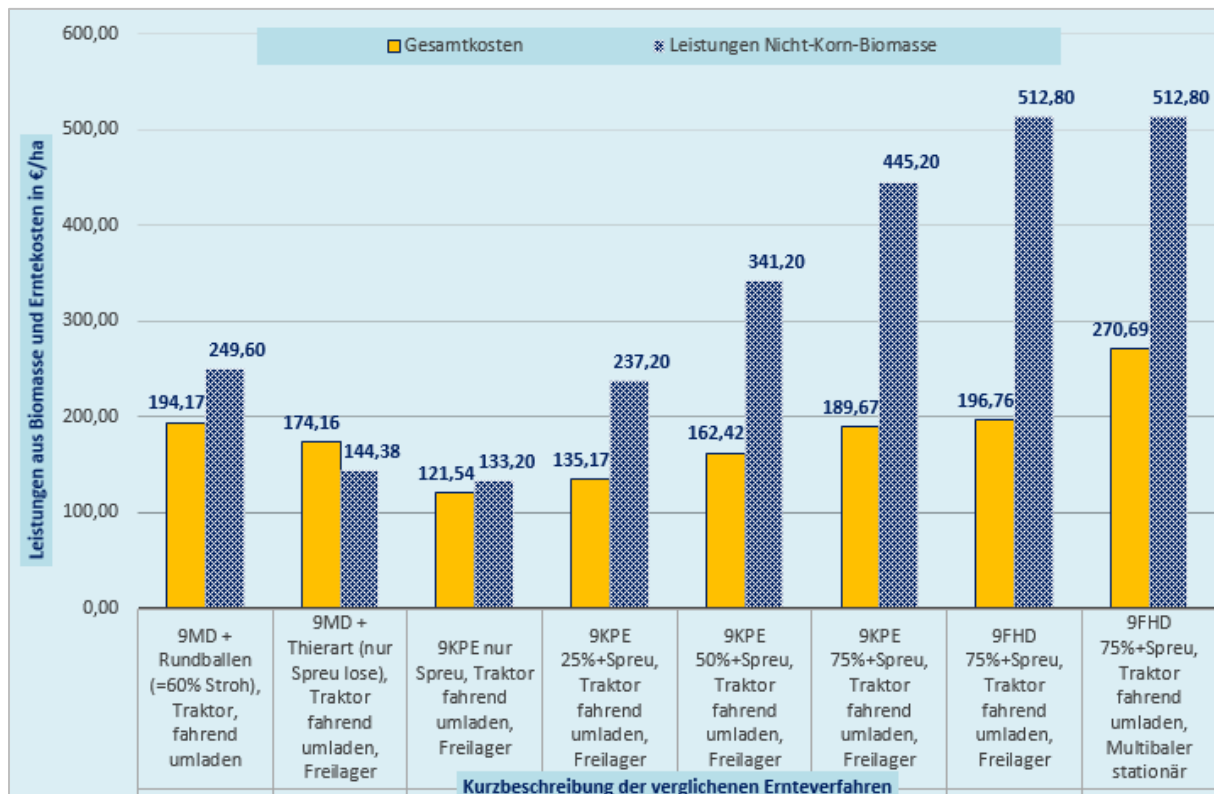


Abbildung 17: Vergleich der monetären Leistungen aus der mitgeernteten Biomasse und der Gesamtkosten verschiedener Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (KPE und FHD) in €/ha

Die zuvor beschriebenen Gesamtkosten der Verfahren sind zusätzlich in Abbildung 17 dargestellt. In der Abbildung werden die Gesamtkosten den monetären Leistungen aus der mitgeernteten Biomasse gegenübergestellt. Als Vergleichsverfahren dienen die bereits ausführlich beschriebenen MD-Verfahren, die links im Diagramm abgebildet sind.

Beim KPE-Verfahren ohne Strohernte (3. von links) decken die niedrigen Biomasseerlöse bereits die Erntekosten von 121,54 €/ha. Zwar steigen die Erntekosten bei höherem Strohanteil im Erntegut an, die Erlöse aus der Biomasse steigen jedoch stärker, so dass beim KPE-Verfahren mit 75 % Strohmitnahme 445,45 €/ha Erlöse aus Biomasse den Erntekosten von 189,67 €/ha gegenüberstehen (3. von rechts). Da Körner und Biomasse bei Doppelernteverfahren als Produktkombination und nicht wie beim Mähdruschverfahren mit eindeutig abgegrenzten, separaten Ernteketten geerntet werden, kann keine genaue Zuteilung der Kosten zur Kornernte oder zur Biomasseernte vorgenommen werden, denn der wesentliche Kostenfaktor sind die Transportkosten. Das Stroh mit der geringen Dichte nimmt einen Großteil des Transportvolumens ein, während die Körner mit hoher Dichte einen großen Anteil am Gewicht des gesamten Ernteguts einnehmen.

Durch die Ernte als Produktkombination ohne spezifisch zuordenbare Kosten ist es nur schwer möglich, die Schwelle zur Kostendeckung zu berechnen. Dies ist hier jedoch nicht erforderlich, da die Schwelle auf jeden Fall überschritten ist, wenn die zusätzlichen Biomasseerlöse die gesamten Erntekosten überschreiten.

So sind die Biomasseerlöse bei den FHD-Verfahren noch deutlich höher als bei den KPE-Verfahren, was jedoch in dieser Betrachtung wenig Aussagekraft hat, denn die hohen Bruchkornteile bei den FHD-Verfahren sind nicht voll vermarktungsfähig, wodurch sich die Menge der Marktware für 200 €/t verringert und die Biomassemenge für 80 €/t erhöht. Eine abschließende Betrachtung lässt daher nur die Darstellung der EKFL zu, die alle Erlöse miteinbezieht. Bei den MD- und KPE-Verfahren wirken sich die geringen Unterschiede in den Verlusten von Marktware nur sehr gering auf die Gesamterlöse aus.

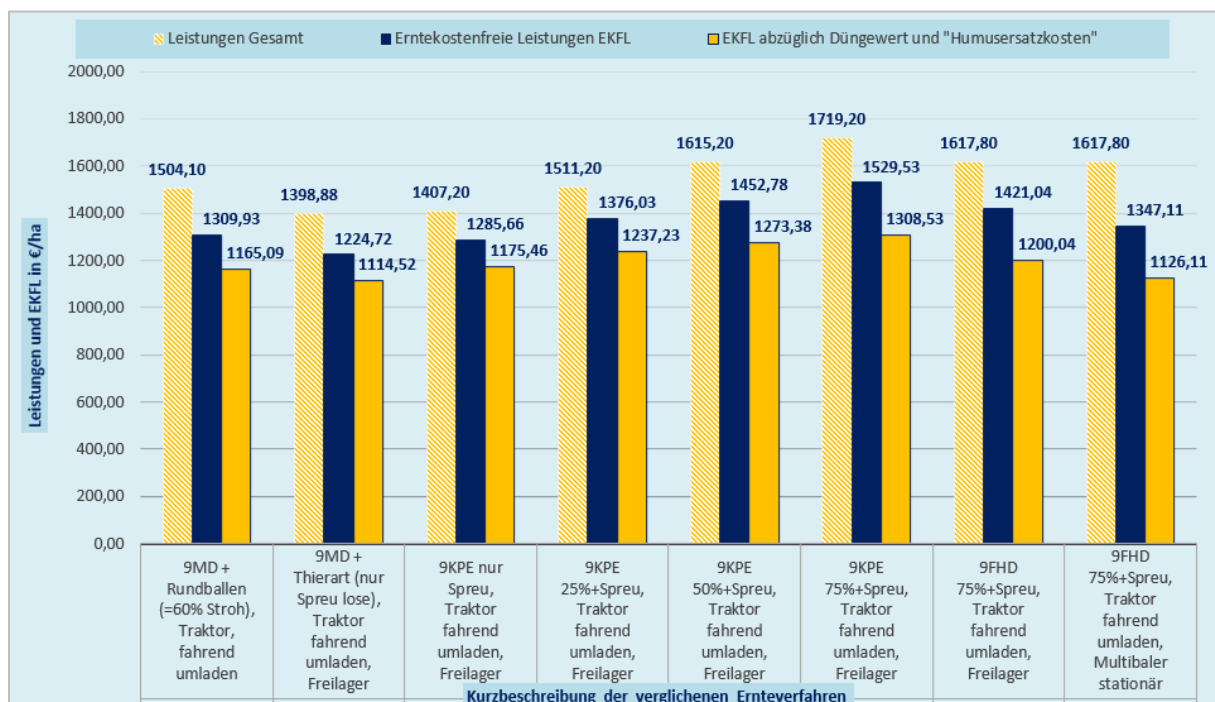


Abbildung 18: Vergleich der gesamten monetären Leistungen und die EKFL mehrerer Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (KPE und FHD) in €/ha

Zunächst werden in Abbildung 18 die gelb schraffierten Balken links bei jedem Verfahren betrachtet, die die gesamten monetären Leistungen sowohl aus voll vermarktungsfähigen Körnern, als auch die Leistungen aus der Biomasse in Summe zeigen. Die Gesamtleistungen sind beim KPE-Verfahren ohne Stroh bereits leicht höher als beim vergleichbaren MD-Spreuernteverfahren. Bei 25 % Strohanteil im KPE-Erntegut übersteigen die Leistungen mit 1511,20 €/ha

bereits die Leistungen des MD-Rundballenverfahrens. Bei 50 % Stroh betragen die KPE-Erlöse 1615,20 €/ha und bei 75 % Stroh sind mit 1719,20 €/ha die höchsten monetären Leistungen aller verglichenen Verfahren zu erwarten. Aufgrund der bereits angedeuteten Bruchkornproblematik der FHD-Verfahren und dem damit verbundenen Übergang von Körnern in die Biomasse mit niedrigerem Erlös pro Tonne, liegen die gesamten FHD-Erlöse um etwa 100 €/ha niedriger bei 1617,80 €/ha und damit auf dem Niveau des KPE-Verfahrens mit 50 % Strohanteil, obwohl beim FHD-Verfahren ein Strohernteanteil von 75 % angenommen wird.

Aufgrund der niedrigen Verfahrenskosten liegen die kurzfristig aussagekräftigen EKFL (blau) des KPE-Verfahrens ohne Stroh mit 1285,66 €/ha um nur 24,27 €/ha unter denen des MD-Rundballenernteverfahrens. Mit zunehmendem Strohanteil im KPE-Erntegut steigen auch die EKFL bis auf den Höchstwert aller Verfahren von 1529,53 €/ha bei 75 % Strohanteil im Erntegut. Durch die niedrigeren Gesamtleistungen und die höheren Verfahrenskosten sind die EKFL der FHD-Verfahren geringer. Sie betragen 1421,04 €/ha bzw. 1347,11 €/ha durch die zusätzlichen Kosten, die durch das stationäre Ballenpressen verursacht werden.

Die Kosten der Kompakternte mit 75 % Stroh und des vergleichbaren Feldhäckseldruschverfahrens liegen mit einer Differenz von 7,09 €/ha (vgl. Abbildung 17) jedoch nur geringfügig auseinander. Die Differenz der Verfahrenserlöse und -EKFL zueinander von jeweils über 100 €/ha ist jedoch wesentlich höher. Daraus ist ersichtlich, dass der Einfluss der Ernteverfahrenskosten nicht zwingend relevant ist. Die Menge an qualitativ hochwertigem Erntegut ist in dieser Betrachtung von größerer Bedeutung. Das Kompakternteverfahren, das speziell für die Doppelernte von Getreide entwickelt wird, ist daher deutlich im Vorteil gegenüber dem Feldhäckseldrusch. Dessen Fokus liegt auf der Zerkleinerung von Erntegut bei der Grünfutterernte, was für die Ernte ganzer Körner nicht optimal ist.

Im direkten Vergleich des Kompakternteverfahrens (+ 75 % Strohernte) mit dem Mähdrusch inklusive Ballenernte als aktuell etabliertes Getreideernteverfahren ergibt sich bei den gegebenen Annahmen ein EKFL-Vorteil des KPE-Verfahrens von 219,60 €/ha. Werden Düngewert und Humusersatzkosten für eine längerfristige Betrachtung miteinbezogen, liegt der Vorteil des KPE-Verfahrens bei 143,44 €/ha gegenüber dem MD-Ballenernteverfahren.

Die langfristig betrachteten EKFL (gelb) unter Einbeziehung der Humusersatzkosten und des Nährstoffwerts der Biomasse sind bei allen KPE-Verfahren höher als bei den MD-Verfahren mit 1165,09 €/ha und liegen zwischen 1175,46 €/ha und 1308,53 €/ha. Der letztgenannte Wert ist dem KPE-Verfahren mit 75 % Strohernte zuzuordnen und damit auch in der langfristigen Betrachtung der höchste Wert aller verglichenen Verfahren. Die langfristigen EKFL der FHD-Verfahren betragen 1200,04 bzw. 1126,11 €/ha.

4.5 Ergebnisse Ladewagen-Schwadernte und Ährenstripper

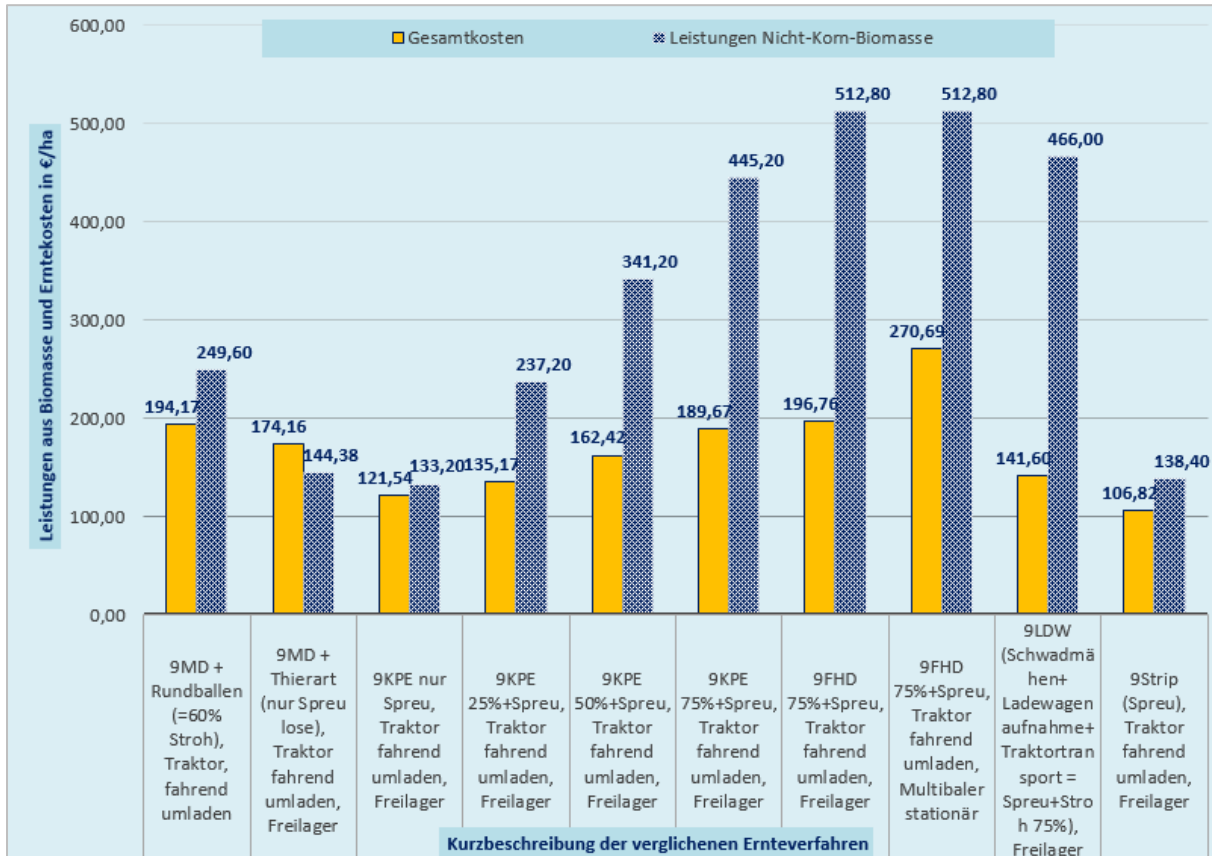


Abbildung 19: Vergleich der monetären Leistungen aus Nicht-Korn-Biomasse und den Kosten verschiedener Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (LDW und Strip) in €/ha

In Abbildung 19 sind zum Vergleich alle Verfahren aus Abbildung 17 und auf der rechten Seite zwei weitere Doppelernteverfahren hinzugefügt. Rechts außen sind die Gesamtkosten und Biomasseerlöse des Ährenstripperverfahrens dargestellt, das im Vergleich mit allen anderen behandelten Verfahren die niedrigsten gesamten Verfahrenskosten für die Getreideernte mit 106,82 €/ha aufweist. Da bei diesem Verfahren lediglich Korn und Spreu geerntet werden, kann es der MD-Spreusammelernte mit 174,16 €/ha oder dem KPE-Verfahren ohne Strohmitnahme mit 121,54 €/ha gegenübergestellt werden. Die Erlöse aus der mitgeernteten Biomasse belaufen sich auf 138,40 €/ha beim Ährenstripperverfahren und übersteigen die Erntekosten um 31,58 €/ha. Die Biomasseerlöse liegen damit ähnlich hoch wie bei den anderen genannten Spreuernteverfahren. Die geringen Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass beim MD-Spreuernteverfahren Bruchkorn, Druschverluste und Reinigungsverluste in den Spreuteil gelangen und dessen Gewichtsanteil erhöhen. Der zu höheren Preisen vermarktungsfähige

Kornanteil nimmt um dieselben Anteile jedoch ab, was daher als negativ zu bewerten ist. Das KPE-Verfahren ohne Strohmitnahme weist für die Korn-Spreu-Ernte die niedrigsten Biomasseerlöse auf, da hierbei die geringsten Kornverluste und -beschädigungen auftreten und somit ein leicht höherer Anteil an Körnern voll vermarktungsfähig bleibt. Beim Ährenstripper sind hingegen höhere Aufnahmeverluste und mehr Bruchkorn zu erwarten, weshalb die Biomasseleistungen zunehmen, jedoch zu Lasten des voll vermarktungsfähigen Kornanteils. Die in Abbildung 20 gezeigten EKFL geben einen vollständigen Überblick über die Wirtschaftlichkeit aller Verfahren.

Die in Abbildung 19 geringeren Kosten des Strip-Verfahrens können mit der angenommenen, höheren Arbeitsgeschwindigkeit und der bei gleicher Arbeitsbreite resultierenden, höheren Flächenleistung bzw. mit der damit verbundenen Fixkostendegression begründet werden. Theoretisch wäre es durch die erhöhte Flächenleistung möglich, mehr Hektar pro Erntesaison zu ernten, wodurch die Fixkosten rechnerisch auf mehr Hektar umgelegt werden.

Das 2. Verfahren von rechts in Abbildung 19 zeigt die Kosten und Biomasseerlöse der Ladewagen-Schwadernte von Getreide. Die Verfahrenskosten belaufen sich auf 141,60 €/ha bei Biomasseerlösen von 466,00 €/ha, die damit mehr als dreimal so hoch sind wie die Kosten.

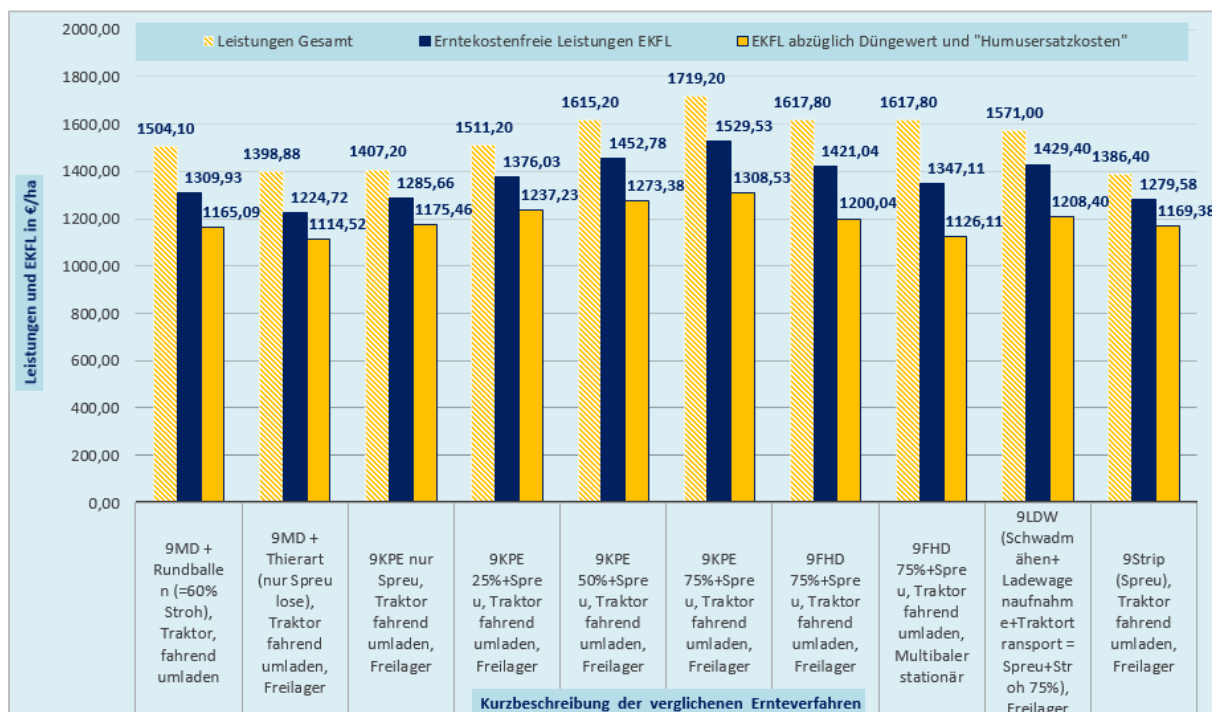


Abbildung 20: Vergleich der monetären Leistungen und EKFL mehrerer Mähdrusch- und Doppelernteverfahren (LDW und Strip) in €/ha

Das Ladewagenverfahren befindet sich auch in Abbildung 20 an 2. Stelle von rechts. Hier wird ersichtlich, dass die gesamten Leistungen (hellgelb) niedriger sind als bei den links davon dargestellten FHD- und KPE-Verfahren, was auch hier auf die höheren Verluste zurückzuführen ist, besonders durch die Schwadaufnahme. Zudem wird für das LDW-Verfahren eine Minderung des Marktgetreideanteils angenommen, da Körner durch den Schneidrotor beschädigt werden können. Die EKFL (blau) des LDW-Verfahrens sind daher mit 1429,40 €/ha unterhalb der KPE-Verfahren mit hohen Strohanteilen, aber oberhalb der EKFL der FHD-Verfahren einzuordnen. Gegenüber dem etablierten Mähdruschverfahren mit anschließender Ballenkette beträgt der Vorteil des LDW-Verfahrens 119,47 €/ha.

Werden für die langfristige Betrachtung (gelb) der Düngewert der Biomasse und die Humusreproduktionskosten abgezogen, ergeben sich für das LDW-Verfahren EKFL in Höhe von 1208,40 €/ha und damit 100,13 €/ha weniger als beim vergleichbaren KPE-Verfahren mit 75 % Strohmitnahme. Zurückzuführen ist die Benachteiligung gegenüber der Kompakternte auf die angenommenen, in der praktischen Umsetzung mit hoher Wahrscheinlichkeit auftretenden Verluste von Körnern und Biomasse durch die Ablage des Getreides im Schwad und die anschließend erforderliche Aufnahme mit der Pick-Up des Ladewagens. Wie bereits beim FHD-Verfahren erläutert, kann auch das auf die Grasernte ausgelegte Ladewagenverfahren das Getreide vermutlich nicht in so großer Menge und Unversehrtheit bereitstellen wie das dafür explizit entwickelte Kompakternteverfahren.

Mit den langfristigen EKFL von 1169,38 €/ha liegt das Ährenstripperverfahren trotz der niedrigen Biomasseernte nur um 39,02 €/ha unterhalb des Ladewagenverfahrens mit hoher Biomasseernte. Die langfristigen EKFL des Ährenstripperverfahrens sind damit sogar geringfügig höher als die 1165,09 €/ha des MD-Rundballenernteverfahrens, aber niedriger als die EKFL des KPE-Verfahrens ohne Stroh.

4.6 Vergleich mit Mähdrusch ohne Biomasseernte

Der Mähdrusch ohne anschließende Strohballenerntekette ist aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit nicht in den Diagrammen dargestellt. Trotzdem kann die Einbeziehung des Ernteverfahrens dahingehend interessant sein für den Fall, dass diese bisherige Erntetechnologie durch ein Doppelernteverfahren ersetzt werden soll, womit dann immer mindestens ein geringer Anteil an Biomasse mitgeerntet wird.

Die Kosten für den Mähdrusch und die zugehörige Kornabfuhr betragen 91,20 €/ha ohne jegliche anschließende Biomasseernte, wie bereits aus Abbildung 13 abgeleitet wurde. Die Biomasseerlöse des Verfahrens betragen 0 €/ha.

Interessant sind daher besonders die Gesamterlöse des MD-Solo-Verfahrens, die auf 1254,50 €/ha beziffert werden können. Da bei diesem Verfahren keine Biomasseerlöse generiert werden, sind die Gesamterlöse die niedrigsten im Vergleich mit allen anderen Verfahren. Der Mähdrusch mit Ballenernte kann 249,60 €/ha mehr Erlösen und beim Kompakternteverfahren mit 75 % Strohernte sind es 464,70 €/ha Mehrerlös. Das als Ersatz infrage kommende KPE-Verfahren mit dem nur Spreu mitgeerntet wird und das Stripperverfahren haben jeweils um ca. 140 €/ha höhere Erlöse als der Solo-Mähdrusch bei der bekannten Biomassepreisannahme von 80 €/t. Sinkt der Biomassepreis, ist das nachteilig für die Doppelernteverfahren. Das MD-Solo-Verfahren wird dadurch jedoch nicht beeinflusst und wird durch die negativen Auswirkungen auf die Vorteilhaftigkeit der Doppelernteverfahren in Relation zu diesen besser gestellt.

Die EKFL beim Solo-MD betragen 1163,30 €/ha. Der Vorteil des KPE-Verfahrens ohne Stroh und des Stripperverfahrens liegt dann noch immer bei rund 120 €/ha höheren EKFL. Werden die langfristigen Humus- und Nährstoffersatzkosten miteinbezogen, sinkt die Vorzüglichkeit der genannten Doppelernteverfahren auf noch immer ca. 90 €/ha. Der Erlösvorteil je Hektar beim ökonomisch besten Doppelernteverfahren (KPE + 75 % Stroh) beträgt in der langfristigen EKFL Betrachtung 220,23 €/ha. Werden die kurzfristigen EKFL vergleichend herangezogen, liegt der Vorteil des KPE-Verfahrens mit 75 % Strohernte bei 366,23 €/ha höheren EKFL.

Als Fazit kann damit festgehalten werden, dass sich die Umstellung eines landwirtschaftlichen Betriebs auf die Doppelernte auf Basis dieser Berechnung bei einem Biomassepreis von 80 €/t als ökonomisch vorteilhaft erweist, sofern die hier getroffenen Annahmen in der Realität nicht stark abweichen und der Absatz der Restbiomasse gesichert ist. Die nachfolgende Sensitivitätsanalyse liefert zu den Zusammenhängen, insbesondere dem Biomasseerlös pro Tonne, weitere wertvolle Erkenntnisse.

4.7 Sensitivitätsanalyse

Durch den Aufbau des Berechnungsmodells ist eine Sensitivitätsanalyse unter Veränderung bisher getroffener Annahmen möglich. Alle Annahmen aus Tabelle 7 wie u.a. die Preise für Biomasse, Korn oder die Feldentfernung können durch eine Änderung der Eingabe in das Berechnungsmodell in ihrer Höhe variiert werden. Durch die in Kapitel 3.5 beschriebene Automatisierung bis hin zur Erstellung der Diagramme ist kein weiterer Aufwand erforderlich, um die Einflüsse einzelner Parameter auf die Kosten, Erlöse und EKFL darzustellen. Als Referenz werden die bereits oben in Kapitel 4 beschriebenen Ergebnisse herangezogen. Um extreme Variationen abschätzen zu können, werden jeweils Werte von 50 % und 150 % bzw. 200 % der ursprünglichen Annahme untersucht.

4.7.1 Veränderung Biomassepreis auf 40 €/t

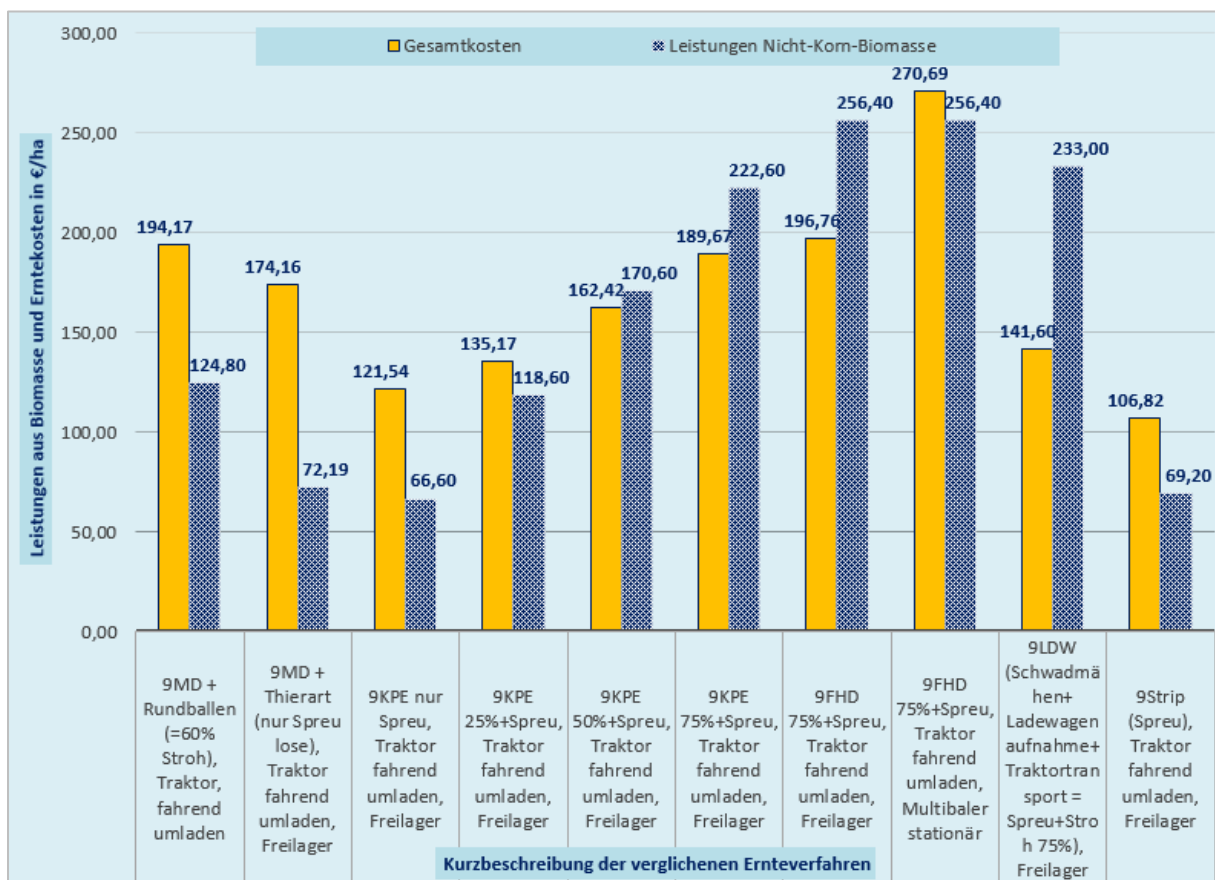


Abbildung 21: Monetäre Biomasseleistungen und Verfahrenskosten bei vermindertem Biomassepreis in €/ha

Abbildung 21 zeigt die unveränderten Verfahrenskosten in €/ha (gelb) und die monetären Leistungen aus der Biomasse (blau) bei einem gegenüber Abbildung 19 halbierten Biomassepreis von 40 €/t anstelle von 80 €/t. Da die Verfahrenskosten sich durch eine Variation des Preises nicht verändern, sind diese identisch mit denen in Abbildung 19. Die Biomasseerlöse haben sich jedoch halbiert, wodurch die monetären Biomasseleistungen in einigen Fällen nun niedriger sind als die Erntekosten. Lediglich bei den Kompakternteverfahren mit hohem Strohanteil, beim Feldhäckseldrusch und dem Ladewagenverfahren sind die Leistungen auch bei einer Halbierung des Biomassepreises noch höher als die Kosten. Dies lässt die Einschätzung zu, dass die genannten Verfahren auch unter Niedrigpreisbedingungen besonders vorteilhaft sind. Dass dies allerdings nicht immer zutreffend ist, zeigt Abbildung 22.

Anders als beim hohen Biomassepreis von 80 €/t stellt sich bei dem halbierten Preis die Frage, ob die Biomasseernte vorteilhaft für den Betrieb ist. Dafür müssen die Biomasseerlöse höher

sein als die Kosten der Biomasseernte, um einen positiven Beitrag zur Deckung der verbleibenden Körnererntekosten bzw. weiterer Produktionskosten zu leisten. Das wurde bereits in Kapitel 4.3 für den Mähdrusch und die nachfolgende Spreu- bzw. Strohernte gezeigt. In Kapitel 4.4 wurde dieser Schritt vernachlässigt, da in allen Verfahren die Erntekosten komplett durch den Biomassepreis gedeckt werden. Die Biomasse hat so vereinfacht dargestellt die ganze Getreideernte bezahlt und zusätzlich einen Beitrag zur Begleichung der verbleibenden Produktionskosten geleistet.

Für die MD-Verfahren mit eindeutig zuordenbaren Kosten ist dies einfach, indem überprüft wird, ob die Biomasseerlöse höher sind als die Kosten der zusätzlichen Erntekette für Biomasse. Bei der Strohballenkette betragen diese 102,96 €/ha, wodurch der Erlös von 124,80 €/ha größer ist. Der Differenzbetrag kann zur Deckung von anderen Produktionskosten herangezogen werden.

Die zusätzlichen Kosten für die Spreuernte im Anschluss an den Mähdrusch betragen 82,96 €/ha (vgl. Kapitel 4.3), die damit die direkt zuordenbaren Erlöse von 72,19 €/ha übersteigen. Bei dem hier vorliegenden, niedrigeren Biomassepreis pro Tonne liegen die Erlöse unter den Kosten wodurch die Spreuernte nicht ökonomisch sinnvoll ist.

Für das KPE-Verfahren ohne Strohernte (3. von links) können die Kosten aufgrund der gemeinsamen Ernte von Korn und Spreu nicht direkt zugeordnet werden. Die Biomasseerlöse sind mit 66,60 €/ha die niedrigsten unter allen verglichenen Verfahren. Die gesamten Kosten betragen 121,54 €/ha. Hier kann die Schwelle nicht ohne weitere Zuordnungen über Transportvolumina oder Erntegutgewicht berechnet werden, was jedoch zu aufwendig für die vorliegende Betrachtung ist. Die einfachste Möglichkeit dafür ist es, die Kosten hälftig auf Biomasse und Körner zu verteilen. Damit werden der Biomasseernte 50 % der 121,54 €/ha zugeordnet, was 60,76 €/ha entspricht. Damit sind die Biomasseerlöse um 5,84 €/ha höher als die zugeordneten Kosten, wodurch ein positiver Beitrag zur Kostendeckung erreicht wird.

Allerdings kann diese Art der Kostenzuteilung als relativ ungenau eingeschätzt werden, auch wenn dies einfach und praktikabel ist. Eine weitere, genauere Kostenzuteilung kann dadurch erfolgen, dass die Kosten in denselben anteiligen Verhältnissen zugewiesen werden, in dem die Erlöse von Korn und Biomasse zueinander stehen. Bei einem Gesamterlös von 1340,60 €/ha beträgt der prozentuale Erlösanteil der Biomasse mit 66,60 €/ha ca. 4,97 %. Wird dieser Anteil von den Erntekosten in Höhe von 121,54 €/ha der Biomasseernte zugeteilt, wären es lediglich 6,04 €/ha, die als Schwelle vom Biomasseerlös überschritten werden müssen, um ökonomisch vorteilhaft für den Landwirt zu sein. Diese Bedingung ist hier erfüllt. Die verbleibenden 115,50 €/ha werden demnach der Körnerernte zugeteilt.

Aufgrund der vergleichenden Darstellung kann die Wirtschaftlichkeit jedoch anderweitig abgeleitet werden. So liegt die rechnerische Differenz beim MD-Spreuernteverfahren bis zur Spreuerntekostendeckung bei 10,77 €/ha (vgl. vorheriger Absatz). Beim KPE-Spreuernteverfahren ist der Biomasseerlös um 5,59 €/ha niedriger als beim MD-Spreuernteverfahren. Dieser Betrag wird zu den 10,77 €/ha hinzuaddiert und ergibt 16,36 €/ha, die ein wirtschaftliches Verfahren für die Korn-Spreuernte günstiger sein muss, als das MD-Spreuernteverfahren. Die Kostendifferenz der Verfahren beträgt 52,62 €/ha ($> 16,36$), die das KPE-Spreuverfahren günstiger ist als das MD-Spreuverfahren, wodurch das KPE-Spreuernteverfahren hier argumentativ als ökonomisch sinnvoll eingestuft werden kann, zurückzuführen auf die exakt mögliche Berechnung des Referenzverfahrens MD-Spreuernte.

In Kürze zusammengefasst und vereinfacht heißt das, beim MD-Spreuverfahren fehlen ca. 10 €/ha zur Wirtschaftlichkeitsschwelle. Das KPE-Spreuverfahren hat zwar um gut 5 €/ha niedrigere Erlöse, aber auch um über 50 €/ha niedrigere Kosten, wodurch die vom MD-Spreuverfahren im Vergleich abgeleitete Schwelle zur Kostendeckung überschritten wird.

Beim KPE-Verfahren mit 25 % Strohernte und beim Stripperernteverfahren werden die Erntekosten ebenfalls nicht gänzlich über die Biomasse gedeckt. Jedoch ist bei diesen Verfahren die Differenz zwischen Kosten und Erlös geringer als beim KPE-Spreuernteverfahren, wodurch beim KPE-Verfahren mit 25 % Stroh und beim Ährenstripperverfahren die ökonomische Vorteilhaftigkeit höher eingestuft wird und dadurch ebenfalls begründet werden kann.

Neben der Sensitivitätsanalyse zeigen die verschiedenen Herangehensweisen, dass unterschiedliche Betrachtungen und damit Möglichkeiten zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Doppelernteverfahren genutzt werden können. Welcher Berechnungsweg individuell als richtig oder falsch interpretiert wird, kann nicht festgelegt werden. Für die vorliegende Zielsetzung der Arbeit haben sich die EKFL bereits als optimal erwiesen. So auch in Abbildung 22 für den vorliegenden Sachverhalt mit vermindertem Biomassepreis pro Tonne Erntegut.

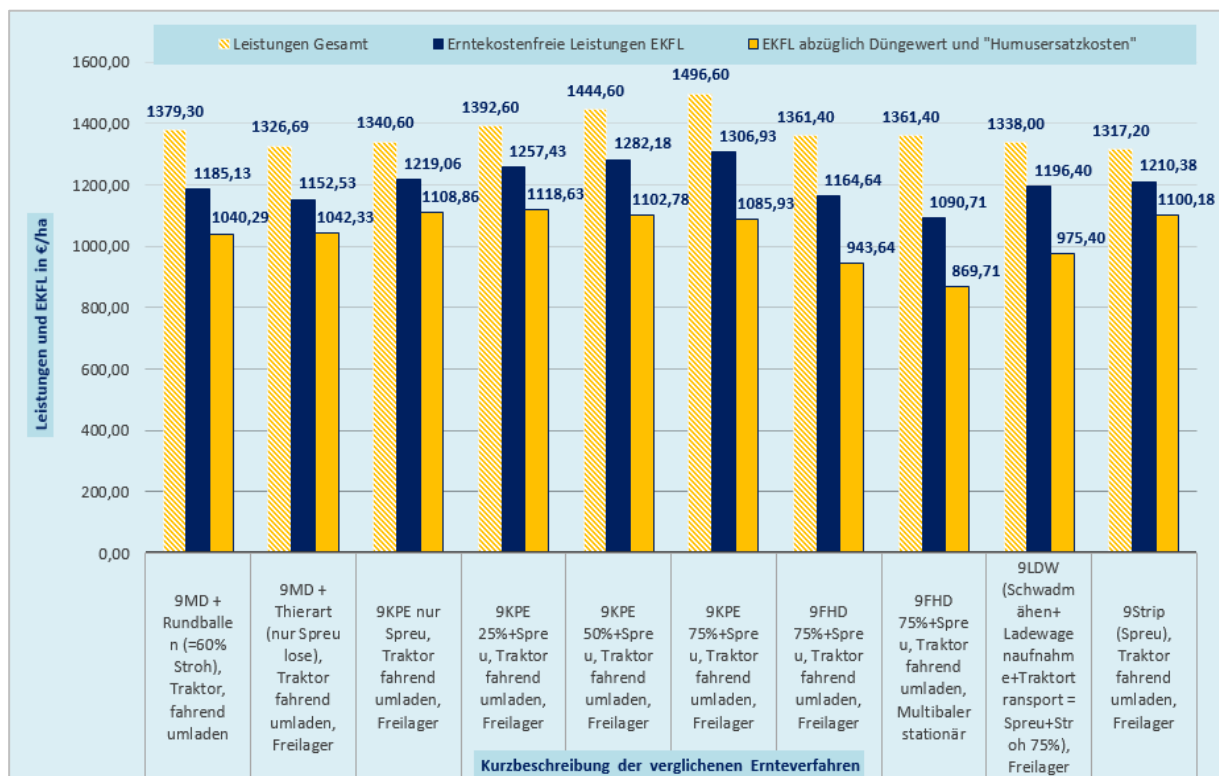


Abbildung 22: Gesamte Leistungen und EKFL der Ernteverfahren in €/ha bei 40 €/t Biomassepreis

In Abbildung 22 fällt auf, dass die FHD-Verfahren und das LDW-Verfahren bei den langfristigen EKFL in Gelb deutlich niedriger sind als alle anderen Verfahren. Die drei genannten Verfahren besitzen demnach Eigenschaften, wodurch diese z.B. gegenüber den Kompakternteverfahren benachteiligt sind. Zum einen sind die genannten Verfahren durch eine sehr hohe Biomassernte und den damit verbundenen Humusersatzkosten gekennzeichnet, zum anderen besitzen die FHD- und LDW-Verfahren wesentlich höhere Kornverluste gegenüber der Kompakternte bzw. Bruchkörner gelangen bei der stationären Separation von der vollvermarktungsfähigen Kornfraktion in die Biomasse. Dies bedingt die in Abbildung 21 gezeigten, noch immer hohen Biomasseerlöse v.a. beim LDW-Verfahren. Die genannten Bruchkörner, die in die Biomasse gelangen, werden bei einem niedrigeren Biomassepreis ebenso wie Spreu und Stroh nur zu diesem geringeren Preis vermarktet. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass Ernteverfahren mit hohen Kornverlusten oder Bruchkornanteilen besonders ökonomisch anfällig sind, wenn die Biomassepreise niedrig sind. Untermauert wird diese Folgerung dadurch, dass auch das Ährenstripperverfahren, die KPE-Verfahren und die Mähdruschverfahren weniger anfällig gegenüber dem halbierten Biomassepreis reagieren. Bei diesen Verfahren wird einerseits nur ein mittlerer oder niedrigerer Biomasseanteil mitgeerntet und andererseits sind die Kornverluste und die Entstehung von Bruchkorn deutlich geringer. Die argumentative Begründung der

Wirtschaftlichkeit des Ährenstripperverfahrens und des KPE-Spreuernteverfahrens ohne Stroh, die sich auf die Abbildung 21 bezieht, wird durch die Darstellung der EKFL in Abbildung 22 bestätigt.

Die Kompakternteverfahren weisen die höchsten Leistungen und EKFL auf, da hierbei die Kornverluste und die Bruchkornentstehung minimiert sind und es gleichzeitig möglich ist, hohe Biomasseanteile zu ernten. Bei den kurzfristig betrachteten EKFL in Blau ist das KPE-Verfahren mit dem höchsten Biomasseanteil von 75 % ökonomisch besser einzustufen als alle anderen betrachteten Verfahren. Die langfristig betrachteten EKFL in Gelb zeigen hingegen einen leichten Rückgang bei den KPE-Verfahren mit 50 % und 75 % Strohernte, was auf die gleichbleibenden Humus- und Nährstoffersatzkosten zurückzuführen ist. Das bedeutet, dass die Kosten für Ernte sowie Humus- und Nährstoffersatz über denen der dadurch generierten Biomasseerlöse liegt. Die Ernte von Anteilen über 25 % Stroh mit dem KPE-Verfahren ist dieser Betrachtung zufolge für die langfristige Gewinnmaximierung nicht sinnvoll. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn der Preis für Biomasse weiter herabgesetzt oder sogar auf 0 €/t reduziert wird. Dann kostet die Ernte je nach Verfahren die gleichen Beträge wie in Abbildung 21. Diese nehmen jedoch mit der Biomassemenge tendenziell zu, wie bei allen Darstellungen anhand der KPE-Verfahren mit zunehmenden Biomasseanteilen ersichtlich ist. Wenn dem kein angemessener Erlös für die unter Mehraufwand geerntete Biomasse gegenübersteht, ist die Ernte ökonomisch nicht sinnvoll. Dieser Punkt ist für einige Verfahren bei den angenommenen 40 €/t für Biomasse bereits überschritten.

4.7.2 Veränderung Biomassepreis auf 120 €/t

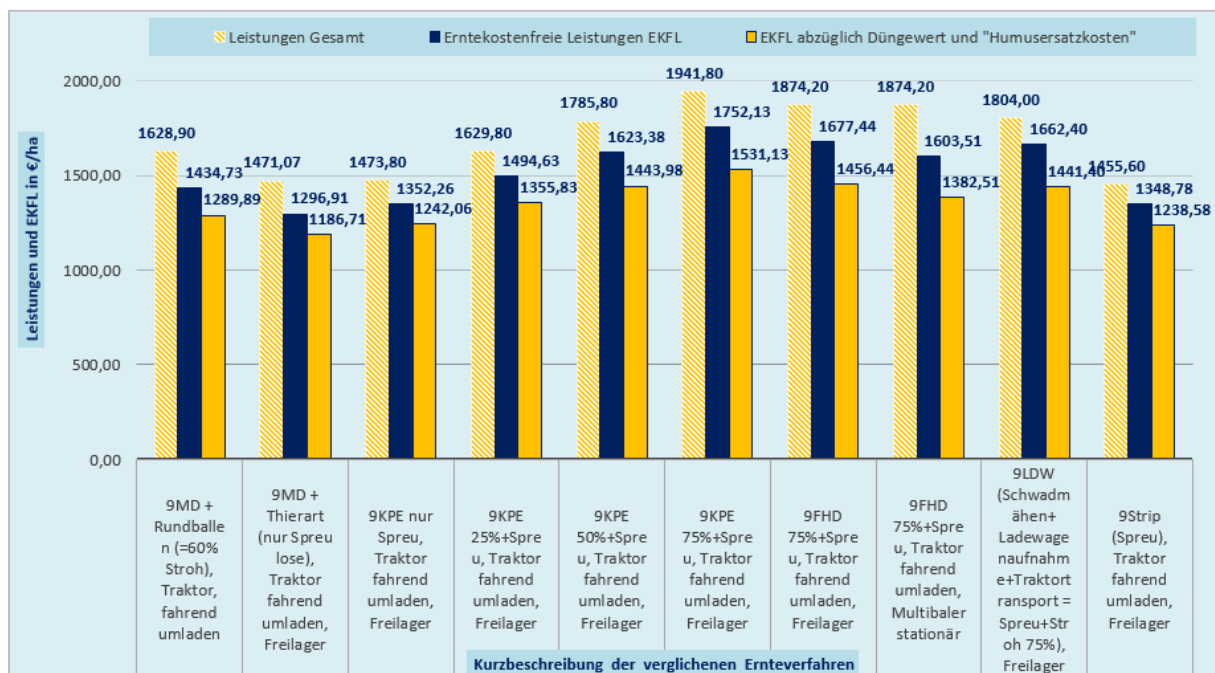


Abbildung 23: Gesamte Leistungen und EKFL der Ernteverfahren in €/ha bei 120 €/t Biomassepreis

Aufgrund der geringen Kornverluste und der hohen Biomasseernte ist das KPE-Verfahren mit 75 % Strohanteil auch in Abbildung 23 mit der Annahme von 120 €/t Erlös für Biomasse ökonomisch als das beste Verfahren einzuordnen. Insgesamt sind die Leistungen von Korn, Biomasse und EKFL auf einem deutlich höheren Niveau als bei 40 €/t Biomasse. Die LDW- und FHD-Verfahren sind bei den hohen Biomassepreisen als ökonomisch vorteilhaft einzuordnen, da den hohen Erntekosten ein hoher Erlöswert gegenübersteht. Dennoch ist zu erkennen, dass die Verfahren aufgrund höherer Kornverluste geringere Gesamtleistungen als das Kompakternteverfahren aufweisen. Schwächer sind die Verfahren mit geringer Biomasseernte wie z.B. das Kompakternteverfahren ohne Strohanteil oder das Ährenstripperverfahren.

Wird der Biomasseerlös weiter in Richtung 200 €/t erhöht, was hier dem Kornpreis entspricht, nehmen die relativen Unterschiede der Verfahren mit hohem Biomasseanteil zueinander weiter ab, da dann auch Bruchkorn gleichwertig wie Konsumgetreide vermarktet werden kann. Allerdings macht eine zunehmend extreme Betrachtung des Biomassepreises über dem Preis der vollvermarktungsfähigen Körner wenig Sinn, wenn wie hier angenommen wird, die Biomasse durch Körner substituiert werden kann. Dann ist es ökonomisch vorteilhaft wenn auch die Körner zum höheren Biomassepreis vermarktet werden und eine stationäre Separation unterlassen wird.

4.7.3 Veränderung Kornpreis

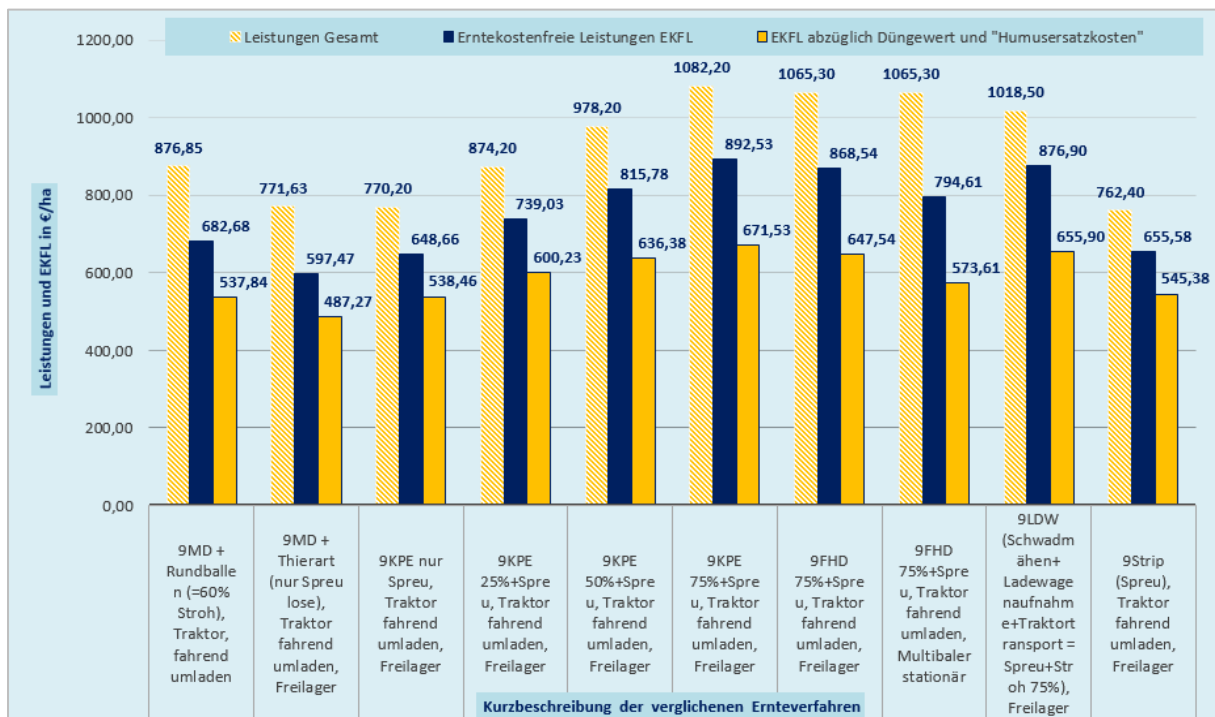


Abbildung 24: Leistungen und EKFL bei Kornpreisen von 100 €/t

Durch die Halbierung der Erlöse von vollvermarktungsfähigem Korn von 200 auf 100 €/t sinkt das Niveau der gesamten Leistungen in Abbildung 24 deutlich. Die Biomasseerlöse werden wieder mit 80 €/t angenommen. Da sich die Erlöse von Korn und Biomasse hierbei fast angleichen, sind ähnlich wie in Abbildung 23 die Ernteverfahren mit hohen Biomasseanteilen besonders vorteilhaft in der vergleichenden Darstellung. Auch hier ist das Kompakternteverfahren ökonomisch am stärksten, jedoch sind die EKFL der LDW- und FHD-Verfahren kaum niedriger, da Kornverluste und Bruchkorn durch die fast angeglichenen Preise von Korn und Biomasse keinen so deutlichen Erlösvorteil für voll vermarktungsfähige Ware hervorbringen, wie bei bisher 200 €/t für Korn und einer damit verbundenen, hohen Differenz zum Biomassepreis von 80 €/t.

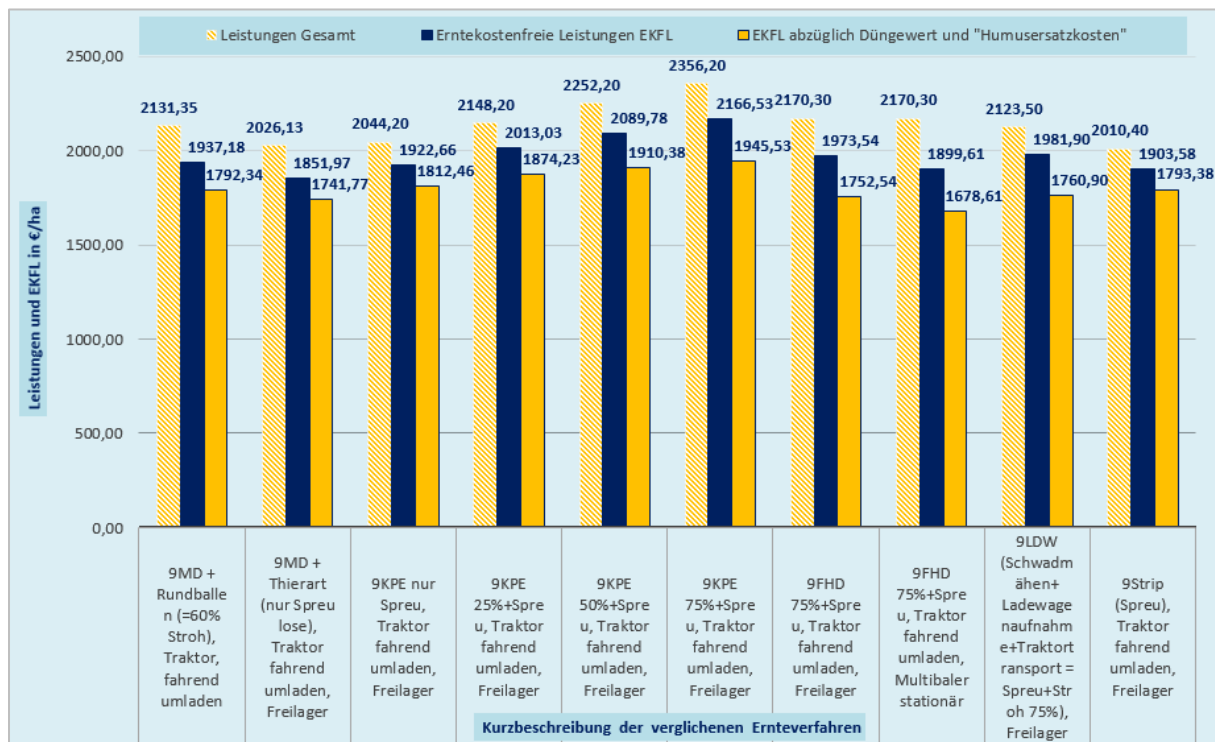


Abbildung 25: Leistungen und EKFL bei Kornpreisen von 300 €/t

Abbildung 25 mit einer Preisannahme für vollvermarktungsfähige Körner von 300 €/t zeigt hingegen ähnliche Verhältnisse der Ernteverfahren untereinander wie Abbildung 22 bei niedrigen Biomassepreisen pro Tonne. Die LDW- und FHD-Verfahren mit hohen Biomasseanteilen und Kornverlusten bzw. Bruchkorn, das bei der Separation in die Biomasse gelangt, sind im Verhältnis zu den anderen Verfahren eher schwächer, insbesondere für die langfristige EKFL-Betrachtung in Gelb (jeweils rechter Balken). Das Niveau der Leistungen und EKFL ist hingegen wesentlich höher als in den Betrachtungen zuvor.

Die Sensitivitätsvariationen der beiden Erlösquellen Korn und Biomasse lassen daher die Schlussfolgerung zu, dass die absolute Höhe der Preise jeweils ein bestimmtes Niveau vorgeben. Der relative Unterschied zwischen Korn und Biomasse beeinflusst die Vorzüglichkeit einzelner Verfahren. Ist der Biomassepreis verhältnismäßig hoch, sind die FHD- und LDW-Verfahren mit höheren Kornverlusten eine interessante Alternative gegenüber der Kompakternte oder dem Ährenstripperverfahren. Mit der Kompakternte können in allen behandelten Marktsituationen die höchsten Erlöse je Hektar eingefahren werden, auch weil sich die Biomasseerntemenge variabel gestalten lässt und somit bei niedrigen Biomassepreisen die Reststofferte reduziert werden kann.

4.7.4 Veränderung Feldentfernung

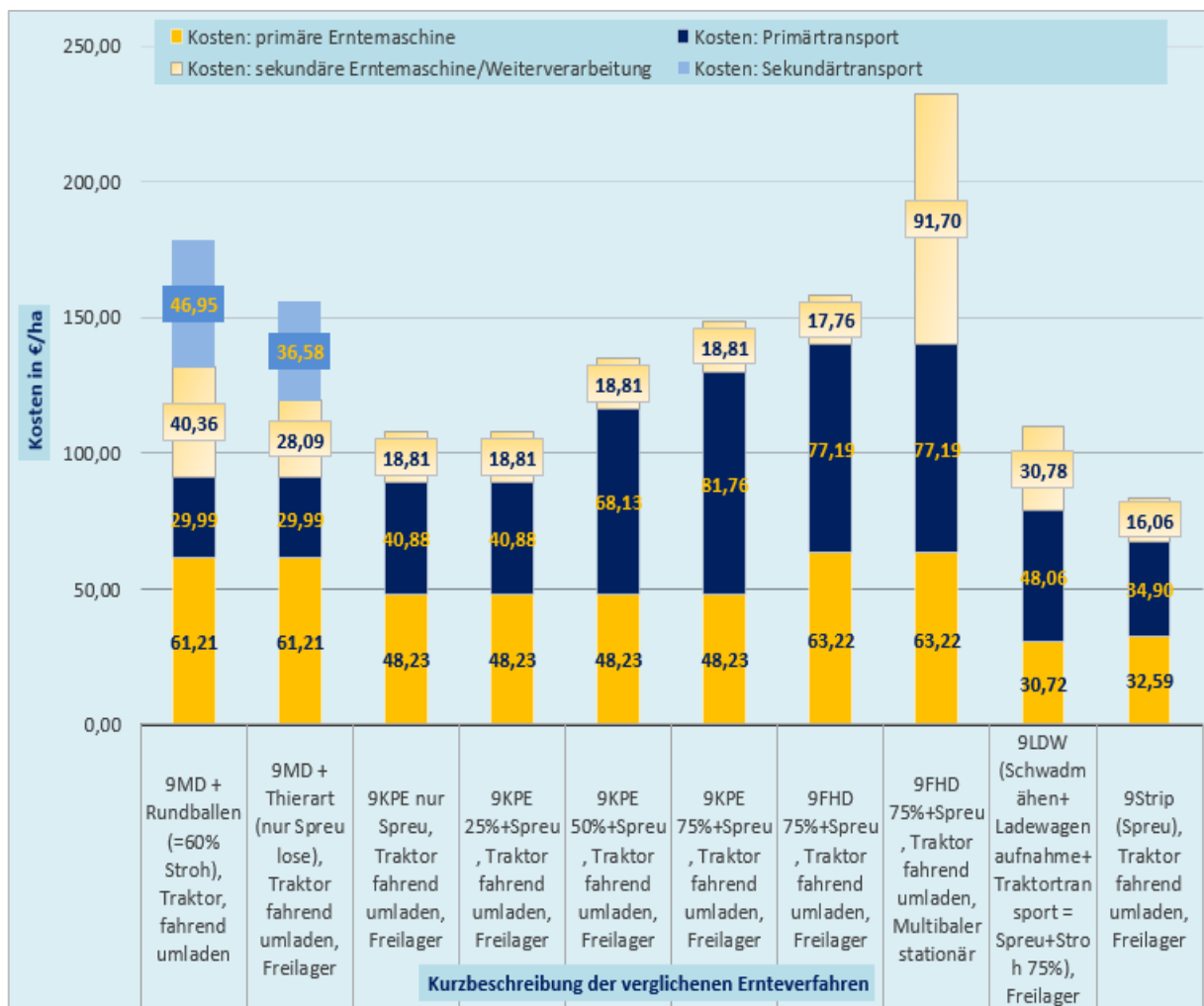


Abbildung 26: Kostenstruktur in €/ha bei 5 km Feldentfernung

Im Vergleich mit der in Abbildung 16 gezeigten Kostenstruktur verschiedener Mähdrusch- und Doppelernteverfahren bei 10 km Feldentfernung sind in Abbildung 26 die Transportkosten in Blau (mittig) und Hellblau (oben bei MD-Verfahren) bei einigen Verfahren deutlich geringer, jedoch nicht entsprechend der Reduktion der Transportstrecke halbiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass lediglich die Fahrzeit abnimmt, nicht jedoch die Zeiten für Beladung und Entladung.

Beim Korntransport der MD-Verfahren hat die geringere Transportentfernung rechnerisch keinen Einfluss, da die benötigten Transporteinheiten, die für 5 km Entfernung benötigt werden, auch bei 10 km noch ausreichend sind. Die Kosten des Biomassetransports verringern sich hingegen bei den MD-Verfahren für die Spreu- bzw. Strohernte um 15 bis 20 €/ha. Die Kosten

für die primäre Erntemaschine bleiben in allen Verfahren identisch, ebenso wie für die sekundären Arbeitsschritte wie Ballenpressen oder stationäre Separation, da lediglich die Transportentfernung variiert wurde, was sich ausschließlich auf die damit verbundenen Transportkosten auswirkt.

Im Gegensatz zu den nur geringen Unterschieden bei den MD-Verfahren nehmen die Transportkosten beim KPE-Verfahren mit 75 % Strohanteil um etwa ein Drittel deutlich ab. Absolut sinken die Transportkosten von 122,63 €/ha auf 81,76 €/ha, was 40,87 €/ha Kostenreduktion bedeutet. Es kann daraus gefolgert werden, dass je höher der Anteil an losem Erntegut auf nicht ausgeladenen Fahrzeugen ist, desto stärker steigen die Transportkosten bei zunehmender Entfernung an. Oder je stärker die Nutzlast der Transportfahrzeuge ausgenutzt wird, desto besser können damit auch größere Entfernungen wirtschaftlich zurückgelegt werden.

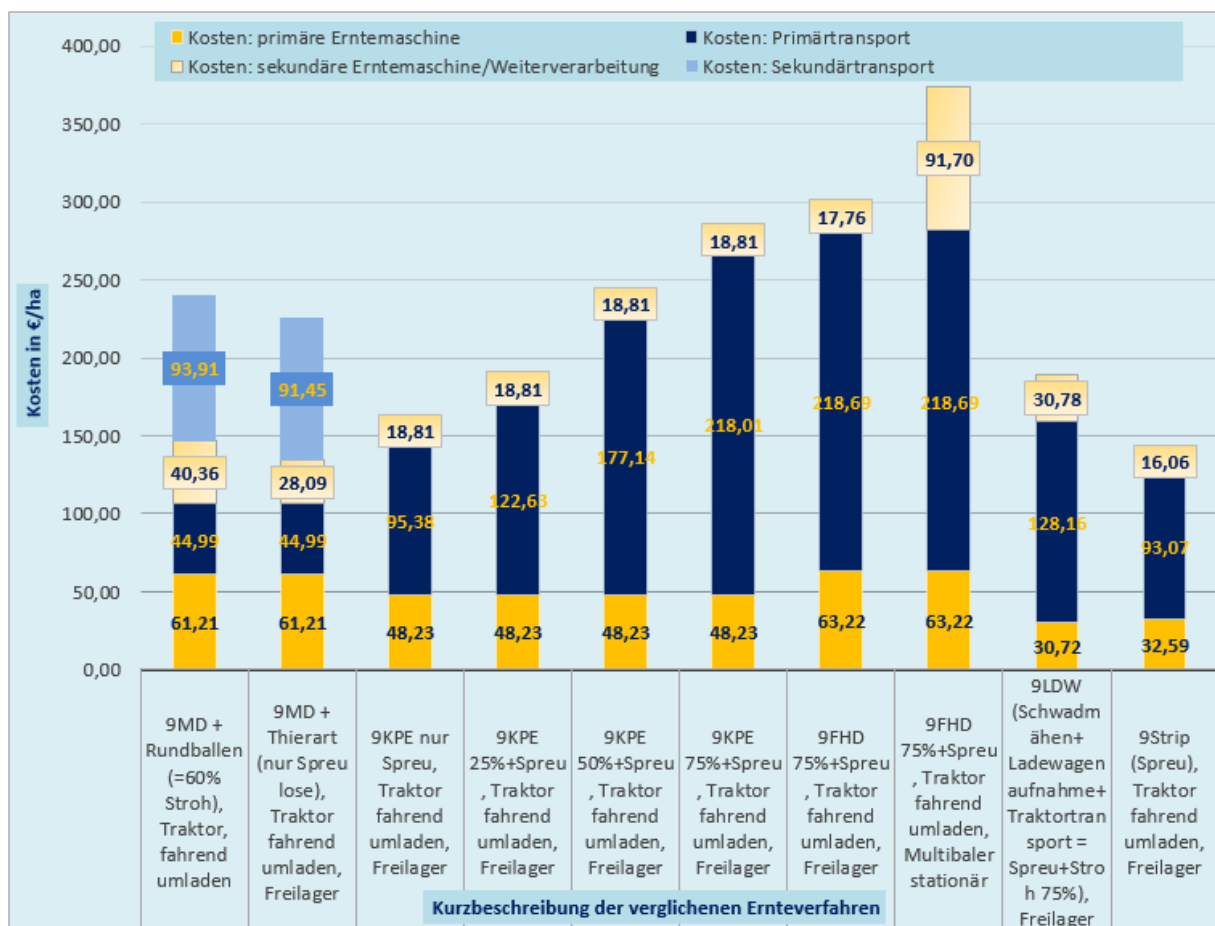


Abbildung 27: Kostenstruktur in €/ha bei 20 km Feldentfernung

Die Folgerungen werden durch die in Abbildung 27 dargestellten Zusammenhänge bestätigt, wobei statt 5 km nun 20 km Transportentfernung angenommen werden, was einer Vervierfachung entspricht. Während sich die Transportkosten (blau) des KPE-Verfahren ohne Stroh um

den Faktor 2,33 von 40,88 €/ha auf 95,38 €/ha erhöhen, steigen die Kosten beim KPE-Verfahren mit 75 % Strohanteil von 77,19 €/ha auf 218,01 €/ha an, was dem Faktor 2,82 entspricht. Bei den FHD-Verfahren werden die Transportkosten mehr als verdreifacht.

Lediglich die Transportkosten von Korn nehmen durch die wesentlich höhere Transportentfernung um nur 15 €/ha zu. Die Transportkosten für Strohballen bzw. lose Spreu bei den MD-Verfahren verdoppeln sich in etwa.

Das MD-Rundballenverfahren weist bei 20 km Transportentfernung 240,47 €/ha an gesamten Verfahrenskosten auf. Bei gleicher Entfernung sind es beim KPE-Verfahren mit 50 % Stroh bereits 244,18 €/ha. Bei den KPE-Verfahren mit höheren Strohanteilen und bei den FHD-Verfahren sind die Kosten mit 285,05 bzw. 299,67 €/ha deutlich höher als die des MD-Rundballenverfahrens.

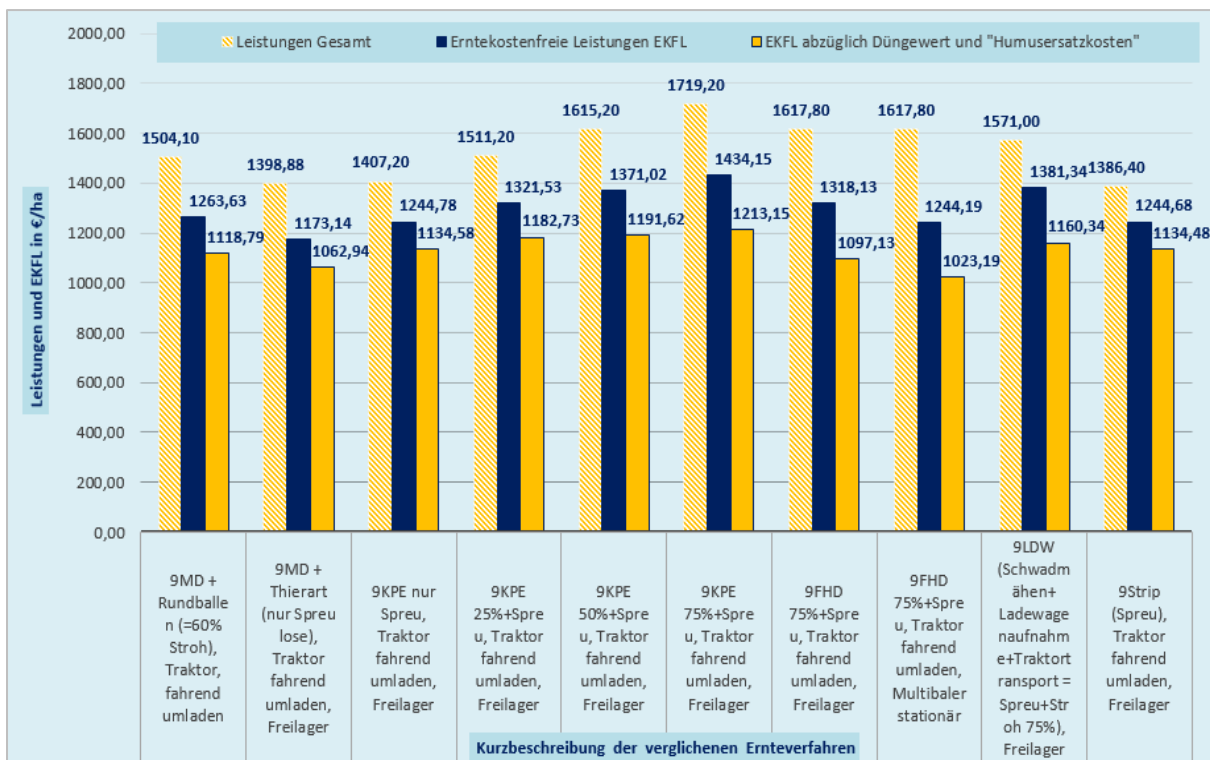


Abbildung 28: Leistungen und EKFL bei 20 km Transportentfernung

Selbst wenn die Kosten des KPE-Verfahrens die Kosten des MD-Rundballenverfahrens übersteigen, wird in Abbildung 28 ersichtlich, dass die Kompakterntverfahren bei den EKFL höher liegen als das MD-Verfahren. Dies ist auf die höheren möglichen Biomasse-mengen und deren zusätzlichen Erlöse gegenüber dem MD-Verfahren zurückzuführen. Trotz den 44,58 €/ha hö-

heren Kosten des KPE-Verfahrens mit 75 % Strohanteil gegenüber dem MD-Rundballenverfahren sind sowohl die kurzfristigen EKFL des KPE-Verfahrens um 170,52 €/ha höher, als auch die langfristigen EKFL um 94,36 €/ha.

Die in Kapitel 4.6 benannte Abhängigkeit der Doppelernteverfahren vom Biomassepreis kann nach der Sensitivitätsanalyse zum Teil bestätigt werden. Besonders der Feldhäckseldrusch reagiert stark negativ auf niedrige Biomassepreise, da ein kleiner aber bedeutender Teil der Körner technisch bedingt zu minderwertigem Bruchkorn verarbeitet wird und der Strohanteil nicht reduziert werden kann. Der Wert des Bruchkorns nimmt in der vorliegenden Betrachtung analog zum Biomassepreis ab, da die Bruchkörner bei der stationären Separation in die Biomassefraktion sortiert werden. Die Vorzüglichkeit des Kompakternteverfahrens kann jedoch weiter bestätigt werden, da hierbei geringere Kornverluste als beim Mähdrusch auftreten und die Biomasseernte bei niedrigen Preisen auf ein Minimum, also nur Spreu, reduziert werden kann. Ährenstripper- und Ladewagenverfahren können in ihrer Eignung zur Getreideernte zwischen den „Extremen“ FHD und KPE eingeordnet werden und bieten noch Potential zur Verlustoptimierung und zur Erhöhung der Flexibilität zur Ernte von höheren oder niedrigeren Biomasseanteilen.

5 Bewertung und Diskussion

Jedes der verglichenen Ernteverfahren hat Vor- und Nachteile in unterschiedlicher Hinsicht. Einerseits was die Kosten und Erlöse anbelangt, die als Ergebnisse in Form der EKFL resultieren und bereits vorgestellt sind. Andererseits ist die Möglichkeit der praktischen Umsetzung der Verfahren mit jeweils verschiedenen Herausforderungen relevant. So werden zunächst v.a. die verfahrenstechnischen Ernteschritte diskutiert und wie diese sich auf die EKFL auswirken können. In diesem Zusammenhang werden auch mögliche Optionen für eine abgeänderte Durchführung der Verfahren behandelt. Weiter sollen dann die Auswirkungen auf den Ackerbau und die Ökologie behandelt werden, die zusätzliche Erlöse oder Einbußen mit sich bringen können, was jedoch über die Zielstellung der vorliegenden Arbeit hinausgeht. Diesbezüglich soll der zukünftige Forschungsbedarf herausgestellt werden. Bei dem zuerst behandelten Verfahren, dem LDW-Verfahren, werden die Erkenntnisse ausführlicher diskutiert, auch stellvertretend für die anderen Verfahren.

5.1 Ladewagen-Schwadernteverfahren

Es ist nicht bekannt, dass das angenommene Ladewagen-Schwadernteverfahren von Getreide praktiziert wird. Die Annahme zu diesem Verfahren ist auf die Überlegungen der Doppelernte und v.a. auf die Vereinfachung der Getreideernte zurückzuführen. Da bei Doppelernteverfahren wie im Grünland große Teile oder sogar die ganzen Pflanzen geerntet werden sollen, liegt die Überlegung nahe, die Grünlanderntetechnik auf die Getreideernte mit stationärer Weiterverarbeitung des Ernteguts zu übertragen, ähnlich dem Feldhäckseldrusch, der früher für die Ernte von Grünland und von Getreide eingesetzt wurde. Abweichend zur Grünlandkette ist beim Ladewagenverfahren für die Getreideernte jedoch das Mähen des Ernteguts mit einem Messerbalken-Bandschneidwerk angenommen, da Scheiben- oder Trommelmähwerke mit hohen Messergeschwindigkeiten erhöhte Kornverluste erwarten lassen.

Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die Technik etabliert ist und verbreitet eingesetzt wird, wodurch sich vorhandene Maschinen besser auslasten lassen. Durch die Verdichtung im Ladewagen ist eine bessere Ausnutzung der Transportkapazität möglich, was den Folgerungen der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.7.4 entspricht. Dabei sind keine teuren Spezialmaschinen wie Feldhäcksler oder Mähdrescher nötig, wodurch auch die Verfahrenskosten als positiv bewertet werden können. Betrachtet man die Leistungen aus Biomasse oder die EKFL vergleichend zu den anderen Verfahren, wird die Schwäche des Ladewagenverfahrens deutlich.

Durch die angenommenen Korn- und Biomasseverluste, die auf die Schwadablage zurückgeführt werden, sinken die LDW-EKFL deutlich unter die des KPE-Verfahrens mit der vergleichbar hohen Biomasseerntemenge von 75 % des Strohs und der Spreu. Dabei sind sowohl die primären Erntemaschinenkosten für den Traktor mit Schneidwerk rund 36 % niedriger als für den Kompakternter mit Schneidwerk und Überladewagen, als auch die Transportkosten, die beim LDW-Verfahren aufgrund der höheren Verdichtung etwa 30 % niedriger sind als beim KPE-Verfahren. Die stationären Separationskosten werden beim LDW-Verfahren höher angesetzt, was in Kapitel 5.1.1 diskutiert wird.

Neben dem Forschungsbedarf zur Höhe der Verluste an Körnern und Biomasse in Abhängigkeit von Getreideart, Sorten, Korn-Stroh-Verhältnis, Feuchtegehalt, Reifegrad, Liegezeit des Schwads und weiteren Parametern muss auch der Rohaschegehalt im Erntegut unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden. Ist dieser aufgrund von Verschmutzungen wie Bodenanhäufungen am Erntegut zu hoch, kann dies zu Problemen in der weiteren Nutzung der Biomasse führen.

Interessant sind zudem Möglichkeiten, das Verfahren hinsichtlich des Biomasseanteils im Erntegut weiter zu optimieren bzw. flexibler zu gestalten. Denkbar wäre der Hochschnitt des Getreides, wodurch die Größe des Schwads reduziert wird und die unteren, tendenziell ligninhaltigeren und zum Erntezeitpunkt feuchteren Stängelbestandteile nicht mitgeerntet werden. Dies führt zu weniger feuchtem Material im Schwad und aufgrund der geringen Masse zu einer besseren Durchlüftung des Schwads. Auch von unten wird das Schwad besser durchlüftet, da die Ähren und Halme auf etwa 20 – 25 cm hohen Stoppeln abgelegt werden, anstatt auf 5 – 10 cm hohen Stoppeln. Zudem ist eine positive Entwicklung der Biomassequalität wie z.B. der Verbrennungseigenschaften zu erwarten, da die unteren Halmteile mit niedriger Qualität nicht mitgeerntet werden. Andererseits ist es möglich, dass hohe Anteile der abgelegten Ähren auf den Boden fallen und von dort nicht wiederaufgenommen werden können und somit in höheren Verlusten resultieren. Es ist daher zu überprüfen, ob sich die erwähnten Möglichkeiten des Hochschnitts bewahrheiten. Unabhängig davon ist das LDW-Verfahren lediglich in der Lage, hohe Mengen Biomasse mit zu ernten, da niedrige Biomasseanteile oder lediglich die Korn-Spreu-Ernte ohne Stroh aufgrund der Verfahrensanordnung mit Schwadablage nicht möglich oder mit extrem hohen Verlusten verbunden sein werden.

Verfahrenstechnisch ist das LDW-Verfahren durch eine hohe Flexibilität gekennzeichnet. Es ist einerseits möglich, das Schwadmähen des Ernteguts direkt vor dem Ladewagen vorzunehmen, aber andererseits kann das Getreide auch 2 oder 3 Wochen vor der Bergung mit dem Ladewagen gemäht werden und im Schwad abreifen oder trocknen. Auch diese, jeweils optimalen Zeitpunkte müssen für die Anwendung evaluiert werden, um große Mengen qualitativ

hochwertiger Körner und Biomasse optimal ernten zu können. Allgemein ist für das Verfahren als vorteilhaft anzusehen, dass die primäre Erntemaschine unabhängig vom Transport arbeiten kann. Es ist nicht zwingend notwendig, die Transportkette auf die Erntemaschine abzustimmen bzw. es ist keine Transportkette notwendig, da ein einziges Transportfahrzeug unabhängig von anderen Fahrzeugen den Transport durchführen kann.

Optimiert werden kann das Verfahren dadurch, dass anstelle des Traktors für den Transport Agrar-LKW eingesetzt werden, wie Abbildung 29 zeigt. Der abgebildete Agrar-LKW ist speziell auf die Grünfütterernte mit dem Ladewagen ausgelegt. Im Vergleich zum Standard-LKW wird Ackerbereifung mit einer Reifendruckregelung genutzt. Zudem besitzt der Agrar-LKW dieselben Hydraulikfunktionen und -anschlüsse sowie Kugelkopfanhängung und Zapfwelle wie Traktoren. Trotz der Modifikationen ist ein Agrar-LKW günstiger in der Anschaffung und bietet wesentlich mehr Nutzlast als ein vergleichbarer Traktor mit über 400 PS Motorleistung. Zudem ist der Reifenverschleiß geringer und die Reifen sind günstiger als beim Traktor. Dabei kann ein LKW mit 80 km/h Höchstgeschwindigkeit und niedrigem Kraftstoffverbrauch die Autobahnen nutzen, was den meisten Traktoren verwehrt bleibt. Lediglich unter schwierigen Bedingungen wie bei Nässe oder in Hanglagen ist der Traktor mit höherem Eigengewicht und größeren Reifen deutlich im Vorteil (vgl. Stenkiewitz und Grünig, 2020).



Abbildung 29: Agrar-LKW mit Ladewagen

Quelle: Eigen, am 22.07.2021

Der in Abbildung 29 an den LKW angehängte Ladewagen von Pöttinger ist ebenfalls modifiziert und auf die höheren Geschwindigkeiten des LKWs abgestimmt, wodurch eine höhere Transportleistung realisiert werden kann. Für 80 km/h Höchstgeschwindigkeit sind insgesamt 16 Reifen an 4 Achsen montiert, die zudem eine hohe Aufstandsfläche für die Bodenschonung ermöglichen. Je größer die Feldentfernungen sind, desto mehr sind LKW-Transportgespanne dem Traktortransport überlegen, was sich auch auf die Doppelernte mit dem Ladewagen-Schwadernteverfahren übertragen lässt. Dass Traktoren beim Transport an Grenzen stoßen, wurde bereits in Kapitel 4.7.4 bei 20 km Transportentfernung durch den starken Anstieg der Transportkosten dargestellt. LKW bringen hier Vorteile sowohl für den benötigten Investitionsbedarf, die Betriebskosten und dadurch bei den EKFL.

Zu bemängeln ist beim LDW-Verfahren, dass durch den Ladewageneinsatz keine konsequente Trennung zwischen Straßenfahrt und Feldarbeit möglich ist. Würde das Erntegut am Feldrand umgeladen, wird es durch den Überladevorgang aufgelockert. Dadurch ist das Erntegut nicht mehr in den Transportbehälter gepresst, weshalb der Vorteil einer hohen, möglichen Nutzlast dann verloren geht.

5.1.1 Stationäre Separation LDW

Bei allen genannten Vorzügen im Feld und beim Transport stellt die anschließende, stationäre Separation des Ernteguts bei LDW-Verfahren eine große Herausforderung dar. Denn das Erntegut ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vollständig ausgedroschen und die Körner befinden sich noch in den Ähren. Daher muss das Erntegut nicht nur voneinander getrennt werden wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, sondern die Körner müssen durch den Ausdrusch zunächst aus den Ähren herausgelöst werden bevor Korn und Biomasse voneinander getrennt werden, was der Ernte von Getreidebündeln mit dem Mähbinder und dem Winterdrusch mit der Dreschmaschine am Hof ähnelt.

Der Ladewagen kann nur insofern Einfluss auf das Erntegut nehmen, wenn dieses optional mit den Messern geschnitten wird. Der Einfluss von geschnittenem Erntegut gegenüber ungeschnittenem Erntegut auf die stationäre Separation ist zu überprüfen. Nach dem Abladen des im Ladewagen verdichteten Ernteguts, muss dieses entzerrt und dosiert werden, um einer stationären Dresch- und Separationseinheit gleichmäßig zugeführt werden zu können. Für die Entzerrung und Dosierung eignen sich eventuell Beschickungseinrichtungen von Biogasanlagen oder Futterrocknungsanlagen, die den Dosiereinrichtungen von Häckseltransportwagen und der Kratzbodenförderung ähneln. Die Dresch- und Separationseinheit könnte aus den wesentlichen der beschriebenen Hauptbaugruppen des Mähdreschers abgeleitet sein, bestehend aus Dreschwerk, Hordenschüttler, Windreinigung und Siebreinigung, ggf. mit zusätzlichem Strohhäckler.

Ist diese Verarbeitungseinheit, die sich aus einer Dosierung, dem Ausdrusch und der Separation von Korn und Biomasse zusammensetzt, als bauliche Anlage vor den Getreidesilos installiert, müssen große Mengen der Biomasse von dort wegbefördert werden, entweder mit Fahrzeugen, Förderbändern oder pneumatischer Förderung. Andernfalls müssen die stationär gepressten Ballen abtransportiert und eingelagert werden. Alternativ kann die Verarbeitungseinheit mobil für innerbetriebliche Einsätze gestaltet sein z.B. ähnlich einer Schlauchsilagepresse, die das Erntegut für die Separation aufnehmen und verarbeiten kann. Dann würde sich die direkt anschließende Schlauchlagerung für die Biomasse optimal eignen und die Körner müssten zum Lager befördert werden. Sofern die Biomasse nicht als gesamte „Mischung“ weiterverwertet werden soll, wie in der Berechnung angenommen, sondern die Trennung der einzelnen Nicht-Korn-Bestandteile aus der geernteten Biomasse bevorzugt wird, müssen diese einzelnen Bestandteile individuell weiterverarbeitet und gelagert werden. Bruchkörner und Kornbeschädigungen können durch die Schneidmesser des Ladewagens und durch die Verarbeitung auftreten, jedoch gehen diese nicht verloren und können weiterverwertet werden, wenn auch nicht mit höchster Qualität wie das Marktgetreide.

Wie in Kapitel 3.4.2 für die Annahmen der Erntegut-Gemisch-Separation beschrieben, basiert die Kostenberechnung dafür auf 50 €/Std. Betriebskosten und auf 400.000 € Anschaffungskosten, über 10.000 Stunden abgeschrieben. Daraus würde lediglich 13,02 €/ha Separationskosten resultieren, die aufgrund der aufwendigeren Verarbeitung und der damit verbundenen Unsicherheit für die Berechnung auf 26,05 €/ha verdoppelt in den Vergleich einfließen. Dies entspricht mit 100 €/Std. Betriebskosten und 800.000 € Anschaffungskosten als Basis sehr hohen Annahmen für die je Hektar dennoch niedrigen Kosten. Daraus wird ersichtlich, dass die stationäre Separation trotz hoher Investitionsausgaben als günstig eingestuft werden kann, verglichen mit Feldarbeiten.

5.1.2 Einfluss auf Bewirtschaftung und Nachhaltigkeit LDW

Aus ackerbaulicher Sicht überwiegen die Vorteile von Doppelernteverfahren, auch wenn es einige Herausforderungen gibt. Durch die Ernte der nahezu kompletten Pflanzenbestandteile, ausgenommen der verfahrensbedingten Verluste, wird auch mit Pflanzenkrankheiten infizierte Biomasse zu großen Teilen vom Feld abgefahren, wodurch sich etwaige Krankheitserreger nicht weiter im Feld ausbreiten können. Ebenso werden Unkrautsamen vom Feld entfernt, wenn diese in den Ladewagen gelangen. Diesbezüglich ist der Zeitpunkt des Schwadlegens eine interessante Option, für die es zu bestimmen gilt, inwiefern sich frühes Schwadlegen vorteilhaft darauf auswirkt, einen höheren Anteil nicht ausgesamter Unkräuter miternten zu können. Wenn z.B. bereits 2 oder 3 Wochen vor dem eigentlichen Erntezeitpunkt das Erntegut ins

Schwad gelegt wird, ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass weniger Pflanzen ausgesamt haben und deren Samen sich ebenfalls im Schwad befinden, wodurch diese dann vom Feld entfernt werden. Langfristig könnte dadurch das Samenpotential im Feld verringert werden, ähnlich wie bei der Ganzpflanzensilage von Getreide in der Milch- oder Teigreife einige Wochen vor dem Drusch von Getreide (vgl. Lochner, 2021). So kann über mehrere Jahre der Bedarf an Fungiziden und Herbiziden in den Folgekulturen bei konsequenter Anwendung der Doppelernte abnehmen, was v.a. der ökologischen Nachhaltigkeitsdimension zuträglich ist. Herausfordernd wird die Ernte hingegen, wenn der bereits gemähte und im Schwad liegende Pflanzenbestand von unvorhersehbaren Niederschlägen feucht oder sogar durchnässt wird. Durch das beim Stroh durchgeführte Wenden können hier die Kornverluste stark zunehmen. Die anschließende Trocknung im Schwad wird kaum möglich sein, weshalb dann eine unverzügliche Ernte nötig wird, um das Keimen der Körner abzuwenden. Das Korn kann nach der Separation mit regulärer Technik getrocknet werden. Das feuchte Stroh kann entweder mit Spezialtechnik ebenfalls getrocknet werden, oder es wird einsiliert sofern die spätere Verwendung dies zulässt. Die Strohsilage sollte ähnlich der guten Siliereigenschaften von Maisstroh mit 40 - 50 % Trockensubstanzgehalt im Fahrsilo oder Folienschlauch kein Problem darstellen (vgl. Fleschhut und Strobl, 2017).

Als ackerbaulich nachteilig ist beim LDW-Verfahren, aber auch bei den anderen Verfahren mit hoher Biomasseabfuhr vom Feld, dass die mitgeerntete Biomasse nicht für die Humusproduktion des Ackers zur Verfügung steht. Auch die in der Biomasse enthaltenen Nährstoffe müssen der Folgekultur anderweitig zugeführt werden. Andererseits ist eine hohe Biomasseabfuhr nicht grundsätzlich als negativ zu bewerten, da entscheidend ist, wofür die Biomasse genutzt wird. Ist die innbetriebliche Nutzung z.B. in der Tierhaltung oder Biogasanlage angestrebt, ist zumeist ein geschlossener Nährstoffkreislauf gegeben. Dadurch werden die „Abfallprodukte“ der Tierhaltung oder Biogasanlage als wertvoller organischer Dünger zurück auf den Acker gebracht, wodurch eine ausreichende Humuszufuhr gewährleistet ist. Wird die Biomasse für industrielle Produkte wie Cellulose oder Ethanol aus dem Betriebskreislauf entfernt, muss die Humusregeneration mit anderen Maßnahmen wie u.a. Zwischenfruchtanbau, abgestimmten Fruchtfolgen oder konservierender Bodenbewirtschaftung sichergestellt werden.

Doch selbst wenn große Teile der Pflanzenreststoffe als Biomasserohstoff aus dem Betriebskreislauf entfernt werden, ist deren Humusregenerationseffekt tendenziell überschätzt. Das Umweltbundesamt (UBA) bewertet die Humusreproduktionsleistung von Stroh als wenig effizient im Vergleich u.a. mit Stallmist und Kompost, da nur etwa 17 – 23 % des im Stroh enthaltenen Kohlenstoffs im Boden gebunden werden (Umweltbundesamt, 2016). Diese Angabe lässt sich durch andere Werte bestätigen. So beträgt der Kohlenstoffgehalt in Stroh rund 45 bzw. 52 % (Vodegel et al., 2016 und Puttkamer, 2005). Daher werden vereinfachend 50 %

Kohlenstoffgehalt im Stroh angenommen. Nach VDLUFA-Werten (vgl. Sünder et al., 2010) können für die Humusreproduktionsleistung aus einer Tonne Stroh nur etwa 100 kg angerechnet werden, was 10 % entspricht. Bei 50 % Kohlenstoffgehalt bzw. 500 kg Kohlenstoff pro Tonne Stroh entsprechen die Anrechenbaren 100 kg einer Humus- bzw. Kohlenstoffproduktion von 20 %. Untermuert wird dies auch vom deutschen Biomasseforschungszentrum DBFZ. Demnach *„wird der meiste im Stroh gebundene Kohlenstoff kurzfristig als Kohlendioxid (sog. Bodenatmung) in die Atmosphäre entlassen. Ein kleinerer Teil wird jedoch in der organischen Bodensubstanz festgelegt“* (DBFZ, 2012, S. 130, vorletzter Absatz).

Die Wirkung des Strohverbleibs auf dem Feld ist demnach gering. Wird die Wirkung bzw. die Effizienz von Stroh als Kohlenstofflieferant für den Boden erhöht, könnten ggf. höhere Mengen der Reststoffe außerhalb des Betriebskreislaufes genutzt werden. Beispielsweise durch die mikrobielle Carbonisierung nach Witte (2013) bzw. dem daraus resultierenden MC-Kompost wird eine Kohlenstoffeffizienz von 90 % erreicht (Wonschik, 2017). Statt 100 kg Kohlenstoff pro Tonne Stroh könnten durch dieses Verfahren bis zu 450 kg Kohlenstoff pro Tonne Stroh in den Boden eingebracht werden, was der 4,5-fachen Menge entspricht. So können durch die Kohlenstoffeffizienzsteigerung wesentlich größere Mengen außerlandwirtschaftlich verwertet werden, ohne dem Boden weniger Kohlenstoff zurückzuführen. Aus einer Tonne Stroh könnten z.B. 250 kg für die Humusreproduktion mittels MC-Kompost genutzt werden, worin 125 kg Kohlenstoff enthalten sind, was mit einer Ausnutzung von 90 % etwa 112,5 kg Kohlenstoffrückführung auf die Fläche ergibt. Somit kann aus 250 kg Stroh durch den MC-Kompost mehr Kohlenstoff konserviert werden als durch den Verbleib von einer Tonne Stroh auf dem Feld. Die Differenz von 750 kg je Tonne Stroh kann dann bedenkenlos außerlandwirtschaftlich eingesetzt werden ohne die Kohlenstoffversorgung des Bodens zu beeinträchtigen. Alternativ können dem Feld bei Bedarf größere Mengen Kohlenstoff zugeführt werden wenn keine außerlandwirtschaftliche Nutzung möglich ist. Sofern sich die Kohlenstoffeffizienz von 90 % beim MC-Kompost konsequent und mit langfristig hoher Kohlenstoffstabilität im Boden erreichen lässt, bedeutet dies, dass die zunehmend politisch geforderte Kohlenstofffixierung zur Reduktion des Kohlenstoffdioxidgehalts in der Atmosphäre durch ein solches Verfahren um den Faktor 4,5 wesentlich wirksamer ist, als die Ernterückstände auf dem Feld verbleiben zu lassen.

Durch die hydrothermale Carbonisierung, die für trockenes Stroh weniger infrage kommt, können 80 % des Kohlenstoffs im Ausgangsmaterial erhalten bleiben (Umweltbundesamt, 2016). Durch die für Stroh geeignete Pyrolyse als Carbonisierungsprozess werden hingegen Kohlenstoffausbeuten um 60 % angegeben. Die daraus resultierende Pflanzenkohle ist sehr stabil und kann lange im Boden bestehen bleiben (Umweltbundesamt, 2016). Das entspricht einer erhöhten Wirksamkeit der Kohlenstoffeinbringung in den Boden mit dem Faktor 3, verglichen mit dem Verbleib der Ernterückstände auf dem Feld. Durch die Festsetzung und Stabilisierung

des während des Pflanzenwachstums aus der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoffdioxids entstehen negative Emission, weshalb der Pyrolyseprozess für die Pflanzenkohleherstellung als Schlüsseltechnologie für den Klimaschutz diskutiert wird (Neumann, 2020). Neben den quantitativ betrachteten Kohlenstoffwerten sind für die Anwendung bzw. Ausbringung auf dem Feld noch weitere, qualitative Parameter der erwähnten Kohlenstoffprodukte zu beachten, auf die nicht näher eingegangen wird.

Bei einem Biomasseertrag ohne Korn von 6,0 t/ha können im Fall der Pflanzenkohle 1,8 t/ha Kohlenstoff jährlich im Boden fixiert werden. Durch das Verbleiben der Biomasse auf dem Feld sind es demnach nur 0,6 t/ha. Der Umrechnungsfaktor von Kohlenstoff in CO₂ beträgt 3,67 (LWF, 2011). Damit werden durch die Reststoffe im Feld 2,2 t/ha CO₂ gebunden. Durch Pflanzenkohle sind es 6,6 t/ha CO₂-Bindung und mit MC-Kompost wären es 9,9 t/ha CO₂ jährlich aus der Atmosphäre entnommen. Bei 6 Mio. Hektar Getreide in Deutschland sind das im Best-Case-Szenario knapp 60 Mio. Tonnen CO₂-Speicherungspotenzial durch die „Kohlenstoffveredelung“ der Getreidereststoffe. Die wichtigsten Getreidearten weltweit sind neben Weizen auch Mais, Reis und Gerste mit einer Anbaufläche von insgesamt rund 600 Mio. Hektar (statista, 2021a). Werden dafür niedrigere 3 t/ha verfügbare Biomasse angenommen, ergibt sich ein Potential zur jährlichen Speicherung von rund 3.000 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxid weltweit durch die Reststoffe aus der Nahrungsmittelproduktion.

Für diese Leistung der CO₂-Fixierung könnten Landwirte zukünftig monetäre Gegenleistungen von CO₂-Verursachern in Form von sogenannten CO₂-Zertifikaten erhalten. Kommen diese Ausgleichszahlungen direkt bei Landwirten an, können sie bei den jeweiligen Zertifikatspreisen (vgl. tagesschau, 2021) in Abhängigkeit ihrer CO₂-Speicherleistung mit entsprechenden Erlösen rechnen, wie Tabelle 11 basierend auf 6 t/ha Biomasseertrag zeigt.

Tabelle 11: Mögliche Erlöse der CO₂-Speicherung in Abhängigkeit von CO₂-Preis und Art der Verwertung, nach vorhergehender Beschreibung und Quellen

	25 €/t CO ₂	50 €/t CO ₂	100 €/t CO ₂
Verbleib auf Feld	55 €/ha	110 €/ha	220 €/ha
Pflanzenkohle	165 €/ha	330 €/ha	660 €/ha
MC-Kompost	247,5 €/ha	495 €/ha	990 €/ha

Es ist ersichtlich, dass die Differenz zwischen dem Status quo „Verbleib auf Feld“ und der „Pflanzenkohle“ bzw. „MC-Kompost“ bei allen Preisannahmen mehr als 100 €/ha beträgt, die dem Landwirt zusätzlich zur Verfügung stehen können. Je nach Vorgehensweise für die offizielle Berechnung und Bilanzierung kann auch der volle, in Tabelle 11 jeweils aufgeführte Betrag in Frage kommen um Landwirte für ihre Klimaschutzleistungen zu bezahlen. Abhängig

von betrieblichen Bedingungen wird es ab einer bestimmten Vergütung lohnend für den Landwirt, die gesamte Biomasse z.B. mit dem LDW-Verfahren zu ernten, den darin enthaltenen Kohlenstoff zu konservieren und diesen mit positiver Wirkung im Boden wieder auszubringen. Sogenannte Humuszertifikate, durch die Landwirte für den zusätzlich erzeugten Kohlenstoff im Bodenhumus entlohnt werden sollen, werden aufgrund der Messmethoden, Fairness und Instabilität bzw. Reversibilität als möglicherweise ungeeignet für die langfristige CO₂-Speicherung eingestuft (Wiesmeier und Baumert, 2021). Die über hunderte Jahre im Boden stabile Pflanzenkohle kann im Gegensatz dazu als tatsächliche Kohlenstoffdioxidsenke bewertet werden und bei der mikrobiellen Carbonisierung besteht großes Potenzial dazu.

5.1.3 Abschließende Beurteilung LDW-Verfahren

Bewahrheiten sich die begründet in Aussicht gestellten Szenarien, ist es erforderlich eine möglichst große Menge des Nutzpflanzenaufwuchses zu ernten, um den darin enthaltenen Kohlenstoff konservieren zu können. Dies kann das Mähdruschverfahren mit anschließender Ballenkette nicht leisten, da die gesamte Spreu und etwa 40 % des Stroh verloren gehen. Auch für andere Verwendungen wie z.B. die Ethanolproduktion ist es erforderlich, die maximale Menge an Biomasse zu ernten, um den Radius des Anlieferungsgebietes möglichst gering zu halten, da andernfalls erhöhte Logistikkosten auftreten. Daher werden Doppelernteverfahren ein essentieller Bestandteil der diskutierten Szenarien, wenn die aufgestellten Thesen diesbezüglich in der praktischen Anwendung und durch weitere Forschungsarbeiten bestätigt werden.

Unter diesen Bedingungen mit hohen Strohanteilen und langen Transportentfernungen ist das Ladewagen-Schwadernteverfahren optimal für die Doppelernte für Getreide geeignet, auch wenn bei der Verlustminimierung noch Potenzial besteht. Die Flexibilität bezüglich der Biomasseerntemenge bzw. des Strohanteils im Erntegut ist dabei nicht erforderlich und kann ggf. durch die Anwendung des Hochschnitts in Teilen dargestellt werden. Die verfahrenstechnische Flexibilität ist dafür umso höher.

Es ist nur eine Erntekette notwendig, um Korn und Biomasse für die Humanernährung und andere Anwendungen der Bioökonomie oder für den Klima- und Bodenschutz bereitzustellen, anstelle des Mähdruschs und der Ballenkette oder sogar der zusätzlichen Ernte einer Zweitfrucht später im Anbaujahr. Ökonomie, Ökologie und soziale Nachhaltigkeitsaspekte des LDW-Verfahrens, aber auch der Doppelernte allgemein, können im Rahmen dieser Arbeit zwar nicht mit detaillierten Zahlen untermauert werden, sind aber tendenziell als deutlich positiv im Vergleich zum aktuellen Stand der Ernteverfahren einzustufen.

5.2 Ährenstripper Ernteverfahren „Strip“

Der Ährenstripper wird bisher lediglich als Erntevorsatz am Mähdrescher genutzt und nicht am Traktor angebaut, ausgenommen der Ernte von Hanfpflanzensamen (vgl. FormationAg, 2021). Der Ährenstripper ist am Frontlader des Traktors angebaut. Das Erntegut wird aufgenommen und in einen Anhänger befördert. Es konnte jedoch über mehrere Jahre nicht ausfindig gemacht werden, dass die gezeigte Fahrzeugkonstellation so oder in ähnlicher Ausführung mit Traktor und Stripper für die Getreideernte eingesetzt wird. Dies kann auf einen großen Nachteil des Strippers, die geringe Flexibilität in der Ernte verschiedener Fruchtarten, zurückgeführt werden. So lassen sich damit lediglich Getreide, Linsen, Erbsen und Reis gut ernten. Raps, Soja, Mais oder Sonnenblumen und andere Früchte sind hingegen nicht oder nur bedingt bzw. mit hohen Verlusten möglich (Shelbourne Reynolds, 2021).

Ähnlich der Grünlandernte ist der Ährenstripper eine etablierte Erntemaschine, deren Anwendungsgebiet sich auf die Doppelernte ausweiten lässt. Die berechneten Verfahrenskosten sind ähnlich denen des Mähdruschs ohne Reststoffbergung, wobei die Feldarbeiten zu wesentlich niedrigeren Kosten erledigt werden können und dafür die Transportkosten aufgrund des höheren Volumens deutlich höher sind. Allerdings ist das Volumen nicht so hoch wie z.B. beim FHD-Verfahren mit hohen Strohanteilen.

Im Gegensatz zu den anderen Doppelernteverfahren kann der Ährenstripper kein Stroh mit-ernten, da lediglich die Ähren abgestreift werden und nicht der Halm geschnitten wird. Dies ermöglicht höhere Arbeitsgeschwindigkeiten bei der Ernte. Die Flexibilität bezüglich des Strohanteils ist aber nicht gegeben. Es kann lediglich ein Gemisch aus Korn und Spreu geerntet werden.

5.2.1 Stationäre Separation Ährenstripperernte

Das beschriebene Korn-Spreu-Gemisch hat den Vorteil, dass die Bestandteile mit geringerem Aufwand voneinander getrennt werden können als ein Gemisch, das große Strohanteile beinhaltet. Nachteilig ist jedoch, dass die Körner nur zu etwa 85 % aus den Spelzen herausgelöst sind, da im Ährenstripper kein vollständiger Ausdrusch stattfindet. Daher muss das Erntegut zusätzlich behandelt werden, z.B. mit einem Entgranner der zur Entspelzung von Dinkelvesen eingesetzt wird (vgl. Reiter Seed Processing o. J.). Ein solcher Entgranner kann entweder das gesamte Erntegut vor der Separation bearbeiten, oder nach der Separation nur das abgesonderte, nicht ausgedroschene Material verarbeiten, das dann zur Abtrennung jedoch erneut durch die Separationsanlage geleitet werden muss.

Die Trennung von Korn und Spreu kann mit einem Trommelreiniger durchgeführt werden, insbesondere wenn die nicht vollvermarktungsfähigen Bestandteile in mehrere Fraktionen getrennt werden sollen. Denkbar ist, dass die Separation auch mit einer einfachen und kostengünstigen Windsichtung mit hoher Leistung durchgeführt werden kann (vgl. CanAGRO GmbH, o. J.). Die Windsichtung ist so aufgebaut, dass das Korn-Spreu-Gemisch nach unten fällt und dabei von Frischluft durchströmt wird, die die leichteren Spreubestandteile nach oben bzw. nach rechts absaugt. Unterhalb des Abscheidezyklons rechts werden diese leichten Bestandteile aufgefangen. Es ist jedoch zu erwarten, dass eine solche Anlage bei den hohen Spreu- bzw. Fremdbesatzanteilen des Korn-Spreu-Gemischs mit verminderter Leistung betrieben werden muss, um die gewünschte Reinheit der Marktware zu erreichen. Angesichts des einfachen Aufbaus der Maschine sind die angenommenen 400.000 € Anschaffungskosten für die stationäre Separation beim Ährenstripperverfahren keinesfalls zu hoch angesetzt.

5.2.2 Einfluss auf Bewirtschaftung und Nachhaltigkeit Strip-Verfahren

Für die Getreideernte wird der Ährenstripper zumeist in kontinentalen Anbauregionen und in Direktsaatsystemen eingesetzt. Die abgestreiften Halme bleiben in voller Länge auf dem Feld stehen, müssen nicht eingearbeitet werden und sind sogar vorteilhaft beim Einsatz von Direktsaattechnik, da kaum Strohreste auf dem Boden liegen, die somit nicht in den Saatschlitz bei der Aussaat der Folgekultur eingedrückt werden. Soll eine Bodenbearbeitung durchgeführt werden, müssen die Halme in einem zusätzlichen Arbeitsgang gemulcht werden, oder das Stoppelbearbeitungsgerät wie z.B. eine Kurzscheibenegge besitzt zerkleinernde Vorlaufwerkzeuge wie Messerwalzen. Die stehenden Halme beschatten den Boden, vermindern die Windgeschwindigkeit und halten fallenden Schnee fest. Durch verminderte Verdunstung und erhöhte Wasserbereitstellung für das Pflanzenwachstum sind unter kontinentalen Bedingungen mit Wasser als begrenzendem Wachstumsfaktor für Nutzpflanzen höhere Erträge zu erwarten. Außerdem kann gefallenenes Getreide gut vom Ährenstripper aufgenommen werden. Diese Vorteile sind unabhängig vom Einsatz am Mähdrescher oder am Traktor für die Doppelernte.

Durch die ackerbaulichen Vorteile und insbesondere die erhöhte Wasserverfügbarkeit für den Nutzpflanzenbestand und damit verbundene, höhere Erträge, erhöht der Ährenstripper indirekt die Effizienz aller anderen eingesetzten Ressourcen wie Dünger oder Saatgut. Mit der einfachen Separation und Logistik kann das Verfahren ein Einstieg für landwirtschaftliche Betriebe in die Reststoffnutzung darstellen, wodurch langfristig weniger NAWARO- oder Futterfläche benötigt wird. Ein ökologischer Nachhaltigkeitsbeitrag ist zudem, dass das Ernteverfahren mit geringerem Einsatz an fossiler Energie durchgeführt wird, sowohl im Feld, als auch bei der

anschließend evtl. benötigten Nachrocknung, weshalb zudem niedrigere Kosten zu erwarten sind.

Dadurch, dass die Ähren abgestreift werden und kaum Halmteile in den Stripper gelangen, kommen die Ähren und Körner nicht mit Stängelbestandteilen in Kontakt wie beim Druschvorgang im Mähdrescher. Dadurch werden die Körner bei der Ernte nicht wieder angefeuchtet, sondern können trocken mit der Spreu geerntet werden. Die Ernte mit dem Ährenstripper kann somit bereits früher am Vormittag beginnen als die Ernte mit dem Mähdrescher, da der Pflanzenbestand oben zuerst abtrocknet und die erforderlichen Trockenheitsgrade erreicht. Ebenso kann abends mit dem Stripper länger geerntet werden, bevor der Feuchtigkeitsgehalt im Erntegut durch Taubildung auf der Spreu zu hoch ist. Nicht nur die Erntezeit pro Tag, sondern auch in der gesamten Erntesaison soll laut Hersteller durch den Ährenstripper verlängert werden. Demnach soll es bereits früher in der Saison möglich sein, die Getreideähren zu ernten, selbst wenn sich das Stroh noch nicht in der Vollreife befindet (Shelbourne Reynolds, 2021).

Die Feuchtigkeitsgehalte im oberen Halmbereich und im Korn liegen für die Ernte meist bei etwa 15 %, die somit auch für die Spreu zutreffen. Segler (1953) beschreibt, dass im unteren Halmbereich selbst unter trockenen Wetterbedingungen bis zu 40 % Feuchtigkeitsgehalt gemessen werden können. Unter feuchten Bedingungen wären die Wassergehalte im unteren Teil des Halms mit großer Wahrscheinlichkeit höher.

5.2.3 Beurteilung Strip-Verfahren

Insgesamt kann gegenüber dem Mähdrescher mehr Stunden pro Saison Getreide geerntet werden. Dabei fallen beim Ährenstripperverfahren ähnliche Kosten an wie beim Mähdrusch ohne Biomasseernte. Durch den Ährenstripper werden jedoch einige ackerbauliche Vorteile generiert, die zu niedrigeren Kosten und höheren Erträgen führen können. Außerdem wird die Spreu als wertvoller Rohstoff mitgeerntet. Die beim Stripperverfahren geerntete Spreu stellt den wertvollen Bestandteil der Biomasse gegenüber dem zurückgelassenen Stroh dar. In Kombination mit konservierenden Bodenbewirtschaftungssystemen wie der Direktsaat kann das Strip-Verfahren ein wesentliches Element im Schutz des Bodens vor Erosion darstellen.

Hohe Arbeitsgeschwindigkeiten und große Arbeitsbreiten ermöglichen bei angepasster Logistik eine hohe Ernteleistung. Die Separationstechnik kann bei bestehenden Getreidelagern einfach vorgeschaltet werden. Dadurch eignet sich das Verfahren als kostengünstige Alternative zum Mähdrusch in Getreideregionen. Besonders interessant ist das Ährenstripperverfahren für landwirtschaftliche Betriebe, die die anfallende Spreu lokal verwerten können wie z.B. in der Tierhaltung, um daraus zusätzliche Wertschöpfung im ländlichen Raum zu generieren.

5.3 Feldhäckseldrusch

Moderne Feldhäcksler sind für die Ernte von Futterpflanzen wie Mais, Gras oder Ganzpflanzensilage von Getreide entwickelt worden. Dadurch sind die Maschinen nicht optimal für die Getreideernte geeignet, wie bereits durch die Beschreibung des praktischen Feldhäckseldruschversuchs in Kapitel 3.4.1 aufgezeigt wurde. Das FHD-Verfahren zeigt zwar in allen Betrachtungen hohe Erlöse aus der Biomasse, was jedoch auf Bruchkornverluste der vollvermarktungsfähigen Körnerware zurückzuführen ist, wodurch bei den EKFL deutliche Einbußen in der ökonomischen Einordnung gegenüber den anderen Verfahren erkennbar sind. Die Sensitivitätsanalyse zeigt eine geringere Benachteiligung des FHD-Verfahrens, wenn sich die Preise von Korn und Biomasse annähern.

Der Vorteil des Feldhäckslers, dass die Maschine weitverbreitet ist, kann in der vorliegenden Vollkostenberechnung nicht in Zahlen ausgedrückt werden, wodurch der Feldhäckseldrusch auf dieser Grundlage als nicht ökonomisch sinnvoll für die Getreideernte beurteilt wird. Der Feldhäcksler ist eine teure Spezialmaschine, die in der Zeit der Getreideernte meist großes Potential für eine bessere Auslastung besitzt. Wird die Maschine im Extremfall über die Einsätze in Gras und Mais abgeschrieben, können diese Fixkosten für die Getreideernte vernachlässigt werden, dass dabei lediglich die variablen Kostenbestandteile wie Verschleiß- oder Kraftstoffkosten gedeckt sind. Der Abschreibungsbetrag des Feldhäckslers liegt bei den bekannten Berechnungsannahmen inklusive Zinsansatz bei 24,47 €/ha. Um diesen Betrag wird das FHD-Verfahren günstiger, wenn die genannten Fixkosten nicht angerechnet werden. Die in Abbildung 17 für das FHD-Verfahren dargestellten Kosten von 196,76 €/ha sinken somit auf 172,29 €/ha. Damit wären die FHD-Verfahrenskosten niedriger als die Kosten des vergleichbaren KPE-Verfahrens mit 75 % Strohanteil, die sich auf 189,67 €/ha belaufen. Diese Betrachtungsweise ist jedoch kritisch zu hinterfragen, besonders wenn die Getreideernte einen großen Anteil des jährlichen Arbeitsumfangs des Feldhäckslers einnimmt. Essentiell für den Feldhäckseldrusch ist auch bei wenigen Hektar die Möglichkeit zur stationären Separation des Erntegutmischs.

5.3.1 Stationäre Separation FHD

Das Erntegut des FHD-Verfahrens besitzt besondere Eigenschaften wie jedes Erntegut von Doppelernteverfahren. Gemeinsam haben alle Doppelernte-Gemischvarianten, dass der Anblick zunächst gewöhnungsbedürftig ist, verglichen mit dem Erntegut von Mähdreschern.



Abbildung 30: Korn-Spreu-Stroh-Gemisch beim Feldhäckseldrusch

Quelle: Eigen, am 26.08.2019

Das Korn-Spreu-Stroh-Gemisch in Abbildung 30 aus dem Praxisversuch des Feldhäckseldruschs zeigt sowohl ganze, als auch zerstörte Körner (vgl. Abbildung 6). Außerdem sind Spelzen und Stroh in verschiedenen Längen zu erkennen, was die Trennung des inhomogenen Gemischs herausfordernd gestaltet.

Die Häcksellänge im Praxisversuch war auf 35 mm eingestellt, wie für die Ernte von Grassilage. Buchmann (1961) hatte 100 mm als Häcksellänge beim Feldhäckseldrusch vorgesehen, um den Bruchkornanteil möglichst gering zu halten. Dabei werden jedoch lediglich 60 bis 90 % der Körner ausgedroschen. Aufgrund der technisch bedingten, im Versuch deutlich geringeren Häcksellänge, konnten unausgedroschene Körner nicht beobachtet werden. Zur Verringerung des Bruchkornanteils wäre eine Erhöhung der Häcksellänge notwendig, was dann zu unausgedroschenen Körnern in den Ähren führen kann. Für die stationäre Separation ergibt sich dadurch der Anspruch, dass einige Körner nicht nur von der Biomasse abgesondert werden müssen, sondern dass diese zuvor auch vollständig aus den Ähren herausgelöst werden. Der Anteil wird aufgrund der Literaturangaben und des Praxisversuchs wesentlich geringer geschätzt als beim LDW-Verfahren (vgl. Kapitel 5.1.1), weshalb der Separationsvorgang wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben angenommen wird. Der Einsatz eines Trommelsiebreinigers mit

der Möglichkeit zur Separation mehrerer Fraktionen ist beim FHD-Verfahren besonders sinnvoll aufgrund des sehr hohen Bruchkornanteils. Dieser kann in einer realen Anwendung abge-sondert und gezielt vermarktet werden.

5.3.2 Bewertung FHD

Bei abgestimmter Logistik besitzt das FHD-Verfahren eine hohe Ernteleistung mit Maschinen, die aus der Silageernte für Landwirte vertraut sind. Gegenüber dem LDW-Verfahren berührt das Erntegut nicht den Boden. Dadurch kann es ohne Verschmutzungen und Verluste aufgenommen und verarbeitet werden. Jedoch ist das wesentlich höhere Transportvolumen ein Nachteil.

Die Kosten des Verfahrens und die EKFL sind gegenüber den anderen Ernteverfahren negativ zu bewerten. Dadurch soll aber nicht ausgeschlossen werden, dass das Verfahren in individuellen Fällen betriebswirtschaftlich vorteilhaft eingesetzt werden kann. Durch die Berechnung kann unter den definierten Szenarien lediglich eingeschätzt werden, dass die anderen Verfahren größere Vorteile bzw. weniger Nachteile mit sich bringen, als das FHD-Verfahren. Neben den hohen Verfahrenskosten, die dem MD-Rundballenverfahren ähneln, ist dies zudem auf den technisch bedingten, hohen Bruchkornanteil zurückzuführen.

5.4 Kompakternteverfahren

Im Gegensatz zu den anderen Doppelernteverfahren wird das Kompakternteverfahren speziell für die Ernte von Druschfrüchten und deren Reststoffe entwickelt. Neben den akzeptablen Kosten des Verfahrens ist die Vielseitigkeit der Kompakternte groß. Die Strohmenge im Erntegut kann einmal durch die Schnitthöhe verändert werden und zudem in der Maschine angepasst werden. Dadurch kann der Biomasseanteil in seiner Zusammensetzung verändert werden, wodurch bei der Ernte Einfluss auf die Qualität der Biomassefraktion genommen werden kann. Da die Maschine keine Reinigungseinheit besitzt, sind die Kornverluste niedriger als beim Mähdescher und tendieren theoretisch gegen Null, wenn das gesamte von der Maschine aufgenommene Erntegut abgefahren wird. Berechnungsergebnisse und Sensitivitätsanalyse zeigen daher in allen Vergleichen und betrachteten Marktlagen Vorteile in den EKFL des KPE-Verfahrens gegenüber den anderen Verfahren.

5.4.1 Einfluss auf Bewirtschaftung und Nachhaltigkeit KPE

Neben den beim LDW-Verfahren in Kapitel 5.1.2 diskutierten Vorteilen der Feldhygiene nach der Anwendung der Doppelernte durch die Abfuhr von infektiösen Pflanzenreststoffen und Unkrautsamen ergibt sich beim Kompakternteverfahren eine weitere, indirekte und nicht chemische Pflanzenschutzmaßnahme. Es handelt sich dabei um die sogenannte Mähdruschdirektsaat von Zwischenfrüchten, die beim Kompakternteverfahren aufgrund des freien verfügbaren Bauraums auf der Maschine gut integriert werden kann. Dabei wird das ausgebrachte Saatgut vom gehäckselten Stroh bedeckt und der Boden beschattet, wodurch die Verdunstung vermindert und die Etablierung der Zwischenfrucht schneller ermöglicht werden soll. Erosionsereignisse sollen dadurch wirksamer verhindert werden (Pröll, 2017). Sturm (2017) führt die unkrautreduzierende Wirkung einerseits auf die Konkurrenz um Wasser, Licht, Nährstoffe und Raum zurück, andererseits auf biochemische Effekte, die sogenannte Allelopathie. Dieser Begriff beschreibt biochemische Verbindungen, die von Zwischenfrüchten wie z.B. Rauhafer, Buchweizen oder Ölrettich als Wurzelausscheidungen abgegeben werden, deren Inhaltsstoffe andere Pflanzen wie Unkräuter im Wachstum hemmen (Sturm, 2017). Durch den zur Verfügung stehenden, freien Bauraum der Kompakterntemaschine können darauf größere Behälter für Saatgut angebracht werden, die die Ernteleistung durch regelmäßiges Nachfüllen weniger negativ beeinflussen wie beim Standardmähdrusch.

Durch die Verlustminderung sowie die Abfuhr von Unkrautsamen und Pflanzenkrankheitserregern in Kombination mit der Mähdruschdirektsaat von Zwischenfrüchten nimmt die Erfordernis von Bodenbearbeitungsmaßnahmen ab. Somit beinhaltet die Kompakternte einige interessante Werkzeuge zur Durchführung von „Conservation Agriculture“ nach den Standards der Food and Agricultural Organization der vereinten Nationen (FAO). Conservation Agriculture basiert im Wesentlichen auf den Prinzipien der minimierten Bodenbearbeitung (z.B. Direktsaat), permanenter Bodenbedeckung mit organischem Material sowie der Diversifizierung der Pflanzen und wird als nachhaltige Bewirtschaftungsform für Umweltschutz, Klimaanpassung und die Abschwächung des Klimawandels beschrieben (FAO, 2017). Jeder der Punkte kann sich durch die Anwendung der Kompakternte direkt oder indirekt vorteilhaft auf die konservierenden Ackerbaumaßnahmen nach FAO-Richtlinien auswirken und so die Nachhaltigkeit der Landbewirtschaftung erhöhen.

Vor dem Hintergrund zunehmender Einschränkungen und eines drohenden Verbots des nicht selektiven Herbizidwirkstoffs Glyphosat, als oftmals essentiellen Bestandteil konservierender Anbauverfahren (vgl. Meyer, 2020), wird die Möglichkeit der Kompakternte als ökologische Pflanzenschutzmaßnahme interessanter. Langfristig könnte dadurch der Bedarf an chemischem Pflanzenschutz abnehmen und so die Umwelt geschont werden. Die konventionelle

Landbewirtschaftung wird dadurch ökologischer und Biolandwirte erhalten durch das Kompakternteverfahren eine neue, wirkungsvolle Bewirtschaftungsmaßnahme gegen Unkräuter und Pflanzenkrankheiten. Durch die mit hoher Wahrscheinlichkeit resultierenden, höheren Qualitäten und Erträge nimmt die Ressourceneffizienz im Ökolandbau zu, was ebenfalls positiv zu bewerten wäre.

Daneben gibt es derzeit kein Ernteverfahren, mit dem das brüchige Stroh von Sojapflanzen geborgen werden kann. Auch die Ernte von Maisstroh ist bei derzeitigen Verfahren mit hohen Verlusten verbunden (vgl. LfL, 2021). Das Kompakternteverfahren ermöglicht die Reststofffernte der genannten Kulturen und vermutlich von weiteren Pflanzen. Die technische Erprobung diesbezüglich ist jedoch noch nicht erfolgt. Ebenso kann das Kompakternteverfahren theoretisch die Reststoffe von Weizen beim sogenannten Relay-Intercropping bergen (vgl. Vimond, 2018). Dabei handelt es sich um ein Anbausystem bei dem Sojabohnen ähnlich einer Untersaat aber in großen Reihenabständen in Winterweizen eingesät sind. Mit speziellen Schneidwerksmodifikationen wird der Weizen geerntet und die Sojabohnen im grünen Zustand verbleiben bis zur vollständigen Reifung auf der Fläche. Dies ermöglicht zwei Ernten innerhalb eines Jahres, jedoch bislang ohne Reststoffe, da die Schwadablage und Wiederaufnahme von Stroh durch die Ballenpresse im bleibenden Sojabestand nicht ohne Beschädigungen möglich ist.

Alle Einschätzungen aus diesem Kapitel müssen sich bei der praktischen Anwendung der Kompakternte bewahrheiten, was zunächst einen hohen Forschungsbedarf mit sich bringt. Die zukünftige Forschung muss die ackerbaulichen Vor- und Nachteile zudem monetär bewerten. Aufgrund der Vielzahl und Übertragbarkeit anderer Maßnahmen wird jedoch davon ausgegangen, dass sich das Kompakternteverfahren insgesamt positiv auf die Nachhaltigkeit der Bewirtschaftung auswirkt. Dazu zählen auch die möglichen Potenziale zur CO₂-Speicherung durch Doppelernteverfahren, die bereits in Kapitel 5.1.2 beschrieben sind.

5.4.2 Stationäre Separation KPE

Verglichen mit den anderen Doppelernteverfahren ist der Vorteil des Kompakternte-Gemischs aus Korn, Spreu und dem einstellbaren Strohanteil, dass durch nahezu vollständigen Ausdrusch, vergleichbar mit dem Mähdrescher, die Körner nicht nachträglich aus den Ähren herausgelöst werden müssen, wie insbesondere beim LDW-Verfahren. Dadurch ist lediglich die Separation erforderlich, die auch beim KPE-Verfahren mit dem Trommelreiniger durchgeführt werden kann. Bei der Demonstration der Kompakternte wurde jedoch eine weitere Möglichkeit zur Trennung von Korn, Spreu und Stroh vorgeführt.



Abbildung 31: Demonstration der Kompakternte-Separationseinheit, bestehend aus Siebband (rechts) und Windsichter

Quelle: Eigen, am 25.07.2019

Die Separationseinheit im Demonstrationsmaßstab in Abbildung 31 wird über den Einfülltrichter rechts befüllt. Darunter befindet sich ein Siebband. Dieses soll das Stroh aus dem Gemisch heraussieben und wegfordern. Korn und Spreu können dagegen nach unten durch das Band fallen und gelangen in einen Auffangtrichter. Mit einer Förderschnecke gelangt das Gemisch in einen Windsichter, der Korn und Spreu voneinander trennt.

Das KPE-Verfahren ist darüber hinaus in der Lage, mehrere Pflanzen gleichzeitig ohne Verluste durch die Schwadablage (vgl. LDW), ohne Spritzverluste wie ggf. beim Ährenstripper und ohne erhöhten Bruchkornanteil (vgl. FHD) aufzunehmen und zu verarbeiten. Stationär kann ohne großen Zusatzaufwand mit hoher Leistung in verschiedene Korngrößen separiert werden. Dadurch ist es möglich ohne Leistungseinbußen wie beim Mähdröschler auch Pflanzengemenge, z.B. Braugerste und Linsen oder Triticale und Erbsen, zu ernten und getrennt voneinander höherwertig zu vermarkten. Der Anbau von Pflanzengemengen wird durch die Ernteerleichterung vereinfacht und fördert die Biodiversität, wie es die Richtlinien zum konservierenden Ackerbau vorsehen (FAO, 2017).

5.4.3 Beurteilung KPE

Insgesamt kann die Kompakternte als das Verfahren bezeichnet werden, das unter allen Bedingungen vorteilhaft in seiner Anwendung ist. Der flexible Strohanteil und die Möglichkeit zur Gemengeernte sind Eigenschaften, die andere Verfahren so kaum abbilden können. Dabei ist das Kompakternteverfahren durch die geringen Verluste an Korn und Biomasse sowie den geringen Bruchkornanteil den anderen Verfahren vorzuziehen. Zuletzt bietet es durch die Option zur Zwischenfruchtaussaat einen neuen Ansatz der ökologischen Unkrautunterdrückung als Ergänzung zur Entfernung von Unkrautsamen vom Feld. Die Kompakternte bietet einen vielversprechenden Ansatz für die Doppelernte von Getreide und anderen Früchten mit großem Forschungsbedarf.

5.5 Mähdruschverfahren

Die von Buchmann (1961) und Garmasch (1960) geäußerten Bedenken zum Mähdrusch (vgl. Kapitel 2.4.4) können bestätigt werden. So ist der Mähdrusch nicht optimal für die Ernte von Korn und Reststoffen geeignet. Soll nur das Korn geerntet werden, ist der Mähdrescher nach wie vor das Verfahren mit den niedrigsten Kosten bzw. den höchsten EKFL.

Im direkten Vergleich mit der Kompakternte spricht jedoch gegen den Mähdrusch, dass aus bioökonomischer Sicht gefordert wird, den gesamten Pflanzenaufwuchs möglichst effizient zu nutzen (BMEL, 2021). Dies können der Mähdrescher und die anschließende Ballenkette nicht leisten.

Auch vor dem Hintergrund der ökologischen Unkrautbekämpfung ist der Mähdrescher wenig vorteilhaft, da die gesamten Ernteverluste, die aufgenommenen Unkrautsamen und die nicht geerntete und evtl. infektiöse Biomasse nach dem Ausdrusch auf das Feld zurückgeführt werden und entsprechende Folgekosten für die Bekämpfung verursachen, die in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden konnten. Werden diese durch Doppelernteverfahren nicht anfallenden Bekämpfungskosten nach dem Verursacherprinzip dem Mähdruschverfahren zugeschrieben, ist es denkbar, dass das Mähdruschverfahren nicht die langfristig günstigste Erntemethode ist, selbst wenn der Biomassepreis auf 0 €/t herabgesetzt wird. Dann könnte der dabei resultierende EKFL-Vorsprung des Solo-Mähdruschs von etwa 20 €/ha zum Ährenstripverfahren bzw. 10 €/ha zur Kompakternte ohne Strohanteil leicht umgekehrt werden und höhere EKFL für die genannten Doppelernteverfahren aufweisen, obwohl dabei die Spreu ohne Erlös mitgeerntet werden muss.

5.6 Berechnungsmethodik, Annahmen und Forschungsbedarf

Eine Alternative zur Berechnung der EKFL wäre eine gesamtbetriebliche Betrachtung denkbar, was zur Bedingung zusätzliche Annahmen zu Region, Fruchtfolge, Betriebsgröße, Pacht- oder Eigentumsfläche, Bewirtschaftungsintensität, Agrarsubventionen, Tierhaltung und weiteren betriebsindividuellen Kennzahlen hätte. Dadurch wäre die Datenerhebung für die Annahmen deutlich aufwändiger und gleichzeitig die Aussagekraft kaum höher, da für die genannten Punkte sehr große Schwankungsbereiche zu erwarten sind. Weitere Annahmen bringen eine erhöhte Gefahr mit sich, dass einzelne Annahmen nicht die Masse an Betrieben abbilden. Dadurch, aber selbst bei korrekten Annahmen können durch die Einbeziehung weiterer gesamtbetrieblicher Kennzahlen diese Einflüsse die eigentlichen Ergebnisse verfälschen, wie z.B. durch die Abschreibungsdauer oder Maschinenauslastung, wodurch die Kosten pro Hektar stark negativ beeinflusst werden können. So werden die EKFL bisher herangezogen, um die betriebsspezifische Auslastung verschiedener Mähdrescher in Abhängigkeit der Erntefläche zu berechnen, um sowohl die Erlöse, als auch die Kostensituation für Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen (vgl. Hensel und Köller, 2019).

Da genau diese Parameter, Erlöse und Kosten, bei den behandelten Doppelernteverfahren stark variieren, ist diese Berechnungsmethodik gut geeignet, um auch die gesamten Ernteverfahren miteinander zu vergleichen. Hensel und Köller (2019) beziehen sich auf die Erntemaschine, den Mähdrescher, weshalb die eigens definierten EKFL (vgl. Kapitel 3.1) für eine genauere Abgrenzung auch als ernteverfahrenskostenfreie Leistungen, z.B. mit der Abkürzung EVKFL, bezeichnet werden können, wenn die Logistik sowie weitere Ernteschritte oder die Nacherntetechnologie miteinbezogen werden.

Generell ist es wichtig, die EKFL für jede Fragestellung exakt zu definieren und abzugrenzen. Denn die Berechnungsmethode ist flexibel in der Anwendung. Neben den Verlusten, den Erlösen und den Kosten wurden bereits die Humusreproduktionskosten als weitere Stufe der EKFL für eine langfristige Betrachtung miteinbezogen. Sobald Annahmen oder Daten für die monetären Auswirkungen auf die ackerbaulichen Einflüsse der Doppelernteverfahren entsprechend dem herausgestellten Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 5.4.1 und 5.1.2) aufbereitet sind, können diese wie die Humusreproduktionskosten als weiterer Schritt in die Berechnungen einfließen und die Ernteverfahren noch genauer beurteilen. Denkbar sind auch weitere, spezifische Berechnungsschritte für einzelne Anwendungen bzw. Verwertungsmöglichkeiten der Reststoffe, z.B. mögliche Trocknungskosten oder die Pelletierung.

Neben der Berechnung von Ernteverfahren ist auch die Kostenberechnung von Bewirtschaftungsmaßnahmen ohne Einschränkungen möglich. Die gewünschten Maschinen müssen lediglich in der entsprechenden Datenbank mit den jeweiligen Daten hinterlegt werden und können dann ausgewählt werden.

Zudem kann das Berechnungsmodell auf neue Fragestellungen einfach angepasst werden, um z.B. die Kosten in fixe und variable Bestandteile aufzuschlüsseln und zu bewerten. Die Flexibilität lässt zukünftig sämtliche neue Anwendungsbereiche zu, sowohl in der einzelbetrieblichen Beratung, in der Forschung oder in überbetrieblichen Betrachtungen.

Essentiell dafür ist das Vorhandensein entsprechender Daten als Grundlage für die Datenbanken des Berechnungsmodells und in der jeweiligen Betrachtung exaktere Werte, als die modellbasierten Annahmen z.B. zu Erträgen und Biomassevolumina (vgl. Kapitel 3.3). Denn im Grunde genommen entspricht jede Einzelne der vielen getroffenen Annahmen einem zukünftigen Forschungsbedarf, um die jeweiligen Werte oder Zusammenhänge zu bestätigen oder diese anzupassen. Die begründeten Annahmen können somit auch als Mittel zur Demonstration des Berechnungsmodells betrachtet werden, das zukünftig noch besser für Verfahrensberechnungen im landwirtschaftlichen Bereich genutzt werden kann. Trotz dieser Betrachtungsmöglichkeit liegt der Hauptfokus der Arbeit auf der Suche, Evaluation und Herleitung der vielen getroffenen Annahmen, um eine realistische, wirtschaftliche Einordnung der Doppelernteverfahren vornehmen zu können. Für die allgemein gehaltenen Berechnungen sind Annahmen jedoch weniger problematisch, als für die einzelbetriebliche Betrachtung mit konkreten Kosten für Maschinen bei den jeweiligen, betrieblichen Verhältnissen.

Der Forschungsbedarf, der in den vorangegangenen Kapiteln herausgestellt wurde, kann kaum eingegrenzt werden. Beginnend mit der Bioökonomieforschung und den Verwertungsmöglichkeiten der Reststoffe entsteht der zunehmende Bedarf der Bereitstellung. Die verschiedenen Ernteverfahren müssen ggf. für die angenommenen Anwendungen modifiziert oder adaptiert werden, was die maschinenbauliche und agrartechnische Erforschung bedingt. Wenn die Maschinen vermehrt eingesetzt werden, können deren Einsatzdaten erhoben werden und so die Wirtschaftlichkeit fundiert bewertet werden. Die Agrarforschung kann die bereits erwähnten, ackerbaulichen Effekte quantifizieren und mit in die ökonomische Betrachtung einbringen. Ökologie und Nachhaltigkeitseffekte, wie Biodiversitäts- und Klimaeinflüsse können ebenfalls aufgrund der ackerbaulichen Auswirkungen abgeschätzt, erforscht und auf größere Regionen, Länder oder Kontinente übertragen werden. Auswirkungen auf ländliche Räume und Gesellschaft können erhoben werden oder die Effekte auf die Welternährungssituation oder Volkswirtschaft besonders von Ländern bestimmt werden, in denen die landwirtschaftliche Primärproduktion einen hohen Anteil am Bruttoinlandsprodukt besitzt. Basierend

auf der anfänglichen Forschung ist diese gefordert, Schwachstellen zu identifizieren, aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten und Lösungen zu finden, um die Verfahren und deren Einflüsse kontinuierlich weiterzuentwickeln. Die Erkenntnisse dienen dann als Grundlage für die Beratung und Politik, bessere Verfahren im Sinne der Nachhaltigkeitsbewertung und Ressourceneffizienz zu fördern.

Besonders interessant sind die angedeuteten, systemischen Forschungsansätze, die jedoch aufgrund der komplexen Zusammenhänge und der nicht eindeutigen Zuordenbarkeit von Auslöser und Wirkung sehr herausfordernd für die Wissenschaft sind, einerseits was die Kommunikation der Themen entgegen lange bewährter Lehrmeinungen anbelangt, andererseits die damit verbundene, niedrigere Wahrscheinlichkeit des Zuspruchs von Forschungsgeldern. So z.B. die Kombination von konservierender Bodenbearbeitung oder Direktsaat mit der Doppelernte. Oder die Bewirtschaftung zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit über die „lichtinduzierte Carbonisierung“ (Witte, 2017) und MC-Kompost (Witte, 2013), da sich diese Ansätze besonders vorteilhaft durch die Doppelernte ergänzen lassen. Durch die gezielte Maßnahmenkombination könnten sämtliche Probleme gelöst und Kritikpunkte an der derzeitigen landwirtschaftlichen Produktionsweise entschärft werden. Es könnte ein Schritt in die Richtung der von Politik und Gesellschaft vermehrt geforderten, ökologischen Landbewirtschaftung ohne Abhängigkeit von chemischen Düngern und Pflanzenschutzmitteln sein, die dennoch eine hohe Ressourceneffizienz und hohe sowie sichere Erträge aufweist, ohne Kompromisse bezüglich Klimaschutz, Biodiversität, Umweltverträglichkeit und Qualität der produzierten Lebensmittel und Rohstoffe.

5.7 Ausblick

Wie in vielen Passagen der Arbeit angedeutet, ist die Doppelernte zukünftig äußerst interessant aufgrund der erhöhten Ressourceneffizienz, zurückzuführen auf die aus der Nahrungsmittelprimärproduktion in höherem Ausmaß und zu niedrigeren Kosten verwertbar bereitgestellten Reststoffe Spreu und Stroh als Biomasserohstoff mit vielfältigen Anwendungsgebieten. Können einige der zukünftigen Forschungsfragen positiv beantwortet werden, ist nicht die Frage ob, sondern wann und in welchem Ausmaß sich Doppelernteverfahren gegenüber dem bisher eingesetzten Mähdruschverfahren etablieren können. Von der Etablierung wird es dann ein länger andauernder Transformationsprozess bis sich Doppelernteverfahren durchsetzen und größere Anteile als Mähdruschverfahren erreichen. Beeinflusst und beschleunigt werden kann dies durch die Politik, wenn die in Aussicht gestellten Erwartungen als wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen und der Politik kommuniziert werden.

Die digitale Transformation kann ein weiteres, unterstützendes Element für Doppelernteverfahren sein, z.B. bei der Planung der aufwändigeren Logistik zur zeitnahen Beschickung von Separationsanlagen. Ebenso können je nach Ernteverfahren die einzelnen Gutströme bereits in den Maschinen mittels NIRS-Sensoren gemessen und teilflächenspezifisch kartiert werden. So kann beispielsweise der Strohanteil beim Kompakternteverfahren je nach Humusbedarf im Feld auf dessen Bedürfnisse variabel eingestellt werden. Die teilflächenspezifischen Inhaltsstoffanalysen des NIRS-Sensors können Daten zum Versorgungszustand der Pflanze und zum Boden liefern und mit künstlicher Intelligenz verarbeitet Handlungsempfehlungen für die Folgekultur geben. Die autonome Ernte ist bei Doppelernteverfahren insofern vereinfacht, da die Prozesse im Feld wesentlich vereinfacht sind und nicht eine Vielzahl von Einstellungen vorgenommen werden müssen. Die stationäre Separation kann bereits elektrisch betrieben werden und standortfeste Automatisierungsprozesse können einfacher überwacht und optimiert werden, als im Mähdrescher bei unterschiedlichen Feldbedingungen.

6 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der wachsenden Weltbevölkerung und des zunehmenden Bedarfs an nachwachsenden Rohstoffen ist die Steigerung der Ressourceneffizienz in der landwirtschaftlichen Produktion unausweichlich. Die voranschreitenden Bestrebungen zur Mehrfach- oder Kaskadennutzung der Reststoffe von Pflanzen für die Humanernährung erfordern neue Ernteverfahren für deren kostengünstige Bereitstellung.

Ziel der Arbeit ist die ökonomische Bewertung von neuen Ernteverfahren, sogenannten Doppelernteverfahren für die gemeinsame Ernte von Körnern und deren Restbiomasse. Im Detail ist das Ziel einerseits die Evaluation der prognostizierten, höheren Qualität und Menge pro Hektar an erntbaren Reststoffbiomassen wie Spreu und Stroh, andererseits jedoch besonders ihren monetären Leistungen in der Gegenüberstellung zu den Verfahrenskosten durch den Einsatz der Doppelernte.

Dafür werden Mähdruschverfahren mit zusätzlicher Spreu- bzw. Stroherntekette mit den verschiedenen Doppelernteverfahren verglichen, sowohl verfahrenstechnisch als auch monetär. Bei den betrachteten Doppelernteverfahren handelt es sich um den Feldhäckseldrusch, das Ladewagen-Schwadernteverfahren, das Kompakternteverfahren und die Ernte mit einem Ährenstripper am Traktor. Der Vergleich bezieht sich auf alle Ernteverfahren inklusive der erforderlichen Logistikkette und Erntegutnachbehandlung, d.h. der stationären Separation von Korn und Biomasse. Als Berechnungsgrundlage dienen Modellierungen, u.a. für Spreuerträge und Erntegutvolumina in Abhängigkeit vom Kornertrag. Unter der Einbeziehung von Parametern wie z.B. Flächengröße, Feldentfernung, Arbeits- und Transportgeschwindigkeiten und Verlustzeiten wie z.B. für Wendevorgänge im Feld, wird in einem dafür entwickelten Berechnungsmodell die benötigte Zeit für die Ernte von einem Feld für alle Verfahren mit größtmöglicher Vergleichbarkeit berechnet. Anhand der in Datenbanken hinterlegten Maschinenkosten, z.B. für Abschreibung oder Verschleiß, die über Auswahllisten automatisiert in die gewünschte Verfahrensberechnung übernommen werden, können zunächst die Kosten je Betriebsstunde und unter Einbeziehung der Flächenleistung und Flächengröße die Kosten pro Hektar für jedes Ernteverfahren ermittelt werden. Da alle Verfahren unterschiedlich hohe Verluste von Korn und Biomasse aufweisen, werden dementsprechend die verfahrensspezifischen, gesamten Erlöse für Korn und Biomasse berechnet und davon die jeweils berechneten Verfahrenskosten abgezogen. Die daraus resultierenden, erntekostenfreien Leistungen (EKFL) werden als Vergleichsgröße herangezogen.

Ohne Berücksichtigung der langfristig zu beachtenden Humusreproduktionskosten ergeben sich nach den getroffenen Annahmen für die einzelnen Verfahren folgende EKFL: Mähdrusch

mit Ballenkette 1309,93 €/ha; Kompakternte 1285,66 bis 1529,53 €/ha je nach Menge des mitgeernteten Strohanteils; Feldhäckseldrusch 1421,04 €/ha; Ladewagen-Schwadernte 1429,40 €/ha; Ährenstripper 1279,58 €/ha. Das Kompakternteverfahren besitzt damit einen Vorteil von bis zu 219,60 €/ha gegenüber der etablierten Mähdrusch- und Ballentechnik unter den gegebenen Annahmen. Die anderen Verfahren liegen dazwischen oder geringfügig unterhalb des Mähdruschverfahrens. Werden die Kosten für Nährstoffabfuhr und Humusreproduktion miteinbezogen, beträgt der Vorteil des Kompakternteverfahrens bis zu 143,44 €/ha.

Auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche und der eigenen Modellrechnungen kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass Doppelernteverfahren die Reststoffe tatsächlich in größerer Menge mit höherer Qualität nutzbar machen, als dies mit den bisher verbreitet eingesetzten Verfahren möglich ist. Die bereits von Buchmann (1961) und Garmasch (1960) geäußerten Bedenken bezüglich der Eignung des Mähdruschverfahrens zur effizienten Bereitstellung von Spreu und Stroh erhärten sich unter Berücksichtigung der durchgeführten Berechnungen.

Zudem sind die ackerbaulichen Effekte der Doppelernteverfahren positiv gegenüber dem Mähdrusch einzuschätzen, was hier jedoch nicht monetär bewertet wird und daher einen großen, zukünftigen Forschungsbedarf darstellt. Die positive Einschätzung ist zurückzuführen auf eine verbesserte Feldhygiene durch das Entfernen der Unkrautsamen und Pflanzenkrankheitserreger bei der Ernte vom Feld. Der Bedarf an chemischen Pflanzenschutzmitteln könnte dadurch abnehmen. Durch die Nutzung der Getreidereststoffe werden nicht nur die Ressourceneffizienz verbessert und Flächen für den Anbau nachwachsender Rohstoffe „eingespart“, sondern der in Spreu und Stroh enthaltene Kohlenstoff bleibt zu größeren Anteilen in nachhaltigen Produkten gebunden, wie z.B. in Pflanzenkohle.

Die Doppelernte ist dabei ein essentielles Werkzeug zur kostengünstigen Bereitstellung der benötigten Pflanzenreststoffe und bietet gleichzeitig großes Potenzial zur umweltverträglicheren Bewirtschaftung von Feldern und Vorteilen für die Biodiversität wie z.B. durch die Möglichkeit zum regelmäßigen Anbau von Pflanzengemengen anstelle von einzelnen Kulturen. Die digitale Entwicklung bis hin zur autonomen Feldbewirtschaftung kann bei Doppelernteverfahren durch vereinfachte Prozesse im Feld rationeller gestaltet werden, was zukünftig weitere Effizienzsteigerungen bei der Getreide- und Reststofferte erwarten lässt.

In Summe kann für die Doppelernte festgehalten werden, dass Ökologie und Ökonomie keinen Widerspruch darstellen, da beide Aspekte als positiv gegenüber dem klassischen Mähdruschverfahren einzustufen sind. Es stellt sich somit nicht die Frage ob, sondern wann Doppelernteverfahren den Mähdrusch ablösen werden.

7 Summary

Due to growing world population and increasing demand for renewable raw materials, an increasing resource efficiency in agricultural production is inevitable. Advancing efforts for multiple or cascade use of crop residues from human food production requires new harvesting methods for their cost-effective provision.

Objective of this work is an economic evaluation of new harvesting methods, so-called “dual-harvesting” methods for common harvesting of grains and their residual biomass. In detail, the aim is on the one hand to evaluate the predicted higher quality and quantity per hectare of harvestable residual biomass such as chaff and straw that can be realized with dual-harvesting technologies, but on the other hand especially their additional income contrasted to the process costs by proceeding dual-harvesting.

For this purpose, combine harvesting with additional chaff or straw harvesting is compared to some dual-harvesting methods, both in terms of process technology and in monetary terms. Dual-harvesting methods are simulated with self-propelled forage harvester threshing, forage wagon windrow harvesting, compact harvesting and harvesting with a tractor mounted stripper header. The comparison includes the required logistic-chains and crop aftertreatment, i.e. stationary separation of grain and biomass for each method. As basis for calculations is done specific modeling, e.g. for chaff yields and crop volumes as a function of grain yield. Parameters such as area size are included and also field distance, loss times, e.g. for turning operations in the field, working speeds and road transport speeds. A calculation model developed for this purpose calculates time required for harvesting of one field for all processes with the greatest possible comparability. Based on machine costs stored in databases, e.g. for depreciation or wear and repair, which are automatically transferred to their desired process calculation via selection lists, the costs per operating hour and, including area per hour and area size, costs per hectare can be determined for each harvesting process. Since all processes have different levels of grain and biomass losses, the process-specific, total revenues for grain and biomass are calculated accordingly and process costs calculated in each case are deducted from them. The resulting harvest cost free outputs (HCFO) are used as a comparative value.

Without taking into account costs of reproducing soil organic matter as long term result, the following HCFO result for the individual methods according to the assumptions are calculated: combine threshing with bale harvesting 1309.93 €/ha; compact harvesting 1285.66 to 1529.53 €/ha depending on the amount of straw harvested; forage harvester threshing 1421.04 €/ha; forage wagon swath harvesting 1429.40 €/ha; tractor-mounted stripper header 1279.58 €/ha.

The compact harvesting method thus has an advantage of up to 219.60 €/ha over the established combine and bale technology with same given assumptions. The other methods are in between or slightly below the combine harvesting. If costs for nutrient removal and soil organic matter reproduction are included for long term perspective, the advantage of compact harvesting is up to 143.44 €/ha.

Based on literature research and model calculations, it can be assumed with a high degree of probability that dual-harvesting methods actually make residual materials usable in greater quantities with higher quality than it is possible with widely used combine harvesting. Concerns expressed by Buchmann (1961) and Garmasch (1960) regarding the suitability of combine harvesting for an efficient provision of chaff and straw are substantiated when calculation results are taken into account.

In addition, agronomic effects of dual-harvesting methods are positive compared to combine harvesting, which was not able to be evaluated in monetary terms and therefore represents a great need for future research. The positive assessment is due to improved field hygiene by removing weed seeds and plant pathogens from the field during dual-harvest. This could reduce the need for chemical pesticides. Use of cereal residues not only improves resource efficiency and "saves" land for cultivation of renewable raw materials, but the carbon contained in chaff and straw remains bound in sustainable products to a greater extent, such as in biochar.

Dual-harvesting is an essential tool for cost-effective provision of plant residues required for that purpose and at the same time offers great potential for more environmentally friendly field management and benefits for biodiversity, e.g. through possibility of regular cultivation of plant mixtures instead of individual crops. Digital development up to autonomous field management can be made more rational in dual-harvesting methods through simplified processes in the field, which can be expected to lead to further increases in efficiency of grain and residue harvesting in the future.

All in all, it can be stated for dual-harvesting that ecology and economy do not represent a contradiction, since both aspects can be classified as positive compared to combine harvesting. The question therefore is not whether, but when dual-harvesting methods will replace combine harvesting.

8 Literatur- und Bildquellenverzeichnis

- Abraham, Ralf (2014). Beiträge zur DGMK-Fachbereichstagung "Konversion von Biomassen". 12. - 14. Mai 2014 in Rotenburg a.d. Fulda (Autorenmanuskripte). S. 203-210. Hamburg, DGMK.
- Agriexpo/HoneyBee (Hrsg.) (2021). Cereal harvesting header - ST Tractor Mount Swather - Honey Bee Manufacturing Ltd. Online verfügbar unter <https://www.agriexpo.online/prod/honey-bee-manufacturing-ltd/product-169283-4688.html> (abgerufen am 15.06.2021).
- Agronym e.V./Scholta, Claudia (2019). 1. FeldTag am 25.07.2019 „Der Kompakt-Ernter für SpreuStroh und Folgeprodukte“ – bei BAG Budissa Agroservice Gesellschaft mbH, 2019. Online verfügbar unter <https://agronym.de/1-feldtag-am-25-07-2019-der-kompakt-ernter-fuer-spreustroh-und-folgeprodukte-bei-bag-budissa-agroservice-gesellschaft-mbh/> (abgerufen am 28.05.2021).
- Anderson Trailers (2021). Produktprogramm Ballensammelwagen (Ausschnitt). Online verfügbar unter <https://grpanderson.com/en/trailers/> (abgerufen am 28.05.2021).
- Benjamin, Cindy (2014). Chaff carts conserve more. WeedSmart. Online verfügbar unter <https://www.weedmart.org.au/content/chaff-carts-conserve-more/> (abgerufen am 28.05.2021).
- Berger, Nicole/Marti, Fritz/Streit, Bernhard (2010). Getreidespreu hat Potenzial. Schweizer Bauer vom 16.01.2010. (abgerufen am 25.05.2021).
- Birth, Torsten/Appelt, Betty (2016). Erkenntnisse aus dem Projekt "EnerSpreu" für thermische Wertschöpfungspotentiale in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <http://www.netzwerk-agrartechnik-sachsen.com/wp-content/uploads/2016/02/fraunhofer-iff-projekt-enerspreu.pdf> (abgerufen am 25.05.2021).
- BMEL (2020). Erntebericht 2020. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ernte-Bericht/ernte-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 28.05.2021).
- BMEL (2021). Bioökonomie + nachwachsende Rohstoffe. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioeokonomie-nachwachsende-rohstoffe/bioeokonomie-nachwachsende-rohstoffe_node.html (abgerufen am 15.07.2021).
- Brenner, Walter Gustav (1958). Neuzeitliche Getreideernteverfahren - Häcksel-drusch, Feldhäckseldrusch und Mähdrusch. Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch. Online verfügbar unter <https://media-tum.ub.tum.de/doc/1508301/1508301.pdf> (abgerufen am 26.05.2021).

- Buchmann, W. (1961). Getreideernte in der Zukunft mit dem Feldhäcksler? Deutsche Agrartechnik, Bd. 11, Nr. 6 (1961). Online verfügbar unter http://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/de_agrartechnik/article/view/6411/6114 (abgerufen am 28.05.2021).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.) (2020). Was ist Bioökonomie? Bioökonomie.de. Online verfügbar unter <https://biooekonomie.de/themen/was-ist-biooekonomie> (abgerufen am 15.07.2021).
- CanAGRO GmbH (o. J.). Mobile Reinigung für Druschfrüchte. Online verfügbar unter https://canagro.de/wp-content/uploads/2019/02/canagro_reinigungA4_2018.pdf (abgerufen am 14.09.2021).
- Chemie.de (2021). Dieselkraftstoff (Lexikon) - Angabe zur Dichte von Dieselkraftstoff. Online verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Dieselmotorkraftstoff.html> (abgerufen am 01.06.2021).
- Çınarlar patoz (Hrsg.) (2021). Homepage. Strohhäckselgebläse Türkei. Online verfügbar unter <https://cnarlar-patoz.business.site/> (abgerufen am 28.05.2021).
- DBFZ (2012). DBFZ Report Nr. 13. Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung. Online verfügbar unter <http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/serien/yo/DBFZ/13.pdf> (abgerufen am 28.05.2021).
- Dierauer, Hansueli (2019). Ackerfuchsschwanz. In Kürze; Auffangen der Spreu. Online verfügbar unter <https://www.bioaktuell.ch/pflanzenbau/ackerbau/unkrautregulierung/problemunkraeuter/einjaehrige-unkraeuter/ackerfuchsschwanz.html> (abgerufen am 25.05.2021).
- Dierig, Carsten (2020). Jetzt entdecken die Investoren den Milliarden-Markt für Fleischersatz (WELT vom 17.02.2021). Online verfügbar unter <https://www.welt.de/wirtschaft/article205908259/Fleischersatz-Investoren-bauen-den-Weltmarktfuehrer-auf.html> (abgerufen am 25.05.2021).
- Dinger, Florian/Platt, Ulrich (2020). Towards an Artificial Carbonhydrates Suply on Earth. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00090> (abgerufen am 25.05.2021).
- DLG (Hrsg.) (2013). Prüfbericht 6112F - Test John Deere Rundballenpresse Serie 900. Online verfügbar unter <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/pbdocs/6112F.pdf> (abgerufen am 30.05.2021).
- DLG (Hrsg.) (2015). Prüfbericht 6294 - Test Krone comprima CF 155 XC X-treme. Online verfügbar unter <https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests/pruefberichte/aussenwirtschaft/test-krone-comprima-cf-155-xc-x-treme/> (abgerufen am 30.05.2021).
- Dürr, Stefan (2019). Expansionsstrategie Ekosem Agrar sowie die Chancen und Herausforderungen großer Agroholdings Walldorf, 18.06.2019.

- Estler, M./Keller, H. (1994). Hauptbaugruppen eines Selbstfahrer-Mähdreschers mit Hordenschüttler (Schemazeichnung). Institut für Landtechnik TUM / Zeichenbüro. Online verfügbar unter https://media-tum.ub.tum.de/11442?show_id=702954 (abgerufen am 28.05.2021).
- ETS Thierart (2021a). La turbine à double étage. Online verfügbar unter <https://www.menuepaille.fr/materiels/turbine-a-double-etage/> (abgerufen am 28.05.2021).
- ETS Thierart (2021b). La Turbine V3. Online verfügbar unter <https://www.menuepaille.fr/materiels/turbine-v3/> (abgerufen am 28.05.2021).
- ETS Thierart (2021c). Menu´ Press. Youtubevideo. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=ChXY0DcT7HU> (abgerufen am 28.05.2021).
- Eurobagging (2021). EB 308 LS - eurobagging.com. Online verfügbar unter <https://www.eurobagging.com/de/schlauchpressen-fur-und-silo-und-anwelksilage/eb-308-ls> (abgerufen am 15.06.2021).
- FAO (2017). Conservation Agriculture - Revised version. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/documents/card/en/c/981ab2a0-f3c6-4de3-a058-f0df6658e69f/> (abgerufen am 17.09.2021).
- Feiffer, Andrea (2015). 20 häufige Fehler von Mähdrescherfahrern. Landwirt 12 / 2015. Online verfügbar unter https://feiffer-consult.de/WebRoot/Store7/Shops/98b24c59-03ca-45e0-8edd-de39a259db15/MediaGallery/Fortschrittliche_Landwirt_12-2015_20_haeufige_Fehler.pdf (abgerufen am 12.09.2021).
- Fleischhut, Monika/Strobl, Martin (2017). Körnermaisstroh - ein Substrat, das Hoffnungen weckt. Biogas Journal 2_2017. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/biogasjournal2_2017_k%C3%B6rnermaisstroh.pdf (abgerufen am 03.09.2021).
- FormationAg (2021). CleanStrip Harvester | FormationAg. Online verfügbar unter <https://formation-ag.com/products/harvesting/cleanstrip> (abgerufen am 08.09.2021).
- Garmasch, N. T. (1960). Über die Verbesserung der Getreideernte. Aus: Traktoren und Landmaschinen, Moskau (1959) H. 9; Übersetzer: Balkin, W. In: Deutsche Agrartechnik, Bd. 10, Nr. 7 (1960). Online verfügbar unter http://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/de_agrartechnik/article/view/4556/4266 (abgerufen am 28.05.2021).
- GK Machine (2021). Bale Direct by GK Machine (Video). Youtube Kanal von GK Machine Inc. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=cnqKeOg9Gtw> (abgerufen am 28.05.2021).
- Hensel, Oliver/Köller, Karlheinz (2019). Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion, S. 239. UTB GmbH.

- Herbsthofer, Franz (1963). Der Entwicklungsstand der Mähdrescher unter Berücksichtigung der neuen Mähdreschertypen von Massey-Ferguson. Grundlagen der Landtechnik Heft 17/1963, 51–55.
- Herlitzius, Thomas (2013). Mähdrescher - Quo Vadis? Herausforderungen an die Entwicklung des Selbstfahrerkonzeptes. Online verfügbar unter <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/int/ressourcen/dateien/agrarsystemtechnik/forschung/VDI-2013-Maehdrescher-Quo-Vadis.pdf?lang=de> (abgerufen am 15.07.2021).
- Hünefeld, Roman (2013). Gute Verkäufe bei Mähdreschern und Pressen. profi - Magazin für professionelle Agrartechnik. Online verfügbar unter <https://www.profi.de/aktuell/aktuelle-meldungen/gute-verkaeufe-bei-maehdreschern-und-pressen-11777571.html> (abgerufen am 28.05.2021).
- Jeroch, Heinz/Drochner, Winfried/Simon, Ortwin/Dänicke, Sven (Hg.) (2008). Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere. Ernährungsphysiologie, Futtermittelkunde, Fütterung; 198 Tabellen. 2. Aufl. Stuttgart, Ulmer.
- Kaack Terminhandel GmbH (Hrsg.) (2021). Weizenpreis. Online verfügbar unter <https://www.kaack-terminhandel.de/de/matif-weizen.html> (abgerufen am 30.05.2021).
- Kolbe, Hartmut/Zimmer, Jörg/Beck, Robert/Reinhold, Jürgen (2015). Leitfaden zur Humusversorgung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hg.). Online verfügbar unter https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj_gKyZ1ojoAhUouaQKH5ND0QFjABegQI-ARAB&url=https%3A%2F%2Fpublikationen.sachsen.de%2Fbdb%2Fartikel%2F25484%2Fdocuments%2F35267&usg=AOvVaw3AUmZ5PBat91-AcbVD7Wgm (abgerufen am 28.05.2021).
- KTBL (2021). Betriebsplanung Landwirtschaft 2020/21.
- LfL (2006). Materialsammlung Futterwirtschaft. Daten, Fakten und Berechnungsgrundlagen zu den Kosten der Grundfuttererzeugung und der Futterwirtschaft (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL). Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/p_22478.pdf (abgerufen am 30.05.2021).
- LfL (2013). Basisdaten u.a. für die Ermittlung des Düngebedarfs und die Umsetzung der Düngeverordnung. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/basisdaten_2013.pdf (abgerufen am 28.05.2021).
- LfL (2021). Verwertung von Körnermaisstroh für die Biogaserzeugung. Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/076707/index.php> (abgerufen am 15.06.2021).

- Lochner, Adriane (2021). Buchau: Variationen von Ganzpflanzensilage als Tierfutter - Junger Landwirt ersetzt Mais durch eine bunte Mischung. inFranken.de vom 2021. Online verfügbar unter <https://www.infranken.de/lk/kulmbach/junger-landwirt-ersetzt-mais-durch-bunte-mischung-art-5237899> (abgerufen am 03.09.2021).
- LWF (2011). Kohlenstoffspeicherung von Bäumen - Merkblatt 27 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft vom 2011. Online verfügbar unter <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-27-kohlenstoffspeicherung-2.pdf> (abgerufen am 07.09.2021).
- Malhi, S. S./Lemke, R. (2007). Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle. *Soil and Tillage Research* 96 (1-2), 269–283. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.011>.
- Malhi, S. S./Lemke, R./Wang, Z. H./Chhabra, Baldev S. (2006). Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil and Tillage Research* 90 (1-2), 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.Still.2005.09.001>.
- Marti, Fritz/Streit, Bernhard/Berger, Nicole/Froidevaux, Nicolas/Muhr, Manfred/Thuer, Florian/Güller, Walter (2013). Sammlung von Spreu und Kurzstroh. Ergebnisse und Erfahrungen aus 3 Jahren Projektarbeit an der HAFL, Tänikon Agrartechniktage 2013, 2013. Online verfügbar unter <http://docplayer.org/113280280-Sammlung-von-spreu-und-kurzstroh-ergebnisse-und-erfahrungen-aus-3-jahren-projektarbeit-an-der-hafl.html> (abgerufen am 25.05.2021).
- MaWi Schütz GmbH (2021). Aspiration- und Trommelsiebreiniger für Getreide bis 400 t/Std. Online verfügbar unter <https://www.mawi-schuetz.de/trommelsiebreiniger.html> (abgerufen am 01.06.2021).
- McChartney, D.H./Block, H.C./Dubeski, P.L./Ohama, A.J. (2006). Review: The composition and availability of straw and chaff from small grain cereals for beef cattle in western Canada. ResearchGate. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/228630270_Review_The_composition_and_availability_of_straw_and_chaff_from_small_grain_cereals_for_beef_cattle_in_Western_Canada (abgerufen am 07.03.2020).
- McLeod Harvest (o. J.). Präsentation: McLeod Harvest - The World's Premier Harvesting System. Online verfügbar unter <https://slidetodoc.com/grain-is-grown-worldwide-principal-food-for-humans/> (abgerufen am 04.06.2021).
- Meyer, Tobias (2020). Direktsaat auch ohne Chemie möglich? In Eilbote 4/2020, 16. Online verfügbar unter <https://www.eilbote-online.com/artikel/anbau-direktsaat-auch-ohne-chemie-moeglich-36553> (abgerufen am 17.09.2021).
- Neumann, Hinrich (2020). Pflanzenkohle bringt „negative Emissionen“. topagrar online vom 02.10.2020. Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/energie/news/pflanzenkohle-bringt-negative-emissionen-12366501.html> (abgerufen am 06.09.2021).

- Neumann, J. (1952). Grundlagen für eine wirtschaftliche Gestaltung der Getreide-
ernte. Landtechnische Forschung Bd. 2, Nr. 2. Online verfügbar unter
<http://440ejournals.uni-hohenheim.de/index.php/LTF/article/view/8347> (abgeru-
fen am 26.05.2021).
- oekolandbau.de (2020). Reduzierte Bodenbearbeitung - schont Boden und Klima.
Online verfügbar unter [https://www.oekolandbau.de/landwirt-
schaft/pflanze/grundlagen-pflanzenbau/boden/reduzierte-bodenbearbeitung/](https://www.oekolandbau.de/landwirt-
schaft/pflanze/grundlagen-pflanzenbau/boden/reduzierte-bodenbearbeitung/)
(abgerufen am 15.07.2021).
- Olfert, M. R./Stumborg, Mark/Craig, Wayne/Schoney, R. A. (1991). The economics of
collecting chaff. *American Journal of Alternative Agriculture* 6 (4), 154–160. On-
line verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/44503682>.
- pixabay (2021). pixabay. Bild Weizen. Online verfügbar unter [https://pix-
abay.com/de/illustrations/weizen-weizenpflanzen-kulturen-5480283/](https://pix-
abay.com/de/illustrations/weizen-weizenpflanzen-kulturen-5480283/) (abgerufen
am 25.05.2021).
- Pluta, Werner (2019). Solein - Finnisches Unternehmen schafft Nahrungsmittel aus
Luft. Online verfügbar unter [https://www.golem.de/news/solein-finnisches-unter-
nehmen-schafft-nahrungsmittel-aus-luft-1908-143089.html](https://www.golem.de/news/solein-finnisches-unter-
nehmen-schafft-nahrungsmittel-aus-luft-1908-143089.html) (abgerufen am
25.05.2021).
- Prentice, Barry/Stewart, Sean/Wang, Zhaokun (1999). An Economic assessment of
the McLeod Harvest. Department of Agricultural Economics, University of Mani-
toba. Online verfügbar unter [https://umanitoba.ca/faculties/management/ti/me-
dia/docs/McLeodHarvest_1999.pdf](https://umanitoba.ca/faculties/management/ti/me-
dia/docs/McLeodHarvest_1999.pdf) (abgerufen am 03.06.2021).
- Pröll, Stefan (2017). Mähdrusch- und Vorerntesaat. *Boden.Wasser.Schutz.Beratung*.
LOP (6/2017), S. 33–37.
- Proplanta (2021a). Aktuelle Strohpreise und Heupreise 2021 - KW 20. Online verfü-
gbar unter [https://www.proplanta.de/markt-und-preis/agrarmarkt-berichte/aktu-
elle-strohpreise-und-heupreise-2021-kw-20_notierungen1621357479.html](https://www.proplanta.de/markt-und-preis/agrarmarkt-berichte/aktu-
elle-strohpreise-und-heupreise-2021-kw-20_notierungen1621357479.html) (ab-
gerufen am 30.05.2021).
- Proplanta (2021b). "Lexikon" - Spezifisches Gewicht Getreide / Hektolitergewicht.
Online verfügbar unter [https://www.proplanta.de/Agrar-Lexikon/Spezifi-
sches+Gewicht+Getreide++Hektolitergewicht_11284209088.html](https://www.proplanta.de/Agrar-Lexikon/Spezifi-
sches+Gewicht+Getreide++Hektolitergewicht_11284209088.html) (abgerufen
am 30.05.2021).
- Puttkamer, Thore von (2005). Charakterisierung biogener Festbrennstoffe.
<https://doi.org/10.18419/opus-1656>.
- Reinhold, Gerd/Friedrich, Eberhard (2012). Vergärung von Stroh. Stand und Per-
spektiven. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.). Online verfügbar
unter [http://www.tll.de/www/daten/pflanzenproduktion/nawaro/bio-
gas/gaer0412.pdf](http://www.tll.de/www/daten/pflanzenproduktion/nawaro/bio-
gas/gaer0412.pdf) (abgerufen am 25.05.2021).

- Reiter Seed Processing (o. J.). Reiter Seed Processing Gmbh & Co. KG: Entgranner Typ Vertigran. Online verfügbar unter <https://www.reiter-sp.com/produkte/saatgutaufbereitung/entgranner/entgranner-typ-vertigran.html> (abgerufen am 14.09.2021).
- Rumpler, Johann (2002). Neues Getreideernteverfahren in Kanada, Bauernzeitung 31/2002. Bauernzeitung (31), 44–45.
- Rumpler, Johann (2010). Endlich Platz für neues Denken. Bauernzeitung 2010 (31), 28–29.
- Rumpler, Johann (2015). Innovation SpreuStroh - Neue Perspektiven mit neuen Verfahren. 14.12.2015 Chemnitz, 2015. Online verfügbar unter https://spreuwerk.com/wp-content/uploads/2020/05/2017_Vortrag_Rumpler_Innovation_SpreuStroh.pdf (abgerufen am 20.08.2021).
- Rumpler, Johann (2016). Wertschöpfungsmöglichkeiten und Marktpotenziale für die Ernteprodukte Spreu, Stroh und SpreuStroh bei der Nutzung als landwirtschaftliche Reststoff - Biomasse. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/55258460-Wertschoepfungsmoeglichkeiten-und-marktpotenziale-fuer-die-ernteprodukte-spreu-stroh-und-spreustroh.html> (abgerufen am 25.05.2021).
- Rumpler, Johann (2018). Mähdrusch - Kompakternte - Pflanzenschutz. Online verfügbar unter https://spreuwerk.com/wp-content/uploads/2020/05/2018_Faltblatt_Maehdrusch.pdf (abgerufen am 12.09.2021).
- Rumpler, Johann (2019). Spreuwerk Homepage - ClearHarvest. Online verfügbar unter <https://spreuwerk.com/clearharvest/> (abgerufen am 12.09.2021).
- Rumpler, Johann/Rudolph, Wolfgang (2016). Mit der Kompakternte neue Wege der Vermarktung öffnen. Bauernzeitung (40. Woche 2016).
- Schindler, Mathias (2021). Lohnt sich der Strohverkauf? Bauernzeitung (online) vom 12.07.2021. Online verfügbar unter <https://www.bauernzeitung.de/agrarpaxis/betriebsfuehrung-lohnt-sich-der-strohverkauf/> (abgerufen am 12.09.2021).
- Schneider, Michael (2011). Doppelt gewinnen mit Kompost statt Stroh. Getreidemagazin (16. Jg.) (3/2011), 2–4.
- Schön, H./Berchtold, M. (2001). Aufbau von herkömmlichem Tangential-Dreschwerk und Axial-Dreschwerk (Schemazeichnung). Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/733519> (abgerufen am 28.05.2021).
- Schweizer Landtechnik (2021). Neue Bunkerpresse von Knoll - Multibaler XL. Online verfügbar unter <https://www.agrartechnik.ch/zeitschrift/schweizer-landtechnik/newsticker/artikel/knoll-multiballer-xl/> (abgerufen am 04.06.2021).
- Segler, Georg (1953). Die Konstruktion des Häckseldreschers. Landtechnische Forschung 3 (1), S. 14–17. Online verfügbar unter https://www.openagrar.de/receive/timport_mods_00026051.

- Shelbourne Reynolds (2021). X Range | Shelbourne Reynolds STRIPPER HEADERS. Online verfügbar unter <https://www.shelbourne.com/harvest/stripper-header/x/> (abgerufen am 15.06.2021).
- Siemens, M. C./Hulick, D. E. (2008). A New Grain Harvesting System for Single-Pass Grain Harvest, Biomass Collection, Crop Residue Sizing, and Grain Segregation. *Transactions of the ASABE* 51 (5), 1519–1527.
<https://doi.org/10.13031/2013.25300>.
- Spomer, O./Stiegemann, J. (2020). Mähdrusch: Schneller fahren und so Verluste senken? *Eilbote* 10/2020. Online verfügbar unter <https://www.eilbote-online.com/artikel/maehdrusch-schneller-fahren-und-so-verluste-senken-36760> (abgerufen am 12.09.2021).
- statista (2019). Anbaufläche von Weizen in der EU bis 2019. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153040/umfrage/anbauflaeche-von-weizen-in-der-eu-seit-2007/> (abgerufen am 15.07.2021).
- statista (2020a). Produktion von Fleisch weltweit in den Jahren 1961 bis 2020. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28782/umfrage/die-globale-fleischerzeugung-seit-1990/> (abgerufen am 25.05.2021).
- statista (2020b). Weltbevölkerung von 1950 bis 2020. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1716/umfrage/entwicklung-der-weltbevoelkerung/> (abgerufen am 25.05.2021).
- statista (2021a). Anbaufläche der wichtigsten Getreidearten weltweit bis 2020/21. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28883/umfrage/anbauflaeche-von-getreide-weltweit/> (abgerufen am 15.07.2021).
- statista (2021b). Anbaufläche von Getreide in Deutschland nach Art bis 2020. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28887/umfrage/anbauflaeche-von-getreide-in-deutschland-seit-1960/> (abgerufen am 15.07.2021).
- statista (2021c). Anzahl der unterernährten Menschen weltweit bis 2020 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38187/umfrage/anzahl-der-hungernden-weltweit/> (abgerufen am 21.09.2021).
- statista (2021d). Prognose zum Anstieg des globalen Fleischkonsums. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1195964/umfrage/prognose-zum-anstieg-des-globalen-fleischkonsums/> (abgerufen am 15.07.2021).
- statista (2021e). Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung bis 2100. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/> (abgerufen am 15.07.2021).
- Stenkiewitz, Stephan/Grünig, Gerhard (2020). *trucker.de - Test & Technik: Die Trucks fürs Feld*. Online verfügbar unter <https://www.trucker.de/test-technik/test-technik-die-trucks-fuers-feld-2647005?showAll=1> (abgerufen am 02.09.2021).
- Sturm, Dominic (2017). Bioherbizide aus Zwischenfrüchten? *LOP* 6/2017, S. 32.

- Suardi, Alessandro/Stefanoni, Walter/Alfano, Vincenzo/Bergonzoli, Simone/Pari, Luigi (2020a). Equipping a Combine Harvester with Turbine Technology Increases the Recovery of Residual Biomass from Cereal Crops via the Collection of Chaff. *Energies* 13 (7), 1572. <https://doi.org/10.3390/en13071572>.
- Suardi, Alessandro/Stefanoni, Walter/Bergonzoli, Simone/Latterini, Francesco/Jonsson, Nils/Pari, Luigi (2020b). Comparison between Two Strategies for the Collection of Wheat Residue after Mechanical Harvesting: Performance and Cost Analysis. *Sustainability* 12 (12), 4936. <https://doi.org/10.3390/su12124936>.
- Sünder, Andreas/Schäfer, Bernhard/Moeser, Joachim (2010). Zwei Drittel beliben auf dem Feld. *praxisnah* 4/2010.
- Sweedhart (2021). Sweedhart Projekt Homepage. Projekt "Sweedhart". Online verfügbar unter <https://sweedhart.eu/index.php/potential/> (abgerufen am 28.05.2021).
- tagesschau (2021). CO2-Bepreisung: Durchbruch für den Emissionshandel? vom 11.05.2021. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/die-co2-preise-explodieren-101.html> (abgerufen am 08.09.2021).
- Umweltbundesamt (2016). Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden 2016. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_04_2016_chancen_und_risiken_des_einsatzes_von_biokohle.pdf (abgerufen am 06.09.2021).
- Umweltbundesamt (2018). Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/pflanzenschutzmittel-in-der-landwirtschaft> (abgerufen am 15.07.2021).
- Unger, Jannike Sophie/Glasner, Christoph (2019). Cost Analysis of Chaff Harvesting Concepts in Germany. *agronomy* 9 (10), 579. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100579>.
- Vimond, Ludovic (2018). Je teste le relay cropping depuis deux ans. 05.12.2018. Online verfügbar unter <https://www.reussir.fr/machinisme/je-teste-le-relay-cropping-depuis-deux-ans> (abgerufen am 17.09.2021).
- Vodegel, S./Davidovic, M./Müller, F. (2016). Vortrag: Biomassereststoffnutzung / Stoffliche Verwertung von Aschen. Workshop 2 des Innovationsforums "SpreuStroh"; UFZ; Leipzig - 14.03.2016. Online verfügbar unter <http://www.netzwerk-agrartechnik-sachsen.com/wp-content/uploads/2016/02/praes-cutec.pdf> (abgerufen am 06.09.2021).
- Walch, Holger (2019). Bruchkorn aufs Korn genommen. Online verfügbar unter <https://www.deere.de/de/blog/articles/technik/Bruchkorn-Verlust-Dreschwerk/> (abgerufen am 12.09.2021).

- Weiser, Christian (2014). Einflüsse auf den Getreidestrohertrag als Voraussetzung der Bestimmung des nachhaltigen Strohpotenzials. Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis 23. Jg., Heft 2, Juli 2014. Online verfügbar unter <https://www.tatup.de/index.php/tatup/article/download/550/967?inline=1> (abgerufen am 28.05.2021).
- Wiesmeier, M./Baumert, V. (2021). Grundsätze der Humuswirtschaft - Humuszertifikate. Online verfügbar unter https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-mlr/get/documents_E-790028533/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Landwirtschaft%20und%20Umwelt/Bodenschutz/Grunds%C3%A4tze%20der%20Humuswirtschaft_DL/Flyer%20Humuszertifikate_LTZ.pdf (abgerufen am 08.09.2021).
- Wilmer, Hubert (2020). John Deere X9 1100: Der 100-t-Drescher? profi (online). Online verfügbar unter <https://www.profi.de/test/fahrbericht/john-deere-x9-1100-der-100-t-drescher-12124216.html> (abgerufen am 16.07.2021).
- Witte, Thomas de/Latacz-Lohmann, Uwe (2014). Was kostet das Greening? topagrar (online). Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/management-und-politik/aus-dem-heft/was-kostet-das-greening-9667565.html> (abgerufen am 12.09.2021).
- Witte, Walter (2013). Die Microbielle Carbonisierung Teil 1 - "Das ist Humus - So sieht er aus".
- Witte, Walter (2017). Die Microbielle Carbonisierung Teil 2 - Bodenfruchtbarkeit. Ursachen - Wirkungen und Widersprüche.
- Wochenblatt (2013). Das ist Ihr Stroh wert. Wochenblatt für Landwirtschaft und Landleben vom 01.08.2013. Online verfügbar unter <https://www.wochenblatt.com/landwirtschaft/nachrichten/das-ist-ihr-stroh-wert-8863450.html> (abgerufen am 12.09.2021).
- Wonschik, Claus-Robert (2017). Mikrobielle Carbonisierung - Untersuchung und Bewertung von Verfahren und Produkt. Doctoralthesis. BTU Cottbus - Senftenberg. Online verfügbar unter <https://opus4.kobv.de/opus4-btu/frontdoor/index/index/year/2017/docId/4160>.
- Zehner, M. M./Farnsworth, R. J./Appleman, R. D./Larntz, K./Springer, J. A. (1986). Growth of Environmental Mastitis Pathogens in Various Bedding Materials. Journal of Dairy Science 69 (7), 1932–1941. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(86\)80620-8](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(86)80620-8).

9 Erklärung

Eidesstattliche Versicherung über die eigenständig erbrachte Leistung gemäß § 18 Absatz 3 Satz 5 der Promotionsordnung der Universität Hohenheim für die Fakultäten Agrar-, Natur- sowie Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.

1. Bei der eingereichten Dissertation zum Thema

Ökonomische Bewertung der „Doppelernte“ von Getreidekörnern mit den Reststoffen Spreu und Stroh

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.

Stuttgart-Hohenheim, den 15.11.2021