

Aus dem Institut für
Pflanzenzüchtung,
Saatgutforschung und Populationsgenetik
Universität Hohenheim
Lehrstuhl Populationsgenetik
Prof. Dr. H.H. Geiger

Untersuchungen zur Bedeutung der Stickstoffeffizienz für die Ertragssicherheit bei Mais

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Agrarwissenschaften
der Fakultät III - Agrarwissenschaften I -
Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie
der Universität Hohenheim

von
Dipl.-Ing. sc. agr.
Elisabeth-M. Thiemt
aus Bremen

2002

Die vorliegende Arbeit wurde am 24. April 2002 von der Fakultät III - Agrarwissenschaften I Pflanzenproduktion und Landschaftsökologie der - Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juli 2002

Prodekan:		Prof. Dr. K. Hurle
Berichterstatter,	1. Prüfer:	Prof. Dr. H.H.Geiger
Mitberichterstatter,	2. Prüfer:	Prof. Dr. C. Engels
	3. Prüfer:	Prof. Dr. W. Aufhammer

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Literaturüberblick

1.1	Einleitung und Fragestellungen.....	1
1.2	Literaturübersicht.....	3
1.2.1	Züchterische Verbesserung der Stickstoffeffizienz.....	3
1.2.2	Bedeutung der Ertragsstabilität für die Züchtung.....	6
1.2.3	Beziehungen zwischen Trockenstress und Stickstoffeffizienz.....	9
1.2.4	Einfluss divergenter Selektion auf den Heterosiszuwachs.....	10
1.2.5	Konkurrenzeffekte.....	11

2 Material und Methoden

2.1	Materialaufbau.....	12
2.2	Standortbeschreibung und Versuchsdurchführung.....	13
2.3	Charakterisierung des Vegetationsverlaufs.....	16
2.4	Merkmalerfassung.....	16
2.5	Statistische Auswertung.....	18

3 Ergebnisse

3.1	Experiment 1: Stabilität und Heterosiszuwachs.....	20
3.1.1	Variationsmaße.....	20
3.1.2	Mittelwerte.....	24
3.1.3	Phänotypische Stabilität.....	28
3.1.4	Trockenstresstoleranz.....	32
3.1.5	Kombinationsfähigkeit und Heterosiszuwachs.....	38
3.2	Experiment 2: Konkurrenzeffekte.....	43
3.3	Experiment 3: Komponenten der Stickstoffeffizienz.....	50
3.3.1	Variationsmaße	50
3.3.2	Mittelwerte.....	54
3.3.3	Merkmalskorrelationen.....	56

4	Diskussion	
4.1	Züchtung auf verbesserte Stickstoffeffizienz.....	65
4.1.1	Bedeutung der Stickstoffeffizienz für die Ertragssicherheit.....	65
4.1.2	Einfluss der Stickstoffeffizienz auf die Trockenstresstoleranz.....	72
4.1.3	Heterosiszuwachs und Kombinationsfähigkeit nach Selektion auf divergenten Stickstoffstufen.....	75
4.2	Auswirkungen einer reduzierten Stickstoffversorgung auf die Konkurrenz- effekte in Feldexperimenten.....	77
4.3	Einfluss der Stickstoffversorgung auf die Komponenten der Stickstoffeffizienz.....	81
4.4	Züchterische Konsequenzen.....	86
5	Zusammenfassung	88
6	Literaturverzeichnis	91
7	Anhang	103

1 Einleitung und Literaturüberblick

1.1 Einleitung und Fragestellungen

Die seit Mitte dieses Jahrhunderts erreichten Fortschritte im Pflanzenbau waren besonders mit einer Intensivierung des Einsatzes von Pflanzenschutz- und Düngemitteln verbunden (ZEDDIES, 1995). Dies führte zu einer Beeinträchtigung der Umwelt, insbesondere des Grundwassers durch Nitrat und Pflanzenschutzmittel. Derzeit liegt die zulässige Höchstkonzentration für Nitrat im Trinkwasser bei 50 mg l^{-1} , der Richtwert jedoch nur bei 25 mg l^{-1} (FREDE & DABBERT, 1998). In den einzelnen Bundesländern wenden die Gesetzgeber unterschiedliche Maßnahmen zum Schutz der Trinkwasser-einzugsgebiete an. Dabei werden grundsätzlich zwei verschiedene Strategien verfolgt, um die Bewirtschaftungsintensität in Wasserschutzgebieten zu reduzieren. Zum einen gelten landesweit einheitliche Regelungen, wie z.B. die SchALVO (Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung) in Baden-Württemberg. Zum anderen sind Kooperationsmodelle zwischen Landwirten und Wasserversorgungsunternehmen zu nennen, die auf freiwilliger Basis standortangepasste Nutzungsbeschränkungen und Ausgleichszahlungen regeln. Nordrhein-Westfalen räumt dem Kooperationsmodell absolute Priorität ein (FREDE & DABBERT, 1998). Auch in den Bundesländern Niedersachsen, Hessen, Bayern, Rheinland-Pfalz, Saarland und Mecklenburg-Vorpommern gibt es solche Kooperationsvereinbarungen.

Die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen unterscheiden sich bezüglich der Nitratrestmengen, die nach der Ernte im Boden gemessen werden. Mais erreicht dabei im Vergleich zu Getreide häufig höhere Werte (ANONYMUS, 1999). Eine Ursache liegt sicherlich darin, dass der Maisanbau in der Praxis eng mit einer intensiven Tierproduktion verbunden ist und Betriebe mit hohem Viehbesatz häufig positive Stickstoff(N)bilanzen aufweisen. Weiterhin wird die N-Mineralisation unter Maisbeständen durch die vergleichsweise späte Bodenbearbeitung zur Maisaussaat gefördert. Auch die langsame Jugendentwicklung und eine damit verbundene relativ späte N-Aufnahme trägt zu einer Gefährdung durch Nitrat auswaschung bei.

Das Auswaschungsrisiko kann durch verschiedene pflanzenbauliche Maßnahmen verringert werden, am effektivsten aber durch eine reduzierte, dem tatsächlichen Bedarf der Pflanze angepasste und gezielte N-Düngung. Es ist damit zu rechnen, dass sich die Landwirtschaft künftig in vielen Anbaugebieten auf eine niedrigere Stickstoffdüngung einstellen muss. Hierbei kann die Züchtung von Maissorten, die an Böden mit einer geringeren N-Versorgung angepasst sind, einen wertvollen Beitrag zu einer wirtschaftlichen und umweltgerechten Pflanzenproduktion leisten.

Dieser Arbeit sind zwei Gemeinschaftsprojekte der Universität Hohenheim und der KWS SAAT AG vorangegangen, die durch das Ministerium für Ernährung und Ländlicher Raum Baden-Württemberg gefördert wurden. Dabei konnte gezeigt werden, dass im aktuellen Zuchtmaterial gute Voraussetzungen für die Entwicklung N-effizienter Sorten gegeben sind (LANDBECK, 1995; PRESTERL, 1996).

Die vorliegende Untersuchung wurde durchgeführt, um die Bedeutung der N-Effizienz für die Ertragssicherheit bei Mais abzuschätzen. Dabei wurden im besonderen folgende Fragestellungen bearbeitet:

1. Analyse der Ertragssicherheit von Hybriden mit spezieller Anpassung an Böden mit niedriger N-Versorgung.
2. Untersuchung der Reaktion von N-effizienten Hybriden auf zusätzlichen Trockenstress.
3. Schätzung des Heterosiszuwachses von Hybriden, deren Elternlinien eine divergente Anpassung an die N-Versorgung aufweisen.
4. Bestimmung von Konkurrenzeffekten zwischen Genotypen mit unterschiedlichen N-Effizienzeigenschaften bei niedriger und hoher N-Versorgung.
5. Bedeutung der genotypischen Variation für die Merkmale N-Aufnahme, N-Remobilisierung und N-Verwertung bei Hybriden, deren Elternlinien bezüglich ihrer Leistung auf niedriger bzw. hoher N-Versorgung selektiert worden waren.

1.2 Literaturübersicht

1.2.1 Züchterische Verbesserung der Stickstoffeffizienz

Unter N-Effizienz wird im folgenden die Fähigkeit eines Genotyps verstanden, bei geringem N-Angebot einen überdurchschnittlichen Kornertrag zu erzielen (SATTELMACHER *et al.* 1994).

In der Literatur liegen einige Studien zur Verbesserung der N-Effizienz bei Mais vor, die an tropischem und europäischem Material durchgeführt wurden. In den Tropen und Subtropen stellt die Versorgung mit Stickstoff nicht nur für Mais einen ertragslimitierenden Faktor dar. Die Böden besitzen oft eine geringe Fruchtbarkeit, zudem ist Stickstoff als Düngemittel nur begrenzt verfügbar und für viele Landwirte häufig zu teuer. Demgegenüber zeigen sich in den Industrieländern die Folgen einer intensiven Pflanzenproduktion, beispielsweise in erhöhten Grundwasserbelastungen mit Nitrat, sodass aus diesem Grund eine Verbesserung der N-Effizienz angestrebt wird.

Die der vorgestellten Studie vorangegangenen Experimente von LANDBECK (1995) und PRESTERL (1996) wurden an aktuellem europäischem Maiszuchtmaterial durchgeführt. LANDBECK (1995) konnte zeigen, dass in diesem Material eine ausreichende genetische Varianz in der Anpassung an eine reduzierte N-Versorgung besteht. Seinen Untersuchungen zufolge ist für die Verbesserung der N-Effizienz die direkte Selektion im Vergleich zur indirekten vorzuziehen. Ähnliches berichteten auch BÄNZIGER *et al.* (1997) für tropisches Material. PRESTERL (1996) schätzte Populationsparameter zur Optimierung der Züchtung auf eine verbesserte N-Effizienz. Dabei war die allgemeine Kombinationsfähigkeit für die Anpassung von Genotypen an eine verringerte N-Düngung bedeutender als die Effekte der spezifischen Kombinationsfähigkeit. Eine deutlichere Ausprägung der Reaktion von Genotypen auf die N-Versorgung konnte durch die Erhöhung der Bestandesdichte erzielt werden.

Aus einer tropischen Population wurden von MURULI & PAULSEN (1981) Linien bei hoher und niedriger N-Versorgung selektiert und daraus zwei synthetische Populationen erstellt. Diese Populationen zeigten jeweils eine Adaptation an diejenige N-Versorgungsstufe, auf der die Selektion erfolgte. Ebenfalls an tropischem Material wurden von LAFITTE & EDMÉADES (1994a-c) umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Es wurde ein Selektionsindex konstruiert, der neben dem Kornertrag auf der niedrigen und hohen N-Stufe auch indirekte Merkmale zur Verbesserung der N-Effizienz auf niedrigem N-Niveau berücksichtigte. Nach drei Selektionszyklen wurde eine lineare

Ertragszunahme je Zyklus von 2,8 % auf der niedrigen und 2,3 % auf der hohen N-Stufe festgestellt. Neuere Studien von BÄNZIGER & LAFITTE (1997) an diesem Material erbrachten den Nachweis, dass die Integration von indirekten Merkmalen in den Selektionsindex den Erfolg der Züchtung auf verbesserte N-Effizienz erhöhen kann. Auch PRESTERL (1996) beschäftigte sich mit der Nutzung indirekter Merkmale für die Verbesserung der N-Effizienz. Der Autor kam zu dem Schluss, dass die Merkmale Blattchlorophyllgehalt, Blühtermin der weiblichen Infloreszenzen und Blühintervall für eine schwache Vorselektion, basierend auf der Linieneigenleistung, geeignet sind.

Die N-Effizienz wird durch verschiedene morphologische und physiologische Eigenschaften einer Pflanze beeinflusst. Nach einem Konzept von MOLL *et al.* (1982, 1983) ist die N-Effizienz in die Komponenten N-Aufnahme- und N-Verwertungseffizienz zu unterteilen. Die N-Aufnahmeeffizienz ergibt sich demnach aus dem Verhältnis zwischen dem N-Ertrag der oberirdischen Pflanzenteile und dem pflanzenverfügbaren Stickstoff im Boden. Bei MOLL *et al.* (1982, 1983) wird dieser pflanzenverfügbare Stickstoff über die gegebene Düngermenge abgeschätzt. Die N-Verwertungseffizienz berechnet sich aus dem Quotienten zwischen Korntrockenmasse und der N-Aufnahme und stellt ein Maß für die Fähigkeit eines Genotyps dar, mit dem aufgenommenen Stickstoff einen möglichst hohen Kornertrag zu erzielen. Zur relativen Bedeutung der N-Aufnahme- und N-Verwertungseffizienz liegen in der Literatur widersprüchliche Ergebnisse vor, die zum einen an tropischem (MURULI & PAULSEN, 1981; KAMPRATH *et al.*, 1982; MOLL *et al.*, 1982, 1987; LAFITTE & EDMEADES, 1994a-c; HEUBERGER, 1998) und zum anderen an europäischem Material (LANDBECK, 1995; PRESTERL, 1996; BERTIN & GALLAIS, 2000) durchgeführt wurden.

Die N-Aufnahme aus dem Boden erfolgt hauptsächlich in der Form von Nitrat und Ammonium. Sie wird nicht nur durch die chemische und räumliche Verfügbarkeit des Nährstoffs im Boden, sondern auch durch eine Vielzahl von Transportsystemen auf zellulärer Ebene reguliert (ENGELS & MARSCHNER, 1995). Für Ammonium und Nitrat sind Transportsysteme beschrieben worden, die in Abhängigkeit von der externen N-Konzentration aktiviert werden (WIRÉN *et al.*, 1997; CRAWFORD & GLASS, 1998). Das Ausmaß der N-Aufnahme ist desweiteren durch Wurzelaktivität und Wurzelmorphologie bedingt (MACKAY & BARBER, 1986; WIESLER, 1991; WIESLER & HORST, 1994; REIDENBACH, 1997; HEUBERGER, 1998).

Die N-Verwertungseffizienz wird durch die Verteilung des Stickstoffs innerhalb der Pflanze und die Verwertung dieses Nährstoffs auf zellulärer Ebene bestimmt. Die Verteilung des Stickstoffs innerhalb der Pflanze wird vielfach mit Hilfe des N-Harvest-Index beschrieben (MOLL *et al.*, 1982; CREGAN & BERKUM, 1984), der aus dem Verhältnis zwischen dem N-Ertrag des Korns und der Gesamtpflanze berechnet wird. Ob eine hohe Verwertungseffizienz bei niedrigem N-Angebot durch eine effizientere Remobilisierung oder eine höhere Sinkstärke der Ertragsorgane bedingt wird, ist noch unklar (SATTELMACHER *et al.*, 1994).

Die Beziehungen zwischen Source und Sink wirken sich auf die Akkumulation und Verteilung von Stickstoff und der gebildeten Trockenmasse aus (ANDERSON *et al.*, 1985). Die Fähigkeit eines Sinkorgans, Assimilate zu mobilisieren und im jeweiligen Organ zu akkumulieren, wird als Sinkstärke bezeichnet. Diese wird einerseits durch die Größe des Sinks und andererseits durch seine Aktivität bedingt (TAIZ & ZEIGER, 1998). Es gibt in der Literatur Hinweise darauf, dass die Sinkstärke Einfluss auf die Rate der Kohlenstoffassimilation (TOLLENAAR, 1977), aber auch auf die Verwertung dieser Assimilate sowie des aufgenommenen Stickstoffs hat (FAKOREDE & MOCK, 1978; MOLL *et al.*, 1987). Die Größe der Sinkstärke des Ertragsorgans Korn zeigt an, in welchem Umfang die nach der Blüte gebildeten Assimilate in die Körner umgelagert werden konnten. Die Remobilisierung von Stickstoff aus den vegetativen Pflanzenorganen ist nach POLLMER *et al.* (1979) sowie ANDERSEN *et al.* (1984) ein bedeutender Faktor für die effiziente Verwertung des der Pflanze zur Verfügung stehenden Stickstoffs. BELOW (1997) beobachtete unter N-Mangelbedingungen, dass die Blätter im Vergleich zu dem Stengel größere N-Mengen in die Kolben verlagern und somit eine bedeutendere Quelle für die N-Remobilisierung darstellen.

Auf zellulärer Ebene wird die N-Verwertung von der N-Assimilation beeinflusst. In den meisten Fällen stellt Nitrat die von den Pflanzen bevorzugt aufgenommene N-Form dar und muss in der Pflanze zuallererst von dem Enzym Nitratreduktase reduziert werden. Lange Zeit konzentrierte sich deshalb das Interesse von Physiologen und auch Pflanzenzüchtern auf dieses Schlüsselenzym (SATTELMACHER *et al.*, 1994). In der Literatur wird sowohl von positiven (MURULI & PAULSEN, 1981; FEIL *et al.*, 1993) als auch von negativen Korrelationen (MESSMER *et al.*, 1984; EICHELBERGER *et al.*, 1989a, b) zwischen der Nitratreduktaseaktivität und dem Ertrag berichtet. Nach MOHR & NEININGER (1994) dürfte die Überexpression der Nitratreduktase keine geeignete Maßnahme darstellen, um eine Steigerung der Biomasseproduktion zu erzielen oder die Effizienz der N-Assimilation zu erhöhen. Dagegen vertreten PELSLEY & CARBOCHE (1992) die Meinung, dass unter Ausnutzung der Nitratreduktaseaktivität Ertragssteigerungen möglich seien, sobald die

Interaktionen zwischen der Nitratreduktase und dem Photosyntheseapparat besser verstanden werden. Einen Überblick über molekulargenetische Studien der Nitrataassimilation geben CRAWFORD & ARST (1993), HOFF *et al.* (1994), CRAWFORD (1995) sowie CRAWFORD & GLASS (1998).

Molekulare Marker bieten die Möglichkeit genomische Bereiche zu detektieren, die mit Merkmalen der N-Effizienz assoziiert sind. AGRAMA *et al.* (1999) identifizierten "Quantitative Trait Loci" (QTL) für Merkmale, welche die Reaktion von Mais auf niedrige N-Versorgung bestimmen. Die von ihnen gefundenen QTL erklärten 42 % der phänotypischen Varianz für das Merkmal Kornertrag auf der niedrigen N-Stufe, die mit 60 kg N ha⁻¹ versorgt wurde. Dabei waren die QTL mit den größten Effekten nur auf der NL-Stufe signifikant. Bei geringer N-Versorgung zeigten die QTL für Kornertrag Übereinstimmung mit den Merkmalen Wuchshöhe, Kolbenblattfläche, Anzahl Körner je Kolben oder Anzahl Kolben je Pflanze. Assoziationen zwischen den QTL für N-Effizienz und Ertragskomponenten, aber auch Blühmerkmalen, wurden von BERTIN & GALLAIS (2001) nachgewiesen. Zudem kosegregierten bereits bekannte Kandidatengene für die Enzyme des Stickstoff- und Kohlenstoffwechsels (z.B. Nitratreduktase, Glutaminsynthetase, ADP-Glucosepyrophosphorylase, Saccharosephosphatsynthase, Saccharosesynthase, Invertase) mit QTL für den Ertrag und seinen Komponenten (BERTIN & GALLAIS, 2001; HIREL *et al.*, 2001).

1.2.2 Die Bedeutung der Ertragsstabilität für die Züchtung

Neben der Ertragsfähigkeit stellt die Ertragsstabilität ein wichtiges Kriterium zur Bewertung einer Sorte dar. Die Beurteilung der Stabilität einer Sorte bzw. eines Genotyps basiert ganz allgemein auf der Ertragsleistung in verschiedenen Umwelten (PIEPHO, 1992). Dabei hängt es von der jeweiligen Fragestellung ab, was konkret unter dem Begriff "Umwelt" zu verstehen ist. Es kann sich hierbei um unterschiedliche Standorte oder produktionstechnische Maßnahmen handeln, wie z.B. in dieser Arbeit Düngung und Beregnung. Auch aufeinanderfolgende Jahre können als verschiedene Umwelten angesehen werden.

Es gibt verschiedene Konzepte dafür, was unter einem stabilen Genotyp zu verstehen ist. BECKER & LÉON (1988) unterscheiden das statische und das dynamische Stabilitätskonzept. Nach dem statischen Konzept ist ein Genotyp um so stabiler, je weniger seine Leistung von Umwelt zu Umwelt variiert. Ein solcher Genotyp würde aber auch auf günstige Umweltbedingungen (z.B. zusätzliche Düngung, optimale Wasserversorgung) nicht mit einem entsprechenden Mehrertrag reagieren. Für

den Landwirt wäre ein solcher Genotyp nicht vorteilhaft (KANG, 1998). Dagegen berücksichtigt das dynamische Konzept das jeweilige Umweltpotential. Danach wird ein Genotyp als stabil bezeichnet, wenn er unter gegebenen Umweltbedingungen möglichst zuverlässig diejenige Leistung erreicht, die aufgrund des Ertragspotentials der jeweiligen Umwelt für den betrachteten Genotyp zu erwarten ist. Das Leistungsniveau einer Umwelt wird dabei in der Regel durch den mittleren Ertrag aller in dieser Umwelt getesteten Genotypen erfasst. Nach letzterem Konzept wird die Ertragsstabilität im wesentlichen durch die Genotyp×Umwelt-Interaktionen beschrieben. Denn erst durch die unterschiedlichen Reaktionen einzelner Genotypen auf die Umwelteinflüsse können Unterschiede in der Ertragsstabilität detektiert werden. Welches Konzept das jeweils sinnvollere ist, hängt von der speziellen Anwendungssituation und der angestrebten Zielvorstellung ab (PIEPHO, 1992). Eine Einsatzmöglichkeit für das statische Konzept besteht bei Merkmalen, deren Leistungsniveau beibehalten werden soll, so z.B. bei Qualitäts- und Resistenzmerkmalen. Bei einem Merkmal wie dem Ertrag findet dagegen das dynamische Konzept Anwendung. Denn hier ist es das Ziel stabile Genotypen zu finden, die gleichzeitig eine hohe Ertragsleistung aufweisen. Für die Landwirtschaft wird es in Zukunft immer wichtiger, Sorten zur Verfügung zu haben, die möglichst stabile Leistungen aufweisen und auch auf abiotischen Stress (z.B. Trockenheit) nicht mit starken Ertragsreduktionen reagieren. Die Anstrengungen der Pflanzenzüchtung gelten daher nicht nur der Steigerung des Ertragspotentials sondern auch einer Verbesserung der Ertragssicherheit.

Es sind verschiedene biometrische Verfahren zur Analyse der Genotyp×Umwelt-Interaktionen und somit zur quantitativen Erfassung der Ertragsstabilität vorgeschlagen worden. Umfangreiche Übersichten geben folgende Autoren: BECKER & LÉON (1988), CROSSA (1990), KANG (1990), KANG & GAUCH (1996), COOPER & HAMMER (1996), KANG (1998) sowie HILL *et al.* (1998). Bei der Vielzahl von Stabilitätsmaßen stellt sich die Frage, welches Maß in einer gegebenen Situation am besten geeignet ist. LIN *et al.* (1986) leisteten hierzu einen wertvollen Beitrag, indem sie Gruppen von Stabilitätsmaßen bildeten, die jeweils ähnliche oder gleiche biometrische Eigenschaften besitzen. Häufig angewandte Verfahren sind der Regressionsansatz nach EBERHART & RUSSELL (1966) und die AMMI-Analyse (**A**dditive **M**ain Effect and **M**ultiplicative **I**nteractions) nach CROSSA *et al.* (1991). Erstere Methode wurde u.a. bei Mais (EBERHART & RUSSELL, 1966; JOHNSON & GEADELMAN, 1989), Mais und Weizen (HEINE & WEBER, 1982; WEBER & VANSELOW, 1985), Gerste (CECCARELLI & GRANDO, 1991), Sorghum (ZAVALA-GARCIA *et al.*, 1991), aber auch bei Zuckerrohr, Kartoffeln und Hafer (zitiert bei SIMMONDS, 1991) eingesetzt. GAUCH & ZOBEL (1996) gaben eine Übersicht über den Einsatz der AMMI-Analyse bei Ertragsexperimenten u.a. bei Reis, Weizen, Hafer, Gerste, Sojabohne und Weidelgras. Für Mais liegen

Untersuchungen von CROSSA *et al.* (1990) sowie GAUCH & ZOBEL (1997) vor. LINK *et al.* (1996) wandten die AMMI-Analyse bei Ackerbohnen, ZAVALA-GARCIA *et al.* (1992) bei Sorghum an. Diese beiden Methoden wurden eingesetzt, um die Stabilität von Genotypen in mehrortigen Ertragsexperimenten oder in Versuchen unter optimalen und suboptimalen Bedingungen zu schätzen. Darunter waren jedoch keine Arbeiten, die explizit die Beziehungen zwischen N-Effizienz und Ertragssicherheit bei Mais untersuchten.

Wie Genotyp×Umwelt-Interaktionen für die Züchtung genutzt werden können, wird in der Literatur vielfach diskutiert. EVANS (1993) unterstrich die Notwendigkeit, Genotypen mit einer breiten Adaptation an eine große Anzahl unterschiedlicher Umwelten zu entwickeln, die Jahr für Jahr stabile und verlässliche Erträge liefern. CECCARELLI (1989) vertrat dagegen die Meinung, dass das Konzept der breiten Adaptation in seiner Anwendung begrenzt ist, besonders dann, wenn es darum geht Genotypen zu finden, die an besonders stark gestresste Umwelten angepasst sind. Sollen stresstolerante Genotypen entwickelt werden, so ist die Wahl der Selektionsstrategie von entscheidender Bedeutung. Dabei stellt sich die Frage, ob unter günstigen Bedingungen indirekt auf Stress selektiert werden kann, oder ob die Selektion direkt in den Stressumwelten erfolgen sollte. Die theoretischen Aspekte hierzu wurden von ROSIELLE & HAMBLIN (1981) bearbeitet. Selektionsstrategien zur Verbesserung der N-Effizienz bei Mais wurden von MURULI & PAULSEN (1981), LAFITTE & EDMÉADES (1994a-c), BÄNZIGER *et al.* (1997) an tropischem sowie von HARRER & UTZ (1990), LANDBECK (1995), PRESTERL (1996) an europäischem Material untersucht. Die Züchtung auf eine verbesserte Trockenstresstoleranz bei tropischem Mais war Gegenstand der Arbeiten von BYRNE *et al.* (1995). Mit der Entwicklung stresstoleranter Gerstensorten befassten sich CECCARELLI *et al.* (1998). Eine Literaturübersicht zur Züchtung von Genotypen, die eine zuverlässige Leistung in Umwelten mit variierenden Stressbedingungen aufweisen, gibt BRAMEL-COX (1996).

1.2.3 Beziehungen zwischen Trockenstress und Stickstoffeffizienz

Das Auftreten von Trockenstress ist nicht nur in den Tropen und Subtropen ein bedeutender ertragslimitierender Faktor, sondern auch in Regionen Europas. Durch Beregnung kann das Ertragspotential heutiger Körnermaissorten besser ausgeschöpft werden. Bei sinkenden Marktpreisen sind Kosten und Nutzen der Beregnung jedoch kritisch abzuwägen (HUGGER, 1993). Trockenstresstolerante Maissorten können zu einer wirtschaftlicheren Pflanzenproduktion beitragen.

Pflanzen verfügen über unterschiedliche Mechanismen, um Trockenperioden zu überleben. Eine Möglichkeit besteht darin, den Lebenszyklus drastisch zu reduzieren, um generative Organe zu bilden bevor der Wasservorrat aufgebraucht ist. Diese Eigenschaft wird als Drought Escape bezeichnet. Pflanzen mit einer längeren Vegetationsperiode können mit Hilfe unterschiedlicher Strategien eine Toleranz gegenüber Trockenheit erzielen. Eine detaillierte Übersicht bezüglich der morphologischen und physiologischen Mechanismen der Trockenstresstoleranz geben BLUM (1988, 1989), LUDLOW & MUCHOW (1990), SCHUSSLER & WESTGATE (1991a, b), BOYER (1996) und BELHASSEN (1997).

Mais ist besonders während der Blüte anfällig gegenüber Trockenheit, wobei die Sensitivität mit fortschreitender reproduktiver Entwicklung abnimmt (WESTGATE & THOMSON GRANT, 1989). Daher beschäftigen sich die meisten Untersuchungen zur Verbesserung der Trockenstresstoleranz mit Blühmerkmalen, insbesondere dem Blühintervall (WESTGATE & BASSETTI, 1990; GUEI & WASSOM, 1992; EDMEADES *et al.*, 1993; BOLAÑOS & EDMEADES, 1996; RIBAUT *et al.*, 1996). Auch die Entwicklung der Kolben und Körner nach der Blüte sind Gegenstand der Forschungen (LAFITTE & EDMEADES, 1995b). Zudem ist bekannt, dass einige Adaptationsmechanismen durch das Phytohormon Abscisinsäure (ABA) kontrolliert werden. ABA beeinflusst das Schließen der Stomata und ist auch an der Regulierung der Genexpression beteiligt (JENSEN *et al.*, 1996; SETTER, 1997; TAIZ & ZEIGER, 1998). Die überwiegende Anzahl der Trockenstressexperimente wurde unter tropischen Bedingungen durchgeführt (BOLAÑOS & EDMEADES, 1993a,b; BOLAÑOS *et al.*, 1993; BYRNE *et al.*, 1995; EDMEADES *et al.*, 1999; CHAPMAN & EDMEADES, 1999); sie sind daher nur eingeschränkt auf mitteleuropäische Klimabedingungen übertragbar.

Auch unter N-Mangelbedingungen stellt die Blüte eine kritische Phase für die Maispflanze dar. BELOW (1997) konnte im Rahmen seiner Untersuchungen feststellen, dass N-Mangel besonders die

Kornfüllungsphase beeinflusste und zu einer Zunahme der Anzahl abortierter Körner führte. Die Toleranz gegenüber mehreren abiotischen Stressfaktoren, wie z.B. Trockenheit und geringe N-Versorgung, wurde bisher nur in wenigen Experimenten untersucht. MOSER *et al.* (1997) studierten die Reaktion von vier Genotypen unter Trockenstress vor der Blüte auf jeweils drei N-Stufen (0, 80, 160 kg ha⁻¹) im Vergleich zu einer berechneten Kontrolle. Es ergaben sich keine signifikanten Interaktionen zwischen den Faktoren Stickstoff, Beregnung und Genotyp für das Merkmal Ertrag. Ebenso wenig konnten signifikante Interaktionen zwischen den Genotypen und der Beregnung beobachtet werden. Die Autoren schlossen daraus, dass Mais in der Lage ist, Trockenstress in einem frühen Entwicklungsstadium zu kompensieren.

LAFITTE & EDMEADES (1995b) verglichen zwei tropische Maispopulationen, die zum einen auf eine verbesserte Toleranz gegenüber Trockenstress (Tuxpeño Sequia) und zum anderen bei geringer N-Versorgung (8328 BN) selektiert worden waren. Diese Populationen wurden unter optimalem und geringem N-Angebot geprüft. Auf der niedrigen N-Stufe zeigte die Population Tuxpeño Sequia nach acht Selektionszyklen einen signifikant höheren Kornertrag als die Low-N-Population (8328 BN) nach drei Selektionszyklen. Da das Material nicht zusätzlich unter Trockenstress getestet wurde, liegen keine Informationen darüber vor, wie sich eine Selektion auf verbesserte N-Effizienz auf die Trockenstresstoleranz auswirkt. An drei weiteren tropischen Maispopulationen wiesen BÄNZIGER *et al.* (1999) nach, dass eine Selektion auf verbesserte Trockenstresstoleranz zu einer erhöhten Ertragsleistung bei geringer N-Versorgung führte.

1.2.4 Einfluss divergenter Selektion auf den Heterosiszuwachs

Die Leistungsfähigkeit einer Hybridsorte wird maßgeblich von deren Heterosis mitbestimmt. Als Heterosis wird die Überlegenheit einer Kreuzung (F₁) gegenüber dem Mittel ihrer homozygoten Eltern bezeichnet. In zahlreichen Experimenten konnte gezeigt werden, dass die Heterosis von Kreuzungen zwischen genetisch sehr divergenten Eltern besonders hoch ist (BECKER, 1984; GEIGER, 1990). MOLL *et al.* (1965) wiesen in ihren Untersuchungen eine positive Beziehung zwischen der genetischen Distanz der Eltern und der Heterosisleistung der daraus resultierenden Hybriden nach. In der Maiszüchtung wird dieses Phänomen durch die Verwendung von Mutter- und Vaterlinien aus den divergenten Formenkreisen (Genpools) Flint und Dent genutzt. Auch die Selektion von Elternlinien auf einer niedrigen bzw. einer hohen N-Versorgungsstufe könnte zu einer größeren Divergenz und somit einer Erhöhung der Heterosis führen.

MOLL *et al.* (1994) schätzten in einem Selektionsexperiment den Heterosiszuwachs verschiedener agronomisch bedeutender Merkmale bei Mais. Sie verglichen Kreuzungen der Populationen Jarvis Golden Prolific und Indian Chief in Zyklus 0 und nach 14 Zyklen Vollgeschwister - bzw. Reziproker Rekurrenter Selektion in einem mehrortigen Feldexperiment mit jeweils drei N-Stufen (56, 140, bzw. 224 kg N ha⁻¹). Die 14 Selektionszyklen wurden auf einem mittlerem N-Versorgungsniveau (140 kg N ha⁻¹) durchgeführt. Als Heterosiszuwachs wurde dabei die Differenz aus dem Mittel der Kreuzungspopulationen und dem Mittel der Elternpopulationen bezeichnet. Bei mittlerer und hoher N-Versorgung konnte für alle drei Kreuzungspopulationen ein signifikanter Heterosiszuwachs für das Merkmal Trockenmasseakkumulation beobachtet werden. Dieser war jedoch nur auf der hohen N-Stufe mit einem schwach signifikanten Heterosiszuwachs im Merkmal N-Akkumulation verbunden.

1.2.5 Konkurrenzeffekte

In Feldversuchen stehen Genotypen mit unterschiedlichen morphologischen und physiologischen Eigenschaften in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander und beeinflussen sich gegenseitig in der Ausprägung der Ertragsmerkmale (SCHMIDT *et al.*, 1995). Konkurrenzeffekte können innerhalb der Parzelle zwischen Pflanzen des gleichen Genotyps auftreten oder aber zwischen benachbarten Parzellen. Letzteres ist besonders für das Versuchswesen von Bedeutung, da möglichst viele Kandidaten auf einer begrenzten Prüffläche evaluiert werden sollen. Konkurrenzeffekte wirken sich auf die Versuchsgenauigkeit bei Sortenprüfungen, aber auch schon bei der Sortenentwicklung aus. Die Genauigkeit des Schätzwertes für die wahre Leistung der einzelnen Kandidaten wird dabei maßgeblich vom Parzellentyp beeinflusst (SCHMIDT *et al.*, 1995). Unter konventionellen Anbaubedingungen wurde beobachtet, dass konkurrenzstarke Maishybriden, die von einem schwächeren Nachbarn umgeben sind, höhere Erträge erzielen können als im Reinbestand und umgekehrt (PENDLETON & SEIF, 1962; UTZ, 1990). BOWMAN (1989) konnte dagegen keine nennenswerten Konkurrenzeinflüsse bei Mais feststellen. Zwischen Maisgenotypen unterschiedlicher N-Effizienz sind besonders bei niedriger N-Versorgung des Bodens erhebliche Konkurrenzeffekte um die begrenzten Nährstoffressourcen zu erwarten (ENGELS, 1998). Untersuchungen zu Konkurrenzeffekten während der Evaluierung von Maisnackkommenschaften unter niedriger und hoher N-Versorgung liegen bisher nur für tropisches Material vor (BÄNZIGER *et al.*, 1995).

2. Material und Methoden

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden in den Jahren 1996 und 1997 mehrortige Feldexperimente mit Körnermais auf jeweils zwei N-Stufen durchgeführt. Experiment 1 diente der Analyse der Leistungsstabilität von Hybriden mit divergenter Anpassung an die N-Versorgung und des Heterosiszuwachses von Hybriden, deren Elternlinien auf unterschiedlichen N-Stufen selektiert worden waren. In Experiment 2 wurden Konkurrenzeffekte zwischen Genotypen auf der niedrigen und der hohen N-Stufe geschätzt. Die Komponenten der N-Effizienz waren Gegenstand der Untersuchungen in Experiment 3.

2.1 Materialaufbau

Zur Untersuchung gelangte aktuelles Maiszuchtmaterial der KWS SAAT AG der mittelfrühen Reifegruppe mit unterschiedlicher Anpassung an die N-Versorgung. Als Ausgangsmaterial dienten Flint- und Dent-Linien, die sich in den vorangegangenen Untersuchungen (LANDBECK, 1995; PRESTERL, 1996) bei hoher bzw. niedriger N-Versorgung durch eine hohe Ertragsleistung ausgezeichnet hatten. Diese Linien wurden mit aktuellen Testern des jeweils komplementären Genpools gekreuzt. Die Testkreuzungsnachkommenschaften wurden im Jahr 1995 an vier Orten mit jeweils zwei N-Stufen (gedüngt *versus* ungedüngt) geprüft. Kriterien für die Linienselektion waren ein hoher Ertrag sowie ähnliche Trockensubstanzgehalte. Je Flint(F)- und Dent(D)-Genpool wurden insgesamt neun Linien selektiert. Die drei besten Linien auf der hohen N-Stufe wurden als H-Linien, die drei besten auf der niedrigen N-Stufe als L-Linien bezeichnet. Des Weiteren wurden sog. Kombinations (K) -Linien selektiert, basierend auf einem Index, der die Ertragsleistung auf beiden N-Stufen berücksichtigte. Aus diesen Linien wurden im Winterzuchtgarten (1995/96) je neun Einfachhybriden (Dent×Flint) des Typs L×L, H×H, K×K, H×L und L×H erstellt (Tab. 2.1). Diese insgesamt 45 Hybriden wurden in den Jahren 1996 und 1997 zusammen mit vier Standards geprüft. Hierbei handelte es sich um die zugelassenen Sorten Green, Achat und Helix sowie um eine Low-Input-Hybride, die in den vorangegangenen Projekten entwickelt worden war. Die Standards Green (Genotyp 2) und die Low-Input-Hybride (Genotyp 4) wurden hinsichtlich ihrer kontrastierenden Reaktion auf Stickstoff ausgewählt. Green zeichnete sich durch eine geringe Leistung auf der niedrigen und einem hohen Ertrag auf der hohen N-Stufe aus. Die Low-Input-Hybride zeigte dagegen auf der niedrigen N-Stufe eine überdurchschnittliche Leistung, fiel aber auf der hohen N-Stufe ab. Bei der Auswahl dieser beiden Standards waren neben ihrer unterschiedlichen N-Effizienz ähnliche Reifezeiten ein wichtiges Kriterium.

Tab. 2.1: Paarungsschema für den Aufbau der Hybridgruppen

Dentlinie†	Flintlinie†								
	HF1	HF2	HF3	KF1	KF2	KF3	LF1	LF2	LF3
HD1	H×H						H×L		
HD2									
HD3									
KD1				K×K					
KD2									
KD3									
LD1	L×H						L×L		
LD2									
LD3									

† Erläuterungen der Abkürzungen im Text.

2.2 Standortbeschreibung und Versuchsdurchführung

In beiden Versuchsjahren (1996, 1997) wurden Leistungsprüfungen an den Orten Stuttgart-Hohenheim, Eckartsweier bei Offenburg im Oberen Rheintal, Walldorf bei Heidelberg, Forchheim bei Karlsruhe und Bernburg bei Magdeburg durchgeführt. Bernburg und Forchheim sind Standorte, an denen regelmäßig Trockenstress auftritt. In Forchheim konnte zusätzlich eine beregnete Variante geprüft werden. Diese beregnete Variante wurde in den Jahren 1996 und 1997 mit fünf bzw. drei Gaben à 30 mm je m² Wasser versorgt. An den Orten Emmendingen am Kaiserstuhl und Grucking bei Erding wurden die Experimente nur im Jahr 1996 durchgeführt.

An allen Orten wurden zwei N-Versorgungsstufen angelegt. Die hohe N-Stufe (NH) wurde mit der ortsüblichen Düngerform und -menge versorgt, während auf der niedrigen N-Stufe (NL) seit mehreren Jahren nicht gedüngt worden war. Eine Ausnahme stellte der Ort Forchheim dar, hier wurde in Abfolge der dort üblichen Rotation jedes Jahr eine andere Fläche zur Verfügung gestellt, sodass die NL-Stufe in dem jeweiligen Versuchsjahr erstmals nicht gedüngt wurde. An allen Orten befanden sich die niedrige und die hohe N-Stufe auf benachbarten Flächen und waren durch einen Trennstreifen voneinander abgegrenzt. Es wurde die praxisübliche Bestandesdichte des jeweiligen Standortes gewählt, die zwischen acht und zehn Pflanzen je m² lag (Tab. 7.1a, b).

Die pflanzenbaulichen Maßnahmen wurden entsprechend den ortsüblichen Gegebenheiten durchgeführt und unterschieden sich mit Ausnahme der N-Düngung nicht zwischen den N-Stufen. An allen Standorten wurden Herbizide eingesetzt, die Bekämpfung des Maiszünslers erfolgte durch die Ausbringung der Schlupfwespe *Trichogramma evanescens* nach der Empfehlung des amtlichen Warndienstes. In Forchheim war die Vorfrucht Winterroggen, an allen anderen Orten lag eine mehrjährige Maismonokultur vor.

Als Versuchsanlage diente in allen Experimenten je N-Stufe ein 7×7 Gitter mit zwei Wiederholungen. In Experiment 1 und 3 bestand die Einzelparzelle aus zwei, in Experiment 2 aus vier Reihen, deren Abstand jeweils 75 cm betrug. Die Parzellengröße lag in Experiment 1 und 3 zwischen sechs und neun m², in Experiment 2 zwischen 12 und 18 m².

Experiment 1

Zur Schätzung der Leistungsstabilität und des Heterosiszuwachses wurden die Hybriden in beiden Versuchsjahren in einem möglichst weiten Umweltbereich geprüft. Zur Verrechnung konnten acht Umwelten des Jahres 1996 und sechs Umwelten des Jahres 1997 mit jeweils zwei N-Stufen herangezogen werden (Tab. 2.2). Es wurden die Merkmale Trockenmasse und der Trockensubstanzgehalt der Körner, sowie Blühtermin und Blühintervall erfasst. Am Standort Forchheim wurden zur Untersuchung der Trockenstresstoleranz zusätzlich der Chloropyllgehalt gemessen und eine Stay-Green-Bonitur durchgeführt (Erläuterung s. Kap. 2.4)

Experiment 2

Im Jahr 1997 wurden die Konkurrenzeffekte zwischen den Hybriden analysiert. An den Orten Eckartsweier, Hohenheim und Forchheim (mit und ohne Beregnung) wurden vierreihige Parzellen angelegt. Die Merkmale Wuchshöhe, Anzahl Kolben je Pflanze, Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt wurden getrennt für die rechte und linke Randreihe sowie den zwei-reihigen Kern erfasst. Daraus ergaben sich drei verschiedene Parzellentypen: die jeweils zweireihige Rand- und Kernparzelle sowie eine vierreihige Parzelle (4R). An der Kernparzelle wurden desweiteren die Merkmale Jugendentwicklung, Blühtermin und Blühintervall bonitiert.

Experiment 3

Experiment 3 wurde ausschließlich im Jahr 1996 an den Orten Eckartsweier, Walldorf und Grucking durchgeführt (Tab. 2.2). Um die Komponenten der N-Effizienz zu ermitteln, wurden zwei Erntetermine gewählt, nach Abschluss der Blüte und zur Körnerreife. Je Parzelle wurden 16 (Eckartsweier) bzw. 20 Einzelpflanzen (Walldorf und Grucking) geerntet. Zur Blüte wurde

die gesamte Pflanze gehäckselt, während zur Körnerreife eine Fraktionierung in Kolben und Stroh erfolgte. Die Lieschen wurden dem Stroh zugeteilt und ebenfalls gehäckselt, die Kolben wurden gedroschen. Von jeder Parzelle wurde von der jeweiligen Pflanzenfraktion (d.h. Gesamtpflanze zur Blüte, sowie Stroh und Korn zur Körnerreife) eine repräsentative Stichprobe zur Ermittlung des Trockensubstanz- und des N-Gehaltes gezogen. Davon abweichend wurden von den Spindeln je Versuch, d.h. je N-Stufe und Ort, 10 Mischproben genommen. Weitere Informationen bezüglich der Aufbereitung der Proben und der N-Analyse sind bei HEINRICH (1997) zu finden. Der N-Gehalt dieser verschiedenen Pflanzenfraktionen wurde mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) bestimmt. Bei TILLMANN (1996) ist diese Methode ausführlich beschrieben. Im weiteren wird die Summe aus Stroh und Spindeln als Restpflanze bezeichnet. Die Gesamtpflanze zur Körnerreife errechnete sich aus der Summe von Restpflanze und Korn. Dieses Experiment war auch Gegenstand der Diplomarbeit von N. HEINRICH (1997).

Detailliertere Angaben über die Versuchsdurchführung sowie die Aussaat- und Erntetermine sind dem Anhang zu entnehmen (Tab. 7.1a, b).

Tab. 2.2: Übersicht über die durchgeführten Experimente

	Experiment I	Experiment II	Experiment III
Anzahl Prüfumwelten (jeweils NL- und NH)	14	4	3
Einzelumwelten†	HOH 96 und 97 EWE 96 und 97 WAL 96 und 97 FOR 96 und 97 FORB 96 und 97 BER 96 und 97 EMM 96 GRU 96	HOH 97 EWE 97 FOR 97 FORB 97	EWE 96 WAL 96 GRU 96

† HOH = Hohenheim, EWE = Eckartsweier, WAL = Walldorf, FOR = Forchheim,
FORB = Forchheim mit Beregnung, BER = Bernburg, EMM = Emmendingen , GRU = Grucking.

2.3 Charakterisierung des Vegetationsverlaufs

Das erste Versuchsjahr 1996 war durch einen überdurchschnittlich warmen und trockenen April gekennzeichnet. In den Monaten Mai, Juli und September wurden im Vergleich zum langjährigen Mittel geringere, im Juni, August und Oktober hingegen höhere Temperaturen erreicht (Tab. 7.2a, b). In Hohenheim und Eckartsweier war der Mai, in Bernburg der Juli überdurchschnittlich feucht, sodass im Laufe der Vegetationsperiode die Niederschlagssumme das langjährige Mittel übertraf. In Forchheim war es besonders trocken, die Niederschlagssumme während der gesamten Vegetationsperiode lag 176 mm unter dem langjährigen Mittel. Die Körnermaisernte konnte an den meisten Orten im Oktober abgeschlossen werden, in Hohenheim war dies erst im November möglich. In Forchheim reiften die unberegnete und die beregnete Variante unterschiedlich ab, erstere wurde Anfang Oktober letztere Anfang November geerntet.

Im zweiten Prüfljahr 1997 war es an allen Orten etwas wärmer als das Vorjahr (Tab. 7.2a, b). Dies galt jedoch nicht für den Beginn und das Ende der Vegetationsperiode, im April und auch im Oktober wurden geringere Temperaturen im Vergleich zum Vorjahr und zum langjährigen Mittel gemessen. Überdurchschnittlich warm und trocken war es hingegen im August. Während der Vegetationsperiode 1997 fielen mit Ausnahme von Forchheim weniger Niederschläge als im Vorjahr. An keinem Ort wurde die Niederschlagssumme des langjährigen Mittels erreicht. Vergleichsweise trocken waren besonders die Monate April bis Mai sowie August und September. Dies führte dazu, dass die unberegneten Varianten in Forchheim und Bernburg schon im September zu ernten waren. Aber auch in Walldorf, dem frühesten Standort, wurde in diesem Monat die Druschreife erreicht.

2.4 Merkmalerfassung

Folgende Merkmale wurden in den Experimenten 1-3 ausgewertet:

Blüte ♂	Männliche Blüte in Tagen [d] nach Aussaat bei 50 % der Pflanzen einer Parzelle.
Blüte ♀	Weibliche Blüte in Tagen [d] nach Aussaat bei 50 % der Pflanzen einer Parzelle.
Blühintervall	Intervall [d] zwischen weiblicher und männlicher Blüte (Blüte ♀ - Blüte ♂).
Wuchshöhe	Mittlere Wuchshöhe der Pflanzen einer Parzelle, gemessen von der Bodenoberfläche bis zum untersten Rispenast [cm].

Kolben/Pflanze	Relativer Kolbenansatz je Pflanze [%], (100 % = 1 Kolben je Pflanze).
Chlorophyll	Mittlerer Blattchlorophyllgehalt von 20 Pflanzen einer Parzelle, gemessen am Kolbenblatt nach der Blüte mit dem Chlorophyllmeter Minolta SPAD 502, in der dimensionslosen Maßeinheit SPAD.
Stay-Green	Bonitur der Blattfarbe [9 = alle Blätter grün, 5 = Blätter unterhalb des Kolbens abgereift, 1 = gesamte Pflanze abgereift].
Korn-TS	Kornrockensubstanzgehalt [%].
Korn-TM	Kornrockenmasse [g m ⁻²], bezogen auf 0 % Wassergehalt.
Jugendentwicklung	Bonitur der Bestandesentwicklung [9 = sehr gut, 1 = sehr schlecht]

Zusätzliche Merkmalerfassung in Experiment 3:

Für die Pflanzenfraktionen Gesamtpflanze zur Blüte, Stroh, Korn, und Spindel wurden die Merkmale Trockensubstanzgehalt [%], Trockenmasse [g m⁻²], N-Gehalt [%] direkt bestimmt. Der N-Ertrag [g N m⁻²] ergab sich aus der Trockenmasse und dem N-Gehalt der jeweiligen Fraktion. Für die Fraktionen Gesamtpflanze zur Körnerreife und Restpflanze wurden diese Merkmale berechnet. Auf dieser Basis wurden die folgenden N-Effizienzmerkmale ermittelt:

N-Aufnahme	N-Aufnahme [g N m ⁻²], entspricht dem N-Ertrag der oberirdischen Pflanzenteile nach Körnerreife.
N-Verwertung	N-Verwertungseffizienz [g TM g ⁻¹ N], entspricht dem Quotienten aus Korn-TM und N-Aufnahme.
N-Remobilisierung	N-Remobilisierung [g N m ⁻²], entspricht der Differenz zwischen Gesamtpflanzen-N-Ertrag zur Blüte und dem Restpflanzen-N-Ertrag.
Harvest-Index	Quotient aus Korn-TM und Gesamtpflanzen-TM nach Körnerreife [%].
N-Harvest-Index	Quotient aus Korn-N-Ertrag und Gesamtpflanzen-N-Ertrag nach Körnerreife [%].
N-Assimilation	Assimilationseffizienz [g TM g ⁻¹ N], entspricht dem Quotienten aus Gesamtpflanzen-TM und Gesamtpflanzen-N-Ertrag nach Körnerreife.
N-Aufn. z. Blüte	N-Aufnahme zur Blüte [g N m ⁻²], entspricht der Differenz zwischen Gesamtpflanzen-N-Ertrag nach Körnerreife und dem Gesamtpflanzen-N-Ertrag zur Blüte.
Sink	Sinkstärke [g m ⁻²], entspricht der Differenz zwischen Korn-TM und Trockenmassezuwachs der Gesamtpflanze nach Blüte.
TM-Zuw. n. Blüte	Trockenmassezuwachs nach Blüte [g m ⁻²], entspricht der Differenz zwischen der Gesamtpflanzen-TM nach Körnerreife und der Gesamtpflanzen-TM nach Blüte.

2.5 Statistische Auswertung

Die Verrechnung der Einzelversuche der drei Experimente wurde nach der von COCHRAN & COX (1957) beschriebenen statistischen Analyse von Gitteranlagen zunächst getrennt nach den N-Stufen, Orten und Jahren durchgeführt. Für jeden Einzelversuch erfolgte ein Ausreißertest nach ANSCOMBE & TUKEY (1963). Im weiteren wurden die eliminierten Ausreißer als fehlende Werte behandelt. Die zusammenfassende Verrechnung der jeweiligen Versuchsserien wurde mit den adjustierten Prüfgliedmittelwerten in den Einzelexperimenten und den gepoolten effektiven Fehlervarianzen aus der Gitteranalyse durchgeführt (COCHRAN & COX, 1957). Die Schätzung der Varianzkomponenten erfolgte nach SNEDECOR & COCHRAN, 1980. In allen statistischen Analysen wurden die Effekte der Umwelten und Jahre als zufällig, und die Effekte der Genotypen, N-Stufen und Berechnungsstufen als fixiert angenommen. Die Abweichungsquadrate für die Genotypen wurden in einigen Analysen in Hybridgruppen und Kreuzungen innerhalb von Hybridgruppen unterteilt (s. Tab. 2.1). Die entsprechenden Effekte wurden ebenfalls als fixiert angesehen.

Im Jahr 1996 konnte Prüfglied 14 (eine H×L-Hybride) wegen eines Saatgutfehlers nicht in die Berechnungen einbezogen werden. Daher wurde in dem nur im Jahr 1996 durchgeführten Experiment 3 Prüfglied 14 weggelassen, die angegebenen Mittelwerte für die H×L-Hybridgruppe beziehen sich nur auf acht statt neun Prüfglieder. Alle zusammenfassenden Verrechnungen in Experiment 1 und 2 über die beiden Versuchsjahre basieren für das Prüfglied 14 ausschliesslich auf Werten aus dem zweiten Versuchsjahr.

Die mitgeprüften Standards wurden in allen Experimenten nicht in die Serienanalysen einbezogen. Ihre Mittelwerte werden jedoch in einigen Abbildungen als Vergleichsbasis gezeigt.

Die Wiederholbarkeit (Wdh%) der Parzellenwerte eines Prüfgliedes in einem Gitter wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Wdh}\% = \hat{\sigma}_g^2 / (\hat{\sigma}_g^2 + \hat{\sigma}_e^2)$$

Dabei symbolisieren $\hat{\sigma}_g^2$ und $\hat{\sigma}_e^2$ die geschätzte Varianz der (fixierten) genotypischen Effekte bzw. der Restabweichungen der Parzellen (Fehler).

Die Schätzwerte für die Heritabilität wurden auf der Basis der Prüfgliedmittelwerte als Quotient aus der genotypischen und der phänotypischen Varianz (WRICKE & WEBER, 1986) ermittelt und in den Serienanalysen getrennt für die N-Stufen geschätzt. Die Konfidenzintervalle der Heritabilitätsschätzwerte wurden nach KNAPP & BRIDGES (1987) berechnet.

Die vorstehenden Auswertungen erfolgten im allgemeinen mit dem Programmpaket PLABSTAT (UTZ, 1996). Nur die Varianzanalysen zur faktoriellen Auswertung der Hybridgruppen und die Vergleiche der Gruppenmittelwerte wurden mit dem Programmpaket SAS (SAS INSTITUTE, 1996) durchgeführt.

Experiment 1

In Experiment 1 wurde zur Erfassung der phänotypischen Stabilität eine Analyse der Interaktionen der Genotypen mit den Umwelten in Anlehnung an das Regressionsmodell von EBERHART & RUSSELL (1966) durchgeführt. Die Interaktionen werden dabei zerlegt in einen Regressionskoeffizienten, der die Reaktion der einzelnen Genotypen auf die Produktivität der Umwelten beschreibt, und eine Abweichungsvarianz, welche die Streuung der Einzelwerte um die Regressionsgerade angibt. Das zu Grunde liegende Modell ist bei UTZ (1972) beschrieben. Die Stabilitätsanalysen wurden für drei verschiedene Serien gerechnet: über die 14 NL-Umwelten, über die 14 NH-Umwelten sowie über alle 28 Umwelten. Dabei traten signifikante Effekte der Nichtadditivität (Tukey-Test) in der Serie über die 14 NH-Umwelten und über alle 28 Umwelten auf. Die in diesem Fall bei SNEDECOR & COCHRAN (1980) vorgeschlagenen Funktionen zur Transformation der Daten waren nicht erfolgreich, sodass letztlich auf eine Transformation der Daten verzichtet wurde.

Die AMMI-Analyse (**A**dditive **M**ain Effects and **M**ultiplicative **I**nteraction) wurde nach der in CROSSA *et al.* (1991) beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Dabei werden in einem ersten Schritt die additiven Effekte der Genotypen und der Umwelten sowie deren Interaktionseffekte in einer Varianzanalyse berechnet. In einem zweiten Schritt werden die Genotyp×Umwelt-Interaktionseffekte einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen. Für die AMMI-Analyse kam das Programmpaket SAS zur Anwendung.

Bei der faktoriellen Auswertung der verschiedenen Hybridgruppen wurden die Effekte der Allgemeinen (GCA) und Spezifischen (SCA) Kombinationsfähigkeit sowie der N-Stufen als fixiert angenommen. Die entsprechenden Varianzen stellen somit keine Varianzkomponenten im engeren Sinne, d.h. keine Populationsparameter, sondern die Mittelquadrate der geschätzten Effekte dar. Der Gültigkeitsbereich der Ergebnisse ist demzufolge auf die in diesem Experiment verwendeten Flint- und Dent-Linien beschränkt.

3 Ergebnisse

3.1 Experiment 1: Stabilität und Heterosiszuwachs

3.1.1 Variationsmaße

In der zusammenfassenden Analyse über die 14 Umwelten jeder N-Stufe wurden für alle erfassten Merkmale hochsignifikante Effekte der Varianzursachen Genotyp und Genotyp×Umwelt nachgewiesen (Daten nicht tabelliert). Auch die Auftrennung in Hybridgruppen und Kreuzungen innerhalb Gruppen ergab hochsignifikante Schätzwerte. In der Serienverrechnung über die beiden N-Stufen wurden hochsignifikante Interaktionen der Genotypen sowohl mit den Umwelten als auch mit den N-Stufen festgestellt. Auch für die Dreifachinteraktion der Faktoren Genotyp×N-Stufe×Umwelt bestand eine hochsignifikante Variation. Die Auftrennung der Genotypen ergab hochsignifikante Unterschiede der Hybridgruppen mit Ausnahme des Merkmals Korntrockenmasse, die Kreuzungen innerhalb der Gruppen variierten dagegen für alle erfassten Merkmale hochsignifikant. Ferner zeigten alle weiteren Haupt- und Interaktionskomponenten für die in dieser Analyse ermittelten Merkmale hochsignifikante Effekte.

Die Serienanalyse über die sechs Orte, an denen die Genotypen in beiden Versuchsjahren auf jeweils zwei N-Stufen geprüft wurden, ergab hochsignifikante Jahr×Ort- und Jahr×Ort×N-Stufe-Interaktionen für alle erfassten Merkmale (Tab. 3.1). Die Interaktionen zwischen den Jahren und den N-Stufen waren für keines der Merkmale signifikant. Es lagen aber, mit Ausnahme des Korntrockensubstanzgehaltes, signifikante bis hochsignifikante Wechselwirkungen zwischen den Orten und N-Stufen vor.

In der Serienanalyse über die Jahre waren die Effekte der Genotypen für alle Merkmale hochsignifikant (Daten nicht gezeigt). Zwischen den Hybridgruppen bestanden keine bzw. nur schwach signifikante Unterschiede für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt, während sich die Kreuzungen innerhalb der Hybridgruppen hochsignifikant unterschieden (Tab. 3.1). Für die Blühmerkmale ergaben sich sowohl für die Hybridgruppen als auch für die Kreuzungen innerhalb der Gruppen hochsignifikante Unterschiede. Die Genotyp×Jahr-Interaktionen waren für alle ermittelten Merkmale durchweg signifikant bis hochsignifikant, bei den Interaktionen zwischen den Jahren und den Hybridgruppen oder Kreuzungen innerhalb der Gruppen wich davon nur das Merkmal Blühintervall ab. Signifikante bis hochsignifikante Interaktionseffekte wurden zwischen den Faktoren Genotyp×Jahr×Ort sowie Hybridgruppe×Jahr×Ort beobachtet.

Tab. 3.1: Mittelquadrate der zusammenfassenden Verrechnung über zwei Jahre, sechs Orte und zwei N-Stufen unter Berücksichtigung der Hybridgruppen für die Merkmale Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) und Korntrockenmasse (Korn-TM) sowie Blühtermin (Blüte ♂, ♀) und Blühintervall in **Experiment 1**

Variationsursache	Merkmal				
	Korn-TS	Korn-TM†	Blüte ♂	Blüte ♀	Blühintervall
Jahr (J)	6506,07 **	3051,13 +	6102,06 +	5189,52 *	42,13
Ort (O)	3781,31 **	3433,30 *	3983,08 +	4015,35 *	131,07
N-Stufe (N)	115,84	17779,44 **	897,06 +	2447,32 *	375,23 *
J×O	339,66 **	627,23 **	1005,54 **	579,27 **	155,02 **
J×N	46,38	0,50	3,00	21,54	5,77
O×N	11,18	1035,19 *	143,10 *	256,80 **	40,40 **
J×O×N	34,71 **	128,83 **	17,87 **	23,30 **	2,55 **
Hybridgruppe (H)	173,58 +	24,89	285,56 **	478,02 **	32,74 **
Kreuzung (K):H‡	97,98 **	33,25 **	37,38 **	42,52 **	11,01 **
H×J	35,58 **	16,11 *	5,17 **	11,65 **	4,09 +
(K×J):H	6,34 **	6,81 **	5,48 **	4,14 **	1,07
H×O	6,95	6,00	2,06 *	2,69	1,37
(K×O):H	3,15 **	5,04 **	1,10	1,71 **	0,98
H×N	10,16 +	44,71 *	6,02	21,69 **	5,87
(K×N):H	3,42 **	7,34 **	0,77	2,75 **	1,15 *
H×J×O	5,77 **	5,58 **	0,89 **	2,27 **	1,50 **
(K×J×O):H	1,85 **	2,99 **	1,00 **	0,97 **	0,84 **
H×J×N	0,49	2,35	0,74	0,50	0,46
(K×J×N):H	1,14 *	2,74	0,78	0,88	0,57
H×O×N	1,42 **	2,77	0,63	1,16	0,80
(K×O×N):H	0,87 +	2,79 +	0,63	0,88	0,64
H×J×O×N	0,45	4,01 **	0,57 *	0,91 **	0,47
(K×J×O×N):H	0,71 +	2,24 **	0,62 **	0,78 **	0,61 **
Fehler	0,60	1,20	0,34	0,35	0,34

+, *, ** Schätzwert signifikant bei P=0,1; 0,05 bzw. 0,01.

† Mittelquadrat × 0,001. ‡ Der Doppelpunkt steht für „innerhalb“.

Die Wechselwirkungen der Genotypen mit den Orten oder N-Stufen waren mit Ausnahme der Merkmale männliche Blüte und Blühintervall hochsignifikant. Bei einer Aufteilung dieser Interaktionskomponenten in Hybridgruppen und Kreuzungen innerhalb Gruppen wurden für die geprüften Merkmale sehr unterschiedliche Signifikanzniveaus erreicht. Nur für den Korntrockensubstanzgehalt wurden signifikante Dreifachinteraktionen zwischen den Komponenten Genotyp, N-Stufe und Ort oder Jahr festgestellt. In der Gruppenanalyse wurden unterschiedlich signifikante Wechselwirkungen für dieses Merkmal beobachtet. Die durchgehend hochsignifikanten Effekte zwischen den Genotypen und den drei Faktoren Jahr, Ort und N-Stufe wurden in der Gruppenanalyse nicht in allen Fällen bestätigt.

Die Heritabilitätsschätzwerte für die erfassten Merkmale waren in der Serienanalyse über 14 Umwelten durchweg sehr hoch und unterschieden sich auf den beiden N-Stufen nur geringfügig (Tab. 3.2). Für die Korntrockenmasse lagen die Heritabilitäten auf beiden N-Stufen bei 0,8.

Tab. 3.2: Schätzwerte für die Heritabilität (h^2) und zugehörige 95% Konfidenzintervalle (CI 95%) getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe aus der Serie über 14 Umwelten für die Merkmale Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) und Korntrockenmasse (Korn-TM) sowie Blühtermin (Blüte ♂, ♀) und Blühintervall in **Experiment 1**

Merkmal	NL-Stufe		NH-Stufe	
	h^2	CI 95%	h^2	CI 95%
Korn-TS	0,97	0,95-0,98	0,96	0,94-0,97
Korn-TM	0,83	0,73-0,89	0,86	0,78-0,91
Blüte ♂	0,97	0,95-0,98	0,97	0,95-0,98
Blüte ♀	0,98	0,96-0,98	0,97	0,95-0,98
Blühintervall	0,91	0,86-0,94	0,86	0,77-0,90

Die Wiederholbarkeiten für den Korntrockensubstanzgehalt lagen in 18 der insgesamt 28 Einzelversuche über 90 %, zwischen den N-Stufen gab es keine bedeutenden Unterschiede, dies galt auch für die Variationskoeffizienten des Fehlers (Tab. 7.3). Dagegen schwankten die Wiederholbarkeiten für das Merkmal Korntrockenmasse in den einzelnen Versuchen sehr und erreichten auf der NH-Stufe meist höhere Werte. In Bernburg zeigten sich in beiden Versuchsjahren auf der NL-Stufe die größten Fehlervariationskoeffizienten, diese wurden nur in Forchheim 1996 auf der unberechneten NH-Stufe überschritten. Weiterhin wurden hohe Fehlereffekte

auf der NL-Stufe im Jahr 1996 in Grucking und Walldorf, sowie in 1997 in Eckartsweier festgestellt. In der Regel waren die Fehlervariationskoeffizienten auf der NL-Stufe höher als auf der NH-Stufe.

Die Schätzwerte der Korrelationen zwischen den N-Stufen waren für alle erfassten Merkmale mit Ausnahme der Korntrockenmasse sehr straff (Tab. 3.3). Schwach negativ korrelierte die Korntrockenmasse mit dem Korntrockensubstanzgehalt auf der NH-Stufe, auf der NL-Stufe war diese Beziehung nicht nachzuweisen. Die Blüte der weiblichen Infloreszenzen zeigte zur Korntrockenmasse auf der NL-Stufe eine schwach negative, auf der NH-Stufe hingegen eine schwach positive Korrelation. Demzufolge war eine höhere Ertragsleistung unter N-Mangel mit einer früheren Blüte verknüpft, während bei ausreichender N-Versorgung späte Blühtermine zu einer Ertragssteigerung führten. Auf beiden N-Stufen war der Korntrockensubstanzgehalt negativ mit dem Blühtermin der männlichen und weiblichen Infloreszenzen korreliert, d.h. ein hoher Korntrockensubstanzgehalt, und somit eine frühere Reife, war mit einem frühen Blühtermin verbunden. Das Blühintervall zeigte mit der Korntrockenmasse nur auf der NL-Stufe eine schwach negative Beziehung.

Tab. 3.3: Geschätzte Koeffizienten der phänotypischen Korrelationen zwischen den Merkmalen Korntrockenmasse (Korn-TM), Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS), Blühtermin (Blüte ♂, ♀) und Blühintervall getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe und die Beziehungen zwischen den N-Stufen ($r_{NL/NH}$) aus der Serie über 14 Umwelten in **Experiment 1**

Merkmal	Korn-TM		Korn-TS		r
	NL-Stufe	NH-Stufe	NL-Stufe	NH-Stufe	NL/NH
Korn-TM					0,51**
Korn-TS	0,04	-0,45**			0,96**
Blüte ♂	-0,29	0,23	-0,61**	-0,57**	0,97**
Blüte ♀	-0,37*	0,32*	-0,60**	-0,52**	0,94**
Blühintervall	-0,37*	0,25	-0,27	0,06	0,82**

*, ** Schätzwert signifikant bei $P=0,01$ bzw. $0,05$.

3.1.2 Mittelwerte

In allen Umwelten konnte ein deutlicher Effekt der N-Düngung beobachtet werden. Auf der NL-Stufe wurde im Mittel 68 % der Kornertragsleistung der NH-Stufe erreicht (Tab. 3.4). Bedingt durch das spezifische N-Nachlieferungsvermögen in den einzelnen Umwelten fielen die Ertragsdifferenzen zwischen den N-Stufen sehr unterschiedlich aus. Der größte Ertragsrückgang lag bei 50 % (Bernburg 1997, Emmendingen 1996), geringste Differenzen wurden in Forchheim 1996 (1 %) und in Hohenheim 1997 (10 %) festgestellt. Die Standorte mit Trockenstress (Bernburg

Tab. 3.4: Umweltmittelwerte auf der niedrigen (NL) und der hohen (NH) N-Stufe für die Merkmale Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) und Korntrockenmasse (Korn-TM) sowie Blühtermin (Blüte ♂, ♀) und Blühintervall in **Experiment 1**

Umwelt†	Korn-TS [%]		Korn-TM [g m ⁻²]		Blüte ♂ [d]		Blüte ♀ [d]		Blühintervall [d]	
	NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH
EMM 96	66,0	68,4	424	799	81,2	78,7	83,6	79,4	2,33	0,71
GRU 96	58,4	60,8	515	851	87,1	84,1	91,8	89,1	4,65	5,08
HOH 96	59,7	60,2	653	861	97,9	96,3	97,1	95,2	-0,79	-1,03
HOH 97	67,1	67,7	933	1035	91,6	89,9	90,4	88,5	-1,22	-1,40
EWE 96	65,9	67,6	440	728	85,3	82,7	88,2	82,6	2,98	-0,11
EWE 97	72,6	71,4	456	725	84,1	83,6	84,3	81,7	0,23	-1,86
WAL 96	69,5	71,7	654	1163	91,5	90,7	93,1	90,9	1,60	0,24
WAL 97	74,7	73,9	684	1087	91,7	90,1	94,3	91,4	2,61	1,21
FOR 96	72,5	72,7	464	467	89,4	88,4	90,2	88,9	0,75	0,45
FOR 97	73,4	74,7	684	794	84,2	84,1	85,0	84,4	0,91	0,30
FORB 96	71,8	72,4	688	891	88,5	88,5	89,1	88,2	0,54	-0,27
FORB 97	75,5	75,1	757	949	84,9	83,5	85,7	84,1	0,77	0,52
BER 96	58,7	60,0	443	777	105,3	99,6	105,7	97,7	0,35	-1,87
BER 97	67,4	69,3	466	950	91,9	86,8	95,4	88,6	3,61	1,88
Mittel	68,1	69,0	590	863	89,6	87,6	91,0	87,9	1,38	0,28
<i>GD 5%</i>	<i>0,6</i>	<i>0,6</i>	<i>21</i>	<i>27</i>	<i>0,5</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,4</i>	<i>0,40</i>	<i>0,36</i>

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.2.

und Forchheim) unterschieden sich bezüglich ihres Ertragsniveaus und reagierten sehr unterschiedlich auf eine verringerte N-Versorgung. Mit Ausnahme von Eckartsweier wurden im Versuchsjahr 1997 höhere Korntrockenmassen erzielt als im Vorjahr. Der N-Mangel bewirkte in fast allen Umwelten eine verzögerte Blüte der männlichen und weiblichen Infloreszenzen, die im Mittel zwei Tage betrug. Auch die mittleren Korntrockensubstanzgehalte waren auf der NL-Stufe um 1 % geringer als auf der NH-Stufe. Bei geringem N-Angebot verlängerte sich das Blühintervall im Mittel um einen Tag, in einzelnen Umwelten wurden jedoch auch Abweichungen von dieser Reaktion beobachtet.

Tab. 3.5: Mittelwerte der Hybridgruppen aus der Serie über 14 Umwelten auf der niedrigen (NL) und der hohen (NH) N-Stufe für die Merkmale Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) und Korntrockenmasse (Korn-TM) sowie Blühtermin (Blüte ♂, ♀) und Blühintervall in **Experiment 1**

Hybrid- gruppe†	Korn-TS [%]		Korn-TM [g m ⁻²]		Blüte ♂ [d]		Blüte ♀ [d]		Blühintervall [d]	
	NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH
H×H	66,8 b	68,1 d	572 b‡	885 a	90,1 b	88,2 b	92,0 b	88,8 b	1,92 a	0,58 a
L×L	69,2 a	70,1 a	595 a	849 b	89,5 c	87,3 c	90,4 c	87,2 c	0,94 b	-0,08 c
K×K	68,7 a	69,0 bc	611 a	868 ab	88,5 d	87,0 c	89,3 d	87,1 c	0,83 b	0,09 bc
H×L	68,8 a	69,3 ab	601 a	846 b	88,4 d	86,4 d	89,6 d	86,8 d	1,26 b	0,43 ab
L×H	67,0 b	68,5 cd	573 b	866 ab	91,6 a	89,3 a	93,6 a	89,5 a	1,94 a	0,34 ab
Mittel	68,1	69,0	590	863	89,6	87,6	91,0	87,6	1,38	0,27

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.1.

‡ Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte bezeichnen eine bei P=0,01 signifikante Mittelwertsdifferenz im Vergleich der Hybridgruppen; Duncan-Test.

In der zusammenfassenden Serie über die 14 Umwelten waren die L×L-Hybriden den H×H-Hybriden auf der NL-Stufe im Mittel um 4 % im Kornertrag überlegen (Tab. 3.5). Der entgegengesetzte Effekt wurde auf der NH-Stufe beobachtet. Hier ergaben sich für die H×H-Hybriden im Vergleich zu den L×L-Hybriden im Mittel um 4 % höhere Erträge. Auf der NL-Stufe zeigten K×K-Hybriden und L×L-Hybriden ähnliche Leistungen, und waren zudem signifikant besser als die H×H-Hybriden. Auf der NH-Stufe unterschieden sich die K×K-Hybriden nicht signifikant von den H×H- oder L×L-Hybriden. Für alle Gruppen konnte eine durch N-Mangel bedingte Verzögerung der Blüte beobachtet werden. Dabei zeigte sich auf beiden N-Stufen, dass die männlichen und weiblichen Infloreszenzen der H×H-Hybriden signifikant später als die der L×L-

Hybriden blühten. Ferner wiesen die L×L-Hybriden auf beiden N-Stufen ein signifikant geringeres Blühintervall als die H×H-Hybriden auf. Auf der NL-Stufe erreichten alle Hybridgruppen geringere Korntrockensubstanzgehalte als auf der NH-Stufe. Für die L×L-Hybriden wurden sowohl auf der NL- als auch auf der NH-Stufe um 2,4 bzw. 2,0 % höhere Korntrockensubstanzgehalte als für die H×H-Hybriden ermittelt.

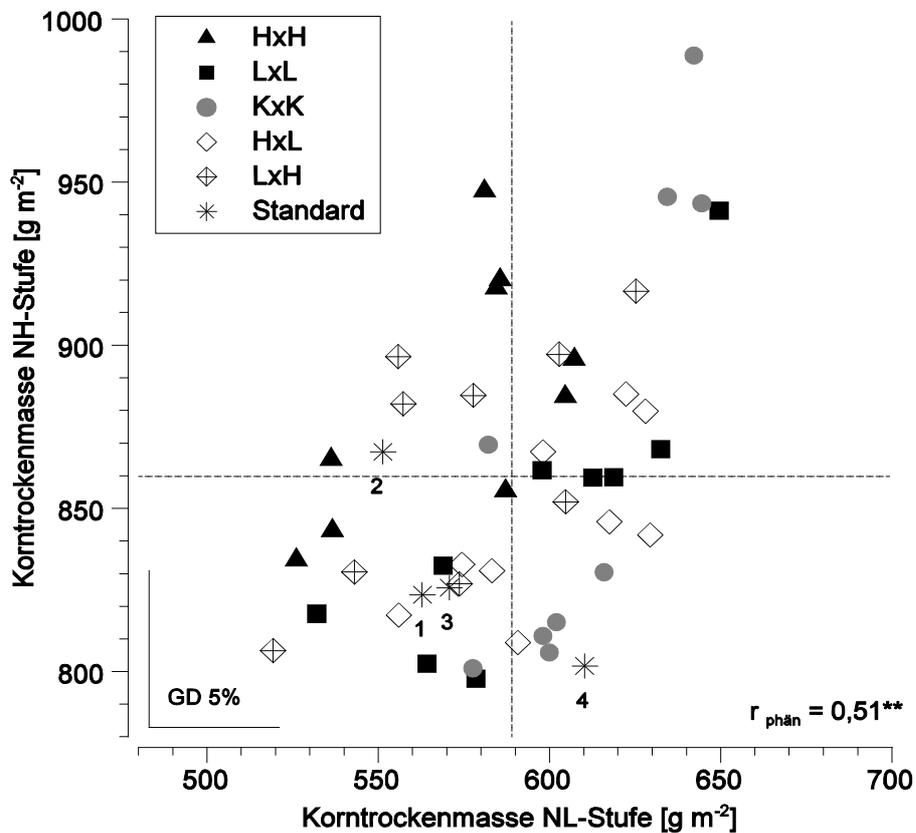


Abb. 3.1: Beziehung zwischen Korntrockenmasse auf der niedrigen (NL) und hohen (NH) N-Stufe der 45 Hybriden und vier Standards aus der Serie über 14 Umwelten in **Experiment 1**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. ** signifikant bei $P=0,01$. GD 5% Grenzdifferenz bei $P=0,05$).

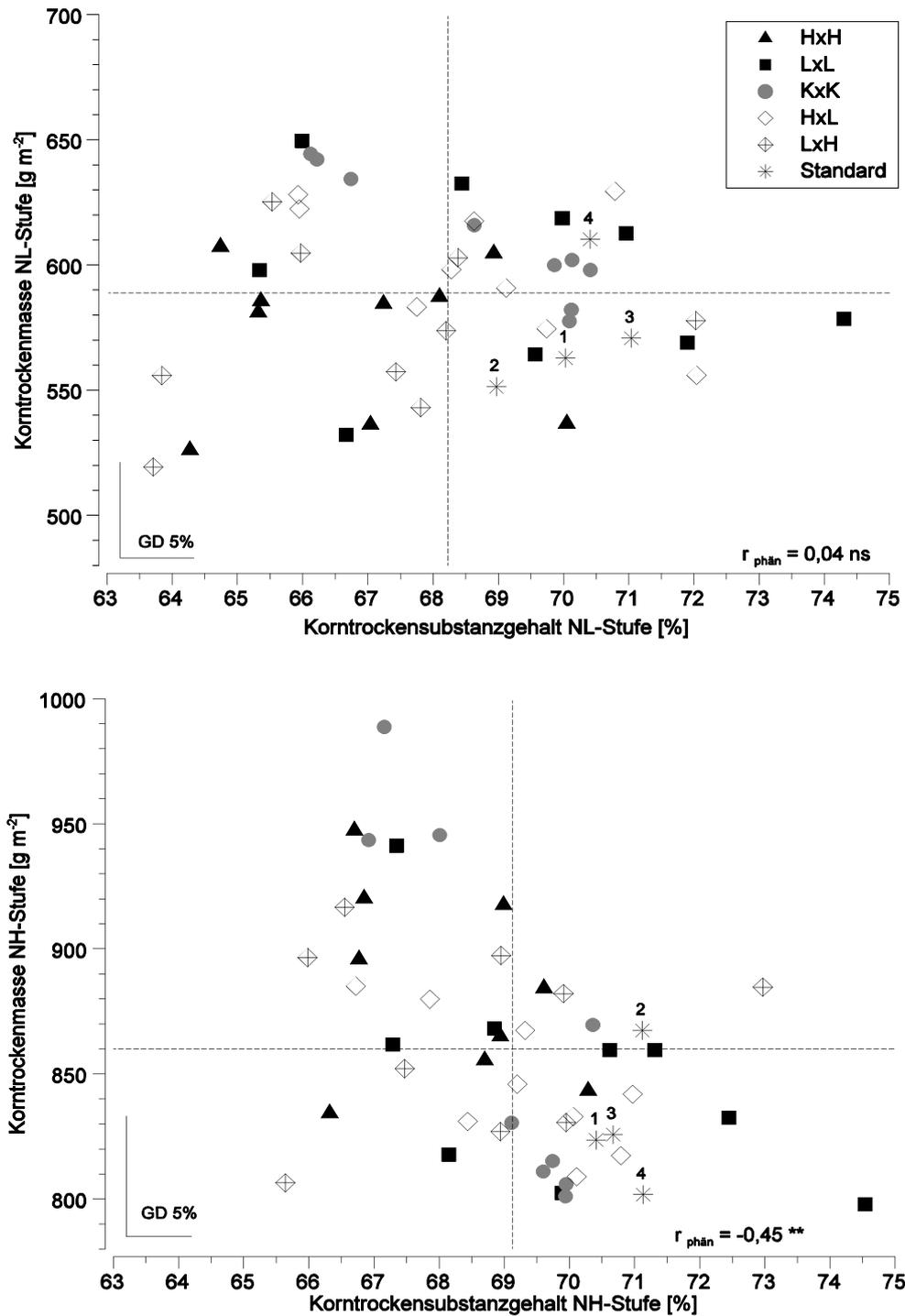


Abb. 3.2: Beziehung zwischen Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt auf der niedrigen (NL) N-Stufe, oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, der 45 Hybriden und vier Standards aus der Serie über 14 Umwelten in **Experiment 1**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. ** signifikant bei $P=0,01$. GD 5% Grenzdifferenz bei $P=0,05$).

Nicht nur die Hybridgruppen, sondern auch die Hybriden innerhalb einer Gruppe unterschieden sich in ihrer Reaktion auf die N-Versorgung. Die hohen Gruppenmittel der K×K-Hybriden für den Kornertrag auf beiden N-Stufen ergaben sich hauptsächlich durch die überlegene Leistung dreier Hybriden, die den gleichen Flint-Elter besaßen (Abb. 3.1). Zudem zeigte eine L×L-Hybride auf beiden N-Stufen sehr hohe Korntrockenmassen und wich damit in ihrem Verhalten sehr stark von den übrigen L×L-Hybriden ab, die auf der NH-Stufe eher mittelmäßige Leistungen erzielten. Auch die entgegengesetzte Reaktion der Standards 2 und 4 war auf den beiden N-Stufen deutlich zu erkennen. Obwohl bei der Wahl der Elternlinien ähnliche Reifetermine ein wichtiges Kriterium darstellten, zeigten die 45 Hybriden auf beiden N-Stufen eine deutliche Variabilität für das Merkmal Korntrockensubstanzgehalt, die weit über die Bandbreite der mitgeprüften Standards hinausreichte (Abb. 3.2). Die auf beiden N-Stufen besonders leistungsstarke L×L-Hybride sowie die drei K×K-Hybriden fielen durch vergleichsweise geringe Korntrockensubstanzgehalte auf.

3.1.3 Phänotypische Stabilität

In allen drei Serienanalysen konnte nur ein kleiner Teil der Genotyp×Umwelt-Interaktionsvarianz auf die Heterogenität der Regressionsgeraden der Genotypen zurückgeführt werden (Tab. 3.6). Dabei erklärten die Regressionen der Genotypen und diejenigen der Umwelten in den Serien über alle 14 NH- bzw. NL-Umwelten etwa gleichgroße Anteile. In der zusammenfassenden Serie über beide N-Stufen war hingegen der Anteil der Regression der Genotypen auf die Umweltmittel deutlich höher als der Anteil der Regression der Umwelten. Die Nichtadditivität war in der Serie über alle NH-Umwelten und in der zusammenfassenden Analyse über die beiden N-Stufen signifikant, d.h. die Genotypeffekte waren mit den Umwelteffekten multiplikativ verknüpft. Auch durch die von SNEDECOR & COCHRAN (1980) vorgeschlagenen Transformationen ließ sich die Nichtadditivität nicht beseitigen. In allen dargestellten Analysen waren die Abweichungen von der Regression signifikant und erklärten jeweils mehr als 80 % der Interaktionsvarianz.

Tab. 3.6: Aufteilung der Varianz der Genotyp×Umwelt-Interaktionseffekte in der Regressionsanalyse aus der Serie über 14 Umwelten auf der niedrigen (NL) und der hohen (NH) N-Stufe sowie über die beiden N-Stufen für das Merkmal **Korn-trockenmasse** in **Experiment 1**

Variationsursache	Serie über		
	14 NL-Umwelten	14 NH-Umwelten	28 Umwelten †
Genotypen	916**	1874**	1074**
Genotyp×Umwelt	2551**	4152**	3668**
Heterogenität			
Regression der Genotypen	105**	126*	361**
Regression der Umwelten	82**	173**	88**
Nichtadditivität	4	152**	138**
Abweichung von der Regression	2359**	3687**	3068**
Fehler	1172	1302	1237

*, ** Schätzwert signifikant bei P=0,05 bzw. 0,01.

† 14 Umwelten mit jeweils zwei N-Stufen.

Die Regressionskoeffizienten der H×H-Hybriden erreichten in den dargestellten Serienanalysen im Mittel Werte über 1, d.h. sie waren an hochproduktive Umwelten adaptiert, während die L×L-Hybriden im Mittel Werte kleiner als 1 erzielten und somit eine Adaptation an gering produktive Umwelten aufwiesen (Tab. 3.7). Die Unterschiede zwischen diesen Gruppen waren auf der NH-Stufe und in der Serie über alle Umwelten signifikant. Im Mittel zeigten die L×L-Hybriden geringere Abweichungsvarianzen als die H×H-Hybriden. Die Unterschiede überschritten jedoch in keiner der vorgestellten Serienanalysen das Signifikanzniveau, da auch die Hybriden innerhalb einer Gruppe bezüglich der Regressionskoeffizienten und Abweichungsvarianzen erheblich variierten (Abb. 3.3).

Tab. 3.7: Schätzwerte für die Stabilitätsparameter Regressionskoeffizient (b) und Abweichungsvarianz (s_d^2) aus der Regressionsanalyse für die Hybridgruppen aus der Serie über 14 Umwelten getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe sowie zusammengefasst über beide N-Stufen für das Merkmal **Korn-trockenmasse** in **Experiment 1**

Parameter	Hybridgruppe†				
	H×H	L×L	K×K	H×L	L×H
NL-Stufe					
b	1,028 a‡	0,959 a	1,021 a	0,945 a	1,047 a
s_d^2	2670 a	1802 a	2764 a	2214 a	2490 a
NH-Stufe					
b	1,061 a	0,917 b	0,984 ab	0,985 ab	1,053 ab
s_d^2	4170 a	3573 a	4270 a	3052 a	3827 a
Zusammengefasst über beide N-Stufen					
b	1,088 a	0,933 c	0,975 bc	0,943 c	1,060 ab
s_d^2	3519 a	2760 a	3502 a	2583 a	3077 a

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.1.

‡ Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Zeile bezeichnen eine bei P=0,05 signifikante Mittelwertsdifferenz im Vergleich der Hybridgruppen; Duncan-Test.

In der AMMI-Analyse erklärte die erste Hauptkomponente (PCA 1) fast 22 % der Varianz der Genotyp ×Umwelt-Interaktionseffekte. Die zweite und dritte Hauptkomponente trugen nur noch zu 12 bzw. 10 % zur Beschreibung der Interaktionsvarianz bei (Daten nicht gezeigt). Im AMMI-Biplot weisen Genotypen und Umwelten, die in einer vertikalen Linie liegen gleiche Mittelwerte auf, während solche, die in einer horizontalen Linie zueinander angeordnet sind, in ihrem Interaktionsverhalten übereinstimmen. Geringe Interaktionen zeigen Genotypen bzw. Umwelten mit Werten, die auf der Hauptkomponentenachse nahe Null liegen. Hohe Interaktionen sind hingegen durch hohe PCA-Werte gekennzeichnet, unabhängig davon, ob sie ein positives oder negatives Vorzeichen führen. Genotypen und Umwelten, die ein gleichgerichtetes Vorzeichen tragen, zeigen positive Interaktionen. Im Gegensatz dazu weisen Genotypen und Umwelten mit entgegengesetztem Vorzeichen negative Interaktionen auf. In dem vorgestellten Experiment trennte die erste Hauptkomponente Genotypen und Umwelten bezüglich ihrer Reaktion auf die unterschiedliche Stickstoffversorgung (Abb. 3.4). Demzufolge interagierten die L×L-Hybriden positiv mit den NL-Umwelten, während die H×H-Hybriden mit den NH-Umwelten positive Reaktionen aufwiesen.

3.1.4 Trockenstresstoleranz

In der Serienverrechnung über jeweils zwei Jahre, Stickstoff- und Beregnungsstufen ergaben sich hochsignifikante Jahreseffekte für alle erfassten Merkmale. Der Faktor Beregnung erreichte in dieser Analyse keine Signifikanz, während der Faktor N-Stufe nur für das Merkmal Korn-trockensubstanzgehalt signifikant war. Demgegenüber waren die Interaktionen der Faktor-kombinationen Jahr×Beregnung sowie Jahr×Beregnung×N-Stufe für alle ermittelten Merkmale hochsignifikant (Daten nicht gezeigt).

Bei der getrennten Verrechnung der zwei Versuchsjahre zeigten sich im allgemeinen hoch-signifikante Effekte des Faktors Beregnung; keine Signifikanz resultierte lediglich für die die Blühmerkmale im zweiten Versuchsjahr (Tab. 3.8). Im Vergleich dazu wurden in beiden Jahren für alle ermittelten Merkmale hochsignifikante Hauptwirkungen des Faktors N-Stufe nach-gewiesen. Auch die Interaktionen zwischen den Hauptfaktoren Beregnung und N-Stufe waren in beiden Jahren für fast alle Merkmale signifikant bis hochsignifikant, während in der Serie über die Jahre keine Signifikanz erreicht wurde. Die Hybridgruppen unterschieden sich signifikant bis hochsignifikant in der Ausprägung der Ertrags- und Blühmerkmale, die Differenzierung der Kreuzungen innerhalb der Gruppen war in beiden Jahren durchgehend hochsignifikant. Für das nur im Jahr 1996 erfasste Merkmal Chlorophyllgehalt wurden keine signifikanten Gruppen-unterschiede, aber hochsignifikante Wechselwirkungen zwischen den Kreuzungen innerhalb der Hybridgruppen gefunden. Im folgenden Jahr ergaben sich hochsignifikante Differenzen zwischen den Hybridgruppen für die Stay-Green-Bonitur. Im Jahr 1996 zeigten die Hybrid-gruppen und die Kreuzungen innerhalb der Gruppen für das Merkmal Korntrockensubstanz-gehalt hochsignifikante Wechselwirkungen mit den Faktor Beregnung, während im darauf folgenden Jahr zusätzlich für den Kornertrag hochsignifikante Schätzwerte festgestellt werden konnten. In beiden Jahren waren die Interaktionseffekte des Faktors N-Stufe mit den Hybrid-gruppen und Kreuzungen innerhalb der Gruppen nur für das Merkmal Korntrockenmasse hochsignifikant.

Tab. 3.8: Mittelquadrate der zusammenfassenden Verrechnung über zwei Berechnungsstufen und zwei N-Stufen am Ort Forchheim getrennt für die Jahre 1996 und 1997 unter Berücksichtigung der Hybridgruppen für die Merkmale Korn-trockensubstanzgehalt (Korn-TS), Korntrockenmasse (Korn-TM), weibliche Blüte (Blüte ♀), Blühintervall und Chlorophyllgehalt bzw. Stay-Green-Bonitur in **Experiment 1**

Variationsursache	1996				
	Korn-TS	Korn-TM‡	Blüte ♀	Blühintervall	Chlorophyll
Berechnung (B)	12,57 **	4597,11 **	34,47 **	9,52 **	2294,34 **
N-Stufe (N)	8,09 **	464,58 **	52,73 **	13,11 **	8519,36 **
Hybridgruppe (H)	42,00 **	4,66 *	104,57 **	10,21 **	7,28
Kreuzung (K):H†	15,00 **	11,10 **	8,44 **	5,13 **	35,38 **
H×B	25,66 **	3,00 +	0,52	0,53	10,29 +
(K×B):H	2,56 **	2,38 *	0,52 +	0,52 +	5,70
H×N	0,28	5,29 **	1,29 **	0,97 *	6,63
(K×N):H	1,16 *	3,79 **	0,97 **	0,89 **	7,60 *
B×N	1,23	440,79 **	1,75 *	3,00 **	1924,18 **
H×B×N	0,36	10,92 **	0,57	0,06	16,98 **
(K×B×N):H	1,23 *	1,79	0,57 *	0,65 **	6,12
Fehler	0,71	1,41	0,37	0,37	4,76
	1997				
	Korn-TS	Korn-TM‡	Blüte ♀	Blühintervall	Stay-Green
Berechnung (B)	67,80 **	580,90 **	1,28 +	0,06	133,52 **
N-Stufe (N)	8,88 **	1023,06 **	54,21 **	8,13 **	16,36 **
Hybridgruppe (H)	11,20 **	15,98 **	67,43 **	3,53 **	3,45 **
Kreuzung (K):H	30,64 **	9,01 **	15,95 **	3,12 **	1,62 **
H×B	2,74 **	3,64 **	1,28 **	0,16	0,97 *
(K×B):H	1,97 **	3,32 **	0,80 **	0,40	0,73 **
H×N	0,76	10,80 **	1,14 *	0,27	0,32
(K×N):H	2,06 **	2,44 **	1,16 **	0,52 *	0,41
B×N	31,29 **	75,46 **	11,43 **	1,47 *	2,31 *
H×B×N	0,36	1,73	0,35	0,48	0,15
(K×B×N):H	1,27	2,45 **	0,99 **	0,71 **	0,74 **
Fehler	0,48	0,98	0,33	0,31	0,34

+, *, ** Schätzwert signifikant bei P=0,1; 0,05 bzw. 0,01.

† Der Doppelpunkt steht für „innerhalb“.

‡ Mittelquadrat × 0,001.

Die Analyse der Hybridgruppen getrennt für die Versuchsjahre, N-Stufen und Berechnungsstufen ergab für den Korntrockensubstanzgehalt, die Blühtermine der männlichen und weiblichen Infloreszenzen sowie das Blühintervall durchweg signifikante bis hochsignifikante Unterschiede innerhalb und zwischen den Hybridgruppen. Davon abweichend zeigten die Hybridgruppen auf der unberechneten NL-Stufe im Jahr 1996 keine signifikanten Unterschiede für das Merkmal Korntrockenmasse. Zudem waren auch die Gruppenunterschiede für den Chlorophyllgehalt sowohl auf der berechneten NL-Stufe als auch auf der unberechneten NH-Stufe nicht signifikant, während für die Stay-Green-Bonituren auf allen Varianten signifikante bis hochsignifikante Unterschiede beobachtet werden konnten (Daten nicht gezeigt).

Bei niedriger N-Versorgung war die Korrelation zwischen der Korntrockenmasse und dem Chlorophyllgehalt auf der berechneten Stufe schwach positiv ($r_{\text{phän}} = 0,35$; $P=0,01$) und auf der unberechneten Stufe nicht signifikant. Die Beziehungen zwischen der Korntrockenmasse und dem Blühintervall waren im Jahr 1996 auf beiden Berechnungsstufen schwach negativ ($r_{\text{phän}} = -0,35$; $P=0,05$), während im darauf folgenden Jahr keine Signifikanz erreicht wurde. Die Stay-Green-Bonitur korrelierte schwach positiv mit dem Korntrockensubstanzgehalt und lag für die einzelnen Varianten zwischen $r_{\text{phän}} = 0,33$ und $r_{\text{phän}} = 0,45$ ($P=0,05$ bzw. $0,01$), auf der berechneten NL-Stufe wurde jedoch keine Signifikanz erreicht. Zur Korntrockenmasse zeigte die Stay-Green-Bonitur in keiner der geprüften Varianten eine signifikante Beziehung (Daten nicht gezeigt).

In beiden Versuchsjahren wurde auf der NL-Stufe zwischen den Korntrockenmassen der unberechneten und berechneten Variante eine mittlere Korrelation beobachtet (Abb. 3.5). Auf der berechneten NL-Stufe zeigten die L×L- Hybriden in der Tendenz höhere Leistungen als die H×H-Hybriden, im Mittel unterschieden sich diese Gruppen jedoch nicht signifikant. Zwischen den L×L- und H×H-Hybriden waren dagegen auf der unberechneten NL-Stufe keine bedeutenden Unterschiede erkennbar. Die durch Trockenheit auf dieser N-Stufe verstärkten Stressbedingungen bewirkten, dass einzelne H×H-Hybriden im Vergleich zu den L×L-Hybriden höhere Ertragsleistungen erzielten. Auch die Standards 4 (N-effizient) und 2 (nicht N-effizient) zeigten unter zusätzlichem Trockenstress auf der NL-Stufe eine Umkehrung ihres Leistungsverhältnisses. Im ersten Versuchsjahr (1996) wiesen die Korntrockenmassen der berechneten und unberechneten NH-Stufe eine moderate Korrelation auf ($r_{\text{phän}} = 0,49$; $P=0,01$), im darauf folgenden Jahr war diese Beziehung etwas loser ($r_{\text{phän}} = 0,35$; $P=0,05$).

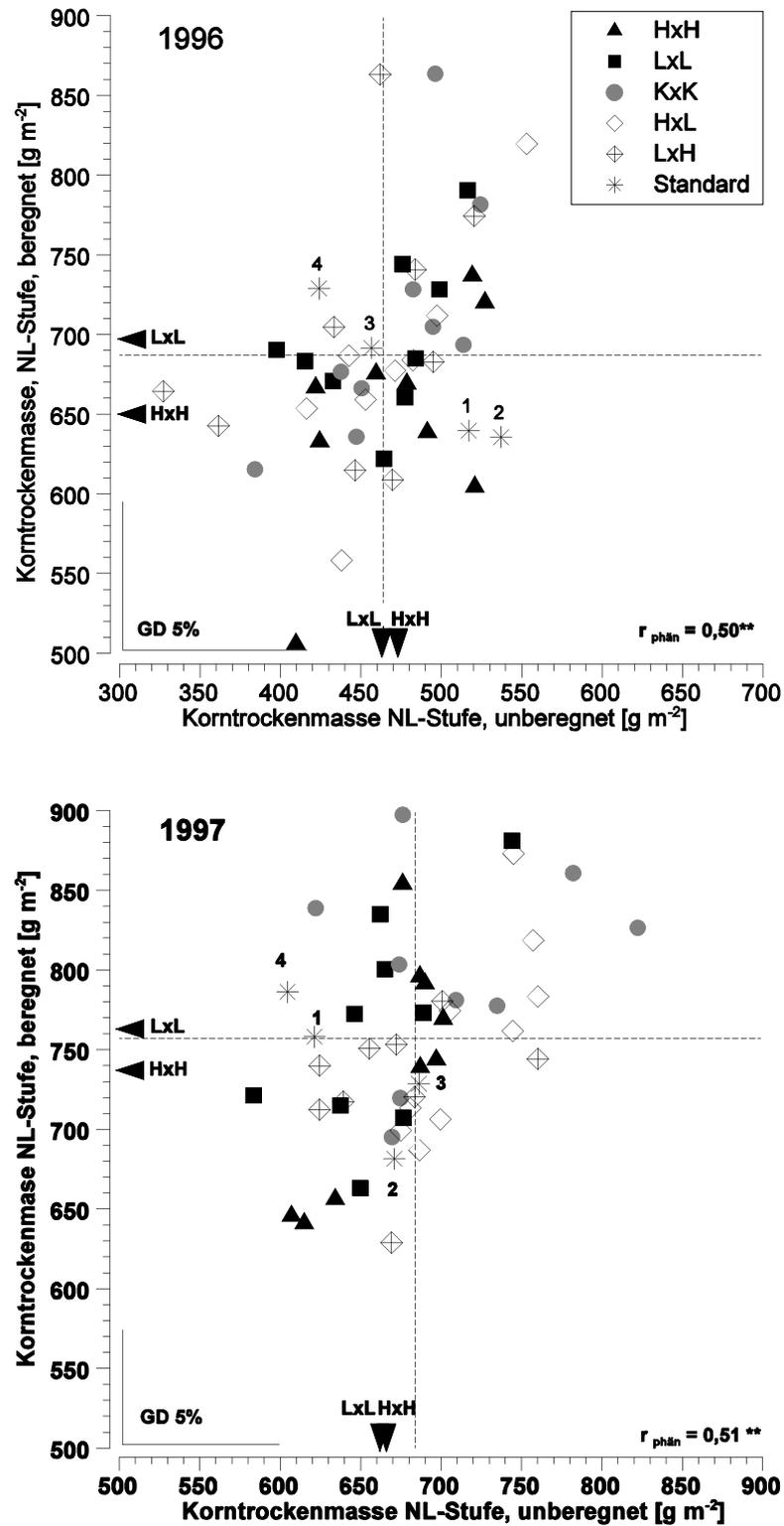


Abb. 3.5: Beziehung zwischen der berechneten und unberechneten Variante auf der niedrigen N-Stufe (NL) am Standort Forchheim in den Jahren 1996 (oben) und 1997 (unten) für Korntrockenmasse in **Experiment 1**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation, ** signifikant bei $P=0,01$. GD 5% Grenzdifferenz bei $P=0,05$).

Der Trockenstress bewirkte im Versuchsjahr 1996 auf beiden N-Stufen für alle Hybridgruppen höhere Ertragsverluste als im darauf folgenden Jahr. Die Unterschiede zwischen den Beregnungsstufen waren jedoch auch im zweiten Jahr signifikant. In beiden Jahren zeigten sich auf der NL-Stufe die L×L- und K×K-Hybriden stärker vom Trockenstress beeinflusst als die H×H-Hybriden. Auf der NH-Stufe wirkte sich im Jahr 1996 der Trockenstress am geringsten auf die K×K-Hybriden und am stärksten auf die H×H-Hybriden aus. Im darauf folgenden Jahr unterschieden sich die Hybridgruppen auf dieser N-Stufe nicht signifikant (Tab. 3.9).

Die Blüte der weiblichen Infloreszenzen wurde durch den Trockenstress im Jahr 1996 auf beiden N-Stufen verzögert, jedoch waren die Unterschiede zwischen den Beregnungsstufen nur auf der NL-Stufe für alle Hybridgruppen durchweg signifikant. Auf der NH-Stufe wurden die H×H-Hybriden in ihrem Blühverhalten stärker durch den Trockenstress beeinflusst als die L×L- bzw. K×K-Hybriden, während sich im Vergleich dazu auf der NL-Stufe diese Gruppen im Mittel nur gering unterschieden. Im darauffolgenden Jahr (1997) bewirkte der Trockenstress bei den H×H-Hybriden auf der NL-Stufe eine frühere, bei den L×L-Hybriden auf der NH-Stufe hingegen eine verzögerte weibliche Blüte. Die im Jahr 1996 auf der niedrigen N-Stufe durch Trockenstress verzögerte weibliche Blüte war nicht mit einem einheitlichem Reifeverhalten verbunden. Im nächsten Jahr (1997) bewirkte die mangelnde Beregnung auf der NL-Stufe durchweg eine frühere Blüte, die für alle Hybridgruppen mit geringeren Trockensubstanzgehalten und somit einer späteren Reife einherging. Auf der NH-Stufe zeigte sich keine einheitliche Tendenz.

Die trockenstressbedingten Differenzen für die Merkmale Korntrockenmasse und weibliche Blüte korrelierten auf der NL-Stufe im Jahr 1997 gering ($r_{\text{phän}} = +0,3$; $P=0,05$) und im Vorjahr nicht signifikant. Auch auf der NH-Stufe erreichte diese Beziehung ein ähnlich geringes Niveau, wies aber in den beiden Versuchsjahren ein entgegengesetztes Vorzeichen auf. Die Korrelation der Effekte des Trockenstresses der Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt war auf der NL-Stufe nur im Jahr 1997 signifikant und lose ($r_{\text{phän}} = +0,3$; $P= 0,05$). Auf der NH-Stufe wurden ähnlich geringe Korrelationskoeffizienten nachgewiesen, die jedoch in den beiden Versuchsjahren ein entgegengesetztes Vorzeichen trugen (Daten nicht gezeigt).

Tab. 3.9: Effekte des Trockenstresses unter Berücksichtigung der Hybridgruppen am Ort Forchheim auf der niedrigen (NL) und der hohen (NH) N-Stufe in den Jahren 1996 und 1997 für die Merkmale Korntrockenmasse (Korn-TM), weibliche Blüte (♀ Blüte) und Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) in **Experiment 1**

Hybridgruppe†	NL-Stufe		NH-Stufe	
	1996	1997	1996	1997
----- Korn-TM [g m ⁻²] ‡ -----				
H×H	-177 (73,1)**	-71 (90,8)**	-493 (47,0)**	-142 (86,0)**
L×L	-235 (66,5)**	-102 (87,1)**	-394 (54,6)**	-164 (82,3)**
K×K	-237 (66,7)**	-93 (88,8)**	-372 (57,5)**	-156 (84,5)**
H×L	-212 (69,1)**	-40 (95,0)**	-416 (51,4)**	-124 (86,8)**
L×H	-255 (63,9)**	-58 (92,3)**	-444 (51,9)**	-187 (80,7)**
Mittel	-223 (67,9)	-73 (90,8)	-424 (52,5)	-155 (84,1)
<i>GD 5%</i>	<i>-56 (6,3)</i>	<i>-54 (6,5)</i>	<i>-67 (6,8)</i>	<i>-87 (8,4)</i>
----- ♀ Blüte [d]§ -----				
H×H	-1,27**	+1,13**	-1,18**	-0,34ns
L×L	-1,26**	+0,35ns	-0,42ns	-1,05**
K×K	-1,16**	+0,32ns	-0,48+	-0,52*
H×L	-0,92**	+0,73*	-0,19ns	0,00ns
L×H	-0,81**	+0,84**	-1,16**	+0,23ns
Mittel	-1,09	+0,67	-0,77	-0,34
<i>GD 5%</i>	<i>0,94</i>	<i>0,98</i>	<i>1,05</i>	<i>1,52</i>
----- Korn-TS [%]§ -----				
H×H	+0,54ns	+1,90**	+0,94*	-0,45ns
L×L	-1,39**	+2,33**	-1,12*	+0,66+
K×K	-2,45**	+1,29**	-2,59**	-0,21ns
H×L	-1,80**	+2,43**	-0,82+	+1,01**
L×H	+1,57**	+2,35**	+1,74**	+0,97**
Mittel	-0,70	+2,06	-0,37	+0,39
<i>GD 5%</i>	<i>2,07</i>	<i>1,42</i>	<i>1,62</i>	<i>1,96</i>

+, *, ** Differenz zwischen beregneter und unberegneter Variante signifikant von Null verschieden bei P=0,1; 0,05; bzw. 0,01.

ns Nicht signifikant.

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.1.

‡ Differenz zwischen unberegneter und beregneter Variante absolut, relativ in Klammern.

§ Differenz zwischen beregneter und unberegneter Variante, absolut.

3.1.5 Kombinationsfähigkeit und Heterosiszuwachs

Auf beiden N-Stufen zeigten sich für die Korntrockenmasse in den fünf Hybridgruppen, bis auf wenige Ausnahmen, signifikante Schätzwerte für die allgemeine (GCA) und die spezifische (SCA) Kombinationsfähigkeit (Tab. 3.10). Für die H×H-Hybriden überwog auf der NL-Stufe die SCA-Varianz, während auf der NH-Stufe die GCA-Varianz der Flint-Linien von größter Bedeutung war. Demgegenüber stellte für die L×L-Hybriden auf der NL-Stufe die GCA-Varianz der Dent-Linien die größte Varianzkomponente dar, auf der NH-Stufe erreichten die GCA-Varianzen der Flint- und Dent-Linien ähnliche Größen.

Tab. 3.10: Schätzwerte für die Varianz der Allgemeinen (GCA) und Spezifischen (SCA) Kombinationsfähigkeitseffekte für die fünf Hybridgruppen (H×H, L×L, H×L, L×H, K×K) auf der niedrigen (NL) und hohen (NH) N-Stufe sowie zusammengefügt über die N-Stufen für das Merkmal **Korntrockenmasse** aus der Serie über je 14 Umwelten in **Experiment 1**

Variationsursache	Hybridgruppe†					Gepoolt
	H×H	L×L	H×L	L×H	K×K	
----- NL-Stufe -----						
GCA-Dent	474**	1085**	123+	1004**	27	542**
GCA-Flint	95	518**	477**	166+	563**	364**
SCA	632**	123+	340*	129	-	237**
----- NH-Stufe -----						
GCA-Dent	248	1085**	310+	398*	338**	476**
GCA-Flint	1327**	1127**	309**	1065**	6228**	2011**
SCA	-	-	223+	115	104	69
----- Serie über N-Stufen -----						
GCA-Dent(D)	408**	1089**	159+	684**	87*	486**
GCA-Flint(F)	501**	776**	240**	502**	2694**	943**
SCA	284**	-	47	22	-	56+
GCA-D×N-Stufe	-	-	-	33	190*	19
GCA-F×N-Stufe	419**	92+	66	226**	1405**	442**
SCA×N-Stufe	33	122	169	200+	144	133*

+, *, ** Schätzwert signifikant bei P=0,1; 0,05 bzw. 0,01.

- Negativer Schätzwert.

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.1.

Die Serienanalyse über die N-Stufen ergab signifikante Schätzwerte für die GCA-Varianzen der Flint- und Dent-Linien, die bei den einzelnen Hybridgruppen in unterschiedlichem Ausmaß zur Variation beitrugen. Hochsignifikante Schätzwerte für die SCA-Varianz wurden nur in der H×H-Gruppe gefunden. Die Interaktionen zwischen den GCA-Varianzen der Flint-Linien und der N-Stufen waren nur für die Hybriden des Typs H×H, L×H und K×K hochsignifikant. Dagegen erreichten die Wechselwirkungen zwischen den GCA-Effekten der Dent-Linien und der N-Stufen nur für die K×K-Hybriden Signifikanz (Tab. 3.10). Gepoolt über alle Hybridgruppen hatte auf der NL-Stufe die GCA der Dent-Linien, auf der NH-Stufe jedoch die GCA der Flint-Linien eine höhere Bedeutung. Auch in der Serie über die N-Stufen stellte die GCA der Flint-Linien die größte Varianzkomponente dar und interagierte zudem mit den N-Stufen (Tab. 3.10).

Im Merkmal Korntrockensubstanzgehalt ergaben sich auf den beiden N-Stufen für die fünf Hybridgruppen unterschiedliche Größen für die GCA-Varianzen der Flint- und Dent-Linien. Signifikante SCA-Varianzen erklärten nur geringe Anteile an der Variation. Über die N-Stufen hinweg hatten die GCA-Varianzen der Flint- bzw. Dent-Linien in allen Fällen die größte Bedeutung, sie wiesen jedoch bei den einzelnen Hybridgruppen sehr unterschiedliche Relationen zueinander auf (Daten nicht gezeigt).

Die GCA-Effekte einzelner Linien stimmten, bis auf wenige Ausnahmen, bezüglich ihrer Vorzeichen auf der NL- und der NH-Stufe überein (Tab. 3.11a). Die Linien innerhalb einer Selektionsgruppe (H- oder L-Dent, H- oder L-Flint) ließen keine einheitliche Richtung der GCA-Effekte erkennen. Durchweg positive Effekte auf das Merkmal Korntrockenmasse übten Kreuzungen mit den Linien HD2 und LD1 aus, die sich über alle Flintlinien und N-Stufen hinweg beobachten ließen. Auf der Flintseite ergaben sich für Kreuzungen mit den Linien LF1 und HF3 durchgehend positive GCA-Effekte, dabei erreichte HF3 auf der NH-Stufe deutlich höhere Werte als auf der NL-Stufe. Durchweg negative Effekte wurden für die Dent-Linien HD1, HD3, LD2 und LD3 sowie die Flint-Linien HF1 und LF2 auf beiden N-Stufen festgestellt. Mit Ausnahme der Linien HD1 und LD3 wiesen die Dent-Linien auf beiden N-Stufen überwiegend negative GCA-Effekte für das Merkmal Korntrockensubstanzgehalt auf. Auf der Flintseite bewirkten Kreuzungen mit den Linien HF2 und LF2 für dieses Merkmal positive, solche mit den Linien HF1, HF3 und LF2 negative GCA-Effekte. Nur für Kombinationen mit der Linie HF2 wurden auf der NL-Stufe gleichzeitig positive Effekte für die Korntrockenmasse und den Trockensubstanzgehalt nachgewiesen. Kreuzungen mit den Linien HD3, LD2, und HF1 erreichten hingegen für diese Merkmale auf beiden N-Stufen negative GCA-Effekte. Ansonsten wiesen alle anderen Linien, die für die Korntrockenmasse positive GCA-Effekte zeigten, negative Werte für das Merkmal Korntrockensubstanzgehalt auf und umgekehrt.

Tab. 3.11a: Schätzwerte für die Effekte der allgemeinen Kombinationsfähigkeit (GCA) in den Hybridgruppen (**H×H, H×L, L×H und L×L**) getrennt für die niedrige (NL) und hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt aus der Serie über 14 Umwelten in **Experiment 1**

	Korntrockenmasse				Korntrockensubstanzgehalt			
	NL-Stufe		NH-Stufe		NL-Stufe		NH-Stufe	
	HF1-3‡	LF1-3	HF1-3	LF1-3	HF1-3	LF1-3	HF1-3	LF1-3
HD1†	-19,7	-13,5	-9,5	-19,7	1,33	1,24	1,27	0,52
HD2	25,5	14,8	24,4	22,3	-0,45	-0,25	-0,44	-0,16
HD3	-5,9	-1,2	-14,9	-2,6	-0,88	-0,99	-0,84	-0,36
LD1	37,6	36,6	22,8	40,7	-0,36	-0,78	-0,83	-1,11
LD2	-23,7	-30,3	-22,6	-21,7	-1,74	-2,04	-1,63	-1,61
LD3	-14,0	-6,3	-0,2	-19,0	2,10	2,82	2,46	2,72
	HD1-3	LD1-3	HD1-3	LD1-3	HD1-3	LD1-3	HD1-3	LD1-3
HF1	-15,6	-17,6	-19,8	-36,2	-1,44	-1,16	-0,78	-0,80
HF2	4,0	11,5	-23,8	3,7	2,25	2,55	1,40	1,80
HF3	11,6	6,2	43,5	32,5	-0,81	-1,39	-0,62	-1,00
LF1	26,5	27,0	18,5	38,6	-2,06	-2,13	-1,56	-1,40
LF2	-9,9	-9,9	-19,8	-29,1	2,06	2,37	1,46	1,63
LF3	-16,6	-17,2	1,3	-9,5	0,00	-0,24	0,11	-0,23

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.1.

‡ H, L=Linienselektion erfolgte auf der hohen (H) bzw. niedrigen (N) N-Stufe des Flint(F)- bzw. Dent(D)-Genpools.

Auf beiden N-Stufen zeigten die Kombinationslinien KD1, KF1 und KF2 für das Merkmal Korntrockenmasse negative GCA-Effekte, während nur für die Linie KF3 positive Effekte beobachtet wurden (Tab. 3.11b). Alle drei K-Flint-Linien erreichten unabhängig von ihrem Vorzeichen deutlich höhere GCA-Werte als die K-Dent-Linien, zudem waren diese auf der NH-Stufe nochmals höher als auf der NL-Stufe. Die Linie KF3 wies für das Merkmal Korntrockensubstanzgehalt die höchsten GCA-Effekte auf, sie trugen ein negatives Vorzeichen und waren auf der NL-Stufe deutlich höher als auf der NH-Stufe. Auf beiden N-Stufen wurden für die Linien KD1, KD3, KF1 und KF2 durchgehend positive und für die Linie KD2 negative GCA-Effekte beobachtet. Auch bei den Kombinationslinien wurde, mit Ausnahme der Linien KD2 und KD3 beobachtet, dass die GCA-Effekte für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt entgegengesetzte Vorzeichen aufwiesen.

Tab. 3.11b: Schätzwerte für die Effekte der allgemeinen Kombinationsfähigkeit (GCA) in den **K×K-Hybriden** getrennt für die niedrige (NL) und hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt aus der Serie über 14 Umwelten in **Experiment 1**

	Korntrockenmasse		Korntrockensubstanzgehalt	
	NL-Stufe	NH-Stufe	NL-Stufe	NH-Stufe
	KF1-3‡	KF1-3	KF1-3	KF1-3
KD1†	-6,7	-17,1	0,19	0,32
KD2	10,1	-4,8	-0,41	-0,39
KD3	-3,3	21,9	0,22	0,06
	KD1-3	KD1-3	KD1-3	KD1-3
KF1	-18,2	-58,8	1,51	0,78
KF2	-11,4	-32,6	0,83	0,83
KF3	29,6	91,4	-2,34	-1,62

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.1.

‡ K=Kombinationslinien des Flint(F)-bzw. Dent(D)-Genpools, Selektion erfolgte aufgrund einer überlegenen Leistung auf beiden N-Stufen.

Im Durchschnitt führte die Kombination von Elternlinien mit unterschiedlicher N-Effizienz zu keinem signifikant erhöhten Heterosiszuwachs für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt, d.h. das Mittel der H×L- und L×H-Hybriden übertraf nicht das Mittel der H×H- und L×L-Hybriden (Tab. 3.12). Schwach signifikant positive Werte für den Heterosiszuwachs konnten nur in einem Vergleich auf der NL-Stufe für das Merkmal Korntrockensubstanzgehalt ermittelt werden. Signifikanz wurde für negative Heterosisabweichungen in drei Fällen nachgewiesen; für einen Vergleich auf der NH-Stufe im Merkmal Korntrockenmasse und für einen weiteren Vergleich, der auf der NL-Stufe für die Korntrockenmasse und gleichzeitig auf der NH-Stufe für den Korntrockensubstanzgehalt negative Werte erreichte.

Tab. 3.14: Umweltmittelwerte auf der niedrigen (NL) und der hohen (NH) N-Stufe für das Merkmal Korntrockenmasse getrennt für Kern-, Rand- bzw. 4-reihige (4R) Parzelle in **Experiment 2**

Umwelt†	NL-Stufe				NH-Stufe			
	Kern	Rand	4R	GD5%	Kern	Rand	4R	GD5%
HOH	933	950	945	7	1035	1022	1026	10
FOR	684	696	694	11	794	797	795	11
FORB	757	777	770	7	949	932	937	9
EWE	456	483	475	12	725	641	667	12
Mittel	708	727	721	5	876	848	856	34

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.2.

Für das Merkmal Korntrockenmasse lagen die Heritabilitätsschätzwerte der Parzellentypen Kern, Rand und 4R auf der NL-Stufe bei 0,77; 0,72 bzw. 0,77 und auf der NH-Stufe geringfügig höher (0,82; 0,81 bzw. 0,83). Der Parzellentyp hatte keine bedeutenden Auswirkungen auf die Ausprägung der Heritabilitätsschätzwerte der zusätzlich erfassten Merkmale Korntrockensubstanzgehalt und Wuchshöhe (Daten nicht gezeigt). Für die Wiederholbarkeiten des Merkmals Korntrockenmasse ergab sich hinsichtlich des Parzellentyps kein einheitliches Bild (Tab. 7.4). Unabhängig von der N-Stufe erreichten die vierreihigen Parzellen in allen Umwelten die geringsten Schätzwerte für den Variationskoeffizienten des Fehlers. In Forchheim und Hohenheim waren auf beiden N-Stufen die Wiederholbarkeiten und die Variationskoeffizienten des Fehlers für das Merkmal Wuchshöhe annähernd gleich. Davon abweichend erreichten in Eckartsweier die Wiederholbarkeiten auf der NL-Stufe geringere Werte, die Variationskoeffizienten des Fehlers dagegen höhere Werte als auf der NH-Stufe.

Die Hybridgruppen unterschieden sich in ihren Reaktionen auf den Parzellentyp auf der NL-Stufe deutlicher als auf der NH-Stufe (Tab. 3.15). Die Randparzellen der H×H-, L×L- und L×H-Hybriden erreichten auf der NL-Stufe im Mittel signifikant höhere Korntrockenmassen als die Kernparzellen. Lediglich die H×H-Hybriden zeigten zusätzlich signifikante Unterschiede zwischen den Kern- und den vierreihigen Parzellen. Die Leistung der K×K- und H×L-Hybriden war auf der NL-Stufe von dem Parzellentyp nicht beeinflusst. Auf der NH-Stufe wurden für die Kernparzellen höhere Erträge als für die Randparzellen ermittelt, diese Differenz war jedoch nur für die L×L- und K×K-Hybriden signifikant. Die K×K-Hybriden zeigten zudem signifikante Unterschiede zwischen Kern- und vierreihigen Parzellen. Für die H×H-Hybriden konnten im Vergleich zu den L×L-Hybriden auf der NL-Stufe höhere und auf der NH-Stufe geringere Effekte bezüglich des Parzellentyps beobachtet werden. Auf beiden N-Stufen wurden für die

H×H-Hybriden höhere Wuchshöhen als für die L×L- bzw. K×K-Hybriden gemessen. Die einzelnen Kreuzungen innerhalb der verschiedenen Hybridgruppen zeigten aber sehr unterschiedliche Reaktionen auf die verschiedenen Parzellentypen (Abb. 3.6a,b).

Tab. 3.15: Effekte des Parzellentyps (relativ zur Kernparzelle) unter Berücksichtigung der Hybridgruppen aus der Serie über vier Umwelten getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für das Merkmal Korntrockenmasse in **Experiment 2**

Hybrid- gruppe†	NL-Stufe		NH-Stufe	
	Rand vs. Kern‡ [%]	4R vs. Kern [%]	Rand vs. Kern [%]	4R vs. Kern [%]
H×H	106,4 *	104,3 *	97,9	98,7
L×L	103,0 *	102,1	95,8 *	97,4
K×K	100,9	100,8	94,8 *	96,3 *
H×L	100,5	100,6	95,8	97,1
L×H	105,9 *	103,8	98,0	98,6

* Differenz zwischen Kernparzelle und Rand- bzw. 4R-Parzelle signifikant bei Grenzdifferenz 5%.

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.1.

‡ Rand = zweireihige Randparzelle, Kern = zweireihige Kernparzelle, 4R = vierreihige Parzelle.

Die Korntrockenmassen der verschiedenen Parzellentypen zeigten auf beiden N-Stufen sehr enge Beziehungen zueinander, die sich auch in sehr hohen Rangkorrelationen widerspiegeln ($r = 0,95-0,99$; $P=0,01$). Die phänotypische Korrelation zwischen der Wuchshöhe und der Differenz zwischen den Korntrockenmassen der Kern- und Randparzelle, war auf beiden N-Stufen mittelstraff und negativ (Tab. 3.16). Der Einfluss der Wuchshöhe auf die Korntrockenmassen der Kern- und Randparzellen auf den beiden N-Stufen ist in Abb. 3.7 explizit für die Hybriden des Typs H×H, L×L und K×K dargestellt. Die Beziehungen zwischen Konkurrenzeffekten und Blühterminen der männlichen und weiblichen Infloreszenzen waren auf beiden N-Stufen negativ, es ergaben sich jedoch auf der NH-Stufe engere Korrelationen als auf der NL-Stufe. Mit dem Korntrockensubstanzgehalt zeigten die Konkurrenzeffekte keine signifikante Beziehung. Auf der NL-Stufe bestand eine moderate negative Beziehung zwischen Konkurrenzeffekten und Jugendentwicklung.

NL-Stufe

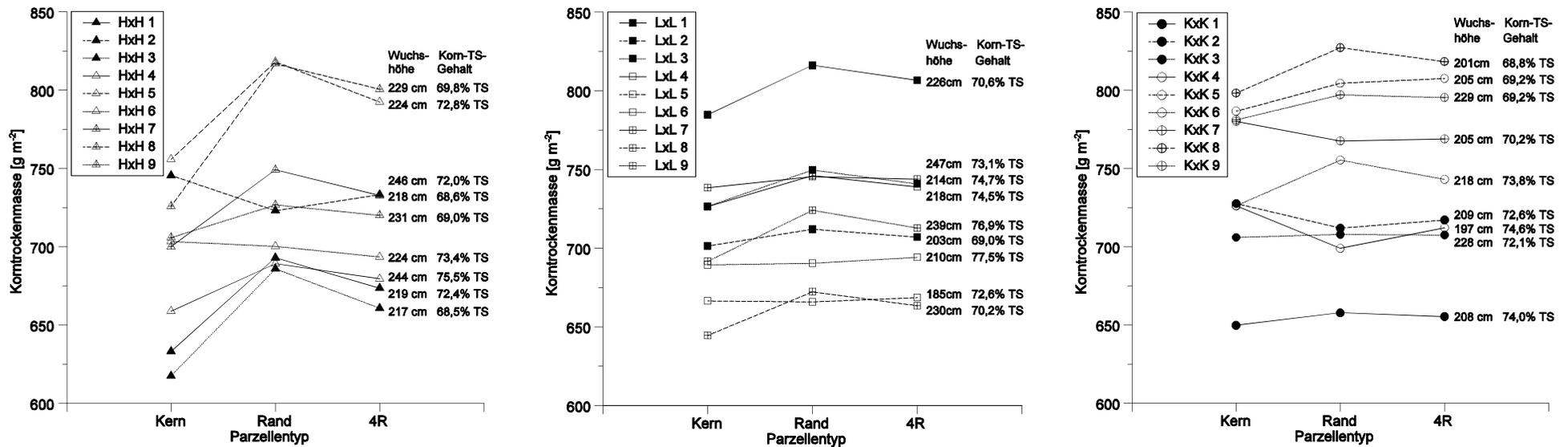


Abb. 3.6a: Korntrockenmasse in Abhängigkeit von dem Parzellentyp auf der niedrigen (NL) N-Stufe für die Hybriden des Typs H×H (links), L×L (Mitte) und K×K (rechts) in **Experiment 2**. (Kern = zweireihige Kernparzelle, Rand = die beiden Randreihen, 4R = vierreihige Parzelle (Kern + Rand)).

NH-Stufe

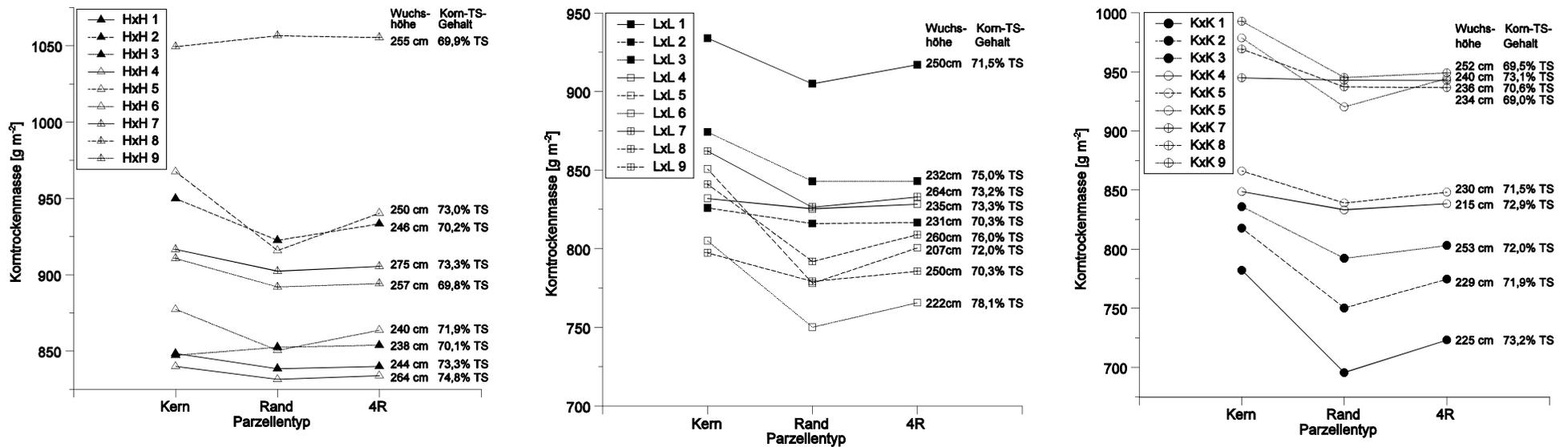


Abb. 3.6b: Korntrockenmasse in Abhängigkeit von dem Parzellentyp auf der hohen (NH) N-Stufe für die Hybriden des Typs H×H (links), L×L (Mitte) und K×K (rechts) in **Experiment 2**. (Kern = zweireihige Kernparzelle, Rand = die beiden Randreihen, 4R = vierreihige Parzelle (Kern + Rand)).

Tab. 3.16: Geschätzte Koeffizienten der phänotypischen Korrelationen getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe aus der Serie über vier Umwelten in **Experiment 2**

Korrelierte Merkmale†	NL-Stufe	NH-Stufe
Korn-TM Kern‡ / Rand‡	0,83**	0,90**
Korn-TM Kern / 4R‡	0,92**	0,96**
Korn-TM Rand / 4R	0,98**	0,99**
Δ Korn-TM / Korn-TS§	0,03	0,12
Δ Korn-TM / Wuchshöhe§	-0,55**	-0,48**
Δ Korn-TM / Blüte ♂§	-0,24	-0,47**
Δ Korn-TM / Blüte ♀§	-0,32*	-0,45**
Δ Korn-TM / Blühintervall§	-0,29	0,06
Δ Korn-TM / Kolben/Pflanze§	0,39**	0,09
Δ Korn-TM / Jugendentwicklung§	-0,51**	-0,17

*, ** Schätzwert signifikant bei P= 0,01 bzw. 0,05.

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

‡ Rand = zweireihige Randparzelle, Kern = zweireihige Kernparzelle, 4R = vierreihige Parzelle.

Δ Korn-TM = Differenz zwischen den Korntrockenmassen der Kern- und Randparzellen (Kern - Rand).

§ Merkmal an der Kernparzelle erfasst.

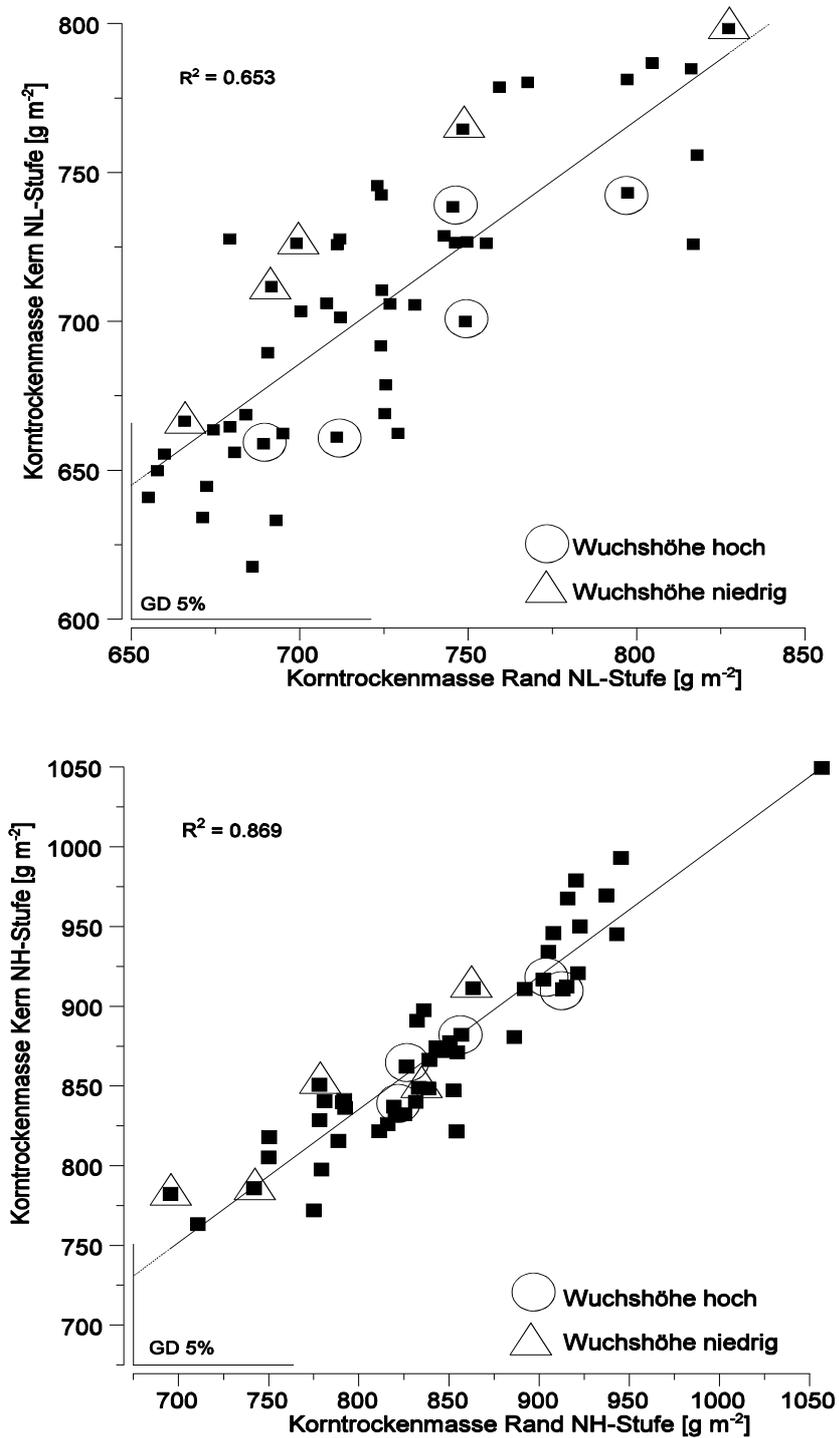


Abb. 3.7: Beziehungen zwischen der Korntrockenmasse der zweireihigen Kernparzellen und der zweireihigen Randparzellen auf der niedrigen (NL), oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, in **Experiment 2**. (Δ , \circ kennzeichnen die fünf Hybriden mit den niedrigsten bzw. höchsten Werten für das Merkmal Wuchshöhe).

3.3 Experiment 3: Komponenten der Stickstoffeffizienz

3.3.1 Variationsmaße

Auf der NL-Stufe zeigten die Hybridgruppen und auch die Kreuzungen innerhalb der Gruppen für die meisten Merkmale eine signifikante Differenzierung (Tab. 3.17). Eine Ausnahme stellten dabei die Merkmale N-Aufnahme, N-Aufnahme zur Blüte und Korntrockenmasse dar, und für den Chlorophyllgehalt wurde nur eine hochsignifikante Variabilität der Kreuzungen innerhalb der Gruppen festgestellt. Auf der NL-Stufe wurden fast durchgehend signifikante bis hochsignifikante Wechselwirkungen zwischen den Orten und den Hybridgruppen bzw. Kreuzungen innerhalb der Gruppen beobachtet. Dagegen wurden auf der NH-Stufe für alle erfassten N-Effizienzmerkmale signifikante Unterschiede sowohl zwischen als auch innerhalb der Hybridgruppen nachgewiesen. Davon abweichend zeigten die Merkmale N-Remobilisierung, N-Aufnahme zur Blüte und Trockenmassezuwachs nach Blüte auf der NH-Stufe keine Signifikanz für die Wechselwirkungen zwischen Orten und Hybridgruppen bzw. Kreuzungen innerhalb der Gruppen. Die Ertragsmerkmale der Fraktionen Gesamtpflanze zur Körnerreife, Restpflanze und Korn wiesen auf beiden N-Stufen, mit wenigen Abweichungen, signifikante Effekte zwischen und innerhalb der Hybridgruppen auf. Auch für die Interaktionen mit den Orten wurde häufig Signifikanz erreicht. Dagegen lagen für die Ertragsmerkmale der Gesamtpflanze zur Blüte oft keine signifikanten Effekte vor (Tab. 7.5).

In der Serienverrechnung über die N-Stufen ergaben sich signifikante bis hochsignifikante Interaktionen der Hybridgruppen bzw. Kreuzungen innerhalb der Gruppen mit den N-Stufen für die Merkmale N-Verwertung und Harvest-Index. Die Wechselwirkungen zwischen den Faktorkombinationen N-Stufe, Ort und Hybridgruppe bzw. Kreuzungen innerhalb Gruppen waren zusätzlich für die Merkmale N-Harvest-Index, N-Assimilation und Chlorophyllgehalt signifikant bis hochsignifikant (Tab. 3.18).

In der zusammenfassenden Verrechnung über die N-Stufen wurden für die Ertragsmerkmale der Pflanzenfraktion Korn signifikante bis hochsignifikante Interaktionen zwischen den N-Stufen und den Hybridgruppen bzw. Kreuzungen innerhalb der Gruppen gefunden (Tab. 7.6). Auch die Dreifachinteraktion N-Stufe×Ort×Hybridgruppe bzw. Kreuzung innerhalb der Gruppe erreichte Signifikanz. Die Ertragsmerkmale der Fraktionen Restpflanze und Gesamtpflanze zur Körnerreife zeigten überwiegend keine signifikanten Wechselwirkungen mit diesen Faktoren, und auch die Fraktion Gesamtpflanze zur Blüte erreichte nur in wenigen Fällen Signifikanz.

Tab. 3.17: Mittelquadrate der zusammenfassenden Verrechnung über drei Orte getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe unter Berücksichtigung der Hybridgruppen für die N-Effizienzmerkmale, Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) und Korntrockenmasse (Korn-TM) in **Experiment 3**

Merkmal†	Variationsursache				
	Hybrid- gruppe (H)	Kreuzung (K):H‡	H×Ort (O)	(K×O):H	Fehler
----- NL-Stufe -----					
N-Aufnahme	3,89	1,27	1,53**	0,96**	0,45
N-Verwertung	487,16**	39,64**	40,12**	6,48**	2,62
N-Remobilisierung	5,79**	1,51**	0,82+	0,82**	0,42
Harvest-Index	281,69**	23,47**	26,27**	5,13**	2,27
N-Harvest-Index	265,88**	17,04**	36,81**	6,31**	2,67
N-Assimilation	193,14**	41,47**	21,06**	15,63**	6,69
N-Aufn. z. Blüte	5,49	1,89	2,37**	1,76**	0,67
Sink¶	69,44**	12,68**	2,85	5,31**	3,00
TM-Zuw. n. Blüte¶	44,58+	16,32	12,73+	12,42**	6,58
Chlorophyll	19,56	12,41**	10,90**	5,33**	1,68
Korn-TS	90,83**	26,15**	3,38**	2,11**	0,43
Korn-TM§	170,09	43,45	81,70**	31,91**	17,71
----- NH-Stufe -----					
N-Aufnahme	28,53**	6,26**	3,86**	2,59**	1,36
N-Verwertung	39,85*	21,63**	7,06**	3,98**	1,93
N-Remobilisierung	8,41+	3,48**	2,75	1,90	1,85
Harvest-Index	43,15+	14,99**	11,44**	4,84**	1,65
N-Harvest-Index	55,20**	16,47**	7,48**	5,37**	2,40
N-Assimilation	47,47**	31,25**	9,56+	8,03*	4,98
N-Aufn. z. Blüte	19,76*	5,06*	3,93	3,17	2,64
Sink¶	90,99**	20,87**	11,58+	7,84	6,01
TM-Zuw. n. Blüte¶	156,94**	29,92**	11,39	11,86	10,85
Chlorophyll	24,14**	10,89**	1,50	4,25**	2,12
Korn-TS	28,57**	14,12**	3,12**	1,59**	0,32
Korn-TM§	146,21	136,70**	79,71**	40,54**	21,46

+, *, ** Schätzwert signifikant bei P=0,1; 0,05 bzw. 0,01. † Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

‡ Der Doppelpunkt steht für "innerhalb". § Mittelquadrat × 0,01. ¶ Mittelquadrat × 0,001.

Tab. 3.18: Mittelquadrate der zusammenfassenden Verrechnung über drei Orte getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe unter Berücksichtigung der Hybridgruppen für die N-Effizienzmerkmale, Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) und Korntrockenmasse (Korn-TM) in **Experiment 3**

Merkmal†	Variationsursache								Fehler
	Hybrid- gruppe (H)	Kreuzung (K):H‡	H×Ort (O)	(K×O):H	H×N-Stufe (N)	(K×N):H	H×O×N	(K×O×N):H	
N-Aufnahme	24,70*	5,18**	4,12**	1,85**	7,71*	2,35	1,27	1,70**	0,90
N-Verwertung	400,50**	47,44**	35,16**	5,09**	126,51**	13,83**	12,03**	5,37**	2,27
N-Remobilisierung	11,54**	3,11**	1,38	1,44+	2,65	1,88+	2,18+	1,27	1,14
Harvest-Index	268,19**	31,90**	26,81**	6,41**	56,65*	6,56*	10,90**	3,56**	1,96
N-Harvest-Index	273,77**	27,42**	23,91**	7,13**	47,13	6,09	20,39**	4,55**	2,53
N-Assimilation	214,69**	53,26**	17,80**	14,35**	25,92	19,47**	12,82*	9,30**	5,84
N-Aufnahme z. Blüte	22,31*	3,82+	3,67*	2,50*	2,94	3,13	2,63	2,42*	1,66
Sink§	155,07**	27,76**	3,89	7,63**	5,36	5,79	10,54*	5,53	4,51
TM-Zuw. n. Blüte§	177,31**	36,60**	13,62	15,34**	24,21	9,64	10,50	10,94	8,72
Chlorophyll	39,07*	18,81**	8,28**	6,42**	4,64	4,49+	4,13*	3,16**	1,90
Korn-TS	107,58**	38,08**	4,85*	3,02**	11,83**	2,18**	1,65**	0,68**	0,38
Korn-TM¶	49,60	139,43**	134,36**	45,22**	266,71**	40,73+	27,06	27,23*	19,59

+, *, ** Schätzwert signifikant bei P=0,1; 0,05 bzw. 0,01.

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

‡ Der Doppelpunkt steht für "innerhalb".

§ Mittelquadrat × 0,001.

¶ Mittelquadrat × 0,01.

Auf beiden N-Stufen wurden hohe Heritabilitätsschätzwerte für die Merkmale N-Verwertung, N-Assimilation, Sinkstärke und die beiden Harvest-Indizes ermittelt (Tab. 3.19). Der Chlorophyllgehalt wies dagegen nur moderate Schätzwerte auf, die auf der NH-Stufe etwas höher als auf der NL-Stufe lagen. Auch die Schätzwerte für die N-Remobilisierung erreichten auf beiden N-Stufen mittlere Werte. Dagegen zeigten die Merkmale N-Aufnahme und Trockenmassenzuwachs auf der NH-Stufe deutlich höhere Heritabilitätsschätzwerte als auf der NL-Stufe. Für die Trockenmassen der verschiedenen Pflanzenfraktionen (Gesamtpflanze, Restpflanze, Korn) der beiden Materialsätze wurden auf der NL-Stufe geringere Heritabilitäten geschätzt als auf der NH-Stufe (Tab. 7.7). Die Heritabilitätsschätzwerte der Merkmale N-Gehalt und N-Ertrag zeigten hingegen keine einheitliche Tendenz.

Tab. 3.19: Schätzwerte für die Heritabilität (h^2) und zugehörige 95% Konfidenzintervalle (CI 95%) getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die N-Effizienzmerkmale, Korntrockensubstanzgehalt und Korntrockenmasse in **Experiment 3**

Merkmal†	NL-Stufe		NH-Stufe	
	h^2	CI 95%	h^2	CI 95%
N-Aufnahme	0,33	-0,16-0,59	0,67	0,44-0,80
N-Verwertung	0,88	0,80-0,93	0,82	0,68-0,89
N-Remobilisierung	0,58	0,27-0,74	0,50	0,13-0,70
Harvest-Index	0,85	0,74-0,91	0,69	0,46-0,81
N-Harvest-Index	0,77	0,61-0,86	0,72	0,52-0,83
N-Assimilation	0,71	0,50-0,82	0,75	0,57-0,85
N-Aufn. z. Blüte	0,18	-0,41-0,51	0,50	0,13-0,69
Sink	0,72	0,51-0,83	0,70	0,48-0,82
TM-Zuwachs	0,34	-0,13-0,60	0,67	0,44-0,80
Chlorophyll	0,55	0,23-0,73	0,67	0,43-0,80
Korn-TS	0,93	0,88-0,96	0,89	0,81-0,93
Korn-TM	0,34	-0,14-0,60	0,68	0,45-0,81

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

Die Harvest-Indices und das Merkmal N-Verwertung wiesen im Vergleich zu den anderen N-Effizienzmerkmalen die höchsten Schätzwerte für die Wiederholbarkeit auf (Tab. 7.8). Für diese Merkmale wurden an den Orten Eckartsweier und Grucking auf der NL-Stufe höhere Schätzwerte als auf der NH-Stufe ermittelt. In Walldorf zeigte sich hingegen keine eindeutige Tendenz. Die Harvest-Indizes sowie die Merkmale N-Verwertung, N-Assimilation und der Chlorophyllgehalt waren zudem nur mit einem geringen Fehler behaftet. Die höchsten Fehlervariationskoeffizienten zeigte das Merkmal Sinkstärke. Die Schätzwerte für die Wiederholbarkeit und den Variationskoeffizienten des Fehlers der Ertragsmerkmale (Kornrockenmasse, Kornrockensubstanzgehalt, N-Gehalt und N-Ertrag) sind im Anhang aufgeführt (Tab. 7.9).

3.3.2 Mittelwerte

Für das Merkmal N-Aufnahme wurden nur auf der NH-Stufe signifikante Unterschiede zwischen den Hybridgruppen festgestellt. Die L×L- und K×K-Hybriden waren den H×H-Hybriden in der Verwertung und der Assimilation des auf der NL-Stufe zur Verfügung stehenden Stickstoffs signifikant überlegen (Tab. 3.20). Unter N-Mangel erreichten die K×K-Hybriden höhere Werte für die Merkmale N-Remobilisierung und die beiden Harvest-Indizes als die H×H-, L×L- und L×H-Hybriden, diese Unterschiede waren nur zwischen den K×K- und L×H-Hybriden signifikant. Auch auf der NH-Stufe waren die Leistungen der K×K-Hybriden für die Merkmale N-Verwertung, N-Harvest-Index und Chlorophyllgehalt höher als diejenigen der L×L-, H×H- und L×H-Hybriden, auch hier waren signifikante Differenzen nur zwischen K×K- und L×H-Hybriden nachweisbar. Nur auf der NL-Stufe ergab sich für die K×K-Hybriden eine signifikant höhere Sinkstärke als für die L×L- und H×H-Hybriden. Ebenfalls signifikante Unterschiede wurden für dieses Merkmal zwischen K×K- und L×H-Hybriden nachgewiesen, auf beiden N-Stufen erzielten die K×K-Hybriden positive, die L×H-Hybriden hingegen negative Werte. Im Merkmal Kornrockenmasse zeigten sich die L×L-Hybriden auf der ungedüngten N-Stufe und die H×H-Hybriden auf der gedüngten N-Stufe den anderen Hybridgruppen überlegen. Diese Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Auf beiden N-Stufen wiesen die L×L-Hybriden im Vergleich zu den H×H-Hybriden höhere Kornrockensubstanzgehalte auf.

Tab. 3.20: Mittelwerte der Hybridgruppen aus der Serie über drei Orte getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die N-Effizienzmerkmale sowie für den Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) und die Korntrockenmasse (Korn-TM) in **Experiment 3**

Merkmal†	Hybridgruppe‡					Mittel
	H×H	L×L	K×K	H×L	L×H	
	NL-Stufe					
N-Aufnahme [g N m ⁻²]	8,96a‡	9,21 a	8,41 a	8,83 a	9,40 a	8,97
N-Verwertung [g TM g ⁻¹ N]	52,7b	58,6 a	61,1 a	58,9 a	51,3 b	56,5
N-Remobilisierung [g N m ⁻²]	1,33 ab	1,51 ab	2,05 a	1,92 a	0,89 b	1,53
Harvest-Index [%]	44,1 ab	46,9 a	48,8 a	48,9 a	41,3 b	45,6
N-Harvest-Index [%]	62,3 ab	61,9 ab	65,8 a	65,4 a	58,0 b	62,6
N-Assimil. [g TM g ⁻¹ N]	120 c	125 ab	126 a	121 bc	125 ab	123
N-Aufn. z. Blüte [g N m ⁻²]	4,27 a	4,19 a	3,43 a	3,83 a	4,62 a	4,07
Sink [g m ⁻²]	2,8 c	22,7 bc	74,7 a	60,6 ab	-54,4 d	20,4
TM-Zuw. n. Blüte [g m ⁻²]	478 a	515 a	446 a	459 a	545 a	489
Chlorophyll [SPAD]	29,6 a	30,3 a	30,5 a	30,9 a	28,7 a	30,0
Korn-TS [%]	63,3 b	66,3 a	66,9 a	66,4 a	63,0 b	65,1
Korn-TM [g m ⁻²]	477 a	538 a	521 a	519 a	489 a	509
	NH-Stufe					
N-Aufnahme [g N m ⁻²]	22,0 a	20,9 ab	19,5 b	21,0 ab	22,1 a	21,1
N-Verwertung [g TM g ⁻¹ N]	44,4 ab	45,6 ab	47,0 a	45,9 ab	43,9 b	45,4
N-Remobilisierung [g N m ⁻²]	5,97 a	5,03 a	6,42 a	5,86 a	5,28 a	5,71
Harvest-Index [%]	48,8 a	48,9 a	49,9 a	50,0 a	46,8 a	48,9
N-Harvest-Index [%]	65,9 ab	64,3 ab	67,0 a	66,4 a	63,5 b	65,4
N-Assimil. [g TM g ⁻¹ N]	91 a	94 a	94 a	91 a	94 a	93
N-Aufn. z. Blüte [g N m ⁻²]	8,50 ab	8,36 ab	6,55 b	8,03 ab	8,68 a	8,02
Sink [g m ⁻²]	25,9 ab	-1,1 ab	95,4 a	53,4 a	-59,6 b	22,1
TM-Zuw. n. Blüte [g m ⁻²]	920 ab	921 ab	794 c	878 bc	1004 a	904
Chlorophyll [SPAD]	55,7 a	54,9 a	55,8 a	56,0 a	53,7 b	55,2
Korn-TS [%]	66,2 bc	68,1 a	67,5 abc	67,9 ab	65,8 c	67,1
Korn-TM [g m ⁻²]	946 a	921 a	889 a	929 a	946 a	926

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4 und Tab. 2.1.

‡ Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Zeile bezeichnen eine signifikante Mittelwertsdifferenz der Hybridgruppen bei P=0,01, Duncan-Test.

Zum ersten Erntetermin (kurz nach der Blüte) wiesen die Hybridgruppen auf beiden N-Stufen nur geringe Unterschiede bezüglich der erfassten Ertragsmerkmale auf, zur Körnerreife war hingegen eine deutlichere Differenzierung zu beobachten. Auf der NL-Stufe erreichten die L×L-Hybriden tendenziell höhere Leistungen als die H×H-Hybriden für die Merkmale Trockenmasse und N-Ertrag. Dagegen zeigten die H×H-Hybriden für die Fraktionen Gesamtpflanze nach Blüte und Korn signifikant höhere N-Gehalte als die L×L-Hybriden. Auf der NH-Stufe waren die H×H-Hybriden den L×L-Hybriden in fast allen Ertragsmerkmalen überlegen (Tab. 7.10). Die Einzelorte reagierten mit unterschiedlichen Leistungen für die Ertragsmerkmale der untersuchten Pflanzenfraktionen (Tab. 7.11). In Walldorf wurden die höchsten und in Eckartsweier die niedrigsten Werte für die Merkmale Trockenmasse und N-Ertrag festgestellt.

3.3.3 Merkmalskorrelationen

Die Merkmale Korntrockenmasse und N-Aufnahme zeigten auf der NL-Stufe eine geringe, auf der NH-Stufe jedoch eine mittelstraffe Korrelation (Tab. 3.21, Abb. 3.8). Die N-Aufnahme war auf beiden N-Stufen moderat negativ mit dem Korntrockensubstanzgehalt korreliert. Nur auf ungedüngtem N-Niveau konnte eine mittlere positive Korrelation zwischen der N-Verwertungseffizienz und der Korntrockenmasse beobachtet werden (Abb. 3.9). Eine verbesserte Ertragsleistung auf der NL-Stufe war demnach eng mit der Fähigkeit verknüpft, den zur Verfügung stehenden Stickstoff zu verwerten. Eine verbesserte N-Verwertung ging mit hohen Korntrockensubstanzgehalten einher. Auf beiden N-Stufen zeigten die Harvest-Indizes eine straffere Korrelation zum Korntrockensubstanzgehalt als zur Korntrockenmasse, d.h. auch diese Merkmale stehen mit einer frühen Körnerreife in Beziehung. Das Merkmal N-Remobilisierung war nur auf der NL-Stufe schwach mit dem Korntrockensubstanzgehalt und der Korntrockenmasse korreliert. Auf keiner N-Stufe konnte eine bedeutende Beziehung zwischen dem Chlorophyllgehalt und der Korntrockenmasse beobachtet werden. Zwischen den N-Stufen waren die N-Effizienzmerkmale mittel bis straff korreliert.

Tab. 3.21: Geschätzte Koeffizienten der phänotypischen Korrelationen der N-Effizienzmerkmale zur Korntrockenmasse (Korn-TM) und zum Korntrockensubstanzgehalt (Korn-TS) aus der Serie über drei Orte getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe sowie der Korrelation zwischen den N-Stufen ($r_{NL/NH}$) für die N-Effizienzmerkmale in **Experiment 3**

Merkmal†	NL-Stufe		NH-Stufe		r
	Korn-TM†	Korn-TS†	Korn-TM	Korn-TS	NL/NH
N-Aufnahme	0,38*	-0,54**	0,64**	-0,42**	0,58**
N-Verwertung	0,57**	0,73**	0,30*	0,17	0,64**
N-Remobilisierung	0,33	0,38*	0,29	0,17	0,35*
Harvest-Index	0,49**	0,73**	0,24	0,51**	0,74**
N-Harvest-Index	0,39**	0,62**	0,22	0,46**	0,71**
N-Assimilation	0,28	0,10	0,22	-0,40**	0,56**
Sink	0,25	0,63**	0,01	0,60**	0,76**
TM-Zuw. n. Blüte	0,29	-0,51**	0,59**	-0,68**	0,69**
Chlorophyll	0,27	0,38*	-0,03	0,11	0,64**

*, ** Schätzwert signifikant bei $P=0,05$ bzw. $0,01$.

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

N-Aufnahme und N-Verwertungseffizienz zeigten eine mittlere negative Korrelation, die auf beiden N-Stufen eine ähnliche Größe erreichte (Tab. 3.22). Die graphische Darstellung macht deutlich, dass diese beiden Merkmale trotz ähnlicher Korrelation eine völlig unterschiedliche Streuung aufwiesen (Abb. 3.10). Die N-Aufnahme korrelierte auf beiden N-Stufen eng positiv mit dem Trockenmassezuwachs nach Blüte und negativ mit der Sinkstärke. Dagegen war die N-Verwertung auf beiden Stufen positiv mit den Harvest-Indizes, der Sinkstärke und der Remobilisierung verbunden; diese Beziehungen waren auf der NL-Stufe aber deutlich straffer als auf der NH-Stufe. Eine mittlere negative Korrelation wurde zwischen der N-Verwertungseffizienz und dem Trockenmassezuwachs nach Blüte auf der NL-Stufe beobachtet. Daraus kann gefolgert werden, dass Genotypen mit einer hohen Verwertungseffizienz tendenziell geringere Zuwachsraten für die Trockenmasse nach der Blüte aufweisen, während im Gegensatz dazu eine hohe N-Aufnahme mit hohen Trockenmassezuwachsen nach der Blüte assoziiert ist. Eine effiziente N-Verwertung ist demnach mit der Fähigkeit zur N-Remobilisierung und hohen Werten für die Merkmale Sinkstärke und Harvest-Index verknüpft (Abb. 3.11-3.13). Die Sinkstärke wiederum war auf beiden N-Stufen straff bis mittelstraff und positiv mit den Harvest-Indizes sowie der Remobilisierung korreliert.

Tab. 3.22: Geschätzte Koeffizienten der phänotypischen Korrelationen zwischen den N-Effizienzmerkmalen aus der Serie über drei Orte getrennt für die niedrige (unterhalb der Diagonalen) und die hohe N-Stufe (oberhalb der Diagonalen) in **Experiment 3**

Merkmal†	N-Aufnahme	N-Verwertung	N-Remobilisierung	Harvest-Index	N-Harvest-Index	N-Assimilation	Sink	TM-Zuw. N-Blüte	Chlorophyll
N-Aufnahme		-0,52**	-0,07	-0,39**	-0,11	-0,31*	-0,44**	0,73**	-0,12
N-Verwertung	-0,50**		0,41**	0,78**	0,43**	0,59**	0,57**	-0,28	0,07
N-Remobilisierung	-0,34*	0,59**		0,51**	0,64**	0,02	0,72**	-0,41**	0,30*
Harvest-Index	-0,48**	0,93**	0,82**		0,78**	-0,01	0,80**	-0,57**	0,20
N-Harvest-Index	-0,43**	0,79**	0,64**	0,91**		-0,32*	0,79**	-0,51**	0,25
N-Assimilation	-0,13	0,29	0,01	-0,07	-0,21		-0,12	0,22	-0,13
Sink	-0,61**	0,79**	0,84**	0,83**	0,78**	-0,03		-0,82**	0,27
TM-Zuw. n. Blüte	0,81**	-0,48**	-0,63**	-0,56**	-0,56**	0,18	-0,85**		-0,23
Chlorophyll	-0,04	0,31*	0,13	0,37*	0,39**	-0,08	0,22	-0,07	

*, ** Schätzwert signifikant bei P=0,05 bzw. 0,01.

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

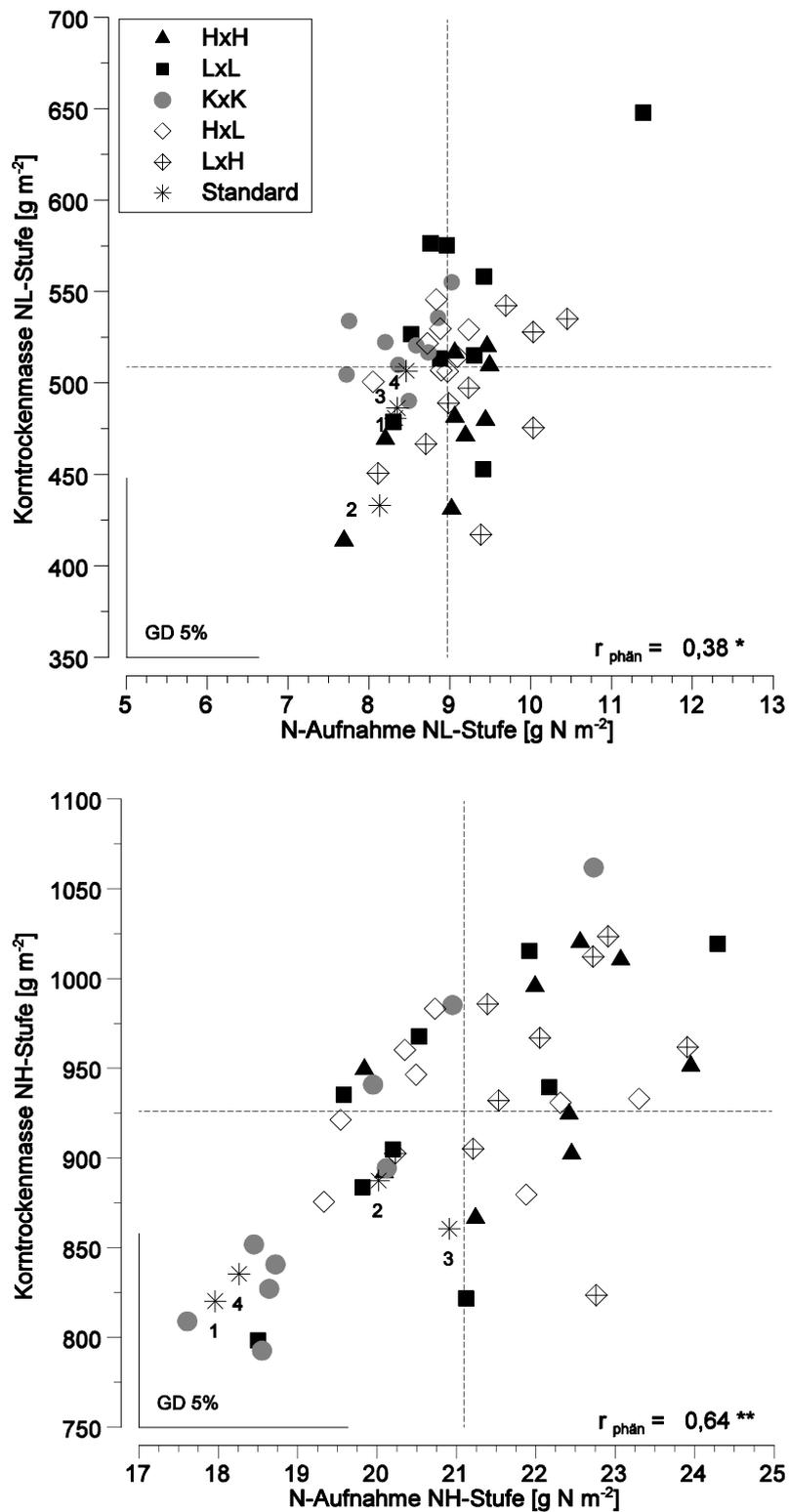


Abb. 3.8: Beziehungen zwischen Korntrockenmasse und N-Aufnahme auf der niedrigen (NL) N-Stufe, oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, der 44 Hybriden und vier Standards aus der Serie über drei Umwelten **in Experiment 3**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. **, * signifikant bei $P=0,01$ bzw. $0,05$. GD 5% Grenzdifferenz bei $P=0,05$).

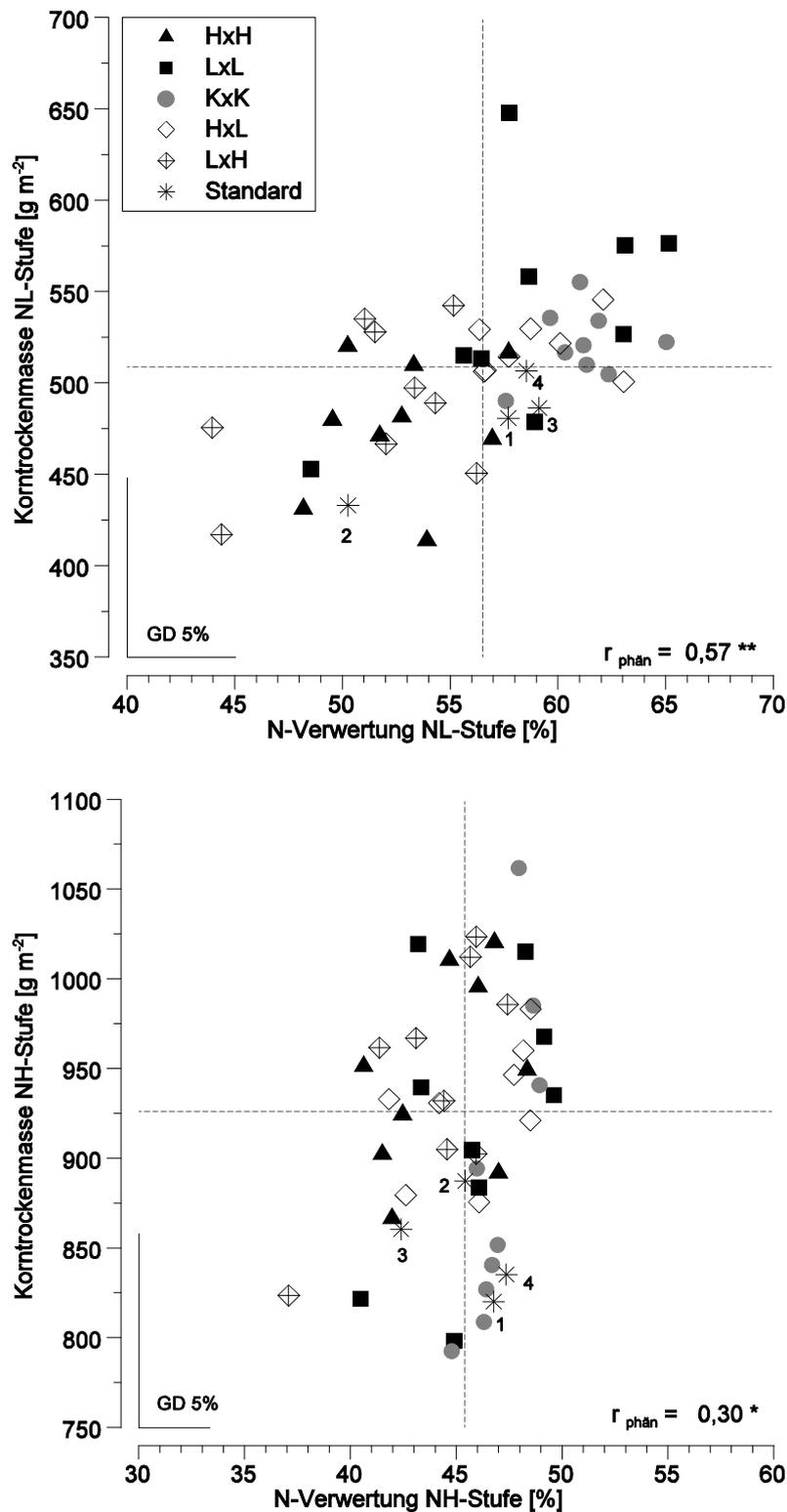


Abb. 3.9: Beziehungen zwischen Korntrockenmasse und N-Verwertung auf der niedrigen (NL) N-Stufe, oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, der 44 Hybriden und vier Standards aus der Serie über drei Umwelten in **Experiment 3**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. **, * signifikant bei P=0,01 bzw. 0,05. GD 5% Grenzdifferenz bei P=0,05).

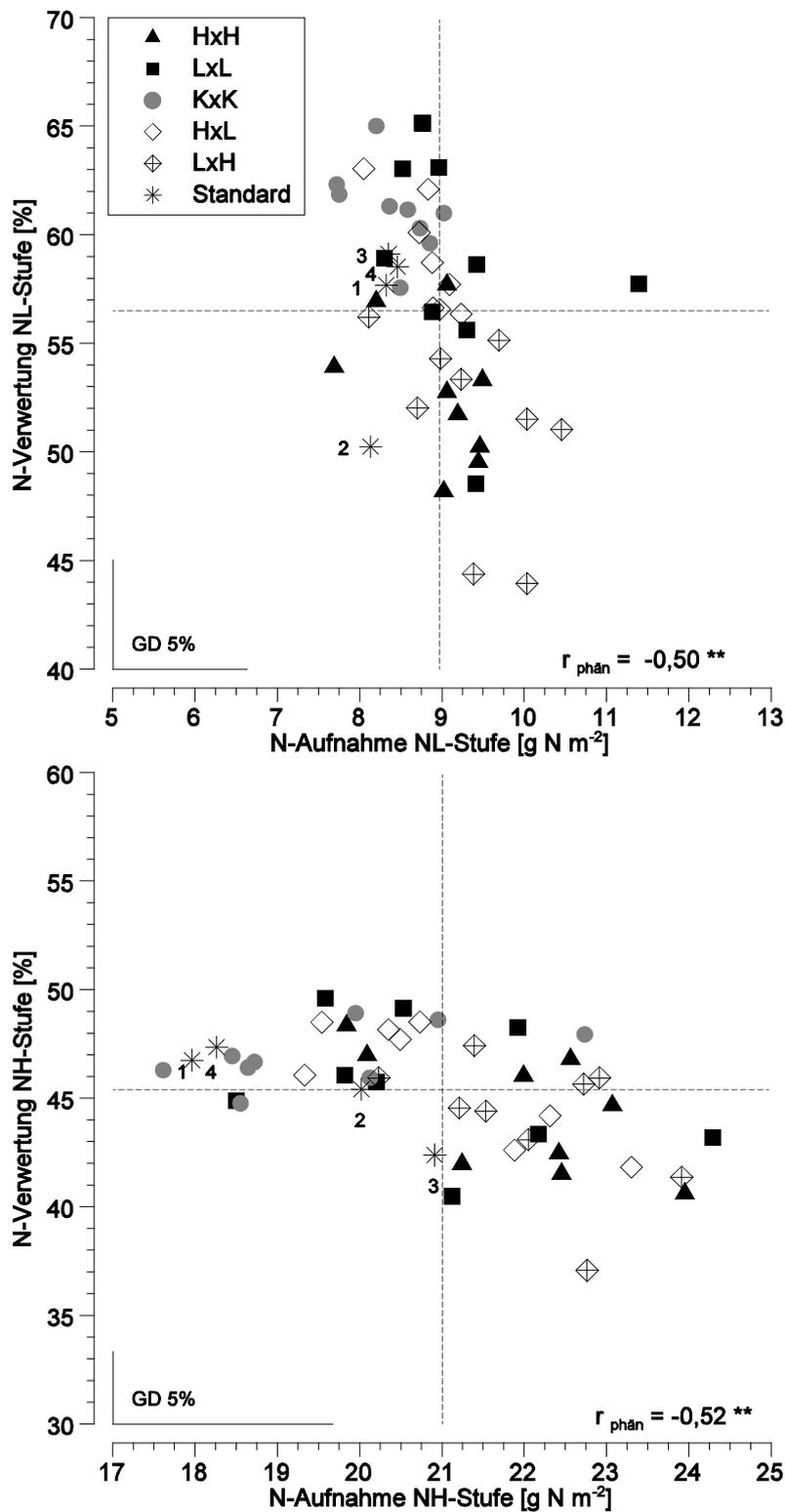


Abb. 3.10: Beziehungen zwischen N-Verwertung und N-Aufnahme auf der niedrigen (NL) N-Stufe, oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, der 44 Hybriden und vier Standards aus der Serie über drei Umwelten **in Experiment 3**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. ** signifikant bei P=0,01. GD 5% Grenzdifferenz bei P=0,05).

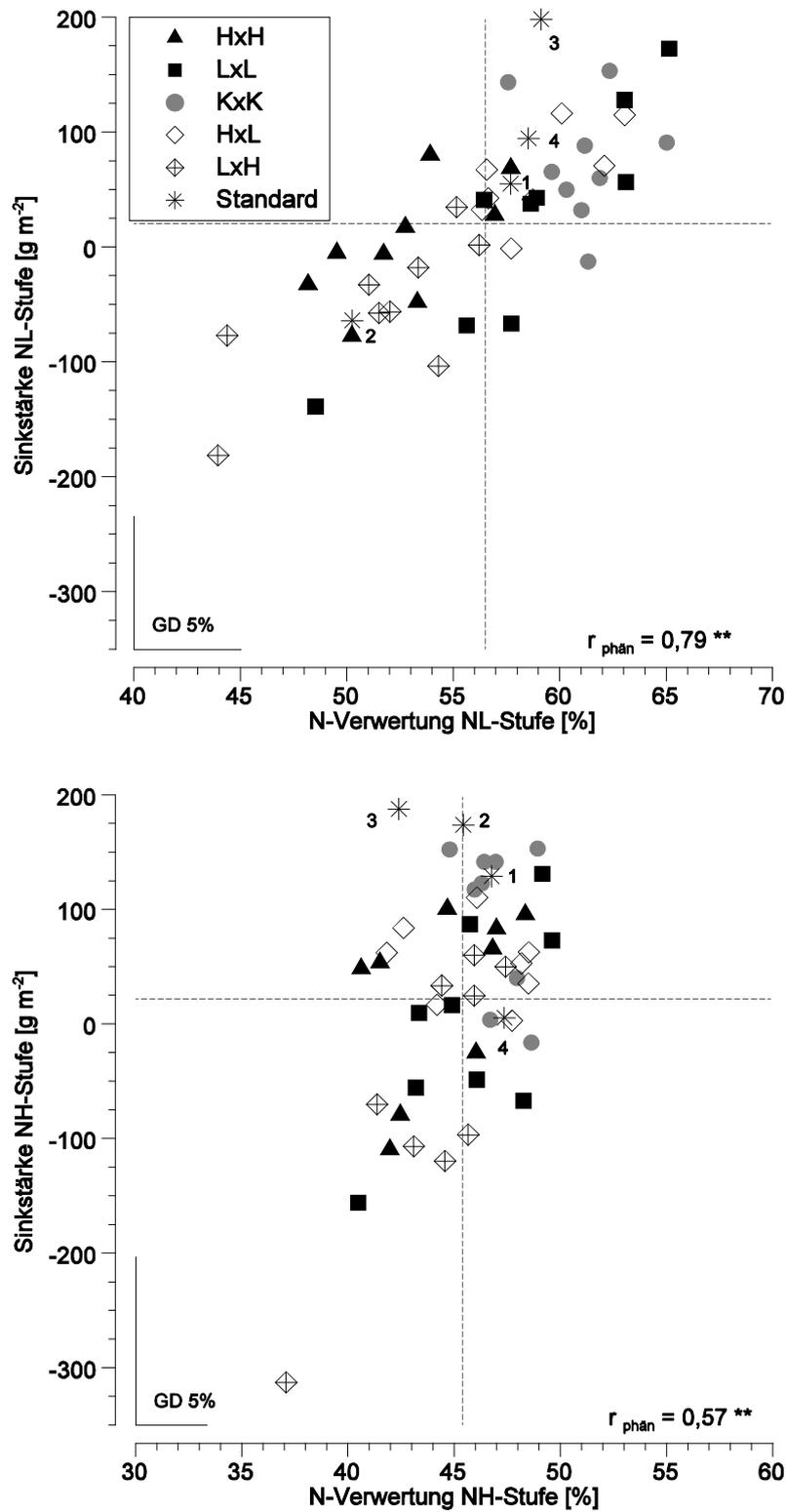


Abb. 3.11: Beziehungen zwischen Sinkstärke und N-Verwertung auf der niedrigen (NL) N-Stufe, oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, der 44 Hybriden und vier Standards aus der Serie über drei Umwelten in **Experiment 3**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. ** signifikant bei $P=0,01$. GD 5% Grenzdifferenz bei $P=0,05$).

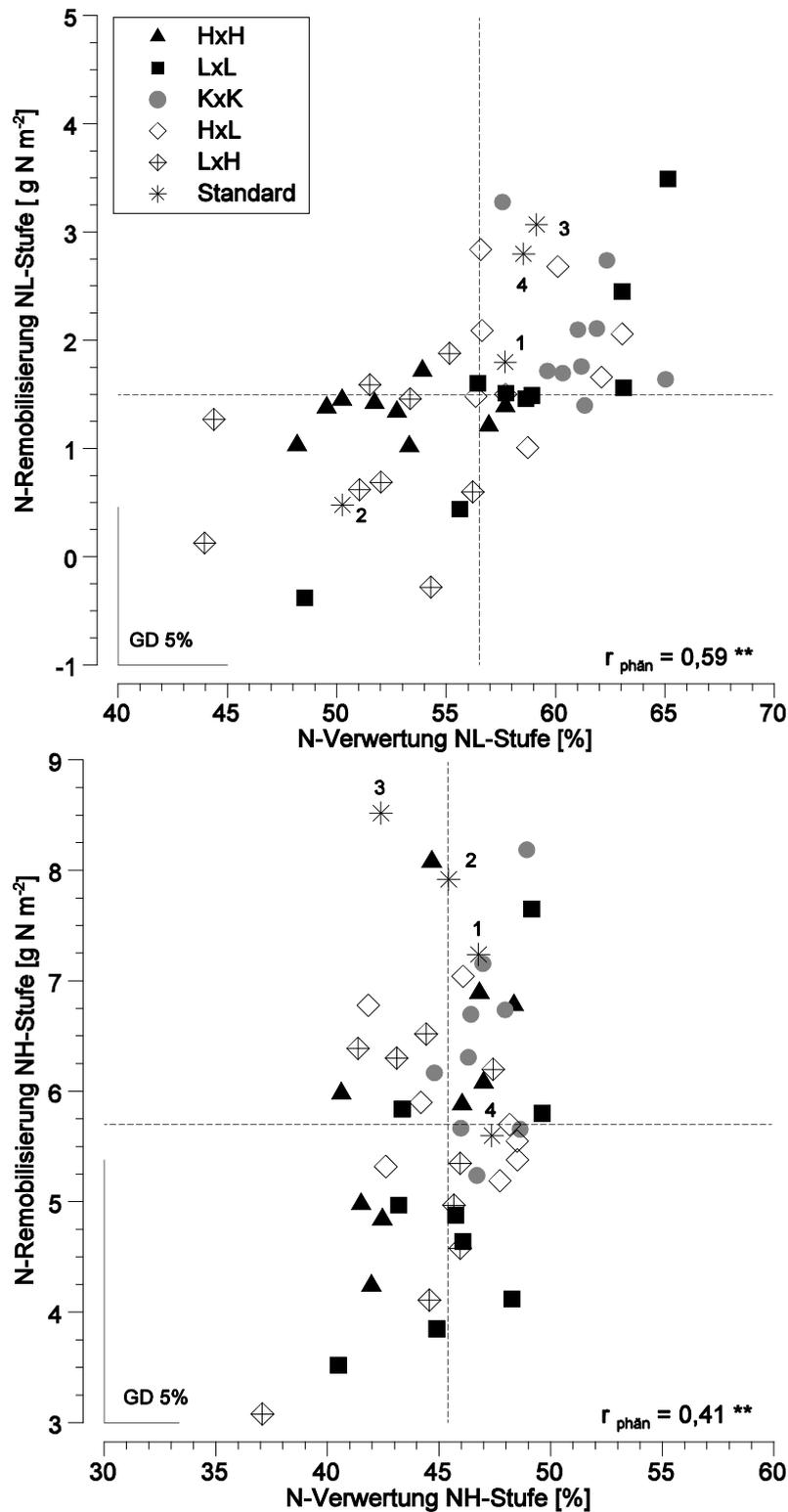


Abb. 3.12: Beziehungen zwischen N-Remobilisierung und N-Verwertung auf der niedrigen (NL) N-Stufe, oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, der 44 Hybriden und vier Standards aus der Serie über drei Umwelten **in Experiment 3**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. ** signifikant bei P=0,01. GD 5% Grenzdifferenz bei P=0,05).

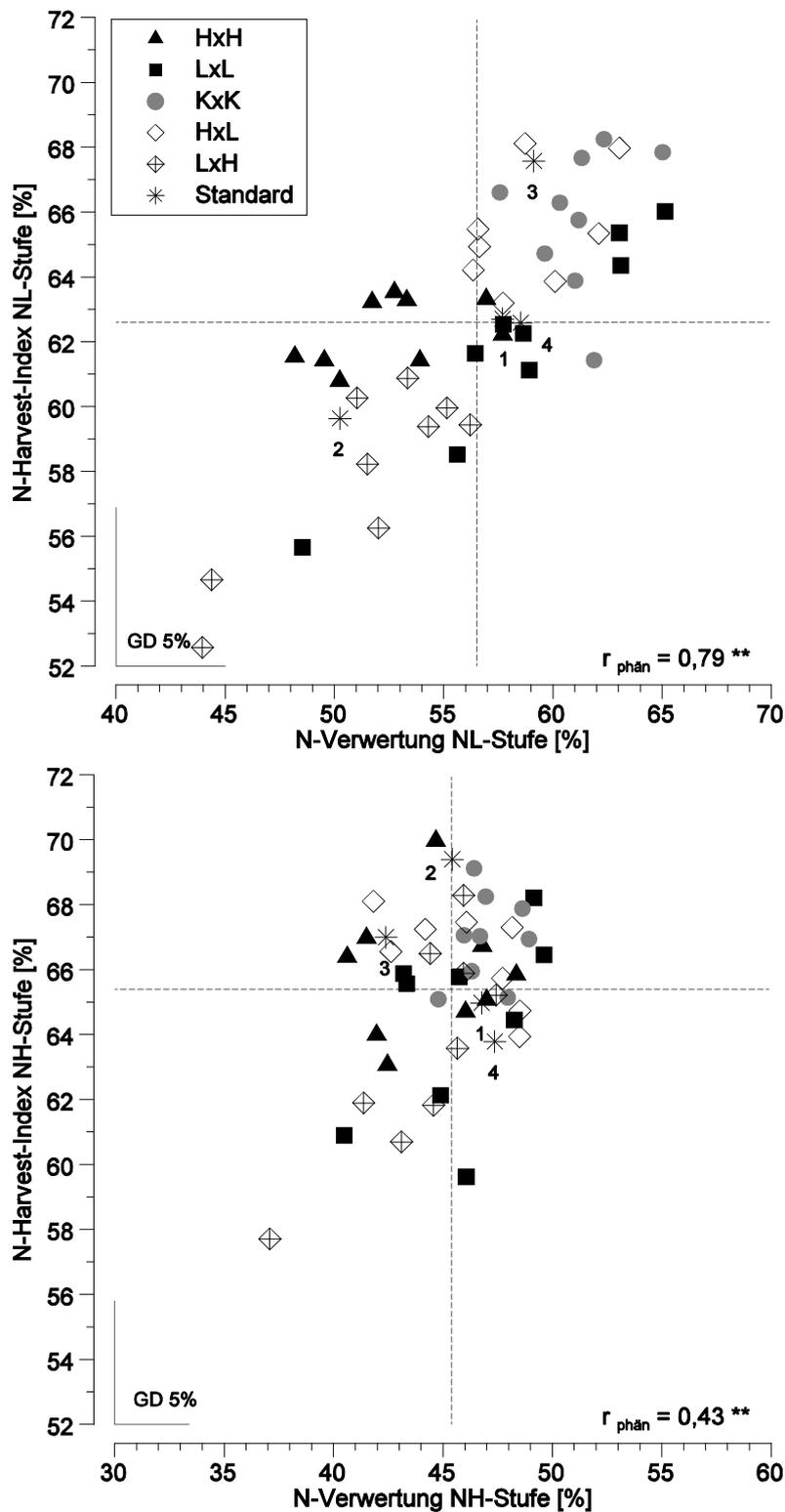


Abb. 3.13: Beziehungen zwischen N-Harvest-Index und N-Verwertung auf der niedrigen (NL) N-Stufe, oben, und der hohen (NH) N-Stufe, unten, der 44 Hybriden und vier Standards aus der Serie über drei Umwelten in **Experiment 3**. ($r_{\text{phän}}$ = Koeffizient der phänotypischen Korrelation. ** signifikant bei $P=0,01$. GD 5% Grenzdifferenz bei $P= 0,05$).

4 Diskussion

4.1 Züchtung auf verbesserte Stickstoffeffizienz

4.1.1 Bedeutung der Stickstoffeffizienz für die Ertragssicherheit

Die Kombination von H-, L-, und K-Linien, die bezüglich ihrer N-Effizienz selektiert worden waren, hat zu Hybriden geführt, deren mittlere Leistungen auf den beiden N-Niveaus deutliche Unterschiede aufwiesen (Tab. 3.5). Wie erwartet erreichten die L×L-Hybriden auf der NL-Stufe im Mittel höhere Erträge als die H×H-Hybriden. Auf der NH-Stufe zeigte sich ein entgegengesetzter Effekt. In Übereinstimmung mit den vorgestellten Ergebnissen wurde in einem vorangegangenen Experiment (PRESTERL, 1996) ebenfalls eine im Mittel signifikante Ertragsüberlegenheit der L×L-Hybriden auf der NL-Stufe beobachtet. Dagegen konnte der Autor keine signifikanten Leistungsunterschiede zwischen L×L- und H×H-Hybriden auf der NH-Stufe nachweisen.

Es muss angemerkt werden, dass die Hybriden in dieser Studie nicht direkt aus dem Material entwickelt wurden, welches der Arbeit von PRESTERL (1996) zu Grunde liegt. Es gab keine vergleichenden Prüfungen in gemeinsamen Umwelten. PRESTERL (1996) prüfte 24 L×L- und 25 H×H-Hybriden auf drei N-Stufen an vier Standorten (Hohenheim, Forchheim, Emmendingen, Walldorf). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit basieren hingegen auf einer größeren Anzahl Umwelten und einer geringeren Anzahl von H×H- und L×L Hybriden. Ein direkter Vergleich kann daher nicht angestellt werden.

Die Hybriden innerhalb einer Hybridgruppe zeigten nicht immer eine einheitliche Reaktion (Abb. 3.1). Die hohe mittlere Ertragsleistung der K×K-Hybriden auf beiden N-Stufen war vor allem auf drei Hybriden zurückzuführen, die einen gemeinsamen Elter besaßen (die Linie KF3). Bei der L×L-Gruppe stach eine Hybride auf der hohen N-Stufe mit überlegener Ertragsleistung hervor. Einige H×H-Hybriden waren auch an geringe N-Versorgung angepasst.

Die signifikanten Differenzen zwischen den Hybridgruppen im Merkmal Korntrockensubstanzgehalt sind insofern bemerkenswert, als bei der Selektion der Elternlinien großer Wert auf ähnliche Trockensubstanzgehalte gelegt wurde (Tab. 3.5). Im Gegensatz zur vorliegenden Studie wiesen bei PRESTERL (1996) die L×L-Hybriden geringere Korntrockensubstanzgehalte als die H×H-Hybriden auf. Übereinstimmend wurde eine verzögerte Blüte der männlichen und weiblichen Infloreszenzen auf der NL-Stufe beobachtet. Auf beiden N-Stufen

blühten die H×H-Hybriden signifikant später als die L×L-Hybriden. In der vorliegenden Arbeit wurde aber eine insgesamt besser abgestimmte Synchronisation der Blüte, ausgedrückt durch ein wesentlich engeres Blühintervall, beobachtet. Auf jeden Fall scheint die Anpassung an ein geringes N-Angebot mit einer besseren Synchronisation der Blüte verbunden zu sein.

Eine mit dieser Arbeit vergleichbare Strategie der Materialentwicklung (H×H, L×L, K×K), mit Hinblick auf eine Verbesserung der Stresstoleranz, verfolgten CECCARELLI *et al.* (1998) bei Gerste. Es wurden Linien auf hohem Ertrag unter günstigen (YNS-Linien) und ungünstigen (YS-Linien) Umweltbedingungen selektiert. Desweiteren wurden Linien ausgewählt, die herausragende Erträge unter beiden Umweltbedingungen zeigten (YA-Linien). Ungünstige Umweltbedingungen stellten in dieser Untersuchung eine Kombination aus Trockenstress und Nährstoffmangel dar. In mehrortigen Prüfungen auf unterschiedlichen Produktivitätsniveaus wiesen die YS-Linien in den vier ungünstigsten Umwelten eine mit den L×L-Hybriden vergleichbare Reaktion auf, da sie signifikant höhere Erträge als die YNS-Linien erreichten. Die Leistung der YA-Linien lag unter ungünstigen Bedingungen zwischen derjenigen der YS- und YNS-Linien und unterschied sich somit von den K×K-Hybriden auf der NL-Stufe, welche keine signifikante Differenz zu den L×L-Hybriden erkennen ließen. Der mittlere Kornertrag der K×K-Hybriden auf der NL-Stufe wurde stark durch die bereits erwähnten drei überlegenen Hybriden beeinflusst, was sicherlich zu einer Überschätzung ihrer Leistung geführt hat. Auch unter Berücksichtigung des starken Einflusses einzelner Hybriden auf die mittlere Leistung einer Hybridgruppe kann festgestellt werden, dass die Entwicklung von K×K-Hybriden zu Material geführt hat, welches das Leistungsniveau von Hybriden erreicht, die auf spezifische Anpassung an hohe bzw. niedrige N-Versorgung selektiert worden waren.

Die auf beiden N-Stufen nachgewiesenen Korrelationen zwischen dem Ertrag und den Blühmerkmalen (Tab. 3.3) konnten durch die Untersuchungen von PRESTERL (1996) nur zum Teil bestätigt werden. An tropischem Maismaterial wurden bei geringer N-Versorgung mittlere negative Korrelationen zwischen Ertrag und Blühtermin festgestellt (LAFITTE & EDMÉADES, 1994a; BÄNZIGER & LAFITTE, 1997). Die in dieser Arbeit auf beiden N-Stufen unterschiedlichen Vorzeichen für diese Korrelationen deuten an, dass eine Anpassung an N-Mangelbedingungen mit einem frühen Blühtermin und einem geringen Blühintervall einhergeht. Bei optimaler N-Versorgung ist dagegen eine spätere Blüte und somit eine verlängerte vegetative Phase von Vorteil. Diese Zeit kann für die N-Aufnahme und Assimilatbildung genutzt werden und wirkt daher ertragssteigernd. Auf der NL-Stufe hingegen scheint eine Verlängerung der vegetativen Phase aufgrund des limitierten N-Angebots von keinem größeren Nutzen zu sein.

Die hohen bis sehr hohen Heritabilitätsschätzwerte auf beiden N-Stufen (Tab. 3.2) stimmen mit mehreren Befunden aus der Literatur überein (PRESTERL, 1996; LANDBECK, 1995). Untersuchungen von SCHINKEL (1991) bei Weizen und HARTMANN (1997) bei Roggen bestätigen diese Beobachtungen für das Merkmal Kornertrag. Für Getreide liegen jedoch auch entgegengesetzte Beobachtungen vor (u.a. ATLIN & FREY, 1990; SINGH & CECCARELLI, 1995). Bei Mais sind die Ergebnisse aus der Literatur ebenfalls keineswegs einstimmig (Tab. 4.1). Die von BÄNZIGER *et al.* (1997) ausgewerteten Experimente zeigten im Mittel auf niedrigem N-Niveau geringere Heritabilitätsschätzwerte als unter hoher N-Versorgung; diese Unterschiede waren jedoch nicht über alle Materialsätze konsistent. Aus den widersprüchlichen Literaturbefunden lässt sich folgern, dass die Ergebnisse sehr stark von dem geprüften Material sowie den Versuchs- und Selektionsbedingungen beeinflusst wurden.

Tab. 4.1: Heritabilitätsschätzwerte für den Kornertrag von Mais bei hoher und geringer N-Versorgung

Materialherkunft	N-Versorgung		Referenz
	hoch	gering	
USA, Dent	0,59	0,51	BRUN & DUDLEY, 1989
Argentinien, Flint	0,51	0,45	BRUN & DUDLEY, 1989
Tropen	0,46	0,58	LAFITTE & EDMEADES, 1994a
Tropen	0,62	0,44	BÄNZIGER <i>et al.</i> 1997 †
Europa	0,70	0,66	LANDBECK, 1995 ‡
Europa	0,73	0,79	PRESTERL, 1996 ‡

† Mittel über 14 Experimente aus den Jahren 1986 - 1995.

‡ Mittel über verschiedene Versuchsserien und Materialsätze.

Das Ausmaß der genetischen Korrelation zwischen den N-Stufen wird hauptsächlich durch die relative Größe der Genotyp×N-Stufe-Interaktionsvarianz gegenüber der genotypischen Varianz bestimmt. Je höher die Wechselwirkungen desto schwächer sind die Korrelationen und umgekehrt. Wegen der in dieser Arbeit fixierten genotypischen Effekte wurde keine genotypischen Korrelationen angegeben. Die Schätzwerte der phänotypischen und genotypischen Korrelationen für die Korntrockenmasse zwischen den beiden N-Stufen erreichten jedoch eine ähnliche Größe (Tab. 3.3) und waren somit geringer als in den vorangegangenen Untersuchungen (LANDBECK, 1995; PRESTERL, 1996). In der

vorliegenden Untersuchung wurden aufgrund der Annahme eines gemischten Modelles Mittelquadrate anstelle von Varianzkomponenten angegeben, so konnte das Verhältnis der Varianzkomponenten zueinander nicht direkt den Ergebnissen von LANDBECK (1995) und PRESTERL (1996) gegenübergestellt werden. Die moderaten Korrelationen für den Kornertrag deuten jedoch an, dass die Genotyp×N-Stufe-Interaktionsvarianzen im Vergleich zu den vorangegangenen Arbeiten anstiegen. In Untersuchungen von BÄNZIGER *et al.* (1997) an tropischem Material führte eine Zunahme der Stressintensität (gemessen als relative Ertragsreduktion bei niedriger im Vergleich zu hoher N-Versorgung) zu einem systematischen Anstieg der Genotyp×N-Stufe-Interaktionen, bei einer gleichzeitigen Abnahme der genetischen Korrelationen. LANDBECK (1995) konnte bei einem Vergleich der von ihm untersuchten Materialsätze feststellen, dass sich die Anteile der einzelnen Varianzkomponenten an der Gesamtvarianz im Zuge ausgeglichenerer Versuchsbedingungen und der Selektion auf Kornertrag veränderten. Die relative Größe der Interaktionsvarianzen Genotyp×Ort und der Genotyp×Ort×N-Stufe sowie der Versuchsfehler nahmen ab, während die Genotyp×N-Stufe-Interaktionsvarianz anstieg.

In der praktischen Maiszüchtung ist es nicht üblich einen Materialsatz über mehrere Jahre hinweg zu prüfen. Selektionen werden in der Regel nach einjährigen Ertragsprüfungen vorgenommen, um die Entwicklungsdauer einer Sorte von zur Zeit 10-12 Jahren nicht noch weiter zu verlängern. Die Untersuchung des vorgestellten Materialsatzes über zwei Jahre hinweg ermöglichte es, den Einfluss des Jahreseffektes in mehrortigen Experimenten mit unterschiedlichen N-Stufen zu analysieren (Tab. 3.1). Aus der Literatur sind nicht viele Studien bekannt, in denen Mais mehrjährig über eine größere Anzahl von Orten geprüft wurde. Bei der Auswertung von Ertragsdaten offizieller Körnermaisprüfungen des Bundessortenamtes konnten UTZ & LAIDIG (1989) nachweisen, dass die relative Größe der Interaktionsvarianzen der Komponenten Genotyp×Jahr sowie Genotyp×Ort×Jahr gegenüber der genotypischen Varianz zwischen 0,3-0,4 bzw. 1,1-1,2 lag. Literaturbefunde über mehrjährige und mehrortige Experimente unter unterschiedlichen N-Versorgungsniveaus sind bisher nicht bekannt. In den vorliegenden Studie trugen die Interaktionen zwischen den Hybriden und den Jahren signifikant zur Merkmalsvariation und somit zu Rangverschiebungen bei (Tab. 3.1). Die signifikanten bis hochsignifikanten Interaktionen zwischen den Komponenten Genotyp×Jahr×Ort sowie Genotyp×Jahr×Ort×N-Stufe zeigen an, dass komplexe Wechselwirkungen zwischen biotischen und abiotischen Faktoren auf die Ertragsfähigkeit der geprüften Hybriden einwirken. Dazu gehören Prozesse, die den Verlauf der N-Mineralisierung und somit die Ertragswirksamkeit der im Boden vorliegenden N-Quellen beeinflussen.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse konnte gezeigt werden, dass die unter N-Mangel selektierten L×L-Hybriden eine Adaptation an Low-Input-Umwelten aufwiesen, während die H×H-Hybriden an High-Input-Bedingungen angepasst waren (Tab. 3.7, Abb. 3.3). Dies bestätigt die Ergebnisse von LANDBECK (1995). Ähnliches wurde von JOHNSON & GEADELMAN (1989) bei Mais und ZAVALA-GARCIA *et al.* (1991) bei Sorghum für Material berichtet, welches unter günstigen und ungünstigen Umweltbedingungen selektiert worden war. Auch CECCARELLI & GRANDO (1991) konnten diesen Effekt bei Gerste nachweisen; diejenigen Linien, welche in gering produktiven Umwelten selektiert worden waren, zeigten neben einer Adaption an natürlichen Stress auch geringere Abweichungen von der Regression. Sie waren somit als ertragssicherer einzustufen als solche Linien, die unter günstigen Bedingungen ausgewählt worden waren. Auch aus der vorliegenden Studie deutet sich an, dass L×L-Hybriden tendenziell über eine höhere Ertragssicherheit verfügen als H×H-Hybriden. Die K×K-Hybriden waren bezüglich ihrer Ertragssicherheit wie die H×H-Hybriden einzustufen.

Eine H×L-Hybride (Prüfglied 14) wies die geringsten Werte für die Abweichungsvarianzen auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für diese Hybride nur Ergebnisse des Jahres 1997 vorlagen und daher die Werte für die Stabilitätsparameter sicherlich unterschätzt worden sind. Dies hatte jedoch keine Auswirkungen auf die Signifikanzen für die Gruppenunterschiede (Daten nicht gezeigt).

Die AMMI-Analyse visualisiert sehr anschaulich die Adaptation der Hybriden an spezifische Umwelten, insbesondere die positiven Interaktionen zwischen L×L-Hybriden und NL-Umwelten sowie zwischen H×H-Hybriden und NH-Umwelten (Abb. 3.4). CROSSA *et al.* (1990) wandten diese Analyse in einem internationalen Maisexperiment mit 17 Genotypen und 35 Umwelten an, und konnten die Genotypen anschließend sehr genau drei verschiedenen Ausgangspopulationen zuordnen. Im Rahmen eines Maisexperimentes mit jeweils 16 Genotypen und Umwelten nutzten GAUCH & ZOBEL (1997) die AMMI-Analyse zur Identifizierung von sogenannten Mega-Umwelten, in denen die Genotypen eine gleichgerichtete Rangierung bezüglich ihrer Leistungen zeigten. Die Ergebnisse einer AMMI-Analyse können auch dazu verwendet werden, in einem Zuchtprogramm Umwelten mit ähnlichen Effekten zu identifizieren. Unter dem Gesichtspunkt der Kosteneffektivität eines Zuchtprogrammes ist zu überdenken, ob nicht auf solche Umwelten verzichtet werden sollte. Stattdessen wäre es von Vorteil, Prüfforte zu wählen, die zusätzliche Informationen über die Leistung und Stabilität der geprüften Genotypen bieten. In der vorgestellten Untersuchung konnten Umwelten mit ähnlichen Effekten beobachtet werden. Dies galt besonders für NL-Umwelten. So zeigten beispielsweise die Orte Emmendingen und Bernburg im Jahr 1996 auf

der NL-Stufe ähnliche Effekte, während sie sich auf der NH-Stufe unterschieden. Für die Gestaltung von Prüfungen auf N-Effizienz könnte dies bedeuten, dass eine geringere Anzahl von Orten mit niedriger als mit hoher N-Versorgung erforderlich wäre, wenn diese Orte auf der NL-Stufe ähnliche Effekte zeigen.

Desweiteren ließ sich aus dem AMMI-Biplot entnehmen, wie unterschiedlich die Gesamtheit der Genotyp×Umwelt-Interaktionen von dem Faktor Jahr beeinflusst wurden. Es gab Orte, an denen in den aufeinanderfolgenden Anbaujahren ähnliche Interaktionseffekte auf beiden N-Stufen gemessen wurden (Forchheim beregnet und unberegnet), während an anderen Orten diese nur auf der NL-Stufe annähernd gleich waren (Eckartsweier).

Über den Einsatz von Stabilitätsparametern in praktischen Zuchtprogrammen gibt es nur wenige Literaturbefunde. ZAVALA-GARCIA *et al.* (1992) untersuchten anhand von zwei Sorghumpopulationen den zu erwartenden Selektionserfolg bei indirekter Selektion auf die Stabilitätsparameter Regressionskoeffizient ($b = 1$) und die Werte der Hauptkomponenten der AMMI-Analyse ($PCA = 0$) allein und in Kombination mit dem Ertragsmittel. Sowohl der Regressionskoeffizient als auch die PCA-Werte ließen für sich allein nur einen geringen Selektionsfortschritt erwarten. Wurden die Stabilitätsparameter aber mit dem Ertragsmittel zu einem Index kombiniert, so stieg die relative Effizienz in beiden Populationen deutlich an. Auch ESKRIDGE & JOHNSEN (1991) zeigten an Sojabohnen, dass es für die Selektion von Genotypen mit einer breiten Adaptation vorteilhaft ist, Indices anzuwenden, die das Ertragsmittel und einen Stabilitätsparameter beinhalten.

In vielen Studien wird auf die geringe bis moderate Reproduzierbarkeit der Stabilitätsmaße hingewiesen (BECKER & LÉON, 1988; WRICKE & WEBER, 1987). KANG (1998) empfahl daher, für eine zuverlässige Schätzung von Stabilitätsparametern mindestens zehn Umwelten heranzuziehen. SNELLER *et al.* (1997) erwarten eine hohe Reproduzierbarkeit der Stabilitätsparameter, wenn Umwelten mit einer großen Diversität in die Analysen einfließen. Aber nicht allein die Anzahl der Umwelten, sondern vermehrt auch ihre agrarökologischen Bedingungen tragen zu zusätzlichen Informationen über die geprüften Genotypen bei. Dazu lieferte die in dieser Studie angewendete AMMI-Analyse einen wertvollen Beitrag.

Zur Berücksichtigung von Low-Input-Bedingungen (etwa N-Mangel) in der Züchtung bestehen nach HARRER & UTZ (1990) drei Handlungsalternativen. Als erstes ist eine Selektion nur unter hoher N-Versorgung (Handlungsalternative I) denkbar. Die Verbesserung der Leistung bei geringer N-Versorgung erfolgt dabei nur indirekt auf Basis der genotypischen

Korrelationen zwischen den N-Stufen. Handlungsalternative II beschreibt eine kombinierte Selektion, bei der die Leistungen auf beiden N-Stufen in einem Selektionsindex zusammengefasst werden. Die dritte Möglichkeit beinhaltet eine Auftrennung des Zuchtprogrammes zur getrennten Selektion (Handlungsalternative III). Unter Annahme einer gleichen ökonomischen Bedeutung von High- und Low-Input-Sorten, gleichen Heritabilitäten ($h^2 = 0,5$) und einer gleichen Anzahl von Prüforten auf beiden Stufen, ergaben Modellrechnungen, dass ein kombiniertes Zuchtprogramm (Handlungsalternative II) bei genetischen Korrelationen zwischen den N-Stufen von 0,7 - 1,0 zu bevorzugen ist. Bei Korrelationen unter 0,6 schlagen die Autoren hingegen die Durchführung von getrennten Zuchtprogrammen vor. Für das im Rahmen dieses Projektes geprüfte Zuchtmaterial, mit Korrelationen zwischen den N-Stufen von $r = 0,5$, lassen demnach getrennte Zuchtprogramme (Handlungsalternative III) langfristig die höchsten Selektionserfolge erwarten. Die in der Arbeit von LANDBECK (1995) gefundenen hohen Heritabilitätsschätzwerte und hohen genetischen Korrelationen zwischen den N-Stufen sprechen dagegen für eine kombinierte Verbesserung (Handlungsalternative II). Weiterhin analysierte LANDBECK (1995) folgende ökonomische Gewichtungen der Zielkriterien Ertrag auf der NH- und NL-Stufe, welche die mittel- bis langfristig möglichen Marktanteile von High- bzw. Low-Input-Sorten widerspiegeln sollten:

A) 1,0 : 1,0; B) 1,5 : 0,5; C) 0,5 : 1,5.

Für eine Prüfkapazität von vier bis acht Orten wurde bei gleicher Gewichtung der Zielmerkmale (A) der maximale Selektionsgewinn durch eine gleiche Verteilung der Prüfungen auf zwei bzw. vier NH- und NL-Orte erzielt. Eine starke Gewichtung eines der beiden Ziele verschiebt die Prüfverteilung so, dass das Maximum des Selektionsgewinnes bei einer nur ein- bzw. zweiortigen Prüfung des schwach gewichteten Zielmerkmals liegt (B, C).

In der vorliegenden Studie lieferten die NL-Umwelten z.T. sehr ähnliche Informationen über die geprüften Hybriden (Abb. 3.4). Daher liegt es nahe, sowohl in getrennten als auch kombinierten Zuchtprogrammen an einer geringeren Anzahl von NL- als NH-Umwelten zu testen. Inwiefern sich eine solche Aufteilung der Prüfkapazitäten auf den Selektionserfolg auswirkt, sollte Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein. Neben den populationsgenetischen Parametern werden die zu erwartenden Selektionsgewinne sehr stark von den angenommenen ökonomischen Gewichten beeinflusst, die sich aus den Einschätzungen künftiger Marktanteile und der Risikobereitschaft eines Zuchtunternehmens ergeben. Realistisch scheinen die von HARTMANN (1997) gewählten ökonomischen Gewichte von 0,3 : 1 für die NL- bzw. NH-Stufe zu sein, entsprechend den Plänen zur Ausweitung der Wasserschutzgebiete in Deutschland auf 30 % (ANONYMUS, 1995).

Bei der Wahl der Selektionsstrategie stellt sich auch die Frage, ob indirekte Merkmale berücksichtigt werden sollen. BÄNZIGER & LAFITTE (1997) untersuchten an 19 Einzelexperimenten bei einer geringen N-Versorgung den Wert der indirekten Selektionsmerkmale Blühintervall, Chlorophyllgehalt, Kolben je Pflanze und Seneszenz, die im Mittel über alle Experimente genetische Korrelationen zum Kornertrag von $-0,42$; $0,25$; $0,75$ bzw. $0,48$ erreichten. In den meisten Experimenten zeigte sich eine direkte Selektion auf Ertrag der Selektion auf ein einzelnes indirektes Merkmal überlegen. Wurden alle indirekten Merkmale in einem Index kombiniert, so verbesserte sich die Effizienz der Selektion im Mittel um 14% im Vergleich zur alleinigen Selektion auf Ertrag. PRESTERL (1996) verwendete in Modellrechnungen einen Selektionsindex, in dem die Merkmale Kornertrag und Blühintervall ökonomische Gewichte von Eins bzw. Null besaßen. Auf der NL-Stufe betrug die relative Effizienz der Indexselektion im Vergleich zur alleinigen Selektion auf Ertrag $102,4\%$. Aufgrund der in der vorliegenden Arbeit schwachen Korrelation zwischen Kornertrag und Blühintervall auf der NL-Stufe erscheint eine indirekte Selektion mit diesem Merkmal nicht sehr erfolgversprechend zu sein.

4.1.2 Einfluss der Stickstoffeffizienz auf die Trockenstresstoleranz

In der vorliegenden Studie waren überlegene Leistungen für N-Effizienz und Ertragssicherheit nicht wie erwartet mit einer höheren Toleranz gegenüber Trockenstress verbunden. Unter extremen Bedingungen (d.h. ungedüngt und unberegnert) erreichten einige H×H-Hybriden in beiden Versuchsjahren bessere Leistungen als die L×L-Hybriden. Im Mittel unterschieden sich diese beiden Hybridgruppen jedoch nicht signifikant. Dies ist u.a. auf die extremen Prüfbedingungen zurückzuführen, unter denen Bodenheterogenitäten stärker zum Ausdruck kamen, und sich folglich in höheren Versuchsfehlern niederschlugen. Ferner fiel auf, dass der wenig N-effiziente Standard Genotyp 2 unter N-Mangel und Trockenstress besser abschnitt als der N-effiziente Standard Genotyp 4 (Abb. 3.5). Bei der Toleranz gegenüber den Stressfaktoren N-Mangel und Trockenheit scheinen daher unterschiedliche Mechanismen zum Tragen zu kommen, über die aufgrund der Daten eines Standortes mit zwei Jahren nur spekuliert werden kann.

Es ist bekannt, dass Mais besonders während der Blüte empfindlich auf Trockenstress reagiert (WESTGATE & BOYER, 1986; WESTGATE & THOMSON GRANT, 1989). Das Ausmaß des Trockenstresses zum Zeitpunkt der Blüte (zweite Julihälfte) unterschied sich in den beiden Prüffahren und spiegelte sich auch in den Ertragsleistungen der unberegneten NL-Stufe wider. Im Jahr 1996 waren die Monate Juni und Juli durch ca. 20 mm geringere Niederschläge

im Vergleich zum langjährigen Mittel gekennzeichnet. Im darauf folgenden Jahr (1997) fielen dagegen im gleichen Zeitraum deutlich höhere Niederschläge (Tab. 7.2b). Es liegt nahe, die bessere Leistung der H×H-Hybriden im Vergleich zu den L×L-Hybriden auf der unberechneten NL-Stufe mit dem unterschiedlichen Blühverhalten zu erklären (siehe auch Tab. 3.5). Die H×H-Hybriden blühten später und wiesen zusätzlich ein größeres Blühintervall auf (Daten nicht gezeigt). Wenn dieses Blühverhalten jedoch unter diesen Bedingungen (NL und unberechnet) allgemein von Vorteil wäre, so müsste es sich auch bei Hybridgruppen mit ähnlichem Blühverlauf (L×H) in vergleichbar höheren Ertragsleistungen niederschlagen. Dementsprechend würden dann auch Hybridgruppen mit einem frühen Blühtermin (K×K) ähnlich ungünstige Auswirkungen auf den Ertrag wie die L×L-Hybriden zeigen. Solche eindeutigen Schlussfolgerungen ließen die vorliegenden Ergebnisse jedoch nicht zu. Es sind daher weitere gezielte Studien erforderlich, um die Beziehungen zwischen Blüh- und Ertragsverhalten unter reduzierten Bedingungen mit zusätzlichem Trockenstress zu untersuchen.

In der Literatur finden sich zur Verbesserung der Trockenstresstoleranz hauptsächlich Studien, die an tropischem Maismaterial durchgeführt wurden. BOLAÑOS & EDMEADES (1993a, b) wiesen nach, dass eine Leistungssteigerung unter Trockenstress mit einer Verringerung des Blühintervalls einhergeht. Nach acht Selektionszyklen konnte eine Reduktion des Blühintervalls von 34 Tagen auf 10 Tage festgestellt werden, was eine durchschnittliche Reduktion des Blühintervalls von drei Tagen oder 16 % pro Zyklus ergibt. Nach weitergehenden Untersuchungen unter Trockenstressbedingungen zeigten sich zwischen Blühintervall und Korntrag negative genetische Korrelationen von 0,5 - 0,6, die auf eine gute Eignung als indirektes Selektionsmerkmal schließen lassen (BOLAÑOS & EDMEADES, 1996). Das vorgestellte europäische Zuchtmaterial wies mit einem Blühintervall von maximal zwei Tagen eine recht gute Synchronisation zwischen der Blüte der männlichen und weiblichen Infloreszenzen auf. Eine signifikante phänotypische Korrelation zwischen den Merkmalen Blühintervall und Korntrag konnte nur im Jahr 1996 auf der NL-Stufe (berechnet sowie unberechnet) nachgewiesen werden. Im folgenden Jahr (1997) war diese Beziehung nicht signifikant (Daten nicht gezeigt). Daher erscheint eine Selektion auf das Merkmal Blühintervall zur Verbesserung der Trockenstresstoleranz für das vorgestellte Material nicht sehr erfolgversprechend.

Die verzögerte Seneszenz der Blätter, oft auch als Stay-Green bezeichnet, wird häufig als indirektes Selektionsmerkmal diskutiert, um die Kornfüllung unter Trockenstress zu verbessern (BLUM, 1998). Nach THOMAS & SMART (1993) sind Unterschiede im Stay-Green-Verhalten zu beobachten und zwar hinsichtlich der Länge der Photosynthese- und Chlorophyllaktivität sowie dem Zeitpunkt des Einsetzens der Seneszenz. Genotypen, die über

einen langen Zeitraum grüne Blätter zeigen und photosynthetisch aktiv sind, können einen höheren Ertrag erzielen, wenn die Produktion von Kohlenhydraten einen limitierenden Faktor für die Ertragsleistung darstellt. Allerdings gibt es auch Genotypen, die zwar eine grüne Blattfarbe aufweisen, jedoch keine Photosynthese mehr betreiben und in dieser Zeit sicherlich keine höheren Ertragszuwächse verzeichnen. Sofern sie aber ein akzeptables Ertragsniveau erreichen, sind sie gewiss auch in Elitezuchtmaterial zu finden (THOMAS & SMART, 1993).

Umfangreiche Untersuchungen zur Verbesserung Stresstoleranz konnten zeigen, dass die Selektion nicht nur unter N-Mangel sondern auch bei Trockenheit zu signifikanten Veränderungen des Chlorophyllgehaltes und der Anzahl grüner Blätter führte (BOLAÑOS & EDMEADES, 1993a, b; BOLAÑOS & EDMEADES, 1996; BOLAÑOS *et al.* 1993; LAFITTE & EDMEADES, 1994 a-c). In der vorliegenden Untersuchung konnte jedoch keine signifikante Beziehung zwischen der Stay-Green-Bonitur und der Korntrockenmasse nachgewiesen werden. Weder auf der unberegneten noch auf der beregneten NL-Stufe waren signifikanten Unterschiede zwischen den H×H- und L×L-Hybriden zu beobachten (Daten nicht gezeigt).

Aufgrund der in dieser Arbeit geringen und nicht immer signifikanten Korrelationen des Chlorophyllgehaltes und der Stay-Green-Bonitur mit der Korntrockenmasse muss ihr Einsatz als indirekte Selektionsmerkmale zur Verbesserung der Trockenstresstoleranz kritisch beurteilt werden. Auch in den Untersuchungen von BOLAÑOS & EDMEADES (1996) an tropischem Material wurden unter Trockenstress nur geringe Korrelationen zum Ertrag beobachtet, obwohl die Heritabilitäten der beiden indirekten Merkmale auf mittlerem Niveau lagen. Ein direkter Vergleich der Merkmale Stay-Green-Bonitur und Chlorophyllgehalt war im Rahmen der vorliegenden Studie leider nicht möglich, da die Bestimmung in zwei unterschiedlichen Jahren erfolgte. Unter günstigen Umweltbedingungen könnte die Selektion auf eine Stay-Green-Bonitur zudem zu einer Bevorzugung von Genotypen führen, die nicht in der Lage sind, ihre Assimilatreserven in den Stängeln und Blättern für die Kornfüllungsphase zu nutzen (BLUM, 1998). In der Tat wurden in Silomaisexperimenten enge Beziehungen zwischen der Restpflanzentrockenmasse und der Stay-Green-Bonitur beobachtet (HARTMANN, 1999).

Die Merkmale Blühintervall, Chlorophyllgehalt und Stay-Green-Bonitur werden sowohl zur Verbesserung der N-Effizienz als auch zur Erhöhung der Toleranz gegenüber Trockenstress eingesetzt (BOLAÑOS & EDMEADES, 1993a, b; LAFITTE & EDMEADES, 1994 a-c). Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Selektion unter NL-Bedingungen zu einer erhöhten Trockenstresstoleranz führen könnte und umgekehrt. Befunde von LAFITTE & BÄNZIGER

(1997) ließen jedoch keine parallelen Effekte zwischen einer Selektion unter geringer N-Versorgung und einer verbesserten Leistung unter Trockenstressbedingungen erkennen. Dagegen führte die Selektion auf Trockenstresstoleranz zu einer Erhöhung des Ertrages bei niedriger N-Versorgung (BÄNZIGER *et al.*, 1999; LAFITTE & EDMEADES, 1995a, b). Es ist unklar, warum über eine Verbesserung der Trockenstresstoleranz die Leistung unter N-Mangel erhöht werden konnte, aber nicht umgekehrt die Trockenstresstoleranz über die Selektion unter N-Mangelbedingungen. Da Stickstoff als Prüffaktor besser steuerbar ist als Trockenheit, die jedes Jahr in unterschiedlichem Ausmaß auftreten kann, wäre zu erwarten, dass über diesen Weg indirekt auch die Trockenstresstoleranz erhöht werden könnte. Ob diese Strategie eine erfolgversprechende Alternative darstellt, kann auf der Basis des vorliegenden Datensatzes nicht abschließend beurteilt werden. Dazu sind weitere Experimente über mehrere Prüfforte und Jahre erforderlich. Aufgrund der hohen Interaktionen mit dem Faktor Jahr wären mehrjährige Analysen besonders zu empfehlen.

Eine weitere Möglichkeit, die Trockenstresstoleranz zu verbessern könnte darin bestehen, markergestützte Selektion in ein Zuchtprogramm zu integrieren. RIBAUT *et al.* (1996, 1997) fanden QTL für den Blühtermin der männlichen und weiblichen Infloreszenzen, die 48 % der phänotypischen Varianz unter Trockenstress erklärten. Für das Blühintervall wurden sechs QTL nachgewiesen, welche zusammen für fast 47 % der phänotypischen Varianz verantwortlich waren. Es konnten genomische Regionen identifiziert werden, die sowohl für die Expression des Blühintervalls als auch der Korntrockenmasse verantwortlich sind. Die Autoren schlugen vor, eine kombinierte Selektionsstrategie zu verfolgen, bei der QTL genutzt werden, die an der Ausprägung von Schlüsselmerkmalen wie z.B. dem Blühintervall und dem Ertrag beteiligt sind.

4.1.3 Heterosiszuwachs und Kombinationsfähigkeit nach Selektion auf divergenten Stickstoffstufen

Als Heterosis wird in der Regel die Überlegenheit einer Kreuzung (F_1) gegenüber dem Mittel ihrer homozygoten Eltern bezeichnet. In der vorliegenden Untersuchung wurden die Elternlinien jedoch nicht mitgeprüft. Über den Vergleich der Hybriden des Typs (H×L und L×H) *versus* (H×H und L×L) konnte jedoch eine Aussage über die Ausprägung des Heterosiszuwachses getroffen werden. Die Kombination von Elternlinien unterschiedlicher N-Effizienz führte auf keiner N-Stufe zu einer signifikanten Erhöhung der Heterosiszuwachses für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt (Tab. 3.12). Die bisher durchgeführten Selektionszyklen scheinen nur geringe Verschiebungen in den Genfrequenzen

bewirkt und folglich die genetische Distanz zwischen den Eltern kaum beeinflusst zu haben. Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass weitaus mehr Selektionszyklen nötig sind, um größere Unterschiede bezüglich der genetischen Divergenz der Eltern zu erreichen. Untersuchungen von PALEOLOG & LORKIEWICZ (1991) an *Drosophila melanogaster* zeigten, dass erhöhte Heterosis nach 28 Zyklen divergenter Selektion (unter günstigen und ungünstigen Umweltbedingungen) nachgewiesen werden konnte. Nach 14 Selektionszyklen auf mittlerem N-Niveau stellten MOLL *et al.* (1994) bei Mais signifikante Heterosis (gemessen als Differenz zwischen dem Mittel der Hybridpopulation und dem Mittel der Elternpopulation) für den Kornertrag auf allen drei geprüften N-Stufen (56, 140 bzw. 224 kg N ha⁻¹) fest. Die Heterosis für die Merkmale Trockenmasseakkumulation und N-Akkumulation war dagegen nur auf der hohen und z.T. auf der mittleren N-Stufe signifikant.

Der faktorielle Kreuzungsaufbau eignete sich dazu, die Effekte der allgemeinen (GCA) und spezifischen (SCA) Kombinationsfähigkeit der fünf verschiedenen Hybridgruppen getrennt zu analysieren (Tab. 3.10). Die signifikante Überlegenheit der L×L-Hybriden auf der NL-Stufe war in weiten Teilen auf die GCA und dabei im besonderen auf diejenige der Flint-Linien zurückzuführen. Bei den H×H-Hybriden waren dagegen die SCA-Effekte relevanter. Dies steht in Übereinstimmung mit Befunden von LANDBECK (1995), der in einem vorangegangenen Projekt GCA- und SCA-Effekte von H×H- und L×L-Hybriden auf drei N-Stufen untersuchte. In seiner Studie wiesen die L×L-Hybriden auf der NH-Stufe bedeutende GCA-Effekte der Flint-Linien auf, während in der vorliegenden Untersuchung die GCA-Effekte der Flint- und Dent-Linien auf dieser N-Stufe ähnliche Werte erreichten. LANDBECK (1995) und auch PRESTERL (1996) berichteten von signifikanten Interaktionen zwischen der N-Versorgung und den GCA- bzw. SCA-Effekten. Bei PRESTERL (1996) waren die Interaktionen zwischen den N-Stufen und den GCA-Effekten der Flint-Linien besonders deutlich ausgeprägt. Dagegen zeigte diese Interaktion bei LANDBECK (1995) nur bei den L×L-Hybriden größere Relevanz. Auch die überlegene Leistung der K×K-Hybriden auf beiden N-Stufen in der vorliegenden Untersuchung kann auf die große Bedeutung der GCA-Effekte der Flint-Linien zurückgeführt werden, die auf der NH-Stufe um einiges höher als auf der NL-Stufe waren. Das Leistungsverhalten der in dieser Arbeit untersuchten Hybriden wurde hauptsächlich durch GCA-Effekte erklärt. Demzufolge wird die genotypische Reaktion auf den unterschiedlichen N-Niveaus stark von additiv genetischen Effekten bestimmt. Auch Untersuchungen von BELOW *et al.* (1997) an 15 Einfachhybriden auf zwei N-Stufen, die auf ein Diallel von sechs Linien zurückgingen, ergaben höhere GCA- als SCA-Effekte für die von ihnen untersuchten Merkmale. Dabei unterschieden sich die GCA-Effekte der einzelnen Linien auf den beiden N-Versorgungsstufen. Oft erreichten Linien mit hoher GCA auf der niedrigen N-Stufe nur geringe Werte auf der hohen N-Stufe und umgekehrt.

Die Schätzung der GCA- und SCA-Effekte basierte auf der Flint- und Dentseite jeweils nur auf drei Linien, sodass sich die Aussagefähigkeit auf das geprüfte Material beschränken muss und keine allgemeinen Schlussfolgerungen getroffen werden können. Das gilt auch für die Untersuchungen von LANDBECK (1995) und PRESTERL (1996), denen ebenfalls nur eine geringe Stichprobe zu Grunde lag. Besonders die Effekte der GCA für die verschiedenen Hybridgruppen (Tab. 3.11a, b) machen deutlich, wie stark die Ergebnisse von einzelnen Linien beeinflusst wurden. Dabei zeigten einige Linien auf beiden N-Stufen für die dargestellten Merkmale durchweg positive GCA-Effekte, andere dagegen trugen für das eine Merkmal positive und für das andere dagegen negative Werte. Zudem gab es Linien, welche in der Ausprägung der GCA-Effekte auch innerhalb einer N-Stufe stark variierten. Dies steht in Übereinstimmung mit obiger Studie von BELOW *et al.* (1997), in welcher ebenfalls über ein unterschiedliches Verhalten der untersuchten Linien auf den beiden geprüften N-Stufen berichtet wurde.

4.2 Auswirkungen einer reduzierten Stickstoffversorgung auf die Konkurrenzeffekte in Feldexperimenten

Im Konkurrenzexperiment wurden auf der NL-Stufe für die Randparzellen durchschnittlich höhere Kornerträge als für die Kernparzellen festgestellt. Ein entgegengesetztes Bild zeigte sich auf der NH-Stufe (Tab. 3.14). Ein Vergleich der Hybridgruppen auf der NL-Stufe ergab für die Randparzellen der H×H- und L×L-Hybriden höhere Erträge als für die Kernparzellen, während die K×K-Hybriden nicht auf den Parzellentyp reagierten (Tab. 3.15). In der Regel ist davon auszugehen, dass die zwei mittleren Reihen einer vierreihigen Parzelle weitestgehend die sortentypische Reaktion eines Reinbestandes unter den Bedingungen in der landwirtschaftlichen Praxis widerspiegeln (SCHMIDT *et al.*, 1995). Die Ergebnisse der vorgestellten Studie zeigen, dass die Kornerträge auf der NL-Stufe bei der Anlage von zweireihigen Parzellen (in dem vorgestellten Experiment die beiden Randeihen der vierreihigen Parzelle) im Vergleich zum Reinbestand überschätzt werden.

Als Maß für den Vergleich der untersuchten Parzellentypen aus der NL-Stufe kann die Fehlervarianz herangezogen werden. In der Serienanalyse, aber auch an den Einzelorten, waren die Fehlervarianzen der Randparzellen immer höher als die der Kernparzellen, die geringsten Werte zeigten jeweils die vierreihigen Parzellen, als größte Parzellenform. In einem Weizenexperiment stellten UTZ *et al.* (1976) eine ähnliche Tendenz fest, mit Zunahme der Parzellengröße beobachteten sie sinkende Werte für die Fehlervarianz. Auch BOWMAN (1989) nutzte die Fehlervarianzen für die Bewertung verschiedener Parzellentypen (zweireihige Rand- und

Kernparzellen sowie vierreihige Parzellen) bei Mais, allerdings unter optimaler N-Versorgung. Die relative Effizienz ergab sich aus dem Verhältnis zwischen der Fehlervarianz der Rand- und der Kernparzelle bzw. zwischen derjenigen der Kern- und der vierreihigen Parzelle, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der benötigten Testfläche. Die von den Autoren ausgewerteten 18 Einzelexperimente zeigten im Mittel eine relative Überlegenheit der vierreihigen Parzelle im Vergleich zur Beerntung von zwei Kernreihen. Unter der Annahme der Nutzung gleichgroßer Testflächen ergab sich jedoch eine höhere relative Effizienz für die Anlage zweireihiger Randparzellen gegenüber den Kernparzellen, weil so mit einer verdoppelten Anzahl von Wiederholungen geprüft werden kann. Die Anwendung der relativen Effizienz nach BOWMAN (1989) auf das vorliegende Experiment führte unter NL-Bedingungen zu dem gleichen Ergebnis (Daten nicht gezeigt). Über eine höhere Anzahl Wiederholungen kann der Einfluss der Fehlervarianz reduziert werden. Verzerrungen durch Konkurrenzeffekte, beispielsweise ausgelöst durch unterschiedliche Wuchshöhen, bleiben jedoch bestehen.

Eine weitere Möglichkeit, die relative Vorzüglichkeit der untersuchten Parzellentypen zu bewerten, besteht in einem Vergleich des zu erwartenden Selektionserfolges für das Merkmal Ertrag. Der Selektionserfolg (G) berechnet sich nach folgender Formel:

$$G(y) = i h_x r_{xy} \sigma_y$$

Darin bezeichnen i = Selektionsintensität, h_x = Wurzel aus der Heritabilität der Testeinheit, r_{xy} = Korrelation zwischen Test- und Zieleinheit, σ_y = Wurzel der genotypischen Varianz der Zieleinheit. Unter der vereinfachenden Annahme, dass i und σ_y für alle Betrachtungen gleich sind, ergibt sich als Vergleichskriterium das Produkt $h_x r_{xy}$. Als Zieleinheit wird die Leistung einer vierreihigen Parzelle mit Kernbeerntung angesehen, da hier nur intragenotypische Konkurrenz herrscht und die sortentypische Reaktion eines Reinbestandes am ehesten widerspiegelt wird. Als Testeinheit sollen die vierreihige Parzelle und die zweireihige Randparzelle untersucht werden. Es wird angenommen, dass die untersuchten Parzellentypen gleiche Testkapazitäten beanspruchen, d.h. die Randparzellen können mit doppelter Anzahl von Wiederholungen geprüft werden. Für das vorliegende Experiment konnte auf der NL-Stufe eine Überlegenheit der Kernbeerntung gegenüber der vierreihigen Parzelle beobachtet werden. Auf der NH-Stufe waren die Unterschiede dagegen nicht sehr deutlich ausgeprägt (Tab. 4.2).

Wenn nur die Ernte der Kernreihen geplant ist, stellt sich die Frage, ob Kern- und Randreihen unterschiedliche Behandlungen erhalten sollten. Aus Kostengründen könnte darüber nachgedacht werden, auf das Vereinzeln der Randreihen zu verzichten. ESGAR & BULLOCK (1999) fanden jedoch, dass die Versuchsfehler in nicht vereinzelt Randreihen höher als in den vereinzelt Randreihen waren.

Tab. 4.2: Bewertung des Parzellentyps anhand der Komponenten des Selektionserfolges getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für das Merkmal Korntrag aus der Serie über vier Umwelten in **Experiment 2**

Variante†	Komponenten des Selektionserfolges ‡		
	h^2	$r_{\text{phän}}$	$h r_{\text{phän}}$
NL-Stufe			
4R, 2Wdh.	0,77	0,92	0,81
Rand, 4Wdh.	0,72	0,83	0,7
Kern, 2Wdh.	0,77	1	0,88
NH-Stufe			
4R, 2Wdh.	0,82	0,96	0,87
Rand, 4Wdh.	0,81	0,9	0,81
Kern, 2Wdh.	0,82	1	0,91

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

Wdh. = Wiederholung.

‡ h^2 = Heritabilität, $r_{\text{phän}}$ phänotypische Korrelation.

Von BÄNZIGER *et al.* (1995) liegt eine Studie zu Konkurrenzeffekten auf unterschiedlichen N-Stufen vor, die auf 72 zufällig ausgewählten S_1 -Nachkommen basiert. An einem Standort wurden auf zwei N-Stufen ein-, zwei- und vierreihige Parzellen angelegt, wobei von letzterem Parzellentyp nur die zwei Kernreihen beerntet wurden. Im Gegensatz zur vorgestellten Untersuchung ergaben sich keine signifikanten Interaktionen zwischen Parzellentyp und Genotyp (Tab. 3.13). Abweichend von der vorliegenden Untersuchung zeigten die vierreihigen Parzellen auf beiden N-Stufen die höchsten Fehlervarianzen für das Merkmal Ertrag. Dies wurde von den Autoren damit erklärt, dass die vierreihigen Parzellen eine doppelt so große Fläche bedeckten, bei der Bodenheterogenitäten stärker zum Ausdruck gekommen sein könnten.

Das Konkurrenzverhalten von Maishybriden wird nachweislich von deren Wuchshöhe beeinflusst (PENDLETON & SEIF, 1962; CASTLEBERRY, 1986). So könnte der höhere Wuchs eine Ursache dafür sein, dass auf der NL-Stufe die H×H- und L×H Hybriden die größten Abweichungen zwischen Rand- und Kernparzellen aber auch zwischen Kern- und vierreihiger Parzelle zeigten (Tab. 3.15). Vermutlich wurden die Ertragsleistungen dieser beiden Hybridgruppen auf der NL-Stufe auch in den Experimenten 1 und 3 überschätzt, da die Daten an zweireihigen Parzellen erfasst wurden. Die Hybriden innerhalb der verschiedenen Gruppen

wiesen eine große Variabilität bezüglich ihres Konkurrenzverhaltens auf, welches nicht durchgängig von der Wuchshöhe beeinflusst war (Abb. 3.6a, b). Dies deutet darauf hin, dass neben der Wuchshöhe weitere Pflanzeigenschaften einen Einfluss auf das Konkurrenzverhalten haben.

Hybriden mit guter Jugendentwicklung zeigten auf der NL-Stufe eine hohe Konkurrenzkraft, diese Beziehung war dagegen auf der NH-Stufe nicht von Bedeutung (Tab. 3.16). Eine frühe Etablierung im Feld scheint demnach unter limitierter N-Versorgung einen entscheidenden Konkurrenzvorteil darzustellen. Diese Zeit kann für die Ausbildung des Wurzelsystems und des Blattapparates genutzt werden. So ist es möglich früher als Nachbarn, die eine langsame Jugendentwicklung aufweisen, mit der Nährstoffaufnahme und der Assimilation zu beginnen. Die gering bis moderate negative Beziehung zwischen dem Konkurrenzeffekt und den Blühterminen der männlichen und weiblichen Infloreszenzen auf der NL-Stufe deutet darauf hin, dass eine spätere Blüte und somit eine insgesamt längere vegetative Phase einen Einfluss auf das Konkurrenzverhalten haben könnte. Diese Beziehung zwischen dem Konkurrenzverhalten und den Blühmerkmalen war auf der NH-Stufe etwas stärker ausgeprägt. In Nachbarschaftsanalysen stellten BÄNZIGER *et al.* (1995) fest, dass bei hoher N-Versorgung Genotypen mit früh blühenden Nachbarn bessere Leistungen aufwiesen als solche deren Nachbarn später blühten. Dies steht in Übereinstimmung mit Untersuchungen von GENTER (1958), der über eine geringere Konkurrenzkraft früher Maishybriden im Vergleich zu später blühenden berichtete. Auf der niedrigen N-Stufe zeigten die Ergebnisse von BÄNZIGER *et al.* (1995) jedoch ein entgegengesetztes Bild, hier waren die Genotypen mit spätblühenden Nachbarn überlegen. Im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchungen scheinen unter tropischen Verhältnissen Genotypen mit einem früheren Blühtermin einen Vorteil bei der Konkurrenz um den in begrenztem Umfang zur Verfügung stehenden Stickstoff zu haben.

Es finden sich in der Literatur mehrere biometrisch-statistische Methoden, die zur Korrektur von Konkurrenzeffekten vorgeschlagen werden. KEMPTON (1982) empfahl eine Adjustierung mittels der Regression des Parzellenertrages auf die Erträge der Nachbarparzellen. GOLDRINGER *et al.* (1994) untersuchten verschiedene Methoden, um die Ertragsschätzungen von einreihigen Versuchen bei Weizen zu verbessern. Die Genauigkeit der Schätzwerte konnte durch die Verwendung einer aus Wuchshöhenunterschieden zwischen den Nachbarparzellen abgeleiteten Kovariablen erheblich verbessert werden. UTZ *et al.* (1984) wiesen darauf hin, dass die Wahl des Adjustierungsverfahrens ein schwieriges Problem darstellt. Vor jeder biometrischen Ausgleichsrechnung sollten nach Meinung der Autoren zuerst die versuchstechnischen Möglichkeiten zur Verminderung von Konkurrenzeffekten ausgeschöpft werden, u.a. durch das Gruppieren der Kandidaten nach Ertrag, Wuchshöhe oder Reife.

4.3 Einfluss der Stickstoffversorgung auf die Komponenten der Stickstoffeffizienz

Eine verbesserte N-Effizienz unter N-Mangelbedingungen war nach den vorliegenden Ergebnissen auf eine erhöhte Fähigkeit zur N-Verwertung zurückzuführen. Auf der NH-Stufe hatte dagegen die N-Aufnahme eine größere Bedeutung (Tab. 3.20 und 3.21). KAMPRATH *et al.* (1982) untersuchten die N-Effizienz von Maispopulationen, die durch acht Zyklen Vollgeschwisterfamilien bzw. durch Reziproke Rekurrente Selektion verbessert worden waren. Im Vergleich zur Ausgangspopulation wiesen beide Populationen eine höhere N-Effizienz auf, die sowohl durch höhere N-Aufnahme als auch durch eine höhere N-Verwertungseffizienz bedingt war. Dabei trugen im Gegensatz zur vorliegenden Studie beide Parameter mit gleichen Anteilen zur Variation der N-Effizienz der selektierten Populationen bei. In Übereinstimmung mit KAMPRATH *et al.* (1982) wurde der Harvest-Index durch die Selektion nur wenig beeinflusst.

Auf der NL-Stufe konnten weder zwischen den Hybridgruppen noch zwischen den Kreuzungen innerhalb der Gruppe signifikante Unterschiede für die Merkmale N-Aufnahme sowie Trockenmassezuwachs und N-Aufnahme zur Blüte beobachtet werden (Tab. 3.17). Die N-Aufnahme wird bei geringem Nährstoffangebot stärker als bei hoher N-Versorgung von morphologischen Wurzeigenschaften (z.B. Wurzeloberfläche, Wurzelradius, Wurzelbehaarung) bestimmt. In der vorliegenden Arbeit wurden keine Wurzeluntersuchungen durchgeführt. Es liegen jedoch Ergebnisse einiger ausgewählter Genotypen vor, die im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit Prof. Dr. C. Engels und Dr. I. Paponov aus dem Institut für Pflanzenernährung der Universität Hohenheim studiert wurden. Die als Standards eingesetzten Genotypen 4 (N-effizient) und 2 (nicht N-effizient) unterschieden sich in einem Gefäßexperiment weder im mittleren Wurzelradius noch in der spezifischen Wurzellänge (ENGELS & PAPONOV, 1998). WIESLER & HORST (1994) hingegen fanden in Feldversuchen eine positive Korrelation zwischen der Nitrataufnahme aus dem Unterboden und der Durchwurzelung des Unterbodens. Diese Beobachtung konnte von REIDENBACH (1997) bestätigt werden. Genotypische Unterschiede bezüglich der Auswirkung des N-Angebotes im Boden auf das Wurzelwachstum wiesen MACKAY & BARBER (1986) nach. REIDENBACH (1997) berichtete, dass bei niedrigen Nitratgehalten eine signifikant positive Beziehung zwischen der Wurzellängendichte und der Abnahme der Nitratgehalte im Boden bestand. Bei hohem Nitratgehalt war dieser Zusammenhang deutlich schwächer ausgeprägt. Dagegen konnte HEUBERGER (1998) in einer Untersuchung an tropischem Material keine eindeutigen Beziehungen zwischen der Wurzellängendichte und der N-Aufnahme nachweisen.

Die Effizienz der Aufnahmemechanismen kann mit Hilfe der Aufnahmekinetik beschrieben werden (ENGELS & MARSCHNER, 1995). Bei Mais wurden genotypische Unterschiede in der maximalen Aufnahme rate (V_{max}) und der Nährstoffkonzentration, bei der die halbe maximale Aufnahme rate erreicht wird (K_m), beobachtet (PACE & McCLURE, 1986). ENGELS & PAPONOV (1998) konnten zwischen dem N-effizienten Genotyp 47 (L×L-Hybride) und dem nicht N-effizienten Standard (Genotyp 2) keine Unterschiede im N-Aufnahmevermögen nach der Blüte nachweisen. Die maximale Aufnahmekapazität der Wurzeln nahm zwar nach der Blüte ab, die Wurzeln konnten jedoch unabhängig vom Genotyp bis kurz vor der physiologischen Reife Stickstoff aufnehmen. Die N-Aufnahme zur Blüte scheint aber aufgrund der vorliegenden Ergebnisse eher bei einer hohen N-Versorgung von Bedeutung zu sein, denn nur auf dieser N-Stufe konnte eine genetische Variabilität und eine mittelstarke Korrelation zum Kornertrag beobachtet werden.

Die auf der NH-Stufe große Bedeutung der N-Aufnahme im Vergleich zur N-Verwertung zeigte sich in der engeren Korrelation zum Kornertrag als dem Maß für die N-Effizienz (Tab. 3.21). In der Studie von MOLL *et al.* (1982) trugen ebenfalls Unterschiede in der N-Aufnahme zur Variation der N-Effizienz bei. Im Gegensatz dazu konnten bei LAFITTE & EDMÉADES (1994a, b) nach mehreren Selektionszyklen keine signifikanten Veränderungen in der N-Aufnahme auf den beiden N-Stufen beobachtet werden.

Die tendenziell höhere Ertragsleistung der L×L- und K×K-Hybriden auf der NL-Stufe war auf eine signifikant höhere N-Verwertung zurückzuführen (Tab. 3.20). Dies steht in Übereinstimmung mit Befunden von LAFITTE & EDMÉADES (1994a, b) nach mehreren Selektionszyklen sowie mit MOLL *et al.* (1982). Dagegen kam PRESTERL (1996) im vorangegangenen Projekt zu entgegengesetzten Ergebnissen. Die in seiner Arbeit auf der NL-Stufe hohe N-Effizienz der L×L-Hybriden war mit einer signifikant höheren N-Aufnahme verbunden, während die N-Verwertung im Vergleich zu den H×H-Hybriden unverändert blieb. Diese widersprüchlichen Ergebnisse machen deutlich, dass die Auswahl der Elternlinien und ihre Kombination zu den fünf Hybridgruppen einen maßgeblichen Einfluss gehabt haben. Konträre Befunde bezüglich der Bedeutung der N-Aufnahme und N-Verwertung für die N-Effizienz sind auch in anderen Studien zu finden. MOLL *et al.* (1987) berichteten abweichend von früheren Ergebnissen (MOLL *et al.*, 1982), dass N-Aufnahme und N-Verwertung gleichermaßen an der Ausprägung der N-Effizienz beteiligt waren. Die unstimmgigen Ergebnisse wurden mit dem Vorhandensein von Genotyp-Umwelt-Interaktionen erklärt.

Die unterschiedlichen Befunde machen deutlich, dass die Ergebnisse sehr stark vom genetischen Material, den versuchstechnischen Bedingungen und den Prüfumwelten abhängig sind. Letzteres zeigte sich in den für fast alle Merkmale signifikanten bis hochsignifikanten Genotyp×Umwelt-Interaktionen.

In vielen Studien zur Verbesserung der N-Effizienz wird der Blattchlorophyllgehalt gemessen (LAFITTE & EDMEADES, 1994a; BÄNZIGER & LAFITTE, 1997). Die genotypische Korrelation zum Ertrag auf der niedrigen N-Stufe lag bei BÄNZIGER & LAFITTE (1997) im Mittel über 19 Experimente mit tropischem Maismaterial bei $r = 0,25$; in den einzelnen Experimenten reichten die Werte von $-0,31$ bis $+0,62$. PRESTERL (1996) fand bei der Auswertung von 19 Experimenten mit europäischem Mais eine mittlere phänotypische Korrelation von $r = 0,23$; die Einzelexperimente zeigten jedoch eine Spannweite von $-0,06$ bis $+0,66$. HEUBERGER (1998) berichtete von engen Beziehungen zwischen dem Chlorophyllgehalt und der Korntrockenmasse unter N-Mangel, bei hoher N-Versorgung wurde keine Signifikanz erreicht. In der vorliegenden Untersuchung konnte auf der NL-Stufe keine signifikante Korrelation zwischen diesen Merkmalen nachgewiesen werden (Tab. 3.21). Dies galt auch für eine Serienverrechnung über alle sieben Orte, an denen im Jahr 1996 der Chlorophyllgehalt bestimmt wurde (Daten nicht gezeigt).

Die große Bedeutung der N-Verwertung auf der NL-Stufe spiegelte sich in der engen positiven Beziehung zum Kornertrag wider (Tab. 3.21). Obwohl bei PRESTERL (1996) die N-Verwertung für die Unterschiede in der N-Effizienz von geringerer Relevanz war, konnten ähnlich hohe Korrelationen für die von ihm geprüften L×L- und H×H-Hybriden beobachtet werden. Die Beziehung zwischen der N-Aufnahme und der N-Verwertungseffizienz war in der vorliegenden Untersuchung auf beiden N-Stufen moderat und negativ (Tab. 3.22), während sie bei PRESTERL (1996) nur auf der NH-Stufe ein negatives Vorzeichen führte und auf der NL-Stufe kein einheitliches Bild für die L×L- und H×H-Hybriden zu erkennen war. Die von MOLL *et al.* (1987) gefundene phänotypische Korrelation zwischen diesen beiden Merkmalen lag bei $r = -0,3$, sie wurde über zwei N-Stufen ermittelt und ist daher nur bedingt mit dem vorgestellten Experiment vergleichbar. In einer früheren Veröffentlichung schlugen MOLL *et al.* (1983) vor, Linien mit hoher N-Aufnahme und solche mit hoher N-Verwertung zu kombinieren, um somit eine Steigerung der N-Effizienz zu erreichen. Experimentelle Ergebnisse wurden von diesen Autoren bisher aber nicht berichtet. Aufgrund der in der vorliegenden Untersuchung mittleren negativen Korrelation zwischen diesen Merkmalen (Tab. 3.22) erscheint eine Verbesserung der N-Effizienz auf diese Weise nicht einfach. Die ertragreichsten Hybriden auf der NL-Stufe besaßen eine überdurchschnittliche Fähigkeit zur N-Verwertung im Vergleich zu einer eher durchschnittlichen N-Aufnahme.

Durch die effektive Umsetzung der gebildeten Biomasse in einen hohen Kornertrag, d.h. einen hohen Harvest-Index, wurde eine hohe N-Verwertung erreicht. In der Literatur liegen Berichte über eine enge Beziehung zwischen dem Kornertrag und dem Harvest-Index auf der niedrigen N-Stufe vor (LAFITTE & EDMÉADES, 1994a; BELOW *et al.*, 1997). Auch der N-Harvest-Index wies eine enge Beziehung zur N-Verwertung auf (Tab. 3.22). Dieser Parameter gibt Auskunft über die Fähigkeit, Stickstoff aus vegetativen Organen in die Körner umzulagern. Er reflektiert somit das Ergebnis einer Vielzahl von Prozessen im N-Metabolismus, und kann als wertvolles Kriterium für deren Effizienz gelten. Die Korrelation des Harvest-Index zum Ertrag auf der NL-Stufe war in der vorliegenden Studie abweichend von den Ergebnissen von DI FONZO *et al.* (1982) und LAFITTE & EDMÉADES (1994a) nur gering (Tab. 3.21).

Eine hohe N-Verwertung ist abhängig von einer effektiven N-Verteilung innerhalb der Pflanze und dem speziellen N-Bedarf für einzelne Prozesse der CO₂-Assimilation (ENGELS & MARSCHNER, 1995). Mit der N-Verwertung zeigten auf der NL-Stufe die Merkmale N-Remobilisierung, die Harvest-Indizes und die Sinkstärke eine enge positive Korrelation (Tab. 3.22, Abb. 3.11-3.13). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit machen deutlich, dass mit zunehmendem N-Mangel Umbau- und Transportprozesse innerhalb der Pflanze erheblich an Bedeutung gewinnen.

In Untersuchungen von DI FONZO *et al.* (1982) war eine hohe N-Remobilisierungsrate des aufgenommenen Stickstoffs aus den vegetativen in die generativen Organe für einen hohen Ertrag von großer Relevanz. ANDERSON *et al.* (1984) konnten nachweisen, dass die N-Remobilisierung aus Blättern und Stängeln direkt nach der Blüte einsetzt und sowohl auf der niedrigen als auch auf der hohen N-Stufe eine wichtige N-Quelle während der Kornfüllungsphase darstellt. Auf der niedrigen N-Stufe war in Untersuchungen von BELOW *et al.* (1997) der Anteil des remobilisierten Stickstoffs aus den Blättern höher als aus den Stängeln (37 bzw. 10 %). Für die N-Remobilisierung sind auf zellulärer Ebene Enzyme, wie z.B. Nitratreduktase und Proteasen, verantwortlich (ENGELS & MARSCHNER, 1995). Die Autoren wiesen darauf hin, dass die Selektion auf die Aktivität einzelner Enzyme bisher in vielen Fällen nicht sehr ermutigend war. Ihren Literaturstudien zufolge gab es Hinweise darauf, dass die N-Remobilisierung nicht nur durch Prozesse innerhalb des zu remobilisierenden Source-Organs sondern auch von der Sinkstärke kontrolliert wird.

Auf der NL-Stufe zeigte die Sinkstärke sowohl zur N-Verwertung als auch zum Kornertrag eine enge positive Korrelation. Unter N-Mangel wird häufig eine gehemmte Kornausbildung beobachtet, die sich in einer verringerten Anzahl von Kornanlagen zur Blüte oder aber durch ein Verkümmern bereits befruchteter Kornanlagen äußern kann. Eine Hemmung der Korn-

ausbildung bewirkt aber immer auch eine verringerte Attraktionskraft der Körner für Assimilate. Daher ist es gerade unter N-Mangelbedingungen für die Pflanzen notwendig über eine hohe Sinkstärke der Ertragsorgane zu verfügen. Auf der NL-Stufe erreichten besonders die K×K-Hybriden und einige L×L-Hybriden hohe Werte für die Sinkstärke (Abb. 3.11). Diese Genotypen waren nicht nur in der Lage, die nach der Blüte gebildeten Assimilate sondern auch einen Teil der zur Blüte bereits vorhandenen Biomasse in das Korn zu verlagern. Im Gegensatz dazu wiesen die H×H- und L×H-Hybriden überwiegend negative Werte für die Sinkstärke auf und zeigten somit sehr deutlich, dass sie nicht alle nach der Blüte gebildeten Assimilate in die Körner umlagern konnten. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie machen deutlich, dass eine Anpassung an eine geringe N-Versorgung sehr stark von der Fähigkeit der Genotypen abhängt, die aufgenommenen Nährstoffe und gebildeten Assimilate möglichst effizient in die Ertragsorgane umzulagern. Weitergehende Untersuchungen sollten der Frage nachgehen, welche physiologischen Prozesse eine verbesserte N-Verwertung bewirken und welche Möglichkeiten zur züchterischen Selektion bestehen. Dabei müsste sich die Suche auf Methoden konzentrieren, die einfach, zuverlässig und möglichst preiswert an großen Materialsätzen durchführbar sind. Dazu gehören auch molekulare Techniken, die mehr und mehr Eingang in die praktische Pflanzenzüchtung finden. Erste QTL für N-Effizienz wurden bereits gefunden (AGRAMA *et al.*, 1999; BERTIN & GALLAIS, 2001). Diese kartieren in Regionen des Genoms, in denen Gene für Schlüsselenzyme des N-Stoffwechsels lokalisiert sind (HIREL *et al.*, 2001). Allele solcher Gene können nun auf ihre Eignung für eine markergestützte Selektion geprüft werden.

4.4 Züchterische Konsequenzen

In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Mais-Hybriden mit einer verbesserten N-Effizienz zu entwickeln. Unter limitierter N-Versorgung zeigten die Hybriden des Typs L×L und K×K überlegene Leistungen. Auf der hohen N-Stufe waren dagegen die H×H-Hybriden am produktivsten. Aber auch die K×K-Hybriden erreichten ähnlich hohe Leistungen. Obwohl letztere ein beachtliches Leistungsniveau erzielten, muss darauf hingewiesen werden, dass ihre mittlere Leistung hauptsächlich auf drei Hybriden zurückzuführen ist, die zudem einen gemeinsamen Elter besaßen. Wäre dieser Elter weniger leistungsstark gewesen, so hätte die mittlere Leistung dieser Hybridgruppe sicherlich nicht dieses hohe Niveau erreicht.

Unter der Annahme, dass für ein Zuchtunternehmen die Entwicklung von Low-Input-Sorten eine große Bedeutung hat, stellt aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Studie die Durchführung von getrennten Zuchtprogrammen langfristig die erfolgversprechendste Methode dar, welche auch die höchsten Selektionserfolge erwarten lässt. Falls NL-Umwelten ähnliche Effekte aufweisen, und somit zu keiner zusätzlichen Information hinsichtlich der Rangierung der geprüften Genotypen beitragen, könnte das NL-Zuchtprogramm mit einer geringeren Anzahl von Standorten als das NH-Zuchtprogramm gefahren werden.

Mit zunehmender Anzahl von Selektionszyklen ist zu vermuten, dass die Heterosis von H×L- und L×H-Hybriden im Vergleich zu den H×H- und L×L-Hybriden ansteigen wird. Die Aufteilung in getrennte Zuchtprogramme eröffnet zudem die Möglichkeit, H- und L-Linien vielfältig miteinander zu kombinieren.

Obwohl die L×L-Hybriden tendenziell über eine höhere Ertragssicherheit verfügten, wiesen sie im Mittel keine höhere Trockenstresstoleranz auf. Jedoch kann aufgrund der begrenzten Daten noch keine endgültige Schlussfolgerung darüber getroffen werden, ob durch die Selektion auf verbesserte N-Effizienz indirekt die Trockenstresstoleranz erhöht werden kann. Dies wäre wünschenswert, weil die Stickstoffversorgung besser steuerbar ist als die Trockenheit, welche über die Jahre hinweg großen Schwankungen unterliegt.

Die auf der niedrigen N-Stufe verstärkt auftretenden Konkurrenzeffekte können durch die Beerntung und Auswertung von Kernreihen minimiert werden. Die verbesserte Prüfgenauigkeit hat zur Folge, dass entweder die Versuchsfläche vergrößert oder die Anzahl der zu testenden Genotypen verringert werden muss. Deshalb sollte untersucht werden, in welchen Generationen der Materialentwicklung die Konkurrenzeffekte den zu erwartende Selektionsgewinn stärker vermindern als die Reduktion der Anzahl Prüfglieder.

Die untersuchten Komponenten der N-Effizienz erfüllen nicht alle Anforderungen, die an indirekte Selektionsmerkmale gestellt werden. Zwar erreichten einige der N-Effizienzkomponenten akzeptable Heritabilitäten und Korrelationen zum Zielmerkmal N-Effizienz bzw. Kornertrag, jedoch erscheint ihre aufwändige Erfassung für einen Einsatz in einem Züchtungsbetrieb nicht praktikabel. Die vorliegende Untersuchung der Komponenten der N-Effizienz kann vielmehr als Basis für weiterführende grundlagenorientierte Untersuchungen angesehen werden, weil nun umfangreiche Ergebnisse über eine Vielzahl unterschiedlicher Genotypen zur Verfügung stehen. In der vorliegenden Arbeit waren hauptsächlich Prozesse der N-Verwertung und Umlagerung für eine hohe N-Effizienz auf der niedrigen N-Stufe von Bedeutung. Weiterführende Untersuchungen sollten deshalb an dieser Stelle ansetzen. Da

mehr und mehr molekulare Techniken Einzug in die praktische Pflanzenzüchtung halten, sind die Voraussetzungen zur Verbesserung der N-Effizienz mittels markergestützter Selektion zu prüfen.

Die zukünftige Bedeutung von N-effizienten Maissorten wird hauptsächlich durch die agrar - und umweltpolitischen Rahmenbedingungen bestimmt werden. Bisher sind beim Bundessortenamt keine Entscheidungen bezüglich der Zulassungskriterien für Sorten gefallen, die ihren besonderen landeskulturellen Wert unter extensiven Anbaubedingungen zeigen. Für private Pflanzenzuchtunternehmen ist die Entwicklung von N-effiziente Hybriden nur von Interesse, wenn entsprechende Absatzchancen zu erwarten sind. Solche Hybriden konnten im Rahmen dieses Projektes erstellt werden: Eine der L×L-Hybriden gelangte in die amtlichen Prüfungen. Sie wurde vom Bundessortenamt im Jahr 2000 unter dem Namen ASKET unter Berücksichtigung der vorliegenden Daten, die eine verbesserte Stabilität und Stresstoleranz dokumentieren, zugelassen. Es wird sich nun in wenigen Jahren herausstellen, inwieweit sich N-effiziente Sorten im Anbau bewähren und wo sie ihre Anbauschwerpunkte finden werden.

5 Zusammenfassung

Hohe Stickstoff(N)düngung im Maisanbau führt häufig zu einer starken Umweltbelastung, insbesondere durch Nitrateintrag in das Grundwasser. Die Gesetzgeber in den einzelnen Bundesländern fördern daher verschiedene Maßnahmen zum Schutz der Trinkwassereinzugsgebiete. Ziel dieser Verordnungen ist es, die Belastung der Umwelt und des Grundwassers zu reduzieren. Daraus lässt sich ein Bedarf an Maissorten ableiten, die an Böden mit geringerer N-Versorgung angepasst sind.

In der vorliegenden Studie sollte ermittelt werden, ob Hybriden mit spezieller Anpassung an Böden mit geringer N-Versorgung eine höhere Ertragssicherheit aufweisen als solche, die auf einem hohen N-Düngungsniveau selektiert worden waren. Zudem wurde geprüft, inwiefern N-effiziente Hybriden zusätzlich über eine höhere Trockenstresstoleranz verfügen. Unter N-Effizienz wird im folgenden die Fähigkeit eines Genotyps verstanden, bei geringem N-Angebot einen überdurchschnittlichen Kornertrag zu erzielen. Weiterhin wurden bei niedriger (NL) und hoher (NH) N-Versorgung die Konkurrenzeffekte zwischen den Genotypen durch die Analyse unterschiedlicher Parzellentypen (vierreihige Parzellen sowie deren Unterteilung in zweireihige Rand- und Kernparzellen) untersucht. Ausserdem wurde der Frage nachgegangen, ob und in welchem Umfang Elternlinien unterschiedlicher N-Effizienz zu einem erhöhten Heterosiszuwachs führen. Die Unterschiede zwischen Hybriden, deren Elternlinien auf ihre hohe Leistung bei niedriger bzw. hoher N-Versorgung selektiert worden waren, wurden im Hinblick auf die Merkmale N-Aufnahme, N-Verwertung und N-Remobilisierung untersucht. Dabei sollte auch ihre Eignung als Selektionsmerkmal für eine verbesserte N-Effizienz bewertet werden.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden in den Jahren 1996 und 1997 drei mehrortige Feldexperimente mit aktuellem Maiszuchtmaterial der mittelfrühen Reifegruppe auf jeweils einer niedrigen (ungedüngt) und einer hohen (160 kg N ha^{-1}) N-Stufe durchgeführt. An einem Standort konnte zusätzlich in beiden Jahren eine beregnete und eine unberegnete Variante geprüft werden. Als Ausgangsmaterial dienten je neun Flint- und Dent-Linien, die sich bei hoher bzw. niedriger N-Versorgung durch überlegene Testkreuzungsleistungen auszeichneten. Kriterien für die Linienselektion waren neben einem hohen Ertrag auf der jeweiligen N-Stufe auch ähnliche Trockensubstanzgehalte. Die drei besten Linien auf der hohen N-Stufe wurden als H-Linien, die drei besten auf der niedrigen N-Stufe als L-Linien bezeichnet. Desweiteren wurden sog. Kombinations(K)-Linien basierend auf einem Index selektiert, der die Ertragsleistung auf beiden N-Stufen berücksichtigte. Aus diesen Linien wurden je neun Einfachhybriden (Dent×Flint) des Typs L×L, H×H, K×K sowie H×L und L×H erstellt. Ein erstes Experiment diente der Analyse der Leistungsstabilität und des Heterosiszuwachses von Hybriden mit divergenter Anpassung an

die N-Versorgung in insgesamt 14 Umwelten (Ort×Jahr-Kombinationen). In einem zweiten Experiment wurden 1997 Konkurrenzeffekte zwischen den Genotypen an vier Orten geschätzt. Die Komponenten der N-Effizienz waren 1996 in einem dritten Experiment Gegenstand der Untersuchungen an drei Orten.

Die fünf verschiedenen Hybridgruppen, aber auch die Hybriden innerhalb einer Gruppe, zeigten auf beiden N-Stufen in der Varianzanalyse hochsignifikante Unterschiede für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt. Es wurden zudem signifikante Interaktionen der Hybridgruppen mit den Jahren und den N-Stufen für diese beiden Merkmale festgestellt. Im Mittel waren die L×L-Hybriden den H×H-Hybriden auf der NL-Stufe um 4 % signifikant überlegen. Ein entgegengesetzter Effekt wurde auf der NH-Stufe beobachtet, auf der die Leistungsüberlegenheit der H×H-Hybriden im Vergleich zu den L×L-Hybriden ebenfalls 4 % betrug. Die K×K-Hybriden zeigten auf der NL-Stufe eine ähnliche Leistung wie die L×L-Hybriden, auf der NH-Stufe unterschieden sich die K×K-Hybriden nicht signifikant von den H×H- bzw. L×L-Hybriden. Auf beiden N-Stufen blühten die L×L-Hybriden früher und erreichten höhere Korntrockensubstanzgehalte als die H×H-Hybriden.

Die zusammenfassende Varianzanalyse des Trockenstressexperimentes ergab hochsignifikante Interaktionseffekte der Faktorkombinationen Jahr×Beregnung sowie Jahr×N-Stufe×Beregnung für die Merkmale Korntrockenmasse, Korntrockensubstanzgehalt, die Blühtermine und das Blühintervall. Unter zusätzlichem Trockenstress auf der NL-Stufe zeigten in beiden Versuchsjahren einzelne H×H-Hybriden höhere Ertragsleistungen als die L×L-Hybriden, im Mittel unterschieden sich diese beiden Gruppen jedoch nicht signifikant. Demzufolge ist die erhöhte N-Effizienz eines Genotyps nicht gleichzeitig mit einer verbesserten Toleranz gegenüber Trockenstress verbunden.

Die Genotyp×Umwelt-Interaktionen wurden mit Hilfe der Regression der Genotypmittelwerte in den Einzelumwelten auf die Umweltmittelwerte untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass die H×H-Hybriden an hochproduktive, die L×L-Hybriden hingegen an gering produktive Umwelten adaptiert waren. L×L-Hybriden zeigten geringere Varianzen der Abweichung von der Regression als H×H-Hybriden und verfügten somit tendenziell über eine höhere Ertragssicherheit.

Die Kombination von Elternlinien unterschiedlicher N-Effizienz führte auf beiden N-Stufen zu keinem signifikant erhöhten Heterosiszuwachs für die Merkmale Korntrockenmasse und Korntrockensubstanzgehalt. Die bisher durchgeführte Selektion bei unterschiedlichem N-Niveau scheint nur geringe Verschiebungen in den Genfrequenzen bewirkt und folglich die genetische Distanz zwischen den Eltern kaum beeinflusst zu haben.

Im Konkurrenzexperiment wurden auf der NL-Stufe für die Randparzellen durchschnittlich höhere Kornerträge als für die Kernparzellen festgestellt. Ein entgegengesetztes Bild zeigte sich auf der NH-Stufe. Im Mittel wurden die Wuchshöhen und die Korntrockensubstanzgehalte auf der jeweiligen N-Stufe nicht von dem Parzellentyp beeinflusst. Ein Vergleich der Hybridgruppen auf der NL-Stufe ergab für die Randparzellen der H×H- und L×L-Hybriden um 6 bzw. 3 % höhere Erträge als für die Kernparzellen, während die K×K-Hybriden nicht auf den Parzellentyp reagierten. Um die Verzerrungen durch Konkurrenzeffekte zu minimieren wird unter reduzierten N-Bedingungen die Beerntung von zwei Kernreihen vorgeschlagen.

Die Untersuchungen zu den Komponenten der N-Effizienz ergaben auf der NL-Stufe eine im Mittel geringere N-Aufnahme als auf der NH-Stufe. Unter N-Mangel wurde jedoch der zur Verfügung stehende Stickstoff effizienter verwertet, dabei waren die L×L- und K×K-Hybriden den H×H-Hybriden signifikant überlegen. Für die Merkmale Harvest-Index, N-Harvest-Index und N-Remobilisierung wurden zwischen den H×H- und L×L-Hybriden auf keiner N-Stufe signifikante Unterschiede beobachtet.

Die Eignung eines indirekten Selektionsmerkmals wird u.a. durch seine Heritabilität und die Korrelation zum Zielmerkmal bestimmt. Nur die Merkmale N-Verwertung und die Harvest-Indizes erreichten auf der NL-Stufe akzeptable Heritabilitätsschätzwerte, die zwischen 0,7 und 0,8 lagen. Die Korrelationen zwischen dem Zielmerkmal N-Effizienz und den in dieser Studie untersuchten indirekten Merkmalen waren auf der NL-Stufe bis auf die N-Verwertung nur gering und oft nicht signifikant. Die in dieser Studie geprüften Merkmale eignen sich auch aufgrund ihrer z.T. hohen Versuchsfehler nur bedingt zur indirekten Selektion. Zudem machen die Ergebnisse deutlich, dass die Ursachen für die bessere Leistung der L×L-Hybriden auf der NL-Stufe in einer effektiveren Verwertung zur Verfügung stehenden Stickstoffs und nicht in einer erhöhten N-Aufnahme zu suchen sind.

Die vorliegende Studie zeigt, dass es möglich ist, Genotypen mit einer verbesserten N-Effizienz zu entwickeln. Für private Pflanzenzuchtunternehmen sind N-effiziente Hybriden von Interesse, wenn entsprechende Absatzchancen zu erwarten sind. Solche Hybriden konnten im Rahmen dieses Projektes erstellt werden: Eine der L×L-Hybriden wurde im Jahr 2000 unter dem Namen ASKET vom Bundessortenamt unter Berücksichtigung der vorliegenden Daten, die eine verbesserte Stabilität und Stresstoleranz dokumentieren, zugelassen.

6 Literaturverzeichnis

- Agrama, H.A.S., A.G. Zakaria, F.B. Said, and M. Tuinstra. 1999. Identification of quantitative trait loci for nitrogen use efficiency in maize. *Molecular Breeding* 5:187-195.
- Anderson, E.L., E.J. Kamprath, and R.H. Moll. 1985. Prolificacy and N-fertilizer effects on yield and N-utilization in maize. *Crop Sci.* 25:598-602.
- Anderson, E.L., E.J. Kamprath, R.H. Moll, and W.A. Jackson. 1984. Effect of N-fertilization on silk synchrony, ear number, and growth of semiprolific maize genotypes. *Crop Sci.* 24:663-666.
- Anscombe, F.J., and J.W. Tukey. 1963. The examination and analysis of residuals. *Technometrics* 5:141-160.
- Anonymus. 1995. Immer weniger Nitrat im Boden. *Landwirtschaftliches Wochenblatt* 31:5-6.
- Anonymus. 1999. SchALVO-Nitrat-Bericht 1999. Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Atlin, G.N., and K.J. Frey. 1990. Selecting oat lines for yield in low-productivity environments. *Crop Sci.* 30:556-561.
- Bänziger, M., F.J. Betrán, and H.R. Lafitte. 1997. Efficiency of high-nitrogen selection environments for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Sci.* 37:1103-1109.
- Bänziger, M., G.O. Edmeades, and H.R. Lafitte. 1999. Selection for drought tolerance increases maize yields across a range of nitrogen levels. *Crop Sci.* 39:1035-1040.
- Bänziger, M., and H.R. Lafitte. 1997. Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Sci.* 37:1110-1117.
- Bänziger, M., H.R. Lafitte, and G.O. Edmeades. 1995. Intergenotypic competition during evaluation of maize progenies under limited and adequate N supply. *Field Crops Res.* 44:25-31.
- Becker, H.C. 1984. Theoretische Überlegungen und experimentelle Untersuchungen zur genetischen Basis der Heterosis - eine Literaturübersicht. *Vortr. Pflanzenzüchtg.* 5:23-42.
- Becker, H.C. 1993 *Pflanzenzüchtung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Becker, H.C., and J. Léon. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101:1-23.
- Bellassen, E. (ed). 1997. Drought tolerance in higher plants: Genetical, physiological, and molecular biological analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL.

- Below, F.E. 1997. Growth and productivity of maize under nitrogen stress. p. 235-240. *In* G.O. Edmeades, M. Bänziger, H.R. Mickelson, and C.B. Peña-Valdivia (ed.). *Developing Drought and Low N-tolerant Maize. Proceedings of a Symposium, March 25-29, 1996, CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.: CIMMYT.*
- Bertin, P., and A. Gallais. 2000. Genetic variation for nitrogen use efficiency in a set of recombinant maize inbred lines. I. Agrophysiological results. *Maydica* 45:53-66.
- Bertin, P., and A. Gallais. 2001. Genetic variation for nitrogen use efficiency in a set of recombinant maize inbred lines. II. QTL detection and coincidences. *Maydica* 46:53-68.
- Blum, A. 1988. *Plant breeding for stress environments.* CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Blum, A. 1989. Breeding methods for drought resistance. p. 197-215. *In*: H.G. Jones, T.J. Flowers, and M.B. Jones (ed.) *Plants under stress.* Society for Experimental Biology Seminar Series: 39, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Blum, A. 1998. Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilization. *Euphytica* 100:77-83.
- Bolaños, J., and G.O. Edmeades. 1993a. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Response in grain yield, biomass, and radiation utilization. *Field Crops Res.* 31:233-252.
- Bolaños, J., and G.O. Edmeades. 1993b. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Response in reproductive behavior. *Field Crops Res.* 31:253-268.
- Bolaños, J., and G.O. Edmeades. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Res.* 48:65-80.
- Bolaños, J., G.O. Edmeades, and L. Martinez. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Response in drought-adaptive physiological and morphological traits. *Field Crops Res.* 31:269-286.
- Bowman, D.T. 1989. Plot configuration in corn yield trials. *Crop Sci.* 29:1202-1206.
- Boyer, J.S. 1996. Advances in drought tolerance in plants. *Adv. Agron.* 56:187-218.
- Bramel-Cox, P.J. 1996. Breeding for reliability of performance across unpredictable environments. p. 309-339. *In* M.S. Kang, and H.G. Gauch, Jr. (ed.) *Genotype-by environment interaction.* CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Brun, E.L., and J.W. Dudley. 1989. Nitrogen response in the USA and Argentina of corn populations with different portions of Flint and Dent germplasm. *Crop Sci.* 29:565-569.

- Byrne, P.F., J. Bolaños, G.O. Edmeades, and D.L. Eaton. 1995. Gains from selection under drought versus multilocation testing in related tropical maize populations. *Crop Sci.* 35:63-69.
- Castleberry, R.M. 1986. Border height effects on two row corn plot yields. Report of 41th Annual Corn & Sorghum Research Conference. p. 171-179.
- Ceccarelli, S. 1989. Wide adaptation: How wide? *Euphytica* 40:197-205.
- Ceccarelli, S., and S. Grando. 1991. Selection environment and environmental sensitivity in barley. *Euphytica* 57:157-167.
- Ceccarelli, S., S. Grando, and A. Impiglia. 1998. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica* 103:307-318.
- Chapman, S.C., and G.O. Edmeades. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations. II. Direct and correlated responses among secondary traits. *Crop Sci.* 39:1315-1324.
- Cochran, W.G., and G.M. Cox. 1957. *Experimental Designs*. 2nd Edition. John Wiley & Sons Inc., London, New York.
- Cooper, M., and G.L. Hammer (ed.) 1996. *Plant adaptation and crop improvement*. CAB International, Wallingford, UK.
- Crawford, N.M. 1995. Nitrate: Nutrient and signal for plant growth. *Plant Cell* 7:859-868.
- Crawford, N.M., and H.N.J. Arst. 1993. The molecular genetics of nitrate assimilation in fungi and plants. *Annu. Rev. Genet.* 27:115-146.
- Crawford, N.M., and A.D.M. Glass. 1998. Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. *Trends Plant Sci.* 3:389-395.
- Cregan, P.B., and P. van Berkum. 1984. Genetics of nitrogen metabolism and physiological / biochemical selection for increased grain crop productivity. *Theor. Appl. Genet.* 67:97-111
- Crossa, J. 1990. Statistical analysis of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- Crossa, J., H.G. Gauch, and R.W. Zobel. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Sci.* 30:493-500.
- Crossa, J., P.N. Fox, W.H. Pfeiffer, S. Rajaram, and H.G. Gauch (Jr.) 1991. AMMI adjustment for statistical analysis of an international wheat yield trial. *Theor. Appl. Genet.* 81:27-37.

- Di Fonzo, N., M. Motto, T. Maggiore, R. Sabatino, and F. Salamini. 1982. N-uptake, translocation, and relationship among N-related traits in maize as affected by genotype. *Agronomie* 2:789-796.
- Eberhart, S.A., and W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- Edmeades, G.O., J. Bolaños, M. Hernandez, and S. Bello. 1993. Causes for silk delay in a lowland tropical maize population. *Crop Sci.* 33:1029-1035.
- Edmeades, G.O., J. Bolaños, S.C. Chapman, H.R. Lafitte, and M. Bänziger. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations. I. Gains in biomass, grain yield, and harvest-index. *Crop Sci.* 39:1306-1315.
- Eichelberger, K.D., R.J. Lambert, F.E. Below, and R.H. Hageman. 1989a. Divergent phenotypic recurrent selection for nitrate reductase activity in maize. I. Selection and correlated responses. *Crop Sci.* 29:1393-1397.
- Eichelberger, K.D., R.J. Lambert, F.E. Below, and R.H. Hageman. 1989b. Divergent phenotypic recurrent selection for nitrate reductase activity in maize. II. Efficient use of fertilizer nitrogen. *Crop Sci.* 29:1398-1402.
- Engels, C. 1998. Pers. Mitteilung.
- Engels, C., and H. Marschner. 1995. Plant uptake and utilization of nitrogen. p. 41-81. *In* P.E. Bacon (ed.) *Nitrogen fertilization in the environment*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Engels, C., und I. Paponov. 1998. Pers. Mitteilung.
- Esgar, R.W., and D.G. Bullock. 1999. Thinning border rows differentially affects hybrids in corn yield trials. *Crop Sci.* 39: 1358-1361.
- Eskridge, K.M, and B.E. Johnson. 1991. Expected utility maximization and selection of stable plant cultivars. *Theor. Appl. Genet.* 81:825-832.
- Evans, L.T. 1993. *Crop evolution, adaptation, and yield*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Fakorede, M.A.B., and J.J. Mock. 1978. Nitrate-reductase activity and grain yield of maize cultivar hybrids. *Crop Sci.* 18:680-682.
- Feil, B., R. Thiraporn, and P. Stamp. 1993. In vitro nitrate reductase activity of laboratory-grown seedlings as an indirect selection criteria for maize. *Crop Sci.* 33:1280-1286.
- Frede, H.-G. und S. Dabbert. 1998. *Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft*. Ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co. KG, Landsberg.

- Gauch, H.G. (Jr.), and R.W. Zobel. 1996. AMMI analysis of yield trials. p. 85-122. In M.S. Kang and H.G. Gauch, Jr. (ed.) Genotype-by-environment interaction. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Gauch, H.G. (Jr.), and R.W. Zobel. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Sci.* 37:311-326.
- Geiger, H.H. 1990. Wege, Fortschritte und Aussichten der Hybridzüchtung. pp. 41-72. In G. Haug, G. Schumann, und G. Fischbeck (eds) Pflanzenproduktion im Wandel. Neue Aspekte in den Agrarwissenschaften. VCH Verlag.
- Genter, C.F. 1958. Plot competition in corn hybrids. *Agron. J.* 50:205-206.
- Goldringer, I., P. Brabant, and R.A. Kempton. 1994. Adjustment for competition between genotypes in single-row-plot trials of winter wheat (*Triticum aestivum*). *Plant Breeding* 112:294-300.
- Guei, R.G., and C.E. Wassom. 1992. Inheritance of some grought adaptative traits in maize. I. Inheritationships between yield, flowering, and ears per plant. *Maydica* 37:157-164.
- Harrer, S., und H.F. Utz. 1990. Modellstudie zur Züchtung von Low-Input-Sorten am Beispiel des Maises. p. 9-19. In Arbeitstagung der "Arbeitsgemeinschaft der Saatzuchtleiter" innerhalb der Vereinigung der österreichischen Pflanzenzüchter, Gumpenstein, 20.-22. Nov. 1990. Gumpenstein, Österreich.
- Hartmann, A. 1997. Untersuchungen zur genetischen Variation von Winterroggen unter ortsüblicher und verringerter Stickstoffdüngung. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Hartmann, A. 1999. Pers. Mitteilung.
- Heinrich, N. 1998. Remobilisierung und Verwertung von Stickstoff bei Maishybriden mit unterschiedlicher Anpassung an die Stickstoffversorgung. Diplomarbeit, Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Heine, H., und W.E. Weber. 1982. Die Aussagekraft statistischer Maßzahlen für die phänotypische Stabilität in amtlichen Sortenprüfungen bei Winterweizen und Körnermais. *Z. Pflanzenzüchtg.* 89:89-99.
- Heuberger., H. 1998. Nitrogen efficiency in tropical maize (*Zea mays L.*) Indirect selection criteria with special emphasis on morphological root characteristics. Dissertation, Universität Hannover. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart.
- Hill, J., H.C. Becker, and P.M.A. Tigerstedt. 1998. Quantitative and Ecological Aspects of Plant Breeding. First Edition. Chapman & Hall, London, UK.

- Hirel, B., P. Bertin, I. Quilleré, W. Bourdoncle, C. Attagnant, C. Delloy, A. Gouy, S. Cadion, C. Retailiau, M. Falque, and A. Gallais. 2001. Towards a better understanding of the genetic and physiological basis for nitrogen use efficiency in maize. *Plant Physiol.* 125:1258-1270.
- Hoff, T., H.-N. Truong, and M. Carboche. 1994. The use of mutants and transgenic plants to study nitrate assimilation. *Plant Cell Environ.* 17:489-506.
- Hugger, H. 1993. Nach Agrarreform: Lohnt sich noch Beregnung im Körnermais? *Mais 3/93:* 136-139.
- Hühn, M. 1981. Beiträge zur Erfassung der phänotypischen Stabilität. III. Überlegungen zur Zusammenfassung der beiden Stabilitätsparameter von EBERHART & RUSSELL (1966). *EDV in Medizin und Biologie* 2:49-56.
- Jensen, A.B., P.K. Busk, M. Figuras, M.M Albá, G. Perachia, R. Messguer, A. Goday, and M. Pagès. 1996. Drought signal transduction in plants. *Plant Growth Regulation* 20:105-110.
- Johnson, S.S., and J.L. Gadelman. 1989. Influence of water stress on grain yield response to recurrent selection in maize. *Crop Sci.* 558-564.
- Kamprath, E.J., R.H. Moll, and N. Rodriguez. 1982. Effects of nitrogen fertilization and recurrent selection on performance of hybrid population of corn. *Agron. J.* 74:955-958.
- Kang, M.S. (ed) 1990. Genotype-by-environment interaction and plant breeding. Department of Agronomy, Baton Rouge, Louisiana.
- Kang, M.S. 1998. Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development. *Adv. Agron.* 62:199-252.
- Kang, M.S., and H.G. Gauch, Jr. (ed.) 1996. Genotype-by-environment interaction. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Kempton, R.A. 1982. Adjustment for competition between varieties in plant breeding trials. *J. Agric. Sci. Camb.* 98:599-611.
- Knapp, S.J., and W.L. Bridges, Jr. 1987. Confidence interval estimates for heritability for several mating and experiment designs. *Theor. Appl. Genet.* 73:759-763.
- Lafitte, H.R., and M. Bänziger. 1997. Maize population improvement for low soil N: Selection gains and the identification of secondary traits. p. 485-489. *In* G.O. Edmeades, M. Bänziger, H.R. Mickelson, and C.B. Peña-Valdivia (ed.) *Developing Drought and Low N-tolerant Maize. Proceedings of a Symposium, March 25-29, 1996, CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.: CIMMYT.*
- Lafitte, H.R., and G.O. Edmeades. 1994a. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. I. Selection criteria. *Field Crops Res.* 39:1-14.

- Lafitte, H.R., and G.O. Edmeades. 1994b. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. II. Grain yield, biomass production, and N-accumulation. *Field Crops Res.* 39:15-25.
- Lafitte, H.R., and G.O. Edmeades. 1994c. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. III. Variation in yield across environments. *Field Crops Res.* 39:27-38.
- Lafitte, H.R., and G.O. Edmeades. 1995a. Association between traits in tropical maize inbred lines and their hybrids under high and low soil nitrogen. *Maydica* 40:259-267.
- Lafitte, H.R., and G.O. Edmeades. 1995b. Stress tolerance in tropical maize is linked to constitutive changes in ear growth characteristics. *Crop Sci.* 35: 820-826.
- Landbeck, M.V. 1995. Untersuchungen zur genetischen Verbesserung der Anbaueignung von Körnermais unter Produktionsbedingungen mit verringerter Stickstoffversorgung. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Lin, C.S., M.R. Binns, and L.P. Lefkovitch. 1986. Stability analysis: Where do we stand? *Crop Sci.* 26:894-901.
- Link, W., B. Schill, and E. Kittlitz von. 1996. Breeding for wide adaptation in faba bean. *Euphytica* 92:185-190.
- Ludlow, M.M., and R.C. Muchow. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.* 43:107-153.
- Mackay, A.D., and S.A. Barber. 1986. Effect of nitrogen on root growth of two corn genotypes in field. *Agron. J.* 78:699-703.
- Messmer, M.J., R.J. Lambert, and R.H. Hageman. 1984. Classification of certain N-traits as criteria for the identification of productive maize genotypes. *Crop Sci.* 24:605-610.
- Mode, C.J., and H.F. Robinson. 1959. Pleiotropism and the genetic variance and covariance. *Biometrics* 15:518-537.
- Mohr, H., und A. Neining. 1994. Schwachstellen der Nitrat- und Ammoniumassimilation - eine Chance für die Gentechnik? Springer Verlag, Berlin, New York.
- Moll, R.H., W.A. Jackson, and L.R. Mikkelsen. 1994. Recurrent selection for maize grain yield: dry matter and nitrogen accumulation and partitioning changes. *Crop Sci.* 34:874-881.
- Moll, R.H., E.J. Kamprath, and W.A. Jackson. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74:563-564.
- Moll, R.H., E.J. Kamprath, and W.A. Jackson. 1983. The potential for genetic improvement in nitrogen efficiency in maize. *Proc. Ann. Corn & Sorghum Res. Conf.* 37:163-175.

- Moll, R.H., E.J. Kamprath, and W.A Jackson. 1987. Development of nitrogen-efficient prolific hybrids in maize. *Crop Sci.* 27:181-186.
- Moll, R.H., J.H. Lonquist, J. Velez Fortuno, and E.C. Johnson. 1965. The relationship of heterosis and genetic divergence in maize. *Genetics* 52:139-144.
- Moser, S., B. Feil, P. Stamp, and R. Thiraporn. 1997. Tropical maize under pre-anthesis drought and low nitrogen supply. p. 159-162. *In* G.O. Edmeades, M. Bänziger, H.R. Mickelson, and C.B. Peña-Valdivia (ed.) *Developing Drought and Low N-tolerant Maize. Proceedings of a Symposium, March 25-29, 1996, CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.: CIMMYT.*
- Muruli, B.J., and G.M. Paulsen. 1981. Improvement of nitrogen use efficiency and its relationship to other traits in maize. *Maydica* 26:63-73.
- Pace, G.M., and P.R. McClure. 1986. Comparison of nitrate uptake kinetic parameters across maize inbred lines. *J. Plant Nutrition* 9:1095-1111.
- Paleolog, J., and M. Lorkiewicz. 1991. Selection for female fecundity in *Drosophila* test crosses and lines selected in different environments. II. Response to heat stress and top-crossing. *J. Animal Breeding Genetics* 108:363-368.
- Pelsy, F., and M. Carboche. 1992. Molecular genetics of nitrate reductase in higher plants. *Adv. Genet.* 30:1-40
- Pendleton, J.W., and R.D. Seif. 1962. Role of height in corn competition. *Crop Sci.* 2:154-156.
- Piepho, H.P. 1992. Vergleichende Untersuchungen der statistischen Eigenschaften verschiedener Stabilitätsmaße mit Anwendungen auf Hafer, Winterraps, Ackerbohnen sowie Futter- und Zuckerrüben. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Pollmer, W.G., D. Eberhard, D. Klein, and B.S. Dhillon. 1979. Genetic control of nitrogen uptake and translocation in maize. *Crop Sci.* 19:82-86.
- Presterl, T. 1996. Schätzung von Populationsparametern zur Optimierung der Züchtung auf verbesserte N-Effizienz bei Mais. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Reidenbach, G. 1997. Bedeutung von Wurzelwachstum und Wurzelaktivität für die Nutzung des Nitratangebots des Bodens durch Mais (*Zea mays L.*). Dissertation, Universität Hannover. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart.
- Ribaut, J.M., D.A. Hoisington, J.A. Deutsch, C. Jiang, and D. Gonzalez-de-Leon. 1996. Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. I. Flowering parameters and the anthesis silking interval. *Theor. Appl. Genet.* 92:905-914.

- Ribaut, J.M., C. Jiang, D. Gonzalez-de-Leon, G.O. Edmeades, and D.A. Hoisington. 1997. Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. II. Yield components and marker-assisted selection strategies. *Theor. Appl. Genet.* 94:887-896.
- Rosielle, A.A., and J. Hamblin. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Sci.* 21:943-946.
- SAS Institute. 1996. SAS/STAT User's guide. Release 6.12. Ed. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Sattelmacher, B., W.J. Horst, and H.C. Becker. 1994. Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 157: 15-224.
- Schinkel, B. 1991. Untersuchungen zur nutzbaren genetischen Variation für Stickstoff-Effizienz bei Winterweizen. Dissertation, Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Schmidt, W., L. Hepting, und G. Fischbeck. Konkurrenzeffekte in Silomaisprüfungen. *Mais* 4/1995:132-135.
- Schussler, J.R., and M.E. Westgate. 1991a. Maize kernel set at low water potential. I. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. *Crop Sci.* 31:1189-1195.
- Schussler, J.R., and M.E. Westgate. 1991b. Maize kernel set at low water potential. II. Sensitivity to reduced assimilates at pollination. *Crop Sci.* 31:1196-1203.
- Setter, T. 1997. Role of the phytohormone ABA in drought tolerance: Potential utility as a selection tool. 142-150. In G.O. Edmeades, M. Bänziger, H.R. Mickelson, and C.B. Peña-Valdivia (ed.) *Developing Drought and Low N-tolerant Maize. Proceedings of a Symposium, March 25-29, 1996, CIMMYT, El Batán, Mexico, Mexico, D.F.: CIMMYT.*
- Simmonds, N.W. 1991. Selection for local adaptation in a plant breeding programme. *Theor. Appl. Genet.* 82:363-367.
- Singh, M., and S. Ceccarelli. 1995. Estimation of heritability using varietal trials from incomplete blocks. *Theor. Appl. Genet.* 90:142-145.
- Snedecor, G.W., and W.G. Cochran. 1980. *Statistical Methods*. 7th Edition. Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa.
- Sneller, C.H., L. Kilgore-Norquest, and D. Danbek. 1997. Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Sci.* 37:383-390.
- Taiz, L., and E. Zeiger. 1998. *Plant Physiology*. 2nd ed., Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA, USA.
- Thomas, H., and C.M. Smart. 1993. Crops that stay green. *Ann. Appl. Biol.* 123:193-219.

- Tollenaar, M. 1977. Sink-source relationships during reproductive development in maize. A review. *Maydica* 22:49-75.
- Tukey, J.W. 1949. One degree of freedom for non-additivity. *Biometrics* 5:232-242.
- Utz, H.F. 1972. Die Zerlegung der Genotyp×Umwelt-Interaktionen. *EDV in Medizin und Biologie* 2:52-59.
- Utz, H.F. 1990. Optimale Versuchsanlagen für Sortenprüfungen bei Mais. p. 39-54. *Mais Kolloquium Einbeck*.
- Utz, H.F. 1996. PLABSTAT Version 2N. Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik, Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Utz, H.F., H.W. Jahnke, und F.W. Schnell. 1984. Beobachtungen zur Konkurrenz in Hybridmaisprüfungen. *Vortr. Pflanzenzüchtg.* 5:147-157.
- Utz, H.F., and F. Laidig. 1989. Genetic and environmental variability of yields in the official FRG variety performance tests. *Biuletyn Ocemy Odmian* 21-22:75-85.
- Utz, H.F., F.W. Schnell, und M.-L. Snoy. 1976. Selektion in frühen Generationen des Winterweizens. II. Parzellentypen. p. 203-211. *In Arbeitstagung der "Arbeitsgemeinschaft der Saatzuchtleiter" innerhalb der Vereinigung der österreichischen Pflanzenzüchter, Gumpenstein, 21.-23. Nov. 1976. Gumpenstein, Österreich.*
- Weber, W.E., und M. Vanselow. 1985. Die Eignung von Prüferten zur Selektion von Sorten auf Ertrag, ermittelt aus amtlichen Prüfungen bei Winterweizen und Mais. *Z. Pflanzenzüchtg.* 94:64-73.
- Weber, W.E., and G. Wricke. 1987. Wie zuverlässig sind Schätzungen von Parametern der phänotypischen Stabilität? *Vortr. Pflanzenzüchtg.* 12:120-133.
- Westgate, M.E., and P. Bassetti. 1990. Heat and drouhgt stress in corn: What really happens to the corn plant at pollination? p. 12-28. *Proc. 45th Ann. Corn & Sorghum Res. Conf.*
- Westgate, M.E., and J.S. Boyer. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Sci.* 26:951-956.
- Westgate, M.E., and D.L. Thomson Grant. 1989. Water deficits and reproduction in maize - Response to reproductive tissue to water deficits at anthesis and mid-grain fill. *Plant Physiol.* 91:862-867.
- Wiesler, F. 1991. Sortentypische Unterschiede im Wurzelwachstum und in der Nutzung des Nitratangebots des Bodens bei Mais. *Dissertation, Universität Hoehhnhheim, Stuttgart. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart.*

- Wiesler, F., and W.J. Horst. 1994. Root growth of maize cultivars under field conditions as studied by core and minirhizotron method and relationships to shoot growth. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 157:351-358.
- Wirén von, N., S. Gazzarini, and W.B. Frommer. 1997. Regulation of mineral uptake in plants. *Plant Soil* 196:191-199.
- Wricke, W. 1962. Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Z. Pflanzenzüchtg.* 47:92-96.
- Wricke, G., and W.E. Weber. 1986. *Quantitative Genetics and Selection in Plant Breeding.* Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Zavala-Garcia, F., P.J. Bramel-Cox, and J.D. Eastin. 1992. Potential gain from selection for yield stability in two grain sorghum populations. *Thoer. Appl. Genet.* 85:112-119.
- Zavala-Garcia, F., O.A. Marinesco, P.J. Bramel-Cox, J.D. Eastin, and M.D. Witt. 1991. Choosing selection environments in sorghum for high variable target areas. *In Agron. Abstracts.* ASA, Madison, WI.
- Zeddies, J. 1995. Umweltgerechte Nutzung von Agrarlandschaften. *Ber. Ldw.* 73:204-241.

7 Anhang

Tab. 7.1a: Beschreibung der Versuchsstandorte und der pflanzenbaulichen Maßnahmen in den Jahren 1996 und 1997

	Eckartsweier				Walldorf				Grucking		Emmendingen	
Höhe über NN [m]	139				109				468		203	
Bodenart	schluffiger Lehm				schluffiger Lehm				Löblehm		sandiger Lehm	
Bodenzahl	80				70				77-80		58-65	
Vorfrucht	Mais				Mais				Mais		Mais	
NL-Stufe ohne N-Zufuhr seit	1992				1989				1992		1992	
	<u>1996</u>		<u>1997</u>		<u>1996</u>		<u>1997</u>		<u>1996</u>		<u>1996</u>	
Parzellengröße [m ²]	6		12		9		18		9		9	
Bestandesdichte [Pflanzen m ⁻²]	9		9		10		10		10		9	
Aussaat	06.05.		02.05.		17.04.		15.04.		29.04.		07.05.	
Ernte:												
zur Körnerreife	28.10.		06.-07.10.		09.-11.10.		26.09.		21.-22.10.		04.11.	
nach Blüte ‡	07.08.		-		30.-31.07.		-		05.08.		-	
Blüte:												
hohe N-Stufe (NH)	23.07.-03.08.		17.07.-27.07.		13.07.-21.07.		12.07.-19.07.		17.07.-30.07.		22.07.-28.07.	
niedrige N-Stufe (NL)	25.07.-08.08.		21.07.-28.07.		14.07.-26.07.		14.07.-26.07.		21.07.-03.08.		24.07.-06.08.	
N-min [kg N ha ⁻¹]	<u>NL</u>	<u>NH</u>										
Aussaat	49	45	-	-	47	102	63	-	-	-	32	31
Ernte nach Blüte ‡	13	69	-	-	8	44	-	-	9	35	-	-
Ernte nach Körnerreife	8	15	-	-	11	43	-	-	27	51	-	-
N-Düngung NH-Stufe [kg N ha ⁻¹]	120		120		160		160		160		140	
N-Form †	Alzon		Alzon		KAS		KAS		Basammon		Basammon	

† KAS = Kalkammonsalpeter (27% N), AHL = Ammonium-Harnstoff-Lösung (28% N), Alzon (28% N), Basammon = Ammonsulfatsalpeter

‡ Experiment 3, nur im Jahr 1996.

Tab. 7.1b: Beschreibung der Versuchsstandorte und der pflanzenbaulichen Maßnahmen in den Jahren 1996 und 1997

	Forchheim		Bernburg		Hohenheim	
Höhe über NN [m]	177		80		400	
Bodenart	lehmiger Sand		Löß-Schwarzerde		schluffiger Lehm	
Bodenzahl	30		95		55	
Vorfrucht	Winterroggen		Mais		Mais	
NL-Stufe ohne N-Zufuhr seit	-		1991		1995	
	<u>1996</u>	<u>1997</u>	<u>1996</u>	<u>1997</u>	<u>1996</u>	<u>1996</u>
Parzellengröße [m ²]	7,5	12	9	9	6	12
Bestandesdichte [Pflanzen m ⁻²]	8	8	10	10	9	9
Aussaat	24.04.	24.04.	25.04.	29.-30.04.	26.04.	28.04.+02.05.
Ernte	‡B-: 07.10. ‡B+: 12.-14.11.	B-: 22.-23.09. B+: 08.10.	24.-26.10.	29.-30.09.	21.11.	23.-24.10.
Blüte:						
hohe N-Stufe (NH)	18.07.-30.07.	12.07.-23.07.	29.07.-09.08.	16.07.-26.07.	27.07.-05.08.	26.07.-04.08.
niedrige N-Stufe (NL)	19.07.-30.07.	13.07.-25.07.	29.07.-09.08.	19.07.-03.08.	29.07.-09.08.	25.07.-31.07.
N-min [kg N ha ⁻¹]			<u>NL</u>	<u>NH</u>	<u>NL</u>	<u>NH</u>
Aussaat	71	-	80	146	40	85
N-Düngung NH-Stufe [kg N ha ⁻¹]	200	110	100	105	130	130
N-Form†	KAS	KAS	KAS	KAS	AHL	AHL

† KAS = Kalkammonsalpeter (27% N), AHL = Ammonium-Harnstoff-Lösung (28% N), Alzon (28% N), Basammon = Ammonsulfatsalpeter (25% N).

‡ B-, B+ = Unberechnete bzw. berechnete Variante.

Tab. 7.2a: Abweichungen der mittleren monatlichen Lufttemperaturen und Niederschläge in den Jahre 1996 und 1997 vom langjährigen Mittel (LM) von 1961 bis 1991 an den einzelnen Versuchsstandorten

	Eckartsweier			Walldorf			Grucking		Emmendingen	
	LM	1996	1997	LM	1996	1997	LM	1996	LM	1996
Temperaturen [°C]										
April	9,6	+1,5	+0,1	11,0	+0,8	-1,2	7,6	+0,8	9,0	+1,2
Mai	13,9	-0,7	+1,4	13,3	-1,2	+0,3	12,2	+0,4	13,1	-0,3
Juni	17,1	+1,3	+0,5	17,9	+0,5	+0,7	15,4	+1,8	16,4	+1,3
Juli	19,1	-0,2	0,0	18,5	-0,9	-0,7	17,3	-0,8	18,2	-0,6
August	18,4	+0,8	+3,3	19,3	+0,4	+3,3	16,6	-0,1	17,6	+0,2
September	15,2	-2,4	+1,2	13,1	-2,4	+1,0	13,4	-2,9	13,4	-3,0
Oktober	10,4	+0,6	-0,5	11,4	+0,2	-1,4	8,2	+0,4	9,7	+0,2
Mittel	14,8	+0,1	+0,9	14,9	-0,4	+0,3	13,0	-0,1	13,9	-0,1
Niederschläge [mm]										
April	71	-36	-29	60	-45	-14	59	-35	76	-44
Mai	102	+65	-35	86	+16	-27	96	+26	111	+16
Juni	104	-8	+43	83	+2	+22	117	-69	108	-36
Juli	78	+3	+20	80	+6	+2	110	+47	90	+38
August	84	+19	-48	70	-1	-39	104	+20	95	-33
September	70	-20	-39	57	-25	-45	68	-14	68	+4
Oktober	62	+31	+1	55	+44	-14	49	+5	63	+20
Summe	571	+54	-87	491	-3	-115	603	-20	611	-35

Tab. 7.2b: Abweichungen der mittleren monatlichen Lufttemperaturen und Niederschläge in den Jahre 1996 und 1997 vom langjährigen Mittel (LM) von 1961 bis 1990 an den einzelnen Versuchsstandorten

	Forchheim			Bernburg			Hohenheim		
	LM	1996	1997	LM	1996	1997	LM	1996	1997
Temperaturen [°C]									
April	9,9	+1,2	-0,4	8,3	+1,1	-1,2	8,3	+1,5	-0,2
Mai	14,3	-0,8	+1,5	13,4	-1,4	+0,3	12,7	-0,5	+1,6
Juni	17,5	+0,7	+0,6	16,6	-0,6	+0,3	15,8	+0,8	+0,5
Juli	19,6	-0,4	-0,2	18,2	-1,7	+0,4	17,8	-0,8	-0,4
August	18,8	+1,5	+3,7	17,7	+0,6	+3,9	17,2	+0,3	+3,1
September	15,4	-1,8	+0,5	14,3	-2,6	+0,6	14,1	-2,9	+1,4
Oktober	10,4	+0,8	-0,7	9,8	+0,1	-1,4	9,4	+0,2	-0,5
Mittel	15,1	+0,2	+0,7	14,0	-0,6	+0,4	13,6	-0,2	+0,8
Niederschläge [mm]									
April	61	-41	-39	37	-9	-20	58	-45	-28
Mai	79	+2	-22	50	+34	0	82	+72	-39
Juni	87	-23	+33	56	+17	-27	92	-17	+34
Juli	70	-20	+13	48	+65	+27	72	+34	+50
August	66	-42	-30	60	-11	0	77	0	-45
September	53	-43	-24	37	+3	-28	53	-33	-32
Oktober	58	-9	+9	30	+22	-5	44	+21	+2
Summe	474	-176	-60	318	121	-53	478	+32	-58

Tab. 7.3: Schätzwerte für die Wiederholbarkeit (Wdh%) und die Variationskoeffizienten des Fehlers (CV_e%) in den 14 Umwelten getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale Korntrockensubstanzgehalt und Korntrockenmasse in **Experiment 1**

Umwelt†	Korntrockensubstanzgehalt				Korntrockenmasse			
	Wdh%		CV _e %		Wdh%		CV _e %	
	NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH
EMM96	95,4	97,6	1,0	0,6	63,6	47,2	6,6	5,1
GRU96	90,6	90,4	1,8	1,3	28,7	55,4	11,6	6,9
HOH96	94,5	95,5	1,4	0,9	49,4	74,1	5,2	4,1
HOH97	92,4	92,4	0,9	0,7	76,5	83,7	3,7	3,7
EWE96	97,3	97,9	0,8	0,6	71,7	57,7	9,0	6,6
EWE97	91,7	85,5	1,1	1,3	51,6	60,2	11,9	6,1
WAL96	94,2	91,1	1,2	1,0	27,2	75,3	10,7	5,9
WAL97	74,8	73,7	1,5	1,3	69,7	64,5	6,3	5,8
FOR96	79,3	67,2	2,0	2,4	30,8	44,2	9,8	13,4
FOR97	89,9	81,7	1,4	1,7	37,5	56,2	7,0	7,6
FORB96	94,7	89,2	0,7	0,8	55,4	68,1	8,0	5,3
FORB97	93,5	91,8	1,0	1,0	72,2	88,3	4,8	2,8
BER96	79,7	83,6	1,6	1,1	28,2	60,8	12,1	7,7
BER97	92,8	92,2	1,2	1,0	33,1	57,9	12,8	4,5

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.2.

Tab. 7.4: Schätzwerte für die Wiederholbarkeit (Wdh%) und den Variationskoeffizienten des Fehlers (CV_e%) in den Einzelumwelten getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale und Korntrockenmasse und Wuchshöhe getrennt für Kern-, Rand- und 4-reihige (4R) Parzelle in **Experiment 2**

Umwelt†	Parzellen-typ‡	Korntrockenmasse				Wuchshöhe			
		Wdh%		CV _e %		Wdh%		CV _e %	
		NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH
HOH	Kern	76,5	83,7	3,7	3,7	87,7	86,2	2,4	2,6
	Rand	77,6	90,0	3,8	3,5	82,4	84,9	2,5	2,6
	4R	81,6	91,1	3,2	3,1	86,4	87,5	2,3	2,4
FOR	Kern	37,5	56,2	7,0	7,6	87,0	85,5	3,3	3,0
	Rand	48,2	67,7	7,6	6,7	89,0	83,9	2,7	2,8
	4R	46,5	69,4	6,8	6,2	90,7	85,8	2,6	2,7
FORB	Kern	72,2	88,3	4,8	2,8	90,3	84,1	2,5	3,2
	Rand	61,1	84,7	4,9	3,6	89,3	89,8	2,5	2,3
	4R	68,7	89,8	4,3	2,7	91,5	91,0	2,3	2,2
EWE	Kern	51,6	60,2	11,9	6,1	72,8	86,4	3,4	2,1
	Rand	45,3	42,3	11,7	10,5	74,5	86,7	3,3	1,9
	4R	61,1	52,5	9,1	7,7	77,4	87,4	3,1	1,9

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.2.

‡ Rand = zweireihige Randparzelle, Kern = zweireihige Kernparzelle, 4R = vierreihige Parzelle.

Tab. 7.5: Mittelquadrate der zusammenfassenden Verrechnung über drei Orte unter Berücksichtigung der Hybridgruppen getrennt für niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale Trockensubstanzgehalt (TS), Trockenmasse (TM), N-Gehalt und N-Ertrag der unterschiedlichen Pflanzenfraktionen in **Experiment 3**

Fraktion	Merkmal	Variationsursache				
		Hybrid- gruppe (H)	Kreuzung (K):H†	H×Ort (O)	(K×O):H	Fehler
----- NL-Stufe -----						
Gesamt- pflanze Blüte	TS	7,49**	1,77**	0,77**	0,24**	0,13
	TM‡	41,19	74,17**	15,84	34,32*	23,65
	N-Gehalt¶	0,95 +	0,79**	0,28	0,38	0,32
	N-Ertrag	0,98**	1,32**	0,70	0,70+	0,50
Gesamt- pflanze Körnerreife	TS	210,89**	11,17**	10,79**	2,37**	1,18
	TM§	61,63*	20,22**	13,58*	0,94*	6,69
	N-Gehalt¶	0,79**	0,17**	0,08**	0,07**	0,03
	N-Ertrag	3,89	1,27	1,53**	0,96**	0,45
Korn	TS	90,83**	26,15**	3,38**	2,11**	0,43
	TM‡	170,09	43,45	81,70**	31,91**	17,71
	N-Gehalt¶	6,35**	0,82**	0,32**	0,12**	0,04
	N-Ertrag	0,32	0,62	1,13**	0,50**	0,23
Restpflanze	TS	94,67**	4,52**	6,32**	1,87**	1,08
	TM§	74,21**	11,46**	1,46	2,72+	2,04
	N-Gehalt¶	0,85*	0,14**	0,13**	0,06**	0,02
	N-Ertrag	3,74**	0,34**	0,07	0,11+	0,08
----- NH-Stufe -----						
Gesamt- pflanze Blüte	TS	9,90**	1,88**	0,39+	0,25	0,20
	TM‡	104,06	135,61**	43,12	39,42+	28,85
	N-Gehalt¶	0,56	1,41	0,27	1,07	0,93
	N-Ertrag	3,36	3,15*	1,43	1,96	1,73
Gesamt- pflanze Körnerreife	TS	136,94**	13,97**	10,65**	3,87**	1,13
	TM§	203,71**	48,03**	17,00*	17,58**	7,31
	N-Gehalt¶	0,70*	0,45**	0,13*	0,11**	0,06
	N-Ertrag	28,53**	6,26**	3,86**	2,59**	1,36
Korn	TS	28,57**	14,12**	3,12**	1,59**	0,32
	TM‡	146,21	136,70**	79,71**	40,54**	21,46
	N-Gehalt¶	2,13**	2,17**	0,25*	0,25**	0,11
	N-Ertrag	8,42+	3,77**	2,82**	1,32**	0,70
Restpflanze	TS	102,68**	9,69**	12,10**	3,50**	1,21
	TM§	116,32**	19,89**	8,90**	8,03**	2,65
	N-Gehalt¶	0,81**	0,25*	0,07	0,14**	0,08
	N-Ertrag	9,52**	1,23**	0,70*	0,56**	0,28

† Der Doppelpunkt steht für "innerhalb". ‡ Mittelquadrat × 0,01. § Mittelquadrat × 0,001.

¶ Mittelquadrat × 100.

Tab. 7.6: Mittelquadrate der zusammenfassenden Verrechnung über drei Orte und zwei N-Stufen unter Berücksichtigung der Hybridgruppen für die Merkmale Trockensubstanzgehalt (TS), Trockenmasse (TM), N-Gehalt sowie N-Ertrag der unterschiedlichen Pflanzenfraktionen **in Experiment 3**

Variationsursache	Gesamtpflanze Blüte				Gesamtpflanze Körnerreife			
	TS	TM‡	N-Gehalt¶	N-Ertrag	TS	TM§	N-Gehalt¶	N-Ertrag
Hybridgruppe (H)	17,30**	24,61	0,18	0,51	342,35**	204,78**	1,48**	24,70*
Kreuzung (K):H†	3,32**	169,81**	1,23	2,82**	20,00**	58,79**	0,43**	5,18**
H×Ort(O)	0,89**	27,41	0,44**	1,27	12,64**	24,12**	0,10*	4,12**
(K×O):H	0,31**	45,54**	0,64	1,42+	3,79**	16,73**	0,11**	1,85**
H×N-Stufe (N)	0,10+	120,63+	1,32**	3,83*	5,48	60,56**	0,02	7,71*
(K×N):H	0,33*	39,97+	0,97	1,66	5,14**	9,46	0,19**	2,35
H×O×N	0,27	31,55	0,11	0,86	8,81**	6,46	0,12**	1,27
(K×O×N):H	0,18	28,20	0,80+	1,23	2,45**	10,69**	0,07**	1,70**
Fehler	0,16	26,55	0,63	1,11	1,16	7,00	0,04	0,90
	Korn				Restpflanze			
	TS	TM‡	N-Gehalt¶	N-Ertrag	TS	TM§	N-Gehalt¶	N-Ertrag
Hybridgruppe (H)	107,58**	49,60	7,79**	4,82	196,93**	185,33**	1,54**	12,37**
Kreuzung (K):H	38,08**	139,43**	2,16**	2,74**	10,42**	27,91**	0,32**	1,26**
H×Ort(O)	4,85*	134,36*	0,34**	2,89**	12,39**	6,47**	0,13*	0,41*
(K×O):H	3,02**	45,22**	0,20**	1,00**	2,98**	6,77**	0,11**	0,35**
H×N-Stufe (N)	11,83**	266,71**	0,69+	3,92+	0,43	7,00	0,12	0,90
(K×N):H	2,18**	40,73+	0,83**	1,65**	3,79+	3,43	0,07	0,31
H×O×N	1,65**	27,06	0,24**	1,06*	6,03**	3,89	0,07	0,36*
(K×O×N):H	0,68**	27,23*	0,17**	0,82**	2,39**	3,98**	0,09**	0,32**
Fehler	0,38	19,59	0,08	0,46	1,14	2,34	0,05	0,18

† Der Doppelpunkt steht für "innerhalb".

‡ Mittelquadrat × 0,01.

§ Mittelquadrat × 0,001.

¶ Mittelquadrat × 100.

Tab. 7.7: Schätzwerte der operativen Heritabilität (h^2) und zugehörige 95% Konfidenzintervalle (CI 95%) getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale Trockensubstanzgehalt (TS), Trockenmasse (TM), N-Gehalt und N-Ertrag der unterschiedlichen Pflanzenfraktionen **in Experiment 3**

Merkmal†	NL-Stufe		NH-Stufe	
	h^2	CI 95%	h^2	CI 95%
Gesamtpflanze Blüte				
TS	0,87	0,78-0,92	0,90	0,83-0,94
TM	0,54	0,21-0,72	0,70	0,48-0,82
N-Gehalt	0,54	0,21-0,72	0,26	-0,28-0,55
N-Ertrag	0,47	0,08-0,68	0,40	-0,04-0,64
Gesamtpflanze Körnerreife				
TS	0,89	0,82-0,94	0,82	0,69-0,89
TM	0,58	0,27-0,74	0,72	0,52-0,83
N-Gehalt	0,69	0,47-0,81	0,76	0,59-0,86
N-Ertrag	0,33	-0,16-0,59	0,67	0,44-0,80
Korn				
TS	0,93	0,88-0,96	0,89	0,81-0,93
TM	0,34	-0,14-0,60	0,68	0,45-0,81
N-Gehalt	0,90	0,82-0,94	0,88	0,80-0,93
N-Ertrag	0,05	-0,64-0,42	0,65	0,40-0,79
Restpflanze				
TS	0,82	0,69-0,89	0,77	0,60-0,86
TM	0,85	0,74-0,91	0,72	0,51-0,83
N-Gehalt	0,69	0,47-0,81	0,56	0,23-0,73
N-Ertrag	0,84	0,73-0,90	0,71	0,51-0,83

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4.

Tab. 7.8: Schätzwerte der Wiederholbarkeit (Wdh%) und des Variationskoeffizienten des Fehlers (CV_e%) in den Einzelumwelten getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale der N-Effizienz in **Experiment 3**

Merkmal†	Ort†	Wdh%		CV _e %	
		NL	NH	NL	NH
N-Aufnahme	EWE	49,4	23,4	10,7	11,3
	WAL	40,2	71,2	10,5	6,6
	GRU	46,2	53,8	10,2	7,2
N-Verwertung	EWE	88,5	61,7	4,6	4,7
	WAL	79,9	80,3	3,4	3,3
	GRU	79,8	68,2	4,1	4,5
N-Remobilisierung	EWE	45,8	22,0	92,8	48,0
	WAL	31,1	24,1	52,2	23,4
	GRU	60,7	9,0	40,5	35,6
Harvest-Index	EWE	82,3	60,3	6,0	3,7
	WAL	68,0	68,3	3,6	2,9
	GRU	78,8	74,4	4,2	4,4
N-Harvest-Index	EWE	81,8	61,4	4,5	2,9
	WAL	63,6	69,6	3,0	2,5
	GRU	67,9	59,5	3,4	4,4
N-Assimilation	EWE	62,3	46,6	3,1	3,9
	WAL	69,3	64,4	2,6	2,9
	GRU	55,5	64,2	3,2	2,7
N-Aufnahme z. Blüte	EWE	16,4	4,5	26,9	43,2
	WAL	55,5	45,8	33,2	25,0
	GRU	47,1	29,5	24,4	25,6
Sink	EWE	45,9	28,5	1084	274
	WAL	53,0	17,5	119	180
	GRU	54,9	69,4	1548	584
TM-Zuwachs n. Blüte	EWE	19,0	13,0	25,6	22,1
	WAL	52,8	43,5	22,9	15,7
	GRU	27,6	66,1	22,8	12,5
Chlorophyll	EWE	67,4	54,1	7,4	5,1
	WAL	78,7	61,3	4,8	3,3
	GRU	58,6	54,3	6,1	2,8

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Kap. 2.4 und Tab. 2.2.

Tab. 7.9: Schätzwerte der Wiederholbarkeit (Wdh%) und des Variationskoeffizienten des Fehlers (CV_e%) in den Einzelumwelten getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe der unterschiedlichen Pflanzenfraktionen in **Experiment 3**

Merkmal	Ort†	Wdh%		CV _e %		Wdh%		CV _e %	
		NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH
		Gesamtpflanze Blüte				Gesamtpflanze Körnerreife			
Trocken- substanz	EWE	77,2	82,7	2,6	2,6	88,7	79,5	3,6	3,0
	WAL	71,3	58,0	3,5	5,1	75,4	85,8	5,0	4,6
	GRU	81,0	72,4	2,4	3,3	82,0	80,4	3,8	3,5
Trocken- masse	EWE	25,9	56,2	10,7	8,0	50,0	33,2	10,3	9,1
	WAL	18,9	45,6	12,4	7,6	31,2	82,2	10,6	4,7
	GRU	56,6	12,7	6,7	7,1	41,0	68,5	9,9	6,2
N-Gehalt	EWE	15,0	17,2	10,4	15,0	60,5	47,6	3,2	3,9
	WAL	6,3	26,6	10,7	6,1	66,5	67,9	2,6	2,9
	GRU	24,4	-	10,0	10,6	54,9	63,2	3,2	2,8
N-Ertrag	EWE	29,9	22,9	15,7	21,0	49,4	23,4	10,7	11,3
	WAL	6,1	27,4	22,6	10,5	40,2	71,2	10,5	6,6
	GRU	40,1	-	12,8	14,5	46,2	53,8	10,2	7,2
		Körner				Restpflanze			
Trocken- substanz	EWE	93,7	87,2	1,4	1,3	78,5	63,4	4,7	5,3
	WAL	94,2	91,1	1,2	1,0	64,2	84,5	6,7	6,3
	GRU	90,7	90,4	1,8	1,3	70,2	76,4	4,6	4,0
Trocken- masse	EWE	61,2	33,7	13,4	9,2	68,8	42,5	9,5	10,3
	WAL	27,2	75,3	10,7	5,9	43,2	82,2	11,6	5,3
	GRU	28,7	55,4	11,6	6,9	68,2	75,1	9,6	8,0
N-Gehalt	EWE	77,3	58,2	3,1	4,5	71,5	50,2	3,9	5,0
	WAL	82,7	89,5	3,2	2,6	41,3	53,5	3,7	4,4
	GRU	80,0	80,3	2,9	2,3	45,8	28,5	5,4	6,1
N-Ertrag	EWE	54,7	19,2	13,4	11,9	77,6	43,2	9,7	13,3
	WAL	47,1	72,1	10,2	7,4	37,2	62,9	13,1	8,2
	GRU	27,9	49,9	12,6	8,0	66,1	62,6	10,9	10,7

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.2.

- Schätzwert für die Prüfgliedvarianz negativ.

Tab. 7.10: Mittelwerte der Hybridgruppen aus der Serie über drei Orte getrennt für die niedrige (NL) und die hohe (NH) N-Stufe für die Merkmale Trockensubstanzgehalt (TS), Trockenmasse (TM), N-Gehalt und N-Ertrag der einzelnen Pflanzenfraktionen **in Experiment 3**

Fraktion	Merkmal	Hybridgruppe†					Mittel	GD5%
		H×H	L×L	K×K	H×L	L×H		
NL-Stufe								
Gesamt- pflanze	TS [%]	17,3 b‡	17,1 b	18,3 a	17,4 b	17,0 b	17,4	0,55
	TM [g m ⁻²]	600 a	631 a	622 a	606 a	616 a	615	25,0
Blüte	N-Gehalt [%]	0,77 a	0,78 a	0,79 a	0,79 a	0,75 a	0,78	0,03
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	4,62 a	5,03 a	50,3 a	5,00 a	4,75 a	4,88	0,52
Gesamt- pflanze	TS [%]	34,2 cb	35,6 cb	40,3 a	36,8 b	33,0 c	36,0	2,06
	TM [g m ⁻²]	1071 a	1145 a	1068 a	1062 a	1162 a	1102	73,1
Körner- reife	N-Gehalt [%]	0,84 a	0,80 bc	0,80 c	0,83 ab	0,80 bc	0,82	0,02
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	8,96 a	9,22 a	8,41 a	8,83 a	9,40 a	8,97	0,78
Korn	TS [%]	63,3 b	66,3 a	66,9 a	66,4 a	63,0 b	65,1	1,15
	TM [g m ⁻²]	477 a	538 a	521 a	519 a	489 a	509	56,7
	N-Gehalt [%]	1,19 a	1,06 c	1,08 c	1,11 bc	1,14 ab	1,12	0,04
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	5,67 a	5,70 a	5,52 a	5,76 a	5,51 a	5,63	0,67
Rest- pflanze	TS [%]	26,1 b	25,3 b	29,3 a	26,0 b	24,7 b	26,1	1,58
	TM [g m ⁻²]	594 b	607 b	545 c	544 c	673 a	594	23,9
	N-Gehalt [%]	0,56 ab	0,57 a	0,53 b	0,56 ab	0,58 a	0,56	0,02
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	3,34 b	3,52 b	2,93 c	3,08 c	3,88 a	3,36	0,17
NH-Stufe								
Gesamt- pflanze	TS [%]	16,2 b	16,0 b	17,4 a	16,4 b	15,8 b	16,4	0,39
	TM [g m ⁻²]	1016 a	969 a	984 a	984 a	1010 a	993	41,2
Blüte	N-Gehalt [%]	1,29 a	1,28 a	1,28 a	1,29 a	1,31 a	1,29	0,03
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	13,40 a	12,59 a	12,86 a	12,98 a	13,40 a	13,05	0,75
Gesamt- pflanze	TS [%]	37,8 b	38,3 b	42,4 a	39,2 b	36,4 b	38,8	2,05
	TM [g m ⁻²]	1936 ab	1889 bc	1779 c	1865 bc	2014 a	1897	81,8
Körner- reife	N-Gehalt [%]	1,11 a	1,09 a	1,08 a	1,11 a	1,08 a	1,10	0,02
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	21,96 a	20,90 ab	19,52 b	20,99 ab	22,08 a	21,09	1,23
Korn	TS [%]	66,2 bc	68,1 a	67,5 abc	67,9 ab	65,8 c	67,1	1,11
	TM [g m ⁻²]	946 a	921 a	889 a	929 a	946 a	926	56,0
	N-Gehalt [%]	1,51 a	1,43 b	1,45 b	1,47 ab	1,47 ab	1,47	0,03
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	14,48 a	13,37 a	13,05 a	13,88 a	14,01 a	13,76	1,05
Rest- pflanze	TS [%]	26,8 b	27,0 b	31,0 a	27,5 b	26,0 b	27,7	2,18
	TM [g m ⁻²]	990 ab	968 bc	890 c	934 bc	1066 a	970	59,2
	N-Gehalt [%]	0,74 a	0,76 a	0,72 b	0,75 a	0,74 a	0,74	0,02
	N-Ertrag [g N m ⁻²]	7,48 ab	7,53 ab	6,47 c	7,11 bc	8,09 a	7,34	0,52

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.1.

‡ Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Zeile bezeichnen eine signifikante Mittelwertsdifferenz der Hybridgruppen bei P=0,01; Duncan-Test.

Tab. 7.11: Ortsmittelwerte auf der niedrigen (NL) und der hohen (NH) N-Stufe für die Merkmale Trockensubstanzgehalt, Trockenmasse, N-Gehalt und N-Ertrag der einzelnen Pflanzenfraktionen in **Experiment 3**

Fraktion	Ort†	Trockensubstanz [%]		Trockenmasse [g m ⁻²]		N-Gehalt [%]		N-Ertrag [g N m ⁻²]	
		NL	NH	NL	NH	NL	NH	NL	NH
Gesamtpflanze Blüte	EWE	16,8	16,2	445	810	0,66	1,05	2,94	8,55
	WAL	18,1	16,8	818	1235	0,81	1,42	6,64	17,49
	GRU	17,4	16,1	582	934	0,87	1,40	5,06	13,10
	Mittel	17,4	16,4	615	993	0,78	1,29	4,88	13,05
	<i>GD5%</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>	<i>24</i>	<i>27</i>	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i>0,35</i>	<i>0,59</i>
Gesamtpflanze Körnerreife	EWE	37,0	40,9	813	1543	0,78	0,92	6,29	14,22
	WAL	39,0	42,8	1393	2339	0,80	1,20	11,06	28,09
	GRU	31,8	32,7	1102	1810	0,87	1,16	9,55	20,97
	Mittel	36,0	38,8	1102	1897	0,82	1,10	8,97	20,88
	<i>GD5%</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>	<i>43</i>	<i>56</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,43</i>	<i>0,71</i>
Korn	EWE	67,6	68,8	359	763	1,10	1,26	3,91	9,65
	WAL	69,5	71,7	653	1164	1,07	1,60	6,90	18,65
	GRU	58,4	60,7	515	852	1,18	1,53	6,07	12,97
	Mittel	65,1	67,1	509	926	1,12	1,47	5,63	13,63
	<i>GD5%</i>	<i>0,6</i>	<i>0,6</i>	<i>26</i>	<i>28</i>	<i>0,02</i>	<i>0,02</i>	<i>0,32</i>	<i>0,52</i>
Restpflanze‡	EWE	27,2	29,3	455	781	0,52	0,58	2,38	4,59
	WAL	28,3	30,9	740	1175	0,56	0,81	4,17	9,44
	GRU	22,7	22,8	586	956	0,60	0,84	3,51	8,00
	Mittel	26,1	27,7	594	970	0,56	0,74	3,36	7,34
	<i>GD5%</i>	<i>0,6</i>	<i>0,9</i>	<i>22</i>	<i>38</i>	<i>0,00</i>	<i>0,02</i>	<i>0,14</i>	<i>0,32</i>
Stroh	EWE	25,4	27,6	362	624	0,51	0,61	1,83	3,80
	WAL	26,8	29,1	623	976	0,55	0,84	3,45	8,23
	GRU	21,0	20,8	464	729	0,63	0,93	2,93	6,76
	Mittel	24,4	25,8	483	776	0,56	0,79	2,74	6,26
	<i>GD5%</i>	<i>0,7</i>	<i>1,0</i>	<i>18</i>	<i>32</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,12</i>	<i>0,30</i>
Spindel§	EWE	38,9	39,4	92	158	0,60	0,50	0,55	0,79
	WAL	39,9	43,9	117	193	0,61	0,63	0,72	1,21
	GRU	32,9	36,4	122	227	0,48	0,55	0,59	1,24
	Mittel	37,3	39,9	110	193	0,56	0,56	0,62	1,08
	<i>GD5%</i>	§	§	5	10	§	§	0,03	0,06

† Erläuterungen der Abkürzungen siehe Tab. 2.2.

‡ Restpflanze besteht aus den Fraktionen Stroh und Spindel.

§ Mischprobe für die Bestimmung des Trockensubstanz- und N-Gehaltes.

Danksagung

Herrn Prof. Dr. H.H. Geiger danke ich für die Überlassung des Themas, die wissenschaftliche Beratung sowie das entgegengebrachte Vertrauen bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. C. Engels danke ich für die Übernahme des Koreferates und sein Interesse, besonders am pflanzenphysiologischen Teil dieser Arbeit.

Bei Dr. Günter Seitz möchte ich mich für die Betreuung in der Anfangsphase dieser Arbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt Dr. Thomas Presterl nicht nur für die Betreuung des größten Teils dieser Arbeit, sondern auch für die freundschaftliche Zusammenarbeit, die wertvollen wissenschaftlichen Anregungen und seine immer gewährte Diskussionsbereitschaft.

Herrn Dr. W. Schmidt von der KWS SAAT AG möchte ich für sein kontinuierliches Interesse am Thema Stickstoffeffizienz danken, durch welches diese Experimente ermöglicht wurden.

Meinen Kollegen Dr. Anette Hartmann, Dr. Lissy Kuntze, Anne-Kristin Reinbrecht, Dr. Axel Schechert, Dr. Bruno Schill, Ulrike Schlacht, Dr. Domagoj Simic, Reiner Tretter und Dr. Pia Walch-Liu danke ich für ihre zahlreichen wissenschaftlichen Anregungen und Diskussionen.

Ein großer Dank gilt Nicole Heinrich, die mich im Rahmen ihrer Diplomarbeit bei den Untersuchungen zur N-Aufnahme- und N-Verwertung engagiert unterstützt hat.

An den verschiedenen Standorten haben zahlreiche Personen bei der Durchführung der Feldversuche, bei Ernte und Ernteaufarbeitung mitgewirkt. Stellvertretend für sie alle geht mein Dank an: Thomas Schmidt, Bärbel Lieberherr, Herrn Wiebe, Herrn Dr. Klein, Familie Lanzinger, Herrn Mastel, Herrn Metzger, Herrn Morath, Herrn Dr. Zieger.

Frau Kraft und Frau Egelhaaf danke ich für ihre vielfältige Hilfe aus dem Sekretariat.

Herrn Arend Kleinhout sowie meinen Kolleginnen und Kollegen von DLF-TRIFOLIUM A/S danke ich für ihre Unterstützung während der letzten Phase dieser Arbeit, *mange tak*.

Herzlicher Dank an meine Schwester und meine Eltern sowie meine Freunde, die mich während meiner Promotionszeit unterstützt und immer wieder ermuntert haben.

Das dieser Dissertation zu Grunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Ministeriums für Ernährung und Ländlicher Raum Baden-Württemberg sowie der KWS SAAT AG gefördert (Ord. Nr. 23-95.8).

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Elisabeth-Margarete Thiemt
Geburtsdatum 29. April 1965
Geburtsort Bremen
Familienstand ledig

Schulbildung

1971 - 1975 Grundschule in Platjenwerbe
1975 - 1981 Schulverbund Bremen-Lesum, Gesamtschule
1981 - 1984 Gymnasiale Oberstufe in Bremen-Lesum, Abitur Juni 1984

Berufsausbildung

1985 - 1987 Ausbildung zur Landwirtschaftlich-technischen Assistentin (LTA),
Berufsfachschule Lüneburg
1990 - 1992 Studium der Agrarwissenschaften an der Christian-Albrechts-Univer-
sität, Kiel, Vordiplom Oktober 1992
1992 - 1995 Studium der Allgemeinen Agrarwissenschaften, Fachrichtung
Pflanzenproduktion, an der Universität Hohenheim, Stuttgart,
Diplom November 1995

Praktika

4/1985 - 6/1985 Praktikum im Gemüsebaubetrieb von H. Rapp, Alfdorf
2/1986 - 1/1987 Praktikum im Rahmen der LTA-Ausbildung bei der F. v. Lochow-
Petkus GmbH, Klausheide
4/1990 - 9/1990 Praktikum auf dem landwirtschaftlichen Betrieb von E. v. Redecker,
Kosel, Praktikantenprüfung Oktober 1990
1991 Erntehilfe bei der Semundo Saatzucht GmbH, Zuchtstation Teendorf
1992 und 1993 Erntehilfe bei der Norddeutschen Pflanzenzucht, Hohenlieth

Berufstätigkeit

8/1987 - 11/1987 LTA bei der F. v. Lochow-Petkus GmbH, Bergen
4/1988 - 3/1990 LTA am Institut für Angewandte Botanik, Abteilung Nutzpflanzen-
biologie, Universität Hamburg
1/1996 - 12/1998 Wissenschaftliche Angestellte am Institut für Pflanzenzüchtung,
Saatgutforschung und Populationsgenetik, Universität Hohenheim,
Stuttgart
8/1999 - 6/2002 Züchterin für Deutsches Weidelgras, DLF-TRIFOLIUM, Dansk
Planteforædning, Store Heddinge, Dänemark
seit 7/2002 Leiterin der Arbeitsgruppe Triticale an der Landessaatzuchtanstalt,
Universität Hohenheim, Stuttgart