

**Ökonomische Bewertung
der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25
sowie
einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung im Züchtungswesen**

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

der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Vorgelegt von: Johannes Ryll
Geb. am 12.03.1988 in Quedlinburg

Gutachter: Prof. Dr. Peter Wagner
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Prof. Dr. Detlev Möller
Universität Kassel

Datum der Verteidigung: 30.11.2020

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes BARLEY BIODIVERSITY und ich möchte an dieser Stelle all jenen Personen meinen herzlichen Dank entgegenbringen, die mich in meiner Promotionsabsicht unterstützt haben.

Mein erster und außerordentlicher Dank gilt meinem sehr geschätzten akademischen Lehrer und Erstbetreuer Herrn Prof. Dr. Peter Wagner von der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg für die wertvolle Unterstützung, Förderung und Betreuung meiner Arbeit. Seine stetige Bereitschaft zur fachlichen Diskussion und seine konstruktiven Anregungen jeglicher Art, gepaart mit verständnisvoller Geduld und Ermutigung in den herausfordernden Phasen des Forschungsprozesses, haben wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen. Vielen Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Ebenfalls herzlich danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Detlef Möller von der Universität Kassel für die wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Mein großer Dank gilt allen Projektpartnern aus BARLEY BIODIVERSITY für das konstruktive Miteinander und die gute Zusammenarbeit. Für die erfolgreiche Antragstellung, die zielorientierte Projektkoordination, die Unterstützung bei der Akquise von Interviewpartnern und den hilfreichen interdisziplinären Austausch danke ich Herrn Prof. Dr. Klaus Pillen von der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg sehr herzlich. Ein besonderer Dank gilt Frau Dr. Anja Hanemann von der Saatzucht Josef Breun GmbH & Co. KG in Herzogenaurach, die mich bei der Einarbeitung in thematisch fachfremde Disziplinen sehr bereitwillig unterstützt hat.

Den Mitarbeitern vom agrar- und ernährungswissenschaftlichen Versuchszentrum (AEVZ) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Abteilung Nutzpflanzen und Anbausysteme in Merbitz, danke ich herzlich für die Betreuung und Durchführung der Feldversuche. Ohne die praktische Unterstützung und das persönliche Engagement von Herrn Bernd Look sowie Frau Marion Herrfurth hätten wesentliche Teilziele dieser Arbeit nicht realisiert werden können.

Des Weiteren danke ich allen Kolleginnen und Kollegen aus der Arbeitsgruppe Landwirtschaftliche Betriebslehre der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die konstruktiven fachlichen Diskussionen sowie die praktische Unterstützung. Eingeschlossen sind bei diesem Dank auch alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Professur Unternehmensführung im Agribusiness unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Norbert Hirschauer. Herzlichen Dank für das gute Beispiel kooperativer Zusammenarbeit.

Halle, im Juni 2019

Johannes Ryll

Kurzzusammenfassung

Am Anfang der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette steht die Pflanzenzüchtung und leistungsstarke Kultursorten bilden das Fundament für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit in der Landwirtschaft. Besonders angesichts globaler Herausforderungen im Agrarsektor (z. B. Klimawandel, Bevölkerungswachstum, Ressourcenknappheit und Nachhaltigkeit) stellen Innovationen in der Pflanzenzüchtung eine künftige Schlüsseltechnologie dar. Der Fokus der vorliegenden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes BARLEY BIODIVERSITY entstandenen Arbeit liegt auf der sozioökonomischen Bewertung von zwei züchterischen Innovationen: A) Die beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25, die durch Einkreuzung positiver Wildallele nicht nur zu einer Erweiterung der Biodiversität im Genpool der Pflanzenzüchtung beitragen, sondern auch das Potenzial für Produktivitätssteigerungen der Kulturart Sommergerste bieten. B) Eine Hochdurchsatz-Phänotypisierung auf technologischer Basis der Hyperspektralanalyse zur nicht-invasiven quantitativen und qualitativen Erfassung züchtungsrelevanter Pflanzenmerkmale.

Vor dem Hintergrund weltweit steigender Nachfrage nach agrarischen Erzeugnissen thematisiert diese Arbeit zunächst deskriptiv aus historischer Perspektive soziale, ökologische und ökonomische Auswirkungen züchterischer Innovationen. Empirisch werden positive Effekte steigender genetischer Diversität durch die Bewertung der Introgressionslinien aus den Populationen S42 und HEB-25 eruiert. Anhand mehrjähriger Feldversuche (2011 bis 2016) werden wirtschaftlich aussichtsreiche Genotypen aus beiden Testpopulationen selektiert und 2017 sowie 2018 separat in Parzellenversuchen unter den Intensitätsstufen mit und ohne Fungizid geprüft. Die Leistungsfähigkeit selektierter Introgressionslinien wird auf der methodischen Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation nachgewiesen. Das Bewertungskonzept für die ökonomische Zielgröße der fungizidkostenfreien Leistung berücksichtigt Eintrittswahrscheinlichkeiten für Erträge und marktrelevante Qualitätseigenschaften sowie historische Marktdaten zur Erfassung des Preisrisikos. Anhand zweistufiger Rentabilitätsvergleiche der Testgenotypen sowohl mit den beiden Kultureltern der Populationen S42 und HEB-25 (Scarlett und Barke) als auch mit modernen, im Anbau dominierenden Elitesorten (Quench und Planet) wird das wirtschaftliche Potenzial und die Limitation der Introgressionslinien aufgezeigt. Als wichtigster ökologischer Effekt werden aus den Introgressionslinien Low-Input-Genotypen identifiziert, deren Schadpotenzial ohne Fungizid-Behandlung deutlich geringer ist als bei den Vergleichssorten. Zudem wird anhand verschiedener Marktszenarien die ökonomische Bedeutung widerstandsfähiger Genotypen mit mittlerer Ertragsleistung im Vergleich zu ertragreicheren, aber anfälligeren Sorten aufgezeigt.

Die in BARLEY BIODIVERSITY durch Erprobung hyperspektraler Phänotypisierung erzielten Forschungsergebnisse werden mittels qualitativer, leitfadengestützter Expertenbefragungen unter potenziellen Nutzern der Technologie evaluiert. Die Arbeit verdeutlicht Stärken der hyperspektralbasierten Technologie im Vergleich mit anderen Sensoren zur phänotypischen Informationsgewinnung. Es werden neue züchterische Nutzungspotenziale der Technologie aufgezeigt und der wirtschaftliche sowie technologische Entwicklungsstand bewertet. Als elementares Ergebnis weisen konkrete Handlungsempfehlungen einen frühzeitigen Weg für eine praxisorientierte Weiterentwicklung der hyperspektralen Phänotypisierung.

Abstract

Plant breeding is at the beginning of the agricultural value chain, and high-yielding cultivars form the foundation for maintaining competitiveness in agriculture. Innovations in plant breeding are a key technology for agricultural progress, particularly in view of global challenges in the agricultural sector (e.g. climate change, population growth, sustainability and scarcity of resources). The focus of this thesis, which is part of the BARLEY BIODIVERSITY project funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), is the socioeconomic evaluation of two breeding innovations: A) the two wild barley introgression libraries S42 and HEB-25, which not only contribute to an expansion of biodiversity in the gene pool of plant breeding, but also offer the potential for productivity increases in the spring barley crop; and B) high throughput phenotyping on a technological basis of hyperspectral imaging for the non-invasive detection of quantitative and qualitative plant traits.

Against the background of the increasing demand for agricultural products worldwide, this thesis initially focuses on the social, ecological and economic effects of breeding innovations from a historical perspective. The positive effects of increasing genetic diversity are empirically determined by evaluating the introgression lines from the populations S42 and HEB-25. On the basis of field trials lasting several years (2011 to 2016), economically promising genotypes have been selected from both test populations. In 2017 and 2018, separate field trials will be conducted under the intensity levels with and without fungicide for economic evaluation. The performance of selected introgression lines is demonstrated on the methodological basis of a Monte Carlo simulation. The valuation concept for the economic target of fungicide cost-free revenue takes into account probabilities for yields and market-relevant quality characteristics, as well as historical market data for recording the price risk. By comparing the profitability of the test genotypes with both the cultural parents of populations S42 and HEB-25 (Scarlett and Barke) as well as with modern elite varieties (Quench and Planet), the economic potential and the limitation of the introgression lines are shown. From a sustainability perspective, the most essential result of the research is the identification of valuable low-input genotypes from both test populations whose damage potential without fungicide treatment is significantly lower than that of tested reference varieties. The economic importance of resistant genotypes and feasible cost savings for fungicides is illustrated by various market scenarios.

The research results obtained in BARLEY BIODIVERSITY from testing hyperspectral phenotyping will be evaluated by qualitative, guideline-based expert interviews among potential users of the technology. The thesis analyzes strengths of the technology in comparison to other sensors, shows new breeding potentials and evaluates the economic and technological state of development of the innovation from a user perspective. As an essential result, this thesis presents specific recommendations for the practice-oriented further development of the sensor technology that currently exists, and thus makes a significant contribution to methodical and technological modifications of hyperspectral-based phenotyping in the interest of potential users.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	III
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Anhangsverzeichnis.....	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Projektzielsetzung und Forschungsfragen dieser Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	6
Teil A: Bedeutung der Pflanzenzüchtung und Wirtschaftlichkeit der Wildgersten- Introgressionspopulationen S42 und HEB-25.....	7
2 Sozioökonomische Aspekte der pflanzenzüchterischen Verbesserung von Kultur- pflanzen	7
2.1 Agrartechnischer Fortschritt als maßgebliche Determinante für Produktivitätssteiger- ungen.....	7
2.2 Züchterischer Einfluss auf den produktionssteigernden agrartechnischen Fortschritt	9
2.2.1 Anteil der Pflanzenzüchtung an der Ertragsentwicklung in Deutschland	11
2.2.2 Ursachen für die Stagnation der Ertragsentwicklung bedeutender Kulturpflanzen in der landwirtschaftlichen Praxis	11
2.3 Sozialpolitische Effekte ertragssteigernder Pflanzenzüchtung	12
2.4 Einfluss der Pflanzenzüchtung auf die Ressourceneffizienz und den Ressourcenschutz	14
2.4.1 Verbesserung der Nährstoffeffizienz am Beispiel von Stickstoff.....	14
2.4.2 Reduktion der Treibhausgasemission.....	16
2.5 Betriebswirtschaftliche Effekte des biologisch-technischen Fortschritts	17
2.5.1 Negative Einkommenseffekte durch technischen Fortschritt	19
2.5.2 Verstärkung negativer Einkommenseffekte durch Nichtnutzung züchterisch verbesserter Sorten	19
2.6 Kurzes forschungsleitendes Zwischenfazit	20
3 Material und Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung der Wildgersten- Introgressionspopulationen S42 und HEB-25	20
3.1 Pflanzenmaterial	20
3.2 Forschungsmethodische Vorüberlegungen	21
3.2.1 Monetäre Bewertung	21
3.2.1.1 Erlöse.....	22
3.2.1.2 Variable Kosten	22

3.2.2	Einfluss bodenbedingter Heterogenität auf die Versuchsergebnisse	23
3.2.3	Problematik der ökonomischen Bewertung aus den Projektdaten der Versuchsjahre 2015 und 2016	24
3.3	Feldversuch	26
3.3.1	Versuchsaufbau	26
3.3.2	Methodischer Ansatz zur Berücksichtigung der Nährstoffverfügbarkeit im Boden.....	29
3.3.3	Begründung der Versuchsanlage	30
3.4	Ökonomische Auswertung der Versuchsdaten.....	30
3.4.1	Annahmen zur Erlösbestimmung	32
3.4.2	Berücksichtigung von Unsicherheit – Monte-Carlo-Simulation	33
3.5	Abweichende Parameter der Versuchsplanung.....	35
4	Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25.....	37
4.1	Klimatische Bedingungen am Versuchsstandort Merbitz 2017 und 2018.....	37
4.2	Deskriptive Statistik zu den Rohdaten der Versuchsjahre 2017 und 2018 am Standort Merbitz	38
4.2.1	Ertragsfähigkeit.....	38
4.2.2	Proteingehalt	40
4.3	Erfassung des Kosteneinsparungspotenzials anhand der ökonomischen Schadschwelle.....	41
4.4	Rentabilitätsvergleiche der Introgressionslinien mit Standardsorten.....	43
4.4.1	Vergleich mit den Kultureltern Scarlett und Barke.....	43
4.4.1.1	Szenario 1: Standardszenario.....	43
4.4.1.2	Szenario 2: volatile Marktpreise	46
4.4.1.3	Szenario 3: Steuer auf Fungizide	47
4.4.2	Vergleich mit der Elitesorte Quench.....	49
Teil B: Anwenderorientierte Bewertung einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung im Züchtungswesen.....		50
5	Material und Methoden zur Evaluierung der hyperspektralen Phänotypisierung	50
5.1	Methodenüberblick zur Innovationsbewertung von Technologien	50
5.2	Forschungsmethodische Abgrenzung	51
5.2.1	Begründung der qualitativen Forschungsmethode	51
5.2.2	Theoretischer Exkurs zum qualitativen Experteninterview.....	52
5.3	Forschungsdesign	53
5.3.1	Phase I: Explorative Vorbereitung	53
5.3.1.1	Entwicklung des Interviewleitfadens	54
5.3.1.2	Leitfadenstruktur	55
5.3.2	Phase II: systematisierende Expertenbefragung potenzieller Anwender der hyper- spektralen Phänotypisierung.....	56

5.3.2.1	Vorgehensweise bei der Planung und Durchführung der leitfadengestützten Interviews	56
5.3.2.2	Methodik der Datenauswertung.....	56
6	Vorstellung des Forschungsobjektes – hyperspektrale Phänotypisierung.....	57
6.1	Kurzer wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen zur Spektralanalyse in der Pflanzenzüchtung	57
6.2	Umsetzung der hyperspektralen Phänotypisierung im IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY	59
6.2.1	Entwicklung eines feldtauglichen Trägersystems.....	59
6.2.2	Datenerhebung und -modellierung	60
6.2.3	Kurzdarstellung statistischer Ergebnisse zur Prädiktionsgüte der hyperspektralen Phänotypisierung.....	62
7	Ergebnisse der qualitativen Experteninterviews zur Bewertung der hyperspektralen Phänotypisierung.....	63
7.1	Expertenanalyse zum allgemeinen Entwicklungsstand sensorischer Phänotypisierung	64
7.1.1	Forschungsfeld sensorische Phänotypisierung.....	64
7.1.2	Potenzial sensorgesteuerter Phänotypisierung.....	65
7.1.3	Herausforderungen der sensorischen Phänotypisierung	65
7.1.3.1	Wirtschaftliche Risiken.....	66
7.1.3.2	Technologische Entwicklungsdefizite	67
7.2	Nutzungspotenziale einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung	68
7.2.1	Hochdurchsatz-Phänotypisierung in jungen Züchtungsgenerationen	68
7.2.2	Analyse pflanzlicher Inhaltsstoffe.....	69
7.2.3	Saatgutqualitätskontrolle	70
7.2.4	Nutzung für Feldbonituren	70
7.2.5	Bestimmung der Malzqualität und weiterer verarbeitungsrelevanter Eigenschaften...	73
7.2.6	Entscheidungsunterstützung zur Kreuzungsplanung	74
7.2.7	Anwendung im Precision Farming	74
7.3	Methodische und technologische Aspekte zur praktischen Anwendung der Hyperspektralanalyse in der Pflanzenzüchtung	75
7.3.1	Technologischer Entwicklungsstand.....	75
7.3.1.1	Präzision der hyperspektralen Prädiktion pflanzlicher Merkmale.....	75
7.3.1.2	Prozess der Datenanalyse	76
7.3.1.3	Auswahl des Wellenlängenbereiches	77
7.3.1.4	Berücksichtigung von Störgrößen unter Freilandbedingungen	78
7.3.2	Züchterische Relevanzen für den praktischen Einsatz der Hyperspektralanalyse	79
7.3.2.1	Messgenauigkeit	79
7.3.2.2	Messgeschwindigkeit	79
7.3.2.3	Datenmanagement	80
7.3.2.4	Investitions- und Anwenderrisiken	80

7.3.2.5	Entwicklungsrichtung auf dem Gebiet der genomischen Selektion	81
7.3.2.6	Robustheit der Modelle	81
7.3.2.7	Monetäre Honorierung züchterischer Merkmalsverbesserungen	82
8	Ergebnisdiskussion und forschungsleitende Schlussfolgerungen	83
8.1	Fazit zur sozioökonomischen Bedeutung der Pflanzenzüchtung (Forschungsfrage I a)	83
8.2	Ergebnisdiskussion zur wirtschaftlichen Bedeutung der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 (Forschungsfrage I b)	86
8.2.1	Ökonomische Auswertung von Sortenversuchen	86
8.2.2	Sozioökonomische Effekte steigender genetischer Diversität	89
8.2.2.1	Sicherung landwirtschaftlicher Produktion	89
8.2.2.2	Verringerung der Produktionsrisiken und Erhöhung der Ertragsstabilität	90
8.2.2.3	Verbesserung der Nachhaltigkeit im Anbau landwirtschaftlicher Nutzpflanzen	91
8.2.3	Wirtschaftlichkeit der Introgressionslinien	93
8.2.3.1	Vergleich mit Kultureltern	93
8.2.3.2	Vergleich mit Elitesorten	95
8.2.4	Fazit zur ökonomischen Bewertung der Introgressionslinien	96
8.2.5	Methodenkritik	97
8.2.5.1	Datenerhebung	97
8.2.5.2	Datenauswertung	98
8.2.6	Forschungsbedarf	99
8.3	Ergebnisdiskussion im Hinblick auf die Bewertung einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung	100
8.3.1	Bedeutung sensorischer Phänotypisierung und öffentlicher Forschungsförderung	100
8.3.2	Stärken der hyperspektralen Phänotypisierung (Forschungsfrage II a)	102
8.3.3	Nutzungspotenzial der hyperspektralen Phänotypisierung (Forschungsfrage II b)	103
8.3.4	Wirtschaftlichkeit der hyperspektralen Phänotypisierung (Forschungsfrage II c)	106
8.3.5	Herausforderungen bei der Implementierung der Hyperspektralanalyse in die praktische Pflanzenzüchtung	110
8.3.6	Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse im Hinblick auf die Anwendung in der Pflanzenzüchtung (Forschungsfrage II d)	112
9	Zusammenfassung	117
	Literaturverzeichnis	120
	Anhang	131
	Angaben zur Person und zum wissenschaftlichen Werdegang	138
	Eidesstattliche Erklärung / Declaration under Oath	139

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	vollständige Bezeichnung
AEVZ	Agrar- und ernährungswissenschaftliches Versuchszentrum
AMI	Agrarmarkt Informations-Gesellschaft
BC	Rückkreuzung (engl. backcross)
BC _x	x-te Rückkreuzung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BSA	Bundessortenamt
BSL	Beschreibende Sortenliste
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DB	Deckungsbeitrag
DKfL	direktkostenfreie Leistung
dt	Dezitonne
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
F-Generation	Filialgeneration
FAO	Food and Agriculture Organization
FKfL	fungizidkostenfreie Leistung
FUN ₀	ohne Fungizide
FUN ₁	mit praxisüblicher Fungizid-Behandlung
GFPI	Gemeinschaft zur Förderung von Pflanzeninnovation
GPS	Global Positioning System
ha	Hektar
Hag	Hordeum vulgare ssp. agriocrithon
HEB	Halle Exotic Barley
Hsp	Hordeum vulgare ssp. spontaneum
Hz	Hertz
IAU	Institut für Agrar- & Umweltanalytik
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy)
IFF	Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung
IL	Introgressionslinie
IPAS	Innovative Pflanzenzüchtung im Anbausystem
IPK	Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung
kcal	Kilokalorien
KAS	Kalkammonsalpeter
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft

LSV	Landessortenversuch
m ²	Quadratmeter
Max	Maximum
MCS	Monte-Carlo-Simulation
Min	Minimum
Mio.	Millionen
MLU	Martin-Luther-Universität
Mrd.	Milliarden
N	Stickstoff
N ₀	geringere Stickstoff-Düngung
N ₁	praxisübliche Stickstoff-Düngung
N _{min}	verfügbarer mineralisierter Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NAM	nested association mapping
NIR	Nahinfrarot (engl. near infrared)
NIRS	Nahinfrarot-Spektroskopie
NKfL	stickstoffkostenfreie Leistung
nm	Nanometer
NN	Normal-Null
p. a.	per annum (jährlich)
QTL	Quantitative Trait Locus
R ²	Bestimmtheitsmaß
REIP	red edge inflection point
RGB	Rot-Grün-Blau
S ₁	erste Selbstungsgeneration
S _x	x-te Selbstungsgeneration
SDB	Standarddeckungsbeiträge
s. p.	sine pagina (ohne Seitenangabe)
ssp.	Unterart (engl. subspecies)
SWIR	kurzwelliges Infrarot (engl. short-wave infrared)
t	Tonnen
TFP	Totale Faktorproduktivität
THG	Treibhausgas
TKG	Tausendkorngewicht
TOF-Kamera	Time-of-Flight-Kamera
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VIS-NIR	sichtbares und nahes Infrarot (engl. visual-near infrared)
VPI	Verbraucherpreisindex

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wachstumsfaktoren der weltweiten Agrarproduktion	8
Abbildung 2: Faktoren der phänotypischen Leistungsfähigkeit.....	9
Abbildung 3: Faktoren des Ertragsanstieges bei Kulturpflanzen	10
Abbildung 4: Entwicklung der Durchschnittserträge und SDB für Sommergerste im Zeitraum von 1977 bis 2011 in Deutschland	18
Abbildung 5: Versuchsserien und Selektion von Testgenotypen für die Rentabilitätsbewertung	27
Abbildung 6: Schema des zweistufigen Bewertungsprozesses der Introgressionslinien	32
Abbildung 7: Prozessschritte der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Verteilungsfunktionen ökonomischer Erfolgsgrößen (DKfL, NKfL und FKfL).....	34
Abbildung 8: Räumliche Verteilung der N_{\min} -Gehalte der Versuchspartzellen am Standort Merbitz in den Versuchsjahren 2017 und 2018.....	36
Abbildung 9: Klimadiagramm der Jahre 2017 und 2018 für den Versuchsstandort Merbitz (Monatsmittelwerte).....	37
Abbildung 10: Relative Ertragsfähigkeit der Population S42 im Vergleich mit Scarlett (Mittelwerte). 38	
Abbildung 11: Relative Ertragsfähigkeit der Population HEB-25 im Vergleich mit Barke (Mittelwerte).....	39
Abbildung 12: Beobachtete Effekte der Population S42 für das Merkmal Protein	40
Abbildung 13: Beobachtete Effekte der Population HEB-25 für das Merkmal Protein.....	41
Abbildung 14: Ökonomische Schadschwelle für die Populationen S42 und HEB-25	42
Abbildung 15: Rentabilität der Introgressionslinien im Vergleich mit den Kultureltern Scarlett und Barke	44
Abbildung 16: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie S42IL-122 im Vergleich mit Scarlett	45
Abbildung 17: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie HEB_01_104 im Vergleich mit Barke	45
Abbildung 18: Gewinnschwelle der Linie S42IL-122 gegenüber Scarlett bei unterschiedlichen Preisszenarien	46
Abbildung 19: Rentabilität der Introgressionslinien im Vergleich mit den Kultureltern Scarlett und Barke bei einer Fungizid-Steuer von 25 %.....	48
Abbildung 20: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie S42IL-122 im Vergleich mit Scarlett bei einer Fungizid-Steuer von 25 %	48
Abbildung 21: Rentabilität der Introgressionslinien im Vergleich mit Quench bei einer Fungizid-Steuer von 25 %.....	49
Abbildung 22: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie S42IL-122 im Vergleich mit Quench bei einer Fungizid-Steuer von 25 %.....	50

Abbildung 23: Kategorisierung verschiedener Bewertungsmethoden neuer Technologien aus Forschung und Entwicklung	51
Abbildung 24: Ablaufschema der Akzeptanzanalyse	53
Abbildung 25: Charakteristisches Reflexionsmuster der Vegetation unter Berücksichtigung von Wachstums- und Alterungsprozessen.....	58
Abbildung 26: Datenerhebung für die Kalibrierung der hyperspektralen Phänotypisierung am Beispiel der Blatt- und Korninhaltsstoffe	60
Abbildung 27: Vereinfachte schematische Darstellung der leave-one-out-Validierung	61
Abbildung 28: Entwicklung der Produktion, des Faktoreinsatzes und der Totalen Faktor- produktivität in der deutschen Landwirtschaft von 2000 bis 2009	84
Abbildung 29: Schematische Darstellung eines exemplarischen Züchtungsprozesses für Sommergerste	107
Abbildung 30: S-Kurven-Konzept zur Erklärung des optimalen Wechselzeitpunktes innovativer Technologien	110
Abbildung 31: Einfluss entscheidungsrelevanter Informationen auf die Wahl der Bewertungs- methode für Innovationen	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verbesserung der N-Nutzungseffizienz von Weizen anhand verschiedener Zeitintervalle .	15
Tabelle 2: Rahmenbedingungen der Feldversuche 2017 und 2018 am Standort Merbitz zur Bestimmung der Produktivität ausgewählter Introgressionslinien	28
Tabelle 3: Auswertungsrelevante Erfolgsgrößen für die Rentabilitätsbewertung der Introgressionslinien.....	31
Tabelle 4: Verteilungsannahmen marktrelevanter Parameter zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulation	35
Tabelle 5: Korrelationen zwischen Faktor- und Produktpreisen bei der Monte-Carlo-Simulation	35
Tabelle 6: Dunnett-Test für das Merkmal Ertrag im Anbausystem ohne Fungizide (FUN ₀)	40
Tabelle 7: Anteil der Pflanzenzüchtung an den Ertragssteigerungen für Sommergerste im Zeitraum von 1946 bis 2008	83
Tabelle 8: Züchtungsfortschritte bei Sommergerste anhand ausgewählter Qualitätsmerkmale	85
Tabelle 9: Einfluss der Leistungsfähigkeit bei der Beurteilung der ökonomischen Schadschwelle.....	94

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Entwicklung einer Wildgersten-Introgressionspopulation am Beispiel der HEB-25	131
Anhang 2: Skizze der Feldversuche der Jahre 2017 und 2018 am Standort Merbitz	132
Anhang 3: Ertrags- und Qualitätsparameter der Feldversuche 2017 und 2018 am Standort Merbitz.....	133
Anhang 4: AgRover für die Feld-Phänotypisierung.....	134
Anhang 5: Befragte Personen der systematisierenden Experteninterviews	134
Anhang 6: Leitfaden zur Durchführung qualitativer Experteninterviews mit potenziellen Anwendern der Hyperspektralanalyse	135

1 Einleitung

Die Landwirtschaft hat seit den 1950er Jahren eine rasante Intensivierung erfahren und innerhalb von 50 Jahren (1950 bis 2000) verdreifachte sich die globale Nahrungsmittelproduktion (DYSON 1999: 990). Eine wesentliche Ursache dieser Produktionszuwächse war die „Grüne Revolution“ mit der Entwicklung und Verbreitung moderner Hochleistungssorten. Auch wenn ein beträchtlicher Teil der Ertragszuwächse auf den verstärkten Einsatz von synthetischem Mineraldünger, Bewässerung, Agrartechnik sowie chemischem Pflanzenschutz zurückzuführen sind, gehört die Erhöhung des genetischen Leistungspotenzials durch neue Sorten langfristig zur wichtigsten Determinante des Produktionswachstums (KHUSH 2001). Die Folge steigender Produktionsmengen waren stetig sinkende Agrarpreise, sodass sich der reale Getreidepreis zwischen 1960 und 2005 teilweise mehr als halbierte (BRAUN und QAIM 2009: 9). Ob sich dieser Trend auf den Weltagrarmärkten fortsetzen wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt fraglich und hängt maßgeblich davon ab, inwieweit Produktivitätssteigerungen unter den gegebenen wirtschaftlichen, klimatischen, politischen und gesellschaftlichen Voraussetzungen künftig in gleicher Intensität wie in der Vergangenheit realisiert werden können. Einen wesentlichen Indikator für den Beginn einer Trendwende auf den Weltagrarmärkten sieht WITZKE (2012) in den starken Anstiegen der Agrarpreise zu Beginn des Jahrtausends. Tatsächlich deuten gegenwärtige Tendenzen darauf hin, dass die zukünftige Ertragsentwicklung wichtiger landwirtschaftlicher Kulturarten keine lineare Fortschreibung vergangener Trends ist (BRISSON et al. 2010). GRASSINI et al. (2013) sehen Hinweise darauf, dass der Weizenanbau in Mitteleuropa ein Ertragsplateau erreicht hat. Ohne zukunftsorientierte Maßnahmen zur Erhöhung der landwirtschaftlichen Produktivität könnten Agrarpreise langfristig vermutlich steigen und gravierende sozialpolitische Konsequenzen besonders in den Entwicklungsländern bedingen.

Nicht nur historisch, sondern auch zukünftig ist die Pflanzenzüchtung einer der Forschungsbereiche, die einen maßgeblichen Einflussfaktor auf die Erhöhung der weitweiten Agrarproduktion ausübt. Daher gilt es, neue pflanzen genetische Innovationen in die Landwirtschaft zu implementieren, um die bestehenden Grenzen der Agrarproduktion in nachhaltiger Art und Weise zu erweitern, die Effizienz landwirtschaftlicher Produktionsfaktoren zu verbessern und eine kontinuierliche Erhöhung des Angebots landwirtschaftlicher Rohstoffe zu gewährleisten. Diesen Schwerpunkten widmet sich die Förderinitiative „Innovative Pflanzenzüchtung im Anbausystem“ (IPAS) im Rahmen der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Die vorliegende Arbeit gliedert sich in das IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY ein und untersucht das Potenzial zweier innovativer Konzepte aus der Pflanzenzüchtung zum langfristigen Erhalt des züchterischen Fortschritts unter wirtschaftlichen Aspekten. Im Zentrum dieser Forschung stehen die Erhöhung von Biodiversität¹ (genetische Diversität), Produktivitätsverbesserungen und das Potenzial sensorischer Phänotypisierung zur Beschleunigung des Züchtungsfortschritts.

¹ Diese Begrifflichkeit fokussiert sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich auf die genetische Dimension der Agrobiodiversität mit den Komponenten der biologischen Vielfalt, die für die landwirtschaftliche Produktion, das Funktionieren der Agrarökosysteme und für die züchterische Weiterentwicklung der Kulturpflanzen von Bedeutung sind.

1.1 Problemstellung

Der Erhalt von Biodiversität gilt als Voraussetzung für intakte Ökosysteme und stellt für den Menschen durch die Bereitstellung zentraler Ökosystemdienstleistungen² eine natürliche Existenzgrundlage dar. Auch für das Erreichen von pflanzenzüchterischen Zielen ist die biologische (genetische) Vielfalt eine essenzielle Voraussetzung, da sich das Leistungspotenzial neuer Sorten durch die Gesamtheit des in einer Kulturart vorhandenen Erbgutes (Genpool) rekrutiert. Im Zuge der Herausbildung einer professionellen privatwirtschaftlichen Pflanzenzüchtung und der allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung im landwirtschaftlichen Primärsektor begann die zunehmende Verbreitung genetisch homogener Sorten. Eine maßgebliche Ursache hierfür liegt darin, dass in der Pflanzenzüchtung insbesondere genetisch stark verwandtes „Elitematerial“ zur Züchtung verwendet wird. Trotz zunehmender Sortenvielfalt resultiert daraus eine Verminderung der genetischen Diversität innerhalb der Kulturpflanzenarten (BECKMANN 2014: 11f.). Die in diesem Zusammenhang geprägte Bezeichnung „genetischer Flaschenhals“ deutet darauf hin, dass nur ein geringer Teil der verfügbaren Genotypen für Kreuzungen verwendet wird. Die Leistungs- und Produktivitätsverbesserungen, die durch Pflanzenzüchtung realisiert werden, sind daher vielfach von einer Verengung der genetischen Diversität begleitet. Moderne Anbausysteme sind aufgrund dieser starken Sortenhomogenität durch eine gewisse Instabilität gegenüber Umwelteinflüssen gekennzeichnet (THOROE und ISEMEYER 1997: 213). Zudem besteht eine aus ökologischer Perspektive nicht zufriedenstellende Abhängigkeit von chemischen Pflanzenschutzmitteln. Der erläuterte Verlust genetischer Vielfalt innerhalb moderner landwirtschaftlicher Kulturarten kann dazu führen, dass das vorhandene Maß an Variabilität zu niedrig ist, um weitere Zuchtfortschritte zu erlangen oder neue pflanzenzüchterische Ziele zu realisieren. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungsprozesse (MONDAL et al. 2016). Die Verwendung bis dato ungenutzter genetischer Ressourcen von Wildarten stellt eine vielversprechende Möglichkeit zur Steigerung der Biodiversität innerhalb landwirtschaftlicher Kulturarten dar. Gleichzeitig birgt die Genomanalyse von Wildarten das Potenzial zur Identifizierung wertsteigernder Wildallele in sich (z. B. in Bezug auf Resistenzen und eine verbesserte Toleranz gegen abiotische und biotische Stressoren), sodass Produktivitätssteigerungen realisiert werden könnten (HOLLAND 2004).

Weitere ungenutzte Potenziale in der Pflanzenzüchtung liegen im Bereich der sensorischen Phänotypisierung (ARAUS und CAIRNS 2014). Um die Auswertung genetischer Informationen künftig effizienter zu gestalten und den züchterischen Fortschritt zu beschleunigen, besteht vorrangig die Notwendigkeit, die räumliche und zeitliche Analyse von Pflanzenmaterial zu automatisieren (COBB et al. 2013). Der pflanzliche Phänotyp entsteht durch Kopplung genetischer Determinanten in ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität mit den jeweiligen Umweltbedingungen. Um ein tiefgehendes Verständnis über die Wechselwirkungen zwischen Genom und Umwelt zu erlangen und die Leistungsfähigkeit der Kulturpflanzen züchterisch zu erhöhen, besteht eine elementare Notwendigkeit zur Erfassung leistungsrelevanter Ertrags- und Qualitätskomponenten über das gesamte Entwicklungsstadium der Pflanze. Trotz intensiver Forschungsbemühungen zur Entwicklung intelligenter Automatisierungssys-

² Ökosystemdienstleistungen sind „direkte und indirekte Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen“ (TEEB 2010: 43).

teme werden viele pflanzenzüchterische Arbeitsschritte gegenwärtig noch mittels kosten- und arbeitsaufwendiger Handbonitur bzw. Laboranalyse durchgeführt (MONTES et al. 2007: 433). Hinzu kommt, dass die Datenerfassung aufgrund hoher Untersuchungskosten auf ausgewählte Parameter bzw. Zeitpunkte beschränkt ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird u. a. die detaillierte Analyse der biochemischen Zusammensetzung (Makro- und Mikronährstoffe) von Testgenotypen vernachlässigt. Mit dem Standardverfahren einer nass-chemischen Laboranalyse lassen sich diese Parameter zwar in hinreichender Präzision erfassen, doch aufgrund hoher Untersuchungskosten besteht für Pflanzenzüchter derzeit kein wirtschaftlicher Anreiz zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit durch eine gezielte Beprobung von Züchtungslinien. Aufgrund der genannten Defizite wird die Phänotypisierung trotz intensiver Forschungsbemühungen gegenwärtig immer noch als „Flaschenhals“ im pflanzenbaulichen Versuchswesen identifiziert (FURBANK und TESTER 2011). Angesichts der wachsenden Bedeutung des züchterischen Fortschritts für eine nachhaltige Ertragssteigerung ist dies ein unbefriedigender Zustand, sodass die Entwicklung alternativer und effizienter Verfahren zur quantitativen und qualitativen Erfassung von Pflanzenmerkmalen von zentraler Relevanz ist (MONTES et al. 2011).

1.2 Projektzielsetzung und Forschungsfragen dieser Arbeit

Zahlreiche angebots- und nachfragebestimmende Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Klimawandel, das Bevölkerungswachstum, veränderte Konsumpräferenzen, erhöhte Flächenkonkurrenz oder die Ressourcenknappheit, werden künftig einen großen Einfluss auf die Entwicklung im Agrar- und Ernährungssektor ausüben. Die Problemstellung im Abschnitt 1.1 zeigt zwei Bereiche auf, um diesen globalen Herausforderungen durch gezielte genetische und sensorische Innovationen in der Pflanzenzüchtung zu begegnen. In diesem Kontext verfolgt das der vorliegenden Arbeit zugrunde liegende IPAS-Forschungsprojekt BARLEY BIODIVERSITY die langfristige Einführung von zwei relevanten pflanzenzüchterischen Innovationen:

I) Nutzung des genetischen Potenzials von Wildarten

Durch die Wildgersten-Introgressionslinien³ der beiden Populationen S42 und HEB-25 soll bislang ungenutztes Potenzial positiv wirkender Gene bzw. Chromosomenabschnitte für die Pflanzenzüchtung verfügbar gemacht werden. Diesbezüglich führen Projektpartner am Lehrstuhl für Pflanzenzüchtung der Martin-Luther-Universität (MLU) Halle-Wittenberg Assoziations- und QTL-Kartierungen (Quantitative Trait Locus⁴) durch. Auf diese Weise können leistungsstarke Zuchtstämme mit positiven Geneigenschaften (z. B. Verfrühung der Blüte, Verbesserung spezifischer Ertragskomponenten, Resistenzen gegen Krankheiten) bestimmt werden. Mittelfristig sind identifizierte Genotypen mit wertsteigernden Wildallelen durch privatwirtschaftliche Saatzuchtunternehmen verwertbar, sodass **Verbesserungen der Produktivität** für die Kulturart Sommergerste realisiert werden könnten. Da die genetische Diversität von Kulturpflanzen ein zentraler Bestandteil der Agrobiodiversität ist, wird durch die Erweiterung des nutzbaren Genpools eine **Steigerung der Biodiversität** angestrebt.

³ Introgressionslinien entstehen durch Kreuzung zwischen Kulturarten und verwandten Wildarten. Detaillierte Erläuterungen, einschließlich der Charakterisierung der beiden Testpopulationen, finden sich im Abschnitt 3.1.

⁴ QTLs sind Abschnitte im Chromosom, die einen Einfluss auf die Ausprägung wertbestimmender quantitativer phänotypischer Merkmale ausüben.

II) **Hyperspektrale Phänotypisierung**

Um quantitative Analysen pflanzlicher Strukturen und Funktionen langfristig betrachtet effizienter zu gestalten, wird die **Hyperspektralanalyse** zur nicht-invasiven Hochdurchsatz-Phänotypisierung eingesetzt. Im Vergleich zu herkömmlichen Standardverfahren eröffnet die Interpretation spektraler Signaturen die Möglichkeit, schneller und kostengünstiger Rückschlüsse auf die physiologische Leistungsfähigkeit von Testgenotypen zu ziehen und die Wechselwirkungen zwischen Genotyp und Umwelt in stärkerem Maße zu erfassen. Durch die kostengünstige und umfassende Bereitstellung phänotypischer Daten können gezielte Selektionsentscheidungen getroffen werden, die den Züchtungsfortschritt nachhaltig beeinflussen. Im Einzelnen soll durch die technologische Nutzung der Hyperspektralanalyse im IPAS-Forschungsprojekt BARLEY BIODIVERSITY die Quantifizierung folgender Pflanzenparameter realisiert werden:

- Hyperspektrale Bestimmung von Blatt- und Korninhaltsstoffen durch die Erfassung von Makro- und Mikronährstoffen
- Modellierung von Pflanzenwachstum durch Erfassung entwicklungs- und ertragsrelevanter Parameter
- Ermittlung von Qualitätseigenschaften für nachgelagerte Verarbeitungsprozesse am Beispiel der Malzqualität von Braugerste

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich im Rahmen von BARLEY BIODIVERSITY auf die Bewertung der beiden angestrebten Innovationen. Ziel ist es, soziale, ökologische und ökonomische Auswirkungen der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 sowie einer hyperspektralen Phänotypisierung darzulegen. Im Folgenden sind die Teilziele dieser Arbeit als Forschungsfragen formuliert. Zur Wahrung einer sachlogischen Struktur sind diese analog den übergeordneten Projektzielen (I und II) untergliedert.

I a) Welche Bedeutung lässt sich der Pflanzenzüchtung im Hinblick auf Produktivitätsverbesserungen beimessen?

In Bezug auf die einleitend dargelegten Herausforderungen der globalen Agrarproduktion gilt es, die Bedeutung und das Potenzial der Pflanzenzüchtung zur Realisierung erforderlicher Produktivitätsverbesserungen zu erläutern. In diesem Zusammenhang soll mit Hilfe einer Literaturanalyse der genetisch bedingte Anteil an den Ertragssteigerungen vergangener Jahrzehnte dargelegt werden. Das Ziel besteht darin, durch Projektion von Entwicklungstrends der Vergangenheit Aussagen hinsichtlich der zukünftigen Bedeutung der Pflanzenzüchtung abzuleiten, um soziale, ökologische und ökonomische Folgerscheinungen des züchterischen Fortschritts diskutieren zu können. Auch wenn im Einzelnen ein spezieller Bezug zur projektrelevanten Kulturart Sommergerste hergestellt werden soll, bezieht sich dieses Teilziel auf den pflanzenzüchterischen Geltungsbereich aller Kulturarten.

I b) Führt der Anbau einzelner Wildgersten-Introgressionslinien aus den Populationen S42 und HEB-25 zu Rentabilitätssteigerungen?

Um das wirtschaftliche Potenzial der Testgenotypen⁵ mit neuen genetischen Eigenschaften zu evaluieren und Anhaltspunkte für beabsichtigte Produktivitätssteigerungen zu eruieren, wird ein Rentabilitätsvergleich ausgewählter Introgressionslinien mit Standardsorten der Kulturart Sommergerste angestrebt. Zur Ableitung sozioökonomischer Effekte steigender Biodiversität im Genpool der Pflanzenzüchtung gilt es, ein monetäres Bewertungskonzept zu erarbeiten, um ökonomisch und ökologisch vorteilhafte Linien zu identifizieren und unter marktspezifischen Voraussetzungen mit Referenzsorten zu vergleichen.

II a) Worin liegen wesentliche Stärken der hyperspektralen Phänotypisierung im Vergleich mit anderen Sensoren zur Informationsgewinnung in der Pflanzenzüchtung?

Trotz zahlreicher wissenschaftlich-technischer Konzepte zur sensorischen Phänotypisierung mangelt es gegenwärtig immer noch an praxisfähigen Lösungen zur Effizienzsteigerung in der Pflanzenzüchtung. Um Rückschlüsse auf mögliche praktische Anwendungsvoraussetzungen der hyperspektralen Phänotypisierung ziehen zu können, besteht ein primäres Ziel zunächst darin, allgemeine sensorische Defizite aus züchterischer Perspektive zu eruieren und diese anschließend im Kontext mit den gesammelten Erfahrungen aus der Testphase der Hyperspektralanalyse im IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY zu bewerten. Dadurch lassen sich im Vergleich zu anderen Systemen wesentliche Stärken des hyperspektralen Messansatzes identifizieren.

II b) Welches Nutzungspotenzial der Hyperspektralanalyse besteht in der Pflanzenzüchtung unter der Voraussetzung wirtschaftlicher und technischer Effizienz dieser Sensorik?

Sensoren können dazu beitragen, die Beobachtungsintensität von Zuchtlinien zu intensivieren und zusätzlich züchterisch bislang nicht erfassbare Pflanzenmerkmale zu detektieren. In diesem Zusammenhang sollen praktische Anwendungsoptionen dargelegt werden, die aufzeigen, wie durch Nutzung der Hyperspektralanalyse wissensbasierte Selektionsentscheidungen zur langfristigen Beschleunigung des Züchtungsfortschritts abgeleitet werden können.

II c) Lassen sich zum gegenwärtigen Entwicklungszeitpunkt wirtschaftliche Effekte der Hyperspektralanalyse im Züchtungswesen abschätzen?

Unternehmerisches Handeln wird in erster Linie durch betriebswirtschaftliche Aspekte gelenkt. Daher ist die wirtschaftliche Effizienz der Hyperspektralanalyse das entscheidende Kriterium hinsichtlich einer Praxiseinführung. In Verbindung mit Nutzungspotenzialen der Hyperspektralanalyse (vgl. Forschungsfrage II b) wird der Versuch einer frühzeitigen Abschätzung monetärer Effekte zur Verdeutlichung von Kosteneinsparungseffekten für die Pflanzenzüchtung unternommen.

⁵ Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Genotypen der beiden zu bewertenden Populationen (S42 und HEB-25) als Testgenotypen bzw. Züchtungslinien bezeichnet. Da es sich um Zuchtmaterial ohne Sortenanerkennung des Bundessortenamtes handelt, ist der Begriff „Sorte“ nicht zulässig.

II d) Welche methodisch-technischen Aspekte zur nutzerfreundlichen Weiterentwicklung der im IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY getesteten hyperspektralbasierten Phänotypisierung lassen sich aus züchterischer Anwenderperspektive identifizieren?

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Bewertung der hyperspektralen Phänotypisierung verfolgt das Ziel, die Wissenslücke zwischen der gegenwärtigen technologischen Entwicklung und den spezifischen Bedürfnissen potenzieller Anwender (Pflanzenzüchter⁶) zu schließen. Durch eine anwenderorientierte Bewertung der hyperspektralen Phänotypisierung sollen zielgerichtete Maßnahmen für eine anwenderfreundliche und praxistaugliche Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse abgeleitet werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Entsprechend der zweigeteilten Zielsetzung des Forschungsprojektes wird die im Abschnitt 1.2 vorgenommene Strukturierung im Rahmen dieser Arbeit beibehalten, sodass eine Untergliederung in zwei Teilbereiche (Teil A und Teil B) erfolgt. Diese strukturelle Unterteilung erscheint insbesondere aufgrund unterschiedlicher methodischer Herangehensweisen zur Bewertung der beiden Projektinnovationen sinnvoll.

Gegenstand von Teil A ist zunächst eine einleitende Darlegung sozioökonomisch relevanter Aspekte des züchterischen (genetischen) Fortschritts (Kapitel 2). Hauptaugenmerk dieses ersten Teilbereiches sind Rentabilitätsvergleiche zwischen den Wildgersten-Introgressionslinien der beiden Populationen S42 und HEB-25 mit wirtschaftlich bedeutenden Standardsorten der Versuchskulturart Sommergerste. Diesbezüglich werden im Kapitel 3 wichtige methodische Grundlagen hinsichtlich des Feldversuchs und der monetären Bewertung erläutert. Relevante Ergebnisse zur wirtschaftlichen Bedeutung der Wildgersten-Introgressionslinien werden im Kapitel 4 dargestellt.

Teil B beinhaltet eine anwenderorientierte Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials der hyperspektralbasierten Phänotypisierung in der Pflanzenzüchtung. Auf die Erläuterung der forschungsmethodischen Vorgehensweise im Kapitel 5 folgt eine Charakterisierung der hyperspektralen Phänotypisierung einschließlich einer kurzen Darlegung statistischer Messergebnisse des Forschungsprojektes BARLEY BIODIVERSITY (Kapitel 6). Wesentliche Ergebnisse der qualitativen Befragung von potenziellen Nutzern der Hyperspektralanalyse im Hinblick auf die Akzeptanz und das Nutzungspotenzial werden im Kapitel 7 kategorisiert und zusammengefasst.

Im Kapitel 8 erfolgt die Diskussion der Forschungsergebnisse über beide Teilbereiche dieser Arbeit. Im Hinblick auf die Bewertung der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 wird unter Einbeziehung einer methodenkritischen Auseinandersetzung ökonomisches und ökologisches Nutzungspotenzial der Introgressionslinien dargelegt und weiterführender Forschungsbedarf aufgezeigt. Weiterhin werden in diesem Kapitel Ergebnisse zur anwendungsorientierten Bewertung der hyperspektralen Phänotypisierung diskutiert, verbunden mit der Ableitung von relevanten Schlussfolgerun-

⁶ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit für nachfolgende Bezeichnungen stets das generische Maskulinum verwendet: Pflanzenzüchter, Züchter, Anwender, Nutzer, Experte und Landwirt. Im weiteren Verlauf der Arbeit schließt die jeweils gewählte männliche Form immer eine weibliche Form und anderweitige Geschlechteridentitäten gleichberechtigt ein.

gen und Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse aus züchterischer Perspektive. Eine abschließende Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zur sozioökonomischen Bewertung intendierter züchterischer Innovationen aus dem IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY findet sich im Kapitel 9.

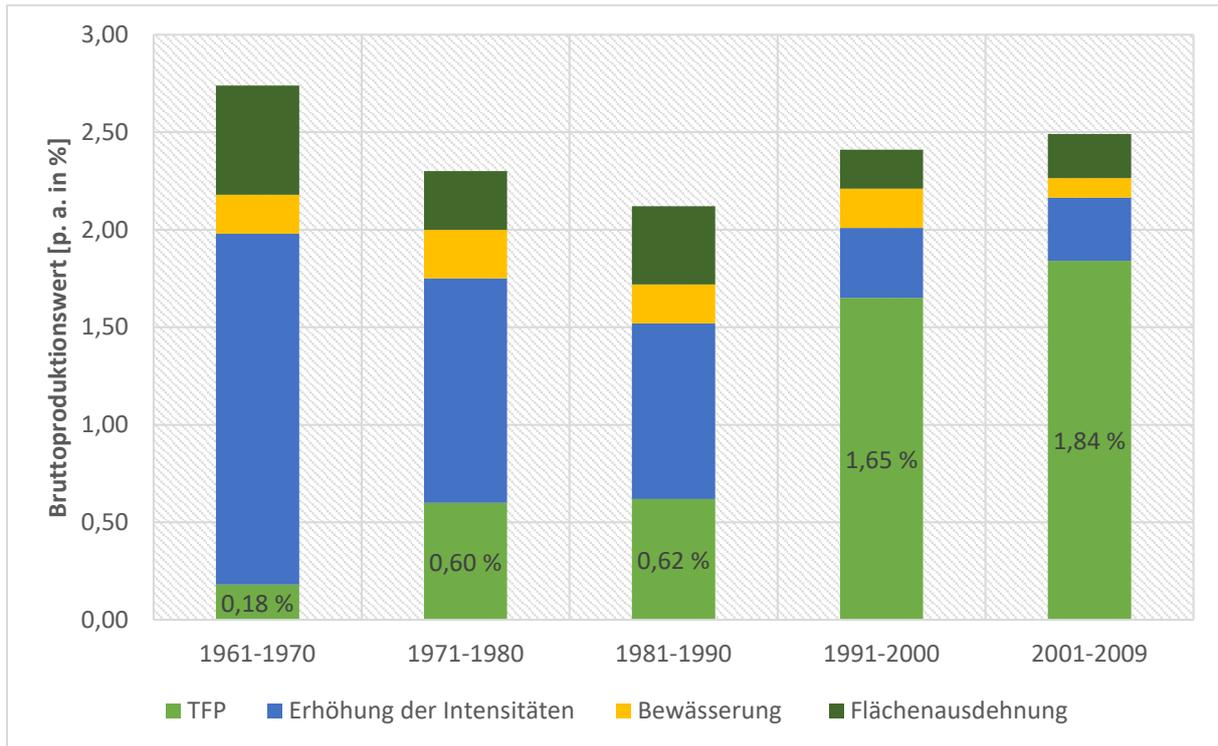
Teil A: Bedeutung der Pflanzenzüchtung und Wirtschaftlichkeit der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25

2 Sozioökonomische Aspekte der pflanzenzüchterischen Verbesserung von Kulturpflanzen

2.1 Agrartechnischer Fortschritt als maßgebliche Determinante für Produktivitätssteigerungen

Gegenwärtige agrarische Entwicklungstendenzen lassen sich vereinfacht in einer Kernaussage zusammenfassen: Unter schlechter werdenden Rahmenbedingungen müssen mehr Nahrungsmittel erzeugt werden. Die Gesamtheit aller globalen Entwicklungen im Agrar- und Ernährungssektor könnte laut Prognosen der Food and Agriculture Organization (FAO) dazu führen, dass die Nachfrage nach Agrargütern bis zum Jahr 2050 um bis zu 70 % ansteigt (FAO 2009: 8). Weltweit betrachtet gibt es verschiedene Stellschrauben zur Realisierung von Produktivitätssteigerungen. Aufgrund des eingeschränkten Potenzials von Flächenausdehnungen und der ausgeprägten Nichtnachhaltigkeit eines verstärkten Betriebsmitteleinsatzes gilt es jedoch in erster Linie, die Produktivität bereits genutzter Flächen zu erhöhen. Bei der Entwicklung innovativer Anpassungsmaßnahmen zur Begegnung negativer Auswirkungen des Klimawandels, zur nachhaltigen und ressourcenschonenden Steigerung der Produktivität und zum Schutz der Umwelt wird insbesondere der Forschung im Agrarsektor eine bedeutsame Position beigemessen (FUGLIE und HEISEY 2007). Allgemein lässt sich der agrartechnische Fortschritt in drei Kategorien klassifizieren (BRINKMANN 1922): 1) biologisch-technischer Fortschritt, 2) mechanisch-technischer Fortschritt und 3) organisatorisch-technischer Fortschritt. Zudem ist eine Differenzierung zwischen produktionssteigerndem und faktorsparendem technischen Fortschritt möglich. Beide Komponenten sind in gleicher Weise relevant: Produktionssteigernder technischer Fortschritt führt zur Steigerung des Outputs je Flächeneinheit und bewirkt eine Anhebung der optimalen speziellen Intensität (durch die Verschiebung der Produktionsfunktion). Im Kontext klimatischer Veränderungen, schwindender Ressourcen und zunehmender Umweltbelastungen erscheinen zudem Innovationen von Bedeutung, die auf eine Verminderung der eingesetzten Inputmengen abzielen (faktorsparend). Um Rückschlüsse auf die Bedeutung des technischen Fortschritts in einem Wirtschaftszweig ziehen zu können, ist die Totale Faktorproduktivität (TFP) ein wichtiger Indikator. Sie misst den Anteil des Wirtschaftswachstums, der nicht auf die Veränderung der Produktionsfaktoren Boden, Arbeit und Kapital zurückzuführen ist und wird als Maß für den technischen Fortschritt interpretiert (DIW 2007: s. p.).

Abbildung 1: Wachstumsfaktoren der weltweiten Agrarproduktion



Anmerkung: Bruttoproduktionswert bewertet in konstantem US-Dollar (Preismittelwerte 2004 bis 2006). TFP: Totale Faktorproduktivität.

Quelle: Nach FUGLIE (2012: 354).

Abbildung 1 zeigt den Anteil am Bruttoproduktionswert für bedeutende Wachstumsfaktoren der weltweiten landwirtschaftlichen Produktion über verschiedene Zeitintervalle. Es wird deutlich, dass zu Beginn der „Grünen Revolution“ (1960) der größte Teil des Produktionswachstums auf die Erhöhung der eingesetzten Produktionsmittel zurückzuführen ist⁷. In den grafisch dargestellten Zeitintervallen verringert sich die anteilige Bedeutung der Faktoren Flächenausdehnung, Bewässerung und Erhöhung der Intensitäten bei einer vergleichenden Betrachtung älterer und jüngerer Perioden, wobei der rückläufige Beitrag der beiden letztgenannten Determinanten insbesondere durch das Gesetz des abnehmenden Grenzertrages zu erklären ist. Gleichzeitig kommt dem agrartechnischen Fortschritt über den gesamten Zeitverlauf eine stetig steigende Bedeutung zu (sukzessiver Anstieg der TFP). Im letzten dargestellten Zeitintervall (2001 bis 2009) rekrutiert sich das Produktionswachstum global betrachtet zu über 70 % aus dem agrartechnischen Fortschritt. Dieser Trend wird sich in den kommenden Jahrzehnten vermutlich fortsetzen, sodass anlässlich der wachsenden Bedeutung des agrartechnischen Fortschritts in Bezug auf das weltweite Produktionswachstum sowohl in Deutschland (WITZKE et al. 2004; NOLEPPA und WITZKE 2013) als auch international (ALSTON et al. 2010; HEISEY et al. 2010) eine Unterinvestition in die Agrarforschung zu beklagen ist.

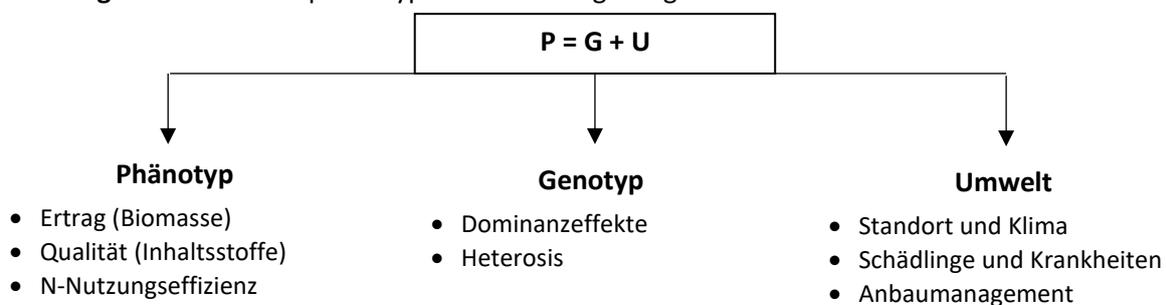
⁷ Wesentliche Antriebskraft des erhöhten Faktoreinsatzes war die technische Produktion von synthetischem Stickstoff zu vergleichsweise niedrigen Energiekosten (Haber-Bosch-Verfahren).

2.2 Züchterischer Einfluss auf den produktionssteigernden agrartechnischen Fortschritt

Die Pflanzengenetik ist neben Precision Farming, Pflanzenschutz, Bewässerungstechnologien, effizienten Beratungs- und Managementsystemen sowie Strategien und Technologien zur Bodenverbesserung lediglich eine Komponente des agrartechnischen Fortschritts. Aus dem tendenziellen Bedeutungszuwachs der TFP (vgl. Abbildung 1) lassen sich daher noch keine hinreichenden Aussagen hinsichtlich des pflanzenzüchterischen (genetischen) Einflusses auf das Produktionswachstum ableiten. Diesbezüglich besteht die Notwendigkeit, den spezifischen historischen Ertrageinfluss der Züchtung isoliert herauszustellen.

Die phänotypische Leistung einer Kulturpflanze, die den Landwirt in Form von Qualitäts- und Ertrags-eigenschaften interessiert, wird durch Wechselwirkungen zwischen dem Genotyp und seiner Umwelt bestimmt (z. B. BECKER 2011: 127ff.). Die Notwendigkeit und Bedeutung der Pflanzenzüchtung lässt sich sehr allgemein mit Blick auf den in Abbildung 2 dargestellten Zusammenhang verdeutlichen.

Abbildung 2: Faktoren der phänotypischen Leistungsfähigkeit



Anmerkungen: P: phänotypischer Wert, G: genotypischer Wert, U: Umwelt (positiver oder negativer Einfluss).

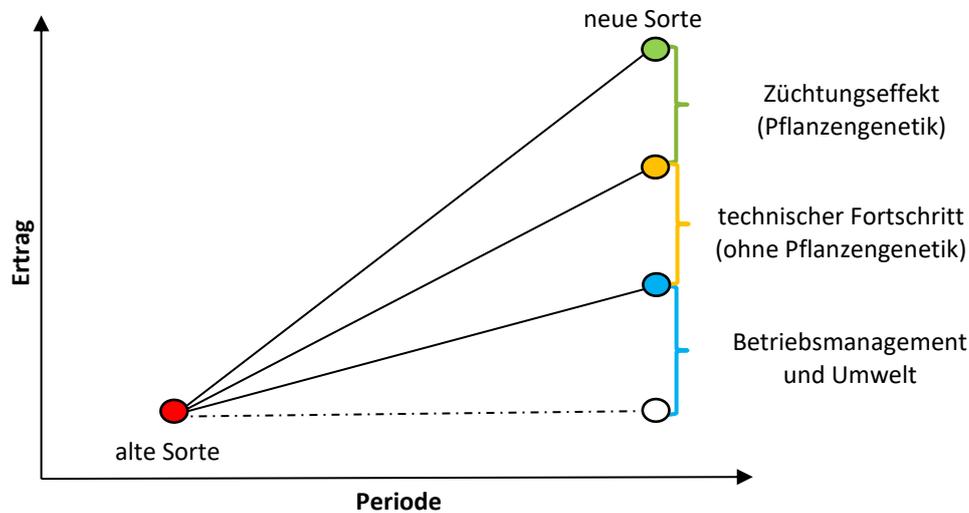
Quelle: Nach WEHLING (2004: 75).

Im einfachsten Fall ist der phänotypische Wert die Summe aus dem genotypischen Wert zuzüglich der positiven oder negativen umweltbedingten Abweichungen. Während die Umwelt durch das Zusammenspiel verschiedener standortspezifischer (Boden und Klima) sowie anbauspezifischer Faktoren (z. B. Düngung, Pflanzenschutz, Betriebsmanagement) geprägt wird, ist die genotypische Leistung einer Kulturpflanze das alleinige Resultat der Pflanzenzüchtung (WEHLING 2004: 75). Damit sind Innovationen der Pflanzenzüchtung ein ganz wesentliches Fundament für die gesamte landwirtschaftliche Wertschöpfungskette.

Üblicherweise wird der Züchtungsfortschritt über die Komponente Ertrag [dt/ha] abgeleitet. Der seit der Jahrtausendwende in Deutschland und anderen wichtigen Erzeugerländern anhaltende Trend stagnierender und teilweise rückläufiger Erträge für bedeutende Getreidearten könnte die Vermutung aufkommen lassen, dass sich der züchterisch-produktionssteigernde Fortschritt verlangsamt hat. Die alleinige Betrachtung der Praxiserträge ist jedoch kein hinreichend verlässlicher Indikator, um Rückschlüsse auf die Bedeutung der Pflanzenzüchtung zu ziehen und genetischen Züchtungsfortschritt beurteilen zu können. Die Ertragsbildung bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen wird durch vielfältige Bestimmungsfaktoren beeinflusst (Abbildung 3). Das Problem bei der Beurteilung von Praxiserträgen

ist, dass sich der Züchtungsfortschritt vielfach nicht von veränderten Rahmenbedingungen (z. B. Umweltfaktoren, Intensitätsniveau der Produktion) und anderen Erscheinungsformen des technischen Fortschritts trennen lässt (HARTL 2009; MICHEL 2012).

Abbildung 3: Faktoren des Ertragsanstieges bei Kulturpflanzen



Quelle: Nach HOFFMANN und LOEL (2015: 49).

Diese Argumentation erscheint auch aus ökonomischer Sicht plausibel, da die Komponente Ertrag nicht immer gleichbedeutend mit dem Faktor Wirtschaftlichkeit zu interpretieren ist. Die oberste Prämisse unternehmerischen Handelns liegt primär nicht in der Ertrags-, sondern in der Gewinnmaximierung. Zwei einfache Beispiele verdeutlichen diesen wichtigen Zusammenhang:

- Ein Anbau qualitativ höherwertiger Sorten (z. B. Eliteweizen) ist in der Regel mit Ertragseinbußen verbunden, führt jedoch zu steigenden Erlösen (€/dt).
- Das Ertragsniveau wird maßgeblich durch die Intensität der landwirtschaftlichen Produktion beeinflusst und diese ist abhängig von den ökonomischen Rahmenbedingungen auf landwirtschaftlichen Faktor- und Produktmärkten.

Den Ertragsfortschritt mit dem Züchtungsfortschritt gleichzusetzen, ist bei der Bewertung der Pflanzenzüchtung wenig zielführend und die o. g. Beispiele verdeutlichen, dass Praxiserträge lediglich eine eingeschränkte Aussagekraft besitzen, insbesondere dann, wenn es um die Quantifizierung ökonomisch messbarer Größen geht. Um ökonomisch verwertbare Aussagen hinsichtlich des Züchtungseffektes generieren zu können, ist eine Isolierung genetischer Effekte von den übrigen Umwelt- und Anbaubedingungen essenziell. In der Literatur existieren in diesem Kontext zahlreiche wissenschaftliche Studien, die den isolierten züchterischen Einfluss an der Ertragsentwicklung untersuchen. Zur Erfassung bzw. Schätzung des Züchtungseffektes gibt es verschiedene methodische Herangehensweisen (nach HOFFMANN und LOEL 2015: 51):

- Auswertung von Sortenprüfungen und Zulassungsverfahren
- statistische Analysen auf der Grundlage von Primärdaten (Metaanalysen)
- versuchstechnische Ansätze unter Freilandbedingungen (gleichzeitiger Anbau alter und neuer Sorten)

2.2.1 Anteil der Pflanzenzüchtung an der Ertragsentwicklung in Deutschland

SCHUSTER (1997) untersuchte den Einfluss der beiden Faktoren Agrotechnik und Genetik auf die Ertragsentwicklung anhand der Versuchsergebnisse von Wertprüfungen und Landessortenversuchen (LSVs) für verschiedene Kulturarten. Für Winterweizen konnte festgestellt werden, dass das Ertragswachstum im Zeitraum von 1952 bis 1993 zu gleichen Anteilen sowohl durch mechanisch-technischen als auch biologisch-technischen Fortschritt bedingt war. In Abhängigkeit des Betrachtungszeitraumes ist jedoch ein prozentualer Bedeutungszuwachs der Züchtung erkennbar. Im Zeitraum von 1970 bis 1986 waren Ertragszuwächse vor allem auf verbesserte Maßnahmen der Agrartechnik zurückzuführen und lediglich 32 % der gestiegenen Erträge genetisch bedingt. Für den späteren Betrachtungszeitraum von 1986 bis 1993 dominierten mit 77 % hingegen genetische Einflüsse.

LADIG et al. (2014) konnten aus den offiziellen Sortenversuchen von 1983 bis 2012 einen genetisch bedingten Ertragsfortschritt bei mit Fungizid behandeltem Winterweizen von jährlich 0,66 % ermitteln. Die Durchschnittserträge stiegen im gleichen Zeitraum jährlich um 1,2 % (FAO 2016: s. p.), sodass der pflanzengenetische Einfluss für das Produktionswachstum auf über 50 % zu beziffern ist. Ein noch höherer genetischer Fortschritt (jährlich 1,15 %) wurde an der unbehandelten Anbauvariante festgestellt, der auf deutliche Verbesserungen der Resistenzeigenschaften schließen lässt. In derselben Studie wurde zudem ein jährlicher pflanzengenetischer Ertragseffekt von 0,68 % für die Kulturart Sommergerste quantifiziert.

Leistungsprüfungen verschiedener Sorten aus unterschiedlichen Zulassungsjahren sind zur Ableitung von Aussagen hinsichtlich der produktionswirksamen Bedeutung der Pflanzenzüchtung besonders geeignet, da der Einfluss von Umweltfaktoren und des Anbaumanagements minimiert werden (HOFFMANN und LOEL 2015: 51). AHLEMEYER und FRIEDT (2011) untersuchten den genetisch bedingten Sorteneinfluss über einen dreijährigen Versuchszeitraum anhand des Anbaus von 90 verschiedenen Winterweizensorten, die zwischen 1966 und 2007 vom Bundessortenamt (BSA) zugelassen worden sind. Es konnten kontinuierliche Sortenverbesserungen erzielt werden und der züchtungsbedingte Ertragsfortschritt bei Weizen lag im Mittel jährlich bei 0,375 dt/ha in der extensiveren Anbaustufe und 0,34 dt/ha bei intensiver Bewirtschaftung. Die Durchschnittserträge in diesem Zeitraum stiegen in Deutschland jährlich um 0,61 dt/ha (FAO 2016: s. p.), sodass der pflanzengenetischen Komponente anteilig mehr als 50 % des Ertragswachstums zuzuschreiben ist. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei gleichen Versuchsbedingungen auch für Wintergerste (AHLEMEYER 2009).

Dieser speziell auf Deutschland ausgerichtete Forschungsüberblick zum Ertragseinfluss der Pflanzenzüchtung verdeutlicht, dass die in den letzten 20 Jahren beobachteten Ertragsstagnationen für bedeutende Kulturpflanzen nicht genetisch bedingt sind. Daher erscheint die Betrachtung kausaler Zusammenhänge für die Stagnation der Praxiserträge in Deutschland indiziert.

2.2.2 Ursachen für die Stagnation der Ertragsentwicklung bedeutender Kulturpflanzen in der landwirtschaftlichen Praxis

Ertragsdepressionen infolge weltweiter klimatischer Veränderungen wurden bereits als maßgeblicher Einflussfaktor angeführt. Diese sorgen dafür, dass der genetische Fortschritt in den Praxiserträgen nur bedingt sichtbar und Züchtungseffekte konterkariert werden (BRISSEON et al. 2010; OURY et al. 2012).

Ebenso spielt die züchterische Fokussierung auf nicht ertragsrelevante Pflanzenmerkmale (z. B. Resistenzen, Standfestigkeit) eine bedeutende Rolle bei der Ertragsstagnation (LEGE 2010: 252). Dies gilt insbesondere für Kulturarten, bei denen qualitative Aspekte aufgrund nachgelagerter Verarbeitungsschritte von zentraler Bedeutung sind (z. B. Proteingehalt bei Braugerste). Je mehr Zuchtziele existieren, „desto geringer fällt bei gleichem Züchtungsaufwand der Züchtungsfortschritt für eines dieser [qualitativen] Merkmale je Zeiteinheit aus“ (MICHEL 2012: 1). Als Beispiel lässt sich in diesem Zusammenhang die negative Korrelation zwischen Ertrag und Ertragsstabilität anführen (CALDERINI und SLAFER 1999).

Des Weiteren können die pflanzenbauliche Einengung der Fruchtfolge mit der damit verbundenen Erhöhung des Krankheitsdruckes sowie die stetige Ausweitung des Winterweizenanbaus auf weniger ertragreiche Standorte als Stagnationsursachen der Naturalerträge in Deutschland angeführt werden (AHLEMEYER und FRIEDT 2011: 19). Als weiterer kausaler Erklärungsansatz für die Stagnation landwirtschaftlicher Erträge wird in der Literatur die zunehmende Extensivierung erwähnt (LAIDIG et al. 2014: 2601). Aufgrund veränderter politischer Rahmenbedingungen (z. B. Verschärfung der Düngemittelverordnung) aber auch betriebswirtschaftlicher Überlegungen (z. B. verstärkt konservierende Bodenbearbeitung) ist partiell eine rückläufige Anbauintensität in der Landwirtschaft zu beobachten.

2.3 Sozialpolitische Effekte ertragssteigernder Pflanzenzüchtung

Die dargelegten Erkenntnisse hinsichtlich des wachsenden Anteils der Züchtungsforschung an der Ertragsleistung moderner Kulturpflanzen sind ein wichtiger Anhaltspunkt für die Bedeutung der Pflanzenzüchtung. Da die Ertragskomponente jedoch lediglich eine Zielsetzung moderner Pflanzenzüchtung ist, gilt es, weitere soziale, ökologische und ökonomische Aspekte des züchterischen Fortschritts zu eruieren.

Sozialpolitische Folgen von Hunger wurden besonders durch die Nahrungsmittelkrise während des Jahres 2008 offenbar. Im Hinblick auf eine adäquate Ernährungssicherheit der Weltbevölkerung ist nicht nur die alleinige Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln als Einflussfaktor für die Welternährung zu nennen, sondern gleichermaßen spielt auch der Zugang zu Nahrungsmitteln eine bedeutsame Rolle⁸. Dies korreliert maßgeblich mit der Einkommenssituation der Bevölkerung sowie dem Preisniveau von Agrargütern. Obwohl hohe Agrarpreise landwirtschaftliches Wachstum fördern und höhere Verkaufserlöse letztendlich auch Kleinbauern in Entwicklungsländern zugutekommen, sind volatile und steigende Preise eine wesentliche Ursache für Ernährungsunsicherheit. Besonders Haushalte mit sehr geringem Einkommen sind bei der Versorgung mit Nahrungsmitteln auf stabile Preise angewiesen, da der relative Ausgabenanteil für Nahrungsmittel überproportional hoch ist und diesbezüglich teilweise 70 % des Einkommens aufgewendet werden müssen (FAN et al. 2011: 2). Steigende Preise führen zu einer deutlichen Verschärfung der Armutssituation, da die Kaufkraft sinkt und Grundbedürfnisse der in diesen Haushalten lebenden Menschen nicht ausreichend gedeckt werden können (BRAUN und QAIM 2009: 13). Dies gilt nicht nur für Nahrungsmittel, sondern hat auch indirekte Auswirkungen auf die Kaufkraft und den Erwerb anderer Güter und Dienstleistungen des täglichen Bedarfs (z. B. Gesundheitsversorgung, Zugang zu Bildung). Hohe Agrarpreise können daher zu einer deutlichen Verschlechterung der

⁸ Nach dem sog. Entitlement-Ansatz (SEN 1988).

Lebensqualität beitragen. In diesem Kontext ermittelten RUNGE und SENAUER (2007: s. p.), dass eine Erhöhung der Nahrungsmittelpreise um 1 % einen Anstieg der Anzahl weltweit hungernder Menschen von ca. 16 Mio. bewirkt.

Beide Aspekte der globalen Ernährungssicherheit – Verfügbarkeit von und Zugang zu Nahrungsmitteln – werden durch produktionssteigernde Pflanzenzüchtung gleichermaßen positiv beeinflusst. Wie im Abschnitt 2.2 erläutert, hat die Züchtung einen im Zeitverlauf steigenden Einfluss am weltweiten Produktionswachstum. Bei einer Ceteris Paribus Betrachtung⁹ führt diese Ausdehnung des Angebots zu einer Reduktion des Preisniveaus. Der positive Mengeneffekt bedingt einen zusätzlichen negativen Preiseffekt. Dieser wechselseitige Zusammenhang zwischen Produktionsmenge (Angebot) und Agrarpreisen wird im Abschnitt 2.5 im Kontext mit betriebswirtschaftlichen Effekten züchterischer Fortschritte detaillierter erläutert und anhand empirischer Daten nachgewiesen. Innovationen der Pflanzenzüchtung tragen maßgeblich dazu bei, dass Weltmarktpreise für Agrargüter stabil bleiben (historisch tendenziell sogar sinken) und erleichtern über niedrige Preise auch den Zugang zu Nahrungsmitteln. Ohne diesen produktionssteigernden Einfluss können Nachfragetrends nicht in ausreichendem Maße entsprochen werden. Dies würde aufgrund steigender Agrarpreise negative soziale Folgeerscheinungen bedingen.

Aus sozialer Perspektive können pflanzengenetisch verbesserte Sorten auch für Kleinbauern in Entwicklungsländern zu positiven Einkommenseffekten beitragen. Auf den ersten Blick scheint diese Aussage im Widerspruch mit der vorangegangenen Argumentation zu stehen. Doch weltweit betrachtet existiert ein duales landwirtschaftliches System, das sowohl durch eine industrialisierte als auch subsistenzorientierte Landwirtschaft geprägt ist. Moderne Hochleistungssorten der kommerziellen Pflanzenzüchtung, die ihr Ertragspotenzial vor allem auf nährstoffreichen Böden und unter intensiver Bewirtschaftung entfalten, sind für die spezifischen Anforderungen kleinbäuerlicher Produzenten in Entwicklungsländern wenig geeignet und kommen hauptsächlich der industriellen Landwirtschaft zugute. Insbesondere diese kommerzielle Pflanzenzüchtung hat aufgrund der Mengenwirkung einen großen Einfluss auf das weltweite Marktgleichgewicht und auf sinkende Agrarpreise. Demzufolge hat eine nicht kommerzielle Pflanzenzüchtung, die im Sinne staatlicher Agrarentwicklung ausgerichtet ist, durchaus das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Einkommensentwicklung ländlicher Bevölkerung zu leisten, da aufgrund der vergleichsweise geringen Produktionsbedeutung kleinbäuerlicher Produzenten keine zusätzlichen negativen Preiseffekte entstehen. Unter der Voraussetzung, dass „diese [Kleinbauern] fairen Zugang zu lokalen und globalen Märkten haben, können sie von angepassten Saatguttechnologien enorm profitieren“ (QAIM und STEIN 2006: 50). Angepasst bedeutet in diesem Kontext, dass sich die Züchtung spezifisch auf die regionalen Begebenheiten fokussiert (z. B. geringe Bodenfruchtbarkeit, klimatisch ungünstige Standortverhältnisse). Eine an die spezifischen Bedingungen der Subsistenzlandwirtschaft angepasste Züchtung, die auf die Verbesserung lokaler Sorten ausgerichtet

⁹ Die Ceteris Paribus Annahme wird zur Analyse statisch ökonomischer Systeme verwendet. Bei gleichzeitiger Konstanz aller anderen ökonomischen Variablen verändert sich jeweils nur der Einfluss einer Variablen. Im betrachteten Beispiel verändert sich lediglich die Produktionsmenge und übrige Faktoren, wie z. B. das Bevölkerungswachstum, werden vernachlässigt.

ist, hat auf das weltweite Marktgleichgewicht einen geringen Einfluss. Bei dieser regionalen Betrachtung sind positive Einkommenseffekte durch Ertragssteigerungen durchaus realistisch. Da der Primärsektor Landwirtschaft gerade in den Entwicklungsländern von zentraler Bedeutung ist, ergeben sich durch Einkommenssteigerungen positive Rückkopplungen (sog. Spill-over-Effekte) auf andere Wirtschaftsbereiche. So besteht die Möglichkeit, dass über eine verstärkte Nachfrage nach Arbeitskräften auch landlose Bevölkerungsgruppen von züchterischen Entwicklungen profitieren (QAIM 2006: 206). Studien aus verschiedenen Entwicklungsländern zeigen, dass jeder Dollar an zusätzlichem Einkommen infolge verbesserter Technologien im landwirtschaftlichen Sektor zu ein bis zwei Dollar an Wachstum in anderen Wirtschaftssektoren führt (DELGADO et al. 1998: 14). Vor diesem Hintergrund sind Investitionen in internationale Pflanzenzüchtungsprogramme als nachhaltig und rentabel einzustufen.

2.4 Einfluss der Pflanzenzüchtung auf die Ressourceneffizienz und den Ressourcenschutz

Die Erfolge der Pflanzenzucht lediglich auf die Komponente Ertrag zu reduzieren, wäre sehr einseitig und würde den enormen Beitrag der Züchtung zum Erhalt wichtiger Ressourcen vernachlässigen. Neben der Ertragssteigerung liegen die Ziele der Pflanzenzüchtung in der Verbesserung der Pflanzengesundheit (hohe Widerstandsfähigkeit gegen biotische und abiotische Stressoren) und der Nährstoffeffizienz (gleiche Biomasse bei einem verringerten Nährstoffangebot). Genetische Fortschritte im Hinblick auf die Nährstoffeffizienz oder die Erhöhung der Stresstoleranz gegen Hitze, Trockenheit und Versalzung lassen sich im Vergleich zu den Ertragswirkungen deutlich schwieriger quantifizieren. Da diese Zuchtziele einen direkten Einfluss auf den Bedarf an landwirtschaftlichen Betriebsmitteln ausüben (faktorsparender technischer Fortschritt), haben sie aus ökonomischer Perspektive eine besondere Relevanz. Auch vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen und schwindender Ressourcen wird die Innovation von robusteren und widerstandsfähigeren Sorten zukünftig von noch stärkerer Relevanz sein. Darin liegt auch eine zentrale Bedeutung der Wildgersten-Introgressionslinien der Populationen S42 und HEB-25 aus BARLEY BIODIVERSITY. Entsprechende Effekte bezüglich des Bedarfs an Fungiziden werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargelegt (vgl. Kapitel 4).

2.4.1 Verbesserung der Nährstoffeffizienz am Beispiel von Stickstoff

Der Einsatz von Stickstoff (N) als essenzieller Pflanzennährstoff ist nicht nur mit positiven Ertragswirkungen verbunden, sondern assoziiert auch mit Belastungen wertvoller Ökosysteme. Der jährliche N-Überschuss in Deutschland konnte zwar auf 95 kg N/ha reduziert werden, doch das Ziel der Bundesregierung, den jährlichen Überschuss auf 80 kg N/ha zu reduzieren, wird gegenwärtig weiterhin deutlich verfehlt (UBA 2016: s. p.). Diese Belastungen bringen empfindliche Ökosysteme aus dem Gleichgewicht und bedrohen durch Eutrophierung von Gewässern nicht nur die biologische Vielfalt, sondern infolge von Nitratanreicherungen im Trinkwasser auch die menschliche Gesundheit. Vielfach lassen sich die Kosten dieser negativen externen Effekte nicht monetär bewerten, da für bestimmte Natur- und Umweltgüter keine Märkte existieren bzw. negative Folgeerscheinungen nicht direkt zurechenbar sind. Die externen ökologischen Kosten lassen sich daher nur durch Schätzwerte beziffern und liegen für die EU-27 jährlich zwischen 70 und 320 Mrd. € (BRINK und GRINSVEN 2011: 533). Ein Großteil dieser

Kosten ist direkt auf die landwirtschaftliche Düngung zurückzuführen, da nach Einschätzung des Umweltbundesamtes 70 % der Stickstoff- und 50 % der Phosphoreinträge in Oberflächengewässern aus der Landwirtschaft stammen (UBA 2011: 22). Diese ökologischen Kosten sind von der Gesellschaft zu tragen und liegen in der EU-27 zwischen 150 und 750 € pro Kopf (BRINK und GRINSVEN 2011: 533).

Angesichts negativer Umwelteinflüsse, zunehmend kritischer Konsumenten sowie hoher Energiekosten für die Herstellung von synthetischem Stickstoff ist davon auszugehen, dass sich die Landwirtschaft weiterhin auf politische Reglementierungen und eine niedrigere N-Düngung einstellen muss. Daher ist die Züchtung N-effizienter Pflanzen eine zentrale Zielsetzung der modernen Pflanzenzüchtung (GARNETT et al. 2015). Der Begriff N-Effizienz steht für die Fähigkeit eines Genotyps, bei verringertem N-Angebot einen überdurchschnittlichen Kornertrag zu erzielen (SATTELMACHER et al. 1994: 215). Entsprechend einer gängigen Definition von MOLL et al. (1982: 562f.) ist die N-Effizienz der Quotient aus Getreidetrockenmasse und N-Gehalt im Boden ($N_{\min} + N\text{-Düngung}$). Dabei wird die N-Effizienz von der N-Aufnahme- und der N-Nutzungseffizienz beeinflusst (MOLL et al. 1982: 562f.). Die N-Nutzungseffizienz von Pflanzen ist bis zu einem gewissen Grad genetisch bedingt (LE GOUIS et al. 2000; SYLVESTER-BRADLEY und KINDRED 2009). Dies gilt im Speziellen auch für die Versuchskultur Sommergerste im Projekt BARLEY BIODIVERSITY (ABELED0 et al. 2008; BEATTY et al. 2010).

Tabelle 1: Verbesserung der N-Nutzungseffizienz von Weizen anhand verschiedener Zeitintervalle

Zeitraum	Anzahl der Genotypen	N-Level [kg N/ha]	Erhöhung der N-Effizienz [% je Jahr]	Quelle
1962 - 1985	8	0	1,2	(ORTIZ-MONASTERIO et al. 1997)
		75	0,4	
		150	0,6	
		300	0,9	
1977 - 2007	24	0	0,35	(SYLVESTER-BRADLEY und KINDRED 2009)
		200	0,58	
1985 - 2010	195	150	0,37	(CORMIER et al. 2013)
		250	0,3	

Anmerkung: N-Effizienz: Quotient aus Getreidetrockenmasse und N-Gehalt im Boden (MOLL et al. 1982: 562f.).

Quelle: CORMIER et al. (2016: 265).

Verschiedene Studien haben versucht, den genetischen Einfluss auf die Verbesserung der N-Nutzungseffizienz durch den Anbau traditioneller und moderner Sorten unter gleichen ackerbaulichen Verhältnissen zu quantifizieren. Tabelle 1 zeigt positive Züchtungseffekte bei Weizen für verschiedene Zeitintervalle. ORTIZ-MONASTERIO et al. (1997) ermittelten für den Zeitraum von 1962 bis 1985 anhand unterschiedlicher Düngungsstufen einen genetischen Fortschritt der N-Nutzungseffizienz von jährlich 0,4 bis 1,2 %. Auch SYLVESTER-BRADLEY und KINDRED (2009) konnten in den Jahren von 1977 bis 2007 in Bezug auf die N-Nutzungseffizienz signifikante genetische Verbesserungen feststellen (0,35 bis 0,58 % pro Jahr). CORMIER et al. (2013) quantifizierten in Frankreich auf der Basis von 195 Weizensorten der Zulassungsjahre 1985 bis 2010 eine züchterisch bedingte Verbesserung der N-Effizienz von jährlich 0,3 bis

0,37 %. Anhand dieser Daten lässt sich verdeutlichen, welchen wichtigen Beitrag die Pflanzenzüchtung im Hinblick auf eine wirtschaftliche und umweltschonende Landwirtschaft leisten kann.

Auch wenn sich N-Überschüsse durch ein verbessertes Anbaumanagement reduzieren lassen, sind züchterische Verbesserungen und der Anbau von N-effizienteren Sorten dringend erforderlich, um der zunehmenden Nitratbelastung von Grundwasser, Böden und Habitaten entgegenzuwirken und die damit verbundenen gesellschaftlichen Kosten zu minimieren. Studien über die Verbesserung der N-Nutzungseffizienz lassen darauf schließen, dass der genetische Fortschritt über zehn Jahre theoretisch dazu beitragen kann, 6 bis 8 kg N/ha einzusparen (CORMIER et al. 2016: 255). Dass sich dies nicht in der Praxis widerspiegelt, hängt insbesondere mit ökonomischen Entscheidungen über die optimale spezielle Intensität der N-Düngung zusammen und wird maßgeblich von Input- und Output-Preisen beeinflusst (SYLVESTER-BRADLEY und KINDRED 2009: 1942ff.).

2.4.2 Reduktion der Treibhausgasemission

Die Landwirtschaft ist nicht nur von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen, sondern sie ist weltweit auch einer der wesentlichsten Emittenten von Treibhausgasen (THGs)¹⁰. Der Gesamtanteil direkter landwirtschaftlicher THG-Emissionen lässt sich auf 10 bis 14 % beziffern (SMITH et al. 2007: 499; FAO 2009: 30). Neben diesen der Landwirtschaft direkt zurechenbaren THG-Emissionen existieren zusätzlich indirekte Emissionen, die insbesondere durch Landnutzungsänderungen hervorgerufen werden. In Deutschland ist in erster Linie die landwirtschaftliche Nutzung entwässerter Moore und die Umwandlung von Grünland in Ackerland für die Freisetzung klimarelevanter Gase verantwortlich¹¹ (WEGENER et al. 2006). Global ist die Freisetzung klimaschädlicher Gase vor allem auf die Entwaldung zurückzuführen, weil dadurch nicht nur die Funktion der Wälder als wichtige Kohlenstoffsенke verloren geht, sondern enorme Mengen an CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt werden¹². Weltweit belaufen sich die indirekten Emissionen auf ca. 15 % der gesamten anthropogen verursachten THG-Emissionen (WERF et al. 2009: 738). Da Landnutzungsänderungen häufig auf die Gewinnung landwirtschaftlich nutzbarer Flächen abzielen, ist ein Großteil dieser indirekten Emissionen der Landwirtschaft zurechenbar, sodass der Gesamtanteil landwirtschaftlicher Emissionen schätzungsweise bei 25 % liegt (SCHAFNIT-CHATTERJEE 2011: 3f.).

Als Folge eines verringerten Flächenbedarfs durch Ertragsfortschritte in der Pflanzenzüchtung ergeben sich vor dem Hintergrund dieser immensen landwirtschaftlichen THG-Emissionen Rückwirkungen auf klimarelevante Effekte:

- Ertragssteigerungen verbessern die CO₂-Bilanz erzeugter agrarischer Rohstoffe, da je Einheit eingesetzter Produktionsfaktoren mehr Output erzielt werden kann (NOLEPPA und WITZKE 2013: 25).

¹⁰ 50 bis 60 % der Methan- und Lachgasemission (CH₄ und N₂O) stammen direkt aus dem Agrarsektor (WREFORD et al. 2010: 14). Die Klimawirkungen von CH₄ und N₂O sind um ein Vielfaches höher als die von CO₂. Beispielsweise beträgt das CO₂-Äquivalent von N₂O 310. Das bedeutet, dass ein Kilogramm N₂O 310 mal stärker zum Treibhauseffekt beiträgt als ein Kilogramm CO₂ (WREFORD et al. 2010: 14).

¹¹ In lediglich 10 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen in Deutschland (insbesondere Grünlandstandorte) werden ca. 35 % aller Kohlenstoffvorräte gespeichert (OSTERBURG et al. 2007: 164).

¹² 40 % des gesamten Kohlenstoffs aller Landökosysteme werden in Wäldern gespeichert (LEHMANN 2007: 5).

- Produktionssteigernder züchterischer Fortschritt beugt der Freisetzung klimaschädlicher Gase vor, da aufgrund einer gestiegenen Flächenproduktivität ein geringerer Anreiz für Landnutzungsänderungen gegeben ist.

Dank der Investitionen in die deutsche Pflanzenzüchtung und dem damit verbundenen positiven Folgeeffekt einer verringerten Flächenausdehnung konnte zwischen 1991 und 2000 die Freisetzung von etwa 160 bis 235 Mio. t CO₂ vermieden werden (NOLEPPA und WITZKE 2013: 24-28).

2.5 Betriebswirtschaftliche Effekte des biologisch-technischen Fortschritts

In den vorangegangenen Abschnitten wurden wesentliche Aspekte der volkswirtschaftlichen Bedeutung der Pflanzenzüchtung erläutert. Der Fokus dieses Abschnitts liegt auf einzelbetrieblicher Ebene. Es wird anhand empirischer Daten untersucht, ob Sortenverbesserungen Einkommenseffekte für landwirtschaftliche Produzenten bedingen. Als Datengrundlage fungieren langfristige Standarddeckungsbeiträge (SDB)¹³ vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) für den Sommergerstenanbau im Zeitraum von 1977 bis 2011 in Deutschland¹⁴. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich die zeitraumbezogene Wirkung des biologisch-technischen Fortschritts zwischen den einzelnen Kulturarten nicht sonderlich voneinander unterscheidet, sodass generelle Aussagen abgeleitet werden können. Um die Effekte ertragssteigernder Pflanzenzüchtung und genotypischer Verbesserungen auf betrieblicher Ebene erfassen zu können, ist es notwendig, den züchterischen Fortschritt aus der allgemeinen Ertragsentwicklung zu isolieren (vgl. Abschnitt 2.2). Diesbezüglich werden die historischen SDB zwischen 1977 und 2011 mit einer hypothetischen Referenzsituation verglichen, die auf der Annahme beruht, dass züchterischer Fortschritt auf einzelbetrieblicher Ebene nicht genutzt wird (SDB ohne Züchtung). Zur Bestimmung der SDB ohne den Einfluss der Pflanzenzüchtung wird unterstellt, dass das Ertragswachstum ohne biologisch-technischen Fortschritt 50 % geringer ausfällt als bei kontinuierlicher Nutzung genetisch verbesserter Sorten¹⁵.

Da die SDB durch das KTBL erst seit dem Wirtschaftsjahr 2001/2002 nach der sog. EU-Typologie¹⁶ ermittelt werden, sind zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit nachfolgende Annahmen notwendig:

- Die Erträge und SDB vor 2001/2002 beziehen sich auf die durchschnittliche Leistungsklasse 3.
- Bei der Kostenkalkulation werden keine Maschinen- und Arbeitskosten berücksichtigt. Die variablen Kosten setzen sich aus Saatgut, Dünger, Pflanzenschutz und sonstigen Kosten zusammen.
- Die zwischen dem Wirtschaftsjahr 2001/2002 und 2004/2005 gezahlte Flächenprämie für Sommergerste wird zur Wahrung der Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt.

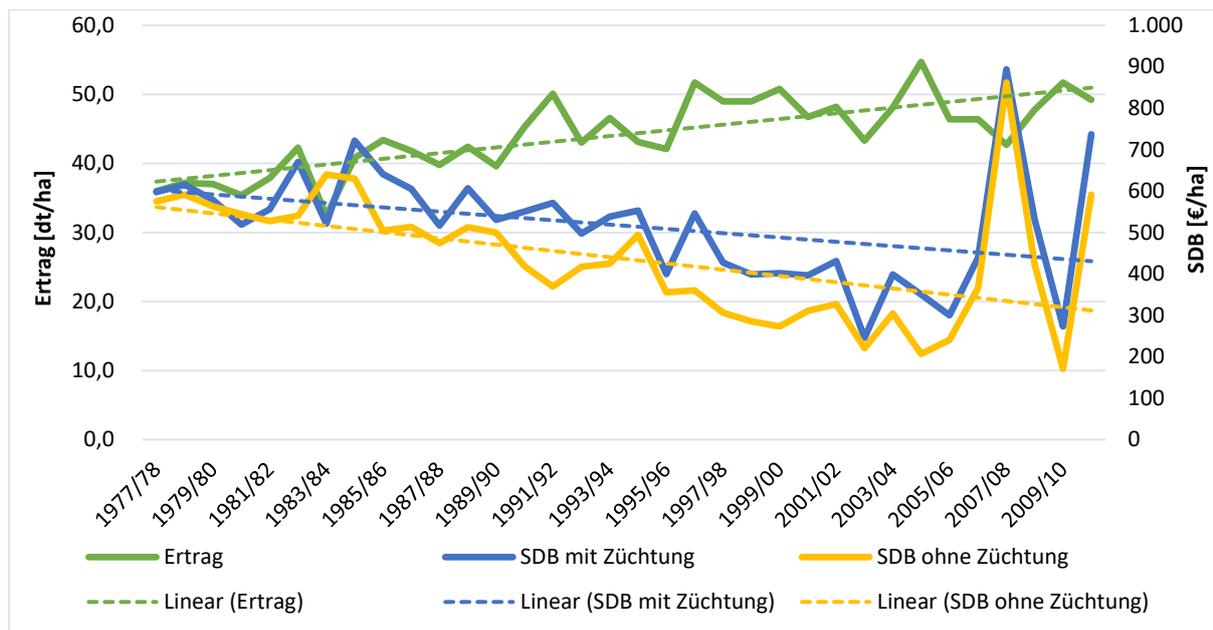
¹³ Der Standarddeckungsbeitrag entspricht der monetär bewerteten Bruttoleistung abzüglich der entsprechenden variablen Spezialkosten (SAUER und HARDEWEG 2006: 5).

¹⁴ Aufgrund veränderter Erhebungsmodalitäten des KTBL (keine Erfassung für Sommergerste ab dem Jahr 2011) erfolgt keine Darstellung aktuellerer Jahrgänge.

¹⁵ Die Annahme des um 50 % verminderten Ertragswachstums bezieht sich auf die im Punkt 2.2.1 vorgestellten Studien (vgl. AHLEMEYER und FRIEDT 2011; LAIDIG et al. 2014). Im Vergleich zur Studie von NOLEPPA und WITZKE (2013), die bezüglich des Einflusses der Pflanzenzüchtung ein Intervall von 50 bis 75 % festgelegt haben, ist die in dieser Arbeit gewählte Annahme als eher konservativ einzustufen.

¹⁶ Gemeinschaftliches Klassifizierungssystem aller landwirtschaftlichen Betriebe der EU.

Abbildung 4: Entwicklung der Durchschnittserträge und SDB für Sommergerste im Zeitraum von 1977 bis 2011 in Deutschland



Anmerkung: Die Simulation der SDB ohne Züchtung basiert auf der Annahme, dass der relative Ertrags Einfluss der Pflanzenzüchtung bei 50 % liegt.

Quelle: Eigene Darstellung (2018) auf Datenbasis des KTBL (2018).

Die grafische Darstellung in Abbildung 4 visualisiert die Entwicklung der Durchschnittserträge und SDB für Sommergerste im Zeitraum von 1977 bis 2011 in Deutschland und verdeutlicht folgende Sachverhalte:

- a) Die durchschnittliche Ertragsleistung von Sommergerste stieg zwischen 1977 und 2011 von 36 auf ca. 50 dt/ha an. Demzufolge haben sich die Erträge im betrachteten Zeitraum um jährlich ca. 1 % erhöht, was einem Anstieg von 0,4 dt/ha pro Jahr entspricht.
- b) Trotz steigender Erträge sinken die SDB für Sommergerste sowohl mit als auch ohne Pflanzenzüchtung im Zeitverlauf. Es ist ersichtlich, dass beide SDB gegen Ende der 2000er Jahre deutlich stärkeren Schwankungen unterworfen waren. Dies ist jedoch nicht die Folge technischer Innovationen, sondern das Resultat verschiedener angebots- und nachfragebestimmender Faktoren (insbesondere Missernten und geringe Lagerbestände).
- c) Bei der entsprechend der Annahme unterstellten Nichtnutzung genetisch verbesserter Sorten liegen die SDB für Sommergerste ohne Pflanzenzüchtung über den gesamten Betrachtungszeitraum durchschnittlich um ca. 80 €/ha unterhalb des historischen Niveaus (SDB mit Züchtung). In vereinzelten Jahren (insbesondere 1983 und 1984) zeigt die Grafik, dass die SDB unter Berücksichtigung der Züchtung geringer sind als in der hypothetischen Referenzsituation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Modellierung der SDB ohne Züchtung mit einem konstanten Ertragszuwachs gerechnet wurde. Witterungsbeeinflusste Ertragseinbußen konnten modellbedingt nicht erfasst werden.

Im Hinblick auf die Fragestellung zur einzelbetrieblichen Wirkung des technischen Fortschritts werden die Sachverhalte b) und c) nachfolgend interpretiert.

2.5.1 Negative Einkommenseffekte durch technischen Fortschritt

Produktionssteigernder technischer Fortschritt (u. a. durch biologisch-technischen Züchtungsfortschritt) führt nicht zwangsläufig zur Erhöhung landwirtschaftlicher Einkommen, da aufgrund gesunkener Produktpreise trotz positivem Mengeneffekt kein positiver Einkommenseffekt entsteht (negativ linearer Trend). Dieses landwirtschaftliche Phänomen ist in der Literatur eingehend beschrieben und wird insbesondere durch eine unelastische Nachfrage nach Nahrungsmitteln bestimmt (der Wert der Preiselastizität ist kleiner als 1). Das bedeutet vereinfacht ausgedrückt, dass die prozentuale Änderung der Nachfragemenge kleiner ist als die prozentuale Preisänderung. Bedingt durch die geringe Preiselastizität der Nachfrage nach Nahrungsmitteln führen technologische Weiterentwicklungen und Innovationen über den gesamten Agrarsektor betrachtet dazu, dass das Angebot stärker ansteigt als die Nachfrage. Ursache für diesen Effekt ist nicht allein die Pflanzenzüchtung (biologisch-technischer Fortschritt), sondern die generelle ertragssteigernde Wirkung des technischen Fortschritts. Die Verschiebung des Angebots führt zu einem neuen Marktgleichgewicht und dazu, dass die Weltmarktpreise für Agrargüter tendenziell sinken. Auf Seiten der landwirtschaftlichen Produzenten entsteht daraufhin zur Überwindung negativer Einkommenseffekte der Anpassungsdruck, die Produktion unter den gegebenen Voraussetzungen (geringere Preise) durch Innovationsübernahmen weiter auszudehnen. Diese Strategie erscheint aus einzelbetrieblicher Perspektive erfolversprechend, doch eine sektorale Erhöhung des Angebots ist im Hinblick auf eine Einkommenserhöhung wenig zielführend und hat wiederum sinkende Agrarpreise zur Folge, sodass sich die wirtschaftliche Situation der Landwirte trotz Innovationsübernahme keineswegs bessert. Aufgrund dieser Kausalzusammenhänge hat sich in der Literatur in diesem Kontext der Begriff der landwirtschaftlichen Tretmühle etabliert (COCHRANE 1958, 1979). Auch staatliche Maßnahmen der Agrarpreisstützung konnten in der Vergangenheit nicht zu einer deutlichen Angleichung der landwirtschaftlichen Einkommensentwicklung mit anderen Wirtschaftssektoren beitragen.

Im Hinblick auf die zu erörternde Fragestellung (vgl. Forschungsfrage I a) ist zu konstatieren, dass Innovationen der Pflanzenzüchtung (biologisch-technischer Fortschritt) in erster Linie den Konsumenten einen höheren Nutzen stiften, da ein niedriges Verbraucherpreisniveau gewährleistet werden kann. Der dargelegte Zusammenhang ist ein empirischer Beleg für die im Abschnitt 2.3 diskutierten sozialpolitischen Folgeeffekte der Pflanzenzüchtung. Die von Saatgutunternehmen zu Marketingzwecken propagierte positive Einkommenswirkung neuer Kultursorten lässt sich bei sektoraler Betrachtung langjähriger SDB nicht bestätigen. Da sich die KTBL-Daten stets auf aggregierte nominale Produktpreise beziehen, sind die Auswirkungen des technischen Fortschritts auf das Realeinkommen der Landwirte tendenziell sogar noch größer¹⁷.

2.5.2 Verstärkung negativer Einkommenseffekte durch Nichtnutzung züchterisch verbesserter Sorten

Eine Innovationsübernahme ist bei einem gesunkenen Produktpreisniveau eine wesentliche Voraussetzung, um sich gegenüber konkurrierenden landwirtschaftlichen Produzenten einen strategischen

¹⁷ Für eine inflationsbereinigte Darstellung wäre eine Deflationierung der Agrarpreise mit Hilfe des Verbraucherpreisindex (VPI) erforderlich.

Wettbewerbsvorteil zu verschaffen. Die Nichtnutzung technischer Neuerungen führt langfristig dazu, dass diese Betriebe vom Markt verdrängt werden (COCHRANE 1979: 389f.). Wird auf die Übernahme neuer Sorten verzichtet, entsteht bei einem gesunkenen Produktpreisniveau ein zusätzlicher Einkommensverlust. Die unternehmerische Nutzung von Innovationen lässt sich entsprechend der sog. Diffusionstheorie mit Hilfe von Diffusionsmodellen erklären, die davon ausgehen, dass Innovationsübernahmen von den Anwendern zu unterschiedlichen Zeitpunkten realisiert werden. Dies lässt sich auf landwirtschaftliche Produzenten und die Ausbreitung neuer Sorten projizieren. ROGERS (1983: 245ff.) unterscheidet zwischen fünf Anwenderkategorien: 1) Innovatoren, 2) frühe Übernehmer, 3) frühe Mehrheit, 4) späte Mehrheit und 5) Nachzügler. Aufgrund einer schwachen sektoralen Angebotsausdehnung zum Zeitpunkt der Markteinführung profitieren insbesondere frühe Anwender (Kategorien 1 und 2) von neuen Technologien, da die Rückwirkungen auf das Agrarpreisniveau wesentlich geringer sind als zu einem späteren Anwendungszeitpunkt (BRANDES et al. 1997: 414f.). Das ermöglicht für Innovatoren die Realisierung sog. Pioniergewinne (BRANDES et al. 1997: 414f.).

2.6 Kurzes forschungsleitendes Zwischenfazit

Im Rahmen von Kapitel 2 wurde anhand mehrerer prägnanter Faktoren aufgezeigt, dass pflanzengenetische Verbesserungen nicht nur eine ökonomische und produktivitätssteigernde Dimension haben, sondern gleichzeitig positive soziale und ökologische Folgeerscheinungen bedingen. Im weiteren Verlauf des Forschungsprozesses der vorliegenden Arbeit gilt es deshalb, diese Erkenntnisse bei der empirischen Bewertung der beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 zu berücksichtigen. Insbesondere aufgrund der breiten genetischen Diversität der Introgressionslinien besteht im Vorfeld der Bewertung eine hohe Erwartungshaltung zur Verbesserung der Aspekte Ressourceneffizienz und -schutz (vgl. Abschnitt 2.4). Daher sollte im Rahmen dieser Arbeit eine bewertungsmethodische Herangehensweise gewählt werden, die nicht ausschließlich auf die ökonomische produktionssteigernde Dimension ausgerichtet ist, sondern ökologische Effekte gleichermaßen erfasst.

3 Material und Methoden zur wirtschaftlichen Bewertung der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25

Im Folgenden werden methodische Aspekte zur wirtschaftlichen Sortenbewertung thematisiert. Dies betrifft neben einer einleitenden Kurzcharakterisierung der beiden zu bewertenden Populationen S42 und HEB-25 (Abschnitt 3.1) die feldversuchsspezifischen Voraussetzungen, die für die ökonomische Bewertung gegeben sein müssen (Abschnitt 3.2). Anhand der Darlegung dieser Erfordernisse soll aufgezeigt werden, dass die standardmäßigen Feldversuche in BARLEY BIODIVERSITY keine hinreichend geeignete Datengrundlage für die Quantifizierung wirtschaftlicher Effekte der Introgressionslinien darstellen (Punkt 3.2.3). Die zur Rentabilitätsbewertung erforderliche Neukonzeption der Feldversuche und die Methodik der ökonomischen Bewertung werden in den darauffolgenden Abschnitten 3.3 und 3.4 erläutert.

3.1 Pflanzenmaterial

Grundlage für die in BARLEY BIODIVERSITY angestrebte Suche nach leistungssteigernden Wildgerstenallelen und die ökonomische Bewertung entstandener Kreuzungsprodukte als Teilziel dieser Arbeit

stellen die Wildgersten-Introgressionslinien der Populationen S42 sowie HEB-25 (Halle Exotic Barley 25) dar. Introgressionslinien entstehen durch Kreuzung zwischen Kultur- und verwandten Wildarten. Ziel ist die gezielte Einkreuzung kleiner Chromosomenabschnitte der Wildart in die Kultursorte (z. B. die Übertragung einzelner Resistenzgene). Da sich das Genom der ersten Nachkommen (F1-Generation) zu gleichen Teilen (50/50) aus Kultursorte und Wildtyp zusammensetzt, besteht die Notwendigkeit weiterer Rückkreuzungen der F1-Generation mit der Ausgangskultursorte. Je nach Anzahl dieser Rückkreuzungen wird der genetische Anteil der exotischen Wildarten immer geringer und es erfolgt eine zufällige, abschnittsweise Integration des Wildgerstengenoms in die Kulturpflanze. Zum Verständnis dieses Prozesses dient eine grafische Darstellung im Anhang 1. Ein essenzieller Vorteil der Introgressionslinien besteht darin, dass phänotypische Veränderungen spezifischer Pflanzenmerkmale durch die abschnittsweise Integration des Wildgerstengenoms in die jeweilige Kulturpflanze genetisch zugeordnet werden können. So gelingt es, spezifische Abschnitte des Genoms zu identifizieren, die für die Ausprägung wertbestimmender Pflanzeigenschaften von Relevanz sind.

Die Population S42 ist das Kreuzungsprodukt der israelischen Wildgerstenakzession¹⁸ *Hordeum vulgare* ssp. *spontaneum* (*Hsp*) und der Kultursorte Scarlett. Sie umfasst insgesamt 73 BC₂S₄-Linien (SCHMALENBACH et al. 2011). Die HEB-25-Population entstand aus Kreuzungen von 25 exotischen Wildgersten mit der Kulturgerste Barke. 24 *Hsp*-Wildgerstenakzessionen stammen aus dem Gebiet des Fruchtbaren Halbmonds sowie aus Afghanistan. Eine Akzession – *Hordeum vulgare* ssp. *agriocrithon* (*Hag*) – entstammt aus China. Insgesamt besteht die Population aus 1420 BC₁S₃-Linien. Detaillierte Informationen über die Population HEB-25 finden sich bei MAURER et al. (2015).

3.2 Forschungsmethodische Vorüberlegungen

3.2.1 Monetäre Bewertung

Ökonomische Aussagen über die Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Produktionsverfahren – in dieser Arbeit die Bewertung verschiedener Genotypen von Sommergerste – erfolgen in der Regel auf der Basis einer Teilkostenrechnung. Dabei werden im Gegensatz zur Vollkostenrechnung ausschließlich Einzelkosten berücksichtigt, die im Unterschied zu den betrieblichen Gemeinkosten einem Produktionsverfahren direkt zurechenbar sind. Da die fixen Einzelkosten für die betriebliche Produktionsplanung kurz- bis mittelfristig nicht entscheidungsrelevant sind, wird als Vergleichsmaßstab in der Regel der Deckungsbeitrag (DB) gewählt. Die Vorteilhaftigkeit einer neuen Sorte kann dabei durch zwei gleichwertige Effekte bedingt werden: 1) Outputeffekt (Erhöhung der Erträge und der Ertragssicherheit, Verbesserung von Qualitätseigenschaften) und 2) Kosteneinsparungseffekt (Reduktion des Betriebsmitteleinsatzes). Methodisch erfolgt diesbezüglich eine Gegenüberstellung von **Erlösen** (Haupt- und Nebenprodukte) mit **variablen Kosten** (Direktkosten und variable Arbeiterledigungskosten).

¹⁸ Der Begriff Akzession wird im Zusammenhang mit eingelagerten Mustern von Wild- und Nutzpflanzen in Genbanken verwendet.

3.2.1.1 Erlöse

Als Grundlage für die Bestimmung des Erlöses von Züchtungslinien können lediglich marktfähige Eigenschaften berücksichtigt werden, die mit Preisen zu bewerten sind. Phänotypische Daten wichtiger Ertragskomponenten (z. B. Tausendkorngewicht [TKG], Ähren pro Pflanze, Kornanzahl pro Ähre), die Pflanzenzüchtern wertvolle Hinweise auf mögliche positive Geneffekte liefern, können monetär nicht bewertet werden. Bereits an dieser Stelle wird unverkennbar eine Divergenz zwischen den Zielen pflanzengenetischer Forschung und den Methoden der Ökonomie offensichtlich: Während die Züchtung eine Lokalisierung und Charakterisierung positiver ertragswirksamer Gene beabsichtigt und diesbezüglich signifikante Veränderungen ertragsrelevanter Komponenten der Zuchtlinie im Vergleich zur jeweiligen Kultursorte als Indikator heranzieht, können positive ökonomische Effekte lediglich quantifiziert werden, wenn sich die genetischen Eigenschaften im Gesamtertrag bzw. in monetär messbaren Qualitätseigenschaften (z. B. Proteingehalt) niederschlagen. Ökonomisch ist in diesem Zusammenhang in erster Linie der physische Ertrag auf der Grundlage des Trockengewichtes von Interesse. Da es bei der Rentabilitätsbewertung notwendig ist, Parzellenerträge auf den Hektar zu projizieren, besteht insbesondere bei Kleinparzellen die Gefahr von Fehleinschätzungen.

Zur Ableitung von Schlussfolgerungen hinsichtlich der Rentabilität von Züchtungslinien ist aus ökonomischer Sicht zudem die Berücksichtigung qualitativer Pflanzeigenschaften essenziell, da aufgrund der spezifischen Nutzungsausrichtung eine enge Kopplung zwischen landwirtschaftlichem Rohprodukt und der Qualität des Endproduktes besteht. Entsprechend ist die Vermarktung von Sommergerste (Braugerste) in erheblichem Maße an qualitative Eigenschaften geknüpft. In Abhängigkeit von den spezifischen Anforderungen der Brauereien im Hinblick auf Sorten und Qualität erfolgt ein Großteil der Braugerstenerzeugung Deutschlands im Vertragsanbau mit individueller Preisbildung und Qualitätsfestsetzung. Dies impliziert Schwankungen zwischen dem handelsüblichen Marktpreis und dem qualitätsbedingten tatsächlichen Auszahlungspreis. Infolge restriktiver Qualitätsanforderungen besteht für die landwirtschaftlichen Erzeuger das Risiko von Preisabschlägen, sodass nur ein Teil der Ernte als Braugerste vermarktet werden kann. Im Rahmen der ökonomischen Bewertung der Wildgersten-Introgressionslinien besteht daher die Notwendigkeit, die spezifischen Rahmenbedingungen des Braugerstenmarktes zu berücksichtigen und begründete Annahmen zur realitätsnahen Bewertung von Genotypen mit minderen Qualitäten zu tätigen. In diesem Kontext gilt es, den spezifischen Proteingehalt der Genotypen als auszahlungsrelevantes Qualitätskriterium zu berücksichtigen.

3.2.1.2 Variable Kosten

Da moderne Hochleistungssorten über Jahrzehnte hinweg auf ertrags- und qualitätsorientierte Merkmale selektiert wurden, weisen nicht adaptierte Wildarten insgesamt ein deutlich geringeres Ertragspotenzial auf. Dies gilt insbesondere unter in Deutschland praxisüblichen Anbaubedingungen mit ausreichendem Nährstoffangebot und präventivem Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel. Daher existiert im Vorhinein einerseits die Erwartungshaltung, dass die Ertragsleistung der Introgressionslinien der Populationen S42 und HEB-25, trotz mehrfacher Rückkreuzungen (zur Eliminierung unerwünschter genetischer Eigenschaften), im Vergleich zu den Kultureltern unter Standardanbaubedingungen im Durchschnitt geringer sein wird. Andererseits besteht jedoch im Hinblick auf die größere genetische Variation der Wildarten die Wahrscheinlichkeit einer höheren Widerstandsfähigkeit gegen abiotische

und biotische Stressoren, sodass unter extensiveren Anbaubedingungen¹⁹ positive ökonomische und ökologische Effekte realistisch erscheinen. Die erläuterte Erwartungshaltung bezüglich der Leistungsfähigkeit der Introgressionslinien soll verdeutlichen, dass bei ausschließlicher Bewertung des Outputs unter High-Input-Bedingungen das tatsächliche genetische Potenzial der Wildarten monetär vermutlich gar nicht erfasst werden kann. Um ein objektives Bild über das reale wirtschaftliche Potenzial der Linien zu bekommen, bedarf es eines Versuchsdesigns, bei dem Kosteneinsparungseffekte erfasst werden. Diese o. g. Einsparungseffekte könnten sich beispielsweise infolge verbesserter Resistenzeigenschaften einstellen.

Jeder Genotyp besitzt ein spezifisches Bedarfsniveau im Hinblick auf Nährstoffe, Wasser oder Pflanzenschutz. Unter Rückgriff auf produktionstheoretische Grundlagen kann in diesem Kontext davon gesprochen werden, dass sich die individuelle Produktionsfunktion jedes einzelnen Genotyps unterscheidet. Diese Überlegung verdeutlicht, dass die Bewertung auf der Basis normierter Anbaubedingungen lediglich eine Approximation des tatsächlichen Leistungspotenzials darstellt, da dem spezifischen Bedarfsniveau des einzelnen Genotyps nicht entsprochen werden kann. Genau genommen können keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der Introgressionslinien gezogen werden, sondern lediglich Ableitungen in Bezug auf die gewählten spezifischen Anbauverhältnisse. Diese Überlegungen implizieren, dass einheitliche Produktionsbedingungen für die ökonomische Bewertung von Testgenotypen nicht zielführend sind. Da der genaue produktionstechnologische Zusammenhang zwischen Input und Output ex ante unbekannt ist, erscheint die Berücksichtigung verschiedener Intensitätsstufen eine prädestinierte Möglichkeit zu sein, um die Fähigkeit der Genotypen unter veränderten Anbaubedingungen zu quantifizieren und gleichzeitig Einsparungseffekte monetär erfassen zu können. Diesbezüglich gibt es verschiedene versuchstechnische Stellschrauben: 1) Düngungsstufen, 2) differenzierte Strategien des Pflanzenschutzes und 3) zusätzliche Anbauvarianten mit künstlicher Simulation von Trockenstress.

3.2.2 Einfluss bodenbedingter Heterogenität auf die Versuchsergebnisse

Landwirtschaftliche Feldversuche werden durch eine Vielzahl von Störgrößen beeinflusst, die sich auch durch ein angepasstes Versuchsdesign nicht vollständig eliminieren lassen. Äußere Einflüsse, die den pflanzlichen Entwicklungs- und Wachstumsprozess steuern, sind durch eine natürliche räumliche und zeitliche Variabilität gekennzeichnet. In besonderer Weise trifft dies auf den Produktionsfaktor Boden zu. Landwirtschaftlich genutzte Flächen weisen boden- oder reliefbedingt immer mehr oder minder starke Unterschiede in den Bodeneigenschaften auf. Erhebliche Differenzen in der Nährstoffverfügbarkeit oder den pH-Verhältnissen sind Ausdruck der Bodenheterogenität und Ursache für inhomogene Pflanzenbestände mit unterschiedlich ausgeprägten Qualitätsmerkmalen. Trotz einheitlicher Bewirtschaftung schlägt sich diese Heterogenität in deutlich differenzierten und schlagspezifischen Ertragsprofilen nieder. Die Qualität und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen landwirtschaftlicher Sortenversuche werden demzufolge maßgeblich durch die Versuchsfläche bestimmt. Es besteht zwischen benachbarten Teilflächen (Parzellen) eine positive Korrelation im Hinblick auf relevante wachstumsbestimmende Bodenparameter (z. B. Nährstoffgehalte), die mit zunehmender Distanz in der Regel kleiner

¹⁹ Aufgrund der spezifischen Versuchsanstellung in dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 3.3) werden extensive bzw. Low-Input-Anbaubedingungen als Anbausysteme mit reduzierter N-Düngung und ohne Fungizid-Einsatz definiert.

wird (RICHTER und KROSCHESKI 2009: 253). Dieser prägnante Zusammenhang spiegelt sich auch in räumlich korrelierten Kornerträgen wider.

In Abhängigkeit von der jeweiligen züchterischen Zielsetzung hat sich im Feldversuchswesen eine Vielzahl von methodischen Ansätzen für die praktische Versuchsanlage etabliert. Standardmäßig wird versucht, systematisch korrelierte Fehler aufgrund von Bodentrends durch eine auf Randomisierung, Wiederholung und Blockbildung beruhende Versuchsplanung auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Eine effektive Blockbildung setzt Kenntnisse über die tatsächliche räumliche Verteilung von Störgrößen (Bodenunterschiede) voraus (RICHTER und KROSCHESKI 2009: 254). Da diese Informationen in der Regel nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind, beruht eine prinzipielle Annahme bei der Auswertung von Sortenversuchen darin, dass der Boden innerhalb benachbarter Parzellen homogen ist. Es wird unterstellt, dass die Bodenverhältnisse innerhalb einer Blockanlage vergleichbar sind und lediglich zwischen den Blöcken eine zufällig bedingte Variabilität besteht. Diese Annahme ist jedoch unter praktischen Anbaubedingungen nicht vorzufinden. Das gilt insbesondere, wie in den Versuchen des IPAS-Projektes BARLEY BIODIVERSITY, bei einer großen Anzahl von Prüfgliedern innerhalb einer Blockanlage (GRAF 2000). Dass die Annahme der Bodenhomogenität in der Realität nicht vorzufinden ist, verdeutlicht insbesondere die stetige Weiterentwicklung im Technologiebereich des Precision Farming. Durch eine angepasste Bewirtschaftung lässt sich das standortspezifische Ertragspotenzial deutlich besser ausschöpfen und ermöglicht sowohl in ökonomischer (z. B. Einsparung von Betriebsmitteln) als auch ökologischer Hinsicht (z. B. Reduktion der N-Verluste) ein erhebliches Potenzial für Effizienzsteigerungen. Bei Nichtberücksichtigung heterogener Bodenverhältnisse in den Feldversuchen besteht die Gefahr, dass agronomisch positive Prüfgliedereigenschaften (insbesondere der Ertrag) nicht durch verbesserte Genotypen, sondern infolge einer Kombination unterschiedlich positiv wirkender Bodenfaktoren verursacht werden (z. B. höherer N_{\min} -Gehalt). Ungenaue Schlussfolgerungen hinsichtlich der Eigenschaften von Prüfgliedern können auf Seiten der Pflanzenzüchtung falsche Selektionsentscheidungen nach sich ziehen. Da der Ertrag bei der ökonomischen Bewertung naturgemäß einen außerordentlichen Stellenwert besitzt, besteht bei der Vernachlässigung bodenbedingter Heterogenität die potenzielle Gefahr von monetären Fehleinschätzungen. Durch die Projektion der Erträge aus den Forschungspartellen auf die ökonomische Bezugsgröße Hektar könnten sich versuchsbedingte Fehler potenzieren und falsche Schlussfolgerungen bedingen.

Die erörterten Vorüberlegungen verdeutlichen, dass die Einbeziehung kleinräumiger Bodenparameter im Interesse der Verringerung bodenbedingter Variabilität der Nährstoffverfügbarkeit für eine ökonomische Bewertung sinnvoll sein kann. Daher erscheint zur Verbesserung der Datenqualität eine Erweiterung der Parzellenversuche mit Elementen des Precision Farming geeignet.

3.2.3 Problematik der ökonomischen Bewertung aus den Projektdaten der Versuchsjahre 2015 und 2016

Ursprünglich bestand die konzeptionelle Projektintension darin, die ökonomische Evaluierung der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 auf der Datengrundlage der Versuchsjahre 2015 und 2016 an den drei Standorten Halle-Kühnfeld, Merbitz und Morgenrot zu realisieren. Unter Berücksichtigung der erläuterten Vorüberlegungen hinsichtlich versuchstechnischer Ansprüche einer

monetären Bewertung ist zu konstatieren, dass sich dieses Datenmaterial lediglich im begrenzten Rahmen zur Rentabilitätsbewertung eignet. Folgende methodische Probleme wurden identifiziert:

- a) Der zur phänotypischen Charakterisierung durchgeführte doppelreihige Versuch der 1420 Linien der Population HEB-25 mit jeweils 100 Einzelpflanzen am Standort Halle-Kühnfeld ist für eine ökonomische Auswertung nicht zweckmäßig, da verlässliche Ertragsdaten nicht auf der Basis eines doppelreihigen Versuchs ableitbar und keinesfalls auf den Hektar projizierbar sind. Aus dem verfügbaren Datenmaterial lassen sich keine validen ökonomischen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Produktivität ziehen.
- b) Infolge weit verbreiteter typischer negativer agronomischer Eigenschaften der Wildgerste in den Introgressionslinien (z. B. Spindelbrüchigkeit der Ähre, schlechte Dreschbarkeit), insbesondere bei den Linien der HEB-25, ist kritisch zu hinterfragen, ob eine ökonomische Bewertung aller Genotypen unter einer vergleichenden Betrachtung der im praktischen Anbau befindlichen Kultursorten überhaupt sinnvoll ist.
- c) Um zuverlässige Angaben über die Ausprägung des ökonomisch relevanten Merkmals Ertrag zu bekommen, sind die gewählten Parzellengrößen (3,5 m²) zur Bewertung der Population S42 zu gering bemessen. Hinzu kommt, dass der Ertrag aufgrund zusätzlicher Entnahme von Pflanzen- und Wurzelmaterialien für Analysezwecke oder aufgrund technisch und witterungsbedingter Zwischenfälle teilweise nur über Hilfsgrößen geschätzt werden konnte. Diese unzureichende Sicherheit über die Ertragsdaten liefert keine solide Datenbasis für Rentabilitätsvergleiche.
- d) Mit dem gewählten Versuchsdesign (zweifaktorielle Spaltanlage mit zwei Düngungsstufen) wurden lediglich Wechselwirkungen zwischen Genotyp und Düngung erfasst. Tatsächlich ist das genotypspezifische Nährstoffaneignungsvermögen ein wichtiger ökonomischer und ökologischer Indikator und die Verringerung des Düngemittelbedarfs kann zur Kostenreduktion beitragen. Positive Wildallele können diesbezüglich einen wertvollen Beitrag zu Effizienzsteigerungen leisten. Jedoch vernachlässigt der Versuchsaufbau der Jahre 2015 und 2016 mögliche Kosteneinsparungseffekte aufgrund verbesserter Resistenzeigenschaften. Unter gleichen Anbaubedingungen mit identischen Aufwandmengen an Pflanzenschutz können keine monetären Effekte erfasst werden. Daraus resultiert eine mit dem Blickwinkel auf das angestrebte Forschungsziel nicht zufriedenstellende Überbewertung der Ertragseigenschaften im Vergleich zu Resistenzen (vgl. Abschnitt 2.6). Dieser Versuchsaufbau wird dem Potenzial der Introgressionslinien nur bedingt gerecht.
- e) Das wichtige ertragsbestimmende Merkmal der Feuchte wurde im Erntejahr 2015 für den Standort Morgenrot nicht erhoben und lässt sich rückwirkend nicht mehr quantifizieren. Da bei der großen Anzahl an genetisch vielfältigen Testgenotypen feuchtebedingte Ertragschwankungen unvermeidlich sind, führt deren Nichtberücksichtigung zu Verzerrungen in der ökonomischen Bewertung.
- f) Im Rahmen der pflanzenzüchterischen Phänotypisierung sind wesentliche auszahlungsrelevante Qualitätseigenschaften der Introgressionslinien vernachlässigt worden. So wurde auf die

Erfassung des Proteingehaltes gänzlich verzichtet. Ökonomische Schlussfolgerungen hinsichtlich der Produktionsleistung unterschiedlicher Genotypen von Sommergerste ohne die Berücksichtigung des Proteingehaltes haben wenig praktische Relevanz.

- g) Aufgrund der im Züchtungswesen gängigen Praxis gab es keine Berücksichtigung der räumlichen Heterogenität des Bodens und der Nährstoffverfügbarkeit in den Parzellen, sodass Homogenität vorausgesetzt wurde. Diese Annahme ist insbesondere aufgrund der hohen Anzahl an Testgenotypen (große Versuchsblöcke) infrage zu stellen und kann einen verzerrenden Einfluss auf das erlösbestimmende Merkmal Ertrag ausüben.

Die genannten methodischen Probleme sowie die Nichtberücksichtigung erforderlicher Parameter sind nicht zwangsläufig als Kritikpunkte an der Versuchsdurchführung in BARLEY BIODIVERSITY zu werten, sondern insbesondere Ausdruck divergierender Zielsetzungen der Fachrichtungen Pflanzengenetik und Ökonomie. Diese Feldversuche wurden nicht explizit für die wirtschaftliche Bewertung der Genotypen konzipiert, sondern in erster Linie für die phänotypische Charakterisierung. Aus züchterischer Perspektive liegt der Arbeitsschwerpunkt in der Identifizierung und Charakterisierung leistungssteigernder Gene (z. B. positive Verschiebung des Blühzeitpunktes). Aufgrund anderer negativ überlagernder genetischer Effekte der Wildarten (z. B. Spindelbrüchigkeit der Ähre) führen einzelne positive Geneigenschaften nicht zwangsläufig zu einem positiven Ertrags- oder Qualitätseffekt. Während Erträge und Qualitäten aus ökonomischer Sicht substanziell für den Erlös sind, spielen diese Merkmale aus der Perspektive genetischer Grundlagenforschung eine untergeordnete Rolle. Dem Züchter geht es vordergründig um eine gezielte phänotypische Charakterisierung aller Züchtungslinien. Aufgrund der Populationsgröße der HEB-25 (1420 Linien) sowie flächenbedingter Restriktionen des universitären Versuchszentrums Halle-Kühnfeld war der Anbau in Doppelreihe mit lediglich 100 Einzelpflanzen zur phänotypischen Charakterisierung weitgehend alternativlos. Gleichzeitig war auch die Erfassung und Berücksichtigung räumlicher Heterogenität in der Nährstoffverfügbarkeit des Bodens aus arbeitstechnischer Perspektive nicht im erforderlichen Umfang realisierbar.

3.3 Feldversuch

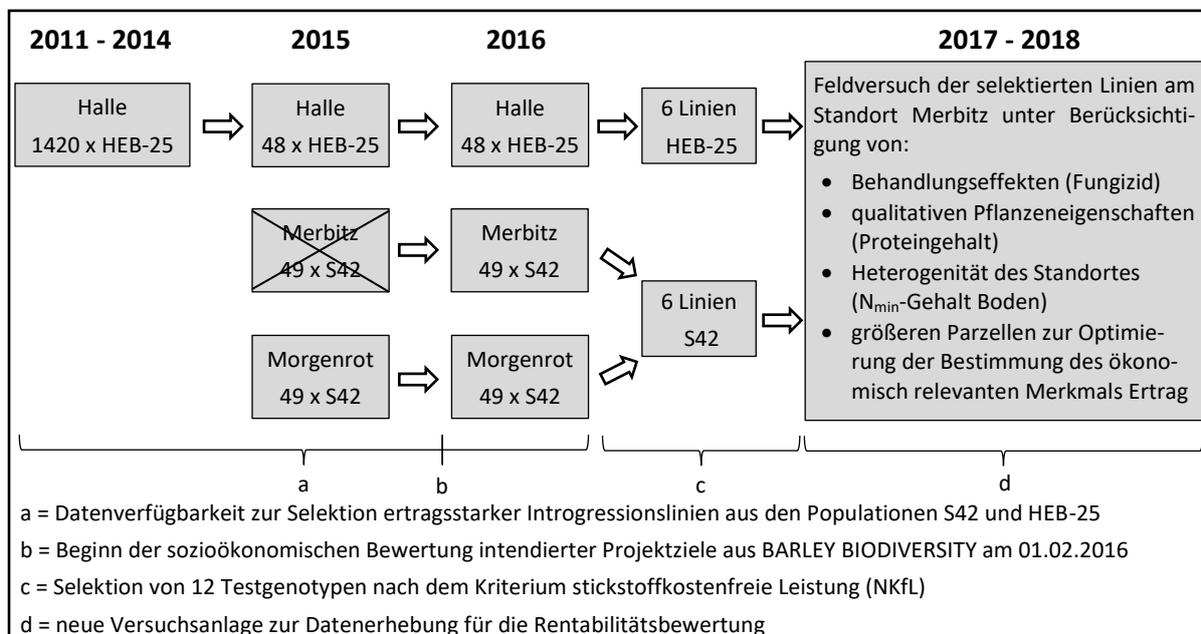
Infolge der genannten Problematiken wurde nicht, wie anfänglich beabsichtigt, auf die bestehende Versuchsanordnung zurückgegriffen. Die erläuterten Defizite hinsichtlich der verfügbaren Datengrundlage machten es erforderlich, das ursprünglich geplante Versuchsdesign im Interesse des Forschungsauftrages zu überarbeiten. In Erweiterung zu den in BARLEY BIODIVERSITY standardmäßig durchgeführten Feldversuchen an den drei Standorten Halle-Kühnfeld, Merbitz und Morgenrot wurde deshalb für 2017 und 2018 eine weitere Versuchsserie angelegt. Diese sollte eine valide Datenbasis zur Bewertung der Produktionsleistung der beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 liefern.

3.3.1 Versuchsaufbau

Die bestehende Datenbasis zurückliegender Feldversuche (2011 bis 2016) war eine hilfreiche und notwendige Grundlage, um sich bei der Auswahl der Testgenotypen auf wirtschaftlich aussichtsreiche Genotypen der Populationen S42 und HEB-25 zu beschränken. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Versuchsserien sowie die Selektion von Testgenotypen für die Rentabilitätsbewertung. Introgressions-

linien, die aufgrund agronomisch negativer Eigenschaften für eine ökonomisch vergleichende Bewertung mit Kultursorten ungeeignet erschienen (z. B. schlechte Dreschbarkeit, Spindelbrüchigkeit), wurden ebenso aussortiert wie ertragschwache Genotypen. Zur Begegnung der Problematik fehlender Vorhersagegenauigkeit des Merkmals Ertrag in den doppelreihigen Versuchen der HEB-Population in BARLEY BIODIVERSITY musste auf Versuchsdaten der gleichen Population aus dem Projekt HEB-Yield zurückgegriffen werden. Bei diesem Projekt wurden auf der Datenbasis vierjähriger Feldversuche (2011 bis 2014) aus der 1420 Linien umfassenden HEB-25-Population 48 ertragsstarke Linien selektiert. Für die Jahre 2015 und 2016 erfolgte dann ein Anbau dieser Linien in Parzellenversuchen, sodass aussagefähigere Ertragsdaten vorliegen. Die Selektion bewertungsrelevanter Testgenotypen aus der Population S42 erfolgte ausschließlich auf Datenbasis der in BARLEY BIODIVERSITY 2015 und 2016 erhobenen Felddaten der Standorte Merbitz und Morgenrot. Als maßgebliches Kriterium für die Auswahl der Testgenotypen in Bezug auf die ökonomische Bewertung fungierte die stickstoffkostenfreie Leistung (NKfL).

Abbildung 5: Versuchsserien und Selektion von Testgenotypen für die Rentabilitätsbewertung



Anmerkung: Im Jahr 2015 konnte am Standort Merbitz witterungsbedingt keine Ernte erfolgen.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Insgesamt wurden 12 ertragsstarke Wildgersten-Introgressionslinien für die Rentabilitätsbewertung (vgl. Forschungsfrage I b) ausgewählt: 6 Linien der S42 und 6 Linien der HEB-25. Die entsprechenden Genotypbezeichnungen sind in Tabelle 2 mit weiteren versuchsrelevanten Spezifikationen aufgelistet. Zusätzlich wurden die beiden Elternsorten Scarlett und Barke sowie 2 aktuelle Elitesorten (Planet und Quench)²⁰ im Feldversuch angebaut, woraus insgesamt ein Spektrum von 16 Genotypen resultiert. Die Versuchsfläche liegt auf dem agrar- und ernährungswissenschaftlichen Versuchszentrum (AEVZ) in Merbitz der MLU Halle-Wittenberg und unterliegt folgenden Standorteigenschaften: Höhe über NN:

²⁰ Bei der Auswahl aktueller Elitesorten wurde die vom Bundessortenamt ausgewiesene Saatgutvermehrungsfläche als maßgeblicher Indikator herangezogen. Die beiden Sorten Planet und Quench lagen im Jahr 2016 entsprechend dieser Kennziffer unter den Top 3 der zugelassenen Sommergersten.

160 m, Ø Temperatur: 9,5 °C; Ø Niederschlag: 470 mm; Bodentyp: Tschernosem; Bodenart: Lehm bzw. sandiger Lehm (HINZ 2013: 5ff.).

Tabelle 2: Rahmenbedingungen der Feldversuche 2017 und 2018 am Standort Merbitz zur Bestimmung der Produktivität ausgewählter Introgressionslinien

Parameter	Rahmenbedingungen des Versuchsaufbaus
Fungizid-Behandlungsvarianten (Prüffaktor A)	2 (FUN ₀ : ohne Fungizid; FUN ₁ : praxisüblicher Fungizid-Einsatz)
Düngungsstufen (Prüffaktor B)	2 (N ₀ : geringere N-Düngung; N ₁ : praxisübliche N-Düngung)
Genotypen (Prüffaktor C)	16 Genotypen <ul style="list-style-type: none"> • 6 x S42 → S42IL-104, S42IL-110, S42IL-122, S42IL-135, S42IL-144, S42IL-161 • 6 x HEB-25 → HEB_01_032, HEB_01_104, HEB_03_040, HEB_04_149, HEB_11_098, HEB_21_184 • Scarlett und Barke als Kultureltern • Planet und Quench als ertragsstarke Elitesorten
Parzellengröße	7,5 m ²
Wiederholungen (Versuchsblöcke)	3
Vorfrucht	Winterraps
Versuchspartellen	192

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Als Anlagemethode dient eine dreifaktorielle Spaltanlage mit dreifacher Wiederholung²¹. Eine Versuchsskizzen befindet sich im Anhang 2. Der Prüffaktor A (Großteilstück) beinhaltet die Intensität der Pflanzenschutzmittelbehandlung, wobei aus arbeitstechnischen Gesichtspunkten lediglich zwischen den beiden Faktorstufen mit und ohne Fungizid-Behandlung (FUN₁ und FUN₀) unterschieden wird und nicht nach individueller Schadschwelle²². Prüffaktor B (Mittelteilstück) differenziert in zweifacher Abstufung hinsichtlich der N-Düngung (N₀: geringere N-Düngung; N₁: praxisübliche N-Düngung). Den Prüffaktor C (Kleinteilstück) stellen die 16 Genotypen dar. Die Zuteilung der jeweiligen Teilstücke erfolgte mit Ausnahme der N-Düngung nach dem Zufallsprinzip. Die fehlende Randomisierung der Düngung begründet sich durch die Entnahme parzellenspezifischer N_{min}-Proben und wird gesondert unter Punkt 3.3.2 erläutert. Die Parzellengröße wurde mit 7,5 m² (1,5 m x 5 m) im Vergleich zu den

²¹ Im pflanzenbaulichen Versuchswesen werden die zur statistischen Absicherung durchgeführten Wiederholungen auch als Versuchsblöcke bezeichnet, sodass diese beiden Begriffe im weiteren Verlauf der Arbeit synonym verwendet werden.

²² Als Schadschwelle wird die Befallsstärke eines Schaderregers bezeichnet, die aus wirtschaftlicher Perspektive maximal tolerierbar ist. Bei Überschreitung der Schadschwelle ist der zu erwartende Schaden höher als die Kosten der Pflanzenschutzmittelbehandlung.

anderen Feldversuchen in BARLEY BIODIVERSITY vergrößert. Insgesamt beinhaltet das Versuchsschema 192 Parzellen²³ und die Größe der Versuchsanlage umfasst mit den Randflächen ca. 3000 m². Als Vorfrucht wurde Winterraps²⁴ gewählt.

3.3.2 Methodischer Ansatz zur Berücksichtigung der Nährstoffverfügbarkeit im Boden

Die Einbeziehung der Bodenheterogenität in den Feldversuchen der Jahre 2017 und 2018 stellt nach bisherigem Kenntnisstand des Autors ein Alleinstellungsmerkmal der vorliegenden Arbeit dar. Dass sich eine bestandseinheitliche Düngung nicht an dem realen Nährstoffbedarf der Pflanze orientiert und durch die Berücksichtigung räumlicher Bodentrends sowohl in der Grunddüngung als auch in der N-Düngung erhebliches Potenzial zur ökonomischen und ökologischen Verbesserung im Pflanzenanbaumanagement liegt, wird durch zahlreiche Versuche des Precision Farming offenbart. Daher soll die räumliche Heterogenität zumindest in Ansätzen versuchstechnisch berücksichtigt werden. Das Ziel besteht darin, die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb des Versuchsschlages auftretende Differenzen im N_{min}-Gehalt einen verzerrenden Einfluss auf bewertungsrelevante Komponenten (Ertrag und Qualität) haben, durch eine gezielte Homogenisierung der N-Versorgung zu minimieren. Basis für die Nivellierung bodenbedingter heterogener Wachstumsfaktoren ist die Erfassung des Nährstoffgehaltes mit Hilfe von Bodenuntersuchungen. Dabei gilt die Gesetzmäßigkeit, dass der Aussagegehalt über die tatsächliche räumliche Verfügbarkeit von Nährstoffen umso größer ist, je kleinräumiger die Bezugsgröße gewählt ist (WAGNER und MARZ 2017). Im Hinblick auf die Ermittlung des Ertragspotenzials der Testgenotypen in Kleinparzellen ist die Nährstofffassung über die gesamte Versuchsanlage ungenügend. Da auch teilstückspezifische Untersuchungen (z. B. innerhalb der Versuchsblöcke) lediglich eine Approximation darstellen, bietet sich als kleinste Bezugsgröße die Bestimmung des Nährstoffgehaltes für jede Parzelle an. Genau genommen liegen auch innerhalb jeder einzelnen Parzelle erhebliche lokale Schwankungen vor, sodass es im Hinblick auf ein hohes Maß an Analysegenauigkeit vorteilhaft wäre, diese in weitere Teilbereiche zu strukturieren.

Die Vorgehensweise im Rahmen dieser Arbeit orientierte sich an den o. g. Überlegungen. Vor der Aussaat 2017 und 2018 wurden jeweils Bodenproben zur Quantifizierung des N_{min}-Gehaltes entnommen. Die Probenentnahmen erfolgten nach den Richtlinien des Verbandes deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) in den beiden Bodentiefen 0 bis 30 cm sowie 30 bis 60 cm (THUN et al. 2012). Bezugsgröße war die Parzelle. Um Verzerrungen (statistische Ausreißer) innerhalb jeder Parzelle zu vermeiden, wurde für jede der beiden Tiefenstufen eine Bodenmischprobe gebildet, die sich aus jeweils ca. 7 Einstichen zusammensetzte. Diese Proben wurden durch das Institut für Agrar- & Umweltanalytik (IAU) in Freyburg untersucht. Zur Ermittlung des N-Versorgungszustandes jeder Parzelle wurde das Analyseergebnis aus beiden Bodentiefen summiert.

Um für jeden Genotyp in Bezug auf die N-Versorgung gleiche Wachstumsbedingungen zu gewährleisten, erfolgte in Abhängigkeit des ermittelten N_{min}-Gehaltes eine parzellenindividuelle Bemessung des

²³ 16 Genotypen * 2 Fungizid-Behandlungsvarianten * 2 Düngungsstufen * 3 Wiederholungen = 192 Parzellen

²⁴ In der landwirtschaftlichen Praxis ist Winterraps keine gängige Vorfrucht für Sommergerste. Die Auswahl begründet sich darin, dass aufgrund der kurzfristigen Neuansetzung dieser Versuchsserie keine für Parzellenversuche homogenisierte Versuchsfläche mit geeigneteren Vorfrüchten vorhanden war. Da bei den weiteren Versuchen von BARLEY BIODIVERSITY auch Vorfruchtwirkungen mit Raps untersucht werden (lediglich am Standort Merbitz), ist jedoch eine gewisse Vergleichbarkeit der Daten gegeben.

Bedarfs an N. Das bedeutet, dass die Differenzmenge aus lokaler N_{\min} -Versorgung und angestrebter N-Gesamtversorgung im Vorfeld der Düngung manuell eingewogen und in jeder Parzelle mittels Düngerstreuer eine individuelle N-Düngung vorgenommen wurde. Im Zusammenhang mit dem spezifischen Versuchsaufbau wären geringe N_{\min} -Gehalte im Boden wünschenswert, denn nur Low-Input-Versuchsbedingungen gewährleisten größtmögliche Effekte zwischen den beiden Düngungsstufen (N_0 und N_1). Darin liegt auch die Begründung für den Verzicht auf eine randomisierte Düngung in diesem spezifischen Versuch. Da in der Versuchsanstellung eine exakte Düngung auf ein einheitliches N-Gesamtniveau erfolgte, wurden die N_0 -Varianten innerhalb einer Fungizid-Behandlungsvariante gezielt auf Parzellen mit geringen N_{\min} -gehalten gelegt. Die N-Düngung erfolgte mit Kalkammonsalpeter (KAS)²⁵.

3.3.3 Begründung der Versuchsanlage

Der neu konzipierte Feldversuch ist ein Kompromiss aus ökonomisch sinnvoller und arbeitstechnisch realisierbarer Methodik. Wie in diesem Kapitel bereits erläutert, liegt die wesentliche Zielsetzung in der Quantifizierung von Kosteneinsparungseffekten (vgl. Punkt 3.2.1). Idealerweise wäre in diesem Kontext sowohl eine bedarfsspezifische Applikation von Fungiziden für jeden Genotyp (Behandlung nach dem Prinzip der individuellen Schadschwelle) als auch eine zusätzliche Differenzierung hinsichtlich der N-Düngung wünschenswert. Dies ist arbeitstechnisch jedoch auch bei einer deutlich reduzierten Anzahl an Genotypen nicht im gewünschten Umfang realisierbar. Daher wird lediglich zwischen den beiden Faktorstufen FUN_0 und FUN_1 sowie N_0 und N_1 unterschieden. Mit diesem Feldversuch wird die Fragestellung untersucht, ob unter den beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 Genotypen existieren, deren Ertragsdepression in der extensiveren Behandlungsvariante (FUN_0 , N_0) im Vergleich zur praxisüblichen Variante (FUN_1 , N_1) geringer ist als bei Standardsorten (höhere Ertragsstabilität der Introgressionslinien).

Der gewählte methodische Ansatz untersucht bewusst lediglich den Prüffaktor der Fungizid-Behandlung. Der Verzicht auf die Untersuchung der ökonomischen Folgewirkungen einer fehlenden Herbizid- und Insektizid-Behandlung in der extensiveren Behandlungsvariante liegt darin begründet, dass im Hinblick auf die angestrebte Einschätzung der Produktivität diese nicht relevant erscheinen, da keine oder lediglich geringe genotypische Effekte durch die Introgressionslinien zu erwarten sind. Sowohl die Unkrautintensität als auch das Auftreten von Schadinsekten unterliegen schwankenden Umweltbedingungen. Die Erschließung neuer Resistenzquellen durch Einkreuzung von Wildgerstenallelen wirkt sich demzufolge in erster Linie faktorsparend auf den Einsatz von Fungiziden aus.

3.4 Ökonomische Auswertung der Versuchsdaten

Die methodische Neuausrichtung der Feldversuche 2017 und 2018 ermöglicht eine Bewertung der beiden Zuchtstämme im Hinblick auf eine Quantifizierung von Effizienzverbesserungen unter extensiveren Anbaubedingungen. Durch das gewählte Versuchsdesign mit den differenzierten Anbausystemen (N_0/N_1 ; FUN_0/FUN_1) soll der wirtschaftliche Vorzug nährstoffeffizienter bzw. widerstandsfähiger Geno-

²⁵ Dünger mit 27 % N-Gehalt.

typen der Populationen S42 und HEB-25 mit mittlerer Ertragsleistung im Vergleich zu den ertragreicheren Intensivkulturen aufgezeigt werden. Für die im Rahmen der Arbeit angestrebte Rentabilitätsbewertung (vgl. Forschungsfrage I b) sind in diesem Zusammenhang zwei Fragestellungen relevant:

- 1) Gibt es unter den Introgressionslinien der Populationen S42 und HEB-25 nährstoffeffiziente bzw. widerstandsfähige Genotypen mit dem Potenzial zur Einsparung variabler Kosten (N-Düngung oder Fungizide)?
- 2) Reicht das Kosteneinsparungspotenzial dieser Introgressionslinien aus, um im Vergleich mit Standardsorten eine höhere Rentabilität zu erzielen?

Zunächst wird anhand der Daten aus den zweijährigen Feldversuchen 2017 und 2018 geprüft, ob unter den Introgressionslinien tatsächlich züchterisch wertvolle Low-Input-Genotypen mit verbesserter Effizienz existieren, die bei reduziertem Faktoreinsatz ein vergleichsweise hohes Ertragsniveau generieren. Diesbezüglich ist zu prüfen, ob es Testgenotypen gibt, die unter extensiven Anbaubedingungen eine höhere Rentabilität aufweisen als unter Standardanbaubedingungen. In Tabelle 3 sind die für die Auswertung der Feldversuche relevanten ökonomischen Erfolgsgrößen dargestellt.

Tabelle 3: Auswertungsrelevante Erfolgsgrößen für die Rentabilitätsbewertung der Introgressionslinien

ökonomische Zielgröße	Berechnung
direktkostenfreie Leistung (DKfL)	Leistung – Direktkosten
stickstoffkostenfreie Leistung (NKfL)	Leistung – Direktkosten N-Dünger
fungizidkostenfreie Leistung (FKfL)	Leistung – Direktkosten Fungizide

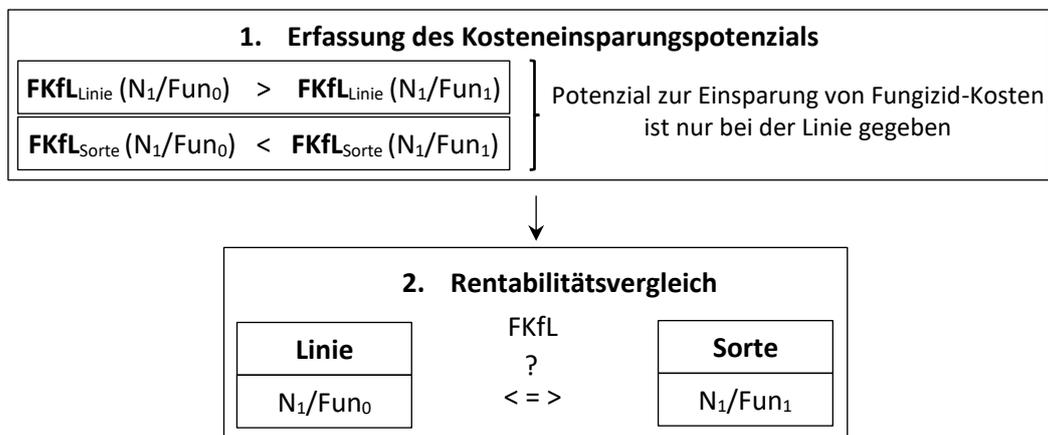
Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Als Zielgröße und wirtschaftlicher Indikator wird zunächst die direktkostenfreie Leistung (DKfL) herangezogen. Diese ergibt sich aus der Leistung (mit Marktpreisen bewertete Erträge) abzüglich der Direktkosten für N-Dünger und Fungizide. Da Fungizide in der Landwirtschaft in der Regel zusammen mit anderen Pflanzenschutzmitteln ausgebracht werden, besteht kein Potenzial zur Einsparung variabler Arbeitserledigungskosten. Des Weiteren erscheint ein gänzlicher Verzicht auf eine N-Düngung unrealistisch zu sein, sodass nicht der DB als Zielgröße zugrunde gelegt wird. Neben der DKfL werden darüber hinaus auch die ökonomischen Erfolgsgrößen NKfL und FKfL in der Auswertung berücksichtigt. Das gewählte Versuchsdesign ermöglicht es, Effizienzverbesserungen (N-Effizienz und Resistenz) über diese genannten Zielgrößen unabhängig voneinander zu erfassen. Beispielsweise wäre denkbar, dass sich ein Testgenotyp im Vergleich zu den Standardsorten durch eine höhere Nährstoffeffizienz auszeichnet, während der gleiche Genotyp bei fehlender Fungizid-Behandlung Ertragseinbußen zu verzeichnen hat. In diesem spezifischen Fall könnten Effizienzsteigerungen über die NKfL nachgewiesen werden. Ziel dieses ersten Analyseschrittes ist es, unter den Neuzüchtungen ressourceneffiziente Genotypen zu identifizieren, deren DKfL (bzw. NKfL oder FKfL) in der extensiven Variante höher ist als unter praxisüblichen Anbaubedingungen.

Die Verringerung des N-Bedarfs einer Sorte sowie eine Verschiebung der ökonomischen Schadschwelle zugunsten einer geringeren Behandlungsintensität sind noch keine Voraussetzungen für die Erlangung praktischer Anbaurelevanz. Daher soll in einem zweiten Schritt aufgezeigt werden, welche wirtschaftliche Bedeutung mögliche Kosteneinsparungseffekte der Wildgersten-Introgressionslinien gegenüber

High-Input-Sorten haben. Unter der Voraussetzung, dass sich die Introgressionslinien in den Feldversuchen 2017 und 2018 tatsächlich als nährstoffeffizienter bzw. widerstandsfähiger zeigen als Standardsorten, erfolgt ein monetärer Vergleich zwischen Kultursorten unter Standardanbaubedingungen und Introgressionslinien unter extensiveren Anbaubedingungen. Es wird untersucht, ob der Effekt der Kosteneinsparung bei den Introgressionslinien zur Kompensation eines niedrigeren, aus der geringeren Anbauintensität resultierenden Ertragsniveaus ausreicht. Rentabilitätssteigerungen sind dann zu verzeichnen, wenn der Effekt der Kosteneinsparung größer ist als der monetäre Ertragseffekt, der sich durch die geringere Anbauintensität ergibt. Als relevante Vergleichssorten werden entsprechend der gängigen Züchtungspraxis zunächst die beiden Kultureltern Scarlett und Barke herangezogen. Da im Hinblick auf positive volkswirtschaftliche Effekte jedoch insbesondere Vergleiche mit aktuellen Anbausorten interessant sind, erfolgt anschließend auch ein Vergleich mit den beiden leistungsfähigeren Sorten Planet und Quench. Für ein grundlegendes Verständnis wird in Abbildung 6 dieser beschriebene zweistufige Bewertungsprozess anhand eines Beispiels schematisch dargestellt.

Abbildung 6: Schema des zweistufigen Bewertungsprozesses der Introgressionslinien



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

3.4.1 Annahmen zur Erlösbestimmung

Die erläuterten forschungsmethodischen Vorüberlegungen (vgl. Abschnitt 3.2) verdeutlichen die Notwendigkeit zur Bestimmung eines feuchtekorrigierten Ertrages und das Erfordernis zur Einbeziehung von Qualitätseigenschaften. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Ertrag anhand der Basisfeuchte von 14,5 % bestimmt. Die mathematische Grundlage liefert der in Gleichung (1) formulierte Zusammenhang. Da sämtliche Genotypen trotz unterschiedlicher Reifedauer zur gleichen Zeit geerntet werden müssen, gewährleistet diese Vorgehensweise eine Bewertung aller Genotypen unter gleichen Voraussetzungen.

$$\text{korrigierter Ertrag} = \text{Ertrag} * \left(\frac{100 - \text{Feuchte [\%]}}{100 - 14,5 [\%]} \right) \quad (1)$$

Als auszahlungsrelevantes Qualitätskriterium wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit lediglich der Proteingehalt berücksichtigt. Die Höhe des Proteingehaltes unterliegt neben umweltbedingten und produktionstechnischen Einflüssen auch dem Sorteneinfluss. Standardmäßig sollte dieser den Wert von 11,5 % nicht überschreiten, andernfalls ist mit Preisabschlägen zu rechnen. Aufgrund der N-Empfindlichkeit der Braugerste und den qualitätsabhängigen Restriktionen kann in der landwirtschaftlichen

Praxis häufig nur ein Teil der Erntemenge als Qualitätsbraugerste vermarktet werden. Durch folgende Annahmen soll diese Spezifität der Preisbildung von Braugerste in der monetären Bewertung berücksichtigt werden²⁶:

- Es erfolgt ein Preisabschlag von jeweils 1,5 €/t bei Überschreitung des Proteingehaltes um 0,1 % (zulässig bis zu einem maximalen Proteingehalt von 12 %).
- Ab einem Proteingehalt von 12,1 % ist die Vermarktung als Braugerste unzulässig, sodass eine Verrechnung mit Preisen von Futtergerste erfolgt.

Andere relevante Kriterien, wie z. B. der Vollgerstenanteil, die Sortenreinheit oder Keimfähigkeit, spielen bei der Preisbildung ebenso eine Rolle. Da diese jedoch von untergeordneter Bedeutung für die Erlösbestimmung sind und der Datenerhebungsaufwand weitaus größer ist, wurde im Rahmen der vorzunehmenden ökonomischen Bewertung lediglich der Proteingehalt zugrunde gelegt.

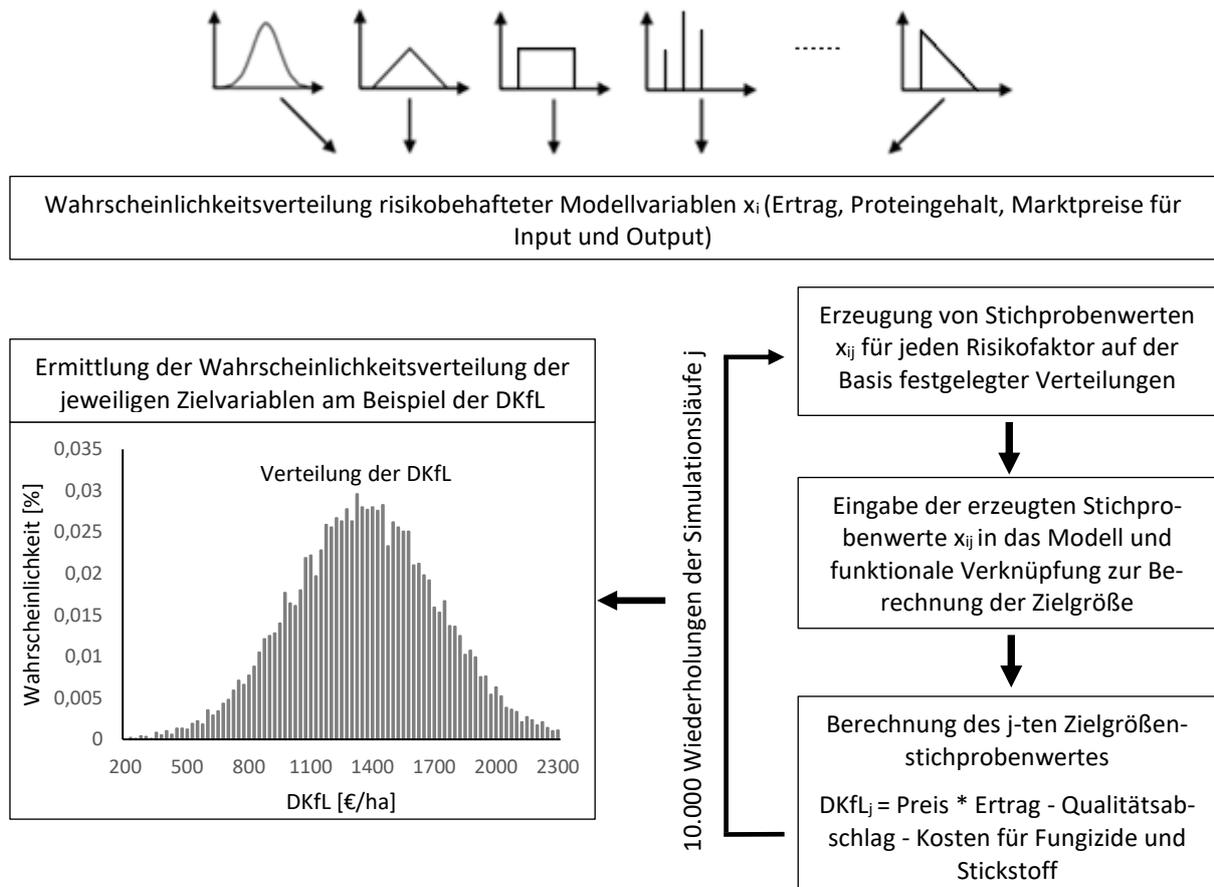
3.4.2 Berücksichtigung von Unsicherheit – Monte-Carlo-Simulation

Der Faktor Unsicherheit stellt bei der monetären Bewertung der Genotypen einen maßgeblichen Einflussfaktor dar. Dies gilt nicht nur in Bezug auf die Ergebnisse der Feldversuche (z. B. Ertragsschwankungen infolge von Witterungseffekten und anderen äußeren Störeinflüssen), sondern auch bei der Festlegung verrechnungsrelevanter Input- und Output-Preise. Eine Bewertung mit gegenwärtigen Marktpreisen würde lediglich zeitpunktbezogene Rückschlüsse hinsichtlich der Rentabilität ermöglichen. Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, erfolgt daher die Durchführung einer stochastischen Risikoanalyse unter Berücksichtigung von Marktunsicherheiten und Eintrittswahrscheinlichkeiten.

Risiken lassen sich mathematisch als Zufallsvariable mit entsprechender Wahrscheinlichkeitsverteilung modellieren. Die Analyse von Einzelrisiken in einem Modell erfolgt durch Methoden der quantitativen Risikoanalyse. Ein verbreitetes mathematisch-analytisches Instrument des Risikomanagements stellt die Monte-Carlo-Simulation (MCS) dar, mit der eine repräsentative Anzahl zukünftiger risikobedingter Szenarien berechnet und analysiert werden kann. Die mathematische Grundlage basiert auf dem Gesetz der großen Zahlen, das besagt, dass der arithmetische Mittelwert einer Stichprobe, bei ausreichender Wiederholung des Zufallsexperimentes unter gleichbleibenden Bedingungen, gegen den Erwartungswert der zugrunde liegenden Verteilung konvergiert (VIERTL und KARL 2003: 102). Die MCS ermöglicht es, stochastische Probleme zu simulieren, indem auf der Basis einer gewählten Wahrscheinlichkeitsverteilung zufällige Stichproben erzeugt werden. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass alle unsicheren Variablen in einem Modell berücksichtigt werden. Damit ist die MCS einer klassischen Betrachtung von Einzelszenarien mit Durchschnittswerten deutlich überlegen, da in Abhängigkeit von der Anzahl der Iterationsläufe mehrere tausend Einzelszenarien in die Auswertung einfließen können. Zur Durchführung der MCS wird in dieser Arbeit das Microsoft Excel-Ergänzungstool @Risk verwendet. Abbildung 7 zeigt die wesentlichen Prozessschritte bei der Durchführung der MCS zur Bestimmung der sortenspezifischen DKfL.

²⁶ Nach den Richtlinien der „Getreide AG“ für den Vertragsanbau von Braugerste für die Ernte 2018 (GAG 2017: 4).

Abbildung 7: Prozessschritte der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Verteilungsfunktionen ökonomischer Erfolgsgrößen (DKfL, NKfL und FKfL)



Quelle: Eigene Darstellung (2018) nach SCHMALLOWSKY und REIMERS (2015: 10).

Wesentliche Voraussetzung für die Validität der Ergebnisse ist eine bewusste Annahme der zugrunde liegenden Verteilungsfunktionen unsicherer Einflussfaktoren. Diesbezüglich lassen sich als risikobehaftete Modellvariablen identifizieren: 1) Mengenrisiko (Erträge), 2) Qualitätsrisiko (Proteingehalt) sowie 3) Faktor- und Produktpreisrisiko.

Für das Mengen- und Qualitätsrisiko konnten Verteilungsfunktionen anhand der Feldversuche bestimmt werden. Genotypspezifische Rohdaten aus beiden Versuchsjahren 2017 und 2018 finden sich im Anhang 3. Diese Daten bildeten die Grundlage für die MCS, wobei sowohl für das Mengen- als auch das Qualitätsrisiko eine Normalverteilung unterstellt wurde, die von den erhobenen Minima und Maxima der Feldversuche 2017 und 2018 begrenzt wird (abgeschnittene Normalverteilung). Für die Berücksichtigung des Preisrisikos wurde auf historische Marktdaten (Zeitraum 2008 bis 2017) für Brau-, Futtergerste und KAS der Agrarmarkt Informations-Gesellschaft (AMI) zurückgegriffen, aus denen Verteilungsfunktionen generiert werden konnten (AMI 2018). Da bei Pflanzenschutzanwendungen mehrere praxisrelevante Präparate infrage kommen, musste zur Bestimmung der Fungizid-Kosten auf eine weitere Datenbasis zurückgegriffen werden. Als Grundlage dienten diesbezüglich zunächst proportionale Pflanzenschutzkosten für Sommergerste aus den jährlich erhobenen SDB des KTBL (KTBL 2018). In der Online-Datenbank der Leistungs-Kostenrechnung des KTBL wird der prozentuale Kostenanteil für Fungizide an den gesamten Pflanzenschutzkosten für Sommergerste mit ca. 60 % angegeben, sodass für den gewählten zehnjährigen Zeitraum Kosten für Fungizide ermittelt werden konnten (KTBL

2017). Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Verteilungsparameter verrechnungsrelevanter Faktor- und Produktpreise. Wiederum wurde eine abgeschnittene Normalverteilung unterstellt, wobei die Grenzwerte auf historischen Minima und Maxima beruhen.

Tabelle 4: Verteilungsannahmen marktrelevanter Parameter zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulation

Preis	Produkte	Bezugsgröße	Preis [€]			Streuung	
			Ø	Min	Max	σ	VarK
Output	Braugerste	dt	18,4	9,86	30,19	4,4	0,24
	Futtergerste	dt	15,3	8,77	22,56	3,8	0,25
Input	Fungizide	ha	54,3	43,52	65,28	6,4	0,11
	KAS	t	264,85	181,29	302,90	32,36	0,12

Anmerkung: σ = Standardabweichung; VarK = Variationskoeffizient.

Quelle: Eigene Darstellung (2018) auf Datenbasis des KTBL (2017, 2018) und der AMI (2018).

Anhand aller Verteilungsfunktionen lassen sich Stichprobenwerte für jede unsichere Modellvariable generieren. Dabei gilt es, stochastische Abhängigkeiten (Korrelationen) zwischen den Brau- und Futtergerstenpreisen sowie den Faktor- und Produktpreisen zu berücksichtigen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Korrelationen zwischen Faktor- und Produktpreisen bei der Monte-Carlo-Simulation

	Braugerste	Futtergerste	Faktorpreis
Braugerste	1		
Futtergerste	0,94	1	
Faktorpreis	0,65	0,66	1

Anmerkung: Unter der Bezeichnung Faktorpreis sind Düngung und Pflanzenschutz aggregiert erfasst.

Quelle: Eigene Darstellung (2018) auf Datenbasis des KTBL (2017, 2018) und der AMI (2018).

Die Berechnung der Zielgröße der DKfL erfolgt durch die funktionale Verknüpfung aller unsicherheitsbehafteten Modellvariablen anhand von Gleichung (2):

$$DKfL = \text{Preis [€/dt]} * \text{Menge [dt]} - \text{Qualitätsabschlag [€]} - \text{Kosten für Fungizide und Stickstoff [€]} \quad (2)$$

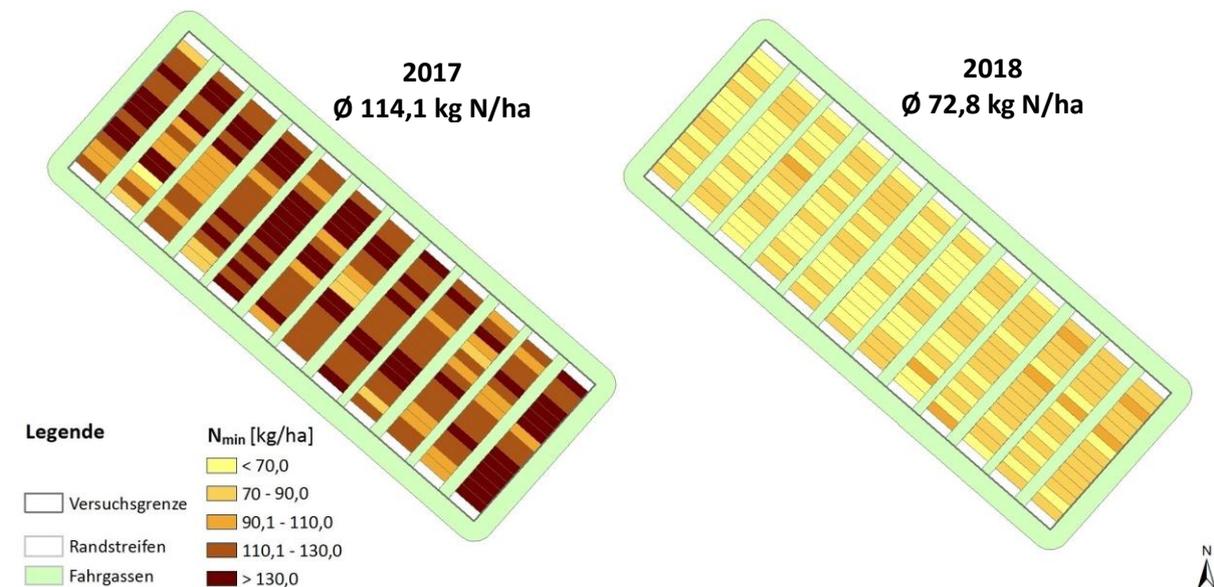
Das Anwendungsziel der MCS im Forschungskontext besteht darin, durch die Berücksichtigung aller identifizierten Eintrittswahrscheinlichkeiten für Risikofaktoren und die Generierung einer großen Anzahl von Einzelszenarien, die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die DKfL (bzw. NKfL oder FKfL) für jeden Genotyp und jede Anbaustufe zu modellieren (vgl. Abbildung 7). Diesbezüglich werden 10.000 Simulationen durchgeführt. Im Hinblick auf die abschließende wirtschaftliche Bewertung der Testgenotypen lässt sich daraus die Wahrscheinlichkeit ableiten, mit der ein Genotyp einem anderen wirtschaftlich über- bzw. unterlegen ist.

3.5 Abweichende Parameter der Versuchsplanung

Landwirtschaftliche Feldversuche unterliegen einem großen Umwelteinfluss, sodass nicht alle Faktoren im Vorfeld kalkulierbar und teilweise situationsbedingte Anpassungen des Versuchsdesigns an witterungsspezifische Gegebenheiten notwendig sind. Die im Punkt 3.3.2 erläuterte Düngungsstrategie für die Feldversuche 2017 und 2018 konnte nicht in geplanter Weise durchgeführt werden. Der ursprünglich für die Datenerhebung konzipierte dreifaktorielle Versuch in dreifacher Wiederholung musste aufgrund der Ergebnisse der N_{min}-Beprobung des Jahres 2017 als zweifaktorieller Versuch in

sechsfacher Wiederholung durchgeführt werden. Zur Visualisierung jahresspezifischer Schwankungen des N_{\min} -Gehaltes dient Abbildung 8. Die Ergebnisse der Bodenanalysen des IAU Freyburg zur Bemessung des spezifischen Düngebedarfs jeder Parzelle brachten im ersten Versuchsjahr 2017 extrem hohe N_{\min} -Werte hervor, die in dieser Form, insbesondere aufgrund von Voruntersuchungen aus dem Jahr 2016, nicht zu erwarten waren²⁷. N_{\min} -Gehalte von durchschnittlich 114 kg N/ha im Jahr 2017 standen einer Durchführung der ursprünglichen Düngeplanung entgegen. Da das Zieldüngeniveau von Braugerste aufgrund qualitativer Restriktionen verhältnismäßig gering ist, konnten unter diesen Bedingungen keine zwei Düngungsstufen festgesetzt werden. Eine extensive Düngungsstrategie (N_0) war unter diesen Voraussetzungen nicht möglich. Um bestmögliche Homogenität in der N-Versorgung zu gewährleisten, wurde das Zieldüngeniveau auf 130 kg N/ha festgelegt. Die Parzellen, deren N_{\min} -Gehalte unterhalb dieses Wertes lagen, wurden entsprechend der ursprünglichen Methodenplanung aufgedüngt. Das Ziel einer einheitlichen Düngung konnte jedoch 2017 nicht vollständig umgesetzt werden, da der N_{\min} -Gehalt einiger Parzellen bereits über dem Zieldüngeniveau lag.

Abbildung 8: Räumliche Verteilung der N_{\min} -Gehalte der Versuchspartellen am Standort Merbitz in den Versuchsjahren 2017 und 2018



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Für 2018 dokumentiert Abbildung 8 geringere N_{\min} -Werte, sodass eine Versuchsdurchführung nach der ursprünglich konzipierten Methodik möglich gewesen wäre. Da für eine repräsentative Datenauswertung jedoch mindestens zwei Versuchsjahre mit identischer Versuchsanstellung notwendig sind, ist der Mehrwert einjähriger Düngungseffekte so gering, dass dieser keine validen Schlussfolgerungen hinsichtlich der NKfL gestattet. Im Interesse einer einheitlichen Datenauswertung wurde die Methodik aus 2017 deshalb beibehalten²⁸. Dies hat insofern Einfluss auf die erläuterte Methodik der ökonomischen Bewertung, dass die Zielgröße der NKfL nicht bestimmt werden kann. Die Untersuchungen be-

²⁷ Zur Bestimmung der Bodenheterogenität der Versuchflächen in Merbitz wurden bereits im März 2016 erste stichprobenartige N_{\min} -Beprobungen von 120 Parzellen durchgeführt. Der durchschnittliche N_{\min} -Gehalt lag bei 78,7 kg N/ha.

²⁸ Lediglich die N-Düngung wurde 2018 auf 120 kg N/ha reduziert.

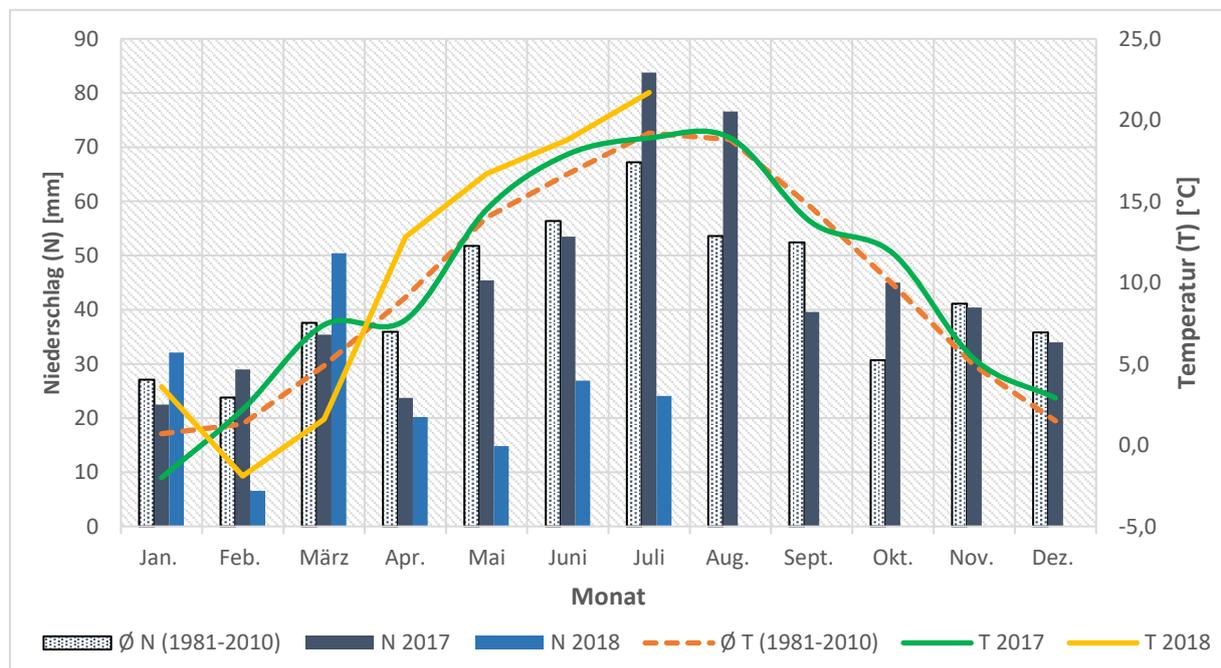
ziehen sich aufgrund der erforderlichen Modifizierungen bei der N-Düngung lediglich auf die Quantifizierung von Kosteneinsparungseffekten infolge verbesserter Resistenzeigenschaften anhand der Zielgröße der FKfL. Ein Vorteil dieser methodisch notwendigen Veränderungen besteht darin, dass die Ergebnisse durch die doppelte Anzahl an Wiederholungen (sechs statt drei Wiederholungen) auf einer breiteren Datengrundlage beruhen.

4 Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25

4.1 Klimatische Bedingungen am Versuchsstandort Merbitz 2017 und 2018

Die klimatischen Bedingungen während der Vegetationsperiode in den beiden Versuchsjahren 2017 und 2018 waren sehr heterogen (Abbildung 9). Verglichen mit 30-jährigen Monatsmittelwerten für Niederschlag und Temperatur ist 2017 als durchschnittliches Jahr zu charakterisieren. Im Gegensatz dazu waren die klimatischen Bedingungen im zweiten Versuchsjahr außergewöhnlich heiß und trocken. Die Niederschlagsmenge in der für Sommergerste relevanten Anbauperiode von April bis Juli reduzierte sich im Vergleich zum Vorjahr um fast 60 %. Gleichzeitig erhöhte sich der Temperaturmittelwert im genannten Zeitraum um fast 3 °C.

Abbildung 9: Klimadiagramm der Jahre 2017 und 2018 für den Versuchsstandort Merbitz (Monatsmittelwerte)



Anmerkung: Für 2018 wurden lediglich die vegetationsrelevanten Monate bis einschließlich Erntemonat Juli berücksichtigt. Da für den Standort Merbitz keine langjährigen Referenzdaten vorhanden sind, basieren die durchschnittlichen Monatsmittelwerte auf Erhebungen am Standort Halle/Kühnfeld aus den Jahren 1981 bis 2010.

Quelle: Eigene Darstellung (2018) auf Datenbasis von DÖRING (2018).

Die auffällig unterschiedlichen klimatischen Voraussetzungen in den beiden Versuchsjahren 2017 und 2018 spiegeln sich auch in den Daten aus den Feldversuchen wider. Für die Datenauswertung waren

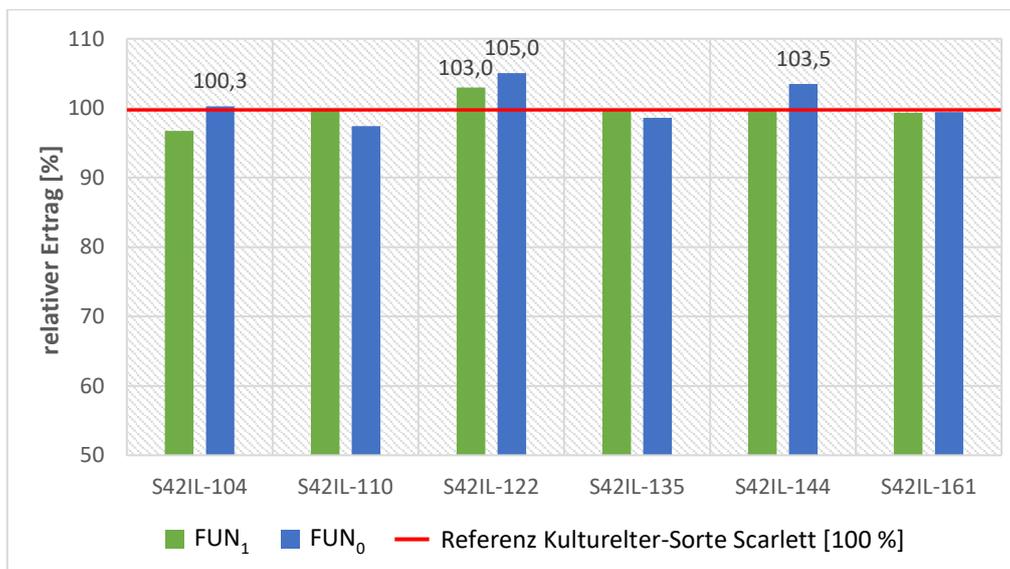
diese heterogenen jahresspezifischen Witterungsbedingungen von Vorteil, da bei zweijähriger Betrachtung ein breiteres Spektrum an Umweltbedingungen abgedeckt werden konnte. Durch Verteilungsfunktionen der Variablen Ertrag und Proteingehalt wurden klimabedingte Veränderungen stochastisch erfasst und bei der Modellierung berücksichtigt.

4.2 Deskriptive Statistik zu den Rohdaten der Versuchsjahre 2017 und 2018 am Standort Merbitz

4.2.1 Ertragsfähigkeit

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Introgressionslinien ist die Ertragsfähigkeit der wesentlichste Einflussfaktor. In Abbildung 10 sind die durchschnittlich erzielten Relativerträge der Introgressionslinien aus der Population S42 im Vergleich zum Kulturelter Scarlett in beiden Fungizid-Identitätsstufen (FUN_0 und FUN_1) dargestellt. Die Mittelwerte setzen sich aus 12 Beobachtungswerten zusammen. Das Ertragsniveau von Scarlett wird unter Standardanbaubedingungen mit praxisüblichem Fungizid-Einsatz (FUN_1) größtenteils nicht überschritten. Einzige Ausnahme stellt unter diesen Anbaubedingungen die Linie S42IL-122 dar, die im Durchschnitt der beiden Versuchsjahre 2017 und 2018 gegenüber Scarlett eine positive Ertragsdifferenz von 3 % aufweist. Trotz eines stabilen Ertragsniveaus aller getesteten Linien aus der Population S42 konnten keine weiteren positiven Ertragseffekte im Anbausystem FUN_1 erfasst werden.

Abbildung 10: Relative Ertragsfähigkeit der Population S42 im Vergleich mit Scarlett (Mittelwerte)



Anmerkung: Referenzniveau der Sorte Scarlett: FUN_1 : 82,0 dt/ha, FUN_0 : 78,3 dt/ha.

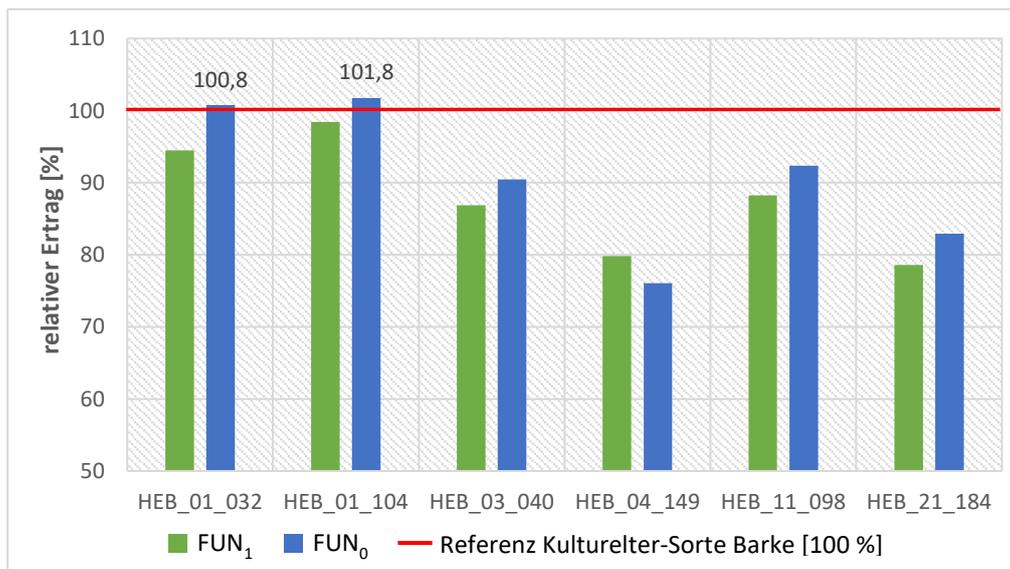
Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Bezüglich der in den forschungsmethodischen Vorüberlegungen geäußerten Vermutung (vgl. Abschnitt 3.2), dass Introgressionslinien unter extensiveren Anbaubedingungen aufgrund höherer Widerstandsfähigkeit weniger anfällig reagieren als etablierte Kontrollsorten, lassen sich aus Abbildung 10 erste Rückschlüsse erkennen: Bei drei der getesteten Introgressionslinien der Population S42 steigen die Relativerträge in der unbehandelten Variante (FUN_0) im Vergleich zum Intensitätsniveau FUN_1 erkenn-

bar an. Die Linien S42IL-104, S42IL-122 und S42IL-144 erzielen in der unbehandelten Variante ein höheres Ertragsniveau als die Sorte Scarlett. Mit einer Ertragsdifferenz von 5 % ergibt sich durch die Linie S42IL-122 der größte positive Effekt.

Die Relativerträge der zweiten Population HEB-25 im Vergleich mit dem Kulturelter Barke sind in Abbildung 11 visualisiert. Verglichen mit den Linien der S42, die alle etwa auf demselben Ertragsniveau liegen wie Scarlett, kann diese Leistungsdichte bei der HEB-25 nicht erzielt werden. Vier Linien fallen im Ertragsvergleich zu Barke deutlich ab. Dies ist durch die Anzahl an Rückkreuzungsschritten bedingt. Während bei der S42 zwei Rückkreuzungen mit der Ausgangskultursorte durchgeführt wurden, war es bei der HEB-25 lediglich eine Rückkreuzung. Der durchschnittlich höhere Anteil des Wildgerstengensoms führt zur Ertragsreduktion, sodass für wirtschaftliche Vergleiche nur die beiden Linien HEB_01_032 und HEB_01_104 relevant erscheinen. Dennoch zeigt sich bei einem Vergleich der Relativerträge aus beiden Anbauintensitäten die gleiche Tendenz wie bei der S42: Während in der Anbauvariante FUN₁ keine positiven Effekte erzielt werden konnten, stiegen die Relativerträge in der unbehandelten Variante an. Bei fünf von sechs getesteten Linien der HEB-25 ist die prozentuale Ertragsdepression geringer als beim Kulturelter Barke. Das führt dazu, dass die Relativerträge der beiden Linien HEB_01_032 und HEB_01_104 ohne Fungizid-Einsatz höher sind als bei der Sorte Barke. Die Differenz liegt bei 0,8 bzw. 1,8 %.

Abbildung 11: Relative Ertragsfähigkeit der Population HEB-25 im Vergleich mit Barke (Mittelwerte)



Anmerkung: Referenzniveau der Sorte Barke: FUN₁: 84,0 dt/ha, FUN₀: 80,7 dt/ha.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Für beide Populationen ist der Anstieg des Relativertrags bei unbehandelten Genotypen an acht von zwölf Introgressionslinien ersichtlich. Es handelt sich bei den Neuzüchtungen der Populationen S42 und HEB-25 demnach um durchschnittlich ertragsschwächere, jedoch gegenüber Schaderregern widerstandsfähigere Genotypen. Der prozentuale Ertragsabfall infolge geringerer Anbauintensität ist kleiner als bei den Kultureltern Scarlett und Barke.

Zur Bestimmung der Signifikanz der im Anbausystem FUN₀ erzielten positiven Ertragseffekte wurde eine Varianzanalyse mittels Dunnett-Test durchgeführt. Tabelle 6 weist neben dem Signifikanzniveau zusätzlich die mittlere Ertragsdifferenz in dt/ha aus. Trotz positiver Ertragsdifferenz von fast 4 dt/ha

der ertragsstärksten Linie S42IL-122 sind alle Ertragseffekte im Vergleich zu dem jeweiligen Kulturelter (Scarlett bzw. Barke) aus statistischer Perspektive als nicht signifikant einzustufen. Für signifikante positive Ertragseffekte ist der Stichprobenumfang von N = 12 zu gering.

Tabelle 6: Dunnett-Test für das Merkmal Ertrag im Anbausystem ohne Fungizide (FUN₀)

Genotyp (I)	Kontrollsorte (J)	mittlere Ertragsdifferenz (I-J) [dt/ha]	Signifikanz [p-Wert]
S42IL-104	Scarlett	0,23	1,000
S42IL-122		3,94	0,271
S42IL-144		2,74	0,630
HEB_01_032	Barke	0,61	0,979
HEB_01_104		1,42	0,893

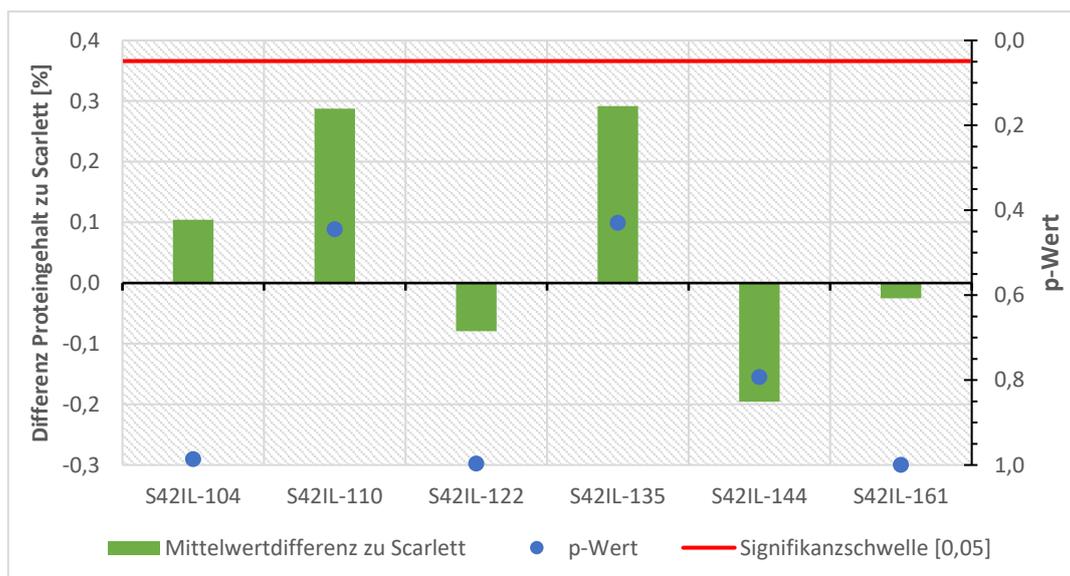
Anmerkung: Berücksichtigt wurden lediglich Genotypen mit positiver Ertragsdifferenz.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

4.2.2 Proteingehalt

Maßgebliche Einflussvariable bei der marktüblichen Leistungsbewertung von Braugerste ist neben dem Ertrag auch der Proteingehalt. Dieser liegt bei den Introgressionslinien der S42 im Leistungsbereich der Kulturelter-Sorte Scarlett. Es wurden aus den Daten der Feldversuche 2017 und 2018 keine statistisch signifikanten Veränderungen nachgewiesen (Abbildung 12). Bei der grafischen Interpretation ist zu beachten, dass eine negative Abweichung vom Mittel des Kulturelters wünschenswert wäre. Der Proteingehalt von Scarlett befindet sich im Mittel mit 10,9 % innerhalb des zulässigen Grenzbereiches. Eine leichte Verbesserung gegenüber Scarlett konnte durch die drei Linien S42IL-122, S42IL-144 und S42IL-161 beobachtet werden.

Abbildung 12: Beobachtete Effekte der Population S42 für das Merkmal Protein

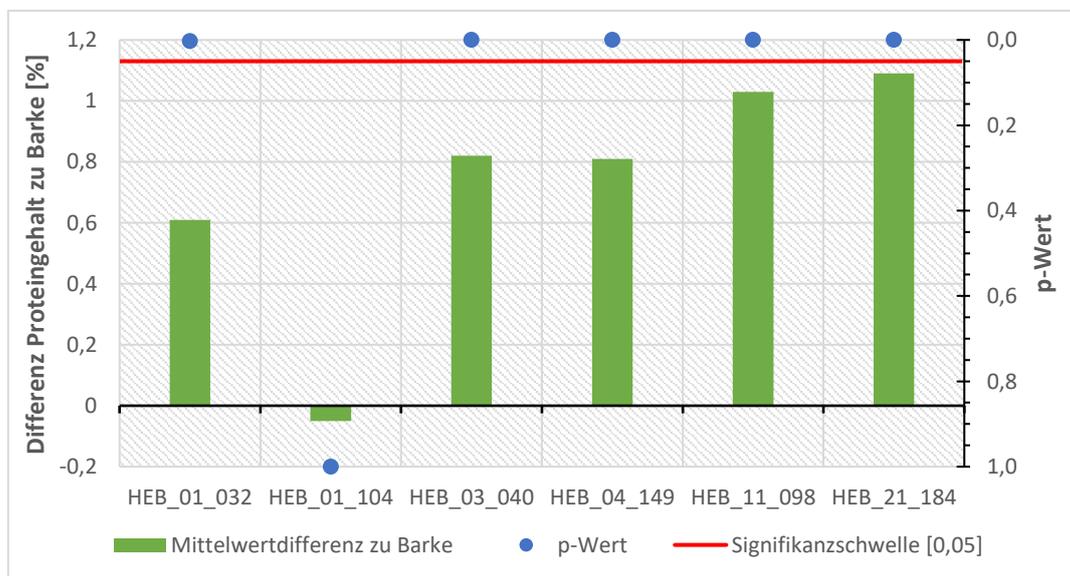


Anmerkung: Der Proteingehalt von Scarlett liegt im Mittel bei 10,9 %. Zur Mittelwertbildung wurden beide Anbauvarianten (FUN₀ und FUN₁) kumuliert erfasst (N = 24).

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

In Abbildung 13 sind Merkmalsabweichungen im Proteingehalt der Introgressionslinien aus der Population HEB-25 im Vergleich zu Barke dargestellt. Gleichmaßen wie bei den Ertragseffekten, gibt es auch beim Proteingehalt aufgrund der geringeren Anzahl an Rückkreuzungen deutlich größere Abweichungen als bei den Linien der Population S42. Mit Ausnahme der Linie HEB_01_104 weisen alle anderen Introgressionslinien einen signifikant höheren Proteingehalt auf als die Sorte Barke. Für diese Linien liegt der durchschnittliche Proteingehalt oberhalb des vom Markt zulässigen Grenzwertes von 11,5 % (der Mittelwert von Barke liegt bei 10,8 %). Entsprechend den methodisch gewählten Bewertungsannahmen (vgl. Punkt 3.4.1) sind Preisabschläge aufgrund minderer Kornqualitäten vorzunehmen. Dies ist insofern äußerst relevant, da das hohe Ertragsniveau der Linie HEB_01_032 durch den hohen Proteingehalt konterkariert wird. Mit einer nicht signifikanten Veränderung des Proteingehaltes von -0,05 % im Vergleich zu Barke konnten durch die Linie HEB_01_104 züchterisch positive Effekte erzielt werden. Damit erreicht dieser Genotyp sowohl ein hohes Ertrags- als auch ein hohes Qualitätsniveau.

Abbildung 13: Beobachtete Effekte der Population HEB-25 für das Merkmal Protein



Anmerkung: Der Proteingehalt von Barke liegt im Mittel bei 10,8 %. Zur Mittelwertbildung wurden beide Anbauvarianten (FUN₀ und FUN₁) kumuliert erfasst (N = 24).

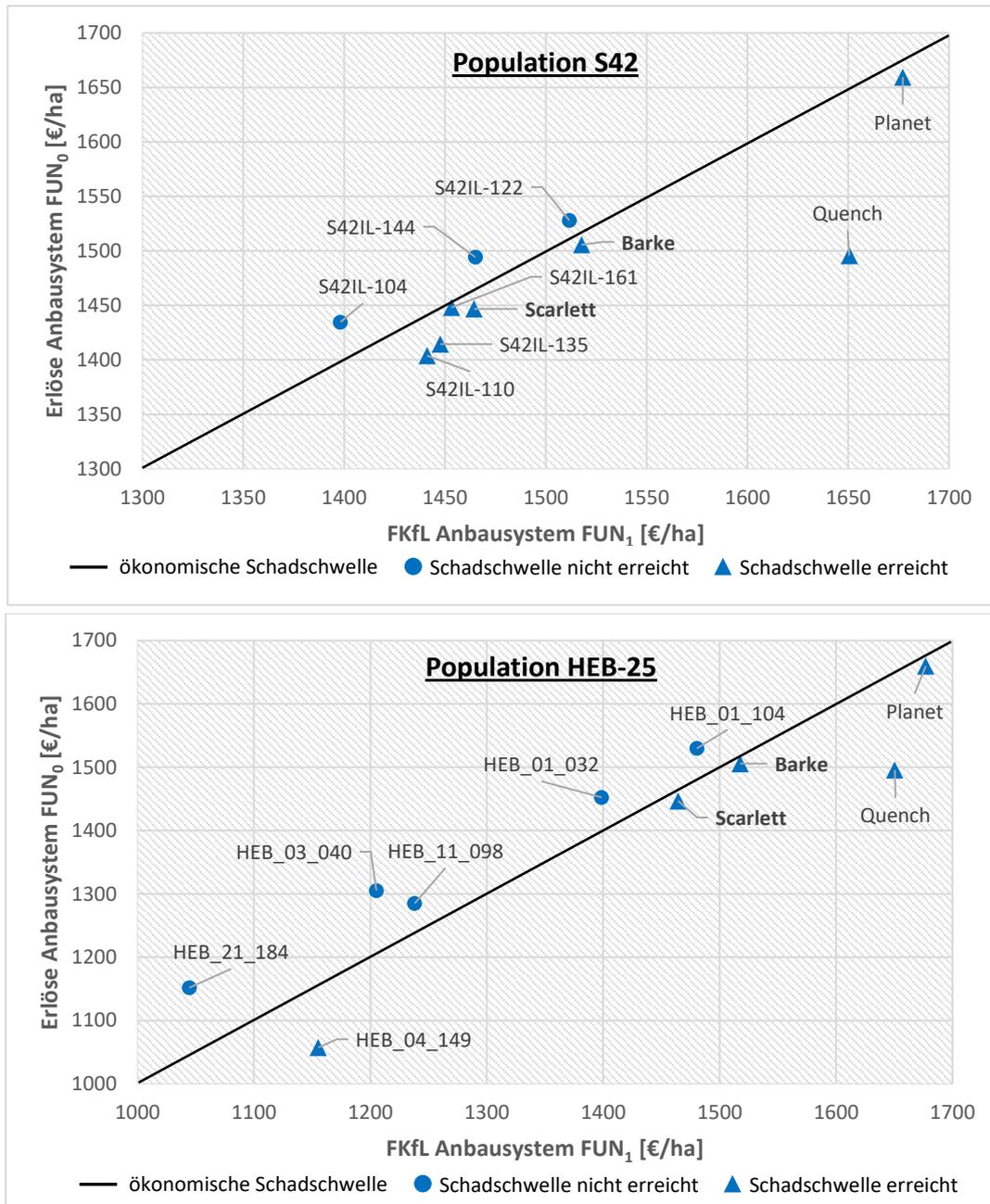
Quelle: Eigene Darstellung (2018).

4.3 Erfassung des Kosteneinsparungspotenzials anhand der ökonomischen Schadschwelle

Die geringere Ertragsdepression einiger Introgressionslinien unter extensiveren Anbaubedingungen lässt vermuten, dass auch bei reduzierten Aufwandmengen von Fungiziden eine hohe Wirtschaftlichkeit gewährleistet ist. Das Entscheidungskriterium für den rentablen Einsatz von Fungiziden ist die ökonomische Schadschwelle. Das Schadschwellenniveau ist nur unter Berücksichtigung monetärer Effekte zu erfassen. Diesbezüglich wird im Folgenden die Fragestellung untersucht, ob die geringere Ertragsdepression der Introgressionslinien aus ökonomischer Perspektive tatsächlich ein geringeres Intensitätsniveau bei der Applikation von Fungiziden rechtfertigt.

Abbildung 14 stellt die ökonomische Schadschwelle für die Populationen S42 und HEB-25 dar und gibt Aufschluss über die Wirtschaftlichkeit des Fungizid-Einsatzes. Auf den Achsen ist jeweils die monetäre Leistung der Versuchsglieder in beiden Anbausystemen dargestellt (x-Achse: Fkfl bei der Variante FUN₁; y-Achse: Erlöse bei der Variante FUN₀). Die ökonomische Schadschwelle für den rentablen Einsatz von Fungiziden wird anhand der diagonalen Linie dargestellt: Genotypen, die sich unterhalb (bzw. rechts) der Diagonalen befinden, erzielen bei einer praxisüblichen Fungizid-Behandlung eine höhere Rentabilität. Für alle Genotypen, die oberhalb (bzw. links) der Diagonalen liegen, ist ein Behandlungsverzicht mit Fungiziden aufgrund höherer Widerstandsfähigkeit ökonomisch sinnvoller.

Abbildung 14: Ökonomische Schadschwelle für die Populationen S42 und HEB-25



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Aus der grafischen Darstellung in Abbildung 14 ist erkennbar, dass die ökonomische Schadschwelle von allen in den Feldversuchen 2017 und 2018 getesteten Sorten überschritten wird: Die FKfL in den

Versuchspartellen FUN₁ ist höher als der Erlös in der Variante ohne Fungizid-Einsatz. Die zusätzlichen Behandlungskosten wurden durch den Mehrerlös kompensiert und der Fungizid-Einsatz ist bei allen Sorten ökonomisch sinnvoll. Das betrifft sowohl die Kultureltern Scarlett und Barke als auch die beiden modernen Elitesorten Quench und Planet. Da das hohe Ertragspotenzial moderner Kultursorten zu einem gewissen Anteil auch auf den präventiven Einsatz von Pflanzenschutzmitteln beruht, waren diese Ergebnisse zu erwarten. Auch bei den Genotypen S42IL-110, S42IL-135 und S42IL-161 ist aus den Daten der Feldversuche 2017 und 2018 eine ökonomische Notwendigkeit für den Fungizid-Einsatz abzuleiten. Die anderen drei Genotypen der Population S42 (S42IL-104, S42IL-122, S42IL-144) erzielten unter extensiven Anbaubedingungen ohne Fungizid-Einsatz eine höhere Rentabilität im Vergleich zu praxisüblichen Aufwandmengen. Aufgrund höherer Widerstandsfähigkeit ist bei diesen Linien ein Behandlungsverzicht ökonomisch gerechtfertigt.

Bei der Population HEB-25 konnten fünf Genotypen identifiziert werden, die in den unbehandelten Versuchspartellen ein besseres wirtschaftliches Ergebnis erzielten. Ein Potenzial zur Einsparung variabler Kosten für Fungizide besteht bei den Linien HEB_01_032, HEB_01_104, HEB_04_040, HEB_11_098 und HEB_21_184.

4.4 Rentabilitätsvergleiche der Introgressionslinien mit Standardsorten

Für die Rentabilitätsvergleiche der Introgressionslinien mit Standardsorten wurde jeweils diejenige Intensitätsstufe berücksichtigt, die durchschnittlich zu einer höheren Rentabilität führt. Bei den Standardsorten war das in der Regel die Intensitätsstufe FUN₁²⁹. Das gleiche Kriterium fand hinsichtlich der Introgressionslinien Anwendung, sodass bei den o. g. acht Linien die Intensitätsstufe FUN₀ als wirtschaftlich effizient heranzuziehen war. Infolge dieser Vorgehensweise erfolgte die Rentabilitätsbewertung nicht nur vertikal zwischen zwei gleichen Anbausystemen (FUN₀/FUN₀), sondern auch horizontal über beide Anbausysteme (FUN₁/FUN₀) in Abhängigkeit vom jeweiligen ökonomischen Schadschwellemniveau.

4.4.1 Vergleich mit den Kultureltern Scarlett und Barke

4.4.1.1 Szenario 1: Standardszenario

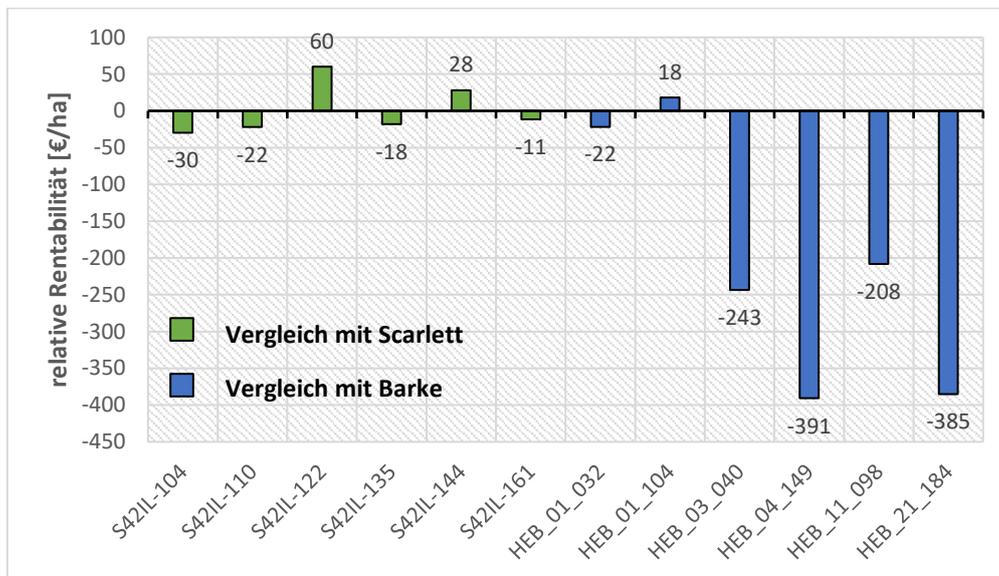
Zur realitätsnahen Einschätzung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit der Introgressionslinien wurde bei der MCS zunächst ein Standardszenario mit durchschnittlichen Marktpreisen konzipiert. Die Preisentwicklung beruht dabei auf historischen Marktdaten zwischen den Jahren 2008 und 2017. Unter diesem Standardszenario konnten in beiden Populationen positive monetäre Effekte einzelner Introgressionslinien nachgewiesen werden.

Abbildung 15 präsentiert einen Wirtschaftlichkeitsvergleich der Introgressionslinien mit Scarlett bzw. Barke. Da beide Populationen in einer Grafik dargestellt sind, ist bei der Interpretation zu berücksichtigen, dass sich die relative Rentabilität stets auf das Mittel des jeweiligen Kulturelterns bezieht. Bei der Population S42 konnten durch die Linien S42IL-122 und S42IL-144 Rentabilitätssteigerungen von durchschnittlich 60 bzw. 28 €/ha gegenüber Scarlett erzielt werden. Alle weiteren Introgressionslinien

²⁹ In Abhängigkeit des jeweilig unterstellten Szenarios kann es zu Änderungen der wirtschaftlichen Schadschwelle kommen. Berechnungsgrundlage sind daher nicht allein die Ergebnisse aus Abbildung 14, da diese nur auf einem Standardszenario mit durchschnittlichen Marktpreisen basieren.

der Population S42 verzeichneten bei der MCS auf Grundlage der Felddaten keine positiven wirtschaftlichen Effekte. Jedoch zeigt sich durchgängig bei allen Prüfgliedern der Population ein hohes Leistungsniveau. Die monetären Verluste gegenüber Scarlett liegen bei zweijähriger Durchschnittsbetrachtung in einem moderaten Bereich zwischen 11 und 30 €/ha. Bei getrennter Auswertung beider Versuchsjahre konnten teilweise sogar positive Effekte gegenüber Scarlett erreicht werden.

Abbildung 15: Rentabilität der Introgressionslinien im Vergleich mit den Kultureltern Scarlett und Barke



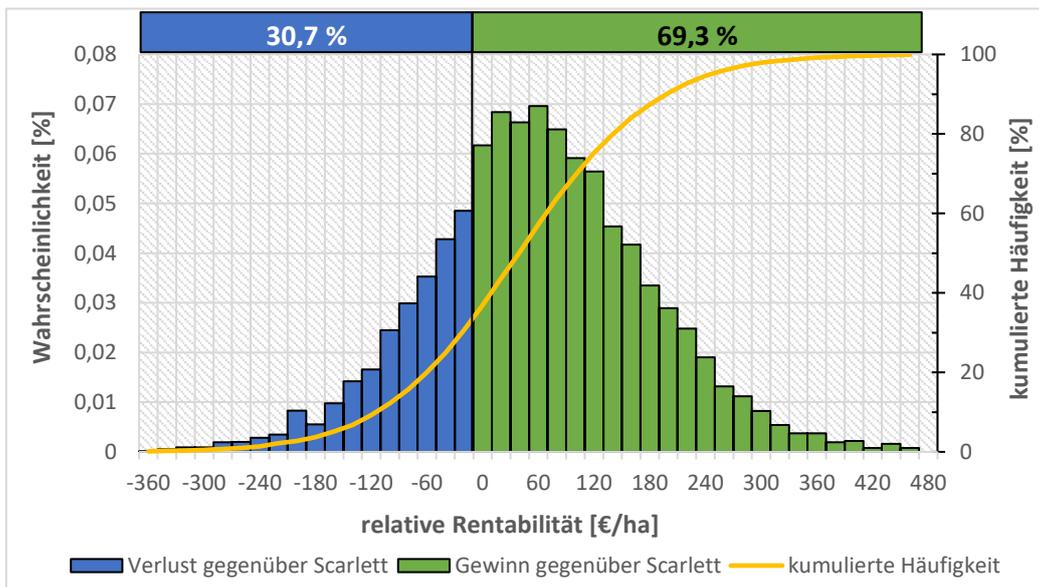
Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Demgegenüber dokumentiert die in Abbildung 15 ausgewiesene relative Rentabilität der HEB-25 im Vergleich mit Barke eine deutlich größere Differenzierung hinsichtlich der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit. Dies ist eine Folge der bereits analysierten heterogenen Ertrags- und Qualitätseigenschaften der Prüfglieder. Die vier Linien HEB_03_040, HEB_04_149, HEB_11_098 und HEB_21_184 sind zum gegenwärtigen Züchtungszeitpunkt und unter marktüblichen Bewertungskriterien nicht in der Lage, einem wirtschaftlichen Vergleich mit Standardsorten standzuhalten. Auch die ertragsstarke Linie HEB_01_032 verzeichnet im Anbau gegenüber Barke durchschnittlich einen Verlust von 22 €/ha, wobei dies auf qualitätsbedingte Preisabschläge zurückzuführen ist (vgl. Punkt 4.2.2). Einzig die Linie HEB_01_104 ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in der Lage, mit der im Anbau befindlichen Kultursorte Barke zu konkurrieren. Auf Basis der Parzellenversuche wurde eine Rentabilitätssteigerung von durchschnittlich 18 €/ha realisiert.

Bei den insgesamt drei Linien, die gegenüber der Ausgangskultursorte unter diesem realitätsnahen Szenario Rentabilitätssteigerungen verzeichnen konnten (S42IL-122, S42IL-144 und HEB_01_104), beruht der positive monetäre Effekt nicht auf höheren Erträgen, sondern auf geringeren variablen Kosten. Im Gegensatz zu Scarlett und auch Barke wurde die ökonomische Schadschwelle für den wirtschaftlichen Einsatz von Fungiziden durch die benannten Introgressionslinien nicht überschritten. Geringere Erträge unter extensiveren Anbaubedingungen ohne Fungizid-Einsatz konnten von den Introgressionslinien durch Kosteneinsparungseffekte kompensiert werden. Neben positiven ökologischen Effekten aus verminderten chemischen Aufwandmengen stellten sich zusätzlich Rentabilitätssteigerungen ein.

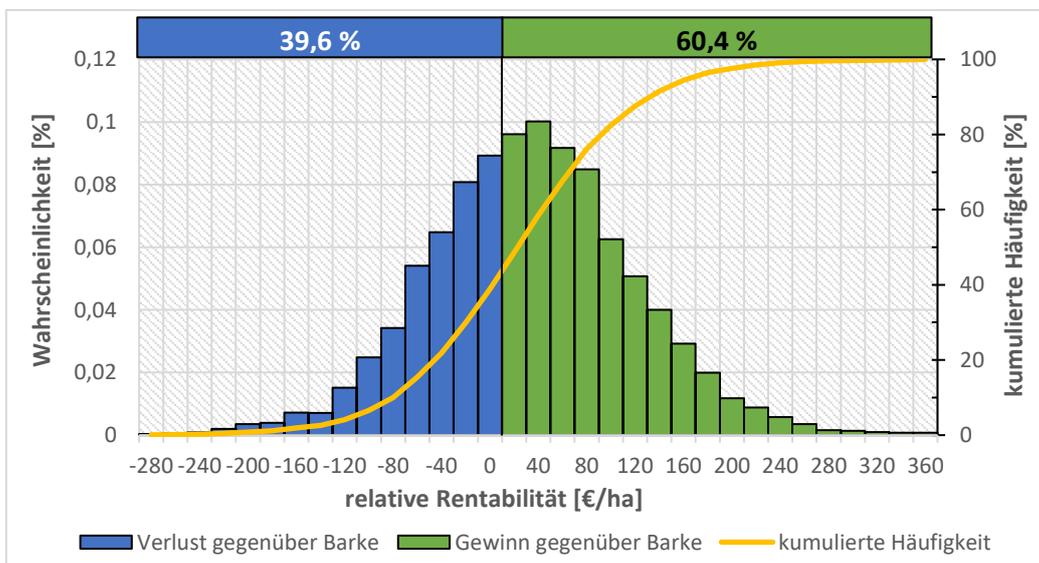
Die bei mehrjähriger Betrachtung zu erwartende durchschnittliche Rentabilität aus Abbildung 15 gibt keinen Aufschluss über die Streuung der Zielgröße (FKfL) und die Eintrittswahrscheinlichkeiten. Die Rohdaten aus den Parzellenversuchen dokumentieren sowohl innerhalb als auch zwischen den Blöcken der Versuchsanlage eine große Heterogenität im Hinblick auf Erträge und Qualitäten der Prüfglieder. Bei der Betrachtung einzelner Simulationsdurchläufe sind daher deutliche Abweichungen vom Mittelwert denkbar. In Erweiterung einer Durchschnittsbetrachtung sind deshalb stochastische Informationen zur Verteilung der Zielgröße prädestiniert. Durch die spezifische Gegenüberstellung der besten Genotypen jeder Population mit dem jeweiligen Kulturelter konnten Wahrscheinlichkeiten und Extremwerte determiniert werden.

Abbildung 16: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie S42IL-122 im Vergleich mit Scarlett



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Abbildung 17: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie HEB_01_104 im Vergleich mit Barke



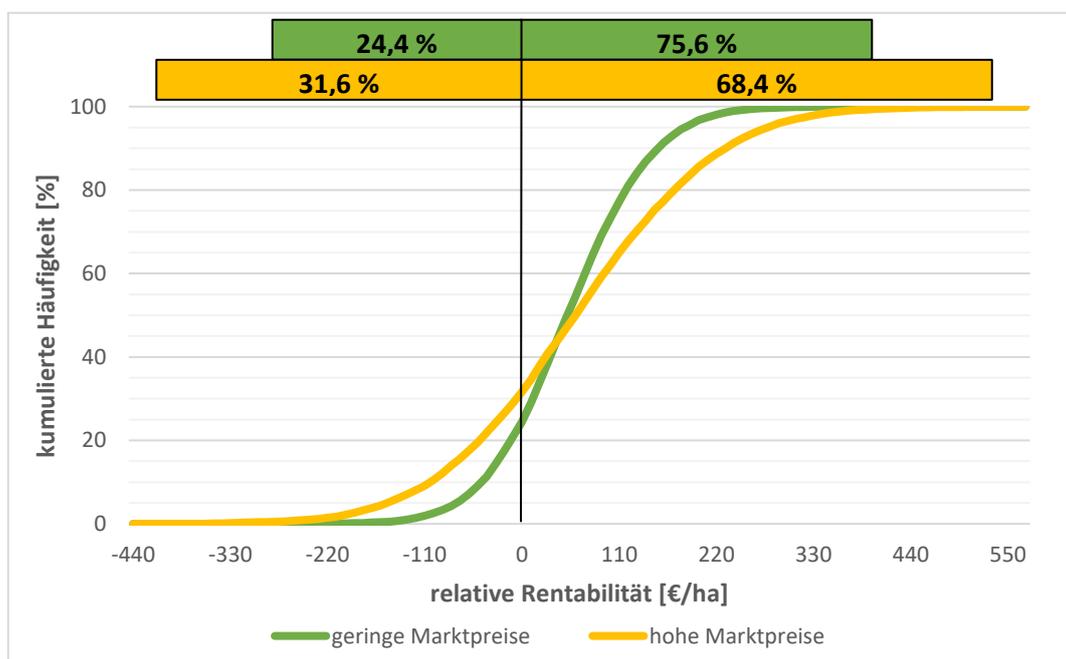
Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Abbildung 16 und Abbildung 17 visualisieren die relative und kumulierte Häufigkeit der Linien S42IL-122 bzw. HEB_01_104 für den Rentabilitätsvergleich mit den Sorten Scarlett bzw. Barke. Die Klassenbreite für die relative Rentabilität wurde auf 20 €/ha festgelegt. Die Wahrscheinlichkeit für Rentabilitätssteigerungen der Linie S42IL-122 im Vergleich mit dem Kulturelter Scarlett beträgt 69,3 %. Bei einem Mittelwert von 60 €/ha und einem Konfidenzniveau von 90 % liegt der Verlust- bzw. Gewinnbereich gegenüber Scarlett im Konfidenzintervall [-144,4; 264,5]. In einem Vergleich mit Barke verifiziert auch der Anbau der Linie HEB_01_104 mit einer Wahrscheinlichkeit von 60,4 % einen positiven monetären Effekt. Bei einem Konfidenzniveau von 90 % liegt die relative Rentabilität im Vergleich mit dem Kulturelter Barke im Konfidenzintervall [-101,1; 137,5], wobei der Mittelwert 18 €/ha beträgt.

4.4.1.2 Szenario 2: volatile Marktpreise

Die positiven wirtschaftlichen Effekte der Introgressionslinien beruhen auf Kosteneinsparungseffekten infolge höherer Stresstoleranz gegenüber Schaderregern. Daher wird die Vorteilhaftigkeit der neuen Genotypen vor allem unter der Voraussetzung geringer Produktpreise offenbar. Positive Effekte stellen sich ein, wenn die Kosteneinsparung einer verringerten Anbauintensität (Reduktion des Betriebsmitteleinsatzes) größer ist als der Mehrertrag bei höherem Faktoreinsatz. Dieser Effekt wird exemplarisch an der Linie S42IL-122 erläutert, gilt aber ebenso auch für die anderen beiden Introgressionslinien, bei denen Rentabilitätssteigerungen realisiert werden konnten (S42IL-144 und HEB_01_104).

Abbildung 18: Gewinnschwelle der Linie S42IL-122 gegenüber Scarlett bei unterschiedlichen Preisszenarien



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Abbildung 18 zeigt vergleichend die Wahrscheinlichkeit für Gewinne bzw. Verluste der Linie S42IL-122 gegenüber Scarlett bei geringen und hohen Agrarpreisen. Für das Szenario geringer Marktpreise wur-

den die Verteilungen der MCS so definiert, dass sich der Preis im unteren Quartil (0,25-Quantil) befindet.³⁰ Bei hohen Preisen für Brau- bzw. Futtergerste wurde unterstellt, dass der Preis im oberen Quartil (0,75-Quantil) liegt. Aus Abbildung 18 ist ersichtlich, dass die Gewinnschwelle in einem Szenario mit geringen Agrarpreisen deutlich schneller erreicht wird. Unter dieser Marktkonstellation werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 75,6 % positive wirtschaftliche Effekte gegenüber Scarlett erzielt. In Phasen hoher Agrarpreise genügt der Effekt der Kosteneinsparungen nicht immer zur monetären Kompensation geringerer Erträge. Die Wahrscheinlichkeit finanzieller Verluste liegt bei 31,6 % und damit ca. 7 % höher als im Referenzszenario mit geringen Marktpreisen. Bei isolierter Betrachtung der Mittelwerte ohne zugehörige Wahrscheinlichkeiten wird die Vorteilhaftigkeit der Introgressionslinien zur Minimierung von Preisrisiken gar nicht offensichtlich. Unter der Annahme geringer Agrarpreise liegt der relative Rentabilitätsgewinn der Linie S42IL-122 gegenüber Scarlett bei 52,7 €/ha. Im Vergleichszenario mit hohen Agrarpreisen ist der durchschnittliche relative Rentabilitätsgewinn mit 61,6 €/ha deutlich höher. Die kumulierten Wahrscheinlichkeiten in Abbildung 18 dokumentieren, dass dieser Effekt nur preisbedingt zustande kommt. Der Anbau der Introgressionslinien rentiert sich im Vergleich mit Standardsorten aufgrund geringerer Fungizid-Kosten insbesondere bei geringen Agrarpreisen. Der Verlust- bzw. Gewinnbereich der Linie S42IL-122 gegenüber Scarlett liegt bei geringen Marktpreisen und einem Konfidenzniveau von 90 % im Konfidenzintervall [-76,9; 182,4]. Unter der Bedingung hoher Agrarpreise erhöht sich die Spannweite des Konfidenzintervalls [-153,8; 277].

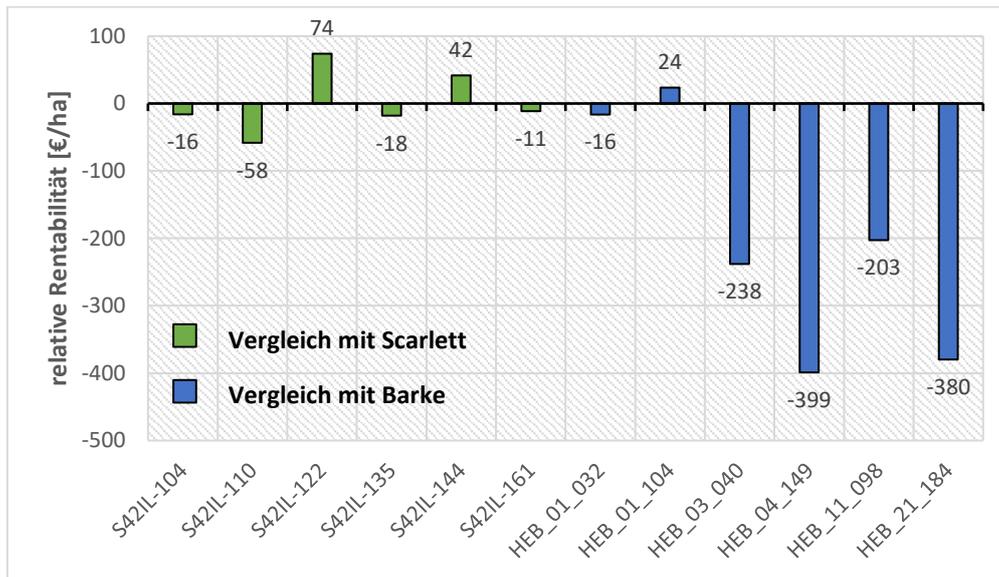
4.4.1.3 Szenario 3: Steuer auf Fungizide

Ökologische Aspekte und Nachhaltigkeit im Anbau landwirtschaftlicher Kulturpflanzen werden aufgrund negativer Umwelteffekte von Pflanzenschutzmitteln und kritischen Konsumenten politisch immer bedeutsamer. Da die Durchsetzung ordnungspolitischer Maßnahmen meist nur mit erheblichen Vollzugskontrollen zu realisieren ist, stellen auch ökonomische Instrumente eine geeignete Maßnahme zur Reduktion chemischer Aufwandmengen in der Landwirtschaft dar. Eine gebräuchliche ökonomische Reglementierungsmaßnahme sind Steuern bzw. Abgaben auf Pflanzenschutzmittel. Daher wurde in einem dritten Szenario eine Fungizid-Steuer in Höhe von 25 % unterstellt, sodass sich der Faktorpreis für Fungizide entsprechend erhöht.

Unter der Voraussetzung ökonomischer Reglementierungen im Umgang mit Pflanzenschutzmitteln konnte durch diese Szenarien-Betrachtung belegt werden, dass die wirtschaftliche Attraktivität widerstandsfähiger Introgressionslinien weiter steigen wird. Im Vergleich zum Standardszenario erhöht sich die Rentabilität der besten Linie S42IL-122 von 60 auf 74 €/ha (Abbildung 19). Diese Rentabilitätssteigerung ist darauf zurückzuführen, dass die ökonomische Schadschwelle für Fungizide trotz deutlicher Erhöhung der Faktorpreise von der Sorte Scarlett überschritten wird. Da der Kosteneinsparungseffekt größer wird, steigt die Wahrscheinlichkeit von Rentabilitätssteigerungen. Bei einem Konfidenzniveau von 90 % liegt der Verlust- bzw. Gewinnbereich gegenüber Scarlett im Konfidenzintervall [-131; 278,3]. Mit einer Wahrscheinlichkeit von über 73 % wird durch die Linie S42IL-122 eine höhere Rentabilität erzielt als bei der Kulturelter-Sorte Scarlett (Abbildung 20).

³⁰ Basierend auf dem von der AMI monatlich erfassten Preisniveau für Brau- und Futtergerste auf deutscher Bundesebene zwischen 2008 und 2017 (AMI 2018).

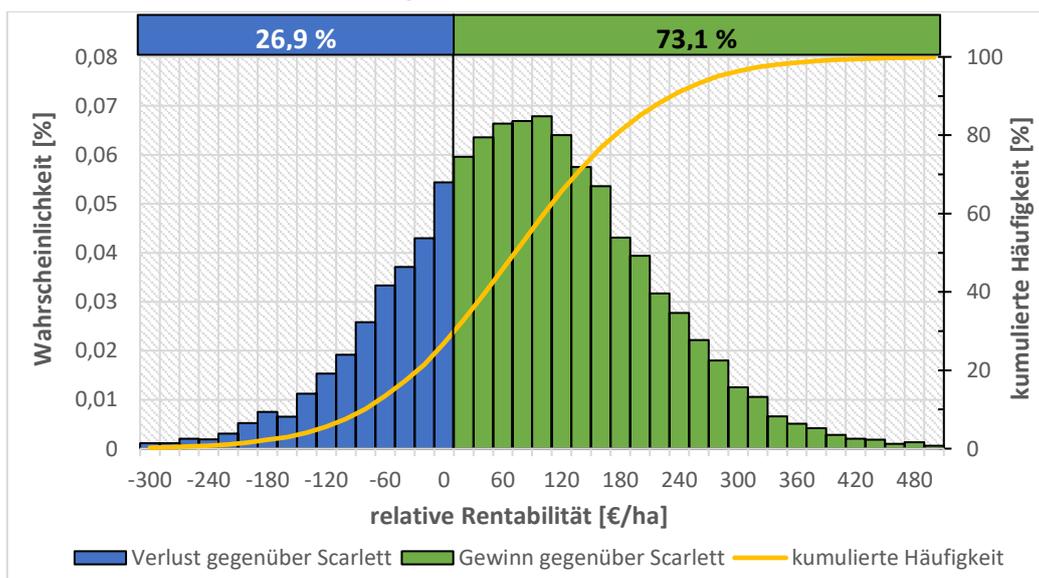
Abbildung 19: Rentabilität der Introgressionslinien im Vergleich mit den Kultureltern Scarlett und Barke bei einer Fungizid-Steuer von 25 %



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Im Gegensatz zur Sorte Scarlett führt die Erhöhung der Faktorpreise bei Barke zum gewünschten ökologischen Effekt. Die gestiegenen Faktorkosten bewirken, dass die Schadschwelle für Fungizide nicht überschritten wird. Unter diesen Annahmen ist eine Fungizid-Applikation nicht mehr rentabel. Bei einem Rentabilitätsvergleich der besten Linie HEB_01_104 mit Barke wird in der Gegenüberstellung zum Standardszenario lediglich ein leicht positiver Effekt erzielt. Bei einer Fungizid-Steuer in Höhe von 25 % liegt die relative Rentabilität gegenüber Barke bei 24 €/ha (Abbildung 19). Da die Auswirkungen auf die Gewinn- bzw. Verlustwahrscheinlichkeiten marginal sind, wird an dieser Stelle auf eine gesonderte grafische Darstellung der relativen und kumulierten Häufigkeit verzichtet.

Abbildung 20: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie S42IL-122 im Vergleich mit Scarlett bei einer Fungizid-Steuer von 25 %



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

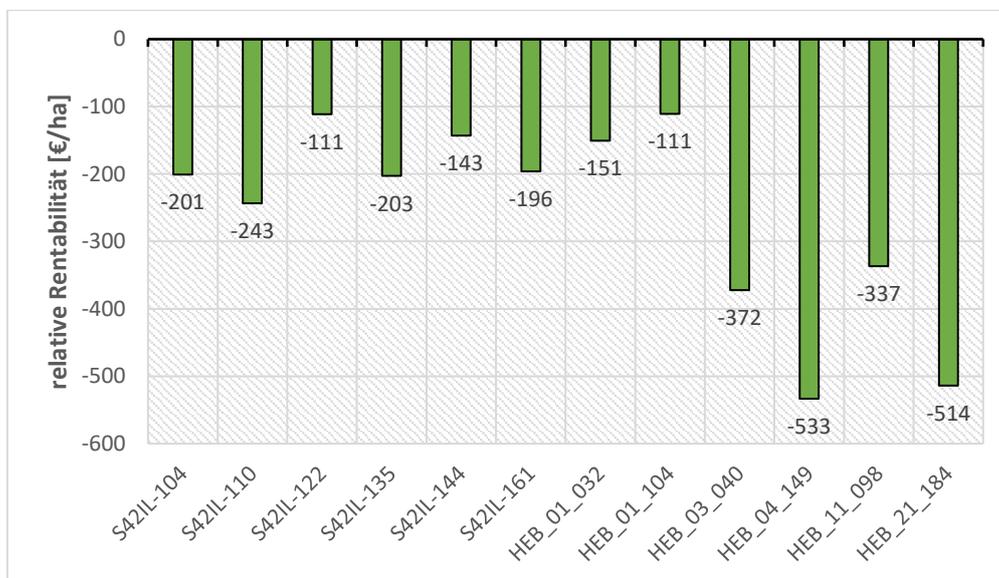
4.4.2 Vergleich mit der Elitesorte Quench

Entsprechend der in der Pflanzenzüchtung gängigen Praxis wurden bislang Vergleiche zwischen den Züchtungsnachkommen (Introgressionslinien) und den Kultureltern (Scarlett bzw. Barke) vorgenommen. Im Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertung der Populationen S42 und HEB-25 sind jedoch auch Rentabilitätsvergleiche mit modernen Elitesorten von ökonomischem Interesse.

Das monetäre Leistungsniveau aktueller Elitesorten (Quench und Planet) kann durch die Introgressionslinien bislang nicht erreicht werden. Alle drei betrachteten Szenarien ergaben eine deutliche Überlegenheit der Elitesorten gegenüber den getesteten Introgressionslinien. Zwar zeigen sich unter extensiven Anbaubedingungen ohne Fungizid-Einsatz ähnliche Effekte wie bei den Kultureltern (geringerer Ertragsabfall der Introgressionslinien), jedoch reichen die Kosteneinsparungseffekte nicht zur Kompensation negativer Ertragseffekte aus. Aufgrund der großen Leistungsdifferenz zwischen Introgressionslinien und Elitesorten wird an dieser Stelle auf die grafische Darstellung aller drei Szenarien verzichtet. Im Folgenden werden lediglich die Simulationsergebnisse des Szenarios mit der aus Perspektive der Introgressionslinien höchsten Erfolgsaussicht präsentiert (Szenario 3: Steuer auf Fungizide).

Im Wirtschaftlichkeitsvergleich in Abbildung 21 ist die relative Rentabilität der Introgressionslinien aus den beiden Populationen S42 und HEB-25 in der Gegenüberstellung mit der Sorte Quench dargestellt. Auch unter der für die Introgressionslinien begünstigenden Annahme einer Fungizid-Steuer (25 %) kann ein gewinnbringender Effekt durch keine der untersuchten Linien erzielt werden. Die monetären Verluste gegenüber Quench sind sehr deutlich und liegen für die beiden besten Linien (S42IL-122 und HEB_01_104) bei jeweils 111 €/ha.

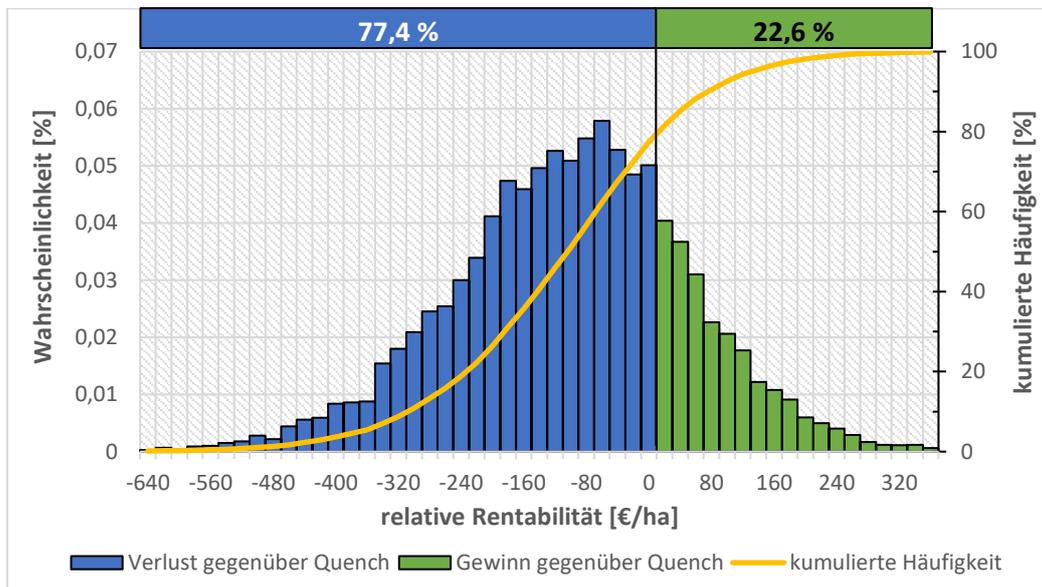
Abbildung 21: Rentabilität der Introgressionslinien im Vergleich mit Quench bei einer Fungizid-Steuer von 25 %



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Linie S42IL-122 im Vergleich zu der Elitesorte Quench im Anbau ein monetäres Defizit erwirtschaftet, liegt bei über 77 % (Abbildung 22). Sowohl bei einem Standardszenario als auch einem Vergleich mit der Sorte Planet ist die Verlustwahrscheinlichkeit noch deutlich höher.

Abbildung 22: Relative und kumulierte Häufigkeit monetärer Effekte der Linie S421L-122 im Vergleich mit Quench bei einer Fungizid-Steuer von 25 %



Quelle: Eigene Darstellung (2018).

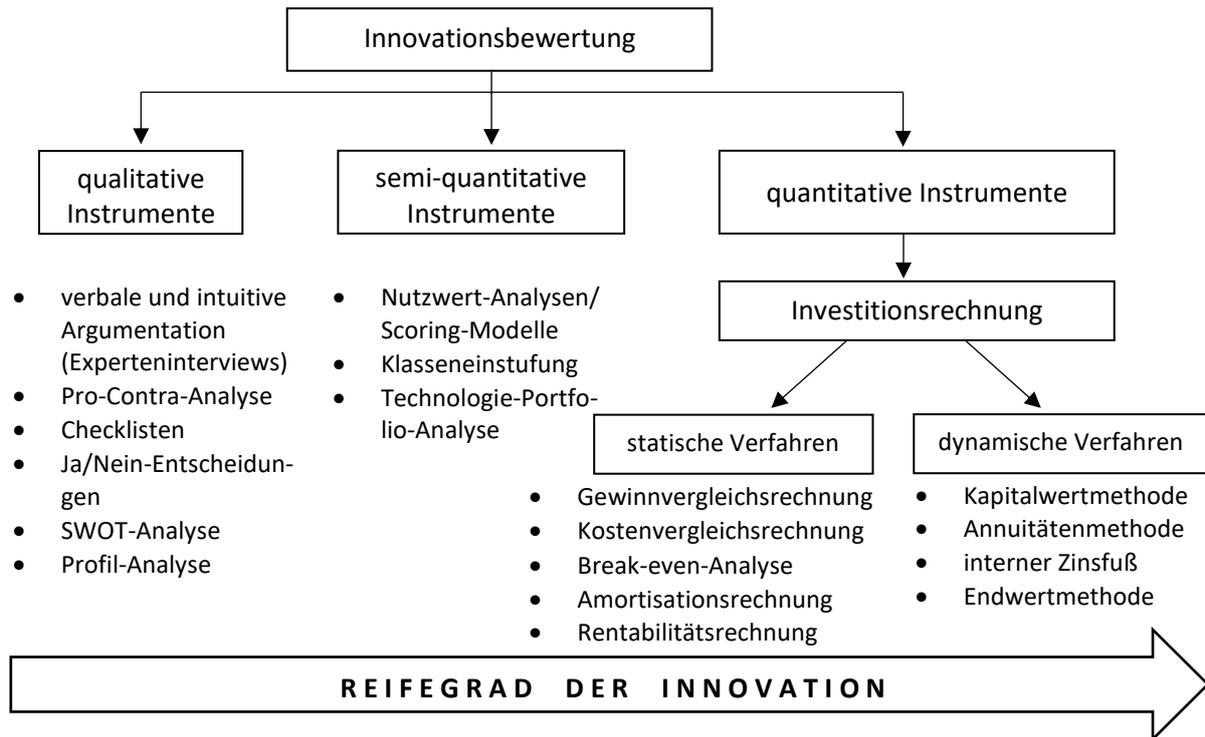
Teil B: Anwenderorientierte Bewertung einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung im Züchtungswesen

5 Material und Methoden zur Evaluierung der hyperspektralen Phänotypisierung

5.1 Methodenüberblick zur Innovationsbewertung von Technologien

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Bewertungsmethoden für Innovationen und Produktideen. Abbildung 23 vermittelt eine allgemeine Klassifizierung ausgewählter Bewertungsverfahren für Projekte aus Forschung und Entwicklung (F&E). Grundsätzlich kann zwischen qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Verfahren differenziert werden, wobei der betriebswirtschaftliche Aussagegehalt der letztgenannten Kategorie am höchsten einzustufen ist (z. B. ABELE 2010). Qualitative Verfahren beruhen auf einer intuitiven Beurteilung und sind dadurch charakterisiert, dass der Grad der Zielerreichung nicht objektiv messbar ist. Dadurch lassen sich zielrelevante Eigenschaften ermitteln, einschließlich diejenigen, die nicht monetär erfassbar sind. Jedoch können subjektive Einflüsse einen verzerrenden Einfluss ausüben. Semi-quantitative Instrumente ermöglichen durch die Verwendung quantitativer Hilfsgrößen eine Erweiterung qualitativer Aussagen. Durch die Übertragung subjektiver Einschätzungen in rechenbare Zahlenwerte erfolgt beispielsweise in Scoring-Modellen eine numerische Bewertung. Dabei können durchaus monetäre Größen einfließen. Quantitative Methoden ermöglichen auf der Basis prognostizierter Ein- und Auszahlungsströme eine finanzwirtschaftliche Bewertung von technologischen Innovationen. In Abhängigkeit davon, ob Zeitpunkte der Zahlungsströme berücksichtigt werden, lassen sich statisch-kalkulatorische und dynamische Bewertungsverfahren unterscheiden.

Abbildung 23: Kategorisierung verschiedener Bewertungsmethoden neuer Technologien aus Forschung und Entwicklung



Quelle: Eigene Darstellung (2018) nach HEESEN (2009: 107).

Zudem wird aus Abbildung 23 deutlich, dass die Wahl der Bewertungsmethode maßgeblich mit dem Reifegrad der zu bewertenden Innovation korreliert. Betriebswirtschaftlich angestrebte quantitative Kennziffern liefern verlässliche monetäre Daten zur unternehmerischen Entscheidungsunterstützung, benötigen jedoch ein großes Maß an Datensicherheit, insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Zahlungsströme und -zeitpunkte. Solange kein verlässliches Zahlenmaterial zur Verfügung steht und Kosten sowie Nutzen nicht monetär bewertet werden können, kann der Grad der Zielerreichung nicht in quantitativer Form gemessen werden und qualitative bzw. semi-quantitative Bewertungsinstrumente sind heranzuziehen.

5.2 Forschungsmethodische Abgrenzung

5.2.1 Begründung der qualitativen Forschungsmethode

Qualitative Instrumente sind die Basis einer frühzeitigen technologischen Bewertung, da der Output zu Beginn des Entwicklungsprozesses neuer Technologien zumeist nicht in ökonomisch quantifizierbarer Form vorliegt. Dies gilt spezifisch auch für das relevante Forschungsobjekt der Hyperspektralanalyse, da die technologische Anwendung in der Pflanzenzüchtung noch am Anfang steht. Gegenwärtig beschränkt sich die züchterische Nutzung dieser Technologie ausschließlich auf die Wissenschaft, sodass betriebswirtschaftliche Kennziffern für die Nutzung quantitativer Bewertungsverfahren nicht verfügbar sind. Folglich stehen für die Bewertung der hyperspektralbasierten Phänotypisierung methodisch lediglich qualitative Instrumente zur Auswahl. Da das vom BMBF geförderte Projekt BARLEY BIO-DIVERSITY langfristig auf praxistaugliche Entwicklungen abzielt, erscheint es zielführend, potenzielle Anwender in den Bewertungsprozess der Technologie einzubeziehen. Die beiderseitige Rückkopplung

zwischen Entwicklung und potenziellen Anwendern ist ein wichtiger Bestandteil technologischer Entwicklungsprozesse, sodass zur Beantwortung der Forschungsfragen (II a bis II d) im Rahmen dieser Arbeit eine qualitative Akzeptanzanalyse mittels Experteninterviews unter potenziellen Nutzern der Hyperspektralanalyse durchgeführt wird. Die Integration und aktive Mitgestaltung möglicher Anwender dient nicht nur zur Einschätzung zukünftiger Erfolgsprognosen, sondern offenbart durch die Identifizierung von Investitionshemmnissen (Risiken) frühzeitig Optimierungsbedarf, sodass zielgerichtete Maßnahmen zur Weiterentwicklung des bestehenden Innovationskonzeptes abgeleitet werden können.

5.2.2 Theoretischer Exkurs zum qualitativen Experteninterview

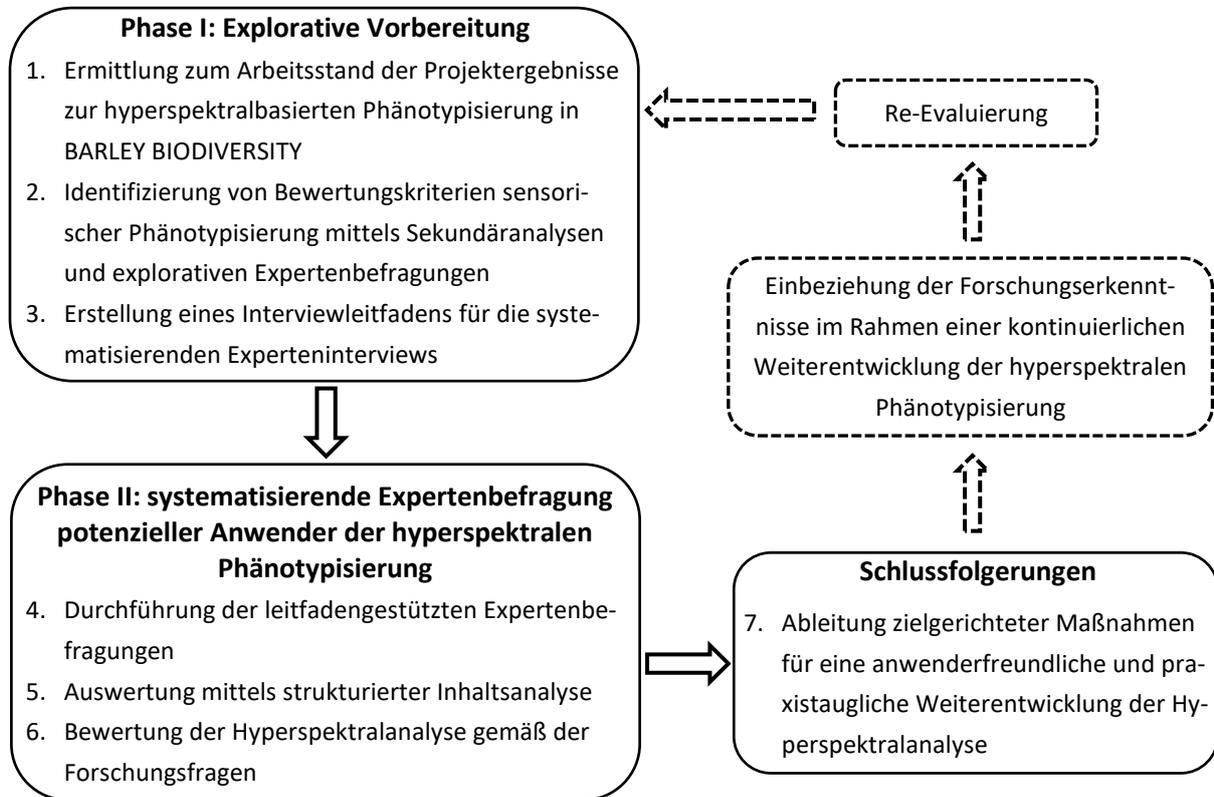
Experteninterviews eignen sich zu einem frühen Evaluierungszeitpunkt besonders, um „Meinungen, Werte, Einstellungen, Erlebnisse, subjektive Bedeutungszuschreibungen und Wissen zu erfragen“ (REINDERS 2005: 97). Wittkowski definiert ein Interview als eine zweckbestimmte sprachliche Interaktion zwischen mindestens zwei Personen, die durch den Interviewer auf bestimmte relevante Inhalte gelenkt wird und das Ziel verfolgt, spezifische subjektive oder objektive Informationen zu erlangen (WITTKOWSKI 1994: 26). Nach MEUSER und NAGEL (1991: 443) ist ein Experte „[...] wer in irgendeiner Weise Verantwortung trägt für den Entwurf, die Implementierung oder die Kontrolle einer Problemlösung oder wer über einen privilegierten Zugang zu Informationen über Personengruppen oder Entscheidungsprozesse verfügt“. BOGNER und MENZ (2002: 36ff.) differenzieren in Abhängigkeit der erkenntnisleitenden Funktion zwischen explorativen, systematisierenden und theoriegenerierenden Experteninterviews. Da im weiteren Forschungsverlauf auf zwei dieser genannten Arten der Experteninterviews zurückgegriffen wird, erscheint eine kurze methodische Beschreibung angemessen:

- a) Das **explorative Experteninterview** kann insbesondere zu Beginn eines Forschungsprozesses zu einem verbesserten Problembewusstsein beitragen. Daher dienen explorative Expertengespräche oft als Vorlauf für eine weitergehende Befragung und die Erstellung eines Leitfadens. Ein wesentlicher Unterschied im Vergleich zu anderen Formen des Experteninterviews liegt darin, dass während der Exploration kein Anspruch „auf Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Standardisierbarkeit der Daten“ besteht (BOGNER und MENZ 2002: 37).
- b) Das **systematisierende Experteninterview** zielt auf eine systematische Informationsgewinnung ab. „Im Vordergrund steht hier das aus der Praxis gewonnene, reflexiv verfügbare und spontan kommunizierbare Handlungs- und Erfahrungswissen“ (BOGNER und MENZ 2002: 37). Im Gegensatz zum explorativen Interview muss der Forscher bei diesem Interviewtyp im Vorfeld wissen, welche spezifischen Informationen im Rahmen des Expertengesprächs abgefragt werden sollen. In diesem Kontext kann ein Interviewleitfaden als Orientierungshilfe gewährleisten, dass alle wesentlichen Aspekte der Forschungsfragen Berücksichtigung finden und bei den geführten Interviews vergleichbare Informationen erhoben werden (BORTZ und DÖRING 1995: 289). Der Interviewleitfaden „schneidet die interessierenden Themen aus dem Horizont möglicher Gesprächsthemen [...] heraus und dient dazu, das Interview auf diese Themen zu fokussieren“ (MEUSER und NAGEL 1991: 453).

5.3 Forschungsdesign

Die im Rahmen der Akzeptanzanalyse vorzunehmende Innovationsbewertung der hyperspektralen Phänotypisierung gliedert sich in einen logisch aufeinander aufbauenden zweiphasigen Forschungsprozess (Abbildung 24).

Abbildung 24: Ablaufschema der Akzeptanzanalyse



Quelle: Eigene Darstellung (2017).

Die Vorbereitungsphase hat in Anlehnung an die im Punkt 5.2.2 erläuterte Klassifizierung der Experteninterviews zunächst eine explorative bzw. sondierende Funktion und dient als wesentliche Grundlage für die daran anschließende Phase der systematisierenden Expertenbefragung potenzieller Nutzer. Entsprechend der Zielsetzung gilt es, aus den gewonnenen Erkenntnissen konkrete Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen abzuleiten, die als Basis für die Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse genutzt werden können. Die in Abbildung 24 als gestrichelte Linie gekennzeichnete Phase der Re-Evaluierung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, symbolisiert jedoch die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Rückkopplung zwischen Entwicklung und Praxis.

Im Folgenden werden wesentliche Aspekte der beiden Forschungsphasen erläutert und einige charakteristische Eckdaten zu den Befragungen angeführt. Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Erstellung eines Interviewleitfadens.

5.3.1 Phase I: Explorative Vorbereitung

Im Rahmen der initiierenden Vorbereitungsphase wurden zunächst explorative Expertenbefragungen mit den Projektpartnern der MLU Halle-Wittenberg und dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) Magdeburg durchgeführt, um wichtige Grundlagen für die Akzeptanzanalyse

unter potenziellen Anwendern der hyperspektralbasierten Phänotypisierung zu erarbeiten. Zur Erstellung eines geeigneten Interviewleitfadens war in diesem Kontext die Identifizierung wesentlicher Bewertungskriterien ein maßgeblicher Arbeitsschwerpunkt. Da diese Kriterien nach präzisen wissenschaftlichen Maßstäben nur auf der Grundlage valider Forschungsergebnisse festgesetzt werden konnten, war ein gewisser zeitlicher Vorlauf der am Teilprojekt „Hochdurchsatz-Phänotypisierung“ beteiligten Arbeitsgruppen elementar. In diesem Zusammenhang führten technisch bedingte Verzögerungen in BARLEY BIODIVERSITY dazu, dass für die Interviews lediglich die Forschungsergebnisse aus dem Jahr 2016 als Bewertungsgrundlage berücksichtigt werden konnten.

Folgende Teilziele sollten durch die explorative Vorbereitung der Phase I erreicht werden:

- Erlangung eines Grundverständnisses des Verfassers der vorliegenden Arbeit über das technologische Konzept der Hyperspektralanalyse:
 - Einholung statistischer Maße für die Leistungsfähigkeit der hyperspektralen Prädiktion
 - Kenntniserlangung über den Entwicklungsstand sowie die Arbeits- und Funktionsweise der Hyperspektralanalyse
- Schaffung der Grundlage für die Phase II des Forschungsprozesses:
 - Eruierung forschungsleitender Indikatoren für die Erstellung des Interviewleitfadens zur Expertenbefragung
 - Bildung eines Ordnungssystems für die inhaltliche Struktur des Interviewleitfadens (Themenblöcke, Hauptkategorien, Leitfragen, Unterfragen; vgl. Anhang 6 und Unterpunkt 5.3.1.2)
 - Erarbeitung von Fach- und Hintergrundwissen des Autors als Voraussetzung für eine qualifizierte Gesprächsführung bei den systematisierenden Experteninterviews

5.3.1.1 Entwicklung des Interviewleitfadens

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse aus den explorativen Experteninterviews wurde ein Interviewleitfaden erstellt. Die Konzipierung erfolgte nach dem SPSS-Prinzip von HELFFERICH (2009: 181): „So offen und flexibel wie möglich [...] - so strukturiert wie aufgrund des Forschungsinteresses notwendig“. Die Abkürzung SPSS steht für die vier aufeinanderfolgenden methodischen Arbeitsschritte: **Sammeln**, **Prüfen**, **Sortieren** und **Subsumieren** (HELFFERICH 2009: 182ff.).

In einem ersten Arbeitsschritt wurden alle Fragen gesammelt, die im Zusammenhang mit der Hyperspektralanalyse und deren Bewertung durch potenzielle Anwender relevant erschienen. Da etliche Fragestellungen daraus resultierten, dass der Autor nicht direkt in die technische Entwicklung und die Testphase der Hyperspektralanalyse eingebunden war, konnte ein wesentlicher Teil dieser Fragestellungen im Rahmen der explorativen Experteninterviews (Phase I) beantwortet werden. Einige relevante technische Aspekte werden im Kapitel 6 thematisiert. Aufgrund des erlangten Fach- und Hintergrundwissens konnten diese Fragen im zweiten Arbeitsschritt „Prüfen“ aussortiert werden. Die Anforderungen des SPSS-Prinzips beinhalten an dieser Stelle eine Überprüfung der Fragen hinsichtlich ihrer Eignung, sodass beispielsweise Faktenfragen eliminiert werden mussten. Um während des Interviews eine sachlogische Struktur wahren zu können, wurden die verbliebenen Fragen entsprechend des gewählten Prinzips im dritten Arbeitsschritt thematisch sortiert und deduktiv kategorisiert (vgl. Unterpunkt 5.3.1.2). Im vierten Schritt der SPSS-Leitfadenerstellung galt es, für jede Kategorie eine möglichst

einfache Erzählaufforderung zu finden, unter die die Einzelaspekte untergeordnet (subsumiert) werden konnten. Um möglichen Verständnisproblemen oder Erzählschwierigkeiten seitens der Befragten in angemessener Weise begegnen zu können, wurden bei der Konzeption des Leitfadens zusätzlich Unterfragen formuliert, die als Impuls für weitere Ausführungen dienten. Somit war gewährleistet, dass alle relevanten Fragestellungen im Laufe des Gespräches berücksichtigt werden konnten. Der vollständige Interviewleitfaden ist als Anhang 6 beigefügt.

5.3.1.2 Leitfadenstruktur

Zur Gewährleistung einer im Sinne des Forschungsinteresses logischen Interviewstruktur gliedert sich der Leitfaden in drei inhaltlich zusammenhängende Themenblöcke:

- I) Allgemeine Aspekte zum gegenwärtigen Entwicklungsstand sensorischer Phänotypisierung in der Züchtung
- II) Nutzungspotenziale einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung
- III) Methodische und technologische Aspekte zur praktischen Anwendung der Hyperspektralanalyse in der Pflanzenzüchtung

Die Themenblöcke des Leitfadens orientieren sich stark an den Forschungsfragen (vgl. Abschnitt 1.2). Jeder Themenblock enthält bis zu drei Hauptkategorien, die jeweils auf eine spezifische Leitfrage ausgerichtet sind. Darüber hinaus ist jede Leitfrage mit zielgerichteten Unterfragen strukturiert, die weitere inhaltlich relevante Aspekte des jeweiligen Themenbereiches abdecken und einen wesentlichen Beitrag zur Beantwortung der forschungsleitenden Hauptkategorie leisten (vgl. Anhang 6).

Im ersten Themenblock werden zunächst allgemeine Aspekte bezüglich sensorischer Phänotypisierung angesprochen. Durch Expertenaussagen sollen sowohl Argumente für sensorische Substitutionstechnologien in der Pflanzenzüchtung als auch gegenwärtig bestehende Herausforderungen bei der Implementierung von Sensoren in die Züchtungspraxis dargelegt werden. Dies bietet die Option zur Ableitung anwenderspezifischer Voraussetzungen für den Praxisbetrieb einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung. Zudem können die Stärken der Hyperspektralanalyse im Vergleich mit anderen Sensoren zur phänotypischen Informationsgewinnung identifiziert werden (vgl. Forschungsfrage II a).

Entsprechend der zweiten Forschungsfrage (II b) fokussiert sich der zweite Themenblock auf die Erfassung von praxisrelevanten Nutzungspotenzialen der Hyperspektralanalyse. Auf der Basis dieser von Experten bekundeten Anwendungsmöglichkeiten wird der Versuch einer frühzeitigen Abschätzung monetärer Effekte unternommen (vgl. Forschungsfrage II c). Anliegen ist es, die Nutzungspotenziale der Hyperspektralanalyse weitgehend entkoppelt von den erzielten Projektergebnissen aus BARLEY BIODIVERSITY zu erfassen. Das bedeutet, dass züchterische Anwendungsoptionen unabhängig vom derzeitigen Leistungs- und Entwicklungsstand der Hyperspektralanalyse erfasst werden sollen. Diese Vorgehensweise begründet sich dadurch, dass zum Bewertungszeitpunkt der durchgeführten Explorationen lediglich Zwischenergebnisse der Vorhersagegenauigkeit einzelner Züchtungsparameter einfließen konnten.

Ein direkter Bezug zu den Projektergebnissen aus BARLEY BIODIVERSITY wird im dritten Themenblock hergestellt. Durch die Befragung potenzieller Anwender sollen der gegenwärtige technologische Entwicklungsstand der Hyperspektralanalyse und wichtige Bestimmungsfaktoren für den avisierten Pra-

xiseinsatz dieser Technologie erfasst werden. Ganz bewusst thematisiert der Leitfaden in diesem Zusammenhang auch kritische Aspekte zur Hyperspektralanalyse. Die Ergebnisse dieses Themenblockes sollen dazu beitragen, Handlungsempfehlungen für eine praxistaugliche Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse abzuleiten (vgl. Forschungsfrage II d).

5.3.2 Phase II: systematisierende Expertenbefragung potenzieller Anwender der hyperspektralen Phänotypisierung

5.3.2.1 Vorgehensweise bei der Planung und Durchführung der leitfadengestützten Interviews

Als relevante Personengruppen für die Experteninterviews wurden sowohl praktische Pflanzenzüchter als auch akademische Nutzer der Hyperspektralanalyse bestimmt, wobei stets ein Bezug zur Pflanzenzüchtung bzw. Landwirtschaft vorhanden sein musste. Zunächst wurden durch Prof. Dr. Klaus Pillen, Koordinator des IPAS-Projektes BARLEY BIODIVERSITY, einige gezielte Kontakte zu Experten hergestellt. Da sowohl Pflanzenzüchter als auch akademische Nutzer der Hyperspektralanalyse teilweise in Kooperationen miteinander stehen, konnten im Rahmen der geführten Interviews weitere Kontaktpersonen akquiriert werden.

Die persönliche Kontaktaufnahme wurde per E-Mail hergestellt mit gleichzeitiger Information über wesentliche Forschungsziele und Projekthintergründe von BARLEY BIODIVERSITY. Bei entsprechender Gesprächsbereitschaft erfolgte eine Terminvereinbarung. Im Zeitraum vom 23. Februar 2018 bis 25. September 2018 wurden insgesamt 20 Personen aus 14 Institutionen befragt, wobei die zeitliche Dauer der Interviews zwischen jeweils 1 bis 1,5 Stunden in Anspruch nahm. Eine vollständige Liste der interviewten Experten findet sich im Anhang 5. Mit einer Ausnahme (ein Interview erfolgte auf Wunsch des Experten telefonisch) wurden die Befragungen mündlich und persönlich auf dem jeweiligen Betriebsgelände der Interviewten durchgeführt.

Im Rahmen des Gesprächseinstiegs wurden vom Interviewer relevante Hintergrundinformationen zur Hyperspektralanalyse und dem IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY in einer Kurzpräsentation (PowerPoint) vorgestellt. Dies beinhaltete die Vorstellung projektinterner Zwischenergebnisse zur statistischen Prädiktionsgüte der Hyperspektralanalyse. Diese Vorgehensweise gewährleistete im Vorfeld der Befragungen einen einheitlichen Kenntnisstand und stellte die Grundlage der Experteneinschätzungen dar. Für ein grundsätzliches Verständnis sind diese Informationen zum Forschungsobjekt der Hyperspektralanalyse im Kapitel 6 integriert. Entsprechend des Leitfadens wurden als Einstieg in das Interview zunächst allgemeine Entwicklungen im Bereich sensorischer Phänotypisierung thematisiert (Themenblock I). Da die Züchter mit diesen Entwicklungen sehr gut vertraut sind, erweist sich diese Vorgehensweise als guter Gesprächseinstieg. Mit fortschreitender Dauer fokussierten sich die Fragen zunehmend auf die Hyperspektralanalyse (Themenblöcke II und III). Als Datengrundlage für die Auswertung der Experteninterviews wurden die wesentlichsten Gesprächsaussagen protokollartig notiert.

5.3.2.2 Methodik der Datenauswertung

Die Auswertung des sprachlichen Datenmaterials aus den leitfadengestützten Experteninterviews erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach MAYRING (2015, 2016). Dieser Ansatz zur Bearbeitung großer Datenmengen besteht darin, „Texte systematisch [zu] analysieren, indem [...] das Material

schrittweise mit theoriegeleitet am Material entwickelten Kategoriensystemen bearbeitet“ wird (MAYRING 2016: 114). Im Mittelpunkt steht die Identifizierung von thematischen Kategorien und Subthemen sowie deren Systematisierung und Analyse wechselseitiger Zusammenhänge. Für die Erstellung eines geeigneten Kategoriensystems stehen nach MAYRING (2015: 52) drei verschiedene Interpretationstechniken zur Verfügung: Explikation, Strukturierung und Zusammenfassung. Grundlage für die Auswertung des Datenmaterials der Experteninterviews war eine Methodenkombination der Interpretationstechniken Strukturierung und Zusammenfassung.

Die deduktive Bildung themenspezifischer Hauptkategorien erfolgte bereits bei der Erstellung des Interviewleitfadens und spiegelt sich an der Struktur des Interviewleitfadens wider (vgl. Unterpunkt 5.3.1.2). In Erweiterung dieses deduktiven Ordnungssystems galt es, das sprachliche Datenmaterial der Experteninterviews durch die induktive Bildung von Subkategorien inhaltlich weiter zu strukturieren. Dadurch ergibt sich für die Datenauswertung eine sachlogische Gliederung von Themenblock, Haupt- und Subkategorien. Durch die Analysetechnik der Zusammenfassung konnten die vorliegenden Gesprächsprotokolle systematisch gekürzt und auf wesentliche Inhalte reduziert werden. Entsprechend der methodischen Empfehlungen von MAYRING (2015: 70ff.) erfolgte dieser Prozess mittels: a) Paraphrasierung (Streichen aller wenig inhaltstragenden Aussagen, Herstellen der einheitlichen Sprachebene), b) Generalisierung (Bringen von Aussagen auf die definierte Abstraktionsebene), c) erste Reduktion (Selektion zentraler Inhalte) und d) zweite Reduktion (Konstruktion und Integration gleicher oder ähnlicher Aussagen als Zusammenfassung). Durch diese qualitative Inhaltsanalyse entstand ein thematisch abgeleitetes Kategorienraster, das eine sachlogische Gliederung gemäß des Forschungsinteresses enthält. Das aus der explorativen Phase I entwickelte Kategoriensystem wurde somit durch die Vorgehensweise der qualitativen Inhaltsanalyse anhand des sprachlichen Datenmaterials aus den Experteninterviews gefestigt und weiterentwickelt. Durch diese Datenauswertung und die entsprechende Gliederungsstruktur können den Lesenden wesentliche Kernaussagen der befragten Experten in übersichtlicher Form präsentiert werden.

6 Vorstellung des Forschungsobjektes – hyperspektrale Phänotypisierung

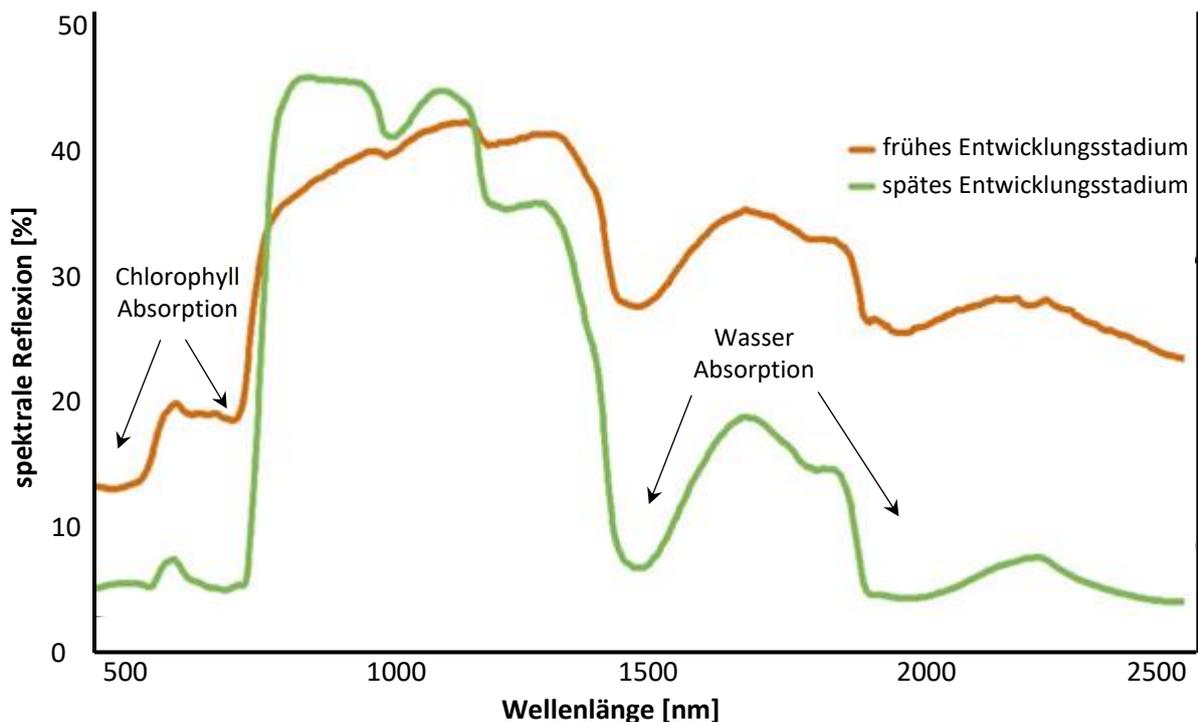
Dieses Kapitel dient zur Erlangung eines grundsätzlichen Verständnisses über die hyperspektrale Phänotypisierung im Projekt BARLEY BIODIVERSITY, wobei keine umfassende Erklärung technischer Details angestrebt wird. Vielmehr soll diese Kurzcharakterisierung dazu beitragen, nachfolgende Aspekte der Bewertung durch Expertenaussagen besser erfassen zu können. Der Abschnitt 6.2 orientiert sich inhaltlich an die im Rahmen des Intervieweinstieges den Experten vermittelten Kurzinformationen.

6.1 Kurzer wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen zur Spektralanalyse in der Pflanzenzüchtung

Oberflächen verhalten sich gegenüber elektromagnetischer Strahlung sehr unterschiedlich und können aufgrund von Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften gegeneinander abgegrenzt werden, da der Anteil reflektierter Strahlung „objektspezifisch und für das gleiche Objekt standsspezifisch“ ist (HILDEBRANDT 1996: 30). Dabei sind die Wechselwirkungen zwischen dem Objekt und der einfallenden Strahlung abhängig von dem Wellenlängenbereich des Lichtes. Die Reflexions-

Charakteristik verschiedener Oberflächen und Materialien lässt sich anhand der sog. spektralen Signatur erfassen. Dabei wird der Reflexionsgrad üblicherweise grafisch als Funktion der Wellenlänge dargestellt. Auch Pflanzen reagieren unterschiedlich auf elektromagnetische Strahlung und in Abhängigkeit der morphologischen und physiologischen Eigenschaften (z. B. chemische Verbindungen, Pigmente, Wassergehalt) ergibt sich eine charakteristische spektrale Signatur, die exemplarisch in Abbildung 25 dargestellt ist.

Abbildung 25: Charakteristisches Reflexionsmuster der Vegetation unter Berücksichtigung von Wachstums- und Alterungsprozessen



Quelle: Nach GEOCLDIAN (2016: s. p.).

Die Lichtenergie im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes wird hauptsächlich zur Fotosynthese genutzt und von den in den Chloroplasten enthaltenen Blattpigmenten (Chlorophyll a und b, Carotinoide und Xanthophyll) absorbiert. Die Fotorezeptoren dieser Blattpigmente werden insbesondere durch die Absorption von blauer und roter Strahlung angeregt, sodass das Absorptionsmaximum bei 430 nm (blaues Licht) und 660 nm (rotes Licht) erreicht wird; hingegen entsteht im grünen Wellenlängenbereich ein relatives Absorptionsminimum (SCHILLING 2000: 50). Vitalitätsunterschiede und eine verringerte fotosynthetische Aktivität der Pflanzen lassen sich im sichtbaren Spektralbereich dadurch feststellen, dass der reflexionsbedingte Peak bei 550 nm infolge eines verringerten Anteils an Chlorophyll reduziert ist. Die elektromagnetische Strahlung wird im Nahinfrarotbereich (ab 780 nm) fotosynthetisch nicht mehr genutzt. Das bedingt einen starken Anstieg der Reflexion gegen Ende des sichtbaren Wellenlängenbereiches. Für dieses charakteristische spektrale Merkmal der Vegetation hat sich die Bezeichnung „Red Edge“ etabliert (GUYOT et al. 1988). Die Parametrisierung des Reflexionsanstiegs erfolgt in der Regel über die Bestimmung des Wendepunktes. In Abhängigkeit von dem Entwicklungsstadium, dem Chlorophyllgehalt und der Blattfläche verschiebt sich der Wendepunkt im Reflexionsmuster (z. B. HORLER et al. 1983). Dieser Wellenlängenbereich ist für die Bestimmung zahlreicher Vegetations- und Biomasseindizes relevant (z. B. REIP - red edge inflection point). Die verstärkte Reflexion bis 1300

nm wird insbesondere durch die Zell- und Gewebestruktur der Blattorgane beeinflusst (BACH 1995: 120). Im Bereich von 1300 bis 2500 nm dominiert wiederum die Absorption. Der weitere spektrale Verlauf zeigt charakteristische Peaks bei ca. 1450, 1940 und 2500 nm, die maßgeblich durch den Wassergehalt der Pflanze beeinflusst werden (LILIENTHAL 2003: 19).

Abbildung 25 dokumentiert darüber hinaus, welchen Einfluss das pflanzliche Entwicklungsstadium auf die Reflexionseigenschaften ausübt. Die spektrale Signatur reagiert hochsensibel auf biologische und chemische Veränderungen, sodass nicht nur pflanzenphysiologische Parameter indirekt durch Änderungen im Spektrum sichtbar werden, sondern jede Form von Veränderungen Einfluss auf das Reflexionsspektrum ausübt. So stellen auch Parameter, wie z. B. Blattstellung und -größe sowie die Aufnahmebedingungen (z. B. Feuchtigkeit, Beleuchtung), maßgebliche Einflussfaktoren dar und äußern sich in der Regel in Mischsignaturen. Die Zerlegung des gesamten Wellenlängenbereiches in viele einzelne Kanäle liefert eine komplexe Datengrundlage. Die Herausforderung liegt darin, diesen spektralen Fingerabdruck mit Hilfe mathematischer Modelle auszuwerten und eine Beziehung zwischen spektralem Messergebnis und der eigentlichen Zielvariable herzustellen, um Aussagen über phänotypische Merkmale ableiten zu können. Aufgrund der genannten Einflussfaktoren auf die Reflexionseigenschaften der Pflanzen eignen sich vor allem Methoden des Maschinellen Lernens zur Interpretation spektraler Signaturen (BREIMAN 2001). Ein Überblick über mögliche mathematische Algorithmen wird von BEHMANN et al. (2015) gegeben. Die Analyse der hochdimensionalen und komplexen Spektraldaten bietet die Option, Pflanzenbestände und deren zeitliche Entwicklung während der gesamten Wachstumsphase zu erfassen. Beispielsweise konnte nachgewiesen werden, dass sich die spektrale Signatur durch pathogenen Einfluss im Zeitverlauf ändert, sodass verschiedene Pflanzenkrankheiten auf Basis hyperspektraler Aufnahmen detektiert werden können (z. B. KUSKA et al. 2015; THOMAS et al. 2018).

6.2 Umsetzung der hyperspektralen Phänotypisierung im IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY

6.2.1 Entwicklung eines feldtauglichen Trägersystems

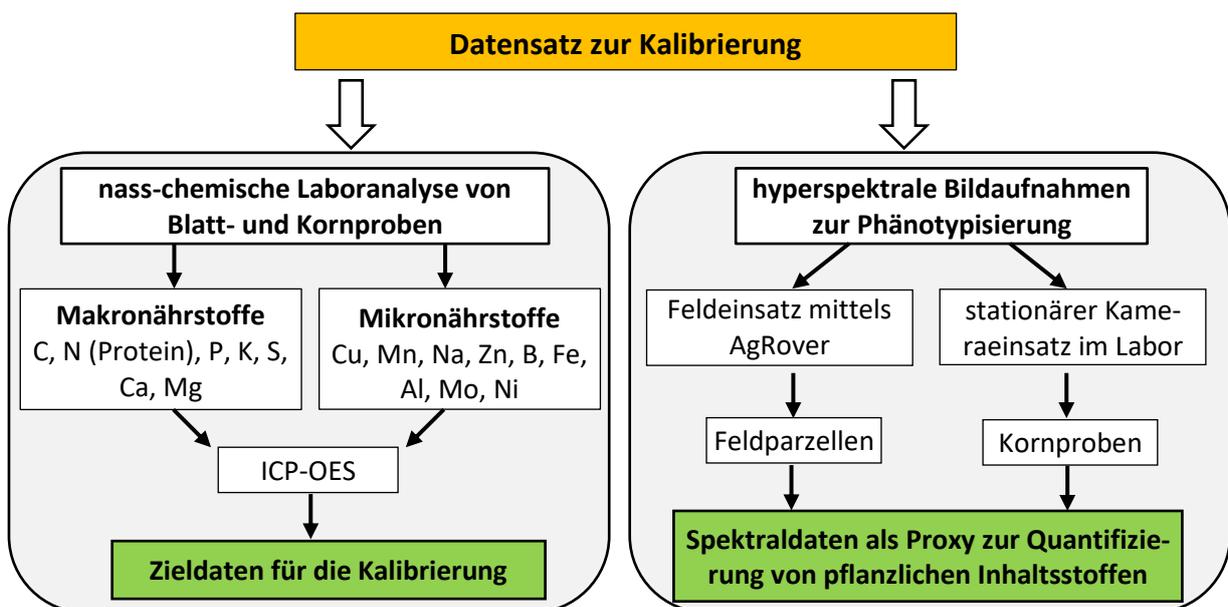
Für die Evaluierung und Kalibrierung der hyperspektralen Phänotypisierung unter praktischen Versuchsbedingungen im Freiland wurde vom Fraunhofer IFF Magdeburg ein Trägerfahrzeug (AgRover) entwickelt (Anhang 4). Dabei galt es, ein ebenso feldtaugliches wie flexibles System zu konzipieren, um einen effizienten Transport zu den Versuchsstandorten zu gewährleisten. Kernstück des Systems ist eine zeilenbasierte Hyperspektralkamera mit 288 Kanälen, einer Auflösung von 384 Pixel und einer Bildaufnahme Frequenz von 400 Hz. Dadurch können Aufnahmen im Wellenlängenbereich von 1000 bis 2500 nm bei einer Abtastrate von 5,5 nm realisiert werden. Zur Gewährleistung einer bestmöglichen Messung der Testparzellen befindet sich die Hyperspektralkamera an einem um 360° schwenkbaren und höhenverstellbaren Teleskopkran. Um den Witterungseinfluss (Intensität der Sonnenstrahlung bzw. Grad der Bewölkung) bei der Datenerfassung zu minimieren, wurde das System als aktiver Sensor konzipiert: Durch die Verfügbarkeit einer eigenen Strahlungsquelle, die unabhängig von der Sonneneinstrahlung konstante Lichtverhältnisse schafft, soll das System tageszeitunabhängig arbeiten können. Da es unter dem Aspekt der Effizienz bedeutsam ist, nicht nur Pflanzeninhaltsstoffe, sondern möglichst viele weitere Wachstumsparameter in einer Überfahrt zu analysieren, wurde zusätzlich eine Time-of-Flight-Kamera (TOF-Kamera) installiert, die eine Modellierung der Pflanzhöhe ermöglicht.

6.2.2 Datenerhebung und -modellierung

Die Modellierung der Zielvariablen erfolgt durch den Projektpartner vom Fraunhofer IFF Magdeburg und basiert auf dem Prinzip des Maschinellen Lernens. Ziel dieses Verfahrens besteht vereinfacht ausgedrückt darin, Aspekte menschlicher Lernfähigkeit durch intelligente, computergestützte Algorithmen zu übernehmen (z. B. VILLMANN et al. 2013; BACKHAUS und SEIFFERT 2014). Grundlage sind Trainingsdaten, aus denen das Modell zugrunde liegende Gesetzmäßigkeiten zwischen Zielvariable und Proxy erlernen kann, um dieses Erfahrungswissen anschließend auch auf unbekannte Untersuchungsobjekte projizieren zu können. „Der Terminus ‚Maschinelles Lernen‘ bezieht sich dabei auf den Fakt, dass die verwendeten Modelle durch ein Optimierungsverfahren parametrisiert werden, so dass diese von Iteration zu Iteration einen geringeren Schätzfehler bei der Prädiktion der Zielgröße zeigen“ (ZOBEL et al. 2016: 45).

Der Analyseprozess zur Nutzung spektraler Daten in Bezug auf die Prädiktion züchtungsrelevanter Merkmale gliedert sich in zwei aufeinander folgende Phasen: Trainings- und Testphase. Der Prozess der Datenmodellierung wird nachfolgend exemplarisch am Beispiel der Bestimmung von Blatt- und Korninhaltsstoffen beschrieben. Zum visuellen Verständnis der verbalen Erläuterungen dienen die Abbildung 26 und Abbildung 27.

Abbildung 26: Datenerhebung für die Kalibrierung der hyperspektralen Phänotypisierung am Beispiel der Blatt- und Korninhaltsstoffe



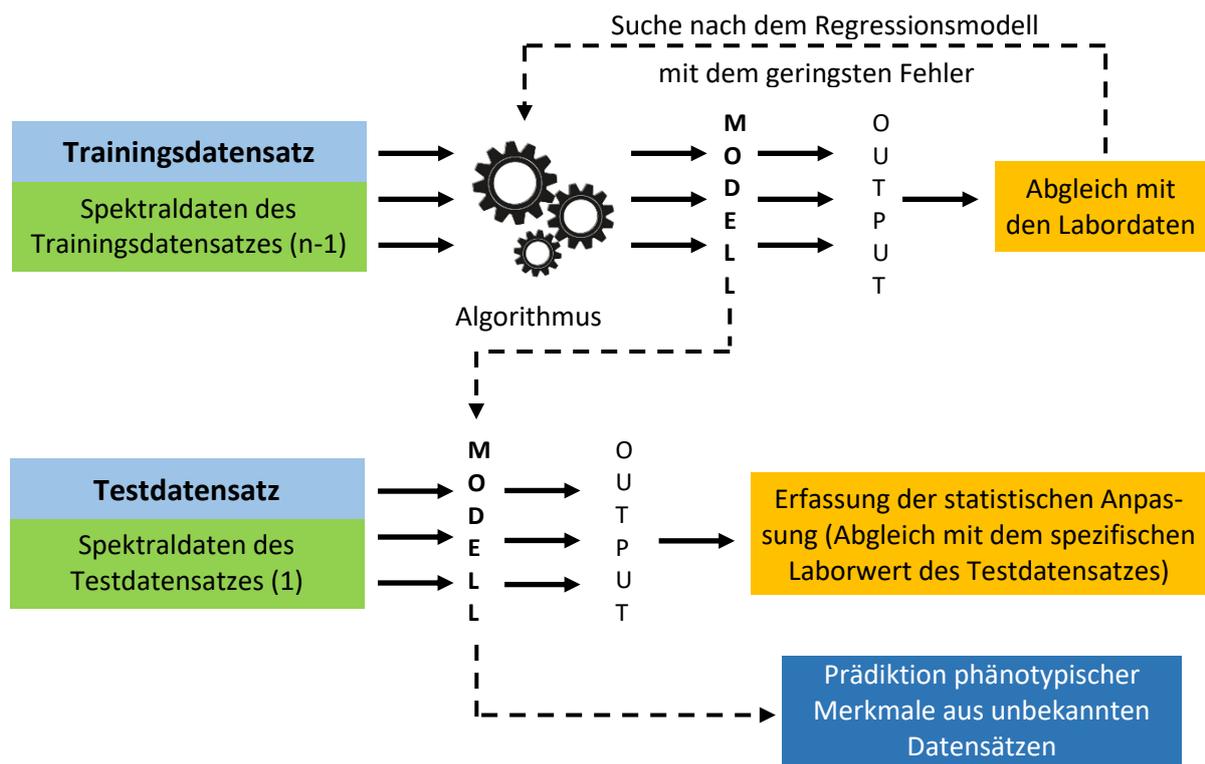
Anmerkung: ICP-OES (Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) ist die laboranalytische Methode zur Analyse pflanzlicher Nährstoffe.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Eine wesentliche Voraussetzung zur Auswertung hyperspektraler Messdaten unter Verwendung mathematischer Algorithmen ist zunächst ein erfolgreicher Kalibrierungsprozess. Diesbezüglich wird identisches Pflanzenmaterial sowohl hyperspektral als auch mittels herkömmlicher Laboranalyse (nass-chemische Ermittlung der relevanten Makro- und Mikronährstoffe) untersucht (vgl. Abbildung 26). Während der Vegetationszeit wurden zu verschiedenen Zeitpunkten, beginnend mit der Schossphase

der Pflanzen, systematisch Aufnahmefahrten mit dem AgRover durchgeführt. Zur statistischen Absicherung erfolgten die Messüberfahrten an den drei Standorten Halle-Kühnfeld, Merbitz und Morgenrot über drei Versuchsjahre (2016 bis 2018)³¹. Das Ausmaß der jährlichen Messüberfahrten richtete sich nach der jeweiligen Bestandsentwicklung, den Witterungsverhältnissen und agronomischen Terminen (keine Koinzidenz mit Pflanzenschutzmaßnahmen) und variierte in Abhängigkeit dieser Parameter zwischen zwei bis vier Überfahrten je Standort und Jahr. Da die Kalibrierung elementar für die Modellwahl und die anschließende Prädiktion der Zielvariablen ist, verbessert sich die Vorhersagegenauigkeit idealerweise auch durch die Erhöhung des Analyseumfangs. Im Rahmen der Überfahrten wurden insgesamt von 10 % der Prüfglieder zufallsbasiert sowohl Blattproben als auch zu späteren Zeitpunkten Ähren- und Kornproben genommen, die vom Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung (IPK) Gatersleben hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe nass-chemisch mittels optischer Emissionsspektrometrie analysiert wurden. Die hyperspektralen Untersuchungen beschränkten sich nicht nur auf diese nach dem Zufallsprinzip ausgewählten 10 % der Prüfglieder, sondern wurden bei allen Genotypen und Parzellen im Feldversuch durchgeführt. Neben der praktischen Anwendung im Feld mittels der Trägerplattform AgRover wurde die Hyperspektralkamera zusätzlich im Labor für die Analyse der biochemischen Zusammensetzung von Kornproben getestet.

Abbildung 27: Vereinfachte schematische Darstellung der leave-one-out-Validierung



Anmerkung: Der Output entspricht der jeweiligen phänotypischen Zielvariablen, die durch das Modell prädiziert wird.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

³¹ Überfahrten am Standort Morgenrot wurden aufgrund der großen Transportintensität lediglich im Jahr 2016 durchgeführt.

Die Kalibrierung erfolgt mittels leave-one-out-Verfahren, dessen schematischer Ablauf in Abbildung 27 dargestellt ist. Dabei werden n Schätzungen durchgeführt, wobei n die Anzahl der Beobachtungen aus dem Kalibrierungsdatensatz darstellt (10 % der Prüfglieder, die sowohl nass-chemisch als auch hyperspektral analysiert wurden). Aus diesem Datensatz fungiert eine einzelne Beobachtungseinheit als Testdatensatz und die restlichen Einheiten werden als Trainingsdatensatz verwendet (n-1). Durch einen Lernprozess (Trainingsphase) wird das Modell unter Abgleich der vorhandenen Zieldaten (Laborwerte) iterativ weiterentwickelt bis eine bestmögliche Annäherung des Vorhersagewertes (Modell-Output) an den laboranalytisch ermittelten Zielwert realisiert werden kann. Nach erfolgreichem Lernen ist das Modell in der Lage, Zusammenhänge zwischen spektralen Messwerten und pflanzlichen Inhaltsstoffen zu erkennen und den zuvor aus dem Datensatz extrahierten unbekanntem Wert zu präzisieren. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt bis jede Beobachtungseinheit einmal als Testdatensatz fungierte. Letztlich werden beim leave-one-out-Verfahren n Modelle erstellt und es wird die statistische Anpassung des jeweiligen Modells an den Testdatensatz geprüft. Ziel des Verfahrens ist es, Modelle zu entwickeln, die für die Prädiktion züchterischer Merkmale (z. B. pflanzliche Inhaltsstoffe) aus unbekanntem Datensätzen genutzt werden können. Bei entsprechender Eignung können die Modelle für die Prädiktion der bislang unbekanntem 90 % der Daten eingesetzt werden, die nicht laboranalytisch untersucht wurden.

6.2.3 Kurzdarstellung statistischer Ergebnisse zur Prädiktionsgüte der hyperspektralen Phänotypisierung

Statistisch lässt sich die Anpassung des regressionsanalytisch geschätzten Modells an den phänotypischen Zielwert – der mittels herkömmlicher Laboranalyse oder Handbonitur erhoben wird – anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2) in Gleichung (3) wiedergeben:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\text{nicht erklärte Varianz}}{\text{Gesamtvarianz}} \quad (3)$$

Dabei gilt:

y_i ... tatsächlicher phänotypischer Wert der Stichprobe i

\hat{y}_i ... durch das Modell geschätzter Wert der Stichprobe i

\bar{y} ... durchschnittlicher Wert über die gesamte Stichprobe

n ... Gesamtanzahl der Stichproben

Bei der in Gleichung (3) dargestellten Berechnungsform des Bestimmtheitsmaßes ist zu beachten, dass R^2 folgenden Wertebereich umfassen kann: $-\infty < R^2 \leq 1$. Das Modell ist umso besser, je höher das R^2 ist. Ein Wert von 1 bedeutet, dass die phänotypischen Daten perfekt vorhergesagt werden können. Sehr schlecht zu interpretierende negative Werte treten dann auf, wenn die \hat{y}_i -Werte nicht aus der linearen Regression berechnet wurden (GÜNTHER und VELTEN 2014: 72). In diesem Fall ist das Modell schlechter angepasst als ein einfaches Mittelwertmodell ($\hat{y}_i = \bar{y}$), bei dem sich entsprechend Gleichung (3) ein R^2 von 0 ergeben würde (GÜNTHER und VELTEN 2014: 72).

Da die Modellierungsprozesse zum Zeitpunkt der durchgeführten Experteninterviews noch nicht abgeschlossen waren, konnten den befragten Pflanzenzüchtern lediglich Zwischenergebnisse als Bewertungsgrundlage präsentiert werden. Nachfolgend sind einige statistische Leistungsparameter zur Beschreibung der technologischen Effizienz der Hyperspektralanalyse dargestellt³²:

a) Bestimmung von Blatt- und Korninhaltsstoffen

Die besten Modellierungsergebnisse wurden für die Vorhersage von Inhaltsstoffen erreicht. Im Durchschnitt konnten alle relevanten Makro- und Mikronährstoffe im Getreidekorn mit einem R^2 von 0,59 bestimmt werden, wobei der N-Gehalt ($R^2 = 0,93$) am besten detektiert werden konnte (HERZIG 2017). Bei der hyperspektralbasierten Vorhersage pflanzlicher Inhaltsstoffe im Feld konnten die Elemente B, Ca, Cu, K, Mg, N, P und S mit einer Modellgüte von $0,50 < R^2 < 0,88$ bestimmt werden (BACKHAUS 2018). Dennoch existieren nicht für alle Nährstoffe geeignete Vorhersagemodelle, da die Bestimmtheitsmaße bei den Elementen C, Fe, Mn, Na und Ni negativ sind (BACKHAUS 2018).

b) Erfassung von Entwicklungs- und Ertragsparametern

Bei der leave-one-out-Validierung erwiesen sich die Merkmale Schossen, Blüte, ährentragende Halme, Reife und Pflanzenhöhe mit $0,63 < R^2 < 0,68$ als am besten prädizierbar (BACKHAUS 2018). Für die beiden ertragsbestimmenden Parameter Kornzahl je Ähre ($R^2 = 0,34$) und TKG ($R^2 = 0,44$) konnte diese Prognosegüte nicht erreicht werden (BACKHAUS 2018).

c) Analyse der Malzqualität

Insgesamt wurden 13 Merkmale³³ der Malzqualität anhand der spektralen Signatur prädiziert, wobei eine durchschnittliche Anpassungsgüte von 47 % erzielt werden konnte (HERZIG 2017). Für die hyperspektrale Vorhersage sind die beiden Parameter Malzextrakt- und Rohproteingehalt mit einer Genauigkeit von 68 bzw. 61 % besonders geeignet (HERZIG 2017).

7 Ergebnisse der qualitativen Experteninterviews zur Bewertung der hyperspektralen Phänotypisierung

Im Hinblick auf die Beantwortung der Forschungsfragen zur Bewertung der hyperspektralen Phänotypisierung (vgl. Forschungsfragen II a bis II d) werden nachfolgend wesentliche Ergebnisse der durchgeführten qualitativen, leitfadengestützten Experteninterviews dargelegt. Die Gliederungsstruktur orientiert sich an der im Unterpunkt 5.3.2.2 erläuterten Vorgehensweise der Datenauswertung.

³² In dieser Arbeit muss auf eine detaillierte statistische Beschreibung der Vorhersagegenauigkeit der Hyperspektralanalyse verzichtet werden, da ein Vorgriff auf Publikationen von Projektpartnern vermieden werden soll. Im Interesse der besseren Nachvollziehbarkeit der Expertenaussagen werden lediglich einige Leistungsparameter der Hyperspektralanalyse mit Verweis auf die jeweiligen Autoren präsentiert. Im Gegensatz zu den im Rahmen dieser Arbeit lediglich auszugsweise präsentierten Daten wurde befragten Experten ein vollständig grafisch aufbereiteter Datensatz als Bewertungsgrundlage vorgestellt.

³³ Extrakt Malz, Viskosität, Mürbigkeit, Endvergärung, Rohprotein, freier Amino-Stickstoff (FAN), β -Glucan, löslicher Stickstoff, Eiweißlösungsgrad, Gesamtschwand, Wassergehalt Malz, α -Amylase, β -Amylase

7.1 Expertenanalyse zum allgemeinen Entwicklungsstand sensorischer Phänotypisierung

7.1.1 Forschungsfeld sensorische Phänotypisierung

Die zuverlässige Charakterisierung physiologischer und biochemischer Pflanzenmerkmale stellt eine wesentliche Grundlage für die Differenzierung verschiedener Züchtungslinien dar. Dementsprechend bedeutsam ist die Phänotypisierung als Fundament für züchterische Entscheidungen. Die geführten Experteninterviews bestätigen im Konsens, dass Züchter in der gegenwärtigen technologischen Ausgestaltung der Phänotypisierung einen Flaschenhals sehen. Das Nichtvorhandensein einer etablierten Hochdurchsatz-Phänotypisierung für den Feldeinsatz wird als limitierender Faktor des züchterischen Fortschritts identifiziert, sodass befragte Züchtungsexperten einen großen Bedarf an wirtschaftlich effizienten Untersuchungsmethoden sehen. Stellvertretend dafür lassen sich zwei wesentliche Ursachen für den gegenwärtigen Flaschenhals benennen (FRAUEN 2018):

- 1) Die klassische Kreuzungszüchtung erfolgt nach dem Zufallsprinzip. Das impliziert, dass die Wahrscheinlichkeit positiver Merkmalskombinationen mit der Anzahl der Prüfglieder im Feldversuch korreliert.
- 2) Eine effektive Beschreibung des pflanzlichen Erscheinungsbildes ist nur anhand einer Vielzahl von Merkmalen möglich (Ertrag, Biomasse, Vitalität, Wachstum, Entwicklung, Reaktion auf Stress, Toleranz etc.).

Beide Aspekte in Kombination bedingen den existierenden Flaschenhals der Feld-Phänotypisierung. Demnach ist es „bei mehr als 10.000 Linien“ im Rahmen der gegenwärtigen technischen Möglichkeiten schwierig, die genetische Variation innerhalb der Zuchtstämme und Pflanzen-Umwelt-Interaktionen umfassend zu dokumentieren (FRAUEN 2018). In diesem Kontext lässt sich die Aussage von CSELÉNYI (2018) einordnen, der aufgrund der großen Anzahl an Züchtungslinien insbesondere „in jungen Generationen“ einen technologischen Engpass in der Phänotypisierung sieht.

Zudem ist der Faktor Wirtschaftlichkeit von Bedeutung. KEMPF (2018) verdeutlicht, dass eine umfassendere Beschreibung des Phänotyps aus Züchtungsperspektive wünschenswert, jedoch diese unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen nicht immer wirtschaftlich ist. Aufgrund finanzieller Restriktionen können bestimmte Eigenschaften nicht analysiert werden und die Bonitur „beschränkt sich auf ausgewählte Merkmale“ (KEMPF 2018).

In der Pflanzenzüchtung ist die Substitution von Arbeit durch Kapital in den vergangenen Jahrzehnten weniger stark ausgeprägt als vergleichsweise in anderen Branchen. Aufgrund der Tatsache, dass Bonituren weitgehend in Handarbeit von Experten durchzuführen sind, wird die Phänotypisierung von den Befragten als zeit-, arbeits- und kostenintensiv dargestellt, jedoch gleichzeitig alternativlos und unersetzlich. FRAUEN (2018) sieht in der starken Abhängigkeit von menschlicher Arbeitskraft bei der Bonitur von Pflanzenmerkmalen „einen natürlichen bottleneck“. Nicht alle phänotypisch relevanten Eigenschaften sind nach Einschätzung dieses Saatzuchtleiters für das menschliche Auge wahrnehmbar, sodass ein großer Bedarf an sensorischen Lösungen zum komplementären Einsatz in der Pflanzenzüchtung gesehen wird. Von zwei weiteren Experten wird in diesem Zusammenhang die fehlende Objektivität

vität von Bonituren thematisiert. Trotz fest definierter Klassengrenzen und geschulter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind visuelle Schätzungen: 1) fehleranfällig, 2) subjektiv und daher begrenzt intersubjektiv vergleichbar sowie 3) eingeschränkt statistisch auswertbar (CSELÉNYI 2018; KEMPF 2018).

7.1.2 Potenzial sensorgesteuerter Phänotypisierung

Aufgrund der geschilderten restriktiven Faktoren bei der Ausgestaltung der Feld-Phänotypisierung wird die Entwicklung neuer Konzepte und Technologien von den Befragten als äußerst relevant angesehen. Das ist daran ersichtlich, dass sich alle befragten Experten aus Saatzuchtunternehmen intensiv mit dem Forschungsfeld sensorischer Phänotypisierung auseinandersetzen. Dies betrifft sowohl individuelle Forschungsbemühungen als auch die Teilnahme an öffentlichen Kooperationsprojekten zur Thematik Phänotypisierung. Die Experteninterviews bestätigen im Konsens, dass Wissen über die Ausprägung quantitativer und qualitativer Pflanzenmerkmale der Schlüsselfaktor eines erfolgreichen Züchtungsprozesses ist. Exemplarisch dafür steht die Aussage eines Experten: Phänotypisierung bedeutet „unter den gegebenen technischen und finanziellen Rahmenbedingungen das Maximum an Informationen [über jeden Genotypen] zu erfassen“ (CÖSTER 2018). Die Erwartungshaltung an Sensoren besteht in der „Verschiebung der technischen Rahmenbedingungen“ zugunsten einer „höheren Informationsdichte“ (CÖSTER 2018). Da Sensoren „maschinell und unabhängig vom Faktor Mensch“ arbeiten können, besteht das Potenzial von Effizienzverbesserungen (WELZ 2018).

Als Beispiel für die Innovationskraft und das Potenzial alternativer Analysemethoden wird von FRAUEN (2018) die Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) herausgestellt. Mit dem Vorhandensein von NIRS hat sich die Qualitätsanalyse landwirtschaftlicher Erzeugnisse revolutioniert, so der Experte. Das gilt sowohl für Landwirte, die bereits während der Ernte mit dem Mähdrescher online über Qualitätseigenschaften informiert werden, als auch für Pflanzenzüchter, bei denen die laboranalytische Erfassung einer ganzen Reihe von verarbeitungsrelevanten Merkmalen durch NIRS substituiert wurde. Die schnelle Entwicklung der NIRS und der nachhaltige Erfolg bei züchterischen Anwendungen waren laut seiner Experten-aussage in dieser Form nicht absehbar. Mit Blick auf das Potenzial sensorgesteuerter Phänotypisierung in der Pflanzenzüchtung und die Erfahrungen mit NIRS schlussfolgert FRAUEN (2018), dass zukünftig ganz „überraschende technische Entwicklungen“ kommen werden, die für die Züchtung von großer Relevanz sind.

Durch die Nutzung von Sensoren besteht nach Auffassung mehrerer Experten ein Potenzial zur Erschließung neuer Forschungsfelder, wie beispielsweise die entwicklungsbegleitende Erfassung des Wurzelwachstums. Ebenso könnten durch die in BARLEY BIODIVERSITY erprobten Anwendungen der Hyperspektralanalyse neue Untersuchungsmethoden für züchterische Grundlagenforschung entstehen. Anwendungspotenziale und bewertungsrelevante Aspekte mit konkretem Bezug zum Forschungsobjekt der Hyperspektralanalyse werden gesondert in den Abschnitten 7.2 und 7.3 dargelegt.

7.1.3 Herausforderungen der sensorischen Phänotypisierung

Sensorische Phänotypisierung ist ein relativ junger Forschungszweig und daher offenbaren die geführten Experteninterviews zahlreiche Herausforderungen bei der Implementierung in die züchterische Praxis, die mit Blick auf das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit von großer Relevanz sind. Im Folgenden werden die Aussagen der Experten zu wesentlichen Herausforderungen bei der Anwendung von Sensorik zur Phänotypisierung in zwei Hauptaspekte kategorisiert.

7.1.3.1 Wirtschaftliche Risiken

Auf Betriebsebene entscheidet nicht allein die Funktionalität der Sensoren, sondern insbesondere die Wirtschaftlichkeit unter Abwägung aller risikobeeinflussenden Faktoren über die Attraktivität und Verbreitung technologischer Konzepte zur Erfassung phänotypischer Pflanzenmerkmale. Im Rahmen der Befragung wurde von der Mehrheit der Züchter bestätigt, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis sensorgesteuerter Phänotypisierung derzeit noch unausgewogen ist, da hochauflösende und leistungsfähige Sensorik zu hohe Investitionskosten verursacht. In diesem Zusammenhang wird von CSELÉNYI (2018) angemerkt, dass die verfügbare Technologie vielfach lediglich auf die Erfassung einzelner spezifischer Pflanzen- und Wachstumsparameter beschränkt ist. Zwar leisten einige Sensoren valide Messergebnisse für züchtungsrelevante Parameter, jedoch sind Großinvestitionen für die Züchtung „gegenwärtig nicht rentabel“, da der Output auf „wenige Züchtungsmerkmale begrenzt“ ist (CSELÉNYI 2018). Mit ähnlicher Argumentation verweisen HANEMANN et al. (2018) darauf, dass der Arbeitsaufwand für die sensorische Erfassung einiger weniger Spezialparameter viel zu groß ist, weil sich zusätzliche Analysen erst dann rentieren, wenn verschiedene Pflanzeigenschaften parallel erfasst werden. Die Arbeit des Züchters im Feld kann durch die Erfassung isolierter Einzelmerkmale „nicht ersetzt werden“, da sich die Leistungsfähigkeit der Zuchtstämme aus verschiedenen Komponenten zusammensetzt (HANEMANN et al. 2018). Als Lösungsansatz wird von diesen Experten die Nutzung von Synergieeffekten durch Zusammenführung verschiedener technisch effizienter Sensoren diskutiert, wobei als limitierender Faktor wiederum die Investitionskosten zu berücksichtigen sind, die sich bei Sensor-Fusion entsprechend summieren.

DAMMER et al. (2018) verweisen darauf, dass die Geschwindigkeit des technischen Fortschritts in einem Forschungszweig eng mit dem Marktpotenzial gekoppelt ist. Im Vergleich zu Innovationen des Precision Farming, bei denen die Anzahl potenzieller Anwender (Landwirte) sehr groß ist, besteht im Hinblick auf die Phänotypisierung ein lediglich eingeschränkter Nutzerkreis von Pflanzenzüchtern. Das geringere Marktpotenzial limitiert nach Experteneinschätzung das Forschungsinteresse (beispielsweise von Dienstleistungsunternehmen) zur Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender Sensorik (DAMMER et al. 2018). Auch HANEMANN et al. (2018) argumentieren, dass Sensorik zur Phänotypisierung „kein Massenprodukt“ ist und die Notwendigkeit zur „Anpassung an individuelle Bedürfnisse“ des Züchters besteht. Als Beispiel wird von diesen Befragten die Spezifität der Züchtung unterschiedlicher Kulturarten angeführt, sodass Forschungsergebnisse nicht zwangsläufig auf andere Kulturarten übertragbar sind. Selbst innerhalb der Getreidezüchtung besteht das Erfordernis spezifischer Kalibrierung, sodass Sensorik nicht kulturartunabhängig eingesetzt werden kann. Hinzu kommt, dass jeder Züchter in der Versuchsgestaltung und -durchführung individuelle Konzepte (z. B. Parzellengrößen) verfolgt, sodass die Sensorik immer auf die spezifischen Bedürfnisse des Züchters anzupassen ist (HANEMANN et al. 2018). Im Hinblick auf das Marktpotenzial schlussfolgert KICHERER (2018), dass der „Sektor zu klein“ ist, sodass weitere Entwicklungen im Bereich sensorischer Phänotypisierung stark von staatlicher Forschung und Förderung abhängig sind.

DAMMER et al. (2018) weisen darauf hin, dass der Einsatz von Sensorik in der Landtechnik und Pflanzenzüchtung nur bedingt miteinander vergleichbar ist, da die Genauigkeit in der Feld-Phänotypisierung zur Detektion minimaler genotypischer Veränderungen viel präziser sein muss. In der Landwirtschaft hingegen ist das Kriterium Flächenleistung nach dieser Expertenauffassung höher zu bewerten als die

räumliche Präzision. Aufgrund dieser unterschiedlichen Ansprüche an Sensorik wäre es falsch zu schlussfolgern, dass der technische Fortschritt im Bereich der Phänotypisierung in der Pflanzenzüchtung geringer ausfällt als in der Landtechnik (DAMMER et al. 2018).

KEMPF (2018) vertritt die Auffassung, dass die Abschätzung langfristiger wirtschaftlicher Effekte von Investitionen in Sensorik derzeit schwierig bzw. gar nicht möglich ist. Einerseits, weil der technologische Entwicklungsstand keine Analysen zulässt, andererseits ist dies durch die lange zeitliche Dauer des Züchtungsprozesses und zufällige Züchtungseffekte bedingt. Investitionen in Sensorik sind daher gegenwärtig „schwer kalkulierbar“ (KEMPF 2018). Zur Vermeidung von Investitionsrisiken agieren Züchter daher nach dem Prinzip „never change a running system“ (HANEMANN et al. 2018). Die unternehmerische Beteiligung an öffentlichen Forschungsprojekten wird von WELZ (2018) als eine Option zur Überbrückung dieser Investitionshemmnisse angeführt.

7.1.3.2 Technologische Entwicklungsdefizite

PILLEN (2018) sowie VERSTEGEN (2018) verweisen in den Experteninterviews darauf, dass viele Entwicklungen im Bereich sensorischer Phänotypisierung derzeit noch ganz am Anfang stehen und häufig lediglich Prototypen existieren. Dementsprechend gibt es nach ihrer Auffassung wenig etablierte Systeme, insbesondere zur Anwendung unter Freilandbedingungen im Versuchsfeld. VERSTEGEN (2018) erläutert, dass die technologische Lernkurve in diesem anfänglichen sensorischen Entwicklungsstadium nicht linear, sondern teilweise exponentiell verläuft. Neue Forschungserkenntnisse führen zu einer sukzessiven Technologieverbesserung und aus Züchterperspektive sind Investitionen in die momentan vorhandene Technologie häufig „ein zu großer Risikofaktor“ (VERSTEGEN 2018). In diesem Zusammenhang betonen STIEWE und SPILLER (2018), dass die „Systementwicklung gegenwärtig nicht abschätzbar“ ist.

HANEMANN et al. (2018) argumentieren, dass zahlreiche Sensoren primär auf wissenschaftliche Fragestellungen und Einzelpflanzenuntersuchungen im Gewächshaus ausgerichtet sind und den Ansprüchen praktischer Pflanzenzüchter nicht ausreichend gerecht werden. In diesem Kontext hinterfragen DAMMER et al. (2018) kritisch die Übertragbarkeit sensorischer Messdaten aus Laborversuchen auf Freilandbedingungen. Aufgrund einer „Summierung von Störeinflüssen“ unter praxisrelevanten Testbedingungen im Feld sind „Laborergebnisse nicht immer übertragbar“ (DAMMER et al. 2018). Dies gilt nach Meinung dieser Experten insbesondere in der Pflanzenzüchtung, bei der geringe genotypische Unterschiede eine hohe Messgenauigkeit der Sensoren voraussetzen. Es besteht ein „Trade-off zwischen räumlicher Auflösung und sensorischer Genauigkeit“ und eine hohe sensorische Messgenauigkeit an Einzelpflanzen im Labor garantiert noch keine befriedigende Eignung unter Feldbedingungen (DAMMER et al. 2018).

Als eher nachteilig wird von WELZ (2018) die „Systemkomplexität“ angesehen, da der Umgang mit Sensorik eine hohe Anwenderkompetenz verlangt, die auf betrieblicher Ebene nicht immer oder nur durch zusätzlichen Kostenaufwand vorhanden ist. Er weist darauf hin, dass das Datenmanagement auf Ebene der Saatzüchter eine Herausforderung darstellt: Einerseits sind die infrastrukturellen Voraussetzungen für den Umgang mit großen Datenmengen häufig nicht gegeben. Andererseits stellt eine anwenderbezogene Auswertung vielfach ein ungelöstes Problem auf Betriebsebene dar (WELZ 2018). Insbesondere

Sensoren, die eine wissensbasierte Entscheidungsunterstützung liefern und ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand eine Strategie zur Betriebsführung (Handlungsanweisung) ermöglichen, eignen sich zur Anwendung in der landwirtschaftlichen oder züchterischen Praxis (STIEWE und SPILLER 2018). In Bezug auf ein breites praktisches Einsatzspektrum gilt daher die Voraussetzung, dass Daten anwenderfreundlich verarbeitet und ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand interpretierbar sein müssen (STIEWE und SPILLER 2018). Auch PILLEN (2018) sieht die „Integration der Daten in die Systembiologie“ als maßgebliche Herausforderung bei der Etablierung von Sensoren an. Diese Anforderung kann nach seiner Auffassung derzeit nicht in vollem Umfang gewährleistet werden und stellt ein Hemmnis für eine breitere Anwendung sensorbasierter Phänotypisierung dar.

Laut CSELÉNYI (2018) kann Sensorik nur eingeschränkt zwischen umweltbedingten und genetischen Effekten unterscheiden. Eine Selektion lediglich auf der Basis sensorischer Daten ist „schwer vorstellbar“, da die erhobenen Daten stets einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden müssen (CSELÉNYI 2018).

7.2 Nutzungspotenziale einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung

Im Vergleich mit anderen Sensoren ist eine Hyperspektralkamera ein „unspezifischer Sensor“, sodass im Hinblick auf die Datenauswertung und -nutzung eine „hohe Flexibilität“ gegeben ist (BEHMANN 2018). Nachfolgend werden aus den Experteninterviews ausgewählte Anwendungsmöglichkeiten der Hyperspektralanalyse in Bezug auf Pflanzenzüchtung und Landwirtschaft erläutert. Diese Klassifikation geht über die in BARLEY BIODIVERSITY erfassten Anwendungen hinaus.

7.2.1 Hochdurchsatz-Phänotypisierung in jungen Züchtungsgenerationen

Ein großes Potenzial der hyperspektralen Hochdurchsatz-Phänotypisierung besteht für einen Praxiseinsatz in jungen Züchtungsgenerationen. FRAUEN (2018) verdeutlicht, dass das Hauptproblem darin liegt, dass Selektionsentscheidungen zu diesem Zeitpunkt auf der Grundlage einer sehr geringen Informationsdichte zu treffen sind. Das ist sowohl durch fehlende Beobachtungsjahre als auch durch begrenzte zeitliche Kapazität zur Erfassung phänotypischer Merkmale bei einer anfänglich noch sehr hohen Anzahl an Zuchtlinien bedingt (FRAUEN 2018). Frühe Selektionsentscheidungen unterliegen daher eher einem „visuellen Eindruck“ anhand von wenigen Einzelpflanzen (CÖSTER 2018). Infolge fehlender datenbasierter Kenntnisse werden Selektionsentscheidungen in frühen Zuchtstadien als unsicherheitsbehaftet wahrgenommen (CÖSTER 2018).

Aufgrund der genannten Defizite manueller Bonituren (vgl. Punkt 7.1.1) betonen Züchter im Rahmen der Befragungen explizit das große Potenzial sowohl sensorischer als auch im Speziellen der hyperspektralen Phänotypisierung im frühen Zuchtstadium. KEMPF (2018) sieht in einer funktionsfähigen Hochdurchsatz-Phänotypisierung ein wesentliches „Instrument zur Entscheidungsunterstützung“. Eine leistungsfähige hyperspektrale Phänotypisierung zur umfassenderen Analyse pflanzlicher Strukturen im frühen Zuchtstadium hat das „Potenzial zur Fehlerminimierung“ (FRAUEN 2018). Gleichzeitig können über den gesamten Züchtungsprozess detaillierte Datenbanken erstellt werden, die dem Züchter neue Perspektiven für wissensbasierte Entscheidungen ermöglichen (WELZ 2018).

7.2.2 Analyse pflanzlicher Inhaltsstoffe

Aus den Befragungen geht hervor, dass die Berücksichtigung pflanzlicher Inhaltsstoffe in der praktischen Züchtung bislang kaum eine Rolle spielt. Das ist dem Sachverhalt geschuldet, dass die Laboranalyse zum gegenwärtigen Zeitpunkt grundsätzlich ein technisch, jedoch kein wirtschaftlich effizientes Analyseverfahren darstellt. Ob die hyperspektrale Erfassung des pflanzlichen Versorgungszustandes zukünftig für die Praxis relevant sein könnte, wird insbesondere von Experten aus Saatzuchtunternehmen bezweifelt. Exemplarisch für diese kritische Perspektive mehrerer Züchter argumentiert KEMPF (2018), dass sich ein höheres pflanzliches Nährstoffaneignungsvermögen auch in ertragsrelevanten Eigenschaften widerspiegelt, sodass Inhaltsstoffe nicht gesondert untersucht werden müssen. Im Vergleich mit anderen phänotypischen Merkmalen ist die Inhaltsstoffanalyse „von untergeordneter Bedeutung“ (KEMPF 2018).

Trotzdem bietet ein kostengünstiges Analyseverfahren potenzielle Möglichkeiten sowohl für die Züchtung als auch die Wissenschaft. Ein Großteil der landwirtschaftlichen Erzeugung wird als Futtermittel eingesetzt, bei der beispielsweise eine „Optimierung der Eiweißversorgung“ von großer Relevanz ist (HANEMANN et al. 2018). Aufgrund begrenzter Analysemöglichkeiten spielen derartige Zuchtziele gegenwärtig eine untergeordnete Rolle. Durch eine hyperspektrale Bestimmung der Aminosäure-Zusammensetzung im Korn könnten möglicherweise Genotypen mit verbesserten Futtereigenschaften selektiert werden (HANEMANN et al. 2018).

Nach Auffassung von FRAUEN (2018) stellen hohe N-Gehalte im Rapsstroh eine maßgebliche Herausforderung dar, weil der in der Fruchtfolge häufig im Anschluss ausgesäte Weizen diese Mengen an N nicht aufnehmen kann und dadurch Umweltbelastungen entstehen. Als ein Züchtungsziel bei Raps formuliert FRAUEN (2018) die Züchtung von „Genotypen mit einer besseren Umlagerung“, sodass „stickstoffärmeres Rapsstroh“ als Ernterest zurückbleibt. In der hyperspektral realisierbaren Erfassung des N-Versorgungszustandes der Ganzpflanze sieht er eine innovative Technologie zur stärkeren Berücksichtigung dieser Züchtungsziele (FRAUEN 2018). Im gleichen Kontext vermuten STIEWE und SPILLER (2018), dass die N-Effizienz als Züchtungsziel aufgrund von Novellierungen der Düngeverordnung künftig an Bedeutung gewinnen wird.

Die züchterische Erfassung pflanzlicher Inhaltsstoffe könnte zudem aus Gründen der Ernährungssicherheit bedeutsamer werden. Als Beispiel für ein nicht abschätzbares gesundheitliches Risiko wird die Aufnahme von Schwermetallen über Getreideerzeugnisse angeführt (CÖSTER 2018). Da die Aufnahmeintensität dieser Umweltgifte im Getreidekorn genetisch bedingt ist, kann eine kostengünstige Analyseverfahren Aufschluss über genotypische Unterschiede geben und zur gezielten „Selektion von Genotypen mit verringerter Schwermetallaufnahme“ beitragen (CÖSTER 2018). Er vermutet, dass diese Zuchtziele unter der Voraussetzung ernährungsbewusster Konsumenten an Bedeutung gewinnen könnten (CÖSTER 2018).

Ein nicht-invasives und dadurch zeitlich reproduzierbares Analyseverfahren für die Bestimmung von Makro- und Mikronährstoffen bietet das Potenzial für neue Erkenntnisse im Hinblick auf Nährstoffverlagerungsprozesse (PILLEN 2018; WELZ 2018). Sowohl tageszeitliche als auch entwicklungsbedingte Nährstoffverlagerungen könnten visuell sichtbar gemacht werden und der Pflanzenzüchtung neue

strukturelle Einblicke in die Funktionsweise der Pflanze liefern (WELZ 2018). Als Beispiel werden Wechselwirkungen zwischen Nährstoffanreicherung und abiotischen sowie biotischen Stressoren genannt (PILLEN 2018).

7.2.3 Saatgutqualitätskontrolle

Die Vorhersage von Korninhaltsstoffen liefert nach HANEMANN et al. (2018) bei stationärer Anwendung der Hyperspektralkamera im Labor die besten Ergebnisse (vgl. Punkt 6.2.3), sodass sie weiteres Nutzungspotenzial für hyperspektrale Saatgutqualitätsanalysen sehen: Neben der Selektion im Zuchtgarten anhand phänotypischer Pflanzenmerkmale erfolgt in frühen Generationen auch eine Selektion anhand von Kornmerkmalen, wie z. B. Siebung nach Größen, Analysen der Keimfähigkeit und des Proteingehaltes sowie eine Beurteilung zur Neigung des Aufplatzens der Körner. Die Hyperspektralanalyse besitzt den Vorzug, dass nicht-invasive bildgebende Untersuchungen bereits zu einem frühen Zuchtzeitpunkt mit einer geringen Menge an Saatgut möglich sind. HANEMANN et al. (2018) sehen die Hyperspektralanalyse als eine Option, um in einer Art „Schnelltest“ die sehr schlechten Kornqualitäten separieren zu können. Als Größenordnung für die Negativ-Selektion schlechter Qualitäten werden 10 bis 15 % angeführt.

Im Zusammenhang mit Saatgutqualitätsanalysen wurde mit HANEMANN et al. (2018) über die Eignung der Hyperspektralanalyse für die nicht-invasive Bestimmung der Keimfähigkeit diskutiert: Herkömmliche Keimfähigkeitstests liefern bei entsprechender Wiederholung ein statistisches Maß der Wahrscheinlichkeit für den Feldaufgang, sind jedoch erst im fortgeschrittenen Zuchtstadium bei ausreichender Saatgutverfügbarkeit realisierbar. Im Gegensatz dazu könnte ein nicht-invasives Analyseverfahren bereits in jungen Generationen angewandt werden. Die hyperspektrale Bestimmung der Keimfähigkeit würde Saatzüchtern darüber hinaus auch eine gezielte Auswahl von Kornmaterial für die Wertprüfungen zur Sortenerkennung ermöglichen. Daher plädieren HANEMANN et al. (2018) dafür, die Hyperspektralanalyse auf diesem Gebiet zu erproben.

7.2.4 Nutzung für Feldbonituren

Wenngleich die Prädiktionsgüte der im Feld hyperspektral erfassten Bonitureigenschaften zwischen den einzelnen Merkmalen stark variiert, besteht unter der Voraussetzung einer gezielten Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit ein vielfältiges zukünftiges Nutzungspotenzial. Grundsätzlich gilt: Je schwerer und zeitaufwendiger die Erfassung mittels konventioneller Analysen ist, desto höher der Nutzen sensorischer Merkmalerfassung für den Züchter (PILLEN 2018). Diese Arbeitsintensität trifft besonders für Feldbonituren zu, sodass laut mehrheitlicher Auffassung der befragten Experten potenziell ein großer Nutzen einer sensorischen Wachstumsüberwachung im Feld bestehen könnte. Dementsprechend wird die in BARLEY BIODIVERSITY angestrebte Vorhersage von Entwicklungs- und Ertragsparametern auf Basis der Hyperspektralanalyse als äußerst praxisrelevant angesehen. Verglichen mit der Vorhersage von Blatt- und Korninhaltsstoffen besteht von Seiten der befragten Züchter ein wesentlich größeres Interesse an der Erfassung entwicklungs- und ertragsrelevanter Parameter.

a) Detektion von Krankheiten bzw. Resistenzen

Ein zentrales Züchtungsziel sind krankheitsresistente bzw. -tolerante Sorten. Dementsprechend betonen Züchter die Bedeutsamkeit der Detektion dieser Merkmale im Feld und sehen diesbezüglich eine

potenzielle Anwendungsmöglichkeit für den Einsatz der Hyperspektralanalyse. CSELÉNYI (2018) schildert die bestehende Problematik konventioneller Krankheitsbonituren für den Züchter:

- 1) Es besteht eine geringe Beobachtungsintensität (ein- bis zweimal).
- 2) Die Handbonitur unterliegt einem erheblichen subjektiven Einfluss und der prozentuale Krankheits- bzw. Schädlingsbefall ist für das menschliche Auge nicht erfassbar.
- 3) Bei Mischinfektionen ist die visuelle Bonitur besonders herausfordernd.
- 4) Die Bewertung von Resistenzeigenschaften unter geringem Krankheitsdruck ist besonders diffizil, sodass die potenzielle Gefahr besteht, dass Genotypen fälschlicherweise als resistent oder tolerant klassifiziert werden.
- 5) Aufgrund der hohen Arbeitsintensität bei der phänotypischen Charakterisierung von Kulturpflanzen spielt das spezifische pflanzliche Entwicklungsstadium bei Krankheitsbonituren eine eher untergeordnete Rolle. Die Schwierigkeit liegt darin, dass Krankheiten bei extrem frühen Genotypen bereits manifeste Symptome aufweisen, während Krankheitszeichen trotz Krankheitsausbruch bei Genotypen mit langsamer Entwicklung noch nicht sichtbar sind, sodass diese nach Durchführung der Bonitur „gar nicht mehr erfasst werden können“ (CSELÉNYI 2018).

Infolge dieser Defizite attestieren interviewte Züchter ein Nutzungspotenzial der Hyperspektralanalyse zur Erkennung von Krankheits- und Schädlingsbefall. Vorteile der Hyperspektralanalyse zur Überwindung o. g. Herausforderungen in der Krankheitsbonitur liegen vor allem in der „Automatisierung und Wiederholbarkeit“ (CÖSTER 2018). Durch die Erhöhung der Analysegeschwindigkeit und die Wiederholbarkeit von Messungen ist „Pflanzenwachstum dynamisch erfassbar“ und in „Wachstumskurven“ darstellbar (WELZ 2018).

Als besonders praxisrelevant wurde in vier Experteninterviews die hyperspektrale Erfassung des Fusariumbefalls und Mykotoxingehaltes betont (HANEMANN et al. 2018; CÖSTER 2018; KEMPF 2018; STIEWE und SPILLER 2018). Das gegenwärtige Problem bei der Feststellung von Fusariumbefall liegt laut CÖSTER (2018) darin, dass der Mykotoxingehalt „nur bedingt mit der visuellen Bonitur korreliert“, sodass trotz optisch erkennbarer Anzeichen eines Fusariumbefalls ein geringer Mykotoxingehalt vorliegen kann. Da jedoch laboranalytische Untersuchungen großer Populationen „aus Kostengründen nicht möglich“ sind, ist die visuelle Bonitur derzeit immer noch die Methode der Wahl zur Schnellbestimmung junger Züchtungsgenerationen (HANEMANN et al. 2018). Eine Erprobung der Hyperspektralanalyse für dieses Einsatzgebiet ist von besonderem züchterischen Interesse, da die Detektion von Fusarium sowohl bei Gerste als auch Weizen bedeutsam ist (STIEWE und SPILLER 2018). Auch HANEMANN et al. (2018) betonen explizit den hohen praktischen Nutzen und plädieren für eine Erprobung der Hyperspektralanalyse in Bezug auf die Anwendung zur Fusariumbestimmung.

BEHMANN (2018) verweist auf das große Potenzial zur Früherkennung von Krankheits- und Pathogenbefall unter Labor- bzw. Gewächshausbedingungen. Durch künstliche Inokulation³⁴ lassen sich laut Aussagen dieses Experten resistente Genotypen bereits vor dem sichtbaren Befall anhand signifikanter Veränderungen im spektralen Muster erkennen, sodass im Vergleich zu molekularbiologischen Untersuchungsmethoden deutliche Kosten- und Zeitersparnisse möglich sind. BEHMANN (2018) spricht in diesem Kontext von einer realisierbaren „Frequenzerhöhung im Gewächshausdurchlauf“. Im Hinblick auf

³⁴ Gezielte Infizierung von Pflanzen mit Erregern, wie z. B. Pilze und Bakterien.

eine Anwendung in der Feld-Phänotypisierung werden schwankende Umweltbedingungen gegenwärtig als größte Herausforderung angesehen (BEHMANN 2018).

b) Untersuchung zur Phytotoxizität von Pflanzenschutzmitteln

Der Anwendungsbereich der Hyperspektralanalyse ist nicht nur auf die Pflanzenzüchtung beschränkt. Einige der befragten Experten sind in Saatgutunternehmen tätig, die in der F&E von Pflanzenschutzmitteln mitwirken, sodass in diesem Bereich eine parallele Nutzungsoption der Hyperspektralanalyse gesehen wird. Bei der Entwicklung neuer Pflanzenschutzmittel ist die Untersuchung phytotoxischer Nebenwirkungen auf Nutzpflanzen elementarer Forschungsbestandteil und WELZ (2018) attestiert der Hyperspektralanalyse in diesem Zusammenhang eine Anwendungsoption. Durch automatisierte Erfassungen könnten Nebenwirkungen von Herbiziden (z. B. Verfärbungen der Blattspitzen) schnell und kostengünstig detektiert werden (WELZ 2018).

c) Ertragserfassung

Trotz vielfältiger Zuchtziele wird der Ertrag als wichtigste und vermarktungsrelevanteste Determinante angesehen. Jedoch besteht insbesondere im frühen Zuchtstadium aufgrund geringer Saatmengen keine Möglichkeit für valide Ertragsprüfungen. Daher gilt es, anhand von Bonituren die Ausprägung verschiedener ertragsbeeinflussender Merkmale im Vergleich zwischen verschiedenen Zuchtlinien und Kreuzungseltern abzuschätzen. Eine Hochdurchsatz-Phänotypisierung zur Prognose von Ertragsparametern in jungen Züchtungsgenerationen bietet in der Praxis die Möglichkeit zur selektiven Ernte, sodass Zuchtlinien mit schlechten Erträgen gar nicht mehr geerntet werden müssten und der Züchter durch Kostenersparnis profitieren könnte (KEMPF 2018).

d) Erfassung von Entwicklungsstadien und züchtungsrelevanten Zeitpunkten

Da die Erfassung von pflanzlichen Entwicklungsstadien mittels herkömmlicher Bonitur sehr zeit- und arbeitsaufwendig ist, werden Parameter, wie z. B. Bestockung, Blüte und Gelbreife, als besonders erhebungsrelevant eingestuft (HANEMANN et al. 2018). VERSTEGEN (2018) erläutert den potenziellen Nutzen einer automatisierten Erfassung von Entwicklungsstadien im Hinblick auf die Verlängerung der Kornfüllphase: Zunehmende Frühsommertrockenheit führt zur Verkürzung der Kornfüllungsphase, sodass das Ertragspotenzial etlicher Sorten nicht ausgenutzt werden kann. Zur Stabilisierung landwirtschaftlicher Erträge unter diesen zunehmenden Extremwetterereignissen sind neue Sorten erforderlich, die sich nach Einschätzung dieses Experten auf folgende Aspekte stützen: 1) Genotypen, die infolge geringerer Sensibilität gegenüber Hitze und Trockenheit weniger anfällig für eine verkürzte Kornfüllungsphase sind. 2) Genotypen, die den klimatischen Entwicklungen durch eine Blütezeitverfrüherung entgegenwirken. Entsprechend dieser formulierten Ziele in der Getreidezüchtung sieht VERSTEGEN (2018) bei einer genotypspezifischen Erfassung in Bezug auf die zeitliche Dauer der Kornfüllphase bzw. den relevanten Blüte- und Reifezeitpunkten ein Anwendungspotenzial für spektralbasierte Untersuchungen. Auch wenn der technologische Nachweis zur Prädizierbarkeit dieser Zeitpunkte im Feld bislang nicht erbracht werden konnte, plädiert VERSTEGEN (2018) für weiterführende Forschungen in diesem für Pflanzenzüchter sehr bedeutsamen Anwendungsbereich.

7.2.5 Bestimmung der Malzqualität und weiterer verarbeitungsrelevanter Eigenschaften

Die Quantifizierung von qualitätsbestimmenden Eigenschaften im Hochdurchsatz auf technologischer Basis der Hyperspektralanalyse wird von den Züchtern durchgängig als äußerst innovativ und praxisrelevant erachtet. Die Selektion hinsichtlich der Brauqualität ist insbesondere für kleine bis mittelständische Saatzuchtunternehmen, die betriebsintern nicht über die technologischen Möglichkeiten der genomischen Selektion³⁵ verfügen, aufgrund folgender Aspekte eine immense Herausforderung (HANEMANN et al. 2018):

- 1) Mälzungen im Labor können aufgrund von geringem Kornmaterial nicht in frühen Generationen durchgeführt werden.
- 2) Infolge hoher Laborkosten (ca. 100 € je Probe) werden Untersuchungen zur Malzqualität üblicherweise erst zum Ende des Züchtungsprozesses mit einer deutlich reduzierten Anzahl an sehr aussichtsreichen Genotypen durchgeführt.
- 3) Die Analysedauer des extern beauftragten Labors ist für den Züchter meist unbefriedigend³⁶.

Die frühzeitige Erfassung von Brauqualitäten ist aufgrund der o. g. Faktoren mittels Laboranalytik gegenwärtig nicht wirtschaftlich. Die Folge: Ertragsstarke, aber qualitativ minderwertige Genotypen durchlaufen weitere Selektionsstadien, da Malzqualitäten erst am Ende des Züchtungsprozesses für einige wenige Kreuzungslinien mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand bestimmt werden. Die Implementierung eines hyperspektralen Hochdurchsatz-Verfahrens könnte diesem Informationsdefizit in jungen Züchtungsgenerationen entgegenwirken. Auch wenn STIEWE und SPILLER (2018) nach Darstellung der Zwischenergebnisse aus dem Projekt BARLEY BIODIVERSITY nicht der Annahme sind, dass die Hyperspektralanalyse kurzfristig zu einer Substitutionstechnologie für die Malzanalyse im Labor werden kann, wäre die Ermittlung einiger „Spezialparameter mit guter Vorhersagegenauigkeit“ der Brauqualität eine Option, um frühzeitig gezielte Selektionsentscheidungen treffen zu können.

Auf der Grundlage bisheriger Testergebnisse für die Prädiktion von Brauqualitäten sehen HANEMANN et al. (2018) insbesondere einen Nutzen für die Züchtung von Winterbraugerste: Aufgrund geringer Ertragseigenschaften der Winterbraugerste liegt das primäre Zuchtziel in der Erhöhung der Ertragsleistung. Dazu kreuzen Züchter qualitativ hochwertige Winterbraugerste mit ertragreicher Futtergerste, sodass die Brauqualität zu einem Faktor wird, der über die Eignung bzw. Nichteignung eines neuen Genotyps entscheidet. Je nachdem welche genetischen Eigenschaften des Elters weitervererbt werden, unterscheiden sich die Qualitäten bei Winterbraugerste sehr deutlich voneinander. HANEMANN et al. (2018) schätzen, dass eine Prädiktionsgüte von $R^2 > 0,7$ für Negativ-Selektionen ausreichend ist. Damit einhergehend könnten bis zu 25 % der Genotypen mit schlechter Braueignung selektiert werden. Da qualitative Unterschiede verarbeitungsrelevanter Braueigenschaften bei Sommergerste deutlich

³⁵ Auf dem Gebiet der Qualitätsanalyse besteht partiell eine Konkurrenz zwischen genomischer Selektion und der Hyperspektralanalyse. Malzqualitäten können ebenso mittels genomischer Selektion frühzeitig und im Vergleich zur Laboranalyse kostengünstiger detektiert werden (vgl. Unterpunkt 7.3.2.5). Allerdings verfügen lediglich große Saatzuchtunternehmen über die technologischen Möglichkeiten zur kostengünstigeren unternehmensinternen Durchführung der genomischen Selektion.

³⁶ Geschuldet ist das der Tatsache, dass die Labore zum Erntezeitpunkt voll ausgelastet sind. Da insbesondere die Züchtung von Sommergerste einer engen zeitlichen Taktung mit teilweise zwei jährlichen Aussaaten (jeweils einmal Nordhalb- und Südhalbkugel) unterliegt, hat die verzögerte Analyse für den Züchter die Konsequenz, dass Ergebnisse der Laboranalyse erst im übernächsten Selektionsschritt berücksichtigt werden können.

geringer sind als bei Wintergerste, ist die Hyperspektralanalyse im Züchtungsprozess von Sommergerste erst bei einer Verbesserung der Prädiktionsgenauigkeit eine wirkliche Alternative zur herkömmlichen Laboranalyse (HANEMANN et al. 2018).

Die Bestimmung qualitativer Eigenschaften durch Hyperspektralkameras in Kombination mit Methoden des Maschinellen Lernens könnte neben der Malzanalyse auch in weiteren Bereichen der Pflanzenzüchtung Anwendung finden. Die Bedeutung von NIRS wurde bereits zur Verdeutlichung des großen Potenzials sensorischer Qualitätsanalysen in der Pflanzenzüchtung angesprochen (vgl. Punkt 7.1.2). Jedoch ist die NIRS auf bestimmte Anwendungen beschränkt. FRAUEN (2018), dessen Züchtungsfokus auf Raps liegt, nennt die beiden Merkmale Rohfaseranteil und Erucasäure-Gehalt, die mittels NIRS bislang nur ungenügend erfasst werden können. Möglicherweise kann die Hyperspektralanalyse den Rahmen sensorischer Qualitätsanalysen erweitern und Standards etablieren, die über das Leistungsniveau von NIRS hinaus gehen (FRAUEN 2018). In diesem Kontext schätzt PILLEN (2018) die „höhere Sensitivität“ als maßgeblichen Vorteil der Hyperspektralanalyse ein.

7.2.6 Entscheidungsunterstützung zur Kreuzungsplanung

Als Grundlage eines erfolgreichen Züchtungsprozesses und wichtiger Arbeitsschritt eines jeden Züchters wird durch verschiedene Experten die Kreuzungsplanung angeführt. KEMPF (2018) schildert exemplarisch die Bedeutung einer umfangreichen und generationsübergreifenden Datenverfügbarkeit: Kreuzungen erfolgen nicht nach dem Zufallsprinzip, sondern auf der Basis phänotypischer und genomischer Daten über mehrere Generationen sowie dem inhärenten Wissen des Züchters. Umfangreiche Daten sowohl über die eigenen Zuchtstämme als auch über bereits zugelassene Sorten bilden die Grundlage für diese zentrale Entscheidungssituation, da idealerweise Eltern mit ergänzenden Eigenschaften kombiniert werden. Durch eine bessere Datenverfügbarkeit infolge hyperspektraler Phänotypisierung sieht KEMPF (2018) ein Potenzial für eine „gezielte Zusammenstellung von Kreuzungseltern“.

Über das Potenzial der Hyperspektralanalyse bezüglich effizienter Zusammenstellungen von Kreuzungseltern besteht jedoch kein Konsens unter den befragten Züchtern und CÖSTER (2018) schätzt den Beitrag der genomischen Selektion im Kontext der Kreuzungsplanung weitaus gewichtiger ein, sodass Daten der Hyperspektralanalyse eher als „Ergänzung zu den genomischen Daten“ genutzt werden könnten.

7.2.7 Anwendung im Precision Farming

DAMMER et al. (2018) nutzen Spektralanalysen im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Versuchen des Precision Farming und sehen in der hyperspektralbasierten frühzeitigen Analyse von Pflanzenkrankheiten ein Potenzial für positive ökonomische und ökologische Effekte in der praktischen Landwirtschaft. Durch die teilflächenspezifische Identifizierung im Entwicklungsstadium befindlicher Erkrankungen wäre nach Meinung dieser Experten ein besser dosierter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln möglich. Zudem könnten bei präsymptomatischer Behandlung Ertragseinbußen vermieden werden. Ideal wäre in diesem Zusammenhang eine „real-time Applikation auf der Basis [hyperspektral] ermittelter Befallsintensitäten“ (DAMMER et al. 2018). Mit Blick auf weitere mögliche Anwendungen im Precision Farming wurde von DAMMER et al. (2018) zudem die teilflächenspezifische Grunddüngung

diskutiert: Über die hyperspektrale Analyse der pflanzlichen Versorgung mit Makro- und Mikronährstoffen im Pflanzenbestand könnte indirekt auf das Versorgungsniveau des Bodens geschlossen werden. Da auf einem Feldstück einheitliche Genotypen angebaut werden, die sich hinsichtlich ihres Nährstoffaneignungsvermögens nicht unterscheiden, ist davon auszugehen, dass räumliche Veränderungen relevanter Nährstoffkonzentrationen in den Pflanzen (z. B. Phosphor und Kalium) auf heterogene Bodenverhältnisse zurückzuführen sind. DAMMER et al. (2018) sehen diesbezüglich bei hoher Analysegenauigkeit ein Potenzial zur Erkennung kleinräumiger Bodenunterschiede. Die Erfassung der Nährstoffe im Boden über die pflanzliche Aufnahme stellt nach Auffassung dieser Experten einen innovativen Ansatz dar, der in weiterführenden Forschungen Berücksichtigung finden sollte. Durch beide thematisierte Anwendungen (bedarfsgerechte Ausbringung von Pflanzenschutz und Grunddüngung) könnte eine hyperspektralbasierte Diagnosemethode dazu beitragen, das standortspezifische Ertragspotenzial nachhaltig auszunutzen (DAMMER et al. 2018).

7.3 Methodische und technologische Aspekte zur praktischen Anwendung der Hyperspektralanalyse in der Pflanzenzüchtung

7.3.1 Technologischer Entwicklungsstand

Die Expertenbefragung offenbart eine deutliche Diskrepanz zwischen den potenziellen Nutzungsmöglichkeiten der Hyperspektralanalyse und dem gegenwärtigen technologischen Entwicklungsstand. Bewertungsrelevante Äußerungen der Experten zur methodischen und technischen Umsetzung der Hyperspektralanalyse werden nachfolgend in Subkategorien klassifiziert.

7.3.1.1 Präzision der hyperspektralen Prädiktion pflanzlicher Merkmale

Die aus BARLEY BIODIVERSITY vorliegenden statistischen Zwischenergebnisse bezüglich der Prädiktionsgüte der Hyperspektralanalyse (vgl. Punkt 6.2.3), die den Experten als Grundlage für eine Bewertungseinschätzung im Vorfeld der Befragungen präsentiert wurden, basieren teilweise auf einjährigen Daten. Daher ist die Leistungsfähigkeit der Hyperspektralanalyse weiterhin durch „eine mehrjährige Modellvalidierung“ nachzuweisen (KEMPF 2018). Bei der Beurteilung des technischen Messergebnisses sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Modellgüte durch die Ausdehnung auf mehrere Versuchsjahre wahrscheinlich verbessert werden kann (PILLEN 2018).

BEHMANN (2018) vertritt die Auffassung, dass der Aussagegehalt statistischer Vorhersagegenauigkeiten durch die Validierungsmethode leave-one-out begrenzt ist. Er plädiert für die Notwendigkeit einer Modellprüfung an unabhängigen Daten, die nicht Teil des Trainingsdatensatzes sind. Insbesondere bei komplexen Merkmalen besteht laut BEHMANN (2018) die Gefahr von „overfitting des Modells“ und es ist zweifelhaft, ob die Vorhersagegenauigkeit der leave-one-out-Validierung bei Modellanwendung an bislang unbekanntem Daten bestätigt werden kann. Eine Einschätzung, die von weiteren Experten bestätigt wird: Eine hohe Vorhersagegenauigkeit von Zielvariablen in einem bekannten Datensatz ist „kein Kriterium für die Modellgüte“ (DAMMER et al. 2018). Die Vorhersagegenauigkeit des Testdatensatzes von $R^2 > 0,6$ sollte als Voraussetzung für eine Systembewertung und eine mögliche Eignung für die Pflanzenzüchtung an unabhängigen Daten nachgewiesen werden (WELZ 2018).

Die Genauigkeit der hyperspektralen Merkmalerfassung wird von befragten Züchtern teilweise als unzureichend eingeschätzt. WELZ (2018) kritisiert, dass der „Schätzfehler für praktische Anwendungen

zu groß“ ist. Da neben der natürlichen Umweltvariabilität eine große Messvariabilität vorhanden ist, kann das System den Ansprüchen der Züchtung gegenwärtig nicht umfassend entsprechen (STIEWE und SPILLER 2018). Auch für VERSTEGEN (2018) ist der „Leistungsnachweis [anhand der gegenwärtigen statistischen Daten] nicht erbracht“. Für HANEMANN et al. (2018) ist die Hyperspektralanalyse bislang „kein Ersatz für den visuellen Blick des Züchters“. Züchtung allein anhand sensorischer bzw. hyperspektraler Daten ist „nicht vorstellbar“, denn der „Züchter geht immer ins Feld“ (HANEMANN et al. 2018).

7.3.1.2 Prozess der Datenanalyse

Da die Hyperspektralanalyse im Hinblick auf die Nutzbarkeit ein „unspezifischer Sensor“ mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten ist, wird der Prozess der „Datenanalyse umso entscheidender“, wenn es um die spezifische Interpretation der Daten geht (BEHMANN 2018). Die Modellierung basiert auf dem mittels herkömmlicher Laboranalyse bzw. Handbonitur erhobenen Wert für die jeweilige züchtungsspezifische Zielgröße. Diese Erhebung des zu modellierenden Zielwertes mit einer hinreichend genauen Präzision stellt dementsprechend eine maßgebliche Voraussetzung für die Modellgüte dar. Laut HANEMANN et al. (2018) ist diese Präzision nicht für alle Merkmale gleichermaßen zu gewährleisten. Deutlich gemacht wird dies anhand des Merkmals Ähren/m²: Dieses Merkmal wird standardmäßig erhoben, indem auf einer Parzelle eine repräsentative Fläche (z. B. 1 m²) ausgezählt wird. Es ist allerdings fraglich, ob der ermittelte Wert auch auf den Rest der Fläche übertragbar ist, da dieses Merkmal einer zufälligen Streuung im Pflanzenbestand unterliegt. Der mittels Handbonitur bestimmte Zielwert unterliegt daher einem großen zufälligen Einfluss, je nachdem, an welcher Stelle der Testparzelle ausgezählt wurde. Da die mathematische Modellierung der Zielvariablen (z. B. Ähren/m²) abhängig von dem händisch bonitierten Wert ist, bezweifeln diese Befragten die Zuverlässigkeit der Prädiktion. Aufgrund der „falschen Eingangsdaten“ kann keine exakte Kalibrierung stattfinden (HANEMANN et al. 2018). Angesichts der erläuterten Problematik stellt auch VERSTEGEN (2018) die Objektivität der Hyperspektralanalyse infrage. Seiner Einschätzung nach kann ein Messverfahren, das mit subjektiven Eingangsdaten kalibriert wurde, „keine objektiven Ergebnisse“ liefern (VERSTEGEN 2018).

Im Rahmen der Experteninterviews wurde auch die Genauigkeit der Laboranalyse für die Modellierung pflanzlicher Inhaltsstoffe diskutiert. FRAUEN (2018) erläutert aus seiner Erfahrung, dass es bei der Qualität der Laborergebnisse trotz Standarderhebungsverfahren deutliche Unterschiede gibt. Diesbezüglich bestehen bei diesem Experten Zweifel hinsichtlich einer exakt durchführbaren Kalibrierung für die hyperspektrale Prädiktion von Makro- und Mikronährstoffen. Dabei wird insbesondere die Tatsache kritisiert, dass die Systemkalibrierung in BARLEY BIODIVERSITY lediglich aufgrund eines einzigen Laborwertes durchgeführt wird (FRAUEN 2018).

Im Kalibrierungsprozess sieht auch WELZ (2018) ein methodisches Defizit. Dabei wird insbesondere die Methodik der Probenentnahmen innerhalb des zugrunde liegenden Forschungsprojektes hinterfragt. Seine Bedenken gründen sich darauf, dass die laboranalytische Inhaltsstoffbestimmung anhand von Blattproben der Fahnenblätter durchgeführt wird, während sich das hyperspektrale Messergebnis auf die Gesamtpflanze bezieht. Aufgrund von Nährstoffverlagerungsprozessen innerhalb der Pflanze und Unterschieden zwischen jungen und alten Blättern wird diese Vorgehensweise kritisch eingeschätzt und als mögliche Ursache für Messfehler angeführt (WELZ 2018). In diesem Zusammenhang wird von

zwei Experten Bedenken an der Größe des Testdatensatzes für die Inhaltsstoffanalyse geäußert: KICHERER (2018) hinterfragt, ob die Auswahl von 10 % der Prüfglieder für nass-chemische Laboranalysen in Bezug auf eine genaue Kalibrierung ausreichend ist. Auch BEHMANN (2018) erwartet bei einer Vergrößerung des Testdatensatzes eine präzisere Modellbildung. PILLEN (2018) bestätigt, dass „eine Erhöhung des Stichprobenumfangs für eine bessere Kalibrierung“ notwendig ist.

Die Modellierung von Entwicklungs- und Ertragsparametern erfolgte in BARLEY BIODIVERSITY teilweise zeitpunktunabhängig. Spektrale Untersuchungen zu frühen pflanzlichen Entwicklungszeitpunkten wurden genutzt, um phänotypische Merkmale zu präzisieren, deren exakte Ausprägung erst zu späteren Stadien messbar ist (z. B. die Vorhersage von TKG zum BBCH³⁷-Stadium 31). Laut BEHMANN (2018), einem sachkundigen Experten auf dem Gebiet der Auswertung hyperspektraler Daten, sind „Historie und Zukunft eines Plots nicht aus den Spektren abzuleiten“. Es ist bei spektralen Daten insbesondere schon aufgrund des Witterungseinflusses „nicht möglich, von einem Zeitpunkt auf den anderen zu schließen“ (BEHMANN 2018). Demgegenüber wird von PILLEN (2018) darauf verwiesen, dass „relative Unterschiede zwischen den Genotypen frühzeitig [spektral] erfassbar sind“. Stressbedingte Entwicklungen führen zu einer „linearen Verschiebung“, sodass aus der spektralen Signatur „frühzeitige Tendenzen“ hinsichtlich der genotypspezifischen Merkmalsausprägung abzuleiten sind (PILLEN 2018).

7.3.1.3 Auswahl des Wellenlängenbereiches

Ein weiterer Kritikpunkt, der im Rahmen der Befragungen offenbar wurde, ist die Auswahl des Wellenlängenbereiches. Die im Forschungsprojekt BARLEY BIODIVERSITY verwendete Hyperspektralkamera deckt einen Wellenlängenbereich von 1000 bis 2500 nm ab. DAMMER et al. (2018) verweisen darauf, dass die meisten Erfahrungen auf dem Gebiet der Spektralanalyse mit Wellenlängen im sichtbaren und nahen Infrarotbereich (VIS-NIR) existieren. Da unbekannt ist, in welchen Wellenlängenbereichen die jeweilige Merkmalsausprägung spektroskopisch sichtbar wird, ist die technologische Nichtberücksichtigung der Wellenlängen von 400 bis 1000 nm „methodisch zweifelhaft“ (DAMMER et al. 2018). WELZ (2018) vermutet, dass bestimmte phänotypische Merkmale mit Hilfe des verfügbaren Sensors in BARLEY BIODIVERSITY „gar nicht erfasst werden können“ und die Nichtberücksichtigung des VIS-NIR-Bereiches die „Vorhersage [spezifischer pflanzlicher Parameter] beschränkt“. Diese Problematik wurde auch im Expertengespräch mit KICHERER (2018) aufgegriffen, die im Rahmen ihrer Forschung zur Phänotypisierung in der Rebenzüchtung umfangreiche Erfahrungen mit der Hyperspektralanalyse gemacht hat. Aus ihren Projekterkenntnissen mit der Phänotypisierungsplattform „Phenoliner“ berichtet sie, dass sowohl der VIS-NIR- als auch SWIR-Bereich (kurzwelliges Infrarot) mit zwei getrennten Hyperspektralkameras erfasst werden. Ihre Forschungsergebnisse dokumentieren, dass der VIS-NIR-Bereich von größerer Bedeutung ist (KICHERER et al. 2017). Ob dies in gleicher Weise auch für pflanzliche Inhaltsstoffe gilt, kann im Experteninterview nicht eingeschätzt werden; trotzdem wird die Erfassung des Wellenlängenbereiches bis 1000 nm als relevant erachtet (KICHERER 2018). BEHMANN (2018) bestätigt, dass der VIS-NIR-Bereich bessere Informationen in Bezug auf Pflanzenkrankheiten und -pigmente liefert, da sowohl der Wissensstand als auch die Qualität der Kameras in diesem Bereich höher sind als im SWIR-Bereich.

³⁷ Der BBCH-Code gibt Auskunft über das morphologische Entwicklungsstadium einer Pflanze.

7.3.1.4 Berücksichtigung von Störgrößen unter Freilandbedingungen

Messergebnisse unter Freilandbedingungen unterliegen immer gewissen Störeinflüssen, die sich auch methodisch nicht gänzlich verhindern, sondern lediglich minimieren lassen. Wissenschaftlich exaktes Arbeiten erfordert in diesem Zusammenhang spezifische Kenntnisse über den Einflussbereich ergebnisrelevanter Störgrößen, um entsprechende Präventionsmaßnahmen ergreifen zu können. Als Kritik an den Projektergebnissen aus BARLEY BIODIVERSITY wird im Rahmen der Expertenbefragungen die methodische Vernachlässigung von Wechselwirkungen zwischen Witterung und Reflexion geäußert. Nach Auffassung von VERSTEGEN (2018) besteht einerseits das Ziel, minimale genotypspezifische Veränderungen der Nährstoffkonzentrationen anhand der Reflexionseigenschaften zu detektieren; andererseits scheint für diesen Experten offensichtlich, dass „zeitliche Veränderungen der Reflexion“ im Verlauf der über mehrere Stunden mittels AgRover durchgeführten Aufnahmefahrten einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Qualität der Rohdaten darstellen.

DAMMER et al. (2018) verfügen auf dem Gebiet der Sensorik in der Landtechnik über ein fundiertes Hintergrundwissen und vermuten, dass Wärmestrahlung bei den Messfahrten im Projekt BARLEY BIODIVERSITY erhebliche Auswirkungen auf die spektrale Signatur des Pflanzenbestandes hat, sodass nachfolgende Parameter beeinflusst werden:

- 1) Durch die Wärmeentwicklung beim Einsatz von Halogenstrahlern (zur Erzeugung gleichbleibender Lichtverhältnisse) könnte sich ein konstanter technisch bedingter Messfehler ergeben.
- 2) Der Faktor Wärme unterliegt witterungsbedingten Einflüssen und ein von Sonnenstrahlung aufgeheizter Pflanzenbestand wird sich im Reflexionsgrad im Vergleich zu Pflanzen unter Beschattung unterscheiden.
- 3) Die Reflexion unterliegt tageszeitlichen Schwankungen, sodass der Messzeitpunkt (Fahrt am Morgen bzw. Fahrt am Mittag) einen Einfluss auf das spektrale Messergebnis ausüben wird.

VERSTEGEN (2018) bestätigt den Einfluss der Wärmestrahlung auf das Messergebnis der Hyperspektralanalyse und erläutert, dass tageszeitliche Wärmeschwankungen Auswirkungen auf die Parameter Blattflächentemperatur, Blattstellung und osmotischer Druck haben, die ihrerseits die spektrale Signatur beeinflussen. KICHERER (2018) bemerkt, dass sich in Abhängigkeit der tageszeit- bzw. wärmespezifischen Bedingungen auch die Konzentration von Blattinhaltsstoffen und Metaboliten innerhalb der Pflanze verändert. Zudem besteht nach Einschätzung von VERSTEGEN (2018) bei der hyperspektralen Phänotypisierung verschiedenartiger Genotypen das Problem unterschiedlicher Bestandsdichten. Während bei frühen Genotypen bereits ein Reihenschluss zu verzeichnen ist, weisen späte Genotypen einen deutlich geringeren Bedeckungsgrad auf (VERSTEGEN 2018). Diese Argumentation wird durch Aussagen von BEHMANN (2018) gestützt, der mit Verweis auf BEHMANN et al. (2016) auf den großen Einfluss der Blattgeometrie und dem spezifischen Aufnahmewinkel bei hyperspektralen Aufnahmen aufmerksam macht.

Tageszeitliche Wärmeschwankungen korrelieren darüber hinaus stark mit dem Wassergehalt innerhalb der Pflanzen, sodass in drei Experteninterviews über den Einfluss von Wasserabsorptionsbanden diskutiert wurde (KICHERER 2018; DAMMER et al. 2018; BEHMANN 2018): Da Pflanzen „bis zu 90 % aus Wasser bestehen“ wird vermutet, dass die eigentlichen Zielvariablen (z. B. chemische Elemente)

„durch Effekte der Wasserversorgung überlagert“ werden (DAMMER et al. 2018). BEHMANN (2018) erläutert, dass insbesondere Messungen im SWIR-Bereich (1000 bis 2500 nm) aufgrund charakteristischer Wasserbanden anfällig gegenüber Wasserschwankungen sind. Da Kornmaterial höhere Trockensubstanzgehalte aufweist, wird die hyperspektrale Inhaltsstoffbestimmung des Korns als „weniger sensibel“ eingeschätzt und als Erklärung im Hinblick auf die bessere Prädizierbarkeit für Merkmale im Korn angeführt (DAMMER et al. 2018). Um den Einfluss von Wasser auf die Prognosegüte nicht linearer Multiregressionsmodelle zu testen, schlägt KICHERER (2018) die Simulation von Trockenstress im Laborversuch vor. In ähnlicher Weise wie Überlappungseffekte durch Wasser die Vorhersage von Blattinhaltsstoffen beeinflussen, können möglicherweise auch Absorptionsbanden einzelner Nährstoffe nicht unmittelbar voneinander getrennt werden (DAMMER et al. 2018). Infolge der „Überlappung von Absorptionsbanden“ wird die nährstoffspezifische Eingrenzung des zu untersuchenden Wellenlängenbereiches für multispektrale Anwendungen als kritisch angesehen (DAMMER et al. 2018).

7.3.2 Züchterische Relevanzen für den praktischen Einsatz der Hyperspektralanalyse

Aus den erläuterten methodischen und technologischen Defiziten lassen sich bereits notwendige Erfordernisse für den Weiterentwicklungsprozess hyperspektralbasierter Phänotypisierung ableiten. Vornehmlich besteht der Anspruch zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit, um speziell die Leistungsfähigkeit der Hyperspektralanalyse für die Prädiktion entwicklungs- und ertragsrelevanter Parameter nachweisen zu können. In den nachfolgenden Unterpunkten werden darüber hinaus weitere aus Züchtungsperspektive relevante Indikatoren für die Anwendung der Hyperspektralanalyse klassifiziert.

7.3.2.1 Messgenauigkeit

Als grobe Orientierung für die Erreichung einer aus Sicht der Pflanzenzüchter zufriedenstellenden Prädiktionsgüte lassen sich aus den Experteninterviews Bestimmtheitsmaße (R^2) ab 0,7 identifizieren. Ein Züchter betont, dass insbesondere bei Felddaten aufgrund des bereits diskutierten Einflusses von Störgrößen keine bessere Merkmalerfassung als $R^2 = 0,7$ zu erwarten ist (FRAUEN 2018). Für STIEWE und SPILLER (2018) liegt der kritische prädiktive Wert etwas höher ($R^2 > 0,8$). Hinsichtlich der für Praxisanwendungen erforderlichen Prädiktionsgüte der Hyperspektralanalyse ist ungeachtet dessen zu erwähnen, dass generelle Aussagen diffizil sind. VERSTEGEN (2018) legt dar, dass diesbezüglich individuell in Abhängigkeit von der Relevanz des Züchtungsmerkmals, der Präzision der genomischen Selektion und dem Erhebungsaufwand mittels herkömmlicher Analyse zu differenzieren ist. In diesem Kontext verweisen HANEMANN et al. (2018) darauf, dass die Vorhersage des Proteingehaltes zwar die höchste hyperspektrale Prädiktionsgüte generiert ($R^2 = 0,93$), diese jedoch aus praktischer Sicht des Pflanzenzüchters nicht relevant ist, da es mit NIRS bereits eine kostengünstige und etablierte Substitutionstechnologie gibt.

7.3.2.2 Messgeschwindigkeit

Neben technischer Effizienz sowie Aspekten der Robustheit und Benutzerfreundlichkeit betonen befragte Züchter vor allem eine wichtige Eigenschaft der Phänotypisierungstechnologie für den Praxiseinsatz: die Messgeschwindigkeit. Die Hyperspektralanalyse besitzt definitiv das Potenzial zur Hochdurchsatz-Phänotypisierung, da idealerweise mehrere Merkmale anhand gleicher Eingangsdaten erfasst

werden können (BEHMANN 2018). Ob dieser Hochdurchsatz unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten jedoch durch eine nicht automatisierte Phänotypisierungsplattform zu realisieren ist, wird infrage gestellt (KEMPF 2018; KICHERER 2018). Als derzeitige technische Limitation wird die Aufnahmegeschwindigkeit der Kameras diskutiert (KICHERER 2018). In diesem Kontext thematisieren WELZ (2018) und FRAUEN (2018) das Potenzial von Drohnen in Ergänzung mit der Spektralanalyse für die Feld-Phänotypisierung. Durch die Erfassung eines „großen Feldausschnittes“ könnte das Kriterium Hochdurchsatz zukünftig erfüllt werden (WELZ 2018). Jedoch ist nach Auffassung von KICHERER (2018) die Messgenauigkeit bei Anwendung von Methoden der Fernerkundung im Vergleich zu bodennahen Verfahren immer ein bestimmender Faktor: Eine Erhöhung des Durchsatzes geht zu Lasten der Auflösung, verbunden mit einer Verschlechterung der Prädiktionsgüte (KICHERER 2018).

7.3.2.3 Datenmanagement

Für Pflanzenzüchter ist eine benutzerfreundliche und einfache Datenauswertung ein entscheidendes Akzeptanzkriterium im Hinblick auf technologische Anwendungen. Ein befragter Züchter stellt bezüglich der Datenaufbereitung eine entscheidende Frage: „Was machen wir mit den Daten?“ (WELZ 2018). HANEMANN et al. (2018) bezweifeln, dass auf Ebene der Saatzüchter überhaupt die infrastrukturellen Voraussetzungen für den Umgang und die Auswertung großer Datenmengen, wie sie bei der Hyperspektralanalyse anfallen, vorhanden sind. Aus anwendungsorientierter Perspektive besteht diesbezüglich das Erfordernis einer effizienten „Datenauswertung mittels Software“, sodass die spektralen Daten in Echtzeit in züchtungsrelevante Informationen überführt werden können (WELZ 2018). PILLEN (2018) bestätigt, dass die zeitliche Diskrepanz zwischen Datenmessung und -verarbeitung ein limitierender Faktor ist und erheblicher Bedarf zur Optimierung der zeitlichen Abläufe besteht.

7.3.2.4 Investitions- und Anwenderisiken

DAMMER et al. (2018) argumentieren, dass Forschungen zur Hyperspektralanalyse aus Kostengründen nur dann einen Nutzen auf praktischer Ebene entfalten können, wenn Wellenlängenintervalle mit spezifischer Verbindung zur Zielvariablen nachgewiesen werden. Andernfalls sind nach Auffassung dieser Befragten die Investitionskosten und die damit verbundenen Risiken für den Anwender zu hoch. Exemplarisch wird der REIP im Zusammenhang mit dem Chlorophyllgehalt als Grundlage für den kostengünstigen N-Sensor in der Landtechnik angeführt (DAMMER et al. 2018).

Die Expertenbefragungen bringen zum Ausdruck, dass die Investitionskosten und -risiken für eine Hyperspektralkamera unter den gegebenen derzeitigen Rahmenbedingungen zu groß sind. HANEMANN et al. (2018) weisen auf die Notwendigkeit hin, Genotypen unter verschiedenen Umwelten zu prüfen: Kommerzielle Pflanzenzüchtung erfolgt nicht standortgebunden; dies gilt auch für die Beschaffung und Anwendung sensorischer Phänotypisierung. Da pflanzliche Merkmale an allen Züchtungsstandorten saisonbedingt zum gleichen Entwicklungszeitpunkt erfasst werden müssen, reicht die einmalige Investition in Sensorik nicht aus, sondern es sollte idealerweise die gleiche Sensorik auf allen Standorten verfügbar sein, sodass identische Vergleichsparameter für die Messwerte vorliegen (HANEMANN et al. 2018). Dies impliziert für alle Standorte gleiche Investitionskosten in Verbindung mit einer Erhöhung sowohl des Investitionsvolumens als auch des -risikos.

KICHERER (2018) argumentiert in diesem Zusammenhang, dass nur „low-cost-Systeme“ eine Nutzungsoption für mittelständische Saatzuchtunternehmen darstellen. Laut ihrer Einschätzung ist die Hyperspektralanalyse eher als Vorläufer zu werten. Plattformen mit Hyperspektralkameras sind Prototypen und generieren wertvolle Forschungserkenntnisse im Hinblick auf die Erfassung charakteristischer Wellenlängen. Als Praxislösung sind multispektrale Systeme „mittelfristig in fünf bis zehn Jahren“ zu erwarten (KICHERER 2018).

7.3.2.5 Entwicklungsrichtung auf dem Gebiet der genomischen Selektion

Als ein wesentlicher Bestimmungsfaktor für die Akzeptanz der Hyperspektralanalyse wird durch zwei Züchter die perspektivische Entwicklung auf dem Gebiet der genomischen Selektion angesprochen. Punktuell besteht eine „Konkurrenz zwischen genomischer Selektion und der Hyperspektralanalyse“ (KEMPF 2018). Diese Konkurrenz wird durch VERSTEGEN (2018) anhand der in BARLEY BIODIVERSITY angestrebten hyperspektralen Erfassung von Malzqualitäten der Braugerste erläutert: Unter Verweis auf SCHMIDT et al. (2016) argumentiert er, dass Brauqualitäten bereits mittels genomischer Selektion mit einer Genauigkeit von bis zu $R^2 = 0,8$ vorherzusagen sind. Aufgrund dieser guten Vorhersagewerte der genomischen Selektion, die durch regelmäßige Validierungsstichproben mittels herkömmlicher nass-chemischer Laboranalyse bestätigt werden, wird dieses Verfahren bereits zur Erhöhung der Selektionsintensität in jungen Züchtungsgenerationen angewandt. Die Kosteneinsparungen im Vergleich zur Laboranalyse liegen bei ca. 70 %, wobei dieser Experte von einem im Zeitverlauf steigenden Kostenvorteil ausgeht³⁸. Auch wenn diese Genauigkeit bei der genomischen Selektion nicht für alle Qualitätskomponenten gleichermaßen erreicht wird, kann VERSTEGEN (2018) beim Abgleich mit den Ergebnissen aus BARLEY BIODIVERSITY keine Verbesserung der Merkmalerfassung durch die Hyperspektralanalyse feststellen. Laut seiner Einschätzung entscheiden zwei Kriterien über die Wahl des Analyseverfahrens: 1) statistische Messgenauigkeit und 2) Analysekosten. Trotz tendenziell sinkender Kosten der genomischen Selektion betont dieser Züchter, dass hohe Fixkosten der Hyperspektralkamera bei entsprechend hohem Durchsatz auf eine große Anzahl von Prüfgliedern aufgeteilt werden, sodass potenziell ein Kostenvorteil der Hyperspektralanalyse entstehen könnte. Da diesbezüglich derzeit keine Bewertung möglich ist, sollte der Ansatz der hyperspektralen Erfassung von Brauqualitäten nach seiner Einschätzung weiterverfolgt werden. Von diesem Experten wird jedoch gegenwärtig der genomischen Selektion ein höheres Potenzial beigemessen (VERSTEGEN 2018).

7.3.2.6 Robustheit der Modelle

Bezüglich der praktischen Anwendung der Hyperspektralanalyse ist die Robustheit erstellter nicht linearer Multiregressionsmodelle für die Schätzung spezifischer Züchtungsmerkmale eine wesentliche Determinante. Nicht zuletzt aufgrund der im Unterpunkt 7.3.1.4 diskutierten Störeinflüsse hat KEMPF (2018) Zweifel an einer witterungs- und tageszeitunabhängigen Kalibrierung. Die Testdaten wurden an den Standorten Halle, Merbitz und Morgenrot erhoben. Aufgrund standortspezifischer Charakteristik

³⁸ Aus anderen geführten Experteninterviews wurde deutlich, dass kleine Saatzuchtunternehmen nicht über die technologischen Möglichkeiten zur kostengünstigen unternehmensinternen Durchführung von genomischer Selektion verfügen. Da die genomischen Daten von externen Dienstleistern analysiert werden müssen, ist der Kostenvorteil für diese Unternehmen deutlich geringer. Insbesondere deshalb wird in der hyperspektralen Bestimmung der Malzqualität eine zukünftige Nutzungsoption gesehen (vgl. Punkt 7.2.5).

(Klima, Boden) ist es fraglich, ob die entsprechenden Modelle auch für andere Standorte mit deutlich differenzierten Wachstumsbedingungen genutzt werden können (KEMPF 2018). KICHERER (2018) hält den Aspekt der regionalen Modellübertragbarkeit für sehr wesentlich und empfiehlt sortenspezifische Kalibrierungen. WELZ (2018) argumentiert, dass sorten- bzw. genotypspezifische Kalibrierungen in der Getreidezüchtung aufgrund der hohen Anzahl von Genotypen nicht möglich sind. Diesbezüglich schlussfolgert dieser Experte, dass die Robustheit der Modelle ein entscheidender Bestimmungsfaktor für praxisnahe Anwendungen ist (WELZ 2018).

7.3.2.7 Monetäre Honorierung züchterischer Merkmalsverbesserungen

Neben technischer Effizienz des Messverfahrens (hohe Genauigkeit bei der Prädiktion der Zielvariablen) spielen wirtschaftliche Bestimmungsfaktoren im Hinblick auf die Akzeptanz der Hyperspektralanalyse eine ebenso bedeutsame Rolle (vgl. Unterpunkt 7.1.3.1). Im Rahmen der geführten Leitfadenterviews wurde insbesondere von VERSTEGEN (2018) und CÖSTER (2018) die Frage aufgegriffen, inwieweit die Erfassung spezifischer Pflanzenmerkmale mittels Hyperspektralanalyse Einfluss auf den Unternehmenserfolg ausübt. Mögliche Kosteneinsparungen durch den Einsatz der Technologie sind diesbezüglich lediglich ein Aspekt. Zudem gilt es, den technologischen Beitrag an betrieblich erfolgswirksamen Einzahlungen zu quantifizieren. Potenziell können hyperspektrale Daten Selektionsentscheidungen unterstützen und damit einen Beitrag zur Züchtung neuer Sorten leisten, wodurch für den Züchter kulturartenspezifisch höhere Vermarktungsanteile zu realisieren sind. Anhand von Beispielen erläutern zwei Züchter die Spezifität der Sortenvermarktung und vertreten die Auffassung, dass Züchtungsfortschritt nicht immer monetär honoriert wird (VERSTEGEN 2018; CÖSTER 2018). Mit Blick auf die in BARLEY BIODIVERSITY angestrebten Ziele einer nicht-invasiven Erfassung von Pflanzeninhaltsstoffen und Qualitätseigenschaften ergeben sich interessante Rückschlüsse im Hinblick auf die Praxisrelevanz der Innovation.

VERSTEGEN (2018) greift ein Beispiel bei der Vermarktung der projektrelevanten Kulturart Sommergerste auf: Obwohl Qualitätseigenschaften, wie z. B. Schaumbildung und -stabilität, vom Handel erwünscht sind, spielen diese Merkmale in der Züchtung eine untergeordnete Rolle, da die genetische Verbesserung dieser vermarktungsrelevanten Eigenschaften „vom Markt nicht monetär honoriert“ wird (VERSTEGEN 2018). „Der Markt bewertet Protein und Ertrag“ (VERSTEGEN 2018). In seiner Argumentation nimmt dieser Experte Bezug auf die landwirtschaftliche Wertschöpfungskette und beklagt, dass lediglich die Verarbeitungsindustrie und der Lebensmitteleinzelhandel durch die Sortendiversifizierung sowie verbesserte Qualitätseigenschaften profitieren. Zwar können im Idealfall durch Vertragsanbau auch Landwirte an höheren qualitätsbedingten Gewinnmargen beteiligt werden, doch der Züchter verdient im Regelfall sehr wenig daran (VERSTEGEN 2018). Weizenzüchter CÖSTER (2018) argumentiert ähnlich: Durch sog. Waxy-Weizen ist es züchterisch gelungen, die Stärkezusammensetzung im Korn zu verändern, wodurch bei späterer Verarbeitung bessere Haltbarkeiten realisiert werden können. Solche Qualitätsverbesserungen rentieren sich finanziell jedoch nicht, da bei der Sortenbewertung Ertragseigenschaften im Vordergrund stehen (CÖSTER 2018). Aufgrund der erläuterten Beispiele sehen diese beiden Züchter momentan einen geringen Bedarf zur Erfassung von Makro- und Mikronährstoffen sowohl in der Pflanze als auch im Korn. Für beide Experten hat die sensorische Erfassung ertragsbestimmender Faktoren übergeordnete Priorität.

8 Ergebnisdiskussion und forschungsleitende Schlussfolgerungen

8.1 Fazit zur sozioökonomischen Bedeutung der Pflanzenzüchtung (Forschungsfrage I a)

Bei der Projektion gegenwärtiger Entwicklungstendenzen in die Zukunft ist der Pflanzenzüchtung eine zentrale Position zur Lösung agrarischer Herausforderungen beizumessen. Der zeitliche Bedeutungszuwachs des agrartechnischen Fortschritts auf globaler Ebene (vgl. Abbildung 1) ist aufgrund mangelnder Alternativen zur Ertragssteigerung eine logische Konsequenz. Bereits LOBELL et al. (2011: 619) weisen im Zusammenhang mit klimatischen Veränderungen darauf hin, dass der technische Fortschritt eines Jahres dazu beitragen kann, die negativen Wirkungen des Klimawandels von zehn Jahren zu kompensieren. Anhand der vorgestellten Ergebnisse ausgewählter Studien zur Erfassung des historisch genetischen Ertragsfortschritts in Deutschland (vgl. Punkt 2.2.1) konnte verdeutlicht werden, dass die Züchtung im Hinblick auf die Produktivität das zentrale Element des agrartechnischen Fortschritts darstellt und ca. 50 % des Ertragsfortschritts genetisch bedingt sind.

Der bereits von SCHUSTER (1997) im Kontext mit Produktivitätsverbesserungen eruierte zeitliche Bedeutungszuwachs der Pflanzengenetik lässt sich durch Studien auf internationaler Ebene verifizieren. Eine Analyse zur Ertragsentwicklung in Entwicklungsländern zeigt, dass der Sorteneinfluss zwischen 1960 und 1980 bei ca. 20 % liegt; zwischen 1981 und 2000 wuchs dieser Anteil auf ca. 50 % (EVENSON und GOLLIN 2003: 760). Ein im Zeitverlauf wachsender Einfluss der Genetik am Ertragsfortschritt konnte zudem für die in BARELY BIODIVERSITY relevante Versuchskultur Sommergerste nachgewiesen werden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Anteil der Pflanzenzüchtung an den Ertragssteigerungen für Sommergerste im Zeitraum von 1946 bis 2008

Zeitintervall	1946 - 1960	1961 - 1980	1981 - 2008
genetisch bedingter Einfluss am Ertragswachstum	29 %	43 %	78 %

Quelle: Eigene Darstellung (2018) nach LILLEMO et al. (2009: 487).

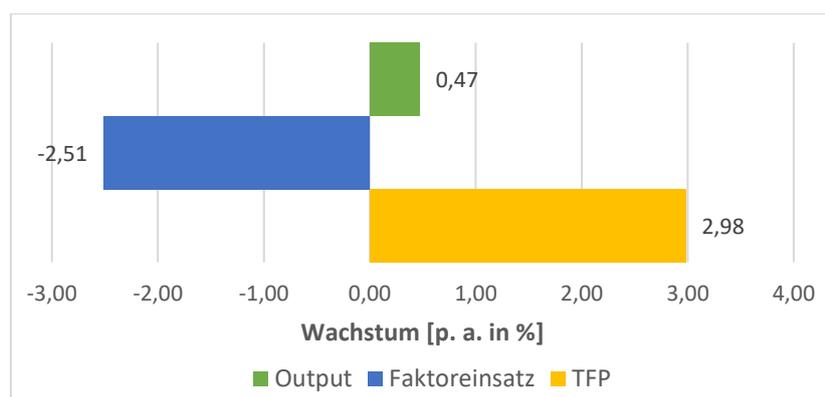
Die wachsende genetische Bedeutsamkeit steht im Kontrast zu der unter Landwirten häufig verbreiteten Ansicht, dass der Züchtungsfortschritt seit der Jahrtausendwende stagniert. Zwar sinken die jährlichen Ertragszuwächse, doch das vorhandene Wachstum basiert in überproportionaler Weise auf genetisch bedingten Veränderungen, die der Pflanzenzüchtung direkt zurechenbar sind. Vielfach wird das genetische Potenzial nur unter optimalen Anbaubedingungen sichtbar, sodass eine deutliche Divergenz zwischen genetischem Ertragspotenzial und Praxiserträgen besteht. SCHUSTER (1997: 14) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Praxiserträge im Zeitraum von 1952 bis 1993 für Getreide im Vergleich zu Sortenprüfungen durchschnittlich um 22 % niedriger lagen. LAIDIG et al. (2014) zeigen, dass sich diese Diskrepanz in den vergangenen Jahren aufgrund der unter Punkt 2.2.2 erläuterten Zusammenhänge teilweise noch vergrößert hat.

Bei der Interpretation des Bedeutungszuwachses der Züchtung ist hervorzuheben, dass es sich um einen relativen Bedeutungsgewinn handelt. Der biologisch-technische Fortschritt wird in diesem Zusammenhang im Verhältnis zu anderen Determinanten des technischen Fortschritts bewertet. Ein relativer

Bedeutungszuwachs ist nicht gleichzusetzen mit einer Beschleunigung des Züchtungsfortschritts. Dies ist u. a. dadurch bedingt, dass die Entwicklungen im Bereich der Agrartechnik (mechanisch-technischer Fortschritt) zumindest in den westlichen Industrieländern weitestgehend ausgereizt sind. Hinzu kommt, dass unter dem Einfluss der politischen Nachhaltigkeitsdebatte auch andere innovationsstarke Forschungsschwerpunkte (z. B. Precision Farming) nicht primär auf Ertragssteigerungen (Verschiebung der Produktionsfunktion) ausgerichtet sind. Vielmehr gilt es in diesem Zusammenhang, ein verbessertes Verständnis standortspezifischer Produktionsfunktionen zu erlangen, um das vorhandene Potenzial unter wirtschaftlichen und ökologischen Restriktionen optimal ausschöpfen zu können.

Die Entwicklung landwirtschaftlicher Produktivität wird in der Europäischen Union (EU) zunehmend auch durch politische und gesellschaftliche Aspekte bestimmt. Die verstärkte politische Betonung von Nachhaltigkeitszielen wird u. a. an verschärften Zulassungsverfahren für neue Pflanzenschutzmittel und strikteren Reglementierungen im Umgang mit Stickstoffdünger deutlich. Durch diese politischen und gesetzlichen Restriktionen und der damit verbundenen Verringerung der Anbauintensität reduziert sich Ceteris Paribus auch das Ertragspotenzial der Kulturpflanzen. Abbildung 28 zeigt für Deutschland im Zeitraum von 2000 bis 2009 einen rückläufigen Faktoreinsatz von jährlich ca. 2,5 %. Diese Verringerung des Faktoreinsatzes begründet sich neben den genannten politischen Aspekten zudem aus einem reduzierten Arbeitseinsatz und einem leicht geringeren Einsatz des Produktionsfaktors Boden. Das innerhalb dieses Zeitraums erreichte Produktionswachstum von jährlich ca. 0,5 % kann folglich nicht mit dem verstärkten Einsatz von Produktionsfaktoren begründet werden und es ist zu konstatieren, dass in Deutschland eine stärkere Abhängigkeit der Ertragsentwicklung vom technischen Fortschritt besteht. Aufgrund des regressiven Faktoreinsatzes führt bereits die Beibehaltung des gegenwärtigen Züchtungsfortschritts zu einem relativen Bedeutungszuwachs des biologisch-technischen Fortschritts. Ähnliches gilt für andere Industrienationen mit hoher Intensität der landwirtschaftlichen Produktion.

Abbildung 28: Entwicklung der Produktion, des Faktoreinsatzes und der Totalen Faktorproduktivität in der deutschen Landwirtschaft von 2000 bis 2009



Anmerkung: Output gemessen anhand des Bruttoproduktionswertes in konstantem US-Dollar (Preismittelwerte 2004 bis 2006). Die TFP (Totale Faktorproduktivität) ist die Differenz aus Output und Faktoreinsatz.

Quelle: Eigene Darstellung (2018) nach FUGLIE (2012).

Ein weiterer interessanter Diskussionspunkt im Hinblick auf die Beantwortung der ersten Forschungsfrage (I a) sind Wechselwirkungen zwischen züchterischen Verbesserungen des Genotyps und Veränderungen im pflanzenbaulichen Anbaumanagement, die durch das ökonomische Konzept der TFP nicht

berücksichtigt werden können. Viele Entwicklungen in der Landwirtschaft, wie z. B. eine erhöhte N-Düngung, höhere Bestandsdichten und eine zunehmende Mechanisierung, wurden erst durch standfeste, trockenheits- und krankheitsresistente Sorten möglich (WEHLING 2004: 76). Aufgrund der Nichtberücksichtigung der genannten Effekte bei der methodischen Quantifizierung der TFP ist deren Anteil zum Zeitpunkt der „Grünen Revolution“ sehr gering (vgl. Abbildung 1). Das Potenzial und der historische Beitrag der Pflanzenzüchtung werden auf der methodischen Basis der TFP folglich unterschätzt. Da pflanzenzüchterische Innovationen in der Vergangenheit eine notwendige Voraussetzung für die Implementierung agrartechnischer Folgeentwicklungen darstellten, ist anzumerken, dass der Züchtungsfortschritt unter Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen noch wesentlich größer ausfallen würde. Zur Stützung dieser These kann mit produktionstheoretischen Grundlagen in Bezug auf die Wirkung des biologisch-technischen Fortschritts argumentiert werden. Die optimale spezielle Intensität wird sowohl durch Produkt- und Faktorpreise als auch von der Produktionsfunktion beeinflusst. Die optimale Faktoreinsatzmenge (z. B. N-Düngung) liegt dort, wo der Grenzerlös den Grenzkosten entspricht. Biologisch-technischer Fortschritt führt dazu, dass sich die Erlösfunktion (Produktionsfunktion) verschiebt. Das hat auch Auswirkungen auf den Faktoreinsatz, denn aufgrund der höheren Grenzerlöse verschiebt sich bei gleichbleibenden Grenzkosten die optimale Faktoreinsatzmenge. Tendenziell wird der Betriebsmitteleinsatz ausgeweitet. Diese Überlegungen verdeutlichen die spezifische Problematik bei der isolierten Bewertung des genetischen Fortschritts und zeigen, dass Ertragsverbesserungen aufgrund eines erhöhten Betriebsmitteleinsatzes auch durch eine biologisch-technische Verschiebung der Produktionsfunktion resultieren. Ertragserhöhungen infolge von Intensitätssteigerungen können demzufolge teilweise auch der Pflanzenzüchtung zugeschrieben werden. Dies wird jedoch durch das theoretische Konzept der TFP nicht berücksichtigt.

Der dominierende genetische Einfluss bei der Erhöhung der Flächenerträge ist noch bemerkenswerter, wenn dieser im Kontext qualitativ verbesserter Pflanzeigenschaften betrachtet wird. Mit den Veränderungen in der europäischen Agrarpolitik haben sich auch die Forschungsprioritäten zugunsten ökologischer sowie qualitativer Aspekte verschoben und sind nicht primär auf Ertragssteigerungen ausgerichtet. Diese Neuorientierung in der europäischen Agrarforschung ist auch ein Resultat politisch bedingter Überschussproduktion und den damit verbundenen wirtschaftlichen Folgekosten Ende der 1970er Jahre. Üblicherweise besteht eine negative Korrelation zwischen einer züchterischen Verbesserung qualitativ wünschenswerter Eigenschaften und der Erhöhung der Erträge (vgl. Punkt 2.2.2).

Tabelle 8: Züchtungsfortschritte bei Sommergerste anhand ausgewählter Qualitätsmerkmale

Zeitintervall	1981 - 1985	1986 - 1990	1991 - 1995	1996 - 2000	2005 - 2009	Trend
Malzextraktgehalt [%]	81,1	81,4	81,1	82,6	82,1	↑
Proteingehalt [%]	10,4	10,5	10,4	9,8	10,0	↓
Eiweißlösungsgrad [%]	41,1	42,6	44,4	46,9	45,5	↑

Quelle: Nach NARZIB et al. (2012: 25).

Tabelle 8 dokumentiert die qualitative Überlegenheit moderner Sommergerstensorten anhand exemplarisch ausgewählter Merkmale für verschiedene Zeitintervalle. Alle Merkmale weisen im Trend eine positive Entwicklung auf und sind ein deutlicher Indikator für den züchterischen Fortschritt. Im

Zeitraum 2005 bis 2009 ist eine Entwicklung gegen den langfristigen Trend ersichtlich. Hierfür können klimatische Veränderungen als ein möglicher Erklärungsansatz angeführt werden.

Es ist davon auszugehen, dass der Sorteneinfluss und die Bedeutung der Pflanzenzüchtung im Zusammenhang mit dem produktionssteigernden technischen Fortschritt in Zukunft weiter zunehmen werden. QAIM und SCHWARZE (2011: 31) schätzen, dass der Anteil der Pflanzenzüchtung für das internationale Produktivitätswachstum bis 2050 einen durchschnittlichen Einfluss von 70 % ausüben wird. Diese Prognose deckt sich im Wesentlichen mit den aufgezeigten Tendenzen und Ergebnissen der betrachteten Studien und kann daher als realistisch eingeschätzt werden. Einschränkend ist jedoch zu bemerken, dass es in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand der Landwirtschaft deutliche geografische Unterschiede im Hinblick auf den Stellenwert der Pflanzenzüchtung gibt. Aufgrund eines höheren Technologieniveaus bzw. geringerer technischer Ineffizienzen im Anbaumanagement ist der Einfluss der Pflanzenzüchtung auf die Erträge in Deutschland größer als in Ländern mit kleinbäuerlich geprägter Landwirtschaft. Dies zeigt sich sehr deutlich bei einem Vergleich der TFP auf globaler (vgl. Abbildung 1) und nationaler Ebene (vgl. Abbildung 28).

Obwohl produktionssteigernder technischer Fortschritt auf sektoraler Ebene nachweislich nicht zu positiven Einkommenseffekten führt (vgl. Punkt 2.5.1), konnte anhand langjähriger SDB für Sommergerste nachgewiesen werden, dass die standort- und nutzungsgerechte Sortenwahl auf einzelbetrieblicher Ebene eine wesentliche Erfolgskomponente hinsichtlich der Unterscheidung effizienter und weniger effizienter Betriebe darstellt. Während effiziente Betriebe züchterisch verbesserte Sorten zu einem frühen Zeitpunkt in das landwirtschaftliche Produktionsprogramm integrieren, führt die Nichtnutzung des züchterischen Fortschritts durch längerfristige Beibehaltung älterer Sorten zu einer Verstärkung negativer Einkommenseffekte (vgl. Punkt 2.5.2).

8.2 Ergebnisdiskussion zur wirtschaftlichen Bedeutung der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 (Forschungsfrage I b)

Erkenntnisse über genfunktionale Beziehungen und neue pflanzengenetische Ressourcen im Genpool der Züchtung sind außerordentlich wichtige Grundlagen für Weiterentwicklungen und Verbesserungen gewünschter agronomischer Pflanzeigenschaften in der angewandten Pflanzenzüchtung. Der Weg von der Grundlagenforschung bis zur Marktreife ist ein langwieriger und zudem ein unsicherheitsbehafteter Prozess. In diesem Kontext stellt die frühzeitige ökonomische Evaluierung der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 im Rahmen dieser Arbeit eine Besonderheit dar. Nachfolgend werden die dargestellten Ergebnisse im Kontext der Forschungsfrage I b diskutiert. Dies impliziert die Ableitung eines ökonomischen Bewertungsfazits einschließlich einer methodenkritischen Ergebnisbetrachtung.

8.2.1 Ökonomische Auswertung von Sortenversuchen

Die Beschreibende Sortenliste (BSL) vom BSA dokumentiert objektiv die Ausprägung von Anbau-, Resistenz-, Qualitäts- und Ertragseigenschaften von Kulturpflanzen (BSA 2016: 3). In Deutschland sind diese neutralen Wertprüfungen zusammen mit den unter regionalen Standortbedingungen durchgeführten LSVs unerlässliche Grundlagen für die Sortenempfehlung durch die landwirtschaftlichen Beratungsstellen. Standardmäßig erfolgt die Bewertung aller leistungsrelevanten Eigenschaften durch das

Sortenversuchswesen unter normierten Anbaubedingungen über die Boniturnotenvergabe von 1 bis 9. „Die ausschließliche Orientierung an den Landessortenversuchen [als Grundlage für die betriebliche Sortenwahl] hat jedoch wesentliche Schwächen, weil dort im Anbau für alle Sorten die gleiche Vorfrucht, die gleiche Saatzeit und das gleiche Fungizidprogramm gelten und die Versuche überwiegend nach Blattfrucht stehen“ (MANN und BRINKMANN 2014: 3). Die standortspezifische Sortenwahl stellt den landwirtschaftlichen Betrieb vor eine komplexe Entscheidung mit weitreichenden betriebswirtschaftlichen Konsequenzen. Aufgrund der Vielzahl wertbestimmender Eigenschaften und den genannten Schwächen in der Versuchsdurchführung kann aus den LSVs oder Wertprüfungen nicht unmittelbar auf den Faktor Wirtschaftlichkeit geschlossen werden. Ordinalskalierte phänotypische Boniturnoten geben dem Landwirt bei der Sortenwahl lediglich eine Orientierung und sind nur bedingt zur Ableitung betriebswirtschaftlicher Sorteneffekte geeignet. In der Literatur finden sich nach umfangreicher Recherche keine Anhaltspunkte dafür, welche monetären Effekte beispielsweise mit einer um einen Wert verbesserten Boniturnote im Hinblick auf Resistenzmerkmale verbunden sind. Infolge der Überlagerung verschiedener, teilweise gegenläufiger leistungsrelevanter Einzeleffekte erscheint dies methodisch auch schwer realisierbar.

Im Interesse der Minimierung des Markt- und Witterungsrisikos gilt es für den Landwirt, bei der Sortenauswahl eine Balance zwischen ertragreichen, jedoch zumeist anfälligeren Sorten und widerstandsfähigen Genotypen mit mittlerer Ertragsleistung zu finden. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der betriebswirtschaftlichen Interpretation von Sortenversuchen folgt die Sortenwahl einer Kombination aus Intuition, landwirtschaftlicher Erfahrung und Beratungsempfehlung. In der Praxis wird landläufig das Einzelmerkmal eines hohen Kornertrages als oberste Prämisse für die Rentabilität einer Anbausorte interpretiert. Zweifellos ist der Ertrag die wichtigste Komponente für den Erlös des Landwirtes und strategisch insbesondere bei hohen Agrarpreisen sinnvoll, da hohe Erträge unter dieser Marktkonstellation „einen großen Hebel für den Gewinn“ darstellen (STEFFIN 2014: 6). Jedoch vernachlässigt die starke Fokussierung auf das Merkmal Ertrag den spezifischen Produktionsmittel- und Arbeitszeitbedarf sowie die damit verbundenen variablen Kosten einer Sorte, die zur Erreichung des hohen Ertragsniveaus notwendig sind. Unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit ist die überdurchschnittliche Bewertung der Ertragseigenschaften durchaus zu beklagen, da ressourceneffizientere, aber im Maximalertrag schwächere Sorten aus ökologischen Gesichtspunkten zu präferieren sind. Jedoch fehlt es bislang an einem geeigneten Bewertungsindikator, um den Vorzug dieser Sorten in einer betriebswirtschaftlich interpretierbaren Kenngröße zu kommunizieren. Daher stellt sich die Frage, warum nicht der sortenspezifische DB (bzw. die DKfL) als Bewertungskriterium für die Leistungsfähigkeit einer Sorte herangezogen werden kann, um dem Landwirt eine hilfreiche Entscheidungsunterstützung bei der Sortenwahl liefern zu können und gleichzeitig die betriebswirtschaftliche Bedeutung stresstoleranter bzw. widerstandsfähiger Sorten durch Berücksichtigung variabler Kosten in den Fokus zu stellen. Der wesentliche Vorteil scheint zunächst offensichtlich zu sein: Alle ein- und auszahlungsrelevanten Eigenschaften einer Pflanzensorte wären in einer allgemeingültigen betriebswirtschaftlichen Kennziffer beschrieben.

Warum dieser ökonomische Ansatz einer monetären Bewertung zur Beurteilung des Leistungspotenzials von Kulturpflanzen im Sortenversuchswesen bis zum heutigen Tag keine Anwendung findet, begründet sich dadurch, dass bei einer monetären Sortenbewertung aufgrund der verzerrenden Wirkung

von Preiseffekten die Gefahr von Fehleinschätzungen unter veränderten ökonomischen Rahmenbedingungen besteht. Damit wird das Ziel einer allgemeingültigen Sortenbeschreibung verfehlt. Eine hohe Preisvolatilität ist charakteristisch für landwirtschaftliche Faktor- und Produktmärkte, sodass sich im Rahmen einer monetären Sortenbewertung die entscheidende Frage stellt, welcher Preisansatz zu wählen ist. Die Bewertung mit gegenwärtigen Preisen würde lediglich eine Momentaufnahme darstellen und auch die Berücksichtigung von Durchschnittspreisen wäre mit einem gewissen Bewertungsrisiko verbunden, sodass demzufolge auch ein monetärer Bewertungsindikator aufgrund unsicherer Preisentwicklung keine geeignete Entscheidungsgrundlage für die Sortenwahl darstellt. Darüber hinaus besteht infolge der verzerrenden Wirkung von Preiseffekten die potenzielle Gefahr, dass landwirtschaftliche Produzenten durch einen monetären Bewertungsindikator zu falschen oder einseitigen Anbauentscheidungen verleitet werden. Dies ist nicht im Sinn der vom BSA angestrebten objektiven Sortenbewertung und verfehlt das Ziel zur Entscheidungsunterstützung der Landwirte bei der Sortenwahl. Die erläuterten Zusammenhänge deuten zunächst darauf hin, dass eine monetäre Bewertung von Genotypen (sowohl auf der Ebene von Zuchtlinien als auch anerkannter Kultursorten) im Vergleich zu herkömmlichen züchterischen Standardbewertungsverfahren keinen maßgeblichen Mehrwert generiert. In Bezug auf das Ziel einer objektiven Beschreibung von Sorteneigenschaften durch LSVs bzw. Wertprüfungen ist dies zutreffend. Dennoch besteht ein gewisses Informationsdefizit, die Fähigkeit eines Genotyps im Hinblick auf den Bedarf landwirtschaftlicher Betriebsmittel monetär einschätzen zu können. Anders ausgedrückt: Ein geeigneter Indikator für die Erfassung wirtschaftlicher Effekte resistenter und widerstandsfähiger Genotypen wäre erstrebenswert. Das Ziel dieser Arbeit liegt nicht in einer Entscheidungsunterstützung für Landwirte im Hinblick auf eine betriebliche Sortenauswahl, sondern vordergründig in einer Rentabilitätsbewertung von Züchtungslinien. Die Verwendung eines monetären Bewertungsindikators für die Einschätzung der Produktionsleistung der Introgressionslinien aus den Populationen S42 und HEB-25 im Rahmen des IPAS-Projektes BARLEY BIODIVERSITY wird durch nachfolgende Argumente begründet:

- a) Boniturnoten unterliegen einer subjektiven Einschätzung und sind ökonomisch schwer interpretierbar. Im Vergleich dazu liefern mengen- oder wertbasierte Kenngrößen ein höheres Maß an Objektivität und ermöglichen aus betriebswirtschaftlicher Perspektive Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Rentabilität der Testgenotypen.
- b) Die Bewertung über Boniturnoten vernachlässigt die Rahmenbedingungen des Marktes bei der Sortenbewertung zugunsten einer allgemeingültigen Aussagefähigkeit.
- c) Im landwirtschaftlichen Produktionsprozess kommt eine Vielzahl an Produktionsfaktoren zum Einsatz. Infolge unterschiedlicher Maßeinheiten handelt es sich dabei um nicht addierbare Kenngrößen. Die Wirtschaftlichkeit eines Produktionsverfahrens lässt sich daher durch eine monetäre Bewertung über Faktor- und Produktpreise besser quantifizieren als über physische Einheiten.
- d) Wertbasierte Größen sind intuitiv verständlich und quantifizierbare Kosteneinsparungen (z. B. durch verbesserte Resistenzeigenschaften positiver Wildallele) bieten auf Ebene der Introgressionslinien ein starkes Argument zur weiteren züchterischen bzw. wirtschaftlichen Verwertung.

Ressourceneffiziente, jedoch unter üblichen High-Input-Anbausystemen ertragsschwächere Sorten sind angesichts der teilweise zu beklagenden Überbewertung physischer Ertragsleistungen von untergeordneter Bedeutung für die Landwirtschaft. Durch die Berücksichtigung von Kosteneinsparungseffekten und des ökonomischen Schadschwellenprinzips im Rahmen dieser Arbeit werden ökologische Aspekte stärker betont. Landwirten und Pflanzenzüchtern wird durch die Ergebnisse dieser Untersuchung die betriebswirtschaftliche Bedeutung widerstandsfähiger Genotypen mit mittlerer Ertragsleistung im Vergleich zu ertragreicheren, aber anfälligeren Sorten vergegenwärtigt.

8.2.2 Sozioökonomische Effekte steigender genetischer Diversität

8.2.2.1 Sicherung landwirtschaftlicher Produktion

Eine breite genetische Basis in Bezug auf agronomisch relevante Eigenschaften, wie z. B. Ertrag, Qualität, Stresstoleranz gegen Trockenheit und Hitze sowie Resistenzen gegen Krankheiten, sind die Grundlage für eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Kulturpflanzen zur Sicherstellung des weltweit steigenden Bedarfs an agrarischen Rohstoffen zur Nahrungs-, Futtermittel- und Bioenergiegewinnung. Im Umkehrschluss stellt der schleichende Verlust genetischer Ressourcen bzw. die genetische Verarmung in modernen Kulturpflanzen eine Bedrohung für eine kontinuierliche landwirtschaftliche Entwicklung dar. Allele, die im Zuge der frühzeitlichen ackerbaulichen Domestikation und durch Züchtung verloren gegangen sind, können nur durch Rückgriff auf die ursprünglichen Wildarten wiederhergestellt werden (TANKSLEY und MCCOUCH 1997). Die privatwirtschaftliche Pflanzenzüchtung konzentriert sich aufgrund wirtschaftlicher Interessen bevorzugt auf die Verwendung von angepasstem Zuchtmaterial, da die isolierte Einkreuzung von Genen aus Wildarten sehr zeit-, arbeits- und kostenintensiv ist. Aus der vorzugsweisen Nutzung von Elitesorten resultiert eine folgenschwere Konsequenz: Ohne die Erweiterung der genetischen Basis wird es mit steigendem Leistungspotenzial der Kulturpflanzen immer schwieriger, die notwendige genetische Variation innerhalb der Arten zu finden, um weiteren Züchtungsfortschritt zu gewährleisten und neue Züchtungsziele umsetzen zu können. Infolgedessen wird sich der biologisch-technische Fortschritt ohne die Erweiterung des Genpools langfristig mutmaßlich verlangsamen.

Wildarten, traditionelle Landsorten und nah verwandte Arten oder Sorten, die sich unter verschiedenen klima- und standortspezifischen Verhältnissen etabliert und angepasst haben, können trotz eines vergleichsweise geringen Ertragspotenzials über genetische Eigenschaften verfügen, die für die landwirtschaftliche Produktion von enormer Bedeutung sind. Als Beispiel ist die Wildgerste *Hordeum bulbosum* zu nennen, auf die zahlreiche zuvor unbekannte Resistenzgene zurückzuführen sind (HABEKUß und SCHOLZ 2014). Darunter u. a. eine Resistenz gegen das Gelbverzwergungsvirus, einem Erreger mit wachsendem wirtschaftlichem Schadpotenzial im Getreideanbau. Dieses Beispiel zeigt, welche Bedeutung die Genomanalyse von bis dato ungenutzten Wildgersten haben kann. Die im Ergebnis dieser Arbeit festgestellte höhere Widerstandsfähigkeit von insgesamt acht Testgenotypen assoziiert mit der Schlussfolgerung, dass derartige Resistenzgene auch in den Introgressionslinien der Populationen S42 und HEB-25 zu finden sind. Die genaue Identifizierung und Lokalisierung dieser vorteilhaften Alleleffekte und deren Verfügbarkeit im züchterischen Genpool moderner Elitesorten dienen zur Erweiterung des Ausgangsmaterials für die Züchtungsforschung und sind von hohem Wert für die Sicherung und Steigerung der Agrarproduktion.

8.2.2.2 Verringerung der Produktionsrisiken und Erhöhung der Ertragsstabilität

Neben dem unmittelbaren Nutzen für konsumtive und produktive Zwecke minimiert ein hohes Maß an genetischer Diversität innerhalb der landwirtschaftlichen Kulturarten Produktionsrisiken. Die starke Fokussierung auf weitgehend homogene Sorten mit einem engen genetischen Verwandtschaftsverhältnis birgt die latente Gefahr einer verstärkten Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen in sich und erhöht das Risiko von Missernten. Mikroorganismen mit hoher Reproduktionsgeschwindigkeit können einen einheitlichen Pflanzenbestand ohne gegensteuernde Maßnahmen durch entsprechende Mutationen in kurzen Zeiträumen infizieren. Eine auf genetische Vielfalt und angepasste Sorten beruhende Landwirtschaft stellt ein natürliches Instrument des Risikomanagements dar und kann dazu beitragen, Ernteauffällen entgegenzuwirken. Aufgrund des hohen Technisierungsgrades der Landwirtschaft und der Verfügbarkeit des chemischen Pflanzenschutzes in der industriellen Agrarproduktion erscheint diese Form der Risikoprävention von untergeordneter Bedeutung zu sein. Doch ein Großteil kleinbäuerlicher Produzenten in den Entwicklungsländern hat nur bedingt Zugang zu diesen Ressourcen, sodass eine strategische Sortendiversifizierung eine maßgebliche Option zur Prävention von Ernteauffällen darstellt. In der Historie finden sich einige Beispiele für das soziale und ökonomische Risiko, das mit einer Verengung der genetischen Diversität im Anbauspektrum einhergehen kann (THRUPP 2000: 272). In Europa ist insbesondere die Kartoffelfäule in Irland 1845 und die daraus resultierende Hungersnot hierfür ein prägnantes Beispiel. Doch auch die von standortspezifischen Umweltbedingungen weitgehend entkoppelte moderne High-Input-Landwirtschaft ist vor den Risiken der Einengung genetischer Variation nur bedingt geschützt. Beispielsweise führte die Pilzkrankheit „Southern Corn Leaf Blight“ in den USA 1970 dazu, dass 15 bis 50 % der Maiserträge vernichtet und wirtschaftliche Schäden von mehr als einer Mrd. US-Dollar verursacht worden sind (BMBF 2004: 27).

Neben der Verminderung der Krankheitsanfälligkeit kann eine breite genetische Basis innerhalb der Kulturpflanzenarten dazu beitragen, Erträge gegenüber schwankenden Witterungsbedingungen abzusichern. Ein hohes genetisches Ertragspotenzial kann langfristig betrachtet nur in Koexistenz mit Ertragssicherheit einen zufriedenstellenden Wirtschaftserfolg gewährleisten. Schon unter den derzeitigen Umweltbedingungen ist ersichtlich, dass das genetische Potenzial der dominierenden Getreidearten in den Praxiserträgen nicht immer zum Tragen kommt (vgl. Abschnitt 8.1). Da weltweit ein großer Teil der Landwirtschaft auf Marginalstandorten betrieben wird, die durch eine niedrige Bodenfruchtbarkeit und durch geringe jährliche Niederschlagsmengen charakterisiert sind, ist der Zusammenhang zwischen Ertragspotenzial und -sicherheit vor allem unter diesen Standortbedingungen offensichtlich. Eine Anbaueignung kommerzieller Hochleistungssorten ist unter diesen Voraussetzungen nicht immer gegeben und führt im Vergleich zu standortangepassten regionalen Sorten mancherorts zu einem Leistungsverlust.

Aufgrund der in den vergangenen Jahren immer häufiger zu beobachtenden Frühsommertrockenheit und nicht absehbarer Reglementierungen im Bereich des Pflanzenschutzes sowie der Düngung ist davon auszugehen, dass dem Faktor Ertragsstabilität in Deutschland zukünftig eine wachsende Bedeutung beizumessen ist. Umfragen unter Landwirten und landwirtschaftlichen Beratern deuten darauf hin, dass die Ertragsstabilität aus betriebswirtschaftlicher Perspektive wichtiger ist als die Ertragssumme (MACHOLDT und HONERMEIER 2017). Der Begriff Ertragsstabilität muss im Hinblick auf die spezifische Versuchsanstellung und die Ergebnisse dieser Arbeit sehr eng gefasst werden und bezieht sich

lediglich auf den Anwendungsbereich von Pflanzenschutzmitteln (Fungiziden). Bei einem Ertragsvergleich zwischen den beiden Anbausystemen FUN₀ und FUN₁ konnte nachgewiesen werden, dass die Ertragsstabilität einiger Introgressionslinien höher ist als bei den untersuchten Kultursorten (vgl. Abschnitt 4.3). Über die Ertragsstabilität der Introgressionslinien bei verminderter N-Düngung oder Trockenheit können versuchsbedingt keine Rückschlüsse gezogen werden. Während der Faktor N-Düngung in Abweichung von der ursprünglichen Versuchsplanung nicht erfasst werden konnte (vgl. Abschnitt 3.5), spiegelten sich die extrem trockenen und heißen Klimabedingungen im Versuchsjahr 2018 standortbedingt nicht in den Ertragsdaten des Versuchs wider (keine signifikant geringeren Erträge 2018). Das ist dadurch bedingt, dass der Feldversuch im zweiten Anbaujahr 2018 auf einem staunäsebeeinflussten Pseudogley stand und die Trockenheit lediglich einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Wachstum ausübte. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Arbeit und der genetischen Vielfalt der Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 ist jedoch zu vermuten, dass einige der Linien auch in Bezug auf die Parameter N-Düngung und Stresstoleranz gegenüber Trockenheit einen Vorteil generieren könnten.

8.2.2.3 Verbesserung der Nachhaltigkeit im Anbau landwirtschaftlicher Nutzpflanzen

Das wirtschaftliche Verlustpotenzial von mykotisch, bakteriell und viral bedingten Krankheiten sowie tierischen Schädlingen ist beträchtlich (STRANGE und SCOTT 2005). Durch Wachstums- und Vitalitätsverminderung würden die globalen Ertragsverluste der Gerstenproduktion ohne den präventiven Einsatz von Pflanzenschutz bei ca. 50 % liegen (OERKE und DEHNE 2004: 278). Diesbezüglich bescheinigen WITZKE und NOLEPPA (2011: 29) dem Pflanzenschutz „eine außerordentlich hohe gesamtwirtschaftliche Bedeutung“. Trotz dieser hohen wirtschaftlichen Bedeutung scheint das Potenzial des chemischen Pflanzenschutzes zur Ertragssicherung zumindest in Europa weitgehend ausgeschöpft zu sein. Die Intensivlandwirtschaft steht aufgrund der hohen ökologischen Risiken chemischer Wirkstoffe einer wachsenden gesellschaftlichen Kritik gegenüber. Dieser gesellschaftliche Stimmungswandel hat längst zu einem agrarpolitischen Umdenken beigetragen. Durch die stärkere Betonung ökologischer Aspekte gilt es, die politischen Ziele Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit in einem multifunktionalen Konzept der Nachhaltigkeit zu vereinen. Vor diesem politischen Hintergrund und den hinlänglich bekannten ökologischen Risiken des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft zeichnen sich weitere Reglementierungen bei der Verwendung und Neuzulassung chemischer Wirkstoffe ab. Mit zunehmenden regulatorischen Hürden ist ein geringerer privatwirtschaftlicher Anreiz zur Investition in die Erforschung neuer Wirkstoffe verbunden, da die Kosten für die Markteinführung neuer Pflanzenschutzwirkstoffe steigen. Innerhalb von zehn Jahren (1995 bis 2005) sind die durchschnittlichen Kosten für F&E und insbesondere für die Registrierung eines neuen Wirkstoffes von 152 auf 256 Mio. US-Dollar angestiegen (MCDUGALL 2013: 6).

Neben politischen Reglementierungen wird das Potenzial des chemischen Pflanzenschutzes auch durch zunehmende Resistenzbildungen gegenüber chemischen Wirkstoffen vermindert. Infolge ökonomischer Überlegungen besteht in der landwirtschaftlichen Praxis ein deutlicher Trend zu engeren Fruchtfolgen, zum Verzicht auf eine wendende Bodenbearbeitung und zu früheren Aussatterminen. Diese Faktoren begünstigen die Entstehung hoher Konzentrationen von Schaderregern, sodass eine zunehmende Abhängigkeit der Agrarproduktion vom chemischen Pflanzenschutz besteht. Eine we-

sentliche Folgeproblematik ist das verstärkte Auftreten von Resistenzbildungen. Infolge der Behandlung von Schaderregern mit identischen chemischen Wirkmechanismen können genetische Veränderungen selektiert werden, die sich im Wesentlichen durch zwei Erscheinungsformen ausdrücken:

- 1) Qualitative Resistenz: Chemische Wirkstoffe können unabhängig von der Aufwandmenge zur völligen Wirkungslosigkeit gegenüber dem Erreger führen (z. B. Mehltau- und Septoria Blatt-dürre-Resistenz gegenüber Strobilurinen³⁹).
- 2) Quantitative Resistenz (Shifting): Die Verwendung gleicher Wirkstoffgruppen führt zu einem sukzessiven Wirkungsverlust. Da sich die Sensitivität gegenüber dem Wirkstoff verringert, führen auch volle Aufwandmengen zu Minderwirkungen. Die progressiv nachlassende Wirkung lässt sich nur über verstärkte Aufwandmengen kompensieren.

Beide Entwicklungen – die zunehmende Beschränkung im Rahmen von Zulassungsverfahren neuer Pflanzenschutzmittel und verstärkte Resistenzbildungen gegenüber zugelassenen Wirkstoffen (sowohl qualitative als auch quantitative Resistenzen) – verdeutlichen, dass die Züchtung robuster Sorten von immer größerer Bedeutung sein wird. Durch die Verfügbarkeit widerstandsfähiger Sorten lässt sich die Abhängigkeit vom chemischen Pflanzenschutz reduzieren. Resistenzzüchtung stellt daher zukünftig einen „Eckpfeiler in der Ernährungssicherung dar“ (WEHLING 2004: 78) und ist „eine der wichtigsten, vorbeugenden Maßnahmen zur Herabsetzung der Schadenswahrscheinlichkeit“ (HEITFUSS 2000: 103). Staatlich geförderte Pre-breeding-Programme, wie das Projekt BARLEY BIODIVERSITY, leisten in diesem Kontext einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige und zukunftsfähige Agrarproduktion. Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen, dass unter den Wildgersten-Introgressionslinien tatsächlich Low-Input-Genotypen existieren, sodass ein Potenzial zur Einsparung von Fungiziden besteht. Gleichzeitig verdeutlicht eine vergleichende Betrachtung verschiedener Szenarien, dass die wirtschaftliche Attraktivität der Introgressionslinien unter der Voraussetzung politischer Reglementierungen weiter steigen könnte (vgl. Unterpunkt 4.4.1.3). Die Identifizierung bis dato unbekannter Resistenzgene stellt für Saatzuchtunternehmen einen potenziellen Nutzen dar. Durch weitere züchterische Verwertung ausgewählter Linien der Populationen S42 und HEB-25 und Einkreuzung positiver Wildallele in Elitesorten besteht die Option zur Kommerzialisierung der Erkenntnisse aus BARLEY BIODIVERSITY. Dadurch kann ein Beitrag für einen kontinuierlichen biologisch-technischen Fortschritt und den Erhalt einer leistungsstarken Agrarproduktion geleistet werden.

Gleichzeitig stellt der Anbau von widerstandsfähigen Genotypen eine nachhaltige Präventionsmöglichkeit gegen Resistenzbildung dar. Insbesondere aufgrund negativer Erfahrungen mit Strobilurin-Resistenzen hat die Prävention zur Resistenzbildung gegenüber Fungiziden eine enorm hohe praktische Bedeutung. Durch den Anbau robuster Sorten und die Verminderung der Behandlungsintensität lässt sich der Selektionsdruck zur Resistenzentstehung minimieren. Vor allem in Regionen mit ausgeprägter Fungizid-Resistenz stellt dies in Kombination mit anderen pflanzenbaulichen Maßnahmen (z. B. Fruchtfolge, Aussattermin, Düngung, Aussaatstärke) eine geeignete Option dar, um die Ausbreitung von Resistenzen hinauszuzögern bzw. zu verhindern. Da für die Kulturart Sommergerste üblicherweise lediglich eine Fungizid-Behandlung angesetzt wird, könnte die Auswirkung der dargelegten ökologischen Effekte bei anderen Kulturarten noch wesentlich größer sein.

³⁹ Fungizid-Wirkstoff im Pflanzenschutz.

Bei der Ergebnisinterpretation ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass in den Feldversuchen 2017 und 2018 am Standort Merbitz lediglich eine geringe Anzahl vorselektierter und ertragsstarker Genotypen getestet worden sind. Vermutlich befinden sich unter den nicht getesteten Linien weitere Genotypen mit positiven genetischen Eigenschaften, deren Identifizierung, Lokalisierung und Einkreuzung zu positiven Effekten in den erörterten Bereichen Produktivitätserhöhung (vgl. Unterpunkt 8.2.2.1), Ertragsstabilisierung (vgl. Unterpunkt 8.2.2.2) und Nachhaltigkeit (vgl. Unterpunkt 8.2.2.3) führen könnte.

8.2.3 Wirtschaftlichkeit der Introgressionslinien

Ohne weitere Beschränkungen hinsichtlich der Verfügbarkeit bzw. Anwendbarkeit von Pflanzenschutzmitteln werden sich neue genetisch diversifizierte Sorten nur dann etablieren können, wenn für den Landwirt durch den Anbau ein wirtschaftlicher Mehrwert zu erzielen ist. Daher ist die ökonomische Bewertung der Testgenotypen im Rahmen dieser Arbeit von besonderer Relevanz.

8.2.3.1 Vergleich mit Kultureltern

Die aufbereiteten Ergebnisse der Risikosimulation verdeutlichen, dass durch die Introgressionslinien der Populationen S42 und HEB-25 im Vergleich mit den Kultureltern Scarlett und Barke teilweise Rentabilitätssteigerungen erzielt werden konnten, wobei die Unsicherheit der Bewertung anhand von Eintrittswahrscheinlichkeiten aus den Feldexperimenten berücksichtigt wurde. Ein wichtiges Ziel innerhalb des Forschungsprojektes BARLEY BIODIVERSITY – die Steigerung der Produktivität von Sommergerste durch Einkreuzung gebietsfremder Wildgersten – konnte dadurch erreicht werden. Dass diese Leistungssteigerung lediglich in einigen wenigen Genotypen sichtbar wird, schränkt den Geltungsbereich dieser Aussage keinesfalls ein, da zufällige Merkmalskombinationen bei pflanzenzüchterischen Kreuzungen üblich sind. In Bezug auf das in BARLEY BIODIVERSITY angestrebte Ziel der Produktivitätsverbesserung ist hervorzuheben, dass in beiden untersuchten Populationen Genotypen vorhanden sind, deren monetäres Durchschnittsergebnis besser ist als das der Kultureltern. Eine besonders hohe Wirtschaftlichkeit erzielen die Testgenotypen S42IL-122 und S42IL-144 sowie HEB-01_104.

Die ökonomische Differenzierung zwischen Output- und Kosteneinsparungseffekt zeigt klar auf, in welchen Bereichen die Einkreuzung positiver Wildallele zu Effizienzsteigerungen führt. Wie bereits in den forschungsmethodischen Vorüberlegungen vermutet (vgl. Abschnitt 3.2), sind die positiven wirtschaftlichen Effekte nicht auf erhöhte Erträge oder verbesserte Qualitäten zurückzuführen (Outputeffekt), sondern auf Kosteneinsparungen infolge verbesserter Stresstoleranz gegenüber Schaderregern. Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass die Neukonzeption der Feldversuche für die wirtschaftliche Bewertung der Testgenotypen unumgänglich war: Unter einheitlichen Anbaubedingungen und gleicher Fungizid-Behandlung kommt das volle Leistungspotenzial einzelner Linien nicht vollständig zur Geltung. Lediglich die Linie S42IL-122 konnte im Vergleich zu Scarlett unter Standardanbaubedingungen mit praxisüblichem Fungizid-Einsatz einen positiven Ertragseffekt erzielen. Durch die Implementierung von Behandlungsvarianten wurden wirtschaftliche und ökologische Effekte der Introgressionslinien empirisch weitaus detaillierter quantifiziert.

Im Ergebnis dieser Arbeit ist festgestellt worden, dass das Schadschwellenniveau für den wirtschaftlichen Einsatz von Fungiziden bei acht von zwölf getesteten Introgressionslinien nicht überschritten wurde. Dies kann auf eine höhere Widerstandsfähigkeit und das Vorhandensein von Resistenzgenen

hindeuten. Auffällig ist, dass insbesondere Genotypen der HEB-25 in der Intensitätsstufe FUN₀ ein wirtschaftlich besseres Ergebnis erzielen (vgl. Abbildung 14). Bezüglich dieser Ergebnisse ist anzumerken, dass die Schadschwelle immer relativ zum Ertragsniveau zu betrachten ist. Dies wird anhand des Zahlenbeispiels in Tabelle 9 deutlich.

Tabelle 9: Einfluss der Leistungsfähigkeit bei der Beurteilung der ökonomischen Schadschwelle

	FKfL FUN ₁ [€/ha]	Erlöse Fun ₀ [€/ha]	Differenz (FUN ₁ -FUN ₀)	Kosten Fungizid [€/ha]	Schadschwelle
Genotyp 1	1500	1425	75	60	erreicht
Genotyp 2	1000	950	50		nicht erreicht

Anmerkung: Es wurde für beide Genotypen eine Ertragsdepression von 5 % im Anbausystem FUN₀ unterstellt.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Die monetäre Differenz zwischen zwei Genotypen im Anbausystem mit praxisüblicher Fungizid-Behandlung FUN₁ liegt bei 500 €/ha. Die Ertragsdepression infolge eines höheren Schädlingsdruckes im Anbausystem FUN₀ wurde für beide Genotypen auf den fiktiven Wert von 5 % festgesetzt. Bei durchschnittlichen Fungizid-Kosten von 60 €/ha führt das Leistungsniveau der beiden Genotypen im Hinblick auf die ökonomische Schadschwelle zu unterschiedlichen Ergebnissen: Während die monetäre Differenz zwischen den Anbausystemen (FUN₁ – FUN₀) beim Genotyp 1 größer ist als die Kosten für Fungizide, ist dies beim Genotyp 2 nicht der Fall. Genau dieser Effekt ist bei der Population HEB-25 zu beobachten. Das Ertragsniveau ist insbesondere bei den Linien HEB_03_040, HEB_11_098 und HEB_21_184 so gering, dass die ökonomische Schadschwelle lediglich eine eingeschränkte Aussagekraft besitzt. Das Nichterreichen der ökonomischen Schadschwelle muss in diesen Fällen nicht gleichbedeutend mit einer höheren Widerstandsfähigkeit gegen Schaderreger sein, sondern kann ebenso infolge einer geringen Ertragsleistung auftreten. Dass die Erträge der HEB-Population im Durchschnitt geringer sind als bei der Population S42, ist auf die geringere Anzahl an Rückkreuzungen zurückzuführen. Mit Blick auf diese Tatsache sollte das Ertragsniveau der HEB-25 durch weitere Rückkreuzungen und Eliminierung negativer genetischer Eigenschaften künftig zu erhöhen sein. Erst damit gelingt der Nachweis, inwieweit das Schadschwellenniveau tatsächlich unterschritten werden kann.

Aufgrund von hohen N_{min}-Werten 2017 musste die Versuchsmethodik angepasst werden (vgl. Abschnitt 3.5). Im Rahmen der Arbeit können daher keine Aussagen im Hinblick auf die N-Effizienz getätigt werden. Damit bleibt ein potenzieller Faktor für weitere Effizienzverbesserungen unberücksichtigt. Zu vermuten ist, dass einige Introgressionslinien, ähnlich wie beim Fungizid, bei einer geringeren N-Düngungsintensität einen vergleichsweise hohen Ertrag erzielen. Diese Hypothese konnte infolge fehlender Voraussetzungen nicht geprüft werden. Da Kosteneinsparungen für Fungizide aufgrund der methodischen Veränderungen im Versuchsaufbau die einzige Möglichkeit zur Nivellierung geringerer Ertragseffekte der Introgressionslinien waren, sind lediglich geringe positive monetäre Effekte nachgewiesen worden. Möglicherweise führt die Berücksichtigung zusätzlicher Düngungseffekte zum Nachweis von weiteren Rentabilitätssteigerungen.

Durch die Anwendung einer stochastischen Simulation im Rahmen der Datenauswertung und der Berücksichtigung verschiedener realitätsnaher Marktszenarien ließ sich die informatorische Lücke zwischen dem Worst-Case-Szenario, dem erwarteten Szenario und dem Best-Case-Szenario schließen und grafisch anschaulich mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen abbilden. Die Ergebnisse zeigen, dass die

Berücksichtigung verschiedener Preisszenarien zweckmäßig war, da das Preisniveau einen nicht unerheblichen Einfluss auf die monetäre Bewertung der Introgressionslinien ausübt. Aufgrund der Tatsache, dass Rentabilitätssteigerungen der Introgressionslinien auf Kosteneinsparungseffekten beruhen, wird die Vorteilhaftigkeit der neuen Genotypen vor allem unter der Voraussetzung geringer Produktpreise (bzw. hoher Faktorpreise) offenbar: Nachweislich dann, wenn die Kosteneinsparung einer geringeren Anbauintensität (Reduktion des Betriebsmitteleinsatzes) größer ist als der Mehrertrag bei höherem Faktoreinsatz.

8.2.3.2 Vergleich mit Elitesorten

Im Hinblick auf die langfristige Zielsetzung der Produktivitätsverbesserung im Sommergerstenanbau durch die Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 wären Rentabilitätssteigerungen gegenüber aktuellen Elitesorten wünschenswert gewesen. Dieses Ziel kann zum gegenwärtigen Züchtungszeitpunkt nicht erreicht werden (vgl. Punkt 4.4.2). In Bezug auf ein abschließendes Fazit ist es wichtig, diese Leistungsdifferenz zwischen Introgressionslinien und Elitesorten adäquat zu interpretieren. Diesbezüglich müssen folgende zwei Überlegungen Berücksichtigung finden:

- a) Bei den Introgressionslinien handelt es sich um Zuchtmaterial, das im Rahmen von BARLEY BIODIVERSITY hinsichtlich seiner genetischen Eigenschaften untersucht wurde. Im Gegensatz zu Elitesorten ist der Züchtungsprozess beider Populationen nicht abgeschlossen. Die ökonomische Vergleichbarkeit zwischen Zuchtmaterial und anerkannten Braugerstensorten ist schwierig, sodass die derzeit bestehende Leistungsdifferenz nachvollziehbar erscheint.
- b) Das genetische Leistungspotenzial der Kultureltern Scarlett und Barke ist deutlich geringer als das aktueller Elitesorten, wie Quench oder Planet. In den Feldversuchen 2017 und 2018 betrug die durchschnittliche Ertragsdifferenz ca. 13 %. Diese Differenz ist auch das Resultat eines stetigen biologisch-technischen Fortschritts. Zwischen der Erstzulassung von Barke (1996) sowie Scarlett (1996) liegt im Vergleich zu Quench (2006) und Planet (2014) eine große Zeitspanne. Die Introgressionslinien tragen lediglich einzelne Chromosomenabschnitte der Wildgerste im genetischen Hintergrund der Kultursorten (Scarlett und Barke), sodass nicht davon ausgegangen werden kann, dass diese Leistungsdifferenz gegenüber aktuellen Elitesorten, wie Quench oder Planet, zum gegenwärtigen Zeitpunkt zu überbrücken ist.

Aufgrund dieser beiden Einschränkungen ist das Nichterreichen des Leistungspotenzials aktueller Braugerstensorten wenig überraschend, auch wenn dies aus ökonomischer Perspektive zunächst nicht befriedigend erscheint. Positive volkswirtschaftliche Effekte infolge neuer Züchtungen werden sich erst dann einstellen, wenn Leistungsspitzen erreicht und durchbrochen werden. Die Ergebnisse aus BARLEY BIODIVERSITY sind ein erster wichtiger Schritt in die beabsichtigte Zielrichtung. Positive genetische Eigenschaften der Wildgerste können zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegen Schaderreger führen und dazu beitragen, das Schadpotenzial zu verringern. Diese Ergebnisse sind nicht nur unter ökologischen Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit als relevant einzustufen, sondern lassen sich durchaus auf aktuelle Sorten übertragen. Durch die segmentale Einkreuzung identifizierter leistungsfördernder Chromosomenabschnitte in Elitesorten könnten in absehbarer Zukunft Produktivitätssteigerungen in der landwirtschaftlichen Praxis realisiert werden.

8.2.4 Fazit zur ökonomischen Bewertung der Introgressionslinien

Der Wert genetischer Ressourcen innerhalb der Kulturpflanzenarten sollte nicht ausschließlich auf den Nutzen gegenwärtiger wirtschaftlicher Prozesse reduziert werden. Aus ökonomischer Perspektive kann die Gesamtheit aller pflanzengenetischen Ressourcen als Kapitalstock interpretiert werden, der dazu dient, einen wirtschaftlichen Überschuss zu generieren. Zur Wahrung eines nachhaltigen Nutzungspotenzials natürlicher Ressourcen gilt es, diesen Kapitalstock durch ein Gleichgewicht zwischen „Entnahmen“ und „Rücklagen“ langfristig zu bewahren (BUTTSCHARDT und BAUM 2011: 21f.). Die aufgezeigten Entwicklungstendenzen im Hinblick auf den schleichenden Verlust genetischer Vielfalt belegen, dass derzeit ein gewisses Ungleichgewicht existiert. In diesem Zusammenhang stellt die Nutzbarmachung genetischer Ressourcen in Form der beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 unabhängig von den aktuellen ökonomischen Nutzungsmöglichkeiten eine optionale Ressource für zukünftige wirtschaftliche Innovationen und die Züchtungsarbeit dar. Dieser Optionswert resultiert einerseits aus den derzeit begrenzten wissenschaftlichen Erkenntnissen im Hinblick auf das ungenutzte züchterische Potenzial von Wildarten und ist andererseits eng mit der Unsicherheit bezüglich künftiger Umweltentwicklungen verbunden. Mit Blick auf die steigende Weltbevölkerung und dem wachsenden molekularbiologisch-technischen Fortschritt zur Verwertung pflanzengenetischer Ressourcen kann davon ausgegangen werden, dass der Erhalt genetischer Diversität eine im Zeitverlauf steigende Relevanz erlangen wird. Daher stellt die vollzogene ökonomische Bewertung der Introgressionslinien zum gegenwärtigen Zeitpunkt trotz aller methodischer Sorgfalt lediglich eine Untergrenze im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit dar und unterschätzt den tatsächlichen Wert züchterischer Grundlagenforschung sowie der Aufklärung genfunktionaler Beziehungen. Die Genomentschlüsselung ist insbesondere von strategisch künftiger Bedeutung für den züchterischen Fortschritt und die allgemeine agrarische Entwicklung.

Die Methodik der Ökonomie stößt insbesondere dann an ihre Grenzen, wenn es darum geht, als vorteilhaft identifizierte Wildgerstenallele isoliert zu bewerten. Kreuzungsnachkommen von nicht adaptierten Wildarten mit Elitesorten tragen nicht nur vorteilhafte leistungsfördernde genetische Eigenschaften in sich, sondern negative Effekte werden zu gleichen Anteilen vererbt. Wünschenswerte Ertragssteigerungen werden demnach trotz mitvererbter positiver Wildallele nicht immer oder zumindest nicht im vollen Umfang sichtbar. Die Differenzierung zwischen einzelnen Ertragsmerkmalen ist mit den Methoden der Ökonomie nicht möglich, da einzelne Ertragskomponenten nicht monetär in Preisen zu bewerten sind. Dementsprechend lassen sich positive und negative Effekte bei der Auswertung von Feldversuchen nicht isoliert voneinander betrachten. An diesem Punkt besteht eine evidente Divergenz zwischen den züchterischen (genetischen) Zielen und den Bewertungsinstrumentarien der Agrarökonomie.

Es ist davon auszugehen, dass es durch weitere Züchtungsfortschritte gelingen wird, positive Wildallele isoliert in Elitezuchtmaterial einzukreuzen, sodass bezüglich der Ergebnisse dieser Arbeit zu konstatieren ist, dass das wirtschaftliche Potenzial der Introgressionslinien größer sein dürfte als die dokumentierten Ergebnisse. Durch Rückkreuzungen lässt sich der negative Einfluss unerwünschter genetischer Effekte langfristig betrachtet sukzessive minimieren, sodass der wahre Nutzen wertsteigernder Wildallele auch in einer höheren monetären Leistung offenbar werden wird. Ökonomisch kann lediglich der Status quo unter Berücksichtigung aller marktrelevanten Eigenschaften bewertet werden. Da es sich

bei den Introgressionslinien gegenwärtig jedoch um reines Zuchtmaterial handelt, muss bei der Interpretation der Ergebnisse zur Produktionsleistung der Introgressionslinien kritisch angemerkt werden, dass in diesem Zuchtstadium generell keine allumfassende Aussage über zukünftige gesellschaftliche oder betriebswirtschaftliche Effekte erfolgen kann. Die genannten Einschränkungen sind bei der Ergebnisinterpretation zwingend zu berücksichtigen. Betriebswirtschaftlich relevante und vor allem veritabel messbare Effekte ergeben sich erst dann, wenn exotische Wildgerstenallele, die zu einer Verbesserung relevanter Merkmale führen, selektiert und isoliert in den Genpool der Kultursorten eingekreuzt werden. Eine ökonomische Bewertung auf Sortenebene liefert in diesem Kontext eine wesentlich solidere Basis für monetäre Vergleiche.

8.2.5 Methodenkritik

Der ökonomische (monetäre) Wert genetischer Grundlagenforschung ist nicht zu jedem Forschungszeitpunkt unmittelbar offensichtlich. Dies gilt insbesondere in der Pflanzenzüchtung, in der Sorteninnovationen nicht nur aufgrund natürlicher Gegebenheiten, sondern auch infolge von Wertprüfungen einen sehr langen Zeitraum in Anspruch nehmen. Volkswirtschaftlich messbare Effekte ergeben sich erst dann, wenn die Erkenntnisse genfunktionaler Beziehungen zur Neuzulassung von Kultursorten beitragen. Da die monetäre Bewertung von Züchtungspopulationen ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der vorliegenden Arbeit ist, erfolgt in diesem Abschnitt eine methodenkritische Auseinandersetzung mit dem gewählten Bewertungsverfahren.

8.2.5.1 Datenerhebung

a) Feldversuch

Das Ziel züchterischer Versuchsanstellungen besteht darin, allgemeingültige Erkenntnisse über das Leistungspotenzial verschiedener Genotypen zu generieren, die über mehrere Standorte und Umweltbedingungen hinweg auf die Bedingungen praktischer Landwirtschaft zu projizieren sind. Diese Anforderung hinsichtlich der Repräsentativität der Ergebnisse impliziert, dass Schlussfolgerungen von Feldversuchen immer auf der Basis mehrjähriger Versuchsreihen gezogen werden können und Versuchsreihen idealerweise über mehrere Standorte erfolgen sollten. Das Datenmaterial zur ökonomischen Bewertung der Introgressionslinien aus den Feldversuchen 2017 und 2018 am Standort Merbitz entspricht im Hinblick auf die genannten Ansprüche lediglich den Mindestanforderungen. Einerseits konnten bei nur einem Versuchsort keine Standorteffekte berücksichtigt werden. Limitierend wirkte sich in diesem Zusammenhang vor allem die begrenzte Verfügbarkeit auf den universitären Versuchsflächen aus, da infolge der standardmäßig durchgeführten Feldversuche in BARLEY BIODIVERSITY eine gewisse Flächenkonkurrenz mit dem kurzfristig und zusätzlich implementierten ökonomischen Versuch bestand. Andererseits besteht aufgrund der Berücksichtigung von lediglich zwei Versuchsjahren die methodische Kritik, dass Umwelteffekte nicht in ausreichendem Maß erfasst worden sind. Da insbesondere Schaderregerkonzentrationen stark witterungsabhängig sind, schränkt dies den Geltungsbereich der ermittelten Ergebnisse sowie der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen ein. Möglicherweise werden in Versuchsjahren mit deutlich höherer Schaderregerkonzentration abweichende Ergebnisse erzielt, sodass die Schadschwelle für den wirtschaftlich rentablen Einsatz von Fungiziden auch bei als widerstandsfähig charakterisierten Introgressionslinien überschritten wird. Die Begrenzung der Ver-

suchsreihe auf zwei Jahre resultiert aus den im Punkt 3.2.3 identifizierten Problemen bei der ökonomischen Interpretation der ursprünglich für diese Arbeit vorgesehenen Feldversuche. Dennoch wäre es im Interesse der Qualität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zweifelsohne wünschenswert gewesen, den Versuch auf weitere Jahre bzw. andere Standorte auszudehnen. Zudem wäre auch eine Fungizid-Behandlung nach individueller Schadschwelle für die Bewertung der Genotypen zielführender. Dieser Anspruch war aus arbeitstechnischer Sicht leider nicht realisierbar.

b) Homogenisierung bodenbedingter Unterschiede in der N-Versorgung

Der Versuch einer Homogenisierung bodenbedingter Nährstoffunterschiede von N ist nicht nur mit erheblichen arbeitstechnischen Anforderungen verbunden, sondern bei unsachgemäßer Planung und Durchführung der Gefahr ausgesetzt, eine zusätzliche Störgröße zu verursachen, sodass der gewünschte Effekt der Homogenisierung des pflanzenverfügbaren Stickstoffs nicht erreicht wird. Um diesem Kritikpunkt bereits versuchsmethodisch zu begegnen, wurden sechs bis sieben Einzelbodenproben entnommen und als Bezugsgröße die Parzelle gewählt (vgl. Punkt 3.3.2). Dennoch besteht eine gewisse Unsicherheit im Hinblick auf die Fähigkeit des Bodens bei der Nachmineralisierung von N. Die N-Mineralisierung korreliert maßgeblich mit dem C/N-Verhältnis der organischen Substanz, dem Wassergehalt und der Temperatur des Bodens. Diese Merkmale unterliegen innerhalb eines Versuchsschlages einer natürlichen Varianz. Daher ist davon auszugehen, dass standortbedingte Unterschiede in der N-Versorgung durch die gewählte Methodik nicht gänzlich nivelliert, sondern lediglich minimiert werden konnten.

8.2.5.2 Datenauswertung

In Bezug auf die Datenauswertung waren die statistischen Möglichkeiten zur ökonomischen Fragestellung des vorliegenden IPAS-Teilprojektes stark restringiert. Monetär wurden in diesem Kontext lediglich marktfähige Produkte (Ertrag) sowie auszahlungsrelevante Qualitätseigenschaften (Proteingehalt) bewertet. Da Stroherträge im konventionellen Ackerbau von untergeordneter Bedeutung sind, wurde bei der monetären Bewertung der Genotypen bewusst darauf verzichtet⁴⁰.

Aufgrund der Unsicherheit über die Ausprägung monetärer Einflussgrößen erfolgte die Datenauswertung mit Hilfe des mathematisch-analytischen Instruments der MCS. Elementare Voraussetzung zur Approximation valider monetärer Effekte der Testgenotypen ist eine realitätsnahe Festlegung der zugrunde liegenden Verteilungsfunktionen unsicherer Einflussfaktoren. Zur Gewährleistung einer größtmöglichen Objektivität wurden alle Eingangsdaten auf Basis der empirischen Versuchsdaten aus den Feldversuchen 2017 und 2018 festgelegt. Unter Berücksichtigung der geringen Versuchsdauer von lediglich zwei Jahren bestehen jedoch gewisse Zweifel an der Validität der Verteilungsparameter. In der landwirtschaftlichen Praxis führt insbesondere die Unvorhersagbarkeit witterungsbedingter Effekte zu Schwankungen in Ertrags- und Qualitätsparametern. In diesem Kontext wäre es zielführender, wenn die gewählten Verteilungen ein über mehrere Perioden charakteristisches Ertragsprofil widerspiegeln

⁴⁰ Stroherträge hätten beispielsweise über den Harvest-Index erfasst werden können und sind in der ökologischen Landwirtschaft wesentlich bedeutsamer.

würden. Trotz der umfangreichen Anzahl von Wiederholungen (jährlich sechs) konnten witterungsbedingte Effekte nicht ausreichend berücksichtigt werden, sodass durch die gewählten Verteilungsannahmen nicht das gesamte Ertragspektrum der Genotypen abgedeckt werden konnte.

Eine monetäre Auswertung erhobener Daten aus Feldversuchen unter betriebswirtschaftlich realitätsnahen Annahmen ist der potenziellen Gefahr ausgesetzt, dass Preiseffekte einen verzerrenden Einfluss ausüben und daher insbesondere die Festlegung des Faktor- und Produktpreisniveaus über die Richtung der Ergebnisse entscheidet. Um dieser Gefahr zu begegnen, wurden verschiedene Preisszenarien unterstellt. Da die Zuweisung von Verteilungsparametern marktrelevanter Einflussgrößen jedoch auf der Basis historischer Daten erfolgte und der allgemeine negative Trend der Agrarpreisentwicklung in der Simulation unberücksichtigt blieb, könnte in diesem Kontext der Vorwurf entstehen, dass diese Eingangsdaten unsichere zukünftige Marktbewegungen nicht realitätsnah widerspiegeln. Dem ist zu entgegnen, dass die Arbeit mit den gewählten Szenarien nicht die Intention einer exakten Simulation zukünftiger ökonomischer Effekte verfolgt. Vielmehr geht es darum, mögliche Entwicklungstendenzen aufzuzeigen, die Aufschluss darüber geben, welche monetären Effekte unter verschiedenen Marktsituationen zu erwarten sind.

8.2.6 Forschungsbedarf

In der vorliegenden Arbeit wurden die beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25 hinsichtlich ihrer ökonomischen Eignung untersucht. Auf der Grundlage der generierten Ergebnisse sowie der zuvor erläuterten methodenkritischen Auseinandersetzung wird in Bezug auf die nachfolgenden Aspekte weiterer Forschungsbedarf gesehen:

- Um im Hinblick auf die Wildgersten-Introgressionslinien tatsächlich von „Sorteninnovationen“ sprechen zu können, besteht die Notwendigkeit, die Lücke zwischen genetischer Grundlagenforschung (Invention) und dem Markt zu schließen. Es bedarf einer Markteinführung in Form von neuen Braugerstensorten, die kurze Chromosomenabschnitte mit positiven genetischen Eigenschaften der Wildgerste in sich tragen. Erst dadurch kommt es tatsächlich zu einer Erhöhung der genetischen Diversität im Genpool der Pflanzenzüchtung. Zur Realisierung dieses Anliegens wäre es opportun, wenn ausgewählte Introgressionslinien als Kreuzungspartner in privatwirtschaftlichen Züchtungsprogrammen Verwendung finden könnten. Entsprechende Nachkommen müssten gezielt auf die relevanten Wildgerstenallele selektiert werden. Durch die projektinterne Kooperation mit Saatzucht Breun scheinen in diesem Zusammenhang wesentliche Voraussetzungen für weiterführende Züchtungen erfüllt zu sein.
- Die 2017 und 2018 durchgeführten Feldversuche liefern lediglich begrenzte Aussagen über die Eignung der Introgressionslinien unter veränderten Umweltbedingungen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf Extremwetterereignisse unter sich künftig wandelnden Umweltbedingungen. Unter dem Aspekt des Klimawandels werden genetische Informationen über die pflanzliche Erhöhung der Trockenstresstoleranz für den züchterischen Fortschritt immer bedeutender. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Wildgersten, die an trockene und heiße Klimabedingungen adaptiert sind, das Potenzial zur genetischen Verbesserung der Ertragssicherheit unter Trockenstress bieten und daher insbesondere zukünftig zur Erhöhung der Produktionsleistung beitragen können. Um die potenzielle Eignung der Introgressionslinien unter

Wassermangel eruieren zu können, wäre die Simulation von Trockenstress unter praktischen Versuchsbedingungen ein interessanter Ansatzpunkt für weiterführende Forschungen. Diesbezüglich bieten Rainout-Shelters eine geeignete methodische Versuchsgrundlage zur Erfassung genotypischer Unterschiede.

- Die Ergebnisse der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Bodenbeprobungen dokumentieren, dass auch auf pflanzenbaulichen Versuchsfeldern große bodenbedingte Nährstoffunterschiede vorzufinden sind, die einen erheblichen Einfluss auf ökonomisch relevante Leistungsparameter ausüben können. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz zur Homogenisierung dieser Differenzen ist wahrscheinlich aufgrund begrenzter personeller und finanzieller Ressourcen nicht uneingeschränkt bei größeren Versuchsserien praktikabel. Dennoch verdeutlichen die gewonnenen Erkenntnisse, dass Aspekte des Precision Farming auch in der Pflanzenzüchtung von großer Relevanz sind. Die Nichtberücksichtigung kleinräumiger Unterschiede in den Bodenverhältnissen kann trotz einer ausgedehnten Versuchsserie zu falschen Selektionsentscheidungen führen. Daher besteht einerseits Forschungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung effizienter technischer Möglichkeiten zur Evaluierung und Nivellierung von Bodenunterschieden. Andererseits wäre eine verstärkte Integration teilflächenspezifischer Bewirtschaftungselemente in das praktische Feldversuchswesen wünschenswert.

8.3 Ergebnisdiskussion im Hinblick auf die Bewertung einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung

8.3.1 Bedeutung sensorischer Phänotypisierung und öffentlicher Forschungsförderung

Ein herausragendes wissenschaftliches Argument für die verstärkten Bemühungen zur technischen Umsetzung einer Hochdurchsatz-Phänotypisierung liegt darin begründet, dass während der letzten Jahrzehnte ein Ungleichgewicht zwischen dem Erkenntniszuwachs in der Forschung molekularbiologischer Prozesse und der Phänotypisierung entstanden ist. „Bislang hat die Entwicklung von Methoden und Konzepten zur quantitativen Analyse pflanzlicher Merkmale unter dem Einfluss der Umwelt mit der rasanten Entwicklung der genetischen und molekularen Grundlagen der Pflanzenforschung nicht ausreichend Schritt gehalten“ (MÜLLER-RÖBER et al. 2010: 21). Da beide Prozesse im Hinblick auf die Umsetzung relevanter Züchtungsziele jedoch komplementär sind und molekularbiologische Daten nur im Zusammenhang mit der phänotypischen Merkmalsausprägung interpretiert und verifiziert werden können, besteht auf wissenschaftlicher Ebene seit mehreren Jahren der Bedarf einer automatisierten Analysetechnik (HOULE et al. 2010; KOLUKISA OGLU und THUROW 2010). Phänotypisierung im Feld ist daher ein Flaschenhals im pflanzenbaulichen Versuchswesen (FURBANK und TESTER 2011). Die durchgeführten Experteninterviews bestätigen dies übereinstimmend und dokumentieren, dass die Entwicklung und Markteinführung neuer Sensoren zur Erfassung pflanzlicher Wachstums- und Entwicklungsparameter für den züchterischen Fortschritt von zentraler Bedeutung sind. Der pflanzliche Phänotyp entsteht durch Kopplung genetischer Determinanten mit den jeweiligen Umweltbedingungen in ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität. Um ein tiefgehendes Verständnis über die Wechselwirkungen zwischen Genom und Umwelt zu erlangen und die Leistungsfähigkeit der Kulturpflanzen züchterisch zu erhöhen, besteht nach Auffassung der befragten Züchter eine elementare Notwendigkeit zur Erfassung leistungsrelevanter Ertrags- und Qualitätskomponenten im frühen Zucht- und Entwicklungsstadium der

Pflanze. Für eine zeitliche Beschleunigung des Züchtungsprozesses ist eine nicht-invasive Erfassung relevanter Wachstumsparameter für Pflanzenzüchter von maßgeblicher Bedeutung.

Die phänotypische Leistungsfähigkeit ist das entscheidende Selektionskriterium in der Pflanzenzüchtung. Da die Genotyp-Umwelt-Interaktionen jedoch nicht vorhersehbar sind, spielt der Faktor Zufall in der gängigen Züchtungspraxis eine entscheidende Rolle. Je größer die Anzahl der im Feldversuch getesteten Genotypen, desto wahrscheinlicher ist die Identifizierung neuer und leistungsstarker Merkmalskombinationen, die das Potenzial zur Sortenankennung besitzen. Ein limitierender Faktor für die Ausweitung praktischer Feldversuche stellen die damit verbundenen Kosten infolge eines zeit- und arbeitsaufwendigen Feldversuchswesens dar. Wie wichtig eine populationsumfassende Phänotypisierung zur Identifizierung positiver Merkmalskombinationen ist, wird am Beispiel der Malzqualitätsanalyse deutlich: Aufgrund hoher Untersuchungskosten werden gegenwärtig lediglich einzelne Genotypen in einem fortgeschrittenen Züchtungsstadium untersucht. Messwiederholungen zur statistischen Absicherung der Ergebnisse sind nicht wirtschaftlich. Diese unvollständige Informationserfassung kann die folgenschwere Konsequenz haben, dass positive genetische Merkmalskombinationen in Bezug auf die Malzqualität gar nicht quantifiziert werden. Zuchtstämme, deren Ertragseigenschaften für eine Sortenankennung nicht ausreichen, die jedoch möglicherweise über wertvolle qualitätsbeeinflussende Gene verfügen, werden demzufolge vom Züchter fälschlicherweise verworfen.

Infolge fehlender Alternativen basiert das Standardverfahren zur Erfassung des Pflanzenwachstums auf der subjektiven Vergabe von Schätzwerten (Boniturnoten). Angesichts klimatischer Veränderungen und anderer globaler Herausforderungen im agrarischen Sektor ist dies ein unbefriedigender Zustand, sodass die Entwicklung alternativer und effizienter Verfahren zur quantitativen und qualitativen Erfassung von Pflanzenmerkmalen von zentraler Relevanz ist.

Im Vergleich zum Precision Farming und den Fortschritten bei der Entwicklung und Verbreitung von Sensoren in der Landwirtschaft könnte bei oberflächlicher Interpretation der Eindruck entstehen, dass der Entwicklungsprozess sensorischer Phänotypisierung in der Pflanzenzüchtung langsamer verläuft. Zu Recht mutmaßen einige Experten im Rahmen der geführten Interviews jedoch, dass beide Forschungsbereiche nur bedingt miteinander vergleichbar sind. Zwar können in der Züchtung praxiserprobte Technologien der Landtechnik verwendet werden (z. B. GPS). Allerdings sind die Anforderungen bezüglich Genauigkeit und Auflösung von Sensoren im Züchtungswesen sehr viel größer, sodass ein längerer Entwicklungsprozess erforderlich ist. Eine gewisse Notwendigkeit für staatliche Förderung zur Entwicklung sensorischer Phänotypisierung lässt sich im Vergleich zum Precision Farming auch daran festmachen, dass die Anzahl potenzieller Nutzer vergleichsweise klein ist. Dadurch erklärt sich möglicherweise das derzeit begrenzte Interesse von Dienstleistungsunternehmen zur Forschung im Bereich sensorischer Phänotypisierung. Infolge dieser Investitionshemmnisse sind öffentliche Forschungsinvestitionen äußerst positiv zu werten. Die Expertenbefragungen dokumentieren, dass Kooperationsprojekte, wie z. B. BARLEY BIODIVERSITY, für mittelständische Saatzuchtunternehmen eine wichtige Möglichkeit sind, um frühen Zugang zu neuen Technologien zu erhalten. Gleichzeitig wird durch Kooperation zwischen öffentlichen und privatwirtschaftlichen Einrichtungen der Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis gefördert.

8.3.2 Stärken der hyperspektralen Phänotypisierung (Forschungsfrage II a)

Trotz des großen Potenzials sensorischer Phänotypisierung in der Pflanzenzüchtung und staatlicher Förderung konnte sich bislang kein Standardsystem etablieren, das den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen der Züchtung entspricht. Dies betrifft vornehmlich die Feld-Phänotypisierung, wobei die unter Punkt 7.1.3 aus Expertenbefragungen eruierten wirtschaftlichen Risiken und technischen Defizite eine Implementierung in die Praxis hemmen. Gegenwärtig werden daher verschiedene Entwicklungspfade und Strategien zur Umsetzung einer Hochdurchsatz-Phänotypisierung verfolgt, von denen die Hyperspektralanalyse lediglich ein technologischer Ansatz ist. Aus diesem Grund wurden bei den Befragungen einleitend zunächst allgemeine Aspekte zur Ausgestaltung und zum Stand der technologischen Entwicklung in der Phänotypisierung thematisiert. Daraus lassen sich anwenderspezifische Voraussetzungen für den Praxisbetrieb sowie Stärken der Hyperspektralanalyse ableiten. Da einige der befragten Experten mit der allgemeinen Entwicklung im Bereich der Phänotypisierung besser vertraut sind als mit der Hyperspektralanalyse im speziellen Anwendungsfall, gewährleistete diese Herangehensweise die bestmögliche Informationsgewinnung.

Die von Züchtern in den Interviews angesprochene Nutzungsspezifität einiger Sensoren ist eine wichtige Ursache für den bislang begrenzten Praxiseinsatz im Züchtungsprozess. Die Hyperspektralanalyse bietet in diesem Kontext einen respektablen Vorzug im Vergleich zu anderen Technologien bzw. Konzepten der Sensor-Fusion: Während gängige Sensoren lediglich auf die Erfassung einzelner Spezialparameter ausgerichtet sind, handelt es sich bei einer Hyperspektralkamera um einen unspezifischen Sensor, der potenziell eine Vielzahl pflanzlicher Entwicklungs- und Wachstumsparameter erfasst. In BARLEY BIODIVERSITY wurden mit Hilfe der Hyperspektralanalyse äußerst differenzierte Züchtungsmerkmale detektiert. Auch wenn eine objektive Betrachtung der statistischen Messergebnisse nach dem derzeitigen Stand und den geführten Experteninterviews berechtigte Zweifel daran bestehen lässt, ob die erzielte Prädiktionsgüte für alle erfassten Anwendungsbereiche gleichermaßen ausreichend für züchterische Entscheidungen ist, kann die Hyperspektralanalyse sehr unspezifisch zur Einschätzung unterschiedlicher phänotypischer Merkmale genutzt werden. Die Tatsache, dass die Vorhersagemodelle nicht für alle Zielmerkmale zufriedenstellende Ergebnisse generieren, steht nicht im Widerspruch zu einem breiten Einsatzbereich der Hyperspektralanalyse. Prinzipiell sind die gewünschten Informationen in der spektralen Signatur enthalten. Jedoch besteht die Herausforderung, diese Informationen gezielt herauszufiltern und mit noch besseren Modellen interpretierbar zu machen. Im Zuge weiterer Entwicklungsarbeit ist davon auszugehen, dass sich Vorhersagemodelle präzisieren lassen, sodass am Ende der Projektdauer eine klare Klassifizierung von Merkmalen mit präziser Vorhersagegenauigkeit möglich sein sollte. Im Rahmen von BARLEY BIODIVERSITY wurde darüber hinaus versucht, die Hyperspektralanalyse in züchtungsrelevanten Anwendungsbereichen zu erproben, für die bislang keine Sensortypen zur Verfügung stehen. Dazu zählen die nicht-invasive Analyse von Pflanzen- bzw. Korninhaltsstoffen sowie die hyperspektrale Prädiktion von Malzeigenschaften, deren exakte Bestimmung bisher lediglich laboranalytisch zu realisieren ist. Insbesondere in dieser Erfassung bislang unberücksichtigter phänotypischer Eigenschaften liegt der innovative Charakter dieses Projektes. Die durchgeführten Expertenbefragungen offenbaren zahlreiche Anhaltspunkte für potenzielle Anwendungsmöglichkeiten, sodass durch eine Nutzung der Technologie auch neue Züchtungsziele etabliert werden könnten.

Die Entwicklung feldbasierter Phänotypisierungssysteme verläuft im Vergleich zur Gewächshausebene langsamer (BAI et al. 2016: 182). Einige Autoren verweisen darauf, dass experimentelle Wachstumsbedingungen im Gewächshaus nicht die typischen landwirtschaftlichen Umweltbedingungen widerspiegeln (z. B. ARAUS et al. 2008; ARAUS und CAIRNS 2014). Im Vergleich zu Freiluftverhältnissen wird die pflanzliche Entwicklung unter kontrollierten Anbaubedingungen durch das vorhandene Nährstoff- und Wasserregime sowie durch die geringere Intensität von Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und Verdampfungsraten beeinflusst (WHITE et al. 2012: 102). In Kombination führen diese Faktoren dazu, dass in experimenteller Umgebung quantifizierte Kandidatengene nicht automatisch zu höheren Kornträgen im Feld führen (ARAUS und CAIRNS 2014: 53). Diese Einschätzungen decken sich mit den Erfahrungen der interviewten Züchter, die in diesem Zusammenhang beklagen, dass ein Großteil der Phänotypisierungsforschung auf Gewächshausebene angesiedelt ist. Als positiv zu bewertender Fakt der Hyperspektralanalyse ist deshalb hervorzuheben, dass sich die Projektbestrebungen von BARLEY BIODIVERSITY auf ein feldbasiertes Phänotypisierungssystem fokussierten. Damit ist der potenzielle Nutzen für die Praxis aufgrund der erwähnten Einflüsse deutlich größer. Im Hinblick auf die Nutzungseffizienz liegt ein weiterer Vorteil darin, dass die Hyperspektralanalyse nicht auf einen Einsatzort beschränkt ist. Während viele Sensoren entweder unter Feldbedingungen oder im Labor einsetzbar sind, können durch den hyperspektralen Ansatz beide Untersuchungsfelder in gleicher Weise bedient werden. Innerhalb der Feldsaison können Messungen im Pflanzenbestand mittels Kamera und Trägerfahrzeug realisiert werden; anschließend besteht die Option zur Nutzung der hyperspektralen Qualitätserfassung von Korn und Saatgut im Labor durch einen stationären Einsatz der Hyperspektralkamera. Unter der Voraussetzung weiterer Präzisierungen der Vorhersagemodelle lässt sich tendenziell eine hohe Auslastung der Hyperspektralanalyse im praktischen Einsatz vermuten.

8.3.3 Nutzungspotenzial der hyperspektralen Phänotypisierung (Forschungsfrage II b)

Die durchgeführten Experteninterviews offenbaren, dass das theoretische Nutzungspotenzial der Hyperspektralanalyse weit über die in BARLEY BIODIVERSITY getesteten Anwendungen hinausgeht. Durch verbesserte Auflösung und Genauigkeit wird die Hyperspektralanalyse für die Phänotypisierung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Insbesondere bei der Beurteilung pflanzlicher Stressreaktionen gegen abiotische und biotische Faktoren sehen Experten zukünftig ein vielversprechendes Nutzungspotenzial dieser Technologie. Zahlreiche Abhandlungen in der Literatur bestätigen den zunehmenden Bedeutungsgewinn der Sensorik (z. B. FIORANI et al. 2012; MAHLEIN et al. 2012; BEHMANN et al. 2014). Während Aspekte der Pflanzengesundheit innerhalb des Forschungsvorhabens im Projekt BARLEY BIODIVERSITY unberücksichtigt blieben, bestand der innovative Charakter des Projektes vor allem in der hyperspektralen Prädiktion von Makro- und Mikronährstoffen im Pflanzenbestand. Aufgrund hoher Untersuchungskosten für die laboranalytische Bestimmung relevanter Nährstoffkonzentrationen stellt insbesondere dieser Forschungsbereich derzeit eine Informationslücke dar. Erstmals belegten PANDEY et al. (2017) die Prädizierbarkeit von Pflanzeninhaltsstoffen auf technologischer Basis der Hyperspektralanalyse. Im Unterschied zu BARLEY BIODIVERSITY wurden die Ergebnisse von PANDEY et al. (2017) unter Laborbedingungen erzielt, sodass aufgrund der im Unterpunkt 7.3.1.4 beschriebenen äußeren Störeinflüsse lediglich eine eingeschränkte Vergleichbarkeit der Modellgüte gegeben ist. Auch wenn die hyperspektrale Vorhersage zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht für alle Pflanzennährstoffe gleichermaßen

ßen gute Ergebnisse erzielt, eröffnet das Vorhandensein eines Hochdurchsatz-Verfahrens für die Anwendung im Feld neue, vielversprechende Optionen in der Züchtung und Forschung. Es konnte durch die geführten Experteninterviews belegt werden, dass sensorischer Einsatz im Feld trotz Performanzverlust aus der Perspektive praktischer Pflanzenzüchter von größerer Akzeptanz ist als Anwendungen auf Labor- oder Gewächshausebene. Die auf Feldebene erzielten Projektergebnisse markieren daher einen weiteren wichtigen Schritt zur Überwindung des genannten Informationsdefizites im Hinblick auf die Erfassung von Blatt- und Korninhaltsstoffen.

Die Felderprobung der Hyperspektralanalyse durch den Einsatz des Trägerfahrzeuges AgRover bestand darin, Mittelwerte für Nährstoffkonzentrationen zu detektieren. Diesbezüglich wurde die mittlere Reflexion erfasst (alle Pixel der Pflanze in Kombination). Neben dieser Nutzungsmöglichkeit besteht die zusätzliche Option, auf der Basis von hyperspektralen Einzelpflanzenuntersuchungen räumliche Vorhersagen über Nährstoffkonzentrationen zu treffen. Diesbezüglich müsste die Reflexionscharakteristik eines jeden Blattpixels einzeln erfasst werden. Zwar steigt mit dieser Anwendung die Komplexität der Datenauswertung, jedoch könnte die Verteilung von Makro- und Mikronährstoffen räumlich dargestellt werden. Die nicht-invasive hyperspektrale Bildanalyse besitzt dabei den wesentlichen Vorteil der Wiederholbarkeit. Auf diese Weise könnte das Nährstoffversorgungsniveau über den gesamten Entwicklungszyklus der Pflanze analysiert und dargestellt werden. Wie aus mehreren Experteninterviews zu vernehmen, eröffnet das Vorhandensein der hyperspektralen Inhaltsstoffanalyse neue Perspektiven in der Grundlagenforschung. Es könnten nicht nur Verlagerungsprozesse mobiler Pflanzennährstoffe über den gesamten pflanzlichen Entwicklungsprozess analysiert werden, sondern gleichzeitig bietet die Hyperspektralanalyse ein geeignetes Instrumentarium, um Prozesse der Nährstoffaufnahme aus dem Boden hinreichend zu erforschen. Neue Forschungserkenntnisse auf diesen beiden Gebieten könnten langfristig zur Züchtung nährstoffeffizienter Genotypen beitragen.

Neben der Inhaltsstoffanalyse fokussierten sich die Projektbestrebungen in BARLEY BIODIVERSITY zusätzlich auf die Vorhersage pflanzlicher Entwicklungs- und Ertragsparameter sowie von Verarbeitungsqualitäten (Malzeigenschaften). Im Hinblick auf die Anwenderrelevanz der in BARLEY BIODIVERSITY quantifizierten Parameter (vgl. Abschnitt 1.2) ist aus den Experteninterviews zu konstatieren, dass die Erfassung pflanzlicher Nährstoffversorgung aus praxisorientierter Perspektive von geringerer Bedeutung ist als die beiden anderen untersuchten Anwendungsbereiche. Züchter begründen dies einerseits damit, dass Kenntnisse hinsichtlich der genotypspezifischen Nährstoffversorgung nicht unmittelbar Selektionsentscheidungen bedingen. Prinzipiell ist eine hohe N- oder P-Effizienz für die Umsetzung von Züchtungszielen wichtig, jedoch ist die Ausprägung dieser Eigenschaften für den Züchter indirekt über ertragsrelevante Parameter abzuleiten. Andererseits spielt die Spezifität der Sortenvermarktung eine wesentliche Rolle. Da erfahrungsgemäß Ertrag und restriktive Qualitätsanforderungen (Protein) ausschlaggebende Kriterien für die monetäre Sortenbewertung sind, werden ernährungsphysiologisch bedeutsame Sorten mit wertvollen Inhaltsstoffen vom Markt monetär kaum honoriert. Die Verbesserung dieser Eigenschaften ist für den Züchter daher eher von untergeordneter Priorität.

Im Vergleich zur Inhaltsstoffanalyse eröffnet die sensorische Prädiktion von Entwicklungs- und Ertragsparametern sowie Malzeigenschaften folglich einen weitaus höheren Nutzen für die praktische Züchtung. Die Bestimmung dieser Merkmale kann direkt in Handlungsanweisungen (Selektionen) überführt werden und durch entsprechende Merkmalsverbesserungen profitiert der Züchter infolge

höherer Vermarktungsanteile. In diesem Zusammenhang offeriert eine nicht-invasive sensorische Analyse ertragsbestimmender Merkmale gegenüber arbeits-, zeit- und kostenintensiver herkömmlicher Handbonitur insbesondere zu frühen Zuchtzeitpunkten einen maßgeblichen Vorteil. Von gleicher Relevanz für Züchter sind frühzeitige Untersuchungen von Malzeigenschaften. Aufgrund des Berliner Programms⁴¹ sind qualitative Aspekte bei der Braugerstenzüchtung von entscheidender Vermarktungsbedeutung. Da herkömmliche laboranalytische Qualitätsuntersuchungen aufgrund des Nichtvorhandenseins ausreichender Saatgutmengen erst zu späteren Zeitpunkten durchführbar sind, könnte die Hyperspektralanalyse zu einem Informations- und Wissensvorsprung beitragen. Ein erfolgreicher Züchtungsprozess beruht auf dem Zusammenspiel von Daten, Informationen, Wissen und Entscheidungen. Können Daten aufgrund arbeitstechnischer oder finanzieller Restriktionen nicht bzw. nur begrenzt erfasst werden, wirkt sich dies negativ auf die nachfolgenden Ebenen aus und limitiert letztlich die Entscheidungsfähigkeit des Züchters. Eine kostengünstige und an die Anforderungen der Praxis angepasste Technologie könnte eine größere Datenbasis für züchterische Entscheidungen liefern. Dies würde bessere Selektionsentscheidungen bedingen und den Züchtungserfolg beschleunigen. Daher werden diese Bestrebungen in BARLEY BIODIVERSITY von den befragten Züchtern als äußerst praxisrelevant bewertet.

Die statistischen Leistungsparameter der hyperspektralen Phänotypisierung offenbaren derzeit jedoch eine merkbare Diskrepanz zwischen Anwenderrelevanz und erforderlicher Vorhersagegüte. Während die hyperspektrale Prädizierbarkeit von Blatt- und Korninhaltsstoffen nachgewiesen werden konnte, besteht hinsichtlich der von Züchtern als sehr bedeutsam eingestuften Vorhersage von Bonitur- und Malzeigenschaften ein deutliches Defizit. Es ist daher wenig verwunderlich, dass sich ein Großteil der Befragten kritisch bezüglich der technologischen Eignung der Hyperspektralanalyse äußert. Aufgrund der nicht zufriedenstellenden Prädizierbarkeit von Entwicklungs- und Ertragsparametern konnte zum Zeitpunkt der Expertenbefragungen noch kein Leistungsnachweis der Technologie für diese Zielvariablen erbracht werden. Ähnliches gilt, wenn auch mit Abstrichen, im Hinblick auf die hyperspektrale Bestimmung von Malzeigenschaften. Von den zahlreichen qualitätsbestimmenden Eigenschaften der Sommergerste konnten die wenigsten Merkmale mit zufriedenstellender Genauigkeit durch eine hyperspektrale Bildanalyse erfasst werden. Kurzfristig besteht demnach bei einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung für potentielle Nutzer kein Einsparungspotenzial in Bezug auf die Laborkosten der Malzanalyse. Demgegenüber dokumentieren die geführten Experteninterviews jedoch, dass nicht immer das Erfordernis einer exakten phänotypischen Merkmalerfassung besteht: Für Pflanzzüchter geht es vornehmlich darum, aus einer großen Anzahl von Zuchtstämmen mit teilweise mehreren tausend Linien, überdurchschnittliche Genotypen für weitere Züchtungsprozesse zu selektieren (Positiv-Selektion) bzw. schlechte zu eliminieren (Negativ-Selektion). Auch wenn die Hyperspektralanalyse derzeit noch keine Substitutionsmöglichkeit für kostenintensive laboranalytische Malzuntersuchungen ist,

⁴¹ Das Sortengremium der Braugersten-Gemeinschaft e. V. prüft und bewertet vom Bundessortenamt neu zugelassene Braugerstensorten hinsichtlich ihrer Verarbeitungseignung in Mälzerei und Brauerei und gibt für Sorten, die diese Prüfung erfolgreich durchlaufen haben, die Verarbeitungsempfehlung des Berliner Programms. Ohne diese Empfehlung findet eine zugelassene Sorte in Deutschland keine Marktakzeptanz. Diese umfangreiche Prüfung von Verarbeitungseigenschaften stellt bei Braugerste im Vergleich zu anderen Kulturarten eine Besonderheit dar.

wird anhand dieser Überlegungen deutlich, dass die frühzeitige Kenntnis über die Ausprägung einiger prägnanter Malzeigenschaften einen deutlichen Wissensvorsprung darstellen kann.

In Bezug auf das Nutzungspotenzial der Hyperspektralanalyse ist zu konstatieren, dass hyperspektrale Vorhersagemodelle insbesondere für ein frühzeitiges Screening verschiedener pflanzlicher Merkmale genutzt werden könnten. Bei objektiver Bewertung der Projektergebnisse aus BARLEY BIODIVERSITY wird jedoch die Notwendigkeit zur Verbesserung der Vorhersagemodelle für einzelne Zielvariablen schnell deutlich. Die Befragungsergebnisse dokumentieren eine große Unsicherheit bei potenziellen Anwendern, insbesondere im Hinblick auf die hyperspektrale Bestimmung von Boniturmerkmalen im Feld. Aus Sicht der interviewten Züchter ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht objektiv einzuschätzen, ob die Hyperspektralanalyse den bestehenden Flaschenhals in der Feld-Phänotypisierung tatsächlich aufweiten kann. In diesem Zusammenhang lassen sich die dargelegten technischen Defizite als Argumente für die fehlende Anwenderakzeptanz anführen, die die Notwendigkeit einer weiteren technologischen Entwicklung unterstreichen (vgl. Punkt 7.3.1). Als erste Grundlage für diesen obligaten Weiterentwicklungsprozess können die im Punkt 8.3.6 aufgeführten Handlungsempfehlungen dienen.

8.3.4 Wirtschaftlichkeit der hyperspektralen Phänotypisierung (Forschungsfrage II c)

Mit den potenziellen Anwendungsmöglichkeiten der Hyperspektralanalyse wurden durch die befragten Experten teilweise wirtschaftliche Effekte einer möglichen unternehmerischen Nutzung angedeutet. Unter Züchtern besteht die Erwartungshaltung, dass sich die Beobachtungsintensität von Zuchtlinien durch leistungsfähige Sensorik bei gleichzeitiger Einsparung von Arbeits- und Analysekosten erhöhen lässt. Zwei spezifische Aussagen aus den geführten Experteninterviews liefern diesbezüglich Spielraum für eine Kalkulation möglicher Kosteneinsparungseffekte (vgl. Punkt 7.2.5):

- Eine Nutzung der Hyperspektralanalyse zur Erfassung von Kornmerkmalen, die zur Erhöhung der Selektionsintensität in einer Größenordnung von 15 % beitragen könnte (HANEMANN et al. 2018).
- Die hyperspektrale Erfassung verarbeitungsrelevanter Malzeigenschaften zur möglichen Identifizierung von 25 % der Zuchtstämme mit minderen Qualitäten (HANEMANN et al. 2018).

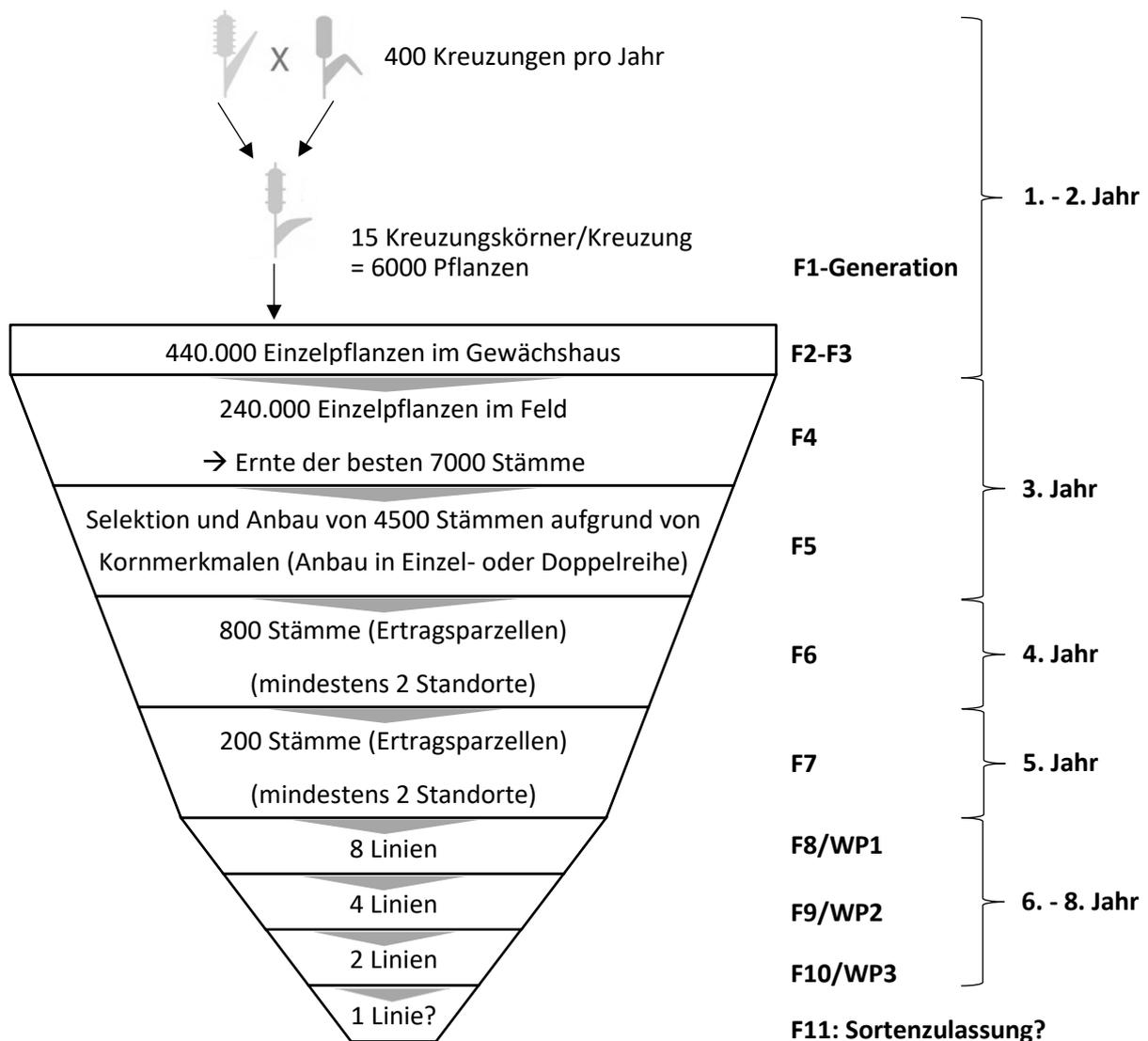
Diese Expertenaussagen implizieren zwei wesentliche Folgen: 1) Durch die höhere Selektionsintensität und die Reduzierung von Kandidatenstämmen könnten Umfänge von Feldversuchen über den gesamten Züchtungsprozess reduziert werden. 2) Durch die zusätzlich zur Verfügung stehende Flächenkapazität könnte jährlich eine größere Anzahl an Neukreuzungen durchgeführt werden. Zur Kalkulation der monetären Größenordnung jährlich realisierbarer Einsparungseffekte müssen lediglich die Kosten der Versuchsdurchführung mit der Anzahl reduzierter Zuchtstämme multipliziert werden. Für Kostensätze von Forschungsparzellen gelten folgende Annahmen⁴²:

- Beobachtungspartellen bestehend aus Einzel- oder Doppelreihen sowie Mikroplots werden mit 25 €/Parzelle bewertet.
- Ertragspartellen (10 bis 20 m²) einschließlich der standardmäßigen Erhebung aller züchtungsrelevanten Merkmale werden mit 50 €/Parzelle bewertet.

⁴² Basierend auf Empfehlungen der Arbeitsgruppe Bewertung von Forschungsparzellen der GFPI-Abteilung Getreide (HANEMANN 2018).

In Abbildung 29 ist ein typisches langjähriges Züchtungsschema für Sommergerste dargestellt, anhand dessen Kosteneinsparungseffekte abgeschätzt werden können. Die darin unterstellten 400 jährlichen Neukreuzungen aussichtsreicher Sorten und Stämme sind eine repräsentative Größenordnung eines mittelständischen Saatzuchtunternehmens. Ziel des Züchters über den gesamten Zeitraum ist die bestmögliche Selektion leistungsfähiger Zuchtstämme für die weltweite Anmeldung in staatlichen Prüfungssystemen zur Erlangung der Sortenankennung. Eine Verkürzung der Zuchtzeit ist auch mittels sensorischer Phänotypisierung nur bedingt möglich. Wesentlich realistischer erscheint hingegen eine höhere Selektionsintensität in jungen Züchtungsgenerationen. Genotypen mit negativen Korn- bzw. Qualitätseigenschaften könnten effizienter und schneller selektiert werden. Insbesondere in der F5- und F6-Generation besteht großes Potenzial einer erhöhten Selektionsintensität.

Abbildung 29: Schematische Darstellung eines exemplarischen Züchtungsprozesses für Sommergerste



Anmerkung: F-Generation = Filialgeneration, WP = Wertprüfung. Die tatsächliche Sortenzulassung unterliegt einer hohen Unsicherheit und ist abhängig von den Ergebnissen der Wertprüfungen.

Quelle: Eigene Darstellung (2018) auf Basis der Experteninterviews (2018).

Abbildung 29 unterstellt, dass aus der F4-Generation 7000 Zuchtlinien geerntet und im weiterführenden Selektionsprozess 4500 Linien anhand äußerer visueller Kornmerkmale für die Aussaat bestimmt

werden. Die Hyperspektralanalyse bietet an dieser Stelle die gewinnbringende Option, visuell nicht erkennbare negative Kornmerkmale zu identifizieren, sodass die Selektionsintensität laut Züchtersage um 15 % erhöht werden könnte. Infolgedessen ließe sich die Anzahl der Zuchtlinien in der nachfolgenden F5-Generation um 675 reduzieren. Bei Multiplikation mit dem Preisansatz für Beobachtungspartzen (25 €) resultiert daraus eine jährliche Kosteneinsparung von 16.875 €. Gleichzeitig besteht die Nutzungsoption, Kornmaterial hyperspektral hinsichtlich der Malzqualität zu untersuchen. Aufgrund des Berliner Programms spielt die Malzqualität eine enorme Rolle bei der Vermarktung von Braugerste. Durch hyperspektral erfasste Qualitätsparameter aus der Generation F5 könnte der Umfang des Zuchtprogramms in der F6-Generation um weitere 25 % reduziert werden. Umgerechnet auf die Größenordnung des in Abbildung 29 dargestellten Züchtungsprozesses ergibt sich eine Reduktion von 200 Ertragspartzen je Standort. Bei einer Bewertung von 50 € je Ertragspartze resultiert aus einem Mindestumfang von zwei Prüfungsstandorten ein Einsparungspotenzial von 20.000 € pro Jahr. In der Summe ergibt sich für das exemplarisch gewählte Züchtungsprogramm unter Berücksichtigung der unterstellten Kostensätze ein Kosteneinsparungspotenzial von 36.875 € pro Jahr.

Die vorgenommene Abschätzung wirtschaftlicher Effekte fokussiert sich ausschließlich auf die hyperspektrale Merkmals- und Qualitätserfassung von Korn bzw. Saatgut. Diese Beschränkung auf den stationären Einsatz der Hyperspektralanalyse begründet sich dadurch, dass die besten Prädiktionsergebnisse im Rahmen der Testphase des Projektes BARLEY BIODIVERSITY für Analysen am Korn erzielt wurden (vgl. Punkt 6.2.3). Die hyperspektrale Erfassung von Entwicklungs- und Ertragsparametern im Feld bietet bei entsprechender technischer Effizienz vermutlich ein noch größeres Kosteneinsparungspotenzial. Jedoch können aus den geführten Experteninterviews diesbezüglich keine begründeten Annahmen für weiterführende Kalkulationen getätigt werden. Die überwiegende Mehrheit der interviewten Züchtungsexperten hat bei Betrachtung der projektinternen Zwischenergebnisse Zweifel an der Eignung der Hyperspektralanalyse für Feldbonituren, sodass eine Abschätzung monetärer Einsparungseffekte zum gegenwärtigen Zeitpunkt deutlich verfrüht erscheint. Da sich die o. g. monetären Effekte auf den stationären Einsatz der Hyperspektralkamera beschränken, entfallen die Kosten einer Trägerplattform. Bei Investitionskosten für die Hyperspektralkamera von 130.000 € würde sich entsprechend der kalkulierten Einsparungseffekte von 36.875 € pro Jahr eine überschaubare Amortisationsdauer von ca. vier Jahren ergeben. Im Hinblick auf diese durchaus gering anmutende Amortisationsdauer ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die prozentualen Abschätzungen für das Ausmaß hyperspektraler Kornselektionen lediglich auf der Basis einzelner Expertenaussagen getätigt wurden. Da die Versuche zur Qualitätserfassung in Kooperation mit dem Projektpartner Saatucht Breun durchgeführt wurden, basieren die Annahmen hinsichtlich verbesserter Selektionsentscheidungen (vgl. Abbildung 29) auf Aussagen der Züchter, die an diesem Projekt beteiligt waren. Aufgrund der Neuheit des hyperspektralbasierten Verfahrens besteht zum gegenwärtigen Zeitpunkt von externer Seite kaum eine Möglichkeit zur realistischen monetären Abschätzung.

Darüber hinaus unterliegt die vorgenommene Kalkulation einem weiteren bedeutsamen Einflussfaktor: den Kostensätzen für Forschungspartzen. Eine adäquate Ergebnisinterpretation verlangt eine Differenzierung zwischen internen und externen Kostensätzen für Bestandsführung und Bonitur von Forschungspartzen. Im Gegensatz zu internen Kostensätzen werden externe Kostensätze nicht kalkulatorisch anhand betrieblicher Einzel- und Gemeinkosten, sondern auf Verhandlungsbasis zwischen

Vertragspartnern erfasst. Im Rahmen von Gemeinschaftsforschungsvorhaben fungieren Züchter partiell als eine Art Dienstleister und stellen Forschungsparzellen zur Verfügung, die entsprechend zu entlohnen sind. In diesem Fall werden nicht interne, sondern externe Kostensätze angesetzt. Zur Abschätzung jährlich realisierbarer Einsparungseffekte der Hyperspektralanalyse musste aufgrund der Nichtverfügbarkeit betrieblicher Daten zwangsläufig auf externe Kostensätze zurückgegriffen werden, sodass Parzellenpreise von 25 bzw. 50 € unterstellt wurden. Aufgrund gewinnmaximierenden Verhaltens des Unternehmers ist davon auszugehen, dass externe Kostensätze immer höher sind als interne. Dieser kausale Sachverhalt muss bei der Ergebnisinterpretation zwingend berücksichtigt werden, denn aus kalkulatorischer Perspektive des Saatzuchtunternehmens vermindert sich dadurch auch das jährliche Einsparungspotenzial frühzeitiger hyperspektraler Selektionsentscheidungen. Die tatsächliche Amortisationsdauer der Hyperspektralkamera wird dementsprechend unabhängig von der Unsicherheit der Experteneinschätzungen länger als vier Jahre sein.

Die kalkulierten Effekte beziehen sich lediglich auf ein Zuchtprogramm von Sommergerste. Im Vergleich zur Wintergerste sind die Qualitäten laut Züchteraussagen relativ homogen, sodass sich Kosteneinsparungseffekte nur bei hoher Genauigkeit der Hyperspektralanalyse einstellen werden. Derzeit wird diese erforderliche Präzision noch nicht erreicht. Die kalkulierten monetären Effekte werden sich dementsprechend nur unter der Voraussetzung einer verbesserten Prädiktion einstellen. Anderenfalls eröffnet sich bei einer hohen Analysegenauigkeit auch bei anderen Kulturarten die Option zur Nutzung der Hyperspektralanalyse für die Einschätzung qualitativer Eigenschaften. Mit der Erweiterung des Einsatzgebietes auf verschiedene Kulturen erhöht sich wiederum das Kosteneinsparungspotenzial der Hyperspektralanalyse.

Einschränkend muss zudem angemerkt werden, dass es sich bei den kalkulierten Kosteneinsparungseffekten lediglich um eine theoretische monetäre Größenordnung handelt: Infolge verbesserter Methoden der Feld-Phänotypisierung wird sich die Zuchtgartenfläche nicht minimieren. Vielmehr wird ein Züchter bei erhöhter Selektionsintensität die Anzahl jährlicher Neukreuzungen aufstocken, sodass anstelle der 400 jährlich unterstellten Kreuzungen z. B. 500 durchgeführt werden könnten. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit zur Identifizierung leistungsfähiger Genotypen mit dem Potenzial zur Sortenankennung. Aufgrund der Langwierigkeit und Unsicherheit im Züchtungsprozess sind jedoch keine realistischen Kalkulationen hinsichtlich der Auswirkungen auf den Unternehmensgewinn möglich, sodass lediglich theoretische Kosteneinsparungseffekte Berücksichtigung finden konnten.

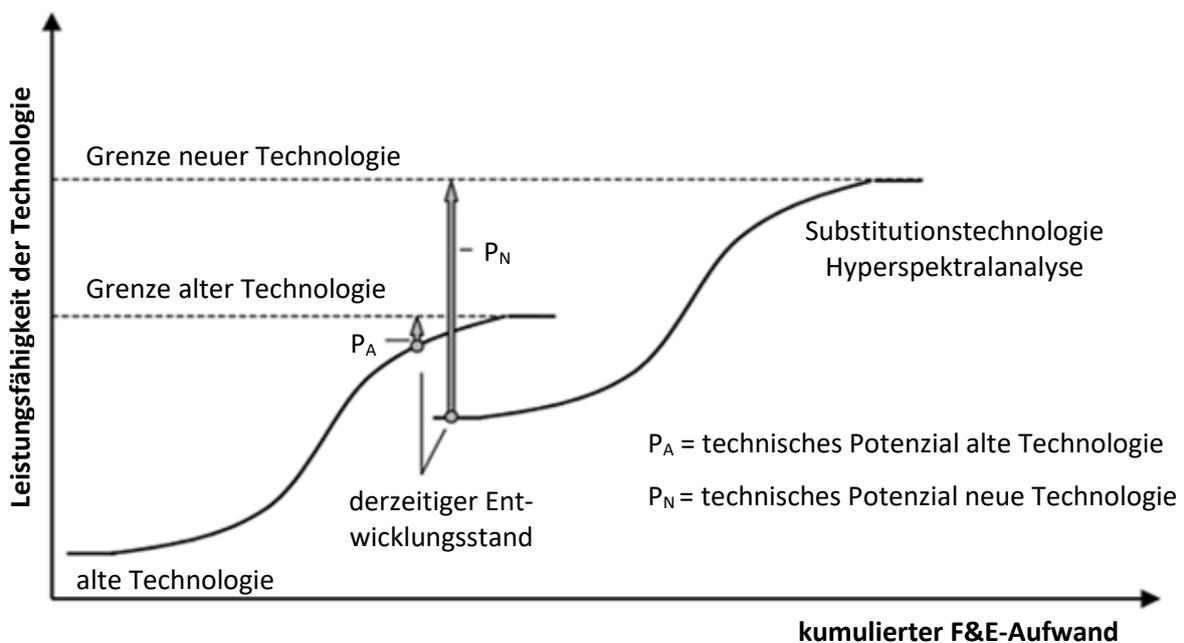
Die Kalkulation wirtschaftlicher Effekte und deren kritische Betrachtung belegt, mit welcher erheblichen Unsicherheit die monetäre Nutzenbewertung zum gegenwärtigen Zeitpunkt verbunden ist. Die Ergebnisse sind daher lediglich ein grober Indikator für potenzielle Effekte einer funktionsfähigen Sensorik zur Unterstützung züchterischer Selektionsentscheidungen. Trotz aller Unsicherheit wird anhand des Kalkulationsbeispiels deutlich, welches wirtschaftliche Potenzial dennoch durch verbesserte Selektionsentscheidungen infolge des Einsatzes sensorischer Phänotypisierung gegeben ist. Ebenso wie beim Precision Farming ist die Betriebsgröße jedoch ein nicht zu vernachlässigender Faktor hinsichtlich der Investitionsentscheidungen zur Anschaffung von Sensorik. Ein finanzieller Anreiz besteht in erster Linie für große Saatzuchtunternehmen mit einem ausgedehnten Zuchtprogramm, da sich aufgrund der höheren Auslastung eine geringere Amortisationsdauer einstellt. Unabhängig davon wird deutlich,

dass auch große Investitionsvolumina, die im Fall der Hyperspektralkamera bei 130.000 € liegen, langfristig rentabel sein könnten.

8.3.5 Herausforderungen bei der Implementierung der Hyperspektralanalyse in die praktische Pflanzenzüchtung

Neben den erwähnten potenziellen Stärken der Hyperspektralanalyse lassen sich mehrere der wirtschaftlichen und technologischen Mängel, die Züchter allgemein in Bezug auf Sensorik anführen, auch auf den Geltungsbereich der Hyperspektralanalyse übertragen (vgl. Punkt 7.1.3). Die geführten Experteninterviews verdeutlichen, dass aufgrund großer Unsicherheit und hoher Anwenderrisiken zum gegenwärtigen Zeitpunkt ein eher geringer Anreiz zur Substitution konventioneller Boniturmethode besteht. Dies trifft allgemein auf den Bereich sensorischer Phänotypisierung zu und schließt die Hyperspektralanalyse als spezifischen Anwendungsfall ein. Die Ergebnisse der Befragungen dokumentieren, dass Züchter die Hyperspektralanalyse aufgrund derzeit bestehender wirtschaftlicher Risiken und technologischer Defizite kurzfristig nicht als Substitutionstechnologie in der Züchtungspraxis sehen. Angesichts des gegenwärtigen Entwicklungsstandes ist diese temporäre Skepsis durchaus berechtigt. Die in BARLEY BIODIVERSITY genutzte Hyperspektralanalyse stellt lediglich einen Entwicklungspfad sensorischer Phänotypisierung dar. Das System befindet sich gegenwärtig in einem Anfangsstadium der Entwicklung, sodass zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht absehbar ist, welcher sensorische Entwicklungspfad bei Züchtern künftig praktische Relevanz erlangen wird. Bei der Realisierung der im Abschnitt 7.2 identifizierten Nutzungspotenziale könnte die Hyperspektralanalyse mittel- bis langfristig eine optionale Substitutionstechnologie in der Feld-Phänotypisierung darstellen. Der zeitliche Rahmen dieser Entwicklung wurde auf fünf bis zehn Jahre geschätzt (KICHERER 2018).

Abbildung 30: S-Kurven-Konzept zur Erklärung des optimalen Wechselzeitpunktes innovativer Technologien



Quelle: Nach MÖHRLE und SPECHT (2010).

In diesem Kontext bietet sich das von einem Experten im Rahmen eines Interviews angeführte Konzept technologischer Lern- bzw. Entwicklungskurven als Diskussionsgrundlage an: Mit Hilfe von S-Kurven-Konzepten lassen sich Entscheidungen hinsichtlich der Beibehaltung bzw. Substitution von Technologien theoretisch erklären. Abbildung 30 stellt die Leistungsfähigkeit alter Technologie (konventionelle Handbonitur, Laboranalyse) und neuer Technologie (hyperspektrale Phänotypisierung) anhand S-förmiger Leistungskurven über dem kumulierten F&E-Aufwand dar. Das technische Entwicklungspotenzial alter Technologie ist weitgehend ausgeschöpft, da der Züchtungsprozess mittels herkömmlicher Handbonitur optimiert und eine Kostendegression bei laboranalytischen Untersuchungen nicht zu erwarten ist. Die potenzielle Substitutionstechnologie der Hyperspektralanalyse bietet künftig zwar die Option zur Leistungssteigerung, doch der heutige Entwicklungsstand ist nicht ausreichend, um die Leistungsfähigkeit etablierter Züchtungsmethoden zu übertreffen. Das Resultat ist die Beibehaltung der alten Technologie bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Grenzen der Leistungsfähigkeit herkömmlicher Methoden durch weitere Investitionen in die F&E überschritten werden.

Bei Investitionsentscheidungen liegen wirtschaftlich technologischer Nutzen (Effizienzsteigerungen und Wettbewerbsvorteile gegenüber Konkurrenten) sowie Schaden (Fehlinvestitionen) oft eng beieinander (ENGSTLER 2009: 10f.). Angesichts der Investitionskosten von 130.000 € für eine Hyperspektralkamera sollte der wirtschaftliche Nutzen für den Züchter zur Minimierung von Investitionsrisiken möglichst exakt zu bestimmen sein. Genau darin liegt bei der hyperspektralen Phänotypisierung gegenwärtig eine maßgebliche Problematik für Züchter, da detaillierte Kosten-Nutzen-Kalkulationen kaum möglich sind (vgl. Punkt 8.3.4). Diese Tatsache ist keinesfalls als Kritikpunkt an der Hyperspektralanalyse aufzufassen, sondern vielmehr eine typische Erscheinung für Technologien im Entwicklungsstadium. Im Vergleich zu einfachen RGB-Kameras, die für spezifische Anwendungen in der Feld-Phänotypisierung genutzt werden können, besteht bei Hyperspektralkameras aus Perspektive des Nutzers ein deutlicher Kostennachteil. Durchgeführte Befragungen belegen, dass fast ausnahmslos alle befragten Züchter mit kostengünstigen RGB-Kameras oder multispektralen Anwendungen in der Feld-Phänotypisierung experimentieren. Eine Investitionsbereitschaft seitens der Saatzüchter ist durchaus vorhanden, da bei entsprechend frühzeitiger Anwendung Wettbewerbsvorteile gegenüber konkurrierenden Unternehmen realisierbar sind. Doch im Gegensatz zu genannten Low-Cost-Systemen besteht bei Hyperspektralkameras die Herausforderung, dass sich der unternehmerische Investitionszeitpunkt aufgrund hoher Investitionskosten nach hinten verschiebt. Mittelständische Saatzuchtunternehmen werden aufgrund des finanziellen Risikos erst zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt, bei dem der wirtschaftlich-technologische Nutzen quantifizierbar ist, zu Investitionen bzw. Ausgaben für F&E bereit sein. Darin liegt die Ursache, dass Hyperspektralkameras trotz ihres potentiell breiten Nutzungspotenzials in der Pflanzenzüchtung bislang sehr begrenzt Verwendung finden. Aufgrund der Kostenintensität ist der Entwicklungsvorlauf, der durch öffentliche Forschung gewährleistet werden muss, wesentlich größer als bei kostengünstigeren Sensoren. Die Anwendungen sind daher gegenwärtig fast ausschließlich auf öffentliche Projekte beschränkt.

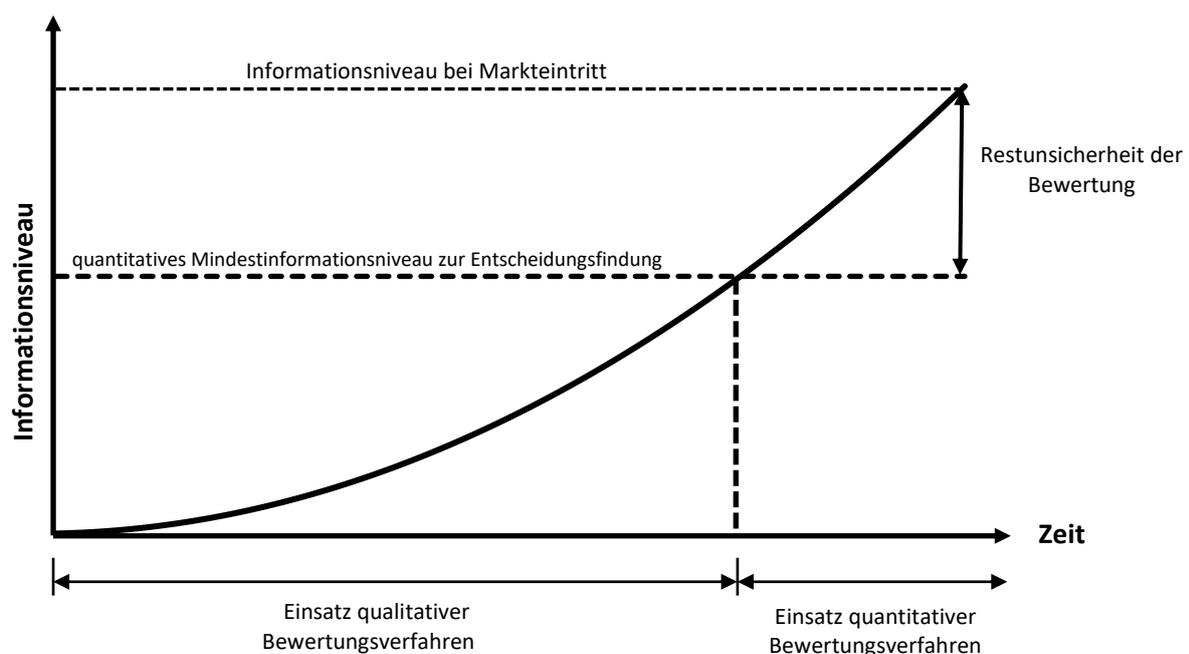
Die Forschungsbemühungen in BARLEY BIODIVERSITY sind ein wichtiger Entwicklungsschritt zur Nutzbarmachung des technologischen Potenzials der Hyperspektralanalyse für die Pflanzenzüchtung. Die-

ser Entwicklungsprozess ist jedoch bei Weitem nicht abgeschlossen. Zur Steigerung der technologischen Attraktivität für Anwendungen in der Pflanzenzüchtung bedarf es weiterführender Entwicklungsmaßnahmen.

8.3.6 Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse im Hinblick auf die Anwendung in der Pflanzenzüchtung (Forschungsfrage II d)

Eine maßgebliche Herausforderung bei der entwicklungsbegleitenden Bewertung der Hyperspektralanalyse besteht in dem Zeitpunkt der Evaluation. In Abbildung 31 ist der Einfluss entscheidungsrelevanter Informationen auf die Wahl der Bewertungsmethode für Innovationen schematisch dargestellt. Es werden wesentliche Kausalzusammenhänge zwischen dem Zeitpunkt der Evaluation, der Wahl der Bewertungsmethode und der damit korrespondierenden Bewertungssicherheit verdeutlicht. Zudem wird grafisch aufgezeigt, dass erst mit zunehmendem Informationsniveau über die jeweiligen Innovationen die Möglichkeit der Einbeziehung quantitativer Bewertungsinstrumentarien zur Erhöhung der Entscheidungssicherheit besteht. Durch die Nichtverfügbarkeit quantifizierbarer Daten infolge des frühen Bewertungszeitpunktes im Projekt BARLEY BIODIVERSITY beschränkte sich das methodische Vorgehen dieser Arbeit lediglich auf qualitative Bewertungsverfahren, sodass daraus eine erhebliche Bewertungsunsicherheit resultiert. Dennoch liefern die Ergebnisse der qualitativen Befragung potenzieller Anwender einen wichtigen Beitrag für einen zielgerichteten Weiterentwicklungsprozess. Eine Bewertung zu einem späteren Zeitpunkt würde einerseits aufgrund eines höheren Informationsniveaus zwar umfangreichere Erkenntnisse im Hinblick auf die Akzeptanz und die Wirtschaftlichkeit der Hyperspektralanalyse liefern, andererseits wären die Kosten technologischer Anpassungen zu einem fortgeschrittenen Entwicklungszeitpunkt höchstwahrscheinlich deutlich höher.

Abbildung 31: Einfluss entscheidungsrelevanter Informationen auf die Wahl der Bewertungsmethode für Innovationen



Quelle: Nach GRANIG (2008: 5).

Durch die in dieser Arbeit vorgenommene frühzeitige Evaluierung der Hyperspektralanalyse ist zum einen eine kostengünstige Beeinflussung der technologischen Entwicklung möglich, zum anderen unterliegen die Ergebnisse jedoch einer nicht zu unterschätzenden Unsicherheit und könnten im Zuge der technologischen Weiterentwicklung redundant werden. Die geführten Experteninterviews dokumentieren nicht nur das Nutzungspotenzial der Hyperspektralanalyse, sondern offenbaren beim gegenwärtigen Stand der Technik erhebliche Zweifel im Hinblick auf die praktische Verwendung im Züchtungsbetrieb. Um dem Ziel einer praxisorientierten Weiterentwicklung der hyperspektralen Phänotypisierung entsprechen zu können, werden aus den durchgeführten Experteninterviews nachfolgend ausgewählte Handlungsempfehlungen für die technologische Weiterentwicklung abgeleitet:

a) Verbesserung der Prädiktionsgüte

Infolge der aus Befragungen potenzieller Anwender eruierten Divergenz zwischen derzeit realisierter und erforderlicher Prädiktionsgüte besteht im Hinblick auf eine erfolgreiche Weiterentwicklung der hyperspektralen Phänotypisierung im Freiland eine elementare Notwendigkeit zur Verbesserung der Analysegenauigkeit. Die Hyperspektralanalyse im IPAS-Projekt BARLEY BIODIVERSITY wurde für drei Anwendungsbereiche erprobt: Inhaltsstoffe (1), Entwicklungs- und Ertragsparameter (2) sowie Malzeigenschaften (3). Bereits im Rahmen der Testphase konnte festgestellt werden, dass die zum gegenwärtigen Zeitpunkt realisierte Prädiktionsgüte nicht für alle Merkmale zufriedenstellende Ergebnisse liefert und in Abhängigkeit des jeweiligen Zielmerkmals große statistische Leistungsunterschiede bei der Prädiktion vorliegen. Insbesondere bezüglich der Vorhersage von Entwicklungs- und Ertragsparametern konnten die Ergebnisse der leave-one-out-Validierung bei Anwendung auf die gesamte Population nicht hinreichend bestätigt werden. Im Gegensatz zur Prädiktion von Inhaltsstoffen, bei der teilweise gute Validierungsergebnisse erzielt wurden, fehlt insbesondere im Hinblick auf die für Züchter äußerst relevante Bestimmung von Entwicklungs- und Ertragsparametern ein konkreter quantitativer Leistungsnachweis für die technologische Eignung der Hyperspektralanalyse.

b) Spezialisierung auf Zielgrößen mit hoher Anwenderrelevanz

Es ist anzuraten, sich bei der Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse gezielt auf phänotypische Merkmale mit hoher Anwenderrelevanz zu fokussieren. In den geführten Experteninterviews wurde deutlich, dass die Prädiktion pflanzlicher Inhaltsstoffe aus praxisorientierter Perspektive eher von sekundärer Bedeutung ist. Die Fähigkeit eines Genotyps zur Aufnahme bestimmter Nährstoffe schlägt sich in ertragsbeeinflussenden Merkmalen nieder, sodass primär eine Notwendigkeit zur Erfassung dieser agronomischen Pflanzeigenschaften besteht. Zudem sehen die befragten Experten ein hohes Nutzungspotenzial bei der hyperspektralen Erfassung von Qualitäts- und Verarbeitungseigenschaften. Die Bestimmung der Malzqualität spielte im Vergleich zur Inhaltsstoffanalyse in BARLEY BIODIVERSITY eine untergeordnete Rolle. Daher ist auf Basis der geführten Experteninterviews eine Verschiebung der Forschungsprioritäten zugunsten der hyperspektralen Erfassung agronomischer und qualitativer Eigenschaften anzuraten. Möglicherweise kann durch eine Spezialisierung und Ausrichtung auf prägnante phänotypische Zielgrößen mit hoher Anwenderrelevanz das Potenzial der Hyperspektralanalyse besser ausgeschöpft werden.

c) Optimierung der Datenmodellierung

Um dem bei der Phänotypisierung so wichtigen Gütekriterium der Objektivität zu entsprechen, sollten Prozesse der hyperspektralen Datenmodellierung optimiert werden. Anzuraten ist in diesem Zusammenhang sowohl eine Vergrößerung des Stichprobenumfangs (z. B. durch großflächigeres Auszählen phänotypischer Merkmale in den Parzellen) als auch eine Erhöhung des laboranalytisch zu untersuchenden Probenmaterials auf 30 % statt bisher 10 %. Gegenwärtig kann dem Kriterium der Objektivität in Bezug auf die Prädiktion spezifischer pflanzlicher Merkmale durch die Hyperspektralanalyse nicht durchgängig entsprochen werden. Die Datenmodellierung mittels Maschinellen Lernens zur Interpretation der Spektraldaten basiert in einigen Fällen auf subjektiv erhobenen Eingangsdaten (z. B. Ähren/m²). Auch eine Divergenz zwischen dem entnommenen Probenmaterial (Fahnenblätter) und den verwendeten Spektraldaten (ganze Pflanze) stellen potenzielle Fehlerquellen dar. Eine exakte Kalibrierung anhand subjektiver Zieldaten ist jedoch nicht möglich. Die ermittelte Performanz ist umso besser, je repräsentativer die Kalibrierungsdaten sind. Die Umsetzung dieser Handlungsempfehlung könnte die für eine exakte Kalibrierung sehr maßgebliche Zieldatengenauigkeit verbessern. Durch die unter b) vorgeschlagene Spezialisierung auf Zielgrößen mit hoher Praxisrelevanz erhöht sich möglicherweise auch die zeitliche Kapazität für eine objektive Zieldatenerfassung.

d) Minimierung des Einflusses von Störeffekten unter Freilandbedingungen

Im Interesse der bereits erläuterten Notwendigkeit zur Verbesserung der Prädiktionsgüte (Handlungsempfehlung a) sollte der Einfluss von Störeffekten bei der hyperspektralbasierten Phänotypisierung unter Freilandbedingungen weiterhin nicht unberücksichtigt bleiben. Zukünftig müssen relevante Störgrößen identifiziert und deren Einfluss auf das Messergebnis in Betracht gezogen werden. Projektinterne Ergebnisse dokumentieren, dass die Präzidierbarkeit von Korninhaltsstoffen bei stationärer Anwendung der Hyperspektralkamera im Labor technisch möglich ist. Während Störeinflüsse unter laboranalytischen Bedingungen weitgehend minimiert werden können, sind umwelt- und witterungsbedingte Einflüsse im Feld wesentlich größer (z. B. Streulichteinfluss, Wärme, Luftfeuchtigkeit sowie der Einfluss von Wasser). Innerhalb von BARLEY BIODIVERSITY wurden derartige Störeinflüsse weitgehend vernachlässigt und konkrete Anhaltspunkte für die Wirkung der genannten Effekte fehlen. Da das vorhandene Analyse- und Nutzungspotenzial der Hyperspektralanalyse bei Nichtberücksichtigung messungsrelevanter Störgrößen unter Freilandbedingungen nicht voll ausgeschöpft werden kann, stellt die Umsetzung dieser Handlungsempfehlung eine künftige Forschungspriorität dar.

e) Berücksichtigung des sichtbaren Wellenlängenbereiches bei der Datenerhebung und -interpretation

Da der Zusammenhang zwischen spektralem Messergebnis und dem jeweiligen phänotypischen Merkmal ex ante unbekannt ist und erst im Rahmen des Kalibrierungsprozesses mit Hilfe mathematischer Algorithmen eruiert wird, ist ein etwaiger limitierender Einfluss auf die Analysegenauigkeit infolge der Eingrenzung des Wellenlängenbereiches auf 1000 bis 2500 nm wissenschaftlich zu evaluieren. Solange es aus technischer Perspektive keine Begründung für die restriktive Begrenzung des Wellenlängenbereiches gibt, erscheint eine zusätzliche Erhebung der pflanzlichen Reflexionseigenschaften im Wellenlängenbereich von 400 bis 1000 nm angebracht. Auch der sichtbare Wellenlängenbereich

bietet charakteristische Signaturen, sodass durch dessen Nichtberücksichtigung von vornherein wertvolle Spektralinformationen vernachlässigt werden. Möglicherweise trägt dies zur erforderlichen Verbesserung der Prädiktionsgüte bei.

f) Realisierung einer standort- und genotypunabhängigen Kalibrierung

Im Interesse der angestrebten Implementierung der hyperspektralbasierten Phänotypisierung in die Pflanzenzüchtung gilt es zu prüfen, inwieweit die Kalibrierungsergebnisse aus BARLEY BIODIVERSITY als Basismodell für die Übertragung auf andere, beliebige Standorte und Genotypen geeignet sind. Im Rahmen der Testphase der Hyperspektralanalyse erfolgte eine dreijährige Kalibrierung (2016 bis 2018) auf den beiden Standorten Halle und Merbitz an den beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25. Es bestehen jedoch begründete Zweifel, inwieweit diese Kalibrierung auf andere Standorte und unbekannte Genotypen übertragbar ist. Die Vorhersagemodelle sind auf die spezifischen Standortbedingungen und die jeweiligen Genotypen adaptiert. Bei Anwendung dieser Modelle auf anderen Standorten bzw. für andere Genotypen wird sich die Prädiktionsgüte phänotypischer Merkmale vermutlich verschlechtern. Aus Züchterperspektive ist eine kosten- und zeitaufwendige Kalibrierung nicht wirtschaftlich. Im Hinblick auf die unternehmerische Eignung der Hyperspektralanalyse scheint eine standort- und genotypunabhängige Kalibrierung eine der wesentlichsten Bestimmungsfaktoren zu sein. Diesbezüglich muss weiterführend an einer praktikablen Lösung gearbeitet werden.

g) Verbesserung der Mobilität und Erhöhung der Flächenleistung

Zur Gewährleistung einer hohen Wirtschaftlichkeit der hyperspektralen Phänotypisierung sollten durch zukünftige Entwicklungsarbeit die Kriterien Flexibilität, Mobilität und Flächenleistung erhöht werden. Letztgenannter Aspekt ließe sich durch eine Erhöhung der Messgeschwindigkeit realisieren, wobei zu prüfen ist, welche Auswirkung dies auf die Prädizierbarkeit einzelner phänotypischer Merkmale hat. Inwieweit eine Phänotypisierungsplattform, wie der AgRover, in der Lage ist, die genannten wirtschaftlichen Effizienzkriterien zu erfüllen, kann gegenwärtig noch nicht abgeschätzt werden. Für Anwender ist eine solche Trägerplattform stets mit zusätzlichen technischen Risiken verbunden, sodass auch die Nutzung von Traktoren als Sensorbasis in Betracht gezogen werden sollte. Im Hinblick auf Effizienzsteigerungen hyperspektraler Phänotypisierung bieten Drohnen zukünftig ein erhebliches Potenzial. Derzeit besteht die Problematik, dass die hyperspektralen Kameras zu groß sind, um mittels Drohne über das Feld fliegen zu können. Doch der technische Fortschritt wird dies in absehbarer Zeit durch Miniaturisierung der Kameras ermöglichen.

h) Verringerung der Investitionskosten durch multispektrale Bilderfassung

Aus anwenderorientierter Perspektive besteht eine primäre Weiterentwicklungsmaßnahme der hyperspektralbasierten Phänotypisierung darin, mit Hilfe mathematischer Modelle und Algorithmen die tatsächlich relevanten Wellenlängenbereiche ausfindig zu machen, in denen sich die jeweilige züchterische Zielgröße im Reflexionsgrad widerspiegelt. Durch die Erkenntnis, in welchem konkreten Spektralbereich die relevanten Informationen verborgen liegen, lassen sich möglicherweise Investitionskosten und -risiken für den Nutzer reduzieren, da multispektrale Systeme mit geringerer Kameraqualität in Abhängigkeit von der jeweils zu prädizierenden Zielvariable ausreichen würden. In BARLEY BIODIVERSITY wurde durch die Ermittlung sog. Relevanzprofile ein erster Versuch zur Spezifizierung des

Wellenlängenbereiches unternommen (z. B. für die Prädiktion von K oder Mg). In zukünftigen Entwicklungsschritten sollte getestet werden, inwieweit diese Ergebnisse für die Konzipierung multispektraler Anwendungen geeignet sind. Da insbesondere bei der Prädiktion von Inhaltsstoffen gute Validierungsergebnisse mit teilweise $R^2 > 0,9$ erzielt wurden, bieten multispektrale Systeme bei geringem Performanzverlust eine kostengünstigere Alternative. Durch die erfolgreiche Umsetzung dieser Handlungsempfehlung ließen sich finanzierbare praxistaugliche Geräte entwickeln, die nach den individuellen Zielvorgaben des Züchters konfiguriert werden könnten. Aufgrund der von befragten Experten betonten Notwendigkeit zur Entwicklung von Low-Cost-Systemen stellt die Umsetzung dieser Handlungsempfehlung eine maßgebliche Priorität dar.

i) Datenintegration und -auswertung in Echtzeit

Damit der Pflanzenzüchter innerhalb eines zeitlich eng getakteten Züchtungsprozesses in der Lage ist, auf der Basis hyperspektral erhobener Daten qualifizierte Selektionsentscheidungen zu treffen, ist eine effiziente Datenauswertung in Echtzeit erforderlich. Dieses Anwenderkriterium konnte in BARLEY BIO-DIVERSITY bislang nicht in vollem Umfang erfüllt werden, da sich die Kalibrierung aufgrund zeitaufwendiger Laboranalysen als sehr langwierig erwies. Ergebnisse der hyperspektralen Prädiktion lagen erst mit einer zeitlichen Verzögerung von ca. einem Jahr vor. Für eine Datenauswertung in Echtzeit müssen bei Fortsetzung des Entwicklungsprozesses die notwendigen Softwarevoraussetzungen geschaffen werden. Ein relevanter Aspekt dabei ist auch der Umgang mit den großen Datenmengen hyperspektraler Aufnahmen, da auf Ebene der praktischen Pflanzenzüchtung nicht immer die nötigen infrastrukturellen Voraussetzungen dafür gegeben sind. Durch die im Punkt h) geforderte Konzeption multispektraler Systeme könnte dieser letztgenannte Aspekt entfallen.

j) Erweiterung des Anwendungsbereiches der Hyperspektralanalyse auf Aspekte des Precision Farming

Der Einsatz der Hyperspektralmessung zur nicht-invasiven Erfassung pathogener Stressfaktoren und des pflanzlichen Nährstoffversorgungszustandes bietet in Verbindung mit GPS und geostatistischer Auswertung über den züchterischen Anwendungsbereich hinaus Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft, sodass die Technologie zukünftig verstärkt auch für die Nutzung im Precision Farming erprobt werden sollte. Durch die Änderung des Metabolitenverhältnisses unter Pathogenbefall lassen sich Pflanzenkrankheiten mittels spektraler Signatur und computergestützt-automatisierter Datenanalyse bereits in frühen Entwicklungsstadien diagnostizieren. Dies kann nicht nur dazu beitragen, resistente bzw. tolerante Sorten unter einer Vielzahl von Testgenotypen zu identifizieren und den Züchtungsfortschritt zu beschleunigen, sondern bietet in Bezug auf die landwirtschaftliche Praxis einen vielversprechenden technologischen Ansatz zur Ermittlung schlagspezifischer Befallsnester und zur Erstellung einer Behandlungskarte für eine bedarfsgerechte Applikation von Pflanzenschutzmitteln. Gleichzeitig könnten hyperspektrale Inhaltsstoffanalysen von Kulturpflanzen im Zusammenhang mit dem teilflächenspezifischen Ertragspotenzial für die nutzungsgerechte Applikation von Grunddüngung genutzt werden. Da Entwicklungen zur Verminderung des landwirtschaftlichen Inputs insbesondere aus umweltökologischen Aspekten von herausragendem Interesse sind, besteht hinsichtlich einer möglichen Anwendung im Precision Farming zukünftig Forschungsbedarf.

9 Zusammenfassung

Am Anfang der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette steht die Pflanzenzüchtung und leistungsstarke Kultursorten bilden das Fundament für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Landwirtschaft. Besonders angesichts weltweiter Herausforderungen im Agrarsektor (z. B. Klimawandel, Bevölkerungswachstum, Ressourcenknappheit und Nachhaltigkeit) stellen Innovationen in der Pflanzenzüchtung eine künftige Schlüsseltechnologie dar. Der Fokus der vorliegenden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes BARLEY BIODIVERSITY entstandenen Arbeit lag auf der sozioökonomischen Bewertung von zwei züchterischen Innovationen: A) Die beiden Wildgersten-Introgressionspopulationen S42 und HEB-25, die durch Einkreuzung positiver Wildallele nicht nur zu einer Erweiterung von Biodiversität im Genpool der Pflanzenzüchtung beitragen, sondern auch das Potenzial für Produktivitätssteigerungen der Kulturart Sommergerste bieten. B) Eine Hochdurchsatz-Phänotypisierung auf technologischer Basis der Hyperspektralanalyse zur nicht-invasiven quantitativen und qualitativen Erfassung züchtungsrelevanter Pflanzenmerkmale.

Zu Beginn dieser Arbeit wurde aus historischer Perspektive die Bedeutung der Agrarforschung und im Speziellen der Pflanzenzüchtung im Hinblick auf Produktivitätsverbesserungen untersucht. Die Pflanzengenetik ist neben Precision Farming, Pflanzenschutz, Bewässerungstechnologien, effizienten Beratungs- und Managementsystemen sowie Strategien zur Bodenverbesserung lediglich eine Komponente des agrartechnischen Fortschritts, jedoch ist anhand von Literaturrecherchen deutlich geworden, dass der genetische Anteil des Produktivitätswachstums in Deutschland in den letzten 50 Jahren bei etwa 50 % liegt. Darüber hinaus konnte im Vergleich zu anderen Faktoren des agronomischen Fortschritts ein sukzessiver Bedeutungsgewinn genetischer Effekte im Zeitverlauf festgestellt werden, so dass davon auszugehen ist, dass künftig erforderliche Produktivitätssteigerungen zu einem großen Teil durch die Pflanzenzüchtung zu realisieren sind.

Empirisch wurden Produktivitätssteigerungen anhand der Introgressionslinien aus den Populationen S42 und HEB-25 eruiert, die gezielt genetische Variationen von Wildarten nutzen. Die Bewertung der Produktionsleistung erfolgte monetär auf der Basis von Rentabilitätsvergleichen der Introgressionslinien mit Elitesorten. Anhand mehrjähriger Feldversuche (2011 bis 2016) wurden aus der hohen Anzahl an Testgenotypen wirtschaftlich aussichtsreiche Genotypen selektiert und 2017 sowie 2018 separat in Parzellenversuchen unter den beiden Intensitätsstufen mit und ohne Fungizid geprüft. Die methodische Bewertungsgrundlage stellte eine Monte-Carlo-Simulation dar. Das Bewertungskonzept für die ökonomische Zielgröße der fungizidkostenfreien Leistung berücksichtigt Eintrittswahrscheinlichkeiten für Erträge und marktrelevante Qualitätseigenschaften sowie historische Marktdaten zur Erfassung des Preisrisikos. Rentabilitätsvergleiche der selektierten Introgressionslinien erfolgten sowohl mit den beiden Kultureltern der Populationen S42 und HEB-25 (Scarlett und Barke) als auch mit modernen Elitesorten (Quench und Planet).

Als ein wichtiges Ergebnis der Arbeit wurde nachgewiesen, dass durch Einkreuzung von Chromosomensegmenten der Wildarten bei den Populationen S42 und HEB-25 eine höhere Ertragsstabilität erreicht wird. Aus den Introgressionslinien konnten wirtschaftlich bedeutsame Low-Input-Genotypen identifiziert werden, deren Schadpotenzial ohne Fungizid-Behandlung deutlich geringer ist als bei den Vergleichssorten. Infolge dieser erhöhten Widerstandsfähigkeit ist der Verzicht auf Fungizid-Einsatz

bei diesen Introgressionslinien im Durchschnitt wirtschaftlicher als praxisübliche Aufwandmengen. Durch diese Kosteneinsparungen können Rentabilitätssteigerungen zwischen 18 und 60 €/ha im Vergleich zu den Kultureltern Scarlett bzw. Barke realisiert werden. Der ökonomisch beste Genotyp (S42IL-122) erzielt im Vergleich zu Scarlett mit einer Wahrscheinlichkeit von 69,3 % positive monetäre Effekte. Durch weitere Szenarien konnte aufgezeigt werden, dass die wirtschaftliche Attraktivität der Introgressionslinien in Szenarien mit geringen Output-Preisen sowie hohen Fungizid-Preisen (z. B. durch staatliche Reglementierungen der Märkte für Pflanzenschutzmittel mit ökonomischen Instrumenten wie Abgaben oder Steuern) besonders groß ist. Unter diesen Markt Voraussetzungen beträgt die durchschnittliche Rentabilitätssteigerung gegenüber den Kultureltern bis zu 74 €/ha. Entgegen diesen Vergleichen mit den beiden Kultureltern verdeutlichen die Ergebnisse dennoch, dass das Ertragsniveau der Wildgersten-Introgressionslinien der Populationen S42 und HEB-25 gegenwärtig nicht ausreicht, um mit modernen Elitesorten (Quench und Planet) zu konkurrieren. Keine der Introgressionslinien konnte bei Rentabilitätsvergleichen mit diesen Sorten einen positiven wirtschaftlichen Effekt erzielen. In der Ergebnisdiskussion erfolgte einerseits die kausale Auseinandersetzung für die gegenwärtig bestehende wirtschaftliche Limitation der Introgressionslinien, andererseits wurde exemplarisch aufgezeigt, welche zukünftige ökologische und ökonomische Bedeutung eine verbreiterte genetische Diversität im Genpool der Pflanzenzüchtung dennoch hat. Dabei wurde die Bedeutung widerstandsfähiger Genotypen mit mittlerer Ertragsleistung im Vergleich zu ertragreicheren, aber anfälligeren Sorten vergegenwärtigt.

Der zweite Teilbereich dieser Arbeit (Teil B) fokussierte sich auf die Bewertung der Hyperspektralanalyse zur sensorischen Phänotypisierung im Hochdurchsatz. In BARLEY BIODIVERSITY wurde die Hyperspektralanalyse für drei züchterische Anwendungsgebiete erprobt: 1) Hyperspektrale Bestimmung von Blatt- und Korninhaltsstoffen, 2) Modellierung von Pflanzenwachstum durch Erfassung entwicklungs- und ertragsrelevanter Parameter und 3) Ermittlung der Malzqualität von Braugerste. Kernstück der Technologie ist eine zeilenbasierte Hyperspektralkamera mit 288 Kanälen, einer Auflösung von 384 Pixel und einer Bildaufnahmefrequenz von 400 Hz, die Aufnahmen im Wellenlängenbereich von 1000 bis 2500 nm bei einer Abtastrate von 5,5 nm realisiert. Einerseits wurde die Kamera stationär im Labor eingesetzt, andererseits mittels Trägerfahrzeug (AgRover) in der Feldsaison systematisch für Aufnahmefahrten über verschiedene Versuchsflächen genutzt. Die mathematische Modellierung der Zielvariablen erfolgte durch Maschinelles Lernen. Teilziel der Arbeit war die Erfassung von Nutzungspotenzialen der Hyperspektralanalyse und die Bewertung der erzielten Forschungsergebnisse des Projektes BARLEY BIODIVERSITY aus anwendungsorientierter Perspektive. Gleichzeitig sollten durch die frühzeitige Evaluierung zielgerichtete Maßnahmen für eine anwenderfreundliche und praxistaugliche Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse ermittelt werden. Die Bewertung der Hyperspektralanalyse erfolgte auf der Basis qualitativer, leitfadengestützter Experteninterviews, wobei zielorientiert 20 Pflanzenzüchter sowohl aus der Privatwirtschaft als auch aus der Wissenschaft interviewt wurden. Die Auswertung des Datenmaterials erfolgte mittels strukturierter Inhaltsanalyse anhand von deduktiv und induktiv abgeleiteten Kategorien.

Infolge zeit- und arbeitsintensiver Prozesse mittels visueller Schätzungen wird die Entwicklung von Sensoren zur Erfassung pflanzlicher Wachstums- und Entwicklungsparameter von befragten Züch-

tungsexperten als äußerst bedeutsam für den züchterischen Fortschritt eingeschätzt. Die Hyperspektralanalyse stellt neben anderen sensorischen Konzepten gegenwärtig lediglich einen technologischen Ansatz zur sensorgesteuerten Phänotypisierung dar. Daher kann zum gegenwärtig frühen Entwicklungszeitpunkt dieser Technologie auch durch Experten nur bedingt eingeschätzt werden, welcher technologische Entwicklungspfad zukünftig den größtmöglichen wirtschaftlichen Erfolg gewährleisten wird. Dennoch wurde im Rahmen dieser Arbeit der Versuch zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit unternommen. Auf der Grundlage von Expertenaussagen bezüglich einer durch die Hyperspektralanalyse bedingten höheren Selektionsintensität konnte für ein exemplarisches Züchtungsprogramm (Sommergerste mit 400 Kreuzungen) ein jährliches Kosteneinsparungspotenzial von 36.875 € ermittelt werden. Dieses Einsparungspotenzial lässt vermuten, dass sich die Hyperspektralanalyse zukünftig trotz vergleichsweise hoher Investitionskosten zu einer Substitutionstechnologie für manuelle Bonituren und Laboranalysen entwickeln könnte. Im Vergleich zu anderen Sensoren liegt ein respektable Vorteil der Hyperspektralkamera in der unspezifischen Eignung, sodass sich ein weites Spektrum für Anwendungen in der Züchtung bietet und ein potenziell hoher Auslastungsgrad der Technologie möglich ist. Es konnte im Rahmen der Arbeit aufgezeigt werden, dass sich das Nutzungspotenzial einer hyperspektralen Phänotypisierung nicht nur auf die in BARLEY BIODIVERSITY erprobten Anwendungsbereiche beschränkt. Insbesondere die Erkennung von Fusariumbefall oder die Saatgutqualitätskontrolle sind exemplarische praxisrelevante Einsatzbereiche, in denen die Technologie erprobt werden sollte.

Bezüglich der erzielten Projektergebnisse ist zu konstatieren, dass die hyperspektrale Erfassung von Entwicklungs- und Ertragsparametern im Feld sowie die Bestimmung von Malzqualitäten von Experten der Züchtung und Wissenschaft gleichermaßen als besonders innovativ und praxisrelevant wahrgenommen werden. Demgegenüber ist die hyperspektrale Analyse des Ernährungszustandes von Blättern und Körnern vorrangig von wissenschaftlichem Interesse. Durch automatisierte Hyperspektralaufnahmen könnte sich die Technologie als ein potenzielles Werkzeug für die räumliche und zeitliche Erfassung pflanzlicher Inhaltsstoffe etablieren. Für die züchterische Grundlagenforschung sind in diesem Zusammenhang besonders Kenntnisse der Nährstoffaufnahme und der -verlagerung von Bedeutung. Als Voraussetzung für die technologische Eignung und die beabsichtigte Projektzielsetzung der Effizienzsteigerung wird von potenziellen Anwendern eine Prädiktion der jeweiligen Zielmerkmale mit einem Bestimmtheitsmaß (R^2) $> 0,7$ erwartet. Da diese erforderliche Vorhersagegenauigkeit der Hyperspektralanalyse beim Abgleich mit den zum Zeitpunkt der Datenerhebung verfügbaren Ergebnissen lediglich für die Inhaltsstoffanalyse erreicht wird, besteht aus praxisorientierter Perspektive weiterer Entwicklungsbedarf dieser Technologie. In diesem Zusammenhang konnte die Wissenslücke zwischen der technologischen Entwicklung der hyperspektralbasierten Phänotypisierung und den spezifischen Bedürfnissen potenzieller Anwender durch die qualitativen Expertenbefragungen teilweise geschlossen werden. Als elementares Ergebnis wurden zehn Handlungsempfehlungen für eine praxisorientierte Weiterentwicklung der Hyperspektralanalyse abgeleitet. Die Ergebnisse dieser Arbeit können in die zukünftige Entwicklungsarbeit einfließen und dazu beitragen, dass sich die Hyperspektralanalyse zu einem wirtschaftlich effizienten Analysewerkzeug in der Pflanzenzüchtung etabliert.

Literaturverzeichnis

- ABELE, T. (2010): Bewertung in frühen Phasen des Innovationsmanagements: Der Weg ins Mittelmaß? In: *Zeitschrift für Innovationsmanagement in Forschung und Praxis (ZIFP)* (1): 4–11.
- ABELED, L. G.; CALDERINI, D. F.; SLAFER, G. A. (2008): Nitrogen economy in old and modern malting barleys. In: *Field Crops Research* 106 (2): 171–178.
- AHLEMEYER, J. (2009): Nur noch wenig Ertragszuwächse. In: *DLG Saatgutmagazin* Juli 2009: 22–24.
- AHLEMEYER, J.; FRIEDT, W. (2011): Progress in winter wheat yield in Germany - What's the share of the genetic gain? In: Vereinigung der Pflanzzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs (Hrsg.): *Tagungsband der 61. Jahrestagung der Vereinigung der Pflanzzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs*. Irdning: Lehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein: 19–23.
- ALSTON, J. M.; ANDERSEN, M. A.; JAMES, J. S.; PARDEY, P. G. (2010): Shifting patterns of agricultural production and productivity in the United States. In: Alston, J. M., Babcock, B. A. und Pardey, P. G. (Hrsg.): *The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide*. Ames, Iowa: The Midwest Agribusiness Trade Research and Information Center: 193–227.
- AMI, Agrarmarkt Informations-Gesellschaft (2018): Marktdaten Getreide des Serviceportals Forschung & Lehre. Online verfügbar unter: <https://www.ami-informiert.de/ami-onlinedienste/serviceportal-forschung-lehre/getreide/marktdaten-download>, zuletzt geprüft am 29.11.2018.
- ARAUS, J. L.; CAIRNS, J. E. (2014): Field high-throughput phenotyping. The new crop breeding frontier. In: *Trends in plant science* 19 (1): 52–61.
- ARAUS, J. L.; SLAFER, G. A.; ROYO, C.; SERRET, M. D. (2008): Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals. In: *Critical Reviews in Plant Sciences* 27 (6): 377–412.
- BACH, H. (1995): Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. Dissertation Universität München: Geobuch-Verlag (Münchener Universitätsschriften Fakultät für Geowissenschaften, 21).
- BACKHAUS, A. (2018): Performanz Datei - Datenverarbeitung Kampagne 2016. Persönliche Mitteilung: E-Mail mit Excel-Datei, versandt am 20.02.2018. Daten einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- BACKHAUS, A.; SEIFFERT, U. (2014): Classification in high-dimensional spectral data. Accuracy vs. interpretability vs. model size. In: *Neurocomputing* 131: 15–22.
- BAI, G.; GE, Y.; HUSSAIN, W.; BAENZIGER, P. S.; GRAEF, G. (2016): A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 128: 181–192.
- BEATTY, P. H.; ANBESSA, Y.; JUSKIW, P.; CARROLL, R. T.; WANG, J.; GOOD, A. G. (2010): Nitrogen use efficiencies of spring barley grown under varying nitrogen conditions in the field and growth chamber. In: *Annals of botany* 105 (7): 1171–1182.
- BECKER, H. (2011): Pflanzzüchtung. 2. Auflage. Stuttgart: UTB (Uni-Taschenbücher Agrarwissenschaften, 1744).

- BECKMANN, J. (2014): Über die Entstehung und heutige Bedeutung der Kulturpflanzenvielfalt sowie deren Nutzung in urbanen Gärten. ProSpecieRara Deutschland (Hrsg.). Online verfügbar unter: http://www.prospecierara.de/uploads/media/129/entstehung%20agrobiodiv_24-s.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2018.
- BEHMANN, J. (2018): Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES), Universität Bonn. Mündlich, persönliches Interview am 06.07.2018.
- BEHMANN, J.; MAHLEIN, A.-K.; PAULUS, S.; DUPUIS, J.; KUHLMANN, H.; OERKE, E.-C.; PLÜMER, L. (2016): Generation and application of hyperspectral 3D plant models. Methods and challenges. In: *Machine Vision and Applications* 27 (5): 611–624.
- BEHMANN, J.; MAHLEIN, A.-K.; RUMPF, T.; RÖMER, C.; PLÜMER, L. (2015): A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. In: *Precision Agriculture* 16 (3): 239–260.
- BEHMANN, J.; SCHMITTER, P.; STEINRÜCKEN, J.; PLÜMER, L. (2014): Ordinal classification for efficient plant stress prediction in hyperspectral data. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-7: 29–36.
- BMBF, Bundesministerium für Bildung und Forschung (2004): So schmeckt die Zukunft. Sozial-ökologische Agrar- und Ernährungsforschung. Online verfügbar unter: http://ernaehrungsdenkwerkstatt.de/fileadmin/user_upload/EDWText/TextElemente/Ernaehrungswissenschaft/SOEF_BMBF_Broschuere_so_schmeckt_die_zukunft.pdf, zuletzt geprüft am 16.09.2016.
- BOGNER, A.; MENZ, W. (2002): Das theoriegenerierende Experteninterview. Erkenntnisinteresse, Wissensformen, Interaktion. In: Bogner, A. (Hrsg.): *Das Experteninterview*. Theorie, Methode, Anwendung. Opladen: Leske + Budrich: 33–70.
- BORTZ, J.; DÖRING, N. (1995): Forschungsmethoden und Evaluation. Für Sozialwissenschaftler. Zweite, vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer.
- BRANDES, W.; RECKE, G.; BERGER, T. (1997): Produktions- und Umweltökonomik. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Uni-Taschenbücher Wirtschaftswissenschaften, Agrarwissenschaften, Ökologie).
- BRAUN, J. von; QAIM, M. (2009): Herausforderungen der weltweiten Lebensmittelversorgung. Verantwortung und Chancen für die deutsche Landwirtschaft. Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Rentenbank 4/2009.
- BREIMAN, L. (2001): Statistical Modeling: The Two Cultures. In: *Statistical Science* 16 (3): 199–231.
- BRINK, C.; GRINSVEN, H. von (2011): Costs and benefits of nitrogen in the environment. In: Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P. et al. (Hrsg.): *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*: Cambridge University Press: 513–540.
- BRINKMANN, T. (1922): Die Ökonomik des landwirtschaftlichen Betriebes. In: Grundriss der Sozialökonomik, VII. Abteilung. Tübingen: Mohr.
- BRISSON, N.; GATE, P.; GOUACHE, D.; CHARMET, G.; OURY, F.-X.; HUARD, F. (2010): Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. In: *Field Crops Research* 119 (1): 201–212.

- BSA, Bundessortenamt (2016): Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte 2016.
- BUTTSCHARDT, T. K.; BAUM, J. (2011): Verlust von Biodiversität – Verlust einer Ressource? In: *Forum der Geoökologie* 22 (1): 20–25.
- CALDERINI, D. F.; SLAFER, G. A. (1999): Has yield stability changed with genetic improvement of wheat yield? In: *Euphytica* 107 (1): 51–59.
- COBB, J. N.; DECLERCK, G.; GREENBERG, A.; CLARK, R.; MCCOUCH, S. (2013): Next-generation phenotyping. Requirements and strategies for enhancing our understanding of genotype-phenotype relationships and its relevance to crop improvement. In: *Theoretical and Applied Genetics* 126 (4): 867–887.
- COCHRANE, W. W. (1958): Farm prices: Myth and reality. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- COCHRANE, W. W. (1979): The development of American agriculture. A historical analysis. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- CORMIER, F.; FAURE, S.; DUBREUIL, P.; HEUMEZ, E.; BEAUCHENE, K.; LAFARGE, S. et al. (2013): A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). In: *Theoretical and applied genetics*. 126 (12): 3035–3048.
- CORMIER, F.; FOULKES, J.; HIREL, B.; GOUACHE, D.; MOËNNE-LOCCOZ, Y.; LE GOUIS, J.; ORDON, F. (2016): Breeding for increased nitrogen-use efficiency. A review for wheat (*T. aestivum* L.). In: *Plant Breeding* 135 (3): 255–278.
- CÖSTER, H. (2018): Leiter deutsches Weizenzuchtprogramm RAGT-Saaten (Rouergue Auvergne Gévaudan Tarnais, französischer Saatgutkonzern). Mündlich, persönliches Interview am 24.05.2018.
- CSELÉNYI, L. (2018): Getreidezüchter W. von Borries-Eckendorf GmbH & Co. KG. Mündlich, persönliches Interview am 16.05.2018.
- DAMMER, K.-H.; GARZ, A.; SCHIRRMANN, M. (2018): Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. (ATB). Mündlich, persönliches Gruppeninterview am 12.03.2018.
- DELGADO, C. L.; HOPKINS, J.; KELLY, V. A. (1998): Agricultural Growth Linkages in Sub-Saharan Africa. Research Report 107. Washington, D. C.: International Food Policy Research Institute.
- DIW, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (2007): Totale Faktorproduktivität. DIW Berlin. Online verfügbar unter: https://www.diw.de/de/diw_01.c.430429.de/presse_/diw_glossar/totale_faktorproduktivitaet.html, zuletzt aktualisiert am 03.01.2007, zuletzt geprüft am 07.10.2016.
- DÖRING, J. (2018): Klimadaten Agrar- und ernährungswissenschaftliches Versuchszentrum (AEVZ) Merbitz Januar 2017 bis Juli 2018; langjährige Referenzdaten 1981-2010 Halle/Kühnfeld. Persönliche Mitteilung: E-Mail mit Excel-Datei, versandt am 29.08.2018. Daten einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- DYSON, T. (1999): Prospects for feeding the world. In: *British Medical Journal*. (319/7215): 988–991.
- ENGSTLER, M. (2009): Organisatorische Implementierung von Informationssystemen an Bankarbeitsplätzen. 1. Auflage. Wiesbaden: Gabler.

- EVENSON, R. E.; GOLLIN, D. (2003): Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. In: *Science* 300 (5620): 758–762.
- FAN, S.; TORERO, M.; HEADEY, D. (2011): Urgent Actions Needed to Prevent Recurring Food Crises. IFPRI Policy Brief 16. Washington, D. C.: International Food Policy Research Institute.
- FAO, Food and Agriculture Organization (2009): How to Feed the World in 2050. Rom, Italien, Food and Agriculture Organization. Online verfügbar unter: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf, zuletzt geprüft am 01.03.2016.
- FAO, Food and Agriculture Organization (2016): FAOSTAT. Online verfügbar unter: <http://faostat.fao.org/>, zuletzt geprüft am 04.03.2016.
- FIORANI, F.; RASCHER, U.; JAHNKE, S.; SCHURR, U. (2012): Imaging plants dynamics in heterogenic environments. In: *Current opinion in biotechnology* 23 (2): 227–235.
- FRAUEN, M. (2018): Saatzuchtleiter Norddeutsche Pflanzenzucht Hans-Georg Lembke KG (NPZ) in Hohenlieth. Mündlich, persönliches Interview am 24.04.2018.
- FUGLIE, K. O. (2012): Productivity Growth and Technology Capital in the Global Agricultural Economy. In: Fuglie, K. O., Wang, S. L. und Ball, V. E. (Hrsg.): *Productivity growth in agriculture: An international perspective*. Wallingford: CABI: 335–368.
- FUGLIE, K. O.; HEISEY, P. W. (2007): Economic Returns to Public Agricultural Research. Economic Brief Number 10, September 2007. Washington, D. C.: United States Department of Agriculture (USDA).
- FURBANK, R. T.; TESTER, M. (2011): Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck. In: *Trends in plant science* 16 (12): 635–644.
- GAG, Getreide AG (2017): Qualitätsanforderungen und Einkaufsbedingungen Ernte 18. Online verfügbar unter: <https://www.getreide-ag.de/service.html>, zuletzt aktualisiert am 15.09.2017, zuletzt geprüft am 18.07.2018.
- GARNETT, T.; PLETT, D.; HEUER, S.; OKAMOTO, M. (2015): Genetic approaches to enhancing nitrogen-use efficiency (NUE) in cereals: Challenges and future directions. In: *Functional Plant Biology* 42 (10): 921–941.
- GEOCLEDIAN (2016): Remote Sensing basics. Online verfügbar unter: <https://sites.google.com/site/geocledian/home/remote-sensing-basics>, zuletzt geprüft am 30.07.2018.
- GRAF, R. (2000): Meilensteine im Versuchswesen - Bodentrendmodelle. In: Birkner, U., Amon, H., Ohmayer, G. und Reiner, L. (Hrsg.): *Referate der 21 GIL-Jahrestagung (Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft)*, Band 13: 44–46.
- GRANIG, P. (2008): Innovationsbewertung. Potentialprognose und -steuerung durch Ertrags- und Risikosimulation: Deutscher Universitätsverlag.
- GRASSINI, P.; ESKRIDGE, K. M.; CASSMAN, K. G. (2013): Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. In: *Nature communications* 4: 2918–2928.
- GÜNTHER, M.; VELTEN, K. (2014): Mathematische Modellbildung und Simulation. Eine Einführung für Wissenschaftler, Ingenieure und Ökonomen. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.

- GUYOT, G.; BARET, F.; MAJOR, D. J. (1988): High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and the near infrared. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (11): 750–760.
- HABEKUß, A.; SCHOLZ, M. (2014): *Hordeum bulbosum* - Eine Quelle wertvoller Resistenzen gegenüber biotischen und abiotischen Stressfaktoren - Bericht über eine Sammelreise nach Israel zu den natürlichen Standorten dieser Gerstenwildart. In: *Journal für Kulturpflanzen* 66 (7).
- HANEMANN, A. (2018): Empfehlungen der Arbeitsgruppe Bewertung von Forschungsparzellen der GFPI-Ableitung Getreide. Persönliche Mitteilung: E-Mail mit pdf-Dokument, versandt am 06.03.2018. Dokument einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- HANEMANN, A.; RAMGRABER, L.; JAISER, H.; WESPEL, F. (2018): Saatzucht Josef Breun GmbH & Co. KG. Mündlich, persönliches Gruppeninterview am 23.02.2018.
- HARTL, L. (2009): Mehr Ertrag durch Zuchtfortschritt bei Getreide. In: *Pflanzenbau unter neuen Preis-Kosten-Bedingungen*. Landshut, Bayern: LfL (Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft): 13–16.
- HEESEN, M. (2009): Innovationsportfoliomanagement. Bewertung von Innovationsprojekten in kleinen und mittelgroßen Unternehmen der Automobilzulieferindustrie. 1. Auflage. Wiesbaden: Gabler.
- HEISEY, P.; KING, J.; RUBENSTEIN, K. D.; BUCKS, D.; WELSH, R. (2010): Assessing the Benefits of Public Research Within an Economic Framework: The Case of USDA's Agricultural Research Service. Washington, D. C.: USDA-Economic Research Report Number 95. Online verfügbar unter: http://www.ers.usda.gov/media/128828/err95_1_.pdf, zuletzt geprüft am 07.03.2016.
- HEITFUSS, R. (2000): Pflanzenschutz - Grundlagen der praktischen Phytomedizin. 3. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- HELFFERICH, C. (2009): Die Qualität qualitativer Daten. Manual für die Durchführung qualitativer Interviews. 3., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften/GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
- HERZIG, P. (2017): Determination of macro- and microelements in HEB-25 barley grains under contrasting nitrogen regime with hyperspectral imaging (HSI). Persönliche Mitteilung: E-Mail mit Präsentation, versandt am 06.12.2017. Daten einzusehen beim Verfasser dieser Arbeit.
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung. Für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. 1. Auflage. Heidelberg: Wichmann.
- HINZ, M. (2013): Standortcharakterisierung der Versuchsflächen des AEVZ in Wettin-Löbejün/OT Merbitz unter besonderer Berücksichtigung physikalischer Bodenparameter. Bachelorarbeit MLU Halle-Wittenberg.
- HOFFMANN, C. M.; LOEL, J. (2015): Bedeutung der Züchtung für den Ertragsanstieg von Zuckerrüben. In: *Zuckerindustrie* Heft 1/2015: 48–56.
- HOLLAND, J. B. (2004): Breeding: Incorporation of Exotic Germplasm. In: Goodman, R. M. (Hrsg.): *Encyclopedia of Plant and Crop Science*: Marcel Dekker, New York: 222–224.
- HORLER, D.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. (1983): The red edge of plant leaf reflectance. In: *International Journal of Remote Sensing* 4 (2): 273–288.

- HOULE, D.; GOVINDARAJU, D. R.; OMHOLT, S. (2010): Phenomics: The next challenge. In: *Nature reviews. Genetics* 11 (12): 855–866.
- KEMPF, H. (2018): Weizenzüchter Secobra Saatzucht GmbH. Mündlich, persönliches Interview am 14.05.2018.
- KHUSH, G. S. (2001): Green revolution. The way forward. In: *Nature Reviews Genetics* 2 (10): 815–822.
- KICHERER, A. (2018): Julius Kühn-Institut (JKI) Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen; Institut für Rebenzüchtung. Mündlich, persönliches Interview am 19.06.2018.
- KICHERER, A.; HERZOG, K.; BENDEL, N.; KLÜCK, H.-C.; BACKHAUS, A.; WIELAND, M. et al. (2017): Phenoliner: A New Field Phenotyping Platform for Grapevine Research. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 17 (7).
- KOLUKISAOGU, Ü.; THUROW, K. (2010): Future and frontiers of automated screening in plant sciences. In: *Plant Science* 178 (6): 476–484.
- KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2017): Online-Datenbank Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Sommergerste - Braugerste. Online verfügbar unter: <http://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html#Ergebnis>, zuletzt geprüft am 30.05.2017.
- KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (2018): Online-Datenbank Standarddeckungsbeiträge. Online verfügbar unter: <https://daten.ktbl.de/sdb/source.do?selectedAction=merkmale&selectedproduktionsZweig=Bodennutzung>, zuletzt geprüft am 18.07.2018.
- KUSKA, M.; WAHABZADA, M.; LEUCKER, M.; DEHNE, H.-W.; KERSTING, K.; OERKE, E.-C. et al. (2015): Hyperspectral phenotyping on the microscopic scale: towards automated characterization of plant-pathogen interactions. In: *Plant methods* 11: 28.
- LADIG, F.; PIEPHO, H. P.; DROBEK, T.; MEYER, U. (2014): Genetic and non-genetic long-term trends of 12 different crops in German official variety performance trials and on-farm yield trends. In: *Theoretical and Applied Genetics* 127 (12): 2599–2617.
- LE GOUIS, J.; BÉGHIN, D.; HEUMEZ, E.; PLUCHARD, P. (2000): Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. In: *European Journal of Agronomy* 12 (3-4): 163–173.
- LEGE, A. (2010): Gibt es (k)einen Zuchtfortschritt? Leistungspotenziale neuer Weizensorten. In: *Getreide Magazin* 15: 252–253.
- LEHMANN, S. (2007): Schutz der Wälder. Nationale Verantwortung tragen und global handeln. Bundesamt für Naturschutz, Bonn. In: *BfN-Skripten* 209.
- LILIENTHAL, H. (2003): Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 254, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig. Online verfügbar unter: http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/zi030987.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2016.
- LILLEMO, M.; REITAN, L.; BJØRNSTAD, Å. (2009): Increasing impact of plant breeding on barley yields in central Norway from 1946 to 2008. In: *Plant Breeding* 129: 484–490.
- LOBELL, D. B.; SCHLENKER, W.; COSTA-ROBERTS, J. (2011): Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. In: *Science* 333 (6042): 616–620.

- MACHOLDT, J.; HONERMEIER, B. (2017): Yield Stability in Winter Wheat Production. A Survey on German Farmers' and Advisors' Views. In: *Agronomy* 7 (3): 45.
- MAHLEIN, A.-K.; OERKE, E.-C.; STEINER, U.; DEHNE, H.-W. (2012): Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. In: *European Journal of Plant Pathology* 133 (1): 197–209.
- MANN, K. H.; BRINKMANN, C. (2014): Einfluss der Sortenwahl auf den Unternehmenserfolg. In: *Praxisnah* 2014 (3): 2–4.
- MAURER, A.; DRABA, V.; JIANG, Y.; SCHNAITHMANN, F.; SHARMA, R.; SCHUMANN, E. et al. (2015): Modelling the genetic architecture of flowering time control in barley through nested association mapping. In: *BMC genomics* 16.
- MAYRING, P. (2015): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 12., überarbeitete Auflage. Weinheim: Beltz.
- MAYRING, P. (2016): Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken. 6., überarbeitete Auflage. Weinheim: Beltz.
- McDOUGALL, P. (2013): R&D trends for chemical crop protection products and the position of the European Market. A consultancy study undertaken for ECPA.
- MEUSER, M.; NAGEL, U. (1991): Experteninterviews - vielfach erprobt, wenig bedacht. Ein Beitrag zur qualitativen Methodendiskussion. In: Garz, D. und Kraimer, K. (Hrsg.): *Qualitativ-empirische Sozialforschung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften: 441–471.
- MICHEL, V. (2012): Stagniert der Züchtungsfortschritt beim Winterweizen? Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern.
- MÖHRLE, M. G.; SPECHT, D. (2010): Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: S-Kurven-Konzept. Online verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/s-kurven-konzept-43411/version-147038>, zuletzt aktualisiert am 08.07.2010, zuletzt geprüft am 11.04.2018.
- MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. (1982): Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization. In: *Agronomy Journal* 74 (3): 562–564.
- MONDAL, S.; RUTKOSKI, J. E.; VELU, G.; SINGH, P. K.; CRESPO-HERRERA, L. A.; GUZMÁN, C. et al. (2016): Harnessing Diversity in Wheat to Enhance Grain Yield, Climate Resilience, Disease and Insect Pest Resistance and Nutrition Through Conventional and Modern Breeding Approaches. In: *Frontiers in plant science* 7: 991.
- MONTES, J. M.; MELCHINGER, A. E.; REIF, J. C. (2007): Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies. In: *Trends in plant science* 12 (10): 433–436.
- MONTES, J. M.; TECHNOW, F.; DHILLON, B. S.; MAUCH, F.; MELCHINGER, A. E. (2011): High-throughput non-destructive biomass determination during early plant development in maize under field conditions. In: *Field Crops Research* 121 (2): 268–273.
- MÜLLER-RÖBER, B.; BARTMER, C.-A.; BÜCHTING, A. J.; DANIEL, H.; KAST, H.; WITT, E. (2010): Pflanzenforschung für eine nachhaltige Bioökonomie. Forschungs-, Technologie- und Handlungsbedarf. Berlin: BioÖkonomieRat (Berichte aus dem BioÖkonomieRat, 2).
- NARZIß, L.; BACK, W.; GASTL, M. (2012): Die Technologie der Malzbereitung. Die Bierbrauerei (Band 1). 8., überarbeitete Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.

- NOLEPPA, S.; WITZKE, H. von (2013): Die gesellschaftliche Bedeutung der Pflanzenzüchtung in Deutschland. Einfluss auf soziale Wohlfahrt, Ernährungssicherung, Klima- und Ressourcenschutz. Humboldt Forum for Food and Agriculture e. V. (HFFA).
- OERKE, E.-C.; DEHNE, H.-W. (2004): Safeguarding production - Losses in major crops and the role of crop protection. In: *Crop Protection* 23 (4): 275–285.
- ORTIZ-MONASTERIO, J. I.; SAYRE, K. D.; RAJARAM, S.; MCMAHON, M. (1997): Genetic Progress in Wheat Yield and Nitrogen Use Efficiency under Four Nitrogen Rates. In: *Crop Science* 37 (3): 898–904.
- OSTERBURG, B.; NITSCH, H.; LAGGNER, A.; WAGNER, S. (2007): Analysis of policy measures for greenhouse gas abatement and compliance with the Convention on Biodiversity. London: Institute for European Environmental Policy. Online verfügbar unter: http://www.ieep.eu/assets/370/meacap_wp6_d16a.pdf, zuletzt geprüft am 08.03.2016.
- OURY, F.-X.; GODIN, C.; MAILLIARD, A.; CHASSIN, A.; GARDET, O.; GIRAUD, A. et al. (2012): A study of genetic progress due to selection reveals a negative effect of climate change on bread wheat yield in France. In: *European Journal of Agronomy* 40: 28–38.
- PANDEY, P.; GE, Y.; STOERGER, V.; SCHNABLE, J. C. (2017): High Throughput In vivo Analysis of Plant Leaf Chemical Properties Using Hyperspectral Imaging. In: *Frontiers in plant science* 8: 1348.
- PARDEY, P. G.; ALSTON, J. M. (2010): U.S. agricultural research in a global food security setting. A Report of the CSIS Task Force on Food Security. Washington, D. C.: CSIS. Online verfügbar unter: https://csis-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/legacy_files/files/publication/100111_Pardey_USAgriRes_Web.pdf, zuletzt geprüft am 18.10.2016.
- PILLEN, K. (2018): Leiter der Professur für Pflanzenzüchtung und Projektkoordinator von BARLEY BIODIVERSITY, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Mündlich, persönliches Interview am 24.09.2018.
- QAIM, M. (2006): Bedeutung der Pflanzenzüchtung für die Welternährung. In: *Berichte über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* (Band 84, Heft 2): 198–212.
- QAIM, M.; SCHWARZE, S. (2011): Agrobiodiversität und Welternährungssicherung. In: Christen, O., Erhardt, G., Flessa, H., Latacz-Lohmann, U., Müller, J. und Otte, A. (Hrsg.): *Agrobiodiversität als Schlüssel für eine nachhaltige Landwirtschaft im 21. Jahrhundert?* (wissenschaftliche Tagung des Dachverbandes Agrarforschung (DAF) am 20. und 21. Oktober 2011 im Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut, Braunschweig). Frankfurt am Main: DLG-Verlag (Agrarspectrum, 44): 24–44.
- QAIM, M.; STEIN, A. J. (2006): Wie satt macht Pflanzenzüchtung? Die Rolle der Agrarforschung bei der Bekämpfung von Hunger und Armut. In: *Eins Entwicklungspolitik* (15/16): 49–52.
- REINDERS, H. (2005): Qualitative Interviews mit Jugendlichen führen. Ein Leitfaden. München, Wien: Oldenbourg Verlag.
- RICHTER, C.; KROSCHESKI, B. (2009): Räumliche Modelle in landwirtschaftlichen Feldversuchen – Abhängigkeit der Ergebnisse von Versuchsplan, Randomisationsplan und Position auf der Versuchsfläche. In: Spilke, J. und Becker, C. (Hrsg.): *Proceedings der 13. Konferenz der SAS-Anwender in Forschung und Entwicklung (KSFE)*. [05. - 06. März 2009, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg]. Aachen: Shaker (Berichte aus der Statistik): 253–270.

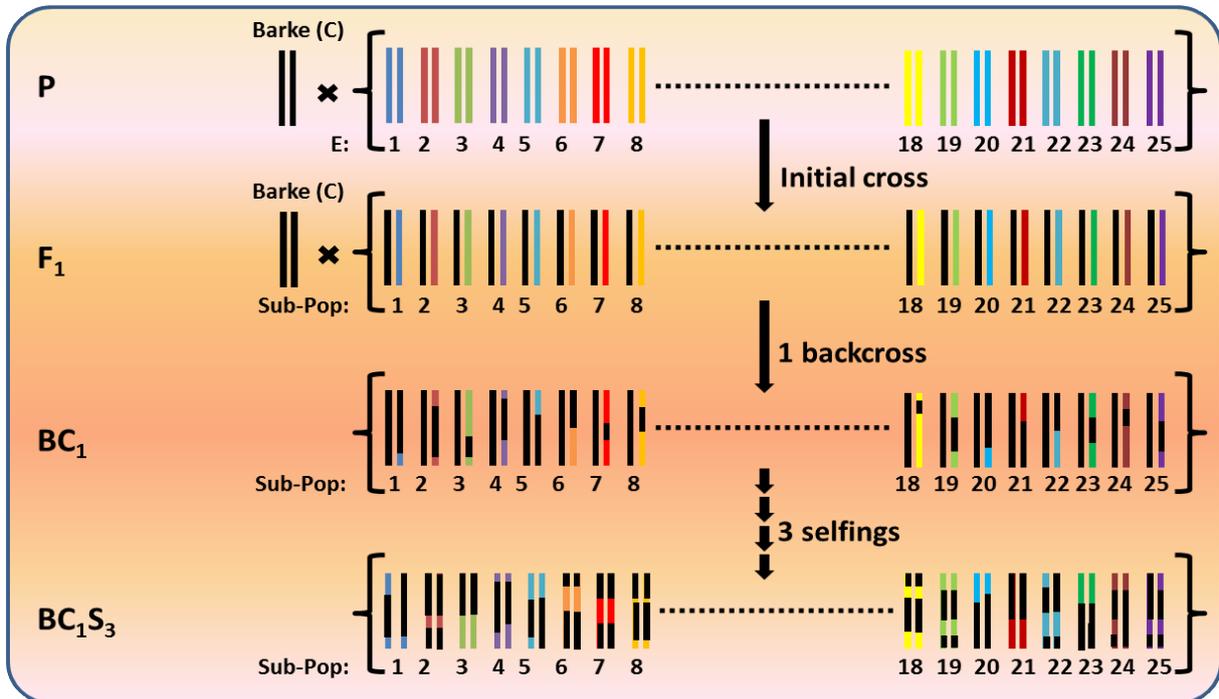
- ROGERS, E. M. (1983): Diffusion of innovations. 3. Auflage. New York/London.
- RUNGE, C. F.; SENAUER, B. (2007): How biofuels could starve the poor. Online verfügbar unter: <https://www.foreignaffairs.com/articles/2007-05-01/how-biofuels-could-starve-poor>, zuletzt geprüft am 26.10.2016.
- SATTELMACHER, B.; HORST, W. J.; BECKER, H. C. (1994): Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157 (3): 215–224.
- SAUER, N.; HARDEWEG, B. (2006): Standarddeckungsbeiträge (SDB). Kalkulation der Rechenwerte zur Betriebsklassifizierung nach der EU-Typologie. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt. Online verfügbar unter: http://daten.ktbl.de/sdb/pdf/SDB_Methode.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2016.
- SCHAFFNIT-CHATTERJEE, C. (2011): Minderung des Klimawandels in der Landwirtschaft: Ein ungenutztes Potenzial. Frankfurt am Main: Deutsche Bank Research. Online verfügbar unter: http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000279645.pdf, zuletzt geprüft am 08.03.2016.
- SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. 164 Tabellen. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB für Wissenschaft, 8189).
- SCHMALENBACH, I.; MARCH, T. J.; BRINGEZU, T.; WAUGH, R.; PILLEN, K. (2011): High-Resolution Genotyping of Wild Barley Introgression Lines and Fine-Mapping of the Threshability Locus thresh-1 Using the Illumina GoldenGate Assay. In: *G3 (Genes Genomes Genetics)* 1 (3): 187–196.
- SCHMALLOWSKY, K.; REIMERS, H.-E. (2015): Unternehmensbewertung mit Monte-Carlo-Simulationen. Wismar: Fakultät für Wirtschaftswissenschaften Wismar Business School (WDP - Wismarer Diskussionspapiere, 2015, 02).
- SCHMIDT, M.; KOLLERS, S.; MAASBERG-PRELLE, A.; GROßER, J.; SCHINKEL, B.; TOMERIUS, A. et al. (2016): Prediction of malting quality traits in barley based on genome-wide marker data to assess the potential of genomic selection. In: *Theoretical and Applied Genetics* 129 (2): 203–213.
- SCHUSTER, W. H. (1997): Welchen Beitrag leistet die Pflanzenzüchtung zur Leistungssteigerung von Kulturpflanzen? In: *Pflanzenbauwissenschaften* 1: 9–18.
- SEN, A. K. (1988): Poverty and famines. An essay on entitlement and deprivation. Oxford, New York: Clarendon Press; Oxford University Press.
- SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P. et al. (2007): Agriculture. In: Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. und Meyer, L. A. (Hrsg.): *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge, United Kingdom und New York, USA: Cambridge University Press: 497–540.
- STEFFIN, U. (2014): Hohe Erträge in Gewinn umsetzen. In: *Praxisnah* 2014 (3): 5–6.
- STIEWE, G.; SPILLER, M. (2018): Syngenta Seeds GmbH. Mündlich, persönliches Gruppeninterview am 13.07.2018.

- STRANGE, R. N.; SCOTT, P. R. (2005): Plant Disease: A Threat to Global Food Security. In: *Annual Review of Phytopathology* 43 (1): 83–116.
- SYLVESTER-BRADLEY, R.; KINDRED, D. R. (2009): Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. In: *Journal of experimental botany* 60 (7): 1939–1951.
- TANKSLEY, S. D.; MCCOUCH, S. R. (1997): Seed Banks and Molecular Maps: Unlocking Genetic Potential from the Wild. In: *Science* 277 (5329): 1063–1066.
- TEEB, The Economics of Ecosystems and Biodiversity (2010): Die Ökonomie von Ökosystemen und Biodiversität: Die ökonomische Bedeutung der Natur in Entscheidungsprozesse integrieren (The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature). Ansatz, Schlussfolgerungen und Empfehlungen von TEEB - eine Synthese. Münster.
- THOMAS, S.; BEHMANN, J.; STEIER, A.; KRASKA, T.; MULLER, O.; RASCHER, U.; MAHLEIN, A.-K. (2018): Quantitative assessment of disease severity and rating of barley cultivars based on hyperspectral imaging in a non-invasive, automated phenotyping platform. In: *Plant methods* 14: 45.
- THOROE, C.; ISERMEYER, F. (1997): Biologische Vielfalt und ökonomische Rahmenbedingungen. In: Welling, M. (Hrsg.): *Biologische Vielfalt in Ökosystemen, Konflikt zwischen Nutzung und Erhaltung*. Symposium der Arbeitsgruppe "Ökosysteme/Ressourcen" des Senats der Bundesforschungsanstalten im Geschäftsbereich des BML vom 22. bis 24. April 1997 im FORUM der FAL in Braunschweig-Völkenrode. Bonn: Köllen (Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Reihe A, Angewandte Wissenschaft, 465): 210–225.
- THRUPP, L. A. (2000): Linking agricultural biodiversity and food security: The valuable role of agrobiodiversity for sustainable agriculture. In: *Institutional Affairs* 76: 265–281.
- THUN, R.; HOFFMANN, G.; BASSLER, R. (2012): Die Untersuchung von Böden. 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Darmstadt: VDLUFA-Verl. (Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik).
- UBA, Umweltbundesamt (2011): Stickstoff - Zuviel des Guten. Überlastung des Stickstoffkreislaufs zum Nutzen von Umwelt und Mensch wirksam reduzieren. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4058.pdf>, zuletzt geprüft am 08.03.2016.
- UBA, Umweltbundesamt (2016): Daten aus Land- und Forstwirtschaft. Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft und Stickstoffüberschuss. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/landwirtschaft/naehrstoffeintraege-aus-der-landwirtschaft>, zuletzt aktualisiert am 07.03.2016, zuletzt geprüft am 07.03.2016.
- VERSTEGEN, H. (2018): Leiter der Getreide- und Rapszüchtung KWS Lochow. Mündlich, persönliches Interview am 23.05.2018.
- VIERTL, W.; KARL, R. (2003): Einführung in die Stochastik. Mit Elementen der Bayes-Statistik und der Analyse unscharfer Information. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Vienna: Springer (Springers Lehrbücher der Informatik).

- VILLMANN, T.; KÄSTNER, M.; BACKHAUS, A.; SEIFFERT, U. (2013): Processing Hyperspectral Data in Machine Learning. In: Verleysen, M. (Hrsg.): *21st European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning*: 1–10.
- WAGNER, P.; MARZ, M. (2017): Precision Farming – Direkte und indirekte Erhebung von Makronährstoffen. In: Ruckelshausen, A., Meyer-Aurich, A., Lentz, W. und Theuvsen, B. (Hrsg.): *Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V. (238): 153–156.
- WEGENER, J.; LÜCKE, W.; HEINZEMANN, J. (2006): Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. In: *Agricultural Engineering Research* 12 (6): 103–114.
- WEHLING, P. (2004): Wohin entwickelt sich die Pflanzenzüchtung bis zum Jahr 2025? In: Isermeyer, F. (Hrsg.): *Ackerbau 2025*. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 274: 75–97.
- WELZ, G. (2018): Strategic Alliance Manager Breeding & Biologics der Bayer CropScience AG. Mündlich, persönliches Interview am 16.05.2018.
- WERF, G. R. van der; MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; OLIVIER, J. G. J.; KASIBHATLA, P. S.; JACKSON, R. B. et al. (2009): CO₂ emissions from forest loss. In: *Nature Geoscience* 2 (11): 737–738.
- WHITE, J. W.; ANDRADE-SANCHEZ, P.; GORE, M. A.; BRONSON, K. F.; COFFELT, T. A.; CONLEY, M. M. et al. (2012): Field-based phenomics for plant genetics research. In: *Field Crops Research* 133: 101–112.
- WITKOWSKI, J. (1994): Das Interview in der Psychologie. Interviewtechnik und Codierung von Interviewmaterial. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- WITZKE, H. von (2012): Das Ende der Landwirtschaftlichen Tretmühle: Implikationen für Welternährung, Klimaschutz und Biodiversität. In: *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung* 81 (4): 63–70.
- WITZKE, H. von; JECHLITSCHKA, K.; KIRSCHKE, D.; LOTZE-CAMPEN, H.; NOLEPPA, S. (2004): Social rate of return to plant breeding research in Germany. In: *Agrarwirtschaft* 53 (5): 206–210.
- WITZKE, H. von; NOLEPPA, S. (2011): Der gesamtgesellschaftliche Nutzen von Pflanzenschutz in Deutschland. Darstellung des Projektansatzes und von Ergebnissen zu Modul 1: Ermittlung von Markteffekten und gesamtwirtschaftlicher Bedeutung. Berlin: agripol GbR und Humboldt-Universität zu Berlin.
- WREFORD, A.; MORAN, D. C.; ADGER, W. N. (2010): Climate change and agriculture. Impacts, adaptation and mitigation. Paris: OECD.
- ZOBEL, N.; BACKHAUS, A.; HERZOG, A. (2016): Anwendungsbeispiele für Datenanalysen in der Prozesstechnik. In: Fraunhofer IFF Magdeburg (Hrsg.): *Digitale Methoden und Modelle im Anlagenbau, Industriearbeitskreis Kooperation im Anlagenbau, Arbeitsbericht 25/2016, Fraunhofer IFF Magdeburg*: 45–46.

Anhang

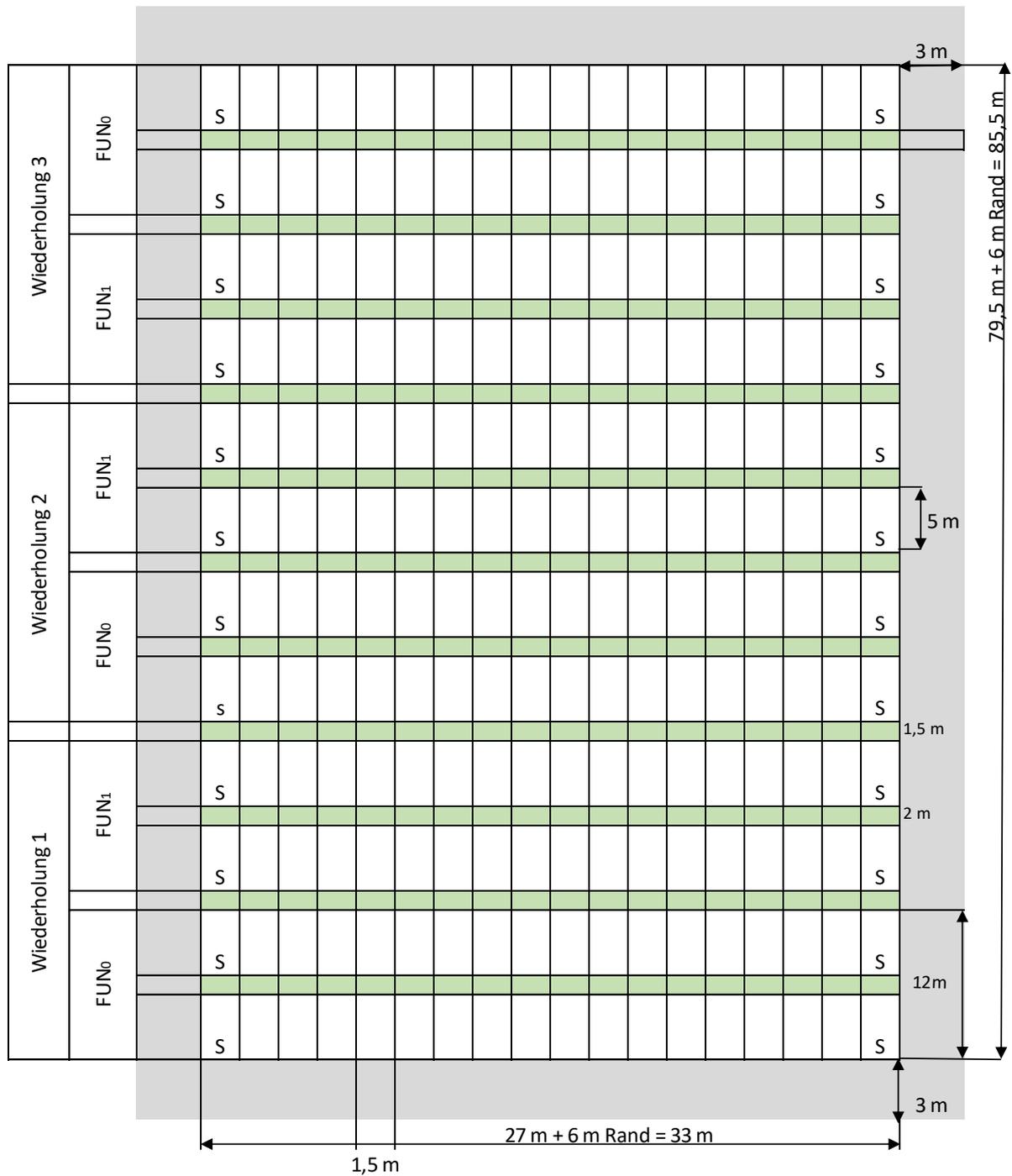
Anhang 1: Entwicklung einer Wildgersten-Introgressionspopulation am Beispiel der HEB-25



Anmerkung: Die Zahlen 1 bis 25 stehen für 25 hochdivergente exotische Wildarten. Schwarze Balken verdeutlichen Chromosomensegmente der Ausgangskulturart (Barke). Farbige Balken symbolisieren die Chromosomensegmente der exotischen Wildarten.

Quelle: MAURER et al. (2015: 2).

Anhang 2: Skizze der Feldversuche der Jahre 2017 und 2018 am Standort Merbitz



Anmerkung: Fahrspur Randstreifen

FUN₀ ohne Fungizid; FUN₁ = mit praxisüblicher Fungizid-Behandlung; S = Schutzstreifen.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Anhang 3: Ertrags- und Qualitätsparameter der Feldversuche 2017 und 2018 am Standort Merbitz

Genotyp	Fungizid	Proteingehalt [%]					Ertrag [dt/ha]				
		Ø	Min	Max	Streuung		Ø	Min	Max	Streuung	
					σ	VarK				σ	VarK
Barke	Fun ₁	10,80	9,90	11,33	0,45	0,04	84,00	75,02	94,58	6,53	0,08
	Fun ₀						80,70	71,69	90,08	6,72	0,08
Scarlett	Fun ₁	10,90	9,18	11,77	0,84	0,08	82,02	76,79	91,07	3,91	0,05
	Fun ₀						78,27	72,58	82,39	2,77	0,04
Planet	Fun ₁	10,10	8,85	11,10	0,89	0,09	98,02	88,43	108,98	5,30	0,05
	Fun ₀						93,63	84,84	103,25	6,63	0,07
Quench	Fun ₁	10,60	9,83	11,33	0,66	0,06	91,57	83,33	104,77	5,62	0,06
	Fun ₀						84,33	77,09	98,57	5,35	0,06
S42IL-104	Fun ₁	11,00	9,77	12,21	1,04	0,09	79,35	75,64	84,41	2,63	0,03
	Fun ₀						78,49	67,16	89,18	5,12	0,07
S42IL-110	Fun ₁	11,20	9,69	12,21	1,04	0,09	81,99	74,78	93,66	4,75	0,06
	Fun ₀						76,23	67,67	82,49	4,07	0,05
S42IL-122	Fun ₁	10,80	9,69	11,62	0,66	0,06	84,45	78,14	92,62	4,53	0,05
	Fun ₀						82,21	74,10	91,59	5,00	0,06
S42IL-135	Fun ₁	11,20	9,92	11,99	0,75	0,07	81,86	74,87	89,12	4,49	0,05
	Fun ₀						77,20	63,66	87,88	7,35	0,10
S42IL-144	Fun ₁	10,70	9,40	12,14	0,98	0,09	81,87	74,01	89,43	4,20	0,05
	Fun ₀						81,01	74,91	89,09	4,17	0,05
S42IL-161	Fun ₁	10,90	9,69	11,77	0,79	0,07	81,49	76,35	87,59	3,34	0,04
	Fun ₀						77,82	68,29	84,69	5,46	0,07
HEB_01_032	Fun ₁	11,40	10,05	11,93	0,52	0,05	79,30	65,31	100,32	10,56	0,13
	Fun ₀						81,40	67,43	101,26	11,11	0,13
HEB_01_104	Fun ₁	10,80	9,75	11,55	0,64	0,06	82,60	67,93	98,71	8,42	0,10
	Fun ₀						82,20	68,18	91,93	6,61	0,08
HEB_03_040	Fun ₁	11,60	10,13	13,05	0,96	0,08	72,90	63,99	86,40	6,34	0,09
	Fun ₀						73,00	63,66	87,20	6,72	0,09
HEB_04_149	Fun ₁	11,60	10,20	12,75	0,92	0,08	67,00	57,47	83,24	6,68	0,10
	Fun ₀						61,40	52,62	74,39	5,63	0,09
HEB_11_098	Fun ₁	11,90	10,05	12,75	1,04	0,09	74,10	66,47	83,18	4,83	0,07
	Fun ₀						74,60	62,23	92,50	8,20	0,11
HEB_21_184	Fun ₁	11,90	10,80	12,98	0,70	0,06	66,00	59,62	71,03	3,99	0,06
	Fun ₀						67,00	59,72	73,41	3,08	0,05

Anmerkung: σ = Standardabweichung; VarK = Variationskoeffizient.

Quelle: Eigene Darstellung (2018).

Anhang 4: AgRover für die Feld-Phänotypisierung



Quelle: Bildaufnahme von Vera Draba (24.05.2017).

Anhang 5: Befragte Personen der systematisierenden Experteninterviews

Name	Institution	Datum
Dr. Franziska Wespel Dr. Ludwig Ramgraber Dr. Heidi Jaiser Dr. Anja Hanemann	Saatzucht Josef Breun GmbH & Co. KG	23.02.2018
Dipl. Physiker Andreas Garz Dr. Michael Schirrmann Dr. Karl-Heinz Dammer	Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V. (ATB)	12.03.2018
Dr. Martin Frauen	Norddeutsche Pflanzenzucht Hans-Georg Lembke KG (NPZ)	24.04.2018
Prof. Dr. Nicolaus von Wirén	Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung (IPK) Gatersleben	02.05.2018
Dr. Hubert Kempf	SECOBRA Saatzucht GmbH	14.05.2018
Dr. László Cselényi	W. von Borries-Eckendorf GmbH & Co. KG	16.05.2018
Dr. Günther Welz	Bayer CropScience AG	16.05.2018
Dr. Harold Verstegen	KWS Lochow GmbH	23.05.2018
Hilmar Cöster	RAGT-Saaten	24.05.2018
Dr. Anna Kicherer	Julius Kühn-Institut (JKI) Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen; Institut für Rebenzüchtung	19.06.2018
Dr. Jan Behmann	Universität Bonn, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES), Phytomedizin	06.07.2018
Dr. Gunther Stiewe Dr. Monika Spiller	Syngenta Seeds GmbH	13.07.2018
Prof. Dr. Klaus Pillen	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU), Leiter der Professur für Pflanzenzüchtung	24.09.2018
Dr. Henrik Schumann	Universität Bonn, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES), Pflanzenzüchtung	25.09.2018

Anhang 6: Leitfaden zur Durchführung qualitativer Experteninterviews mit potenziellen Anwendern der Hyperspektralanalyse

Zur Gewährleistung einer im Sinne des Forschungsinteresses logischen Interviewstruktur gliedert sich der Leitfaden in drei inhaltlich zusammenhängende Themenblöcke:

- I. Allgemeine Aspekte zum gegenwärtigen Entwicklungsstand sensorischer Phänotypisierung in der Züchtung
- II. Nutzungspotenziale einer hyperspektralbasierten Phänotypisierung
- III. Methodische und technologische Aspekte zur praktischen Anwendung der Hyperspektralanalyse in der Pflanzenzüchtung

Themenblock	Leitgedanke (Hauptkategorie)	Leitfrage	Unterfragen
I	Forschungsfeld sensorische Phänotypisierung	Warum wird die Phänotypisierung als sog. „Flaschenhals“ der Pflanzenzüchtung angesehen?	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Defizite sehen Sie bei der Ausgestaltung der Phänotypisierung konkret? • Welche wichtigen phänotypischen Daten können gegenwärtig nur bedingt erhoben werden?
	Potenzial von Sensorik	Welches Potenzial bietet der Einsatz von Sensoren im Züchtungsprozess?	<ul style="list-style-type: none"> • Wie kann sensorgesteuerte Phänotypisierung langfristig den Züchtungserfolg beschleunigen? • Können Sie konkrete Anwendungsbereiche aufzeigen, in denen Sie sich Effizienzsteigerungen mittels sensorischem Einsatz erhoffen?
	Herausforderungen der sensorischen Phänotypisierung	Wodurch ist der Einsatz von Sensorik zur Phänotypisierung derzeit beschränkt?	<ul style="list-style-type: none"> • Wie schätzen Sie die Entwicklung im Bereich sensorischer Phänotypisierung in den letzten Jahren ein? • Nutzen Sie in Ihrem Unternehmen Technologien zur sensorgestützten Phänotypisierung? • Haben Sie Kooperationsprojekte im Bereich der Entwicklung automatisierter Phänotypisierung? Wenn ja, was sind Ihre bisherigen Erfahrungen? • Würden Sie der Aussage zustimmen, dass es aus der Sicht der praktischen Pflanzenzüchtung gegenwärtig wenige marktreife Technologien für eine

Themenblock	Leitgedanke (Hauptkategorie)	Leitfrage	Unterfragen
			<p>sensorische Phänotypisierung gibt? Wenn ja, was sind die Ursachen dafür?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Im Precision Farming der Landwirtschaft wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. Warum kann die Entwicklung einer sensorgesteuerten Phänotypisierung im Vergleich zum Precision Farming nicht mithalten? • Welche Rolle spielt der Faktor Wirtschaftlichkeit?
II	Anwendungsmöglichkeiten der Hyperspektralanalyse	Welche konkreten Anwendungsbereiche sehen Sie für die Hyperspektralanalyse in der Züchtung?	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Chancen sehen Sie zukünftig für die Züchtung unter der Voraussetzung einer gezielten Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit? • Welche Rolle spielen pflanzliche Inhaltsstoffe gegenwärtig in der Züchtung? • Könnten Inhaltsstoffe bei kostengünstiger Analysemethodik als Züchtungsziel zukünftig eine stärkere Bedeutung erlangen? • Ließen sich durch die zusätzliche Erfassung pflanzlicher Inhaltsstoffe bessere Selektionsentscheidungen treffen? • Kann die Hyperspektralanalyse einen Beitrag zur Aufweitung des „Flaschenhalses“ der Phänotypisierung leisten? • Welche Anwendungen der Hyperspektralanalyse ergeben sich in der Wissenschaft? • In welchen Bereichen sehen Sie das größte Anwendungspotenzial für die hyperspektrale Phänotypisierung? • Sehen Sie Anwendungsoptionen bei der Krankheitsdetektion im Feld? • Wie würde sich eine frühzeitige Erfassung verarbeitungsrelevanter Qualitätseigenschaften auf den Züchtungsprozess auswirken?

Themenblock	Leitgedanke (Hauptkategorie)	Leitfrage	Unterfragen
			<ul style="list-style-type: none"> • Wo liegt der wesentliche Vorteil der Hyperspektralanalyse im Vergleich zu anderen technischen Konzepten der Phänotypisierung? • Welche wirtschaftlichen Effekte könnten sich bei technologischer Eignung ergeben?
III	Technologischer Entwicklungsstand (Bezug zu Projektdaten)	Wie schätzen Sie die erzielten Projektergebnisse (statistische Vorhersagegüte) ein?	<ul style="list-style-type: none"> • Hat die Hyperspektralanalyse langfristig das Potenzial, um konventionelle Analysen und Bonituren zu substituieren oder zumindest zu ergänzen? • Welche technologischen Bedenken haben Sie im Hinblick auf die Eignung der Hyperspektralanalyse? • Welche Rolle spielen Störeinflüsse im Feld? • Ist die sensorische Phänotypisierung im Vergleich zur händischen Bonitur zu witterungsunbeständig? • Welche Risiken sehen Sie im Hinblick auf eine unternehmerische Nutzung der Technologie? • Ist die Technik derzeit zu wenig erprobt und ausgereift? • Wie schätzen Sie den Faktor Mobilität einer hyperspektralen Phänotypisierungsplattform ein? • Welche Potenziale bieten Drohnen zukünftig?
	Bestimmungsfaktoren für den Einsatz in der Praxis	Welche Voraussetzungen müssten erfüllt sein, dass die Hyperspektralanalyse Eingang in den Züchtungsprozess findet?	<ul style="list-style-type: none"> • Ab welcher Prädiktionsgüte (R^2) würden Sie die Vorhersagewerte als brauchbar einstufen? • Die Erfassung welcher Merkmale ist für die Praxis von besonderer Relevanz? • Welche Rolle spielen die Investitionskosten? • Welche Investitionsrisiken müssten abgebaut werden?

Angaben zur Person und zum wissenschaftlichen Werdegang

Name:	Johannes Ryll
Akademischer Grad:	Master of Science (M. Sc.)
Geburtsdatum:	12. März 1988
Geburtsort:	Quedlinburg
Geschlecht:	männlich
Anschrift:	Meckelstr. 10, 06112 Halle
Fachgebiet der Promotion:	Agrarwissenschaften

BILDUNGSWEG

Seit 01/2016	Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Naturwissenschaftlichen Fakultät III der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Landwirtschaftliche Betriebslehre
10/2013 – 09/2015	Studium der Agrarwissenschaften Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg <ul style="list-style-type: none">• Schwerpunkt: Agrarökonomie• Abschluss: Master of Science• Thema der Masterarbeit: Politisches Agenda-Setting tier-schutzrelevanter Themen – Das Beispiel der Initiative Tierwohl – Motivation und Risiko für Nutztierhalter
10/2010 – 09/2013	Studium der Agrarwissenschaften Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg <ul style="list-style-type: none">• Schwerpunkt: Agrarökonomie• Abschluss: Bachelor of Science• Thema der Bachelorarbeit: Entwicklung von Preisrelationen zwischen Ost- und Westdeutschland, dargestellt am Beispiel ausgewählter Nahrungsmittelgruppen
08/2000 – 07/2007	Wolterstorff-Gymnasium Ballenstedt <ul style="list-style-type: none">• Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

PUBLIKATIONSLISTE

RYLL, J.; WAGNER, P. (2019): Ökonomische Bewertung von Low-Input-Genotypen unter Berücksichtigung von Kosteneinsparungseffekten für Fungizide. In: Henning, C., Hess, S., Latacz-Lohmann, U., Loy, J.-P., Braatz, M. und Thiele, H. (Hrsg.): *Visionen für eine Agrar- und Ernährungspolitik nach 2020*. 58. Jahrestagung der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e. V. vom 12. bis 14. September 2018 in Kiel. 1. Auflage. Münster: Landwirtschaftsverlag (54): 31-42.

Eidesstattliche Erklärung / *Declaration under Oath*

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare under penalty of perjury that this thesis is my own work entirely and has been written without any help from other people. I used only the sources mentioned and included all the citations correctly both in word or content.

Datum / Date

Unterschrift des Antragstellers / *Signature of the applicant*