

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues

Ökonomische Auswirkungen des Klimawandels auf den Marktfruchtbau und
Bewertung von Anpassungsoptionen am Beispiel von Ernteversicherungen

Johann Gröbmaier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für
Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlan-
gung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. K. Salhofer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. A. Heißenhuber
2. Univ.-Prof. Dr. J. H. Kantelhardt
(Universität für Bodenkultur Wien/Österreich)

Die Dissertation wurde am 18.06.2012 bei der Technischen Universität München ein-
gereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung,
Landnutzung und Umwelt am 17.10.2012 angenommen.

Vorwort

*Man überschätzt leicht das eigene
Wirken und Tun in seiner Wichtig-
keit gegenüber dem, was man durch
andere Menschen geworden ist.*

Dietrich Bonhoeffer

Es ist mir ein Anliegen, meinem hochgeschätzten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Alois Heißenhuber für die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit und die umfangreiche Unterstützung zu danken.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Jochen Kantelhardt für die wichtigen Hinweise und Anregungen zu meiner Arbeit sowie für die Übernahme des Koreferats bedanken.

Außerdem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Klaus Salhofer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Insbesondere möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Markus Gandorfer für das entgegengebrachte Interesse, die ständige Diskussionsbereitschaft und die stete hilfsbereite Unterstützung ganz herzlich bedanken.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues danke ich für eine spannende und bereichernde Zeit.

Nicht zuletzt gehört mein großer Dank meiner Verlobten und meiner Familie für ihre Unterstützung, ihre Geduld und ihr Verständnis während der gesamten Dauer der Promotion.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Formelverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Situation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Klimawandel und Marktfruchtbau – Auswirkungen und Anpassungsstrategien ..	5
2.1 Klimaänderungen und Klimaprognosen	5
2.1.1 Beobachteter Klimawandel.....	6
2.1.2 Klimaprojektionen.....	8
2.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion	9
2.2.1 Änderung von pflanzenbaulich relevanten Wachstumsfaktoren	10
2.2.2 Änderung des Ertragspotentials.....	12
2.2.3 Änderung des Ertragsrisikos.....	14
2.3 Betriebliche Strategien zur Anpassung an den Klimawandel	15
2.3.1 Anpassung im Rahmen der Produktionstechnik	17
2.3.2 Anpassung im Rahmen der organisatorischen Gestaltung	19
2.3.3 Anpassung durch Verbesserung der nachträglichen Anpassungsfähigkeit	21
2.3.4 Anpassung durch Preis- und Mengenabsicherung.....	22
2.4 Exkurs: Anpassung durch Ernteversicherungen	24
2.4.1 Grundlagen der Ernteversicherung.....	24
2.4.2 Marktüberblick und Anwendungsbeispiele	29
2.4.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für Ernteversicherungen	33
2.4.4 Schlussfolgerungen	34
2.5 Zwischenfazit: Klimawandel und Marktfruchtbau	36
3 Klimafolgenanalyse durch statistische Untersuchungen	39
3.1 Untersuchungsgegenstand	42
3.2 Material.....	43
3.2.1 Ertragsdaten.....	43
3.2.2 Klimadaten	44

3.3	Methoden.....	45
3.3.1	Extremwertanalysen	45
3.3.2	Multiple Regressionsanalysen.....	48
3.3.3	Simulation von zukünftigen Ertragsschwankungen	54
3.4	Ergebnisse	54
3.4.1	Ergebnisse der Extremwertanalysen.....	54
3.4.2	Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen	63
3.4.3	Ergebnisse der Simulation von zukünftigen Ertragsschwankungen.....	67
3.5	Zwischenfazit: Klimafolgenanalyse durch statistische Untersuchungen	71
4	Klimafolgenanalyse durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen.....	75
4.1	Untersuchungsgegenstand.....	75
4.2	Material und Methoden.....	76
4.2.1	Auswertung von Klimaszenarien	78
4.2.2	Expertenbefragung.....	84
4.2.3	Stochastische Simulation zukünftiger Erträge durch Monte-Carlo-Simulationen.....	86
4.3	Ergebnisse	88
4.3.1	Ergebnisse der Experteninterviews.....	88
4.3.2	Ergebnisse der Ertragssimulationen.....	90
4.4	Zwischenfazit: Klimafolgenanalyse durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen	93
5	Ableitung ökonomischer Konsequenzen und Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen – dargestellt am Beispiel des Marktfruchtbaus ...	95
5.1	Untersuchungsgegenstand.....	95
5.2	Material und Methoden.....	96
5.2.1	Grundlegendes zu Risikoanalysen	96
5.2.2	Lage- und Streuungsparameter.....	97
5.2.3	Das Konzept der stochastischen Dominanz	97
5.2.4	Das Erwartungsnutzen-Prinzip	101
5.2.5	Datenanalyse und Simulation	104
5.3	Ergebnisse	108
5.3.1	Ableitung ökonomischer Konsequenzen.....	108
5.3.2	Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen	110
5.4	Zwischenfazit.....	116
6	Diskussion und Schlussfolgerungen	119
6.1	Diskussion der Klimafolgenanalyse durch statistische Untersuchungen.....	119
6.1.1	Diskussion der Extremwertanalysen	119
6.1.2	Diskussion der multiplen Regressionsanalysen und der Simulation von zukünftigen Ertragsschwankungen	121

6.2	Diskussion der Klimafolgenanalyse durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen.....	124
6.3	Diskussion der Ableitung ökonomischer Konsequenzen und der Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen	127
7	Zusammenfassung	131
8	Summary	135
9	Anhang	139
9.1	Anhang-Abbildungen	139
9.2	Anhang-Tabellen	159
9.3	Anhang-Sonstiges (Fragebogen Expertenbefragung).....	163
10	Literaturverzeichnis	183

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Beobachteter Klimawandel.....	6
Abbildung 2-2: Trends der wichtigsten Treibhausgaskonzentrationen in der Luft.....	8
Abbildung 2-3: Geschätzte relative Ertragsänderungen aufgrund klimatischer Veränderungen.....	13
Abbildung 3-1: Klimafolgenanalyse pflanzliche Produktion.....	39
Abbildung 3-2: Beeinflussung landwirtschaftlicher Betriebsführung durch klimatische und weitere Faktoren.....	41
Abbildung 3-3: Anomalien der trendbereinigten Winterweizenerträge (Lkr. Mühldorf)	55
Abbildung 3-4: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Winterweizen).....	58
Abbildung 3-5: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Silomais)	59
Abbildung 3-6: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Winterweizen).....	61
Abbildung 3-7: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Silomais)	62
Abbildung 3-8: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Winterweizen)	64
Abbildung 3-9: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Silomais).....	65
Abbildung 3-10: Verteilung der Ertragsanomalien von Silomais (1975 bis 2004 vs. 2070 bis 2099) am Standort Rosenheim	69
Abbildung 3-11: Verteilung der Ertragsanomalien von Winterraps (1975 bis 2004 vs. 2070 bis 2099) am Standort Mühldorf.....	70
Abbildung 3-12: Verteilung der Ertragsanomalien von Grünland (1975 bis 2004 vs. 2070 bis 2099) am Standort Rosenheim.....	71
Abbildung 3-13: Klimafolgenanalyse Pflanzliche Produktion – weiteres methodisches Vorgehen.....	73
Abbildung 4-1: Untersuchungsstandorte	76
Abbildung 4-2: Monatsmittel der Temperatur für das Basisszenario (1971-2000) und das Zukunftsszenario (2021-2050) (Standort Freising).....	79
Abbildung 4-3: Schwankungsbreite der Temperaturänderung (Standort Freising).....	80
Abbildung 4-4: Änderung des Niederschlags (Mittelwerte) (Standort Freising).....	81

Abbildung 4-5: Schwankungsbreite der Niederschlagsänderung (Standort Freising).....	82
Abbildung 4-6: Veränderung der Trockentage (Standort Freising)	83
Abbildung 4-7: Veränderung weiterer klimatologischer Kenntage (Standort Freising).....	84
Abbildung 4-8: Beispiel für eine Ertragsverteilung	85
Abbildung 4-9: Dichtefunktion einer stetigen Dreiecksverteilung	87
Abbildung 4-10: Ergebnisse der Ertragssimulation (Freising)	90
Abbildung 4-11: Ergebnisse der Ertragssimulation (Friedberg).....	91
Abbildung 4-12: Ergebnisse der Ertragssimulation (Magdeburg).....	92
Abbildung 4-13: Ergebnisse der Ertragssimulation (Fürstenwalde)	93
Abbildung 5-1: Stochastische Dominanz 1. Grades	99
Abbildung 5-2: Stochastische Dominanz 2. Grades	100
Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Erwartungswert (EW), Erwartungsnutzen (EW (U)), Sicherheitsäquivalent (SÄ) und Risikoprämie (RP).....	102
Abbildung 5-4: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Erlöses an den Standorten Freising und Magdeburg	109
Abbildung 5-5: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses	113
Abbildung 5-6: Sicherheitsäquivalente des Erlöses	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Anpassungsmöglichkeiten von Marktfruchtbaubetrieben an den Klimawandel	16
Tabelle 2-2: Systematisierung von Ernteversicherungen	27
Tabelle 2-3: Ernteversicherungssysteme in ausgewählten Ländern	30
Tabelle 3-1: Quantifizierbare und nicht quantifizierbare Einflüsse auf die Erträge	46
Tabelle 3-2: Variablen im Regressionsmodell.....	48
Tabelle 3-3: Kulturartenspezifische Periode der Berechnungszeiträume der Variablen	49
Tabelle 3-4: Verbale Erklärung von Missernten	56
Tabelle 3-5: Statistische Parameter der Regressionsmodelle	66
Tabelle 4-1: Ausgewertete Klimaparameter.....	78
Tabelle 4-2: Durch Experteninterviews ermittelte Schätzergebnisse zukünftiger Erträge unter dem Einfluss prognostizierter klimatischer Änderungen an vier Standorten.....	89
Tabelle 5-1: Schema zur Ermittlung der Erfolgskenngröße	106
Tabelle 5-2: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Freising	111
Tabelle 5-3: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Magdeburg ...	112

Formelverzeichnis

Formel 3-1: Berechnung des linearen Trends.....	45
Formel 3-2: Berechnung der Ertragsanomalie	46
Formel 3-3: Berechnung der monatlichen Durchschnittstemperatur (<i>Temp</i>)	49
Formel 3-4: Berechnung der monatlichen Niederschlagssumme (<i>Ns</i>).....	49
Formel 3-5: Berechnung der EDI-Werte für die Regressionsmodelle	50
Formel 3-6: Berechnung der Klimavariablen Hitzestress (<i>HS</i>).....	50
Formel 3-7: Berechnung der Growing Degree Days (<i>GDD</i>)	51
Formel 3-8: Multiple lineare Regression	52
Formel 5-1: Risikonutzenfunktion	104
Formel 5-2: Umkehrfunktion der Risikonutzenfunktion	104
Formel 5-3: Sicherheitsäquivalent.....	104

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
° C	Grad Celsius
€	Euro
abzgl.	abzüglich
AF	Ackerfläche
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
c. p.	ceteris paribus (lat.: „wobei die übrigen Dinge gleich sind“)
CRU	Climatic Research Unit
CV	Coefficient of Variation (Variationskoeffizient)
d.h.	das heißt
DBV	Deutscher Bauernverband
DEKLIM	Deutsches Klimaforschungsprogramm
dt	Dezitonne = 100 kg
DWD	Deutscher Wetterdienst
EDI	Effective Drought Index (Trockenheitsindex)
e. g.	exempli gratia (lat.: „zum Beispiel“)
etc.	et cetera (lat.: „und im Übrigen“ im Sinne von „und so weiter“)
EU	Europäische Union
f.	folgende (Singular)
FACE	Free Air Carbon Dioxide Enrichment
ff.	folgende (Plural)
GAP	Gemeinsame EU-Agrarpolitik
GCM	General Circulation Model
GDD	Growing Degree Days
ggf.	gegebenenfalls
GQ	Goldfeld-Quandt
H ₀	Nullhypothese
ha	Hektar
HS	Index für Hitzestress
i. e.	id est (lat.: „das heißt“)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IQR	interquartile range
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KM	Körnermais
km ²	Quadratkilometer

Abkürzungsverzeichnis

LF	landwirtschaftliche Nutzfläche
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Max	Maximalwert
MGV	Mehrgefahrenversicherung
Min	Minimalwert
mm	Millimeter
MM 5	mesoskaliges Modell der fünften Generation
Mod	Modalwert (häufigster Wert)
Mrd.	Milliarde
MÜ	Standort Mühldorf
MW	Mittelwert
N ₂ O	Lachgas
Ns	Niederschlagssumme
OLS	Ordinary Least Squares
ppm	parts per million
R ²	Bestimmtheitsmaß
rd.	rund
REMO	regionales Klimamodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie Hamburg
RO	Standort Rosenheim
RP	Risikoprämie
S.	Seite
s. o.	siehe oben
SÄ	Sicherheitsäquivalent
SG	Sommergerste
SM	Silomais
SRES	Second Report on Emission Scenarios
Stabw	Standardabweichung
T	Temperatur
T _{Basis}	Basistemperatur
Temp	Durchschnittstemperatur
T _{max}	Maximaltemperatur
T _{min}	Minimaltemperatur
U	Nutzen
u. a.	unter anderem
UNEP	United Nations Environment Programme
URL	Uniform Resource Locator (Internetadresse)
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
usw.	und so weiter
v. a.	vor allem
Vers.	Versicherung
vgl.	vergleiche
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
WG	Wintergerste

Abkürzungsverzeichnis

WMO	World Meteorological Organisation
WR	Winterraps
WTO	World Trade Organization
WW	Winterweizen
Y_a	Ertragsanomalie
Y_e	Erwartungswert des Ertrags
z. B.	zum Beispiel
ZMP	Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle
zzgl.	zuzüglich
λ	absoluter Risikoaversionskoeffizient
σ^2	Varianz

1 Einleitung

Zwischen Landwirtschaft und Klimawandel besteht ein komplexer Zusammenhang. Zum einen ist die Landwirtschaft einer der am stärksten von den klimatischen Änderungen betroffene Sektor, da die Bewirtschaftungsformen direkt vom Klima abhängen. Sie hat sich daher den erwarteten Auswirkungen des Klimawandels anzupassen. Zum anderen gilt sie als Mitverursacher des Klimawandels und ist daher gefordert ihre eigenen Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Darüber hinaus kommt der Landwirtschaft noch eine weitere Rolle im Klimawandel zu, da sie auch, z. B. durch die Erzeugung von erneuerbaren Energien, zur Treibhausgasminderung beitragen kann (vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION 2008). In der vorliegenden Arbeit wird vor allem auf die Betroffenrolle der Landwirtschaft eingegangen und darauf basierend werden ausgewählte Anpassungsoptionen thematisiert.

1.1 Aktuelle Situation und Problemstellung

Der globale Klimawandel wird Auswirkungen auf viele gesellschaftliche, wirtschaftliche und ökologische Bereiche haben und stellt damit eines der wichtigsten Umweltprobleme des 21. Jahrhunderts dar. Die Erwärmung des globalen Klimasystems lässt sich wissenschaftlich bestätigen. So war die Dekade von 2001 bis 2010 die wärmste Dekade seit Beginn der Temperaturaufzeichnungen (CRU 2012). Neben dem beobachteten Anstieg der Temperatur gibt es noch zahlreiche weitere Beobachtungen über Veränderungen im klimatischen System, die in den Berichten des IPCC (verfügbar unter: „www.ipcc.ch“) zusammengefasst sind. Als weitere Veränderungen in Folge der Klimaerwärmung werden auch veränderte Niederschlagsintensitäten sowie eine veränderte zeitliche und räumliche Verteilung der Niederschläge beobachtet. Auch die Häufigkeit von Starkregenereignissen und Überschwemmungen sowie von Hitzewellen und Trockenperioden nimmt zu. Weiterhin wird eine Zunahme der Häufigkeit von Sturmereignissen beobachtet. In verschiedenen Klimaszenarien wird eine Häufung und Intensivierung dieser Ereignisse prognostiziert (IPCC 2007).

Die klimatischen Verhältnisse stellen in der Landwirtschaft einen bedeutenden Risikofaktor dar. Besonders deutlich wurde dies z. B. im Jahr 2003, als eine lang anhaltende Dürre in Europa zu schweren Ertragseinbußen führte. Der Pflanzenbau bzw. der sich daran anschließende gesamte Agrarsektor gehört wegen seiner unmittelbaren Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen zu einem der sensibelsten Bereiche, die durch den Klimawandel betroffen sind. Die prognostizierten klimatischen Veränderungen werden Einfluss auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen haben. Dabei ist nicht nur das mittlere Ertragspotenzial betroffen, sondern auch die Ertragsvariabilität

(vgl. SCHALLER und WEIGEL 2007). Insbesondere die Ertragsunsicherheit durch zunehmende Wetterextreme wird in Abhängigkeit von den Standortvoraussetzungen steigen und die Wahrscheinlichkeit niedriger Erträge wird sich erhöhen. Das Ertragsrisiko und somit auch das Einkommensrisiko vergrößern sich dadurch (vgl. GANDORFER und KERSEBAUM 2008a).

Das Einkommensrisiko im Marktfruchtbau wird zusätzlich durch weitere Entwicklungen beeinflusst. So führen die zunehmende Liberalisierung der Agrarmärkte und der damit einhergehende Abbau der klassischen Marktinstrumente zu höheren Preisschwankungen und somit zu höheren Preisrisiken. Im globalen Maßstab verstärkt die infolge des Klimawandels erhöhte Varianz auf der Angebotsseite diese Entwicklung (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2010). Insgesamt gesehen ist der Marktfruchtbau also in Zukunft mit einem weitaus größeren Ertrags- sowie Preisrisiko als bisher konfrontiert, was vor allem bei stark spezialisierten Betrieben mit angespannter Liquiditätssituation zu Problemen führen kann. Zu einer modernen Unternehmensführung gehört deshalb ein angepasstes und funktionierendes Risikomanagement.

Aus diesen Gründen gewinnt die Frage nach dem Umgang mit Ertrags- bzw. Preisrisiken im Marktfruchtbau bzw. in der Landwirtschaft insgesamt an Bedeutung und wird derzeit, z. B. auch in der Diskussion um die Weiterentwicklung der Gemeinsamen EU-Agrarpolitik (GAP) nach 2013, intensiv diskutiert. So schlägt die EU-Kommission vor, dass ein Instrumentarium für das Risikomanagement eingeführt werden sollte, mit dem die Mitgliedsstaaten auf Erzeugungs- und Einkommensrisiken reagieren können. Die Palette der Vorschläge umfasst dabei u. a. auch die verstärkte Förderung von Versicherungsinstrumenten (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010). Bei der Bewältigung von Ertragsrisiken können Ernteversicherungen eine wichtige Rolle einnehmen und es lässt sich feststellen, dass in vielen Ländern Europas (z. B. Spanien, Österreich), aber auch außerhalb (z. B. USA, Kanada) bereits – und teilweise auch schon seit langer Zeit – Ernteversicherungen zur Absicherung der Naturalerträge landwirtschaftlicher Kulturen gegen witterungsbedingte Ertragsausfälle existieren. In all diesen Ländern wurden diese Versicherungssysteme (v. a. solche zur Absicherung gegen Trockenheitsschäden) mit staatlicher Unterstützung etabliert. Daher stellt sich aktuell auch in Deutschland die Frage, ob und wie umfassende Ernteversicherungssysteme etabliert werden können und welche Rolle der Staat dabei einnehmen könnte bzw. sollte. Dies hat zuletzt auch der wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik der Bundesregierung in einer Stellungnahme thematisiert (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es vor allem, die Aspekte des Klimawandels im Zusammenhang mit dem Ertrags- bzw. Einkommensrisiko in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion näher zu betrachten.

Da die größte Vulnerabilität der Landwirtschaft gegenüber dem Klimawandel aus der Empfindlichkeit landwirtschaftlicher Kulturen gegen eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von meteorologischen Extremereignissen resultiert (vgl. ROSENZWEIG et al. 2002, MEEHL und TEBALDI 2004, UBA 2005, BENISTON et al. 2007), soll durch Extremwertanalysen ein Überblick über den Einfluss extremer Wetterereignisse auf landwirtschaftliche Kulturen sowie das Ausmaß der Zunahme kritischer Klimaparameter unter zukünftigen Klimabedingungen geschaffen werden.

Für weiterführende ökonomische Analysen der Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen ist vor allem eine Quantifizierung der zukünftigen Ertragssituation erforderlich. Daher soll untersucht werden, ob auf Basis weniger Variablen bzw. sehr einfacher Wetterindizes statistische Zusammenhänge zwischen Wetter und Ertrag hergestellt werden können und ob diese Zusammenhänge auf zukünftige Klimaprognosen angewandt, zu plausiblen Aussagen führen. Insgesamt soll damit der Einfluss prognostizierter klimatischer Veränderungen auf die Variabilität der Erträge ausgewählter Kulturen an verschiedenen Standorten beurteilt werden.

Da ein klares Verständnis der Beziehung zwischen Wetter bzw. Klima und Ertragsverteilungen entscheidend bei der Identifizierung von geeigneten Anpassungsstrategien an klimatische Änderungen ist, besteht ein weiteres Ziel der Arbeit darin, einen neuen methodischen Ansatz der Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion zu erproben. Dieser basiert auf der Schätzung von Ertragsverteilungen unter zukünftigen klimatischen Bedingungen durch Experten.

Ein weiteres Ziel der Arbeit besteht darin, ökonomische Konsequenzen der prognostizierten klimatischen Änderungen im Marktfruchtbau abzuleiten. Des Weiteren wird eine Bewertungsmethodik dargestellt, mit der die Effekte von Ernteversicherungen (die als eine wichtige Anpassungsmaßnahme an klimatische Änderungen diskutiert werden) auf den Erlös einer repräsentativen Fruchtfolge (unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen), berücksichtigt werden können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einem Literaturüberblick in Kapitel 2 zum derzeitigen Wissensstand über den globalen Klimawandel sowie dessen Auswirkungen auf die Pflanzenproduktion und möglichen Anpassungsstrategien unter mitteleuropäischen Verhältnissen. Auf den Bereich der Ernteversicherungen wird dabei in einem Exkurs näher eingegangen.

Kapitel 3 beinhaltet eine Analyse des Zusammenhangs zwischen Wetter und Ertrag sowie eine Ertragsprojektion unter zukünftigen Klimabedingungen unter Verwendung von statistischen Methoden. Darin wird zunächst auf die verwendeten Untersuchungsdaten und die angewandten Methoden (Extremwertanalysen und multiple Regressi-

onsanalysen) eingegangen. Das Kapitel schließt mit den Ergebnissen dieser empirischen Untersuchungen.

In Kapitel 4 erfolgt – auf den Erkenntnissen von Kapitel 3 aufbauend – eine weitere Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen mit einem neuen methodischen Ansatz. Dabei wird zunächst das verwendete Material sowie die methodische Vorgehensweise (Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulation) genauer erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse dieses Ansatzes zur Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion beschrieben.

Gegenstand von Kapitel 5 ist zum einen die Ableitung der ökonomischen Konsequenzen der in Kapitel 4 ermittelten Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturalerträge landwirtschaftlicher Kulturen. Zum anderen wird der wirtschaftliche Nutzen von Ernteversicherungen unter Risikoaspekten bewertet. Zunächst erfolgt in Kapitel 5 eine Darstellung des Untersuchungsgegenstands, der sich eine Beschreibung der Untersuchungsmethode und Vorgehensweise anschließt. Das Kapitel endet mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen.

Die Arbeit schließt mit einer kritischen Diskussion der einzelnen Untersuchungen und daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen in Kapitel 6 sowie mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Arbeit in Kapitel 7.

2 Klimawandel und Marktfruchtbau – Auswirkungen und Anpassungsstrategien

Die Landwirtschaft nimmt bei der Diskussion um Auswirkungen, Verursachung und Minderung des Klimawandels eine Sonderstellung ein. Denn einerseits wird die landwirtschaftliche Produktion wie kaum ein anderer Bereich vom Klimawandel betroffen sein und muss sich daher an die veränderten klimatischen Bedingungen anpassen. Andererseits gehört sie auch zu den Produzenten klimaschädlicher Treibhausgase. Die Landwirtschaft ist aber nicht nur Betroffener und Verursacher des Klimawandels, sie kann auch einen erheblichen Beitrag zu dessen Minderung leisten (vgl. HEIßENHUBER und GANDORFER 2008).

Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf den Auswirkungen des Klimawandels im Marktfruchtbau liegt, wird im Folgenden der aktuelle Stand des Wissens in diesem Bereich näher dargestellt. Dabei wird zunächst auf Klimaänderungen und Klimaprognosen eingegangen, woraufhin Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion beschrieben werden. Anschließend werden geeignete Anpassungsstrategien landwirtschaftlicher Betriebe an die prognostizierten Klimaänderungen skizziert.

2.1 Klimaänderungen und Klimaprognosen

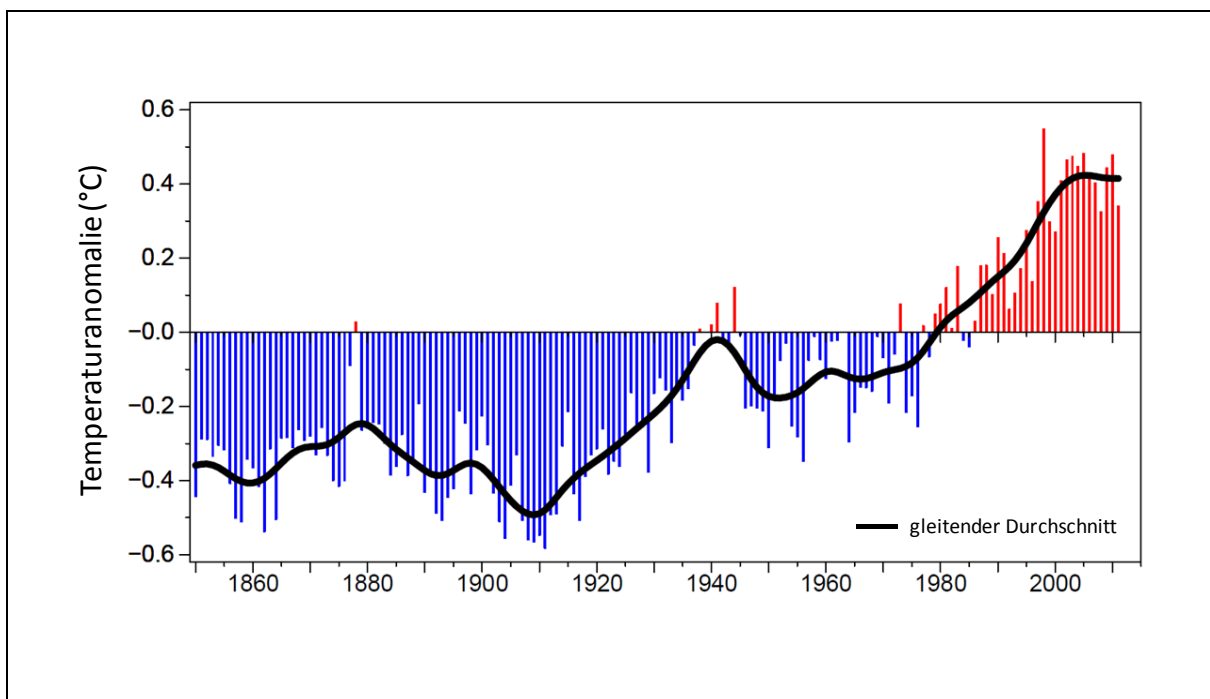
Der 1988 von der World Meteorological Organisation (WMO) und dem United Nations Environment Programme (UNEP) eingesetzte Klimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) stellt in regelmäßigen Abständen (etwa 5 Jahre) den Zustand des Klimasystems und seine Auswirkungen auf gesellschaftliche und ökologische Systeme fest. Dabei bedient er sich der veröffentlichten wissenschaftlichen Literatur. Die ersten drei Berichte wurden 1990, 1995 und 2001 veröffentlicht. Im Jahr 2007 wurde in drei Teilen der vierte Sachstandsbericht des IPCC veröffentlicht. Durch Fortschritte in der Beobachtung des Klimawandels, verbesserte Klimamodellierungen und neue Erkenntnisse über die Zusammenhänge des Klimawandels ließen sich präzisere Aussagen zum Klimawandel ableiten. Der Bericht belegt deutlich die fortschreitende globale Erwärmung und bekräftigt den Einfluss des Menschen als Hauptursache für diese klimatischen Veränderungen. Mit großer Wahrscheinlichkeit (> 90 %) sind demnach die von Menschen verursachten Treibhausgase für den größten Teil der beobachteten Klimaänderung verantwortlich. Zugleich macht der Bericht deutlich, dass große Anstrengungen bei der Minderung von Treibhausgasemissionen notwendig sind, um die globale Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten zu be-

grenzen. Des Weiteren sind auch Maßnahmen zur Anpassung an die klimatischen Veränderungen notwendig (IPCC 2007).

2.1.1 Beobachteter Klimawandel

Durch umfangreiche Wetter- und Klimaaufzeichnungen über die letzten Jahrzehnte kann eine Erwärmung des globalen Klimasystems belegt werden. Die Temperaturzunahme der letzten 50 Jahre ist doppelt so hoch wie die der letzten 100 Jahre und die derzeitigen Temperaturen sind wahrscheinlich die höchsten seit 2.000 Jahren (MOBERG et al. 2005). Der 100-jährige lineare Trend der globalen Mitteltemperatur beträgt $0,74\text{ °C}$ (MARX et al. 2008). Die Dekade von 2001 bis 2010 ($0,44\text{ °C}$ über dem Durchschnitt von 1961 bis 1990) war $0,20\text{ °C}$ wärmer als die Dekade von 1991 bis 2010. Das wärmste Jahr seit Beginn der Temperaturaufzeichnungen war 1998 ($+0,55\text{ °C}$). Die nach 1998 nächsten neun wärmsten Jahre der Zeitreihe befinden sich alle in der Dekade von 2001 bis 2010. Innerhalb dieser Dekade war nur das Jahr 2008 nicht unter den zehn wärmsten Jahren. Obwohl 2008 das kälteste Jahr des 21. Jahrhunderts ist, ist es dennoch das 13. wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen (CRU 2012) (vgl. Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Beobachteter Klimawandel



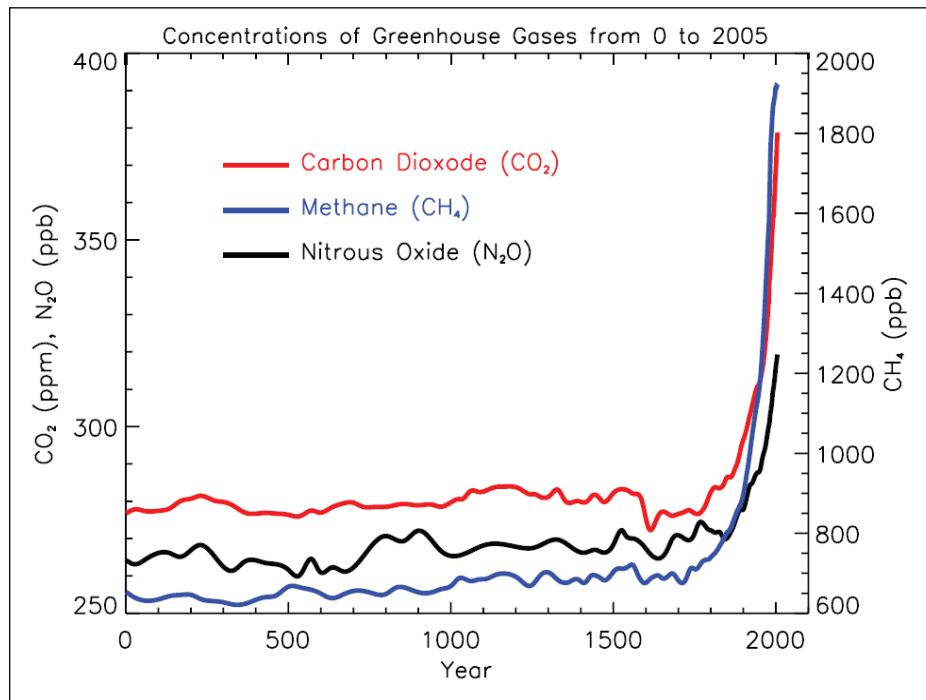
Quelle: CRU (2012)

Neben dem beobachteten Anstieg der Temperatur gibt es noch zahlreiche weitere Beobachtungen über Veränderungen im klimatischen System. So lassen sich auch veränderte Niederschlagsintensitäten sowie eine veränderte zeitliche und räumliche Vertei-

lung der Niederschläge beobachten. Die Häufigkeit von Starkregenereignissen und Überschwemmungen sowie die Häufigkeit von Hitzewellen und Trockenperioden nehmen zu. Weiterhin wird eine Zunahme der Häufigkeit von Sturmereignissen beobachtet (SHEIN 2006, IPCC 2007). Insgesamt werden ein verstärktes Auftreten von Extremwetterereignissen und eine Zunahme von wetterbedingten Naturkatastrophen beobachtet. Weltweit sind die Katastrophenschäden der Versicherer in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen, wobei Wetterextreme fünf von sechs Naturkatastrophen auslösen (MUNICH RE 2007). Auch der aktuelle Sonderbericht des IPCC über Extremereignisse beschreibt, dass wirtschaftliche Schäden aus wetter- und klimabedingten Katastrophen zugenommen haben. Schätzungen der jährlichen Schäden haben seit 1980 von einigen Milliarden US-\$ auf mittlerweile über 200 Mrd. US-\$ (zu Preisen von 2010) zugenommen (IPCC 2012).

Durch die Zunahme der mittleren globalen Temperatur sind weltweit die Gletscher geschrumpft und die schneebedeckte Fläche hat seit 1980 um etwa 5 % abgenommen. Auch die oberen Schichten des Permafrostbodens haben sich seit 1980 um ca. 3 °C erwärmt. Weiterhin führt die Erwärmung dazu, dass das Meereis in der Arktis seit 1978 im Jahresmittel um 8 % abnimmt. Auch die Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis verlieren an Masse und tragen damit insgesamt zu etwa 20 % an einem Anstieg des Meeresspiegels bei. Weiterhin trägt das Abschmelzen der Gebirgsgletscher zu etwa 25 % und die thermische Ausdehnung in Folge einer Erwärmung der Ozeane und Meere zu etwa 55 % zum Anstieg des Meeresspiegels bei (IPCC 2007).

Die bedeutendste Triebkraft für den Klimawandel ist die ansteigende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre und es ist sehr wahrscheinlich, dass die Erwärmung der letzten 50 Jahre wesentlich durch anthropogene Treibhausgase verursacht worden ist. Kohlendioxid (CO₂) ist das bedeutendste Treibhausgas und stellte 2004 ca. 77 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen dar (IPCC 2007). Nachfolgend ist in Abbildung 2-2 die Entwicklung der Konzentration von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) in der Luft dargestellt.

Abbildung 2-2: Trends der wichtigsten Treibhausgaskonzentrationen in der Luft


Quelle: IPCC (2007)

Wie aus Abbildung 2-2 ersichtlich ist, verläuft die Konzentration von Treibhausgasen in der Luft bis ca. 1750 auf einem relativ konstanten Niveau. Seit Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts hat der Kohlendioxid-Gehalt der Luft bis zum Jahr 2005 um 35 % von ca. 280 ppm auf 379 ppm zugenommen. Der Anstieg der CO₂-Konzentration ist hauptsächlich auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführen (IPCC 2007). Weitere Quellen sind Emissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen, wie z. B. durch Rodungen (HOUGHTON 2003). Die heutigen Konzentrationen von Kohlendioxid und Methan in der Atmosphäre stellen den höchsten Wert in den vergangenen 420.000 Jahren dar (PETIT et al. 1999).

2.1.2 Klimaprojektionen

Das globale Klima wird sich auch in Zukunft verändern, wobei das Ausmaß der Änderung unter anderem von der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen abhängig ist. Die SRES-Emissionsszenarien (SRES: Second Report on Emission Scenarios) werden in die vier Hauptfamilien A1, A2, B1 und B2 unterteilt. Ihnen liegen jeweils unterschiedliche Annahmen über die Entwicklung der Weltbevölkerung, den Ressourcenverbrauch, den technologischen Fortschritt und der ökonomischen, sozialen sowie politischen Entwicklung zu Grunde (IPCC 2007). Je nach verwendetem Emissionsszenario wird erwartet, dass sich die untere Atmosphäre bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im günstigsten Szenario (B1) um ca. 1,8 °C (1,1 bis 2,9 °C) und um ca. 4,0 °C (2,4 bis 6,4 °C) im ungünstigsten Szenario (A1FI) erwärmt. Die stärkste Erwärmung findet dabei

in den hohen nördlichen Breiten statt (IPCC 2007). Prognosen für den Niederschlag ergeben, dass der Niederschlag in höheren Breiten sehr wahrscheinlich zunehmen wird, während es in den Tropen und Subtropen (einschließlich der Mittelmeerregion) wahrscheinlich zu einer Verminderung des Niederschlags kommen wird (IPCC 2007).

Diese Daten sind mit globalen Klimamodellen simuliert worden. Sie liefern bei räumlichen Auflösungen in der Größenordnung von 10^2 km belastbare Aussagen über die großskaligen Prozesse in der Atmosphäre (MARX et al. 2008). Klimamodelle sind meist gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle, die Prozesse und Komponenten des Klimas in Form mathematischer Gleichungen berechnen. Solche Modelle werden als General Circulation Models (GCMs) bezeichnet (UBA 2005). Die Klimakomponenten, die miteinander in stetigen Wechselbeziehungen stehen, sind Atmosphäre (Luft), Hydrosphäre (Wasser), Kryptosphäre (Schnee und Eis), Lithosphäre (Erdkruste), Pedosphäre (Boden) sowie die Biosphäre (Flora und Fauna) (CUBASCH und FAST 2007).

Globale Klimamodelle führen auf der regionalen Ebene zu unbefriedigenden Ergebnissen, da lokale Effekte und regionale Besonderheiten, die beispielsweise durch die Höhenlage oder infolge von Luv- und Leeeffekten von Gebirgen auftreten, mit dem relativ groben Modellgitter der globalen Modelle nicht exakt dargestellt werden können (MARX et al. 2008). Daher müssen Regionalisierungsverfahren angewandt werden, um genauere Aussagen über das künftige Klima in einzelnen Regionen treffen zu können. Dieses so genannte Downscaling kann dynamisch bzw. statistisch erfolgen (PAVLIK et al. 2012). Das dynamische Downscaling beruht auf einer physikalischen Berechnung der Wettervorgänge. Die Randdaten des globalen Modells werden als Datenbasis für ein höher aufgelöstes regionales Modell verwendet. Die Ergebnisse erhält man also durch dynamische Weiterrechnung und Einfügen des feiner aufgelösten regionalen in das globale Klimamodell. Beim statistischen Downscaling hingegen werden zusätzliche Informationen über die jeweilige höher aufzulösende Region mit einbezogen. Die Daten des regionalen Klimamodells erhält man bei dieser Variante durch statistische Berechnungen (vgl. MARX et al. 2008). Beide Methoden des Downscalings haben Vor- und Nachteile. Ein Vorteil von dynamischen Modellierungen ist, dass auch komplexe Wetterphänomene (z. B. Extreme, Wind) dargestellt werden können. Nachteilig ist, dass die Modelle schwerer zu kalibrieren sind und hohe Anforderungen an die Rechnerleistung stellen. Statistische Verfahren sind im Vergleich relativ robust und wenig rechenaufwändig. Probleme können hier auftreten, wenn Fehler und Unsicherheiten aus den GCMs übernommen werden (UBA 2005).

2.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion

Der Pflanzenbau bzw. der sich daran anschließende gesamte Agrarsektor gehört wegen seiner unmittelbaren Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen zu einem der sensibelsten Bereiche, die durch den Klimawandel betroffen sind. Im Folgenden

wird zunächst beschrieben, wie sich die pflanzenbaulich relevanten Wachstumsfaktoren Temperatur, Niederschlag und CO₂-Konzentration im mitteleuropäischen Raum im Zuge des Klimawandels verändern und welche Effekte daraus für die pflanzliche Produktion hinsichtlich des Ertragspotentials und des Ertragsrisikos resultieren.

2.2.1 Änderung von pflanzenbaulich relevanten Wachstumsfaktoren

Temperatur

Der mittlere Temperaturanstieg betrug in Europa im Zeitraum von 1970 bis 1999 ca. 0,2 °C pro Dekade und es wird eine weitere Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperatur in Höhe von 0,1 °C bis 0,4 °C pro Dekade prognostiziert (HULME und CARTER 1999), wobei die Temperaturerhöhung in Nordeuropa größer ausfallen wird als in Südeuropa (WEIGEL 2005). Prognosen deuten zudem auf ein häufigeres Auftreten von Hitzeereignissen hin (UBA 2005, CHARPENTIER 2011).

Die Temperatur stellt für das Pflanzenwachstum einen entscheidenden Faktor dar, da viele physiologische Prozesse innerhalb der Pflanze von der Temperatur beeinflusst werden (ALEXANDROV et al. 2002). Je nach Pflanzentypus liegt das Temperaturoptimum für die Photosynthese in einem anderen Bereich. Das bedeutet, eine Temperaturerhöhung unterhalb des jeweiligen Optimums der Pflanze hat einen positiven Einfluss auf das Pflanzenwachstum, oberhalb des Optimums sind hingegen negative Effekte zu erwarten (SCHALLER und WEIGEL 2007), zumal mit steigender Temperatur die Atmungsverluste zunehmen. Grundsätzlich können Kulturpflanzen in C3- und C4-Pflanzen unterschieden werden. C3-Pflanzen, wie z. B. Weizen, haben ein geringeres Temperaturoptimum für die Photosynthese als wärmeliebende C4-Pflanzen, wie z. B. Mais. Für Weizen liegt das Temperaturoptimum beispielsweise bei 17 bis 23 °C, bei Mais hingegen bei 25 bis 30 °C. Ausschlaggebend ist zusätzlich das Entwicklungsstadium beziehungsweise die Wachstumsphase, in dem sich die Pflanze gerade befindet, wenn höhere Temperaturen auf sie einwirken (WEIGEL 2005).

Pflanzen, die nicht durch Temperatursummen determiniert sind und mit Wachstum reagieren, solange die Temperaturen dazu ausreichend sind (z. B. Zuckerrüben, Grünland), werden positiv von einer Temperaturerhöhung beeinflusst, da sich durch eine Temperaturerhöhung auch die Vegetationsperiode verlängert. Eine Temperaturerhöhung von 2 °C verlängert die Vegetationsperiode um ca. zwei Wochen (KREITMAYR und MAYR 2007). Bei Getreidearten, die durch Wärmesummen und festgelegte Reife- und Entwicklungsstadien determiniert sind (z. B. Weizen, Gerste) führen höhere Temperaturen eher zu Leistungseinbußen, da Entwicklungsstadien schneller durchlaufen werden. Beispielsweise verkürzt eine Erhöhung der Umgebungstemperatur um 0,5 °C die Wachstumsdauer von Winterweizen in Österreich um zwei bis drei Tage und eine Erhöhung um 2 °C um elf bis zwölf Tage (ALEXANDROV et al. 2002). Die Dauer der Reifungs- und Kornfüllungsphase wird somit direkt durch die Temperatur begrenzt, was potentielle Ertragseinbußen zur Folge hat (SCHALLER und WEIGEL 2007).

Niederschlag

Im Zuge des Klimawandels zeigen nicht nur die Temperaturen eine Änderung, auch die Niederschlagsmengen und die Niederschlagshäufigkeiten weichen vom bisherigen Muster ab. Für Nordeuropa wird ein Anstieg der jährlichen Niederschlagsmenge von 1 bis 2 % pro Dekade prognostiziert, bei unklaren Änderungen in Mitteleuropa und einem möglichen Rückgang von 1 % pro Dekade in Südeuropa (HULME und CARTER 1999). Saisonal gesehen haben die ohnehin niederschlagsreichen Länder Mittel- und Nordeuropas im Winter eine Steigerung der Niederschläge zu erwarten, während das eher niederschlagsarme Südeuropa mit einem Rückgang rechnen kann. Im Sommer nimmt der Niederschlag vor allem in Süd- aber auch in Mitteleuropa ab, während es in Nordeuropa etwas feuchter wird (vgl. HULME und CARTER 1999, ROECKNER et al. 2006). Allgemein wird für Europa mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von intensiven Niederschlagsereignissen und einem erhöhten Risiko für anhaltende Trocken- und Hitzeperioden im Sommer gerechnet (MEEHL und TEBALDI 2004, UBA 2005, BENISTON et al. 2007, MÄDER 2009).

Auf die Pflanzen kann sowohl ein Mangel als auch ein Überschuss an Wasser schädigend wirken. Bei Wassermangel wird durch das Schließen der Stomata auch der Gasaustausch von CO₂ für die Photosynthese beeinträchtigt, so dass es zu einer Einschränkung des Wachstums und damit zur Minderung der Ertragsleistung kommt. Auch zur Keimung wird ein ausreichender Wassergehalt im Boden benötigt. Zu hohe Niederschläge können durch Luftmangel im Boden negative Folgen für das Pflanzenwachstum bedeuten. Zudem können notwendige Bewirtschaftungsmaßnahmen durch schlechte Befahrbarkeit verzögert werden. Darüber hinaus können hohe und intensive Niederschläge insbesondere bei fehlender Bodenbedeckung Bodenerosion und Nährstoffauswaschung zur Folge haben, die kurz- und langfristig die Nährstoffversorgung der Pflanzen und die Bodenfruchtbarkeit mindern. Wie auch bei der Temperatur, spielt die Jahreszeit und das jeweilige Reifestadium der Pflanzen eine entscheidende Rolle hinsichtlich ihrer Bedürfnisse an den Wachstumsfaktor Wasser (SCHALLER und WEIGEL 2007). Viele Getreidearten reagieren während der Blüte, Bestäubung und Kornentwicklung besonders empfindlich auf Wasserstress.

Anstieg des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre

CO₂ steht in einem engen Zusammenhang mit dem Wachstum der Pflanzen, da daraus Zucker und andere organische Bausteine aufgebaut werden. Eine Erhöhung des atmosphärischen CO₂-Gehalts führt somit zu einem verstärkten Pflanzenwachstum (IDSO et al. 2000, STAFFORD 2007, AINSWORTH und Mc GRATH 2011) und es wird vom so genannten CO₂-Düngeeffekt gesprochen. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird ein CO₂-Gehalt der Atmosphäre von ca. 550 ppm prognostiziert (STAFFORD 2007). Hinsichtlich der Wirksamkeit des CO₂-Düngeeffekts muss allerdings zwischen C3- und C4-Pflanzen unter-

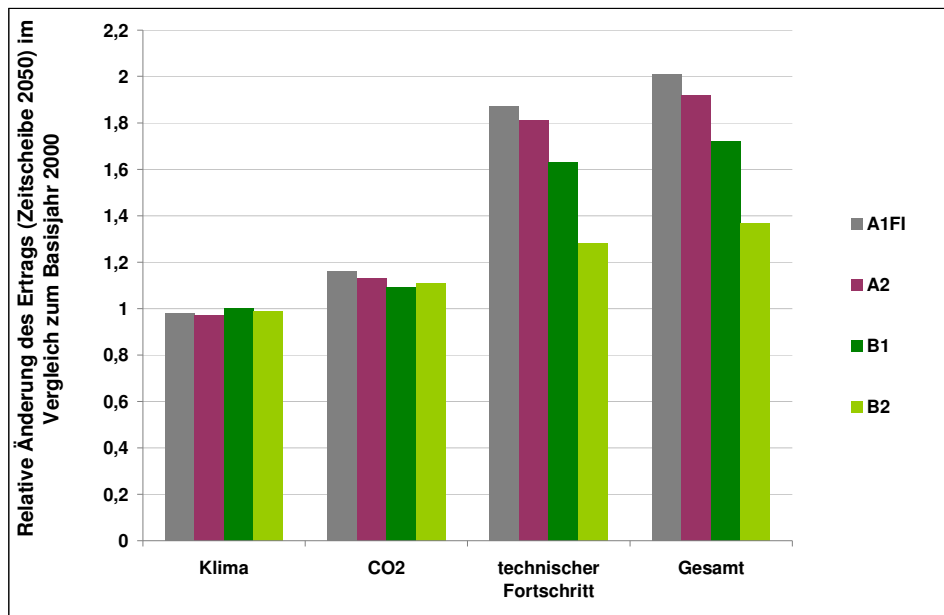
schieden werden. In FACE-Experimenten (FACE: Free Air Carbon Dioxide Enrichment), bei denen Pflanzen auf der freien Ackerfläche in einer veränderten Atmosphäre wachsen, wurde vor allem bei C3-Pflanzen eine erhöhte Biomasseproduktion festgestellt. Bei C4-Pflanzen ist dieser Effekt nur gering ausgeprägt, da diese Pflanzen ohnehin über ein effektiveres Photosynthesesystem als C3-Pflanzen verfügen (WEIGEL 2005, AINSWORTH und MC GRATH 2011). Es gibt jedoch auch Hinweise, dass die erhöhte Biomasseproduktion mit einer veränderten chemischen Zusammensetzung der Pflanzen einhergeht und insbesondere der Proteingehalt abnimmt (WEIGEL 2005, STAFFORD 2007, AINSWORTH und MC GRATH 2011).

Neben der bereits beschriebenen Ertragssteigerung durch den CO₂-Düngeeffekt führt eine Erhöhung des CO₂-Gehalts der Luft auch dazu, dass die Stomata der Pflanzen kürzer geöffnet sein müssen, um die für die Photosynthese notwendige CO₂-Menge aufzunehmen. Folglich sinkt die Transpiration, wodurch die Wassernutzungseffizienz der Pflanzen erhöht und Trockenstress gemildert wird (FANGMEIER und JÄGER 2001, WEIGEL 2005).

2.2.2 Änderung des Ertragspotentials

Durch die beschriebenen prognostizierten klimatischen Veränderungen und den Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre sind für den europäischen Raum (mit großen regionalen Schwankungen) leicht positive Ertragseffekte zu erwarten (ALCAMO et al. 2007, TRNKA et al. 2011). Erhöht sich die Temperatur jedoch um mehr als 2 °C, was in mehreren Klimaprojektionen bis 2050 der Fall ist, dann führt dies zu einem Ertragsrückgang bei einer Vielzahl von Kulturen (TRNKA et al. 2011). Für die Zeitscheibe um 2050 werden durch den CO₂-Effekt in Kombination mit veränderten klimatischen Bedingungen Steigerungen der Weizenerträge in Höhe von 9 bis 14 % geschätzt. Diese Ertragssimulationen stellen aggregierte Ergebnisse für die EU-15-Länder (plus Norwegen und Schweiz) dar. Allerdings gibt es große regionale Unterschiede in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels. Die prognostizierten Veränderungen der klimatischen Bedingungen führen zu hohen Ertragseinbußen in Südeuropa, wohingegen in Nordeuropa aufgrund einer verlängerten Vegetationsperiode und der Ausdehnung der potenziellen landwirtschaftlichen Nutzfläche Ertragssteigerungen resultieren. Die Ertragssteigerungen sind vor allem auf den CO₂-Effekt zurückzuführen, während die klimatischen Veränderungen kaum zu Ertragsänderungen führen (0 bis -3 %) (EWERT et al. 2005). Wie Abbildung 2-3 illustriert, wird jedoch erwartet, dass der technologische Fortschritt diese beiden Faktoren bei weitem überwiegt und zu Ertragssteigerungen bei Weizen in Höhe von 28 bis 87 % führt (EWERT et al. 2005). Es ist jedoch anzumerken, dass der Einfluss des technologischen Fortschritts in dieser Studie auf Grundlage von historischen Ertragstrends modelliert wurde. Es muss sich daher erst zeigen, ob der technologische Fortschritt auch zukünftig im selben Maß realisiert werden kann.

Abbildung 2-3: Geschätzte relative Ertragsänderungen aufgrund klimatischer Veränderungen



Anmerkung: Die Schätzungen auf Grundlage der IPCC-Emissionsszenarien A1FI, A2, B1 sowie B2 beziehen sich auf die Kultur Weizen.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von EWERT et al. (2005)

ALEXANDROV et al. (2002) kommen zu ähnlichen Ergebnissen für den Nordosten von Österreich. Sie zeigen für Weizen und Sojabohnen steigende Erträge, falls neben den klimatischen Veränderungen auch der direkte CO₂-Effekt berücksichtigt wird. Hinsichtlich des technologischen Fortschritts zeigt die historische Entwicklung der Erträge für Mitteleuropa jedoch auch, dass die bislang beobachteten Ertragsteigerungen bei vielen Kulturen in den letzten 10 Jahren eher stagnieren (FAOSTAT 2008). Eine Zunahme der Erträge aufgrund der klimatischen Veränderungen wird nur in Nordeuropa erwartet. Die Anbaugrenzen für manche Feldfrüchte, die auf wärmere Klimate angewiesen sind, wie z. B. Mais oder Sonnenblumen, werden sich nach Norden bzw. in höhere Lagen verschieben, wodurch die Anbauflächen zunehmen und der Anbau von neuen Kulturen und Arten möglich wird. Für Europa wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einer Ausdehnung der potenziell geeigneten Anbaufläche für Körnermais von 39 bis 47 % je nach zugrunde gelegtem Emissionsszenario gerechnet (HILDÉN et al. 2005, OLESEN et al. 2007). Hierbei ist allerdings auch die Wechselwirkung mit bestimmten Schadorganismen, wie z. B. dem Westlichen Maiswurzelbohrer zu berücksichtigen, da infolge der Klimaerwärmung wärmeliebende Arten begünstigt werden und durch die Zunahme der globalen Warenströme auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von weiteren invasiven Arten zunehmen wird. Pro 1 °C Erwärmung wird eine Verfrühung des Vegetationsbeginns um ca. eine Woche prognostiziert (SCHALLER und WEIGEL 2007). Für Südeuropa hingegen werden deutliche Ertragsminderungen prognostiziert (OLESEN und BINDI

2002, MARACCHI et al. 2005), was vor allem auf abnehmende Wasserverfügbarkeit, Hitzestress und eine verkürzte Kornfüllungsphase bei Getreide zurückzuführen ist (MARACCHI et al. 2005).

2.2.3 Änderung des Ertragsrisikos

Die prognostizierten saisonalen Änderungen in der Niederschlagsverteilung und die Zunahme von Extremwetterereignissen wirken den positiven Ertragseffekten entgegen. Falls Wassermangel auftritt, wird dies am stärksten hemmend auf das Pflanzenwachstum wirken (WEIGEL 2005). Folgen sind niedrigere Erträge, eine höhere Ertragsvariabilität und eine Abnahme der geeigneten Nutzfläche für traditionelle landwirtschaftliche Kulturen (OLESEN und BINDI 2002). GANDORFER und KERSEBAUM (2009) zeigen, dass in Bayern bei Annahme eines trockenen Klimaszenarios zukünftig mit einem steigenden Produktionsrisiko bzw. sinkenden Erträgen und Deckungsbeiträgen in der Weizenproduktion gerechnet werden muss.

Das größte Ertragsrisiko stellen Extremwetterereignisse, wie z. B. Hitzewellen und Trockenperioden dar, die zukünftig häufiger und intensiver auftreten werden und in einigen Teilen Europas zu einer erhöhten Ertragsvariabilität führen werden (MEEHL und TEBALDI 2004, UBA 2005, BENISTON et al. 2007, TRNKA et al. 2011). Die prognostizierte Zunahme von Extremwetterereignissen führt unter mitteleuropäischen Verhältnissen beispielsweise zu einer um 50 % höheren interannuellen Ertragsvariabilität bei Zuckerrüben. Zudem werden nach Modellsimulationen die Ernteverluste bei Zuckerrüben durch Trockenheit von 7 % (1961 bis 1990) auf 18 % (2021 bis 2050) ansteigen (JONES et al. 2003). Untersuchungen des Weizenenertrags für England und Wales haben bis Mitte des Jahrhunderts eine um 10 % höhere Wahrscheinlichkeit von dürrebedingten Ertragsminderungen ergeben, die mehr als 25 % des potenziellen Ertrags erreichen können (RICHTER und SEMENOV 2005).

Bei der Beurteilung des Ertragsrisikos müssen auch indirekte Wirkungen des Klimawandels berücksichtigt werden. Neben direkten Wirkungen auf die Pflanzen kann die Änderung pflanzenbaulich relevanter Wachstumsfaktoren auch indirekte Auswirkungen durch Beeinflussung der die Pflanze umgebenden Umwelt haben. Beispielsweise lassen sich hier Bodeneigenschaften oder der Einfluss von Pflanzenkrankheiten und Konkurrenzpflanzen anführen. Da der pflanzenphysiologische Mechanismus zu verstärkter Biomassebildung nicht nur für vom Menschen erwünschte Kulturpflanzen gilt, profitieren Ackerbeipflanzen gleichermaßen von einer erhöhten CO₂-Konzentration. Der Druck durch Ungräser und Unkräuter des C3-Typs wird daher eher zunehmen. Durch mildere Wintertemperaturen werden auch manche Pflanzenkrankheiten, wie z. B. echter Mehltau oder Rhizomania begünstigt, woraus ein erhöhter Krankheitsdruck resultiert. Bestimmte Pilzkrankheiten werden durch trockenere und heißere Sommer hingegen tendenziell reduziert (WEIGEL 2005).

2.3 Betriebliche Strategien zur Anpassung an den Klimawandel¹

Die bisherigen Ausführungen machen deutlich, dass die prognostizierten Veränderungen pflanzenbaulich relevanter Wachstumsfaktoren sowohl das Ertragspotential als auch das Ertragsrisiko beeinflussen. Auf der Ebene von Marktfruchtbaubetrieben gibt es eine Vielzahl verschiedener Handlungsmöglichkeiten, um darauf zu reagieren. Dabei kommt in Zukunft vor allem Instrumenten zum Risikomanagement eine sehr hohe Bedeutung zu. Denn neben den steigenden Ertragsrisiken durch den Klimawandel entstehen aufgrund der zunehmenden Spezialisierung und des Wachstums landwirtschaftlicher Betriebe sowie weiterer Globalisierung und Liberalisierung der Agrarmärkte zusätzliche Risiken für die Betriebe, während die Risikotragfähigkeit der Betriebe abnimmt. Anpassungsmöglichkeiten von Marktfruchtbaubetrieben lassen sich in die vier Kategorien „Produktionstechnik“, „Organisatorische Gestaltung“, „Verbesserung der nachträglichen Anpassungsfähigkeit“ und „Preis- und Mengenabsicherung“ unterteilen. Innerhalb dieser Kategorien sind verschiedene Strategien vorstellbar, die nachfolgend in Tabelle 2-1 dargestellt sind.

¹ Anmerkung: Kapitel 2.3 entspricht im Wesentlichen einem Buchkapitel, bei dem der Verfasser dieser Arbeit Erstautor ist (siehe Gröbmaier, J., M. Gandorfer, A. Heißenhuber. 2009. Handlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung des durch den Klimawandel induzierten Risikos in der Landwirtschaft. In: Eitzinger, J., K. C. Kersebaum, H. Formayer. Landwirtschaft im Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Verlag Agrimedia. Bergen/Dumme.).

Tabelle 2-1: Anpassungsmöglichkeiten von Marktfruchtbaubetrieben an den Klimawandel

Kategorie	Teilbereich	Strategie
Produktionstechnik		<ul style="list-style-type: none"> • Bodenbearbeitung • Bestandesführung • Bewässerung
Organisatorische Gestaltung	Innerbetrieblich	<ul style="list-style-type: none"> • Diversifizierung • Wahl risikoarmer Prozesse • Überkapazitäten
	Intertemporär	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Liquiditätsreserven • Risikoausgleichsrücklage
Verbesserung der nachträglichen Anpassungsfähigkeit		<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring • Managementpläne • Prozesssteuerung / Precision Farming
Preis- und Mengenabsicherung	Terminkontrakte und Optionen	<ul style="list-style-type: none"> • Warenterminbörsen • Wetterderivate
	Vermarktungstechniken	<ul style="list-style-type: none"> • Liefervertrag • Lagerhaltung
	Ernteversicherungen	<ul style="list-style-type: none"> • Ertragsgarantieversicherungen • Ertragsverlustversicherungen • indexbasierte Versicherungen

Quelle: Eigene Darstellung nach HANF (1991)

Bei der Charakterisierung der Anpassungsmöglichkeiten kann eine Einteilung entweder auf Basis der Intention bzw. auf Grundlage des Ausmaßes der Maßnahmen erfolgen.

Intention der Anpassung

Anpassungsmaßnahmen können spontane Maßnahmen im laufenden Betriebsmanagement sein, um kurzfristig auf Änderungen zu reagieren. Die Maßnahmen können aber auch vor dem Hintergrund von zu erwartenden klimatischen Risiken strategisch geplant sein. In einer Volkswirtschaft sind Anpassungsmaßnahmen im öffentlichen Sektor normalerweise bewusst geplant, wie z. B. bestimmte Regierungsprogramme. So ist beispielsweise in Spanien seit nahezu neunzig Jahren ein staatlich gefördertes Agrarversicherungssystem installiert (Fock et al. 2008a). Im privaten Sektor können die Maßnahmen geplant sein, sie finden aber oft auch spontan statt bzw. sie sind eine Kombination dieser beiden Ebenen. So ist zum Beispiel die Entscheidung eines Acker-

bauern, eine Getreidesorte über die Jahre mit einer anderen zu ersetzen, die besser an die klimatischen Bedingungen angepasst ist, sowohl spontan als auch bewusst geplant (SMIT und SKINNER 2002).

Zeitliches Ausmaß der Anpassung

Zeitlich betrachtet kann bei der Anpassung zwischen vorausschauenden, fortwährenden und reaktiven Maßnahmen unterschieden werden. Hinsichtlich der Dauer der Anpassung ist der zeitliche Rahmen entscheidend, in der die Anpassung stattfindet. Es gibt taktische Maßnahmen, die kurzfristig stattfinden und strategische Maßnahmen, die langfristig ausgelegt sind. In der Landwirtschaft könnten taktische Maßnahmen Anpassungen innerhalb einer Vegetationsperiode bedeuten, um z. B. kurzfristig auf eine Dürreperiode zu reagieren. Dazu gehört beispielsweise, dass ein Landwirt Futter zukaft bzw. Vieh verkauft oder auch einen Bankkredit aufnimmt. Strategische Maßnahmen bedeuten hingegen strukturelle Veränderungen im landwirtschaftlichen Betrieb oder Änderungen im Betriebsmanagement, die über eine Vegetationsperiode hinausgehen. Eine solche Maßnahme könnte beispielsweise eine veränderte Fruchtfolge sein (SMIT und SKINNER 2002).

2.3.1 Anpassung im Rahmen der Produktionstechnik

Im Rahmen der Produktionstechnik kann eine Anpassung an klimatische Veränderungen, speziell an erhöhte Trockenheit, bereits mit der Bodenbearbeitung beginnen. So wird beispielsweise häufig eine reduzierte bzw. konservierende Bodenbearbeitung als Anpassungsmaßnahme empfohlen, da diese die Evaporation reduziert und mehr Wasser in den Böden verbleibt, was sich auf entsprechenden Standorten letztlich ertragsstabilisierend auswirkt. Auch die Wasserspeicherkapazität der Böden wird dadurch erhöht, da mehr Humus aufgebaut wird. Zudem kann Erosion eingedämmt werden (vgl. REILLY und SCHIMMELPFENNIG 1999). Aus ökonomischer Sicht führt eine reduzierte Bodenbearbeitung zu Kostenvorteilen aufgrund geringerer fixer Kosten für die Mechanisierung sowie geringerer variabler Kosten bezüglich des Kraftstoff- sowie des Arbeitszeitbedarfs. Allerdings ist unter bestimmten Standortbedingungen mit niedrigeren Erträgen zu rechnen. Teilweise sind auch deutlich höhere Aufwendungen für den Pflanzenschutz erforderlich.

Durch eine Erhöhung des Humusgehalts, auch in Verbindung mit einer möglichst permanenten Bodenbedeckung unter Mulch oder Pflanzen können die Auswirkungen von Wetterextremen abgemildert werden. So kann Regen den Boden weniger stark abtragen bzw. Hitze ihn weniger stark austrocknen. Dies lässt sich neben einer reduzierten Bodenbearbeitung auch mit Methoden der ökologischen Landwirtschaft erreichen. Nach PIMENTEL et al. (2005) lassen sich durch Technologien des ökologischen Landbaues höhere Humusgehalte und eine bessere Erhaltung der Bodenfeuchtigkeit erreichen,

was sich insbesondere bei Trockenheit vorteilhaft auswirkt. Bei einem seit 1981 am Rodale Institute in den USA durchgeführten Dauerversuch, wurden ökologische und konventionelle Landbewirtschaftungssysteme auf Basis einer Getreidefruchtfolge verglichen. Eine Untersuchung hat ergeben, dass nach 22 Jahren getrennter Bewirtschaftung der Bodenkohlenstoffgehalt (organische Substanz im Boden) sowohl beim ökologischen Anbauverfahren mit Tierhaltung als auch beim ökologischen Anbauverfahren mit Leguminosen signifikant höher war. Der Kohlenstoff im Boden erhöhte sich in diesem Zeitraum um 27,9 % (ökologische Bewirtschaftung mit Tierhaltung), 15,1 % (ökologische Bewirtschaftung mit Leguminosen) und 8,6 % (konventionelle Bewirtschaftung) (PIMENTEL et al. 2005).

Auch im Bereich der Sortenwahl und der Saattermine sind Anpassungen möglich. Der Anbau von robusten Sorten bzw. Arten ist eine Möglichkeit, das Ertragsrisiko zu reduzieren (vgl. SCHALLER und WEIGEL 2007). Sorten mit einer höheren Trockenresistenz und längerer Kornfüllungsphase erscheinen zukünftig z. B. in England und Wales von Vorteil zu sein (RICHTER und SEMENOV 2005). Änderungen innerhalb der Fruchtfolge ergeben sich aus dem verstärkten Anbau von Winterungen, die bei Vorsommertrockenheit eine effizientere Wasserausnutzung ermöglichen. Durch die Verringerung von Bracheflächen im Winter wird dadurch gleichzeitig das Erosionsrisiko reduziert (SCHALLER und WEIGEL 2007). Verschiedene Autoren berichten auch von einer Anpassung der Saattermine (OLESEN et al. 2007, FINGER und SCHMID 2008), die auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft ist. Auch TORRIANI et al. (2007) zeigen, dass es zu einer Verfrühung des Saattermins für Mais kommen wird. Ändern sich Temperatur, Niederschlag und CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, so ist natürlich auch auf der Seite der Betriebsmittelinputs bei der Stickstoffdüngung eine Anpassung notwendig. Dies zeigen auch Studien von HOLDEN und BRERETON (2006) sowie von FINGER und SCHMID (2008). Die letztgenannten Autoren kommen zu dem Schluss, dass die prognostizierten Veränderungen zu einem sinkenden Stickstoffniveau bei Winterweizen und Mais in der Schweiz führen werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen HOLDEN und BRERETON (2006) für Kartoffeln und Gerste in Irland. Abnehmende Stickstoffniveaus führen direkt zu sinkenden variablen Kosten für die Stickstoffdüngung. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Stickstoffdüngerproduktion besonders energieintensiv ist. Somit muss aufgrund der sicherlich steigenden Energiekosten zukünftig auch mit höheren Kosten für den Stickstoffdünger gerechnet werden, wie auch schon die Entwicklung der letzten Jahre gezeigt hat.

An von Trockenheit gefährdeten Standorten wird zudem die künstliche Bewässerung, sofern die notwendigen Wasserressourcen dazu zur Verfügung stehen, als Anpassungsstrategie an die bevorstehenden klimatischen Veränderungen an Bedeutung gewinnen. FINGER und SCHMID (2008) zeigen, dass auch aus ökonomischer Sicht vor allem eine Bewässerung von Mais in der Schweiz zukünftig sinnvoll sein wird. Auch HOLDEN

und BRERETON (2006) zeigen für die Kartoffelproduktion in Irland zukünftig die ökonomische Notwendigkeit der Bewässerung auf.

2.3.2 Anpassung im Rahmen der organisatorischen Gestaltung

Eine Verringerung der Gewinnvarianz kann auch durch Änderung der Betriebsorganisation erfolgen. In einem Unternehmen, in dem mehrere Produktionsverfahren durchgeführt werden, ist es möglich, durch entsprechende Gestaltung dieser Prozesse das Risiko einer starken Schwankung der Zielgröße (Gewinn) zu vermindern. Eine Risikominde- rung bezüglich der Folgen des Klimawandels lässt sich hierbei im Wesentlichen durch zwei Strategien erreichen. Zum einen ist ein innerbetrieblicher Risikoausgleich durch eine entsprechende Gestaltung und Steuerung des Umfangs der einzelnen Betriebs- zweige (z. B. Marktfruchtbau und Veredlung) möglich. Zum anderen lässt sich auch das Risiko zwischen verschiedenen Produktionsperioden durch entsprechende Maßnah- men ausgleichen.

Innerbetrieblicher Risikoausgleich

Das Ziel beim innerbetrieblichen Risikoausgleich besteht darin, die verschiedenen Be- triebszweige durch eine Anpassung der Betriebsorganisation derart aufeinander abzu- stimmen, dass die Variabilität des Gewinns abnimmt. So ist es unwahrscheinlich, dass bei einer sehr vielfältigen bzw. diversifizierten Betriebsorganisation gleichzeitig alle den Gewinn bestimmenden Größen ungünstige Werte annehmen. Eine Diversifizierung ist auf verschiedenen Stufen möglich. Bereits der Anbau verschiedener Sorten einer Feldfrucht kann das Risiko reduzieren. Durch eine Erweiterung der Fruchtfolge werden sowohl das Mengen- als auch das Preisrisiko gestreut. So ist bei einer vielgliedrigen Fruchtfolge die Gefahr geringer, dass aufgrund ungünstiger Witterungsverhältnisse die gesamte Ernte gefährdet ist bzw. die Preise für sämtliche Feldfrüchte im gleichen Jahr niedrig sind. Auch der Schädlings- und Krankheitsdruck nimmt durch vielseitige Frucht- folgen ab. Eine betriebliche Diversifizierung durch mehrere Betriebszweige hat ebenso eine Tendenz zum Risikoausgleich. Als letzte Stufe kann auch eine Einkommensdiversi- fizierung erfolgen, bei der es das Ziel ist, die Anzahl der Einkommensquellen, z. B. durch außerlandwirtschaftliche Aktivitäten, zu erhöhen. Bei der Diversifizierung ist vor allem eine Kombination von Verfahren mit einer negativen Korrelation der gewinn- wirksamen Komponenten wichtig. Dadurch können witterungsbedingte Risiken ausge- glichen werden. Zum Beispiel geht mit einer Hitze- und Trockenperiode auch viel Son- nenschein einher, der sich beispielsweise positiv auf den Stromertrag einer Photovolta- ikanlage auswirkt. Generell lässt sich festhalten, dass durch Diversifizierung das Risiko reduziert werden kann, es entstehen jedoch auch Kosten, da Degressionseffekte durch Spezialisierung entfallen (HANF 1991, BRADSHAW et al. 2004, HARDAKER et al. 2004a). Das bedeutet, dass vor allem diejenigen Landwirte diversifizieren, deren Grad der Risiko- aversion hoch ist.

Eine weitere Anpassungsmaßnahme im innerbetrieblichen Risikoausgleich lässt sich im Bereich der Verfahrenswahl bzw. der Verfahrensausgestaltung (Produktionsmanagement) treffen, indem risikoarme Prozesse bevorzugt werden (HANF 1991). Wie oben beschrieben, verringert sich die Evaporation durch konservierende Bodenbearbeitung und es bleibt mehr Wasser in den Böden, was sich auf entsprechenden Standorten letztlich ertragsstabilisierend auswirkt. Der Anbau hitze- und trockenheitstoleranter Sorten bzw. Arten ist eine weitere Möglichkeit das Risiko zu reduzieren (SCHALLER und WEIGEL 2007).

Eine Maßnahme, um die Flexibilität eines Betriebes zu erhöhen und sich an veränderte Bedingungen anzupassen, ist der Aufbau von Überkapazitäten. Dadurch erhöht sich der Handlungsspielraum für den Landwirt, falls unvorhersehbare Witterungsereignisse eintreten. Falls z. B. auf einem Milchviehbetrieb das Frischfutter aufgrund einer Dürre knapp wird, kann der Landwirt durch den Aufbau von Futterreserven in klimatisch günstigen Zeiten auf diesen Engpass reagieren und ist nicht gezwungen, den Viehbestand abzustocken (HARDAKER et al. 2004a). Aber auch im Bereich der Mechanisierung kann das Risiko durch Überkapazitäten (höhere Schlagkraft) gemindert werden (MÜßHOFF und HIRSCHAUER 2008). Bei einer Abnahme der Sommerniederschläge in Kombination mit höheren Temperaturen werden die Zeitfenster zur Durchführung von Pflanzenschutzmaßnahmen und Düngergaben kleiner. Davon werden die Terminkosten beeinflusst, die dann auftreten, wenn der Erlös einer Kultur dadurch geschmälert wird, weil landwirtschaftliche Arbeiten nicht zum optimalen Zeitpunkt durchgeführt werden können (vgl. HANF 1985). So gestaltet sich z. B. die Düngerausbringung schwieriger, da die Verfügbarkeit der Nährstoffe maßgeblich vom Wassergehalt der Böden abhängt. Somit ist bei trockenen Witterungsverhältnissen die Nährstoffaufnahme der Pflanzen geringer und die Terminkosten können sich erhöhen. Bei Trockenheit sinkt zudem die Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln und es kann zu Wirkstoffverlusten durch Verdunstung kommen (WEIGAND und TISCHNER 2007). Wenn die Zeitfenster für Düngung und Pflanzenschutz kleiner werden, kann mit einer schlagkräftigeren Mechanisierung reagiert werden, wodurch allerdings die Maschinenkosten steigen.

Intertemporärer Risikoausgleich

Beim intertemporären Risikoausgleich ist es das Ziel, Reserven zu schaffen, um unvorhersehbare Ereignisse wie Ertragseinbußen oder -ausfälle aufgrund ungünstiger Witterungsverhältnisse abpuffern zu können. Eine in landwirtschaftlichen Betrieben absolut notwendige Risikominderungsstrategie ist hierbei der Aufbau von Liquiditätsreserven. Dies ist nicht nur durch neue Risiken aufgrund klimatischer Veränderungen notwendig, sondern sollte Bestandteil jedes unternehmerischen Denkens sein. Die Liquiditätsreserven sollten in jedem Fall hoch genug sein, um die finanziellen Verpflichtungen in der jeweiligen Periode bedienen zu können. Darüber hinaus ist es dann notwendig, ent-

sprechende Reserven zu bilden, falls witterungsbedingt Einnahmen ausbleiben (STEFFEN und BORN 1987, HANF 1991).

In diesem Zusammenhang spricht sich der Deutsche Bauernverband (DBV) für eine Risikoausgleichsrücklage in der Landwirtschaft aus. Hierbei handelt es sich um eine steuerbegünstigte Gewinnrücklage, womit Naturkatastrophen sowie Marktkrisen abgepuffert werden sollen. Bisher führt die schwankende Ertragsituation zu hoher Steuerzahlung und damit zu einem starken Liquiditätsabfluss in guten Jahren. In schlechten Jahren hingegen fehlt dann diese Liquidität, da sie nicht vorsorgend für den Risikofall zurückgelegt werden kann. Deshalb fordert der DBV, dass Betriebe zum Ausgleich von schwankenden Erträgen und Preisen eine Rücklage bilden können und dadurch in guten Jahren Kapital zur Risikovorsorge ansparen. Diese zum Ausgleich künftiger Risiken angesparten Mittel sollen sowohl unmittelbar bei Eintritt des Risikos als auch vorbeugend zur Stabilisierung der Betriebe genutzt werden können (DBV 2008). Aktuelle Untersuchungen ermittelten einen steuerentlastenden Effekt, den die Einführung einer Risikoausgleichsrücklage für landwirtschaftliche Betriebe im Ertragssteuerrecht bewirken könnte. Demnach führt der Glättungseffekt dieses Instruments zu einer im Durchschnitt moderaten steuerlichen Entlastung für landwirtschaftliche Betriebe, die aber betriebsindividuell sehr unterschiedlich ausfallen kann (BLANCK und BAHRS 2011).

2.3.3 Anpassung durch Verbesserung der nachträglichen Anpassungsfähigkeit

Neben den Maßnahmen, die ergriffen werden können, um das Risiko durch den Klimawandel zu verringern, ist es auch notwendig, die nachträgliche Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Umweltbedingungen sicherzustellen. Dabei gibt es mehrere Maßnahmen, die im Vorfeld ergriffen werden können. Zum einen sollte ein Monitoring der Abläufe und Prozesse im Betrieb stattfinden. Daraufhin können Managementpläne erstellt werden, um eine effektive Anpassung zu gewährleisten. Solche Managementpläne sollten Handlungsanweisungen für die prognostizierten klimatischen Veränderungen und deren Folgen für den jeweiligen Betrieb beinhalten. Dadurch lässt sich der Anpassungszeitraum verkürzen und letztlich lassen sich dadurch Verluste durch zeitweise suboptimales Handeln verringern (HANF 1991, SCHALLER und WEIGEL 2007).

Im Rahmen der Prozessteuerung kann eine Anpassung an bestimmte Auswirkungen des Klimawandels sogar noch während des Produktionsprozesses erfolgen. Durch bestimmte Precision Farming-Technologien erhält der Landwirt beispielsweise mehr und bessere Informationen über den Pflanzenbestand und damit eine bessere Kontrolle über das Pflanzenwachstum. Durch automatisierte Messungen lassen sich Maßnahmen in der Bestandesführung standort- und wachstumsangepasst durchführen. Ebenso lassen sich aus den mit Hilfe von Sensoren gewonnenen Daten frühzeitig Abschätzungen zu den Erntemengen treffen, wodurch andere Instrumente, wie z. B. eine Preisabsicherung an der Warenterminbörse effektiver genutzt werden können. Feldversuche in den USA haben gezeigt, dass sich die Ertragsvariabilität und die Wahr-

scheinlichkeit niedriger Erträge über die Jahre mit Hilfe von Precision Farming-Technologien verringern lassen und somit risikoreduzierende Effekte eintreten können. Nicht unerwähnt bleiben sollte allerdings, dass durch die Investition in Precision Farming-Technologien das finanzielle Risiko erhöht wird. Auch das Risiko von Totalausfällen der Ernte durch extreme Witterungsbedingungen kann nicht gemindert werden. Es sollte daher eine genaue Abwägung zwischen Nutzen und Kosten dieser Maßnahme erfolgen (LOWENBERG-DEBOER 1999).

2.3.4 Anpassung durch Preis- und Mengenabsicherung

Terminkontrakte und Optionen

Ein Instrument des Risikomanagements ist die Preisabsicherung der erzeugten landwirtschaftlichen Produkte an Warenterminbörsen. Die Preisschwankungen können dadurch zur Sicherung der Liquidität reduziert werden. Voraussetzung ist dabei eine ständige Beobachtung des Marktes durch den Landwirt, um Unterschiede zwischen dem Börsenkurs und dem jeweiligen vom Abnehmer vor Ort bezahlten Preis zu erkennen und daraufhin seine Entscheidung für eine Absicherung des Preises an der Warenterminbörse zu treffen. Bei der Preisabsicherung an Warenterminbörsen sind mehrere Strategien denkbar. Abhängig von der Risikoeinstellung des Landwirtes, der betrieblichen Situation sowie der Einschätzung der zukünftigen Marktentwicklung kann beispielsweise eine routinemäßige Vollabsicherung, bei der zwei Drittel einer Durchschnittsernte preislich fixiert werden, vorgenommen werden. Hierdurch können Deckungsbeitragsschwankungen deutlich gemindert werden. Darüber hinaus ergibt sich eine frühzeitige Planungssicherheit. Eine Split-Strategie verringert das Risiko, die Ernte genau in einer Tiefpreisphase zu vermarkten. Eine typische Vorgehensweise ist dabei, ein Drittel der Ernte nach der Aussaat abzusichern, ein weiteres Drittel nachdem eine gute Entwicklung der Feldfrucht zu beobachten ist und das letzte Drittel, wenn sich der Ertrag mit einiger Sicherheit abschätzen lässt (STEFFIN 2008). Neben den beiden genannten Beispielen gibt es noch eine Vielzahl anderer Strategien, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher erläutert werden.

Wetterderivate sind eine neue Klasse von Instrumenten zur Absicherung von Wetterrisiken, die auf einem Witterungsindex wie z. B. Temperatur oder Niederschlag bzw. komplexeren Indizes basieren. Durch den Erwerb von Wetterderivaten kommt es zu einer Ausgleichszahlung im Falle ungünstiger Witterungsentwicklung. Das heißt, diese Art der Risikominderung ist nicht direkt auf die Kompensation von Ertragsverlusten, sondern allein auf den Verlauf der Witterung, die natürlich mit den Ertragsverlusten hoch korreliert sein sollte, bezogen. Dabei wird zunächst ein Strike-Level für den Wetterindex festgelegt, bei dessen Unter- bzw. Überschreitung eine Auszahlung erfolgt. Die Höhe der Auszahlung hängt dann von der Tick-Size, also dem vorher festgelegten Wert pro Indexeinheit ab (WEBER et al. 2008). Für den Landwirt treten zwei Unwägbarkeiten beim Einsatz von Wetterderivaten auf, nämlich das geografische Risiko sowie

das Basisrisiko. Das geografische Risiko bedeutet, dass bei zunehmender Entfernung zwischen dem Ort der Produktion und dem Ort der Messung des Wetterindex ein Restrisiko für den Landwirt resultiert, falls die Witterung an den beiden Orten unterschiedlich ist. Des Weiteren verbleibt dadurch, dass die Ertragsdaten im Normalfall nicht perfekt mit der jeweiligen Witterungsvariable korreliert sind, ein weiteres Restrisiko, nämlich das so genannte Basisrisiko beim Landwirt (MÜßHOFF et al. 2005). Wetterderivate werden in der Landwirtschaft noch kaum eingesetzt und es bedarf noch weiterer Forschung über die Einsatzmöglichkeiten und Wirkungen (vgl. MÜßHOFF et al. 2005, BIELZA et al. 2007, WEBER et al. 2008).

Auch PANNELL et al. (2008) stellen fest, dass Terminkontrakte oder andere Hedging-Instrumente von Landwirten nur in sehr geringem Umfang genutzt werden. Dies lässt sich den Autoren zufolge allerdings durchaus mit rationaler Entscheidungsfindung erklären. Entscheidungsmodelle über die optimale Absicherung zeigen, dass der Grad der Absicherung negativ mit dem Basisrisiko, der Höhe des Risikos und den Transaktionskosten korreliert. Landwirte, die weniger Unsicherheit über Preise haben und solche mit einem diversifizierten Portfolio, haben niedrigere optimale Absicherungsniveaus. Wenn ein Landwirt also optimistische Preiserwartungen in Bezug auf den Futures-Markt hat, kann der Anreiz zur Absicherung stark reduziert werden. Darüber hinaus ist der Nutzen einer Absicherung für Landwirte mit einer niedrigen Risikoaversion relativ gering (vgl. PANNELL et al. 2008).

Vermarktungstechniken

Eine weitere Möglichkeit zur Preisabsicherung ist der Liefervertrag, der zwischen Landwirt und Landhandel oder auch direkt, z. B. im Fall von Braugerste, mit einer Mälzerei oder Brauerei geschlossen wird. Bei einem Liefervertrag handelt es sich um ein zweiseitiges Geschäft mit einem konkreten Vertragspartner (MÜßHOFF und HIRSCHAUER 2008), bei dem Menge, Qualität und Liefermodalitäten geregelt sind. Der Vorteil für den Landwirt besteht in der Preissicherheit und beim Handel bzw. Verarbeiter in der Bezugssicherheit des Rohstoffes.

Auch die Lagerhaltung ist ein Mittel zur Risikominderung. Hierbei steht vor allem die Reduzierung von Preisrisiken im Vordergrund. Durch die Lagerhaltung kann die Ernte zu mehreren Zeitpunkten über das ganze Jahr hinweg verkauft werden und die Gefahr, dass die gesamte Ernte während einer Tiefpreisphase vermarktet werden muss, wird geringer (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2005). Hierbei ist es notwendig, die zunehmenden Preisrisiken gegen die Kosten für die Lagerhaltung abzuwägen. BREUSTEDT et al. (2010) bewerteten die Lagerhaltung unter Risikogesichtspunkten und untersuchten dabei, ob sich die Preisvolatilität für Marktfrüchte verringert, wenn anstatt der vollständigen Vermarktung der Ernte zum Erntepreis ein Teil der Ernte eingelagert und zu mehreren Zeitpunkten verkauft wird. Die Analyse zeigt, dass das Preisrisiko im Marktfruchtbau

durch Lagerhaltung und der daraus resultierenden Option zu mehreren Vermarktungszeitpunkten reduziert werden kann.

Ernteversicherungen

Ernteversicherungen stellen außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente dar, durch die eine Überwälzung des Risikos auf Dritte stattfindet. Sie zählen zu den institutionellen Instrumenten, um auf ökonomische Risiken, welche durch klimatische Veränderungen bedingt sein können, zu reagieren (SMIT und SKINNER 2002).

Da die empirische Untersuchung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen unter Risikoaspekten einen wichtigen Teilbereich dieser Arbeit darstellt, wird im folgenden Exkurs näher auf Ernteversicherungen eingegangen.

2.4 Exkurs: Anpassung durch Ernteversicherungen

2.4.1 Grundlagen der Ernteversicherung

Der grundsätzliche Gedanke im Versicherungswesen ist die gemeinschaftliche Teilung des finanziellen Risikos. Dabei bildet eine Vielzahl von Personen, die von der gleichen Gefahr bedroht sind, eine Gefahrgemeinschaft. Diese übertragen dann das finanzielle Risiko auf ein Versicherungsunternehmen und bezahlen dafür eine Prämie. Aus diesen Mitteln werden dann beim Eintritt eines Schadensfalls diejenigen Personen, die einen Verlust erlitten haben, entschädigt (vgl. VON OVERBECK UND BALDINGER PIROTTA 2000).

2.4.1.1 Versicherbarkeit von Risiken

Um ein Risiko versichern zu können, müssen zwei grundsätzliche Anforderungen erfüllt werden. Zum einen muss das Problem der **asymmetrischen Information** gelöst werden und zum andern müssen die Folgen von **systemischen Risiken** überwunden werden (EUROPEAN COMMISSION 2001, S. 23). Unter asymmetrischer Information wird der Sachverhalt verstanden, dass der Versicherungsnehmer üblicherweise mehr Wissen über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadenereignisses besitzt als das Versicherungsunternehmen.

Asymmetrische Information hat zwei Dimensionen:

- *Adverse Selection (Negativauslese)* tritt dann auf, wenn die Individuen mit einer größeren Risikoexposition mehr Versicherungsschutz kaufen als Individuen mit einer geringeren Risikoexposition, ohne dass das Versicherungsunternehmen davon weiß. Da das Versicherungsunternehmen die individuellen Risikoexpositionen der einzelnen Versicherungsnehmer nicht kennt, bietet es einen Mischvertrag für alle Risikotypen an. Die Prämie für solch einen Vertrag wird auf Basis des durchschnittlichen Risikos ermittelt. Das heißt, es werden sich nur die-

jenigen Individuen versichern, deren Risiko über dem Durchschnittsrisiko liegt. Dies hat zur Folge, dass sich ein Pool von schlechten Risiken beim Versicherungsunternehmen ansammelt. Dadurch ist das Versicherungsunternehmen gezwungen, die Prämie zu erhöhen, was diesen Effekt noch verstärkt. Durch mehrjährige Erfahrung kann ein Versicherungsunternehmen allerdings Verträge entsprechend anpassen bzw. manche Risiken nicht mehr versichern.

- *Moral Hazard (moralisches Risiko)* entsteht, wenn ein Individuum nach dem Abschluss eines Versicherungsvertrags sein Verhalten ändert und größere Risiken (die ja dann versichert sind) eingeht. Für das Versicherungsunternehmen entsteht ein Informationsnachteil, da der Umfang der Anstrengungen des Versicherungsnehmers zur Schadenvermeidung nicht beurteilt werden kann. Dieser Informationsnachteil manifestiert sich erst nach dem Vertragsabschluss. Durch Selbstbehalte, Bonusse bei Schadensfreiheit des Versicherungsnehmers, Kontrollen über Risikovorsorgemaßnahmen oder über ein objektives Auszahlungssystem, das vom Versicherungsnehmer nicht beeinflusst werden kann, können Versicherungsunternehmen Moral Hazard begrenzen.

(ZWEIFEL und EISEN 2000, S. 291 ff., EUROPEAN COMMISSION 2001, S. 24, PRETTENTHALER et al. 2006, S. 22 ff.).

Systemische Risiken sind im Gegensatz zu Risiken wie Einbruch oder Brand abhängige Risiken und betreffen gleichzeitig eine Vielzahl von Individuen. Dazu zählen beispielsweise großflächig auftretende Dürreereignisse, da viele Versicherungsnehmer gleichzeitig davon betroffen sind. Das Resultat sind viele Schäden zur gleichen Zeit, mit dem Effekt, dass die zur Schadensdeckung eingezahlten Prämien nicht ausreichend sind, die entstandenen Schäden auszugleichen. Dadurch kann die Liquidität von Versicherungsunternehmen gefährdet werden. Durch Rückversicherung, geographische Streuung und Nutzung des Kapitalmarktes können Versicherungen die Auswirkungen systemischer Risiken verringern (vgl. European Commission 2001, S. 24).

Nach SKEES (1997), MEUWISSEN et al. (1999), S. 18 f. und SKEES und BARNETT (1999) sind Risiken versicherbar, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Das Versicherungsunternehmen und der Versicherungsnehmer haben (annähernd) die gleiche Information bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadenereignisses.
- Schäden müssen durch Zufall und ungewollt auftreten. Durch den Abschluss einer Versicherung darf das Eigeninteresse des Versicherungsnehmers, die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Höhe eines Schadens gering zu halten, nicht wesentlich beeinträchtigt werden. Wenn sich das Verhalten des Versicherungsnehmers durch eine Versicherung stark ändert, kann Moral Hazard resultieren.

- Risiken sollten über die Versicherungsnehmer unabhängig verteilt sein. Falls Risiken systemisch (abhängig) sind, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um Versicherungslösungen brauchbar zu machen.
- Um Versicherungsprämien festlegen zu können, muss ein Versicherungsunternehmen in der Lage sein, die Wahrscheinlichkeit eines Schadens berechnen zu können, also die durchschnittliche Eintrittswahrscheinlichkeit und die durchschnittliche Schadenshöhe.
- Schäden, die auftreten, müssen feststellbar und messbar sein.
- Die Prämie muss für den Versicherungsnehmer erschwinglich sein.

2.4.1.2 Arten von Ernteversicherungen

Ernteversicherungen lassen sich in Ertragsgarantie- bzw. Ertragsverlustversicherungen sowie indexbasierte Versicherungen einteilen. Außerdem existieren Mischformen.

Bei der **Ertragsgarantieversicherung** wird eine Ertragsgröße als kritische Auszahlungsschwelle (Strike-Level) zugrunde gelegt. Der Versicherungsfall tritt ein, wenn der gemessene betriebliche Durchschnittsertrag der versicherten Kultur den vertraglich festgelegten Normertrag (Strike-Ertrag) unterschreitet. Der Strike-Ertrag eines Betriebes kann individuell durch historische Ertragsdaten des Betriebes und unter Berücksichtigung eines Selbstbehaltes ermittelt werden (WEBER et al. 2008, MUßHOFF und HIRSCHAUER 2010).

Bei der **Ertragsverlustversicherung** orientiert sich die Kompensationszahlung am tatsächlich entstandenen Pflanzenschaden. Hierbei ist es wichtig, dass das Schadbild eindeutig auf die Ursache rückschließbar ist. Die in der EU am weitesten verbreitete Ertragsverlustversicherung ist die Hagelversicherung (WEBER et al. 2008). Problematisch hierbei ist, dass Ertragsausfälle nicht versichert sind, wenn sie aus einer Kombination ungünstiger Witterungsverhältnisse, aber eben nicht durch das versicherte Extremereignis „Hagel“ resultieren (MUßHOFF und HIRSCHAUER 2010). Durch optionale Erweiterungen der Hagelpolicen bieten viele Hagelversicherungsunternehmen in Deutschland mittlerweile Absicherungsmöglichkeiten gegen weitere Witterungsrisiken, wie z. B. Sturm, Starkregen oder Auswinterung an.

Bei **Regionsindexversicherungen** orientiert sich die Schadensleistung – im Unterschied zu Ertragsgarantieversicherungen – nicht am Betriebsertrag, sondern am regionalen Durchschnittsertrag. Dieser wird als Index vertraglich festgelegt. Fällt der Regionalertrag in einem Jahr unter den festgelegten Normertrag, kommt es zu einer Versicherungsleistung, vollkommen unabhängig davon, ob im einzelnen Betrieb ein Ertragsverlust vorliegt oder nicht (MUßHOFF und HIRSCHAUER 2010).

Wetterindexversicherungen stellen eine weitere Art der Absicherungsmöglichkeit gegen Wetterrisiken dar, die allerdings in Deutschland derzeit lediglich diskutiert werden und für die Landwirtschaft noch nicht auf dem Markt verfügbar sind. Sie stellen keine

klassische Versicherung dar, die sich am tatsächlichen Ertragsverlust orientiert, sondern eher einen Optionsvertrag, der festlegt, dass der Landwirt eine vorher vereinbarte Entschädigung erhält, die sich an der objektiven Ausprägung einer Wettervariablen orientiert (MUBHOFF und HIRSCHAUER 2008). Daher werden sie in diesem Zusammenhang dem Punkt „Absicherung durch Terminkontrakte und Optionen“ (siehe Kapitel 2.3.4) zugeteilt und an dieser Stelle näher erläutert.

Darüber hinaus gibt es auch noch Versicherungen, mit denen sich Preisrisiken, Erlösrisiken und Einkommensrisiken versichern lassen (vgl. EUROPEAN COMMISSION 2001, S. 25 ff.). Vor allem in den USA werden neben ertragsbasierten Versicherungen seit dem „Federal Agricultural Improvement and Reform (FAIR) Act“ im Jahre 1996 verstärkt Einkommensversicherungsprogramme angeboten (PRETTENTHALER et al. 2006, S. 57).

Eine allgemeine Systematisierung von Ernteversicherungen kann nach WEBER et al. (2008), S. 16 folgendermaßen vorgenommen werden (siehe Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Systematisierung von Ernteversicherungen

Anzahl der versicherten Risiken	einzelne Schäden eines bestimmten Risikos werden kompensiert	mehrere Schäden mehrerer Risiken werden kompensiert
Auszahlungsbasis	subjektiv eine Auszahlung beruht auf subjektiven Daten zu Verlust oder Ertragshöhe	objektiv eine Auszahlung wird unabhängig vom Schaden durch einen objektiv messbaren Index ausgelöst
Referenz für Schadenbemessung	einzelbetrieblich zur Schadensbemessung werden einzelbetriebliche Daten verwendet	regional zur Schadensbemessung werden regionale Daten verwendet
Art der Schadenbemessung	kausal Schäden werden auf ihre Ursache bezogen bemessen	final Schäden werden unabhängig von der Ursache am Output bemessen

Quelle: WEBER et al. (2008), S. 16

Eingefahrenversicherungen unterscheiden sich im Unterschied zu Mehrgefahrenversicherungen hinsichtlich der Anzahl der versicherbaren Risiken. Die bekannteste Form der Eingefahrenversicherung ist die Hagelversicherung. Durch Zusatzversicherungen lassen sich weitere Schadensursachen in den Versicherungsschutz integrieren, so dass der Übergang von der Ein- zur Mehrgefahrenversicherung fließend ist (WEBER et al. 2008, S. 19). Die Auszahlung kann zum einen subjektiv, z. B. auf Grundlage eines Gutachtens durch einen Sachverständigen oder durch eine objektiv messbare Größe, wie z. B. einem Niederschlagsindex erfolgen. Auch hinsichtlich der Referenz für die Scha-

densbemessung unterscheiden sich Ernteversicherungen. Es können zum einen einzelbetriebliche Daten und zum anderen regionale Daten, z. B. der regionale Durchschnittsertrag, als Bemessungsgrundlage herangezogen werden. Unterschiede bestehen auch hinsichtlich der Art der Schadensbemessung. Bei Mehrgefahrenversicherungen bildet üblicherweise der tatsächlich erzielte Ertrag die Bemessungsgrundlage, ob ein Schaden vorliegt oder nicht. Bei Ertragsverlustversicherungen, z. B. der Hagelversicherung, orientiert sich die Schadenskompensation am tatsächlich entstandenen Pflanzenschaden, der durch Sachverständige des Versicherungsunternehmens festgestellt werden muss (WEBER et al. 2008, S. 18).

Da sich in der Literatur keine einheitliche Definition für den Begriff „Ernteversicherung“ findet, wird er im Rahmen dieser Arbeit für alle Versicherungen verwendet, mit denen der Landwirt die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion gegen mengenmäßige Ertragseinbußen versichern kann.

2.4.1.3 Rückversicherung

Unter Rückversicherung wird die Versicherung von Erstversicherungsunternehmen verstanden. Dabei übertragen die Erstversicherer denjenigen Teil des Risikos an den Rückversicherer, der über ihrer Zeichnungskapazität liegt. Die Zeichnungskapazität ist als die Möglichkeit definiert, Schäden oberhalb des eingenommenen Prämienvolumens in einem bestimmten Jahr abzudecken. Rückversicherung ist vor allem für solche Versicherungsunternehmen wichtig, die korrelierte Risiken abdecken. Ohne Rückversicherung müsste die Prämie stark erhöht werden, um genügend Rücklagen für hohe Verluste aufzubauen (EUROPEAN COMMISSION 2001, S. 28 f.).

Innerhalb der Rückversicherung werden zwei Kategorien unterschieden, die proportionale und die nicht-proportionale Rückversicherung:

- Bei einer **proportionalen Rückversicherung** übernimmt der Rückversicherer einen definierten Anteil der Schäden. Dafür erhält der Rückversicherer einen festgelegten prozentualen Anteil der Versicherungsprämien. Im Rückversicherungsvertrag wird festgelegt, wie Prämie und Schadenskosten zwischen Erstversicherer und Rückversicherer verteilt werden.
- Bei **nicht-proportionalen Rückversicherungen** kommt der Rückversicherer ab einem bestimmten Betrag und bis zu einem im Rückversicherungsvertrag festgelegten Höchstbetrag für einen Teil bzw. die gesamten Schadenskosten auf. Dabei kann die Deckung pro Schadenereignis oder für die Exponierung eines gesamten Versicherungszweigs erfolgen. Innerhalb dieses Rückversicherungstyps gibt es zwei Varianten. Bei einer *Excess of Loss-Rückversicherung* deckt der Rückversicherer alle Schäden bis zu einer bestimmten Höhe, die aus einem definierten Schadensfall resultieren, wenn ein festgelegter Selbstbehalt überschritten wird. Bei einer *Stop-Loss-Rückversicherung* übernimmt der Rückversicherer bis zu ei-

ner bestimmten Höhe die jährlichen Schadenskosten, die einen vereinbarten Selbstbehalt überschreiten.

Damit Rückversicherungen die finanziellen Anforderungen für die Erstversicherer leisten können, müssen sie ihre Risiken zu einem hohen Grad diversifizieren und einen großen und breit gefächerten Versicherungspool schaffen. Typischerweise decken Rückversicherungen daher eine große Spannweite an verschiedenen Versicherungen auf der ganzen Welt ab, um die Variabilität der Verluste innerhalb ihres Portfolios zu reduzieren (MEUWISSEN et al. 1999, S. 20, EUROPEAN COMMISSION 2001, S. 28).

2.4.2 Marktüberblick und Anwendungsbeispiele

Weltweit und auch in Europa gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Ernteversicherungssystemen, die sich hinsichtlich der versicherbaren Gefahren und vor allem bezüglich dem Grad des staatlichen Einflusses unterscheiden. In einigen Ländern werden beispielsweise Versicherungsprämien stark bezuschusst, was eine Versicherung für den Landwirt attraktiver macht und zu entsprechend hohen Partizipationsraten führt. In anderen Ländern hingegen übernimmt der Staat z. B. die Rolle eines Rückversicherers. Nachfolgend zeigt Tabelle 2-3 einen Überblick über Ernteversicherungssysteme in ausgewählten Ländern.

Tabelle 2-3: Erntever sicherungssysteme in ausgewählten Ländern

Land	versicherbare Gefahren	Prämiensubvention	Staatliche Nothilfe	Partizipation	Rückversicherung
Deutschland	Hagel <i>Zusatzversicherung möglich:</i> Sturm, Frost, Auswinterung, Starkregen, Hochwasser, Trockenheit	keine (Ausnahme: Hagelversicherung für Rebflächen in Rheinland-Pfalz)	Im Katastrophenfall durch Länder bzw. Bund	ca. 40 % für Hagel < 1 % für MGV	ausschließlich privatwirtschaftlich
Spanien	Frost, Hagel, Überschwemmung, Feuer, Regen, Trockenheit, stürmischer oder heißer Wind	55 % (Staat zahlt zwischen 40 % und 45 %, den Rest übernehmen die Regionalregierungen)	Ad-hoc-Hilfen (bei außergewöhnlichen Schadenereignissen und nur für versicherte Landwirte)	ca. 35 %	überwiegend staatlich
Österreich	<i>Hagel- und Frostversicherung:</i> Hagel, Frost <i>Ackerpauschalversicherung:</i> Trockenheit, Überschwemmung, Verschlammung, Auswuchs, Dauerregen bei Ernte, Verwehung, Schneckenfraß, Vogelfraß	50 % als Zuschuss zur Prämie für Hagel- und Frostversicherung keine Förderung der Ackerpauschalversicherung	Katastrophenfonds (staatliche Unterstützung nach Naturkatastrophen, außer Hagel und Frost, da hierfür die Prämien subventioniert werden)	78 % für Hagel 56 % für MGV	ausschließlich privatwirtschaftlich
Portugal	<i>Basisversicherung:</i> Feuer, Blitzschlag, Explosion, Hagel <i>Naturgefahren:</i> Feuer, Sturm, Frost, Starkniederschlag, Erdbeben	45 bis 50 %, in Ausnahmefällen bis 85 %	nur für Landwirte, die eine Versicherung abgeschlossen haben ab 50 % Ertragsverlust	25 %	überwiegend staatlich
Griechenland	Hagel, Sturm, Dürre, Frost, Überschwemmung, Schäden durch Bären	50 %	Nur für Schäden außerhalb des Deckungsumfanges der staatlichen Versicherung	100 % (staatliche Pflichtversicherung)	staatlich möglich
Luxemburg	Hagel, Frost/Auswinterung, Sturm, Überschwemmung, Wolkenbruch, Trockenheit	50 %	keine Ad-hoc-Hilfen	10 %	ausschließlich privatwirtschaftlich
Italien	<i>Naturgefahren:</i> Erdbeben, Erdbeben, Lawinen, Überschwemmung <i>Widrige Witterungsbedingungen:</i> Hagel, Frost, Trockenheit, übermäßiger Regen, Eis	bis zu 80 % bei Versicherung gegen Naturgefahren 50 % bei Versicherung gegen widrige Wetterbedingungen (im Fall des Eintretens einer Naturkatastrophe 80 %)	Direkte Kalamitätshilfe (nur bei nicht versicherbaren Risiken bzw. in Regionen, in denen sich die Landwirte nicht versichern können)	8 %	privatwirtschaftlich und öffentlich (für neue Versicherungsprodukte, die Mehrgefahren abdecken)

Land	versicherbare Gefahren	Prämiensubvention	Staatliche Nothilfe	Partizipation	Rückversicherung
Frankreich	Hagel, Eis, Überschwemmung, Wasserüberschuss und Trockenheit	35 % bzw. 40 % (bei Junglandwirten) der Prämie zur Mehrgefahrenversicherung für Getreide, Ölsaaten und Eiweißpflanzen	Kalamitätsfonds bei Naturkatastrophen (z. B. außergewöhnliche Dürre, Erdbeben, Flutwellen), die nicht von privaten Versicherungen abgedeckt werden ab einer Schwelle von 42 % Ertragsverlust bzw. 14 % Einkommensverlusts eines Betriebs	20 %	ausschließlich privatwirtschaftlich
Schweden	Auswinterung	50 %	keine Beihilfen bei klimatisch bedingten Schäden	60 %	ausschließlich privatwirtschaftlich
USA	Dürre, Trockenheit, Frost/Kälte, Insektenbefall, Feuer, Sturm/Tornados, ungünstige Witterung während der Blüte, Hagel, Wildschaden, Unbefahrbarkeit des Feldes zur Ernte, Erdbeben, Vulkanausbruch, Pflanzenkrankheiten, Nässe, Überschwemmung, Blitzschlag, Erlös	35 bis 100 %	Bei außergewöhnlichen Schadenereignissen, für die kein Versicherungsschutz erhältlich ist	80 %	staatlich möglich
Kanada	Dürre, Frost, Starkniederschlag, Überschwemmung, Schädlingsbefall, Pilzkrankheiten, Hagel, Sturm, Schnee, Einkommen	ca. 66 % (von Provinz zu Provinz verschieden)	Bei außergewöhnlichen Schadenereignissen	50 %	ausschließlich staatlich
Japan	Dürren, Taifune, Schneefälle, Überschwemmungen, zu kühle Sommer, Erdbeben, Vulkanausbrüche, Pflanzenkrankheiten, außergewöhnliche meteorologische Ereignisse, Vögel- und Wildschäden	55 %	Ad-hoc-Beihilfen bei Kalamitäten und Katastrophen	keine Angabe	keine Angabe

Quelle: Eigene Darstellung nach EUROPEAN COMMISSION (2001), S. 40-53, PRETTENTHALER et al. (2006), S. 56-69, EUROPEAN COMMISSION (2008), S. 133-144, LANDTAG BADEN-WÜRTTEMBERG (2008), S. 5 f., VON ALTEN (2008), S. 93-96, WEBER et al. (2008), S. 17-20, BIELZA DIAZ-CANEJA et al. (2009), MWVLW (2010)

Tabelle 2-3 macht deutlich, dass EU- bzw. weltweit eine hohe Eingriffsintensität auf den Märkten für Ernteversicherungen vorliegt, z. B. durch Prämiensubventionen, verstaatlichte oder teilverstaatlichte Rückversicherung oder Haftungsbegrenzung für private Rückversicherer. Darüber hinaus werden laut der Stellungnahme des wissenschaftlichen Beirats für Agrarpolitik zum Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft in manchen Ländern auch Steuernachlässe bzw. Steuerbefreiungen auf Versicherungspolice gewährt oder die Verwaltungskosten von Erstversicherern übernommen. Bisher gibt es in Deutschland bis auf mögliche Ad-Hoc-Katastrophenhilfen – die allerdings oft zu spät erfolgen und häufig nur einen geringen Teil des Schadens abdecken – keine den Versicherungsmarkt stützenden staatlichen Hilfestellungen im Bereich der Pflanzenproduktion (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

In Deutschland ist insgesamt ein vergleichsweise geringer Deckungsschutz gegen Ertragsrisiken gegeben, obwohl ergänzend zur Hagelversicherung Zusatzversicherungen gegen Sturm, Frost, Auswinterung, Starkregen, Hochwasser und Trockenheit, hauptsächlich in Form von Ertragsverlustversicherungen, am Markt angeboten werden. Dennoch sind im Rückblick über die Periode von 1990 bis 2007 in Deutschland witterungsbedingte Ernteschäden in Höhe von knapp 8,2 Mrd. € entstanden, wovon über Versicherungspolice nur zwischen 20 und 25 % dieser Schäden gedeckt waren, was eine beträchtliche Deckungslücke aufzeigt (LANGNER 2007, S. 2609).

Insgesamt stellten BIELZA DIAZ-CANEJA et al. (2009) in einer Analyse der europäischen Ernteversicherungssysteme fest, dass das Ausmaß des Risikos sowohl innerhalb der EU von Land zu Land, als auch zwischen verschiedenen Betriebstypen und Betriebsgrößen sehr heterogen ist. Die Entwicklung des Versicherungssektors in den einzelnen Mitgliedsstaaten wird durch die jeweilige Risikohöhe sowie durch die jeweilige Politik zur Unterstützung des Versicherungssektors beeinflusst. Für die EU hat sich gezeigt, dass der private Versicherungssektor für nicht systemische Risiken (z. B. Hagel) passende Lösungen anbietet. Bei Versicherungsprodukten, die einen umfangreichen Versicherungsschutz anbieten, besteht jedoch ein direkter Zusammenhang zwischen der Entwicklung solcher Versicherungslösungen und staatlicher Unterstützung (BIELZA DIAZ-CANEJA et al. 2009).

2.4.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für Ernteversicherungen

Regelungen für staatliche Hilfen bei Ertragsrisiken im Allgemeinen und zu Ernteversicherungen im Speziellen finden sich im WTO-Recht, im EU-Recht und im deutschen Recht. An dieser Stelle sei auf die ausführliche Zusammenfassung zu dieser Thematik in der Stellungnahme des wissenschaftlichen Beirats für Agrarpolitik zum Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft verwiesen (siehe WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011). Zusammenfassend lässt sich für die rechtlichen Rahmenbedingungen festhalten, dass nach WTO-Recht, EU-Recht und deutschem Recht beim Auftreten „echter“ Naturkatastrophen Entschädigungszahlungen bis zu 100 % der entstandenen

Schäden zulässig sind. Bei den Naturkatastrophen gleichzusetzenden widrigen Witterungsverhältnissen mit Schäden von $> 30\%$ der durchschnittlichen Jahreserzeugung gilt diese Erlaubnis ebenfalls, wobei sich hier allerdings die Höchstbeträge für Entschädigungszahlungen unterscheiden (WTO-Recht (Green Box): 100% , EU-Beihilferecht: 80% , Deutsches Recht: 80%). Für die EU und Deutschland verringern sich ab 2010 die Entschädigungshöchstsätze auf 50% , wenn keine angemessene Versicherung, die mindestens 50% der durchschnittlichen Jahreserzeugung und die häufigsten Risiken abdeckt, abgeschlossen worden ist. Beihilfen zur Kompensation von Schäden $\leq 30\%$ der durchschnittlichen Jahreserzeugung werden nach WTO-Recht nicht als Green-Box-fähig anerkannt und unterliegen somit der Abbauverpflichtung der Amber-Box, sofern sie den De-minimis-Höchstbetrag überschreiten. Im EU-Recht hingegen ist die Möglichkeit vorgesehen, Prämienzuschüsse bis zu 50% auch bei widrigen Witterungsverhältnissen bzw. bei Schäden durch Tierseuchen, Pflanzenkrankheiten oder Schädlingsbefall zu gewähren. Nach deutschem Recht sind solche Zuschüsse gegenwärtig nicht vorgesehen bzw. geregelt (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

2.4.4 Schlussfolgerungen

Der Exkurs hat gezeigt, dass es EU- bzw. weltweit eine Vielzahl von staatlichen Eingriffen auf den Märkten für Ernteversicherungen gibt. In Deutschland hingegen gibt es nahezu keine den Versicherungsmarkt stützenden staatlichen Hilfestellungen im Bereich der Pflanzenproduktion. Dies könnte dazu führen, dass sich deutsche Landwirte, aufgrund von teilweise sehr hohen Prämiensubventionen oder anderer staatlicher Unterstützung auf den Versicherungsmärkten in anderen Ländern, gegenüber den dortigen Produzenten zukünftig zunehmenden Wettbewerbsnachteilen gegenübersehen (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

Da zusätzlich die Ertragsrisiken aufgrund des Klimawandels tendenziell zunehmen (siehe Kapitel 2.2.3) erscheint auch in Deutschland eine staatliche Unterstützung bei der Einführung von umfassenden Erntemehrgefahrenversicherungen zur Bewältigung von Ertragsrisiken grundsätzlich denkbar. Dabei sind sowohl Prämiensubventionen als auch die Beteiligung des Staates an privatwirtschaftlichen Rückversicherungssystemen vorstellbar. Auch BIELZA DIAZ-CANEJA et al. (2009) schlagen zur Weiterentwicklung von nationalen Ernteversicherungssystemen eine teilweise Subventionierung nationaler Ernteversicherungen und eine Bereitstellung staatlicher Rückversicherung vor. Zu beachten ist, dass Eingriffe in Form von Prämiensubventionen oder der Beteiligung an privatwirtschaftlichen Rückversicherungen nur bei systemischen Risiken (Trockenheit, Überschwemmungen) und dem Vorliegen echter Unsicherheiten (bislang unbekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten bestimmter Risiken) zu rechtfertigen sind (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

Bei einer Subventionierung von Policen für Ernteversicherungen müssen außerdem einige weitere Aspekte beachtet werden. So sollte eine Subventionierung der Prämien

nicht allein zu dem Zweck erfolgen, eine möglichst hohe Partizipationsrate zu erreichen. Zudem darf eine Subventionierung auch nicht so hoch sein, dass die Prämie für den Versicherungsnehmer niedriger ist als die Nettorisikoprämie, denn dann wird die Versicherung ein Instrument zur Einkommensstützung und nicht eine Maßnahme zur Begrenzung des Risikos, wie es in den USA inzwischen der Fall ist (vgl. BERG 2001, S. 42 f.). Der wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik empfiehlt zudem, eine Prämien-subvention zeitlich degressiv zu gestalten und mit der Zeit auslaufen zu lassen (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011). Von entscheidender Bedeutung wird dabei allerdings sein, ob es der Versicherungswirtschaft gelingt, ausreichend hohe Rücklagen zu bilden, die es erlauben, die Prämien (und damit auch die staatliche Unterstützung) absinken zu lassen.

Kritisch bei der Einführung von umfassenden und nachhaltigen Ernteversicherungssystemen ist, dass gerade in den ersten Jahren beim Eintreten eines großen Schadenerignisses die Prämienzahlungen nicht ausreichen können, um die Schäden zu decken (GDV 2008, S. 15). Um dies zu vermeiden könnte z. B. eine staatliche Instanz implementiert werden, die der privaten Versicherungswirtschaft bei Katastrophen Rückversicherungsschutz bietet (VON ALTEN 2008, S. 139 f.). Vorstellbar ist hierbei, dass der Staat Rückversicherungsgarantien jenseits einer bestimmten Deckungssumme übernimmt. Das würde auch dazu führen, dass der Versicherungsschutz für die Landwirte günstiger wird (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

Auch SKEES und BARNETT (1999) betonen die Bedeutung von Rückversicherungen und einer möglichen staatlichen Unterstützung von Rückversicherungssystemen zur Bewältigung des Problems systemischer Risiken und zeigen auf, unter welchen Bedingungen systemische Risiken die Bereitstellung von Versicherungslösungen reduzieren und zu einem Zusammenbruch von Versicherungsmärkten führen können. Die Tatsache, dass innerhalb der letzten Jahre viele EU-Mitgliedsstaaten versucht haben, den Versicherungssektor auszubauen und dass es immer noch hohe staatliche Ad-hoc-Zahlungen gibt, zeigt, dass das gegenwärtige Versicherungslevel nicht ausreichend entwickelt ist, um große Einkommenseinbußen in schlechten Jahren zu vermeiden (BIELZA DIAZ-CANEJA et al. 2009).

Besonderes Augenmerk sollte bei der Ausgestaltung von Versicherungsmodellen darauf gelegt werden, die bekannten Probleme von adverser Selektion und Moral Hazard zu reduzieren. Dazu sollte zum einen keine umfassende Risikoabdeckung angestrebt werden, sondern eine Versicherung gegen verschiedene, aber wohl definierte Gefahren. Zum anderen sollten mehrere Risiken in einem Gesamtpaket angeboten werden, um eine hohe Beteiligung zu erreichen und damit adverse Selektion zu vermeiden. Eine standort- und fruchtartenspezifische Differenzierung der Versicherungsprämien entsprechend der jeweiligen Risikoexposition kann ebenfalls dazu beitragen, adverse Selektion einzuschränken. Wichtig ist auch, dass eine Schadensfeststellung unmittelbar

nach dem Eintritt des Schadenereignisses vorgenommen werden kann und der Schadensumfang als relative Ertragsminderung bestimmt werden kann. Hier kann auf die Erfahrung und die Ressourcen der Hagelversicherungsunternehmen aufgebaut werden. Bei reinen Ertragsgarantieversicherungen wie in den USA kann Moral Hazard und adverse Selektion nicht ausgeschlossen werden. Darüber hinaus können Selbstbehalte und Bonus-Malus-Systeme adverse Selektion und Moral Hazard einschränken (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

Günstige Rahmenbedingungen für Ernteversicherungen können außerdem auch geschaffen werden, indem die Steuern für Ernteversicherungen EU-weit harmonisiert werden. Problematisch für die Etablierung von umfassenden und nachhaltigen Ernteversicherungen in Deutschland ist auch, dass nach dem aktuellen Versicherungssteuergesetz Mehrgefahrenversicherungen stärker besteuert werden als die Hagelversicherung. So beträgt bei der Hagelversicherung der Steuersatz 0,2 ‰ bezogen auf die Versicherungssumme, während bei der Mehrgefahrenversicherung der Steuersatz 19 % bezogen auf das jährliche Versicherungsentgelt beträgt (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011).

2.5 Zwischenfazit: Klimawandel und Marktfruchtbau

Die prognostizierten klimatischen Veränderungen werden Einfluss auf die Landwirtschaft unter mitteleuropäischen Verhältnissen haben. Auf Basis der ausgewerteten Literatur kann geschlossen werden, dass für den europäischen Raum leicht positive Ertragseffekte zu erwarten sind, wobei es allerdings eine hohe räumliche Heterogenität gibt und manche Regionen unter den Folgen des Klimawandels leiden werden. Ertragszuwächse sind allerdings nur zu erwarten, wenn sich die Temperaturen um nicht mehr als 2 °C erhöhen (vgl. TRNKA 2011). Positive Auswirkungen auf die Ertragspotenziale ergeben sich insbesondere, wenn der zu erwartende CO₂-Effekt berücksichtigt wird und sich der bisherige Zuwachs durch technischen Fortschritt fortschreiben lässt (vgl. GANDORFER und KERSEBAUM 2008a). Durch kontinuierliche Anpassungsmaßnahmen, v. a. im Rahmen der Bestandesführung, können Landwirte auf veränderte Ertragserwartungen reagieren. Grundlage hierfür ist ein intensives Monitoring auftretender Veränderungen, um daraufhin geeignete Anpassungsmaßnahmen ableiten zu können. In diesem Zusammenhang wird der Forschung und Entwicklung sowie der Beratung zukünftig eine noch bedeutendere Rolle zukommen.

Die Anpassung an den Klimawandel umfasst sowohl kurzfristige Entscheidungen über das Management von Systemen, die derzeit im Einsatz sind, als auch langfristige Entscheidungen über Systemänderungen, was Investitionen in Technologie- und Sachkapital sowie Investitionen in Humankapital erfordert, das in der Lage ist, die neuen Systeme anzuwenden. Es kann im Großteil der Fälle davon ausgegangen werden, dass landwirtschaftliche Betriebsleiter die Fähigkeit haben, kurzfristige Managementent-

scheidungen zur Anpassung an beobachtbare Veränderungen zu treffen. Demzufolge sind für die Anpassung eher die längerfristigen Investitionsentscheidungen im Zusammenhang mit der Wahl des Produktionssystems entscheidend (ANTLE und CAPALBO 2010).

Der Marktfruchtbau ist aufgrund der Charakteristika des Klimawandels (graduelle Änderung des Klimas über einen längeren Zeitraum) daher eher in der Lage abzuwarten, ganz im Gegenteil z. B. zur Forstwirtschaft, wo bereits jetzt waldbauliche Entscheidungen über die Anpassungsfähigkeit der Wälder (Produktionssysteme) an künftige Klimabedingungen getroffen werden müssen. Abrupte strukturelle Veränderungen der Landwirtschaft im Bereich der Pflanzenproduktion sind daher zunächst nicht zu erwarten, da das graduelle Fortschreiten des Klimawandels bedeutet, dass Landwirte Zeit zur Anpassung an die klimatischen Änderungen haben werden und dass Zeit zur Entwicklung von Bewirtschaftungstechnologien, Pflanzen und Anbausystemen, die besser an das neue Klima angepasst sind, vorhanden ist (vgl. PANNELL 2010).

Die Literaturanalyse zeigt jedoch auch, dass durch die Zunahme und Verstärkung von Extremwetterereignissen die Ertragsvariabilität und damit das Einkommensrisiko zu nehmen wird, was die Liquidität und Stabilität landwirtschaftlicher Betriebe gefährden kann. Zukünftig sind daher größere Anforderungen an das Risikomanagement notwendig, um auf das mit dem Klimawandel verbundene erhöhte Produktionsrisiko zu reagieren. Das Portfolio der Risikomanagementinstrumente ist, wie dargestellt, sehr breit gefächert. Die optimale Anpassung an das durch den Klimawandel erhöhte Produktionsrisiko sollte daher durch einen betriebsindividuellen Strategiemix erfolgen, der die Risikoexposition und Anpassungsfähigkeit landwirtschaftlicher Betriebe sowie die Risikoeinstellung des Betriebsleiters entsprechend berücksichtigt.

Grundsätzlich muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass der überwiegende Anteil der Anpassungsmaßnahmen zur Reduzierung des erhöhten Produktionsrisikos aufgrund klimatischer Veränderungen mit Kosten verbunden sind. Eine Empfehlung für oder gegen ein bestimmtes Instrument wird somit stark von der Risikoeinstellung des Betriebsleiters determiniert, die wiederum in hohem Maße von der Liquidität des Betriebs bestimmt sein sollte. Des Weiteren ist zu beachten, dass das Preisrisiko nicht allein von den klimatischen Veränderungen beeinflusst wird, sondern vor allem auch von Faktoren, wie z. B. den politischen Rahmenbedingungen (z. B. Liberalisierung der Agrarmärkte), Veränderungen in den Ernährungsgewohnheiten, der Nachfrage nach Bioenergie oder kapitalmarktgesteuerter Spekulationen mit Agrarrohstoffen. Das bedeutet, dass speziell die Preisabsicherung an Bedeutung gewinnen wird, unabhängig davon, wie sich der Klimawandel nun auf das Preisrisiko auswirkt.

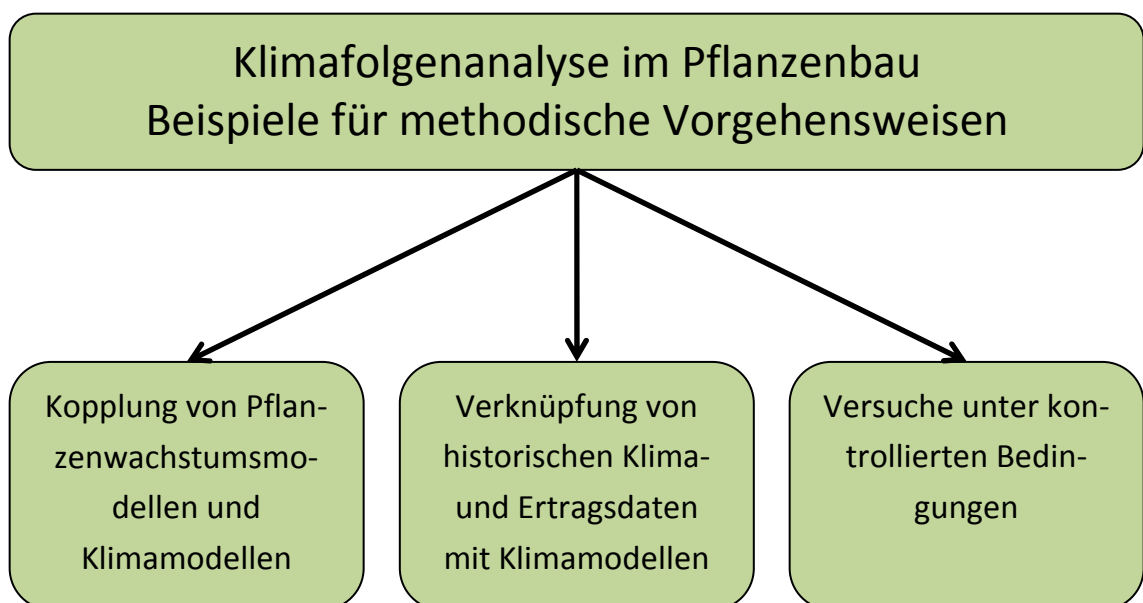
3 Klimafolgenanalyse durch statistische Untersuchungen

Hinsichtlich der Klimafolgenabschätzung für den Bereich Pflanzenbau finden sich in der wissenschaftlichen Literatur verschiedenste Ansätze, die folgenden Kategorien zuordenbar sind:

- Kopplung von Pflanzenwachstumsmodellen mit Klimamodellen,
- statistische Untersuchung von historischen Ertrags- und Wetterdaten und Verknüpfung mit Daten aus Klimamodellen sowie
- Versuche unter kontrollierten Bedingungen

(siehe Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Klimafolgenanalyse pflanzliche Produktion



Quelle: Eigene Darstellung nach GANDORFER und KERSEBAUM (2008b)

Eine weit verbreitete Methode, um Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft ableiten zu können, ist die Kopplung eines Pflanzenwachstumsmodells mit Klimamodellen. Dieser Ansatz wurde bereits in einer Reihe verschiedener Studien angewandt (vgl. SAARIKKO und CARTER 1996, WOLF et al. 1996, HANSEN und JONES 2000, PARRY et al. 2004, LOBELL und ORTIZ-MONASTERIO 2006). Mit dieser Vorgehensweise lassen sich die Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien auf das Ertragspotenzial sowie die Ertragsunsicherheit hinsichtlich der klimatischen und standörtli-

chen Produktionsbedingungen abschätzen. Vorteile dieser Methode sind, dass eine Vielzahl von Szenarien und viele Bewirtschaftungsvarianten (z. B. Art der Bodenbearbeitung, Saatzeitpunkte, Stickstoffdüngung etc.) dargestellt werden können. Auch der Einfluss einer erhöhten CO₂-Konzentration auf die pflanzliche Produktion kann beurteilt werden, sofern entsprechende Algorithmen im Pflanzenwachstumsmodell hinterlegt sind. Nachteile bestehen im hohen Datenbedarf und in der Modellunsicherheit. So sind nach FRANZARING et al. (2006) selbst bei Vorliegen langjähriger, zeitlich und räumlich hoch aufgelöster Daten zu Bodenfeuchten, zur Phänologie und dem Klima die in Pflanzenwachstumsmodellen a posteriori modellierten Erträge meistens höher als die tatsächlich an einem Ort geernteten.

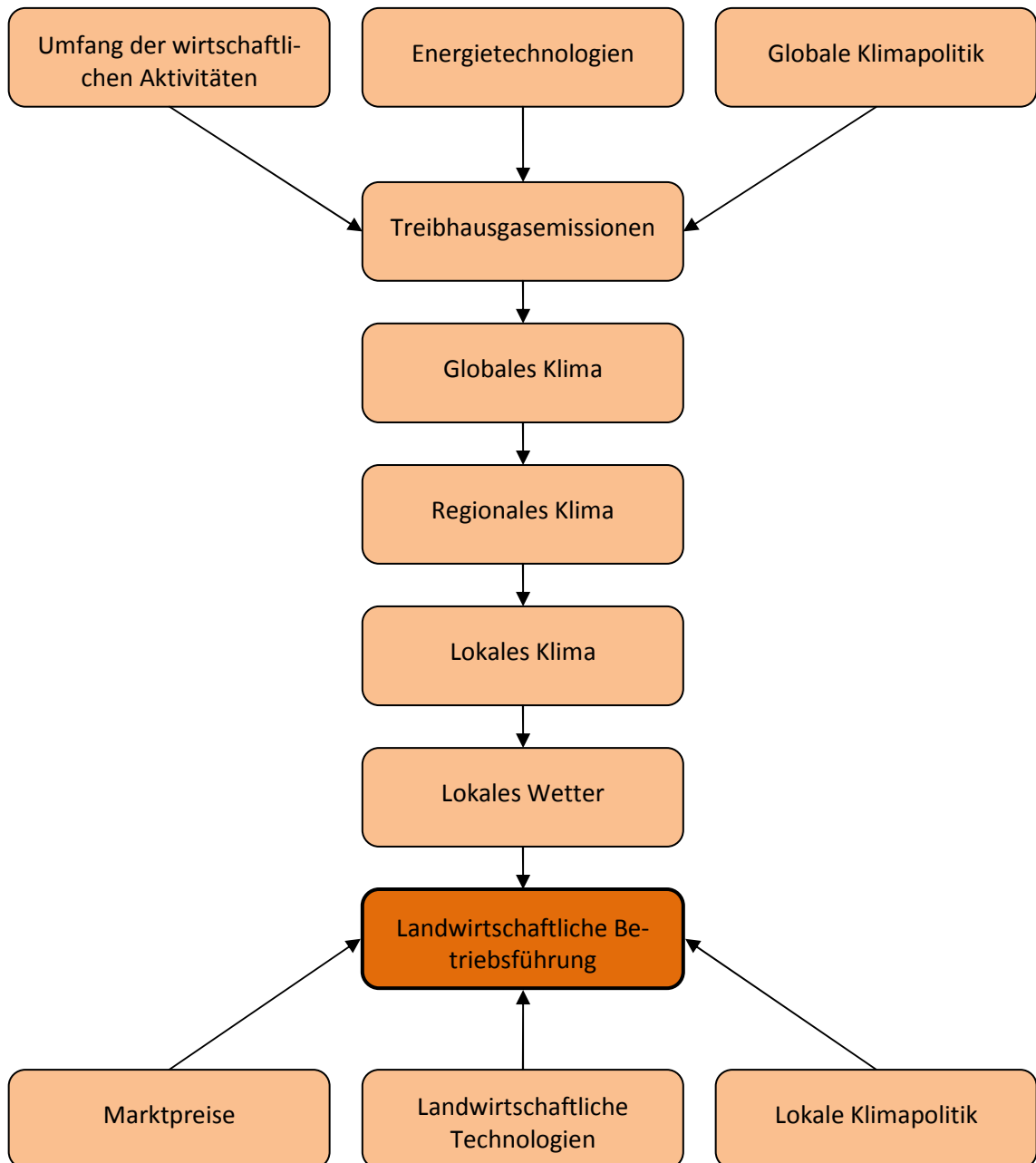
Der für die Untersuchungen in diesem Kapitel gewählte Ansatz ist die unter Kapitel 3.3 noch genauer beschriebene statistische Untersuchung von historischen Ertrags- und Wetterdaten. Hierbei werden zum einen durch Extremwertanalysen kritische Klimaparameter für Missernten identifiziert und daraufhin die Ausprägung dieser Klimaparameter in der Zukunft aus Klimamodellen ausgewertet (vgl. dazu SOJA und SOJA 2003). Zum anderen werden durch multiple Regressionsanalysen historische Ertragsschwankungen durch Klimavariablen erklärt sowie daraus – durch die Kopplung mit Daten aus Klimamodellen – Aussagen über die zukünftige Ertragsvariabilität abgeleitet. Multiple Regressionsmodelle wurden bereits in einigen anderen Studien angewandt, um Zusammenhänge zwischen Erträgen und Umweltvariablen zu quantifizieren (vgl. IGLESIAS et al. 2000, PARRY et al. 2004 und LOBELL et al. 2005) und können auch verwendet werden, um das Risiko im Zusammenhang mit dem Klimawandel zu schätzen (vgl. FERREYRA et al. 2001). Ein Vorteil dieser Methode besteht darin, dass der Datenbedarf relativ gering ist. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Methode nur bei einer hohen Korrelation zwischen Wetter- und Ertragsdaten gute Ergebnisse liefert (vgl. STERZEL 2007).

Darüber hinaus lassen sich noch durch Versuche unter kontrollierten Bedingungen Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf Pflanzen ableiten. Dazu zählen beispielsweise Versuche in Klimakammern oder FACE-Versuche unter Freilandbedingungen. Vorteile dabei sind, dass Reaktionen der Pflanzen auf definierte Bedingungen messbar werden. Mit dieser Methode lassen sich neben der Ertragserwartung auch noch Aussagen über die Ertragsqualität treffen (vgl. STAFFORD 2007). Nachteilig wirkt sich aus, dass z. B. bei FACE-Versuchen aufgrund des hohen Aufwands nur wenige Varianten durchführbar sind und nur eine eingeschränkte Klimawirkung untersuchbar ist, denn aufgrund der Freilandbedingungen wird hier nur die Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Pflanzen untersucht, nicht aber eine Temperaturzunahme oder ein verändertes Niederschlagsmuster.

Unabhängig vom methodischen Ansatz, soll an dieser Stelle auch auf die generelle Unsicherheit bei der Klimafolgenabschätzung in der Pflanzenproduktion eingegangen werden, da dies eine wichtige Rolle spielt, wenn es um die Ableitung von Anpassungs-

strategien an die prognostizierten klimatischen Änderungen geht. Nach PANNELL (2010) gibt es eine Vielzahl unsicherer Variablen und Beziehungen, die die zukünftige landwirtschaftliche Betriebsführung – und damit auch die pflanzliche Produktion – beeinflusst (siehe Abbildung 3-2).

Abbildung 3-2: Beeinflussung landwirtschaftlicher Betriebsführung durch klimatische und weitere Faktoren



Quelle: PANNELL (2010)

Nach PANNELL (2010) beginnt das Ausmaß der Unsicherheit mit der zukünftigen Höhe der Treibhausgasemissionen, welche durch den künftigen Umfang der wirtschaftlichen

Aktivitäten, die Entwicklung von neuen Energietechnologien und die Existenz und Wirksamkeit der globalen Klimapolitik beeinflusst wird. Ebenso besteht Unsicherheit über die Beziehung zwischen Treibhausgasemissionen und dem globalen Klima. So beeinflussen neben den anthropogen verursachten Treibhausgasen auch andere Faktoren, wie z. B. Vulkanismus das Klima.

Außerdem bestehen auch große Unterschiede in der Modellierung der globalen Klimaänderung aufgrund der Sensitivität verschiedener globaler Klimamodelle. Dies ist auf Unterschiede in der Art, wie physikalische Prozesse und Rückkopplungen in verschiedenen Modellen simuliert werden, zurückzuführen. Ebenso resultieren aus Unterschieden in der regionalen Prognose des Klimawandels durch verschiedene regionalisierte Klimamodelle weitere Unsicherheiten (vgl. CARTER et al. 1999).

Schließlich hängen Entscheidungen über die landwirtschaftliche Produktion und betriebliches Management auch vom lokalen Wetter ab, welches grundsätzlich unsicher ist. Sowie vom Wetter wird die landwirtschaftliche Betriebsführung auch noch von einer Vielzahl weiterer Faktoren, einschließlich der Marktpreise, der Verfügbarkeit neuer landwirtschaftlicher Technologien und der Anforderungen von lokaler Klimapolitik beeinflusst (PANNELL 2010).

Somit ist der Grad der Unsicherheit hinsichtlich der Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die pflanzliche Produktion relativ groß. Nach Auswertung der entsprechenden wissenschaftlichen Literatur hat es jedoch den Anschein, dass Prognosen über die Änderung des Ertragsrisikos geringeren Unsicherheiten unterliegen als Prognosen über die Änderung der Ertragspotentiale. Dies erscheint auch insofern plausibel, als dass nach SCHALLER und WEIGEL (2007) aufgrund des Temperaturanstiegs die Verdunstung zunimmt und der hydrologische Kreislauf beschleunigt wird, was die Zunahme von extremen Wetterlagen begünstigt. Dies führt zu einer stärkeren Wettervariabilität und erhöht somit das Ertragsrisiko im Pflanzenbau. Daher wird der Schwerpunkt der nachfolgenden Untersuchungen auf die Analyse der Veränderung des Ertragsrisikos gelegt.

3.1 Untersuchungsgegenstand

In dieser Untersuchung werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion exemplarisch an zwei Standorten im Südosten Bayerns (Mühldorf und Rosenheim) mit statistischen Methoden (Extremwertanalysen und multiple lineare Regressionsanalysen) untersucht. Zum einen sollen dabei Zusammenhänge zwischen Ertrags- und Wetterdaten ermittelt werden. Zum anderen sollen durch die Kopplung von Daten aus Klimamodellen mit den vermuteten Zusammenhängen Aussagen über den Einfluss des Klimawandels auf zukünftige Erträge abgeleitet werden. Insgesamt soll damit der Frage nachgegangen werden, ob mit dieser Methode Ertragsdaten unter zukünftigen Klimabedingungen abgeleitet werden können.

Der Landkreis Mühldorf befindet sich größtenteils im Agrargebiet „Tertiäres Hügelland (Süd)“, während der Landkreis Rosenheim an der Grenze der zwei Agrargebiete „Alpenvorland“ und „voralpines Hügelland“ bzw. im äußersten Süden im Alpenbereich liegt (LFL 2008). Im Landkreis Mühldorf kann auf ebenen, tiefgründigen, lehm- und lößreichen Böden bei Niederschlagsmengen von durchschnittlich ca. 850 mm pro Jahr sehr gut Ackerbau betrieben werden. Der Landkreis Rosenheim ist demgegenüber mit einer Höhenlage von 500 bis 1.850 m und Niederschlägen von durchschnittlich ca. 1.050 bis zu 2.000 mm pro Jahr im Alpenbereich bei einer fast ausschließlich möglichen Grünlandbewirtschaftung eher benachteiligt (vgl. DEMMELER et al. 2004). Der Grünlandanteil an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche beträgt im Landkreis Mühldorf 31 % und im Landkreis Rosenheim 77 % (LfSTAD 2008). Auf den Ackerbaustandorten im Landkreis Rosenheim wird mit einem Anteil von 48 % hauptsächlich Silomais angebaut, gefolgt von Weizen (15 % der AF), Klee und Klee gras (9 %) und Gerste (7 %) (LfStaD 2008). Im Landkreis Mühldorf dominiert ebenfalls der Silomais (31 %), gefolgt von Weizen (25 %), Körnermais (11 %), Gerste (9 %), und Winterraps (7 %) (LfSTAD 2008).

Der Untersuchungszeitraum geht für die einzelnen Untersuchungen jeweils über eine Periode von 30 Jahren, was einer von der World Meteorological Association (WMO) empfohlenen Klimanormalperiode entspricht (WMO 2006). Für die Extremwertanalysen und die Regressionsanalysen wird die historische Zeitscheibe von 1975 bis 2004 untersucht. Als Vergleichszeitraum für die Auswirkungen des Klimawandels in der Zukunft dient jeweils die Periode von 2070 bis 2099, für die Daten auf Tagesbasis aus einem regionalisierten Klimamodell zur Verfügung stehen.

3.2 Material

3.2.1 Ertragsdaten

Die Ertragsdaten beinhalten die Erträge von sechs Ackerkulturen (Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste, Silomais, Körnermais, Winterraps) und Grünland. Diese Daten wurden vom bayerischen Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung zur Verfügung gestellt und stellen die Ergebnisse der besonderen Erntermittlung und der Ernteberichtserstattung dar. Die Erträge steigen über den Untersuchungszeitraum bei allen Kulturarten an, was nach SOJA und SOJA (2003) auf mehrere Ursachen zurückzuführen ist. Dazu zählen vor allem

- züchterische Fortschritte,
- Mechanisierung und technischer Fortschritt,
- Erhöhung des Betriebsmitteleinsatzes (Mineraldünger, Pestizide) und die
- Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse im Pflanzenbau.

Für die weiteren Untersuchungen ist es notwendig, die Ertragsdaten von diesen Effekten zu bereinigen (vgl. dazu Kapitel 3.3.1.1).

3.2.2 Klimadaten

3.2.2.1 Historische Klimadaten

Die Klimadaten der Wetterstationen Mühldorf und Rosenheim wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in Offenbach bereitgestellt. Für den Untersuchungszeitraum von 1975 bis 2004 stehen damit Daten auf Tagesbasis über die mittlere Temperatur, die Maximal- und die Minimaltemperatur sowie den Niederschlag zur Verfügung. Um den Einfluss klimatischer Parameter auf die Erträge zu untersuchen, werden diese Klimadaten zu Klimavariablen aufbereitet, die als Prädiktoren in Regressionsmodellen eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.3.2.1).

3.2.2.2 Daten aus einem regionalisiertem Klimamodell

Für eine Zukunftszeitscheibe über die Jahre von 2070 bis 2099 stehen ebenfalls modellierte Tagesdaten über die mittlere Temperatur, die Maximal- und die Minimaltemperatur, den Niederschlag sowie den Trockenheitsindex EDI zur Verfügung. Diese Daten stammen aus einem regionalisierten Klimamodell, das vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU) erstellt wurde. Dabei wurden vor allem Extremwerte und Häufigkeit von Extremereignissen bezüglich des Niederschlags sowie der Temperatur untersucht. Die Datenbasis lieferte das Deutsche Klimaforschungsprogramm (DEKLIM) und es wurde ein mesoskaliges Modell der fünften Generation (MM 5) verwendet. Als Antriebsdaten für das regionale Modell wurden REMO 1° Daten aus dem globalen Klimamodell ECHAM4 / T106 genutzt. Dabei wurde der anthropogene Einfluss auf Grundlage des IPCC Emissionsszenarios B2 berücksichtigt (MARX et al. 2008).

Dieses Emissionsszenario geht von einer stetig wachsenden Weltbevölkerung und moderatem wirtschaftlichen Wachstum mit weniger raschem, dafür aber vielseitigerem technologischem Wandel aus. Der Schwerpunkt liegt auf lokalen und nachhaltigen Lösungsansätzen (vgl. NAKICENOVIC et al. 2000). Die prognostizierte mittlere globale Temperaturänderung beträgt in diesem Szenario im Zeitraum von 2090 bis 2099 verglichen mit 1980 bis 1999 bei der besten Schätzung 2,4 °C mit einer wahrscheinlichen Schwankungsbreite von 1,4 bis 3,8 °C (IPCC 2007). Im Vergleich mit dem günstigsten Szenario (B1) mit 1,8 °C Temperaturzunahme (1,1 °C bis 2,9 °C) und dem ungünstigsten Szenario (A1FI) mit 4,0 °C Temperaturzunahme (2,4 °C bis 6,4 °C) (IPCC 2007) ist das B2-Emissionsszenario als eher moderat einzustufen.

Aus den Tagesdaten dieses Klimamodells werden mit der in Kapitel 3.3.2.1 beschriebenen Vorgehensweise die entsprechenden Klimavariablen berechnet.

3.3 Methoden

3.3.1 Extremwertanalysen

Durch Extremwertanalysen soll in Anlehnung an SOJA und SOJA (2003) untersucht werden, ob und inwiefern besonders niedrige Erträge durch die meteorologische Situation in diesen Jahren erklärt werden kann. Es werden zunächst kulturartenspezifisch Jahre mit besonders geringen Erträgen identifiziert. Dazu wird eine lineare Trendbereinigung der Erträge der einzelnen Kulturen über die Zeitreihe von 1975 bis 2004 durchgeführt, um die Ertragsanomalien für jedes Jahr zu bestimmen. Daraufhin wird eine Filterung von Missjahren durchgeführt, indem die Ertragsanomalien hinsichtlich der Unterschreitung von festgelegten Streuungsmaßen (Perzentilgrenzen, siehe Kapitel 3.3.1.2) untersucht werden. Anschließend werden die Abweichungen bestimmter Klimaparameter in den Missjahren in Relation zu den durchschnittlichen klimatischen Werten im Zeitraum von 1975 bis 2004 gesetzt, um kritische Klimaparameter für Missernten zu identifizieren (siehe Kapitel 3.3.1.3). Des Weiteren werden Abweichungen der Temperatur und des Niederschlags in der Zukunftszeitscheibe von 2070 bis 2099 relativ zu den Jahren 1975 bis 2004 dargestellt, um die Tendenz kritischer Klimaparameter in der Zukunft bewerten zu können.

3.3.1.1 Lineare Trendbereinigung und Berechnung von Ertragsanomalien

Die Erträge werden vom langfristigen Trend der Ertragszunahme bereinigt, indem die absolute Ertragsabweichung durch Subtraktion des Erwartungswerts des Ertrages vom tatsächlich beobachteten Ertrag des jeweiligen Jahres ermittelt wird (vgl. SCHÖNWIESE 2006, S. 271). Der Erwartungswert des Ertrags wird bestimmt, indem zunächst ein linearer Trend für die Ertragsdaten der einzelnen Kulturen über den Untersuchungszeitraum von 30 Jahren berechnet wird. Der geschätzte Ertragstrend wird mit einem F-Test auf statistische Signifikanz untersucht. Dann wird mit folgender Formel für jedes Jahr berechnet, welcher Ertrag entsprechend der Entwicklung nach dem linearen Trend zu erwarten wäre (vgl. STERZEL 2007).

Formel 3-1: Berechnung des linearen Trends

$$Y_e = b * n - c$$

mit:

- Y_e = Erwartungswert des Ertrags
- b = Steigung der Trendgerade
- n = Jahr
- c = Konstante der Steigungsfunktion der Trendgeraden

Y_e stellt hierbei den Erwartungswert des Ertrags dar, also den Ertrag, der nach der Steigungsfunktion des linearen Trends über die Zeitreihe zu erwarten wäre. Er berechnet sich aus der jährlichen Ertragssteigerung in Dezitonnen pro Hektar und Jahr (b = Steigung der Trendgerade) multipliziert mit dem jeweiligen Jahr (n) abzüglich der Konstanten (c) der Steigungsfunktion der Trendgeraden.

Die Abweichung des tatsächlich beobachteten Ertrags vom Erwartungswert des Ertrags wird mittels folgender Formel ermittelt (vgl. STERZEL 2007).

Formel 3-2: Berechnung der Ertragsanomalie

$$Y_a = Y_b - Y_e$$

mit:

- Y_a = Ertragsanomalie
- Y_b = beobachteter Ertrag
- Y_e = Erwartungswert des Ertrags

Die Ertragsanomalie wird also aus dem tatsächlich beobachteten Ertrag, von dem der Erwartungswert des Ertrags subtrahiert wird, berechnet. Durch diese Methode lässt sich der langfristige Trend der Ertragszunahmen eliminieren, ohne dass die besonders großen Schwankungen nach oben oder nach unten auf Jahresbasis ignoriert werden. Nach STERZEL (2007) gibt es Einflüsse auf die Erträge, die sich durch eine lineare Trendbereinigung eliminieren lassen und solche, die in den Ertragsdaten enthalten bleiben (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Quantifizierbare und nicht quantifizierbare Einflüsse auf die Erträge

Einfluss	durch lineare Trendbereinigung von den Erträgen abgezogen	in den Ertragsdaten verbleibend
biologisch und chemisch	<ul style="list-style-type: none"> • Neue Sorten • Pflanzenschutz • Dünger 	<ul style="list-style-type: none"> • Schädlingsbefall • Pflanzenkrankheiten
mechanisch	<ul style="list-style-type: none"> • Technischer Fortschritt • Ausrüstung 	
Management	<ul style="list-style-type: none"> • Fruchtfolge • Feldbearbeitung 	
meteorologisch	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawandel 	<ul style="list-style-type: none"> • Wettervariabilität • Extremwetterereignisse

Quelle: Eigene Darstellung nach Sterzel (2007); verändert

Wie aus Tabelle 3-1 ersichtlich wird, verbleiben somit die meteorologischen Parameter, die zu Ertragsschwankungen führen in den Ertragsdaten. Für die weiteren Auswertungen wird in Anlehnung an SOJA und SOJA (2003) von der Hypothese ausgegangen, dass meteorologisch bedingte Einflüsse die Hauptursache der jährlichen Ertragsschwankungen darstellen. Dies erscheint insofern plausibel, als dass durch den steigenden Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft große Ertragsschwankungen aufgrund von Schädlingsbefall oder Pflanzenkrankheiten auf regionaler Ebene eher die Ausnahme darstellen.

Für eine Ackerkultur (Silomais im Landkreis Rosenheim) ließ sich kein linearer Trend feststellen. In diesem Fall werden die Ertragsanomalien durch die Subtraktion des Mittelwertes der Erträge über die Zeitreihe vom jeweils tatsächlich beobachteten Ertrag ermittelt.

3.3.1.2 Identifikation von Missjahren

Als Datenbasis für die weiteren Untersuchungen werden die absoluten Abweichungen der jeweiligen Erträge in den einzelnen Jahren von 1975 bis 2004 betrachtet. Zur Identifikation von Missjahren, also Jahren mit besonders großen negativen Ertragsabweichungen, wird das 10. Perzentil gewählt (vgl. SCHÖNWIESE 2006, S. 271). Perzentile bzw. Quantile sind Streuungsmaße, die geordnete Datenreihen in Gruppen unterteilen. Die Perzentilgrenze ist eine von der Streuung unabhängige Zahl und teilt die Daten, in diesem Fall die Ertragsanomalien so ein, dass ein bestimmter Prozentsatz über und ein bestimmter Prozentsatz unter dem entsprechenden Perzentil liegt (DULLER 2005, S. 104). Nach SOJA und SOJA (2003) sind Perzentile zur Identifizierung daher besser geeignet als Streuungsmaße, die von der spezifischen Varianz im Untersuchungszeitraum bei einer bestimmten Kulturart abhängen. Für die Jahre, die für bestimmte Kulturen als Missjahre identifiziert wurden, werden auch agrarmeteorologische Monatsberichte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für Südbayern zur Erklärung der niedrigen Erträge herangezogen (DWD, verschiedene Jahrgänge). Somit kann ein Eindruck über Ursachen für Missernten gewonnen werden. Falls nun beispielsweise Hagel die Ursache für eine Missernte ist, wird die Ertragsanomalie dieses Jahres für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen, da bei der Extremwertanalyse nur die Klimaparameter Temperatur und Niederschlag untersucht werden. Da sich die Datenbasis dadurch verringert, wird die jeweils nächstgrößte negative Ertragsabweichung für die Untersuchungen herangezogen.

3.3.1.3 Kritische Klimaparameter für Missernten

Nach der Identifizierung der negativen Extremjahre werden die Abweichungen von einzelnen Klimaparametern dieser Missjahre vom Durchschnittswert einer von der World Meteorological Association (WMO) empfohlenen 30-jährigen Klimanormalperiode (hier: 1975 bis 2004) verglichen. Dafür werden die Klimadaten Niederschlag und

Temperatur für die ertragsmäßig negativen Extremjahre hinsichtlich der Abweichung von der Referenzperiode untersucht. Für die Niederschlagswerte werden die relativen Abweichungen und für die Temperaturwerte die absoluten Abweichungen von der Referenz untersucht und grafisch dargestellt. Dabei werden diese Klimaparameter jeweils zu Wochenwerten aggregiert und dem Mittelwert der Wochenwerte des Untersuchungszeitraums gegenübergestellt.

3.3.2 Multiple Regressionsanalysen

Durch multiple lineare Regressionsanalysen soll der Zusammenhang zwischen Wetter und Ertrag quantifiziert werden. Es sollen kulturartenspezifisch diejenigen Klimavariablen (siehe Tabelle 3-2) bestimmt werden, welche einen Einfluss auf die interannuelle Ertragsvariabilität haben. Diese Methode wird gewählt, da sie bereits in mehreren ähnlichen Studien angewandt wurde, um den Einfluss von Klimavariablen auf die interannuelle Ertragsvariabilität zu bestimmen (vgl. CHMIELEWSKI und POTTS 1995, CHMIELEWSKI und KÖHN 1999, FRECKLETON et al. 1999, ALEXANDROV und HOOGENBOOM 2001, RODRÍGUEZ-PUEBLA et al. 2007, STERZEL 2007). Im Folgenden wird zunächst beschrieben, wie die Klimadaten zu Variablen für die Regressionsmodelle aufbereitet werden.

3.3.2.1 Aufbereitung der Klimadaten zu Variablen für Regressionsmodelle

Die in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Klimadaten werden zu Klimavariablen aufbereitet, die als Prädiktoren in Regressionsmodellen verwendet werden. Nachfolgend gibt Tabelle 3-2 einen Überblick über die verwendeten Klimavariablen.

Tabelle 3-2: Variablen im Regressionsmodell

Variable	zeitliche Auflösung
<ul style="list-style-type: none">• Durchschnittstemperatur (Temp)• Niederschlagssumme (Ns)• Trockenheitsindex (EDI)• Index für Hitzestress (HS)• Growing Degree Days (GDD)	<ul style="list-style-type: none">• Monatlich• März bis Juli• Juni bis August• Jahr (Saat bis Ernte)

Quelle: Eigene Darstellung

Die Klimavariablen werden für die verschiedenen Ackerkulturen jeweils monatlich für die Periode von der Saat bis zur Ernte und für Grünland für die Monate Januar bis Oktober berechnet. Des Weiteren werden die einzelnen Klimavariablen für die Zeiträume März bis Juli und Juni bis August sowie über das ganze Jahr (Saat bis Ernte) aggregiert. Nachfolgend zeigt Tabelle 3-3 einen Überblick über die Periode der Berechnungszeiträume der Variablen sowie die kulturartenspezifische Anzahl der potentiellen Variablen für die Regressionsmodelle.

Tabelle 3-3: Kulturartenspezifische Periode der Berechnungszeiträume der Variablen

	Anfangsmonat	Endmonat	Anzahl potentieller Variablen
Winterweizen	September	August	53
Wintergerste	September	Juli	49
Sommergerste	März	August	35
Silomais	April	Oktober	39
Körnermais	April	November	41
Winterraps	August	Juli	53
Grünland	Januar	Oktober	46

Quelle: Eigene Darstellung

Im Folgenden werden die einzelnen Klimavariablen kurz beschrieben und begründet, weshalb sie für die Regressionsmodelle berücksichtigt werden.

Durchschnittstemperatur und Niederschlagssumme

Sowohl die Temperatur als auch der Niederschlag stellen für das Pflanzenwachstum entscheidende Faktoren dar, da viele physiologische Prozesse innerhalb der Pflanze von diesen beiden Größen beeinflusst werden (vgl. Kapitel 2.2.1). Aus diesem Grund werden jeweils die monatlichen Durchschnittstemperaturen sowie die monatlichen Niederschlagssummen nach folgenden Formeln berechnet.

Formel 3-3: Berechnung der monatlichen Durchschnittstemperatur (*Temp*)

$$Temp = \frac{\left(\sum_{i=1}^n Temp_d \right)}{n}$$

mit:

$Temp_d$ = Tagesdurchschnittstemperatur

n = Anzahl der Tage eines Monats

Formel 3-4: Berechnung der monatlichen Niederschlagssumme (*Ns*)

$$Ns = \sum_{i=1}^n Ns_d$$

mit:

Ns_d = Tagesniederschlag

n = Anzahl der Tage eines Monats

Trockenheitsindex

Um den Einfluss von Trockenheit auf die Erträge darzustellen, ist es notwendig, neben der Niederschlagsmenge auch den zeitlichen Verlauf des Niederschlags zu berücksichtigen. Dazu wird der Trockenheitsindex EDI (Effective Drought Index) nach BYUN und WILHITE (1999) herangezogen, der ein Maß für den Trockenstress bei Pflanzen ist (MARX et al. 2008). Der Einfluss von Bodenfeuchte und Evapotranspiration wird hierbei berücksichtigt, indem länger zurückliegende Niederschlagsereignisse weniger stark gewichtet in die Berechnung eingehen (vgl. BYUN und WILHITE 1999). Dieser Index kann für beliebig lange Aggregationszeiträume berechnet werden, für mitteleuropäische Verhältnisse wird nach MARX et al. (2008) der sechswöchige EDI₄₂ gewählt.

Der EDI kann positive Werte annehmen, die eine Feuchteperiode anzeigen und negative Werte, was eine Trockenperiode bedeutet. Nach BYUN und WILHITE (1999) lässt sich eine schwere Trockenheit durch Tage mit einem EDI von kleiner gleich "-1,0" kategorisieren. Als Variable in die Regressionsmodelle gehen also die monatlich aufsummierten Werte des EDI ein, die kleiner gleich "-1,0" sind. Dazu wird nachfolgende Formel verwendet.

Formel 3-5: Berechnung der EDI-Werte für die Regressionsmodelle

$$EDI = \sum_{i=1}^n EDI \leq -1,0$$

mit:

$$\begin{aligned} EDI &= \text{Trockenheitsindex} \\ n &= \text{Anzahl der Tage eines Monats} \end{aligned}$$

Index für Hitzestress

Um den Hitzestress (HS) auf Pflanzen zu quantifizieren, werden Temperatursummen für diejenigen Tage innerhalb eines Monats berechnet, an denen die tägliche Maximaltemperatur 30 °C überschreitet. Dazu wird nachfolgende Formel verwendet.

Formel 3-6: Berechnung der Klimavariablen Hitzestress (HS)

$$HS = \sum_{i=1}^n T_{\max} \geq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

mit:

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \text{Tagesmaximaltemperatur} \\ n &= \text{Anzahl der Tage eines Monats} \end{aligned}$$

Growing Degree Days

Temperatursummen, ausgedrückt in Growing Degree Days (GDD), werden oftmals verwendet, um die Terminierung biologischer Prozesse zu beschreiben (MCMMASTER und WILHELM 1999). Die Formel, die hierfür verwendet wird, ist nachfolgend dargestellt.

Formel 3-7: Berechnung der Growing Degree Days (GDD)

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} - T_{\text{Basis}} \right)$$

mit:

T_{\max} = Tagesmaximaltemperatur

T_{\min} = Tagesminimaltemperatur

T_{Basis} = Basistemperatur

n = Anzahl der Tage von der Aussaat bis zur Ernte

T_{\max} und T_{\min} stellen hierbei die täglichen Maximal- und Minimaltemperaturen dar. T_{Basis} ist die Basistemperatur, unterhalb derer nur geringes Pflanzenwachstum herrscht. Die Basistemperatur variiert zwischen den einzelnen Pflanzentypen. Vereinfachend wird für C4-Pflanzen als Basistemperatur 10 °C gewählt, für C3-Pflanzen 5 °C. Außerdem wird auch eine obere Temperaturgrenze eingeführt. Es gilt die Bedingung: wenn $[(T_{\max} + T_{\min})/2] < T_{\text{Basis}}$ ist, dann gilt $[(T_{\max} + T_{\min})/2] = T_{\text{Basis}}$. Falls die Maximaltemperatur größer 25 °C (C3-Pflanzen) beträgt bzw. größer 30 °C (C4-Pflanzen), dann geht jeweils dieser obere Wert in die Kalkulation mit ein, darüber liegende Temperaturen werden abgeschnitten. Es gilt die Bedingung: wenn $T_{\max} > 25$ °C bzw. 30 °C, dann $T_{\max} = 25$ °C bzw. 30 °C. Das liegt daran, dass oberhalb dieser Temperaturen das Pflanzenwachstum ebenfalls eingeschränkt wird (vgl. MCMMASTER und WILHELM 1999).

3.3.2.2 Methodik der multiplen Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren, mit welchem die Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen ermittelt werden. Allgemein formuliert wird eine metrische Variable Y betrachtet, die von einer zweiten Variablen x abhängt. Im eindimensionalen Fall wird von einer einfachen linearen Regressionsanalyse gesprochen, in Dimensionen größer gleich zwei von einer multiplen Regressionsanalyse. Grafisch betrachtet wird durch die Regressionsanalyse einer Punktwolke eine Regressionsgleichung angepasst. Setzt man die Gleichung einer Geraden voraus, dann wird von einer linearen Regression gesprochen (vgl. Formel 3-8).

Formel 3-8: Multiple lineare Regression

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon$$

mit:

- Y = abhängige Variable oder Zielvariable
- a = Regressionskonstante
- b_i = Regressionskoeffizienten ($i = 1, 2, \dots, n$)
- x_i = unabhängige Variablen ($i = 1, 2, \dots, n$)
- ε = Zufallsfehler

Die Variable Y wird dabei als Zielvariable bezeichnet und die unabhängige(n) Variable(n) x_i als Einflussgröße(n). Die Parameter a und b_i können aus den Stichprobenwerten nach der Methode der kleinsten Quadrate (Ordinary Least Squares, OLS) geschätzt werden, bei der die Summe der quadratischen Abweichungen der einzelnen Datenpunkte zur Regressionsgeraden minimiert wird. Mit ε wird der Zufallsfehler bzw. das Residuum des Regressionsmodells bezeichnet (SACHS 2004, S. 294 ff., SCHÖNWIESE 2006, S. 163 ff., KÖHLER et al. 2007, S. 195 ff. und S. 225 ff.).

3.3.2.3 Methode zur Auswahl von Prädiktoren

Es wird zunächst ein Regressionsmodell mit ausgewählten Variablen aufgestellt („reduziertes Modell“) (vgl. KÖHLER et al. 2007, S. 230). Aus der Fülle der potentiellen Variablen können somit bereits im Vorfeld einige Variablen aus pflanzenphysiologischen Gründen ausgeschlossen werden. So wird beispielsweise der Ertrag von Winterweizen nicht mehr durch Hitzestress im Erntemonat beeinträchtigt, weshalb diese Variable nicht in das Modell aufgenommen wird. Bei der Durchführung der multiplen Regressionsanalyse wird nach statistischen Kriterien entschieden, ob eine Variable im Modell verbleibt oder nicht. Dazu wird zum einen die Globalgüte des Regressionsmodells mit einem F-Test geprüft. Zum anderen wird die Änderung des Bestimmtheitsmaßes betrachtet sowie möglicherweise auftretende Multikollinearität. Durch schrittweises Entfernen einzelner ausgewählter Variablen („von oben abbauen“) wird dann das Regressionsmodell vervollständigt (vgl. KÖHLER et al. 2007, S. 230).

3.3.2.4 Modellvalidierung

Ein wichtiger Schritt bei der Regressionsanalyse ist die Modellvalidierung. Hierbei wird überprüft, ob das Modell eine gute Beschreibung des Zusammenhangs liefert und somit von hoher Güte ist. Dabei gibt es verschiedene Gütekriterien bzw. Schritte, die im Folgenden beschrieben werden.

Bestimmtheitsmaß (R^2)

Ein Kriterium für die Modellgüte ist das Bestimmtheitsmaß, welches zur Beurteilung der globalen Güte der Anpassung des Regressionsmodells dient. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen Ziel- und Einflussgröße und gibt Auskunft darüber, wie hoch der Anteil der durch das Regressionsmodell erklärten Varianz an der Gesamtvarianz ist. Je näher der Wert 1 erreicht wird, desto größer ist der Anteil der erklärten Varianz durch das Regressionsmodell (PRECHT und KRAFT 1993, S. 282; ECKEY et al. 2004, S. 49; BACKHAUS et al. 2006, S. 64 ff.). Nur Modelle mit einem hohen Wert des Bestimmtheitsmaßes sind geeignet, zukünftige Ertragsschwankungen erfolgreich zu simulieren (vgl. STERZEL 2007).

visuelle Begutachtung

Nach ECKEY et al. (2004), S. 49 können verschiedene graphische Darstellungen einen visuellen Eindruck über die Güte der Anpassung des Regressionsmodells vermitteln. Daher wurden die durch das Regressionsmodell berechneten Ertragsschwankungen sowie die beobachteten Ertragsschwankungen vergleichend visuell begutachtet, um festzustellen, ob das jeweilige Modell geeignet ist, die tatsächlich beobachteten Ertragsanomalien vorherzusagen.

Überprüfung auf Multikollinearität

Multiple lineare Regressionsgleichungen können durch Multikollinearität in einem starken Maß beeinträchtigt werden. Multikollinearität tritt auf, wenn zwei oder mehr erklärende Variablen stark miteinander korrelieren. Um dies auszuschließen, wurden entsprechende Tests durchgeführt. Eine Möglichkeit dabei ist, Korrelationsmatrizen zwischen den unabhängigen Variablen anzufertigen. Hohe Korrelationskoeffizienten geben einen Hinweis auf Multikollinearität. Problematisch hierbei ist allerdings, dass bei der Betrachtung der paarweisen Korrelation nur Abhängigkeiten zwischen zwei Variablen entdeckt werden, während Multikollinearität, die durch eine Linearkombination mehrerer Variablen entsteht, nicht aufgedeckt wird. Diese kann jedoch durch die Berechnung des Varianzinflationsfaktors (VIF) identifiziert werden. Hohe Werte lassen dann auf Multikollinearität schließen, wobei in der Regel VIF-Werte größer als 10 als kritisch erachtet werden (vgl. BACKHAUS et al. 2006, S. 89 ff., DIETZE 2007, S. 72). Falls Variablen stark untereinander korrelierten bzw. der jeweilige VIF-Wert größer als 10 war, werden die entsprechenden Variablen aus der Regressionsgleichung entfernt.

Residuenanalyse

Nachdem ein Modell an die Daten angepasst wurde, wird untersucht, ob dieses Modell die Daten genügend gut erklärt. Dazu wird eine Residuenanalyse durchgeführt. Als Residuum wird die Differenz zwischen einer Beobachtung und dem geschätzten Wert bezeichnet. Da die Residuen Ergebnis des Verfahrens sind, kann die Prüfung der Annahmen erst im Nachhinein erfolgen. Damit ein Regressionsmodell zuverlässig ist, müssen die Residuen nach PRECHT und KRAFT (1993), S. 299 ff. folgende Annahmen erfüllen:

- Residuen sind normalverteilt (Überprüfung hier mit dem Shapiro-Wilk-Test),
- Residuen sind homoskedastisch, d.h. die Varianz der Residuen ist konstant (Überprüfung hier mit dem Goldfeld-Quandt-Test),
- Residuen sind nicht autokorreliert, d.h. aufeinander folgende Residuen korrelieren nicht miteinander (Überprüfung hier mit dem Durbin-Watson-Test),
- Residuen haben den Erwartungswert 0.

3.3.3 Simulation von zukünftigen Ertragsschwankungen

Regressionsmodelle, bei denen die Analyse der Residuen sowie der Bestimmtheitsmaße auf eine hohe Modellgüte schließen lassen, werden zur Simulation zukünftiger Ertragsschwankungen herangezogen. Dabei werden zunächst die in Kapitel 3.3.2.1 beschriebenen Klimavariablen aus den Rohdaten des in Kapitel 3.2.2.2 beschriebenen regionalisierten Klimamodells berechnet. Diese Variablen werden daraufhin in die für die jeweilige Kultur ermittelten Regressionsgleichungen eingesetzt. Somit können Aussagen über die interannuelle Ertragsvariabilität im zukünftigen Betrachtungszeitraum getroffen werden.

3.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Extremwertanalysen vorgestellt, wodurch qualitative Aussagen über zukünftige Klimafolgen abgeleitet werden können. Daraufhin werden die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalysen dargestellt, um zum einen den historischen Zusammenhang zwischen Wetter und Ertrag zu quantifizieren und zum anderen Aussagen über die Beeinflussung der Ertragsvariabilität durch den Klimawandel abzuleiten.

3.4.1 Ergebnisse der Extremwertanalysen

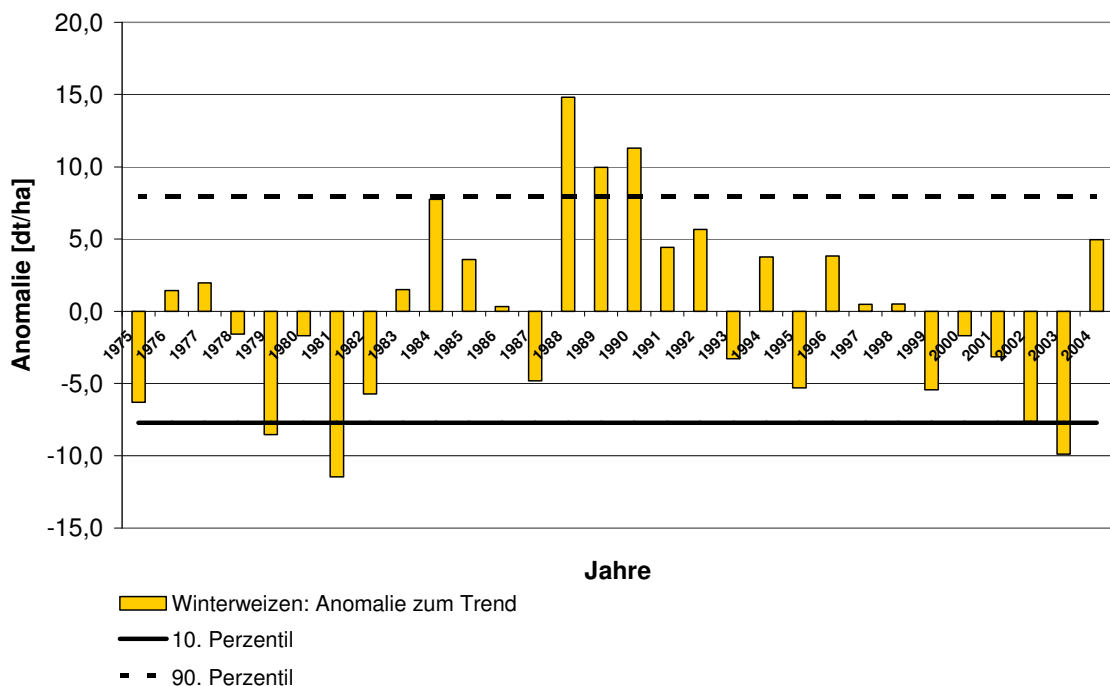
Das Ziel der Extremwertanalysen ist es zu klären, ob und inwiefern besonders niedrige Erträge durch die meteorologische Situation in diesen Jahren erklärt werden kann. Zunächst werden die Ertragsanomalien im Zeitverlauf für die historische Zeitscheibe von 1975 bis 2004 dargestellt. Es wird gezeigt in welchen Jahren an den beiden Standorten (Mühldorf und Rosenheim) kulturartenspezifisch Missjahre aufgetreten sind.

Anhand der Beschreibung des Witterungsverlaufs in den entsprechenden Jahren aus agrarmeteorologischen Monatsberichten des DWD werden bereits mögliche Ursachen für Missernten verbal aufgezeigt. Daraufhin werden die Abweichungen der Klimaparameter in den Missjahren relativ zum Durchschnitt der Klimaparameter in der Periode von 1975 bis 2004 dargestellt, um kritische Klimaparameter zu identifizieren. Des Weiteren werden Abweichungen der Temperatur und des Niederschlags in der Zukunftszeitscheibe von 2070 bis 2099 relativ zu den Jahren 1975 bis 2004 dargestellt, um die Tendenz kritischer Klimaparameter in der Zukunft bewerten zu können.

3.4.1.1 Ertragsanomalien im Zeitverlauf

Durch die Subtraktion des signifikanten Trends vom tatsächlichen Ertrag des jeweiligen Jahres werden die Ertragsanomalien bestimmt (siehe Kapitel 3.3.1.1). Die Residuen stellen die interannuelle Schwankung der Erträge von den erwarteten Werten bzw. die Ertragsvariabilität dar (siehe Abbildung 3-3).

Abbildung 3-3: Anomalien der trendbereinigten Winterweizenerträge (Lkr. Mühldorf)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-3 zeigt die Ertragsanomalien im Zeitraum von 1975 bis 2004 beispielhaft für die Kultur Winterweizen im Landkreis Mühldorf. Da es sich um die Durchschnittserträge auf Landkreisebene handelt, ist die Schwankung der Erträge geringer als auf betrieblicher oder schlagbezogener Ebene. Das liegt zum einen daran, dass extreme Wetterereignisse oft nur sehr lokal begrenzt sind und somit Ertragsverluste in einer festgelegten Region teilweise ausgeglichen werden können. Zum anderen führen auf der

betrieblichen Ebene noch eine Vielzahl weiterer Faktoren, wie z. B. Sortenwahl, Saattermin, Düngestrategie oder Vorfruchteffekte dazu, dass die Ertragsschwankungen dort größer ausfallen. In Abbildung 3-3 sind außerdem das 10. Perzentil und das 90. Perzentil abgebildet. Ein Jahr gilt nun als ein Missjahr, wenn eine Ertragsanomalie das 10. Perzentil unterschreitet. Somit gelten hier die Jahre 1979, 1981 und 2003 als Missjahre. Die Abbildungen für die weiteren untersuchten Kulturen befinden sich im Anhang (siehe Kapitel 9.1). Die Untersuchungen machen auch deutlich, dass Missernten sowohl kulturartenspezifisch als auch regional recht unterschiedlich auftreten. Das ist sowohl auf die im Jahresverlauf zeitlich versetzten phänologischen Phasen der einzelnen Kulturen als auch auf den Einfluss lokaler Wetterereignisse zurückzuführen.

Nachfolgend wird anhand agrarmeteorologischer Monatsberichte (DWD, verschiedene Jahrgänge) aufgezeigt, welche Witterungseinflüsse mögliche Ursachen für Missernten sind (vgl. Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Verbale Erklärung von Missernten

1976	<ul style="list-style-type: none">• Trockenheit
1979	<ul style="list-style-type: none">• nass-kalte Witterung• teilweise Lagerschäden durch Starkregen
1981	<ul style="list-style-type: none">• sehr kalte Witterung im Januar/Februar• Lagerschäden durch Starkregen• Hagelschäden• Juli sehr nass
1987	<ul style="list-style-type: none">• Lagerschäden durch Starkregen• Hagelschäden
1995	<ul style="list-style-type: none">• kalte und nasse Witterung
1996	<ul style="list-style-type: none">• Lagerschäden durch Starkregen• Hagelschäden
1999	<ul style="list-style-type: none">• Auswinterung
2002	<ul style="list-style-type: none">• hohe und starke Niederschläge
2003	<ul style="list-style-type: none">• Auswinterung• Trockenheit und Hitze

Quelle: DWD (verschiedene Jahrgänge)

Tabelle 3-4 beschreibt Witterungsverläufe, die bei manchen Kulturen zu Missernten führten. Dabei wird deutlich, dass Missjahre entweder überdurchschnittlich nass und kalt waren oder dass es Jahre gab, die durch überdurchschnittliche Hitze oder Trockenheit gekennzeichnet waren. Auch extreme Wetterereignisse, wie z. B. Hagel, führten zu Missernten. Da Hagelereignisse nicht durch die Klimaparameter Temperatur oder Niederschlag erfasst werden können, wird die Ertragsanomalie dieses Jahres wie in Kapitel 3.3.1.2 beschrieben für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen und

die jeweils nächstgrößte negative Ertragsabweichung für die Untersuchungen herangezogen. Folglich wird bei Winterweizen im Landkreis Mühldorf das Jahr 1981 ausgeschlossen und durch das Jahr 2002 ersetzt (siehe Abbildung 3-3).

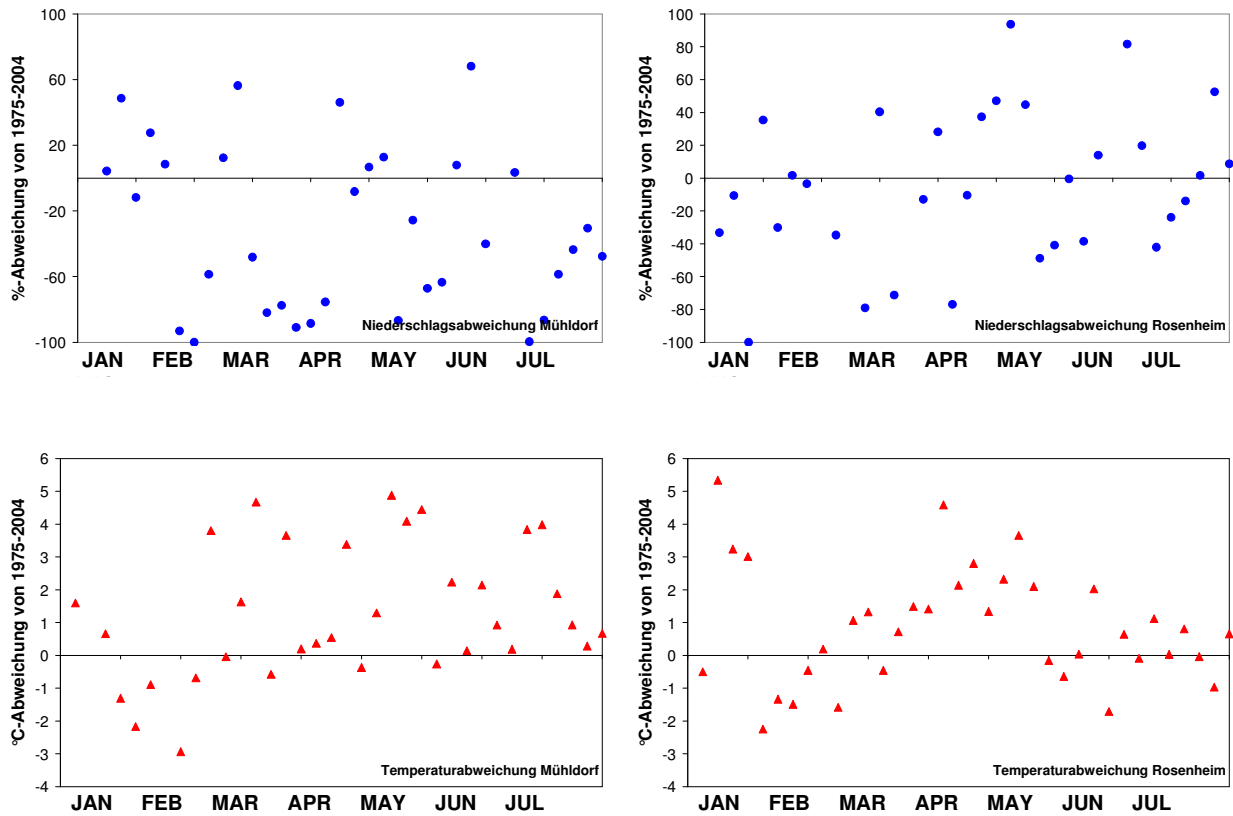
3.4.1.2 Abweichungen der Klimaparameter in den Missjahren

Die in den Extremwertanalysen identifizierten negativen Missjahre wurden hinsichtlich der Abweichung einzelner Klimaparameter (Niederschlag und Temperatur) vom Durchschnittswert der Jahre 1975 bis 2004 untersucht. Nachfolgend werden exemplarisch die Ergebnisse für die Kulturen Winterweizen und Silomais an den Standorten Mühldorf und Rosenheim dargestellt. Die Ergebnisse der anderen Kulturen finden sich im Anhang (siehe Kapitel 9.1).

Winterweizen

Nachfolgend zeigt Abbildung 3-4 die Abweichung des Niederschlags (oben links und oben rechts) und der Temperatur (unten links und unten rechts) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 für die Kultur Winterweizen. Die einzelnen Datenpunkte stehen jeweils für die über eine Woche aggregierten Klimaparameter. Die Abszisse repräsentiert den Mittelwert der Wochenwerte der Jahre 1975 bis 2004. Eine Abweichung des Wochenwertes der Klimaparameter nach oben bzw. nach unten steht dann für eine Temperatur- oder Niederschlagabweichung nach oben bzw. nach unten für den Schnitt der Missjahre in der jeweiligen Woche. Die Klimaparameter sind von Beginn des Kalenderjahres bis zum Erntemonat dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist der Standort Mühldorf und auf der rechten Seite der Standort Rosenheim dargestellt.

Abbildung 3-4: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Winterweizen)



Quelle: Eigene Berechnungen

Winterweizen hat nach SCHALLER und WEIGEL (2007) im Vergleich zu anderen Getreidearten relativ hohe Standortansprüche. Klimatisch geeignet sind vor allem wintermilde, sommerwarme und strahlungsintensive Klimate mit einer günstigen Niederschlagsverteilung während der Vegetationsperiode. Die kritischste Periode hinsichtlich der Wasserversorgung ist demnach die Zeit zwischen Schossen und Blüte. Abbildung 3-4 gibt einen Hinweis darauf, dass vor allem ein Mangel an Niederschlag für Missernten bei Winterweizen verantwortlich ist. Dies gilt insbesondere für sensible phänologische Phasen, wie z. B. die Blütezeit. In den Missjahren tritt vor allem in den Monaten März und April Wassermangel auf.

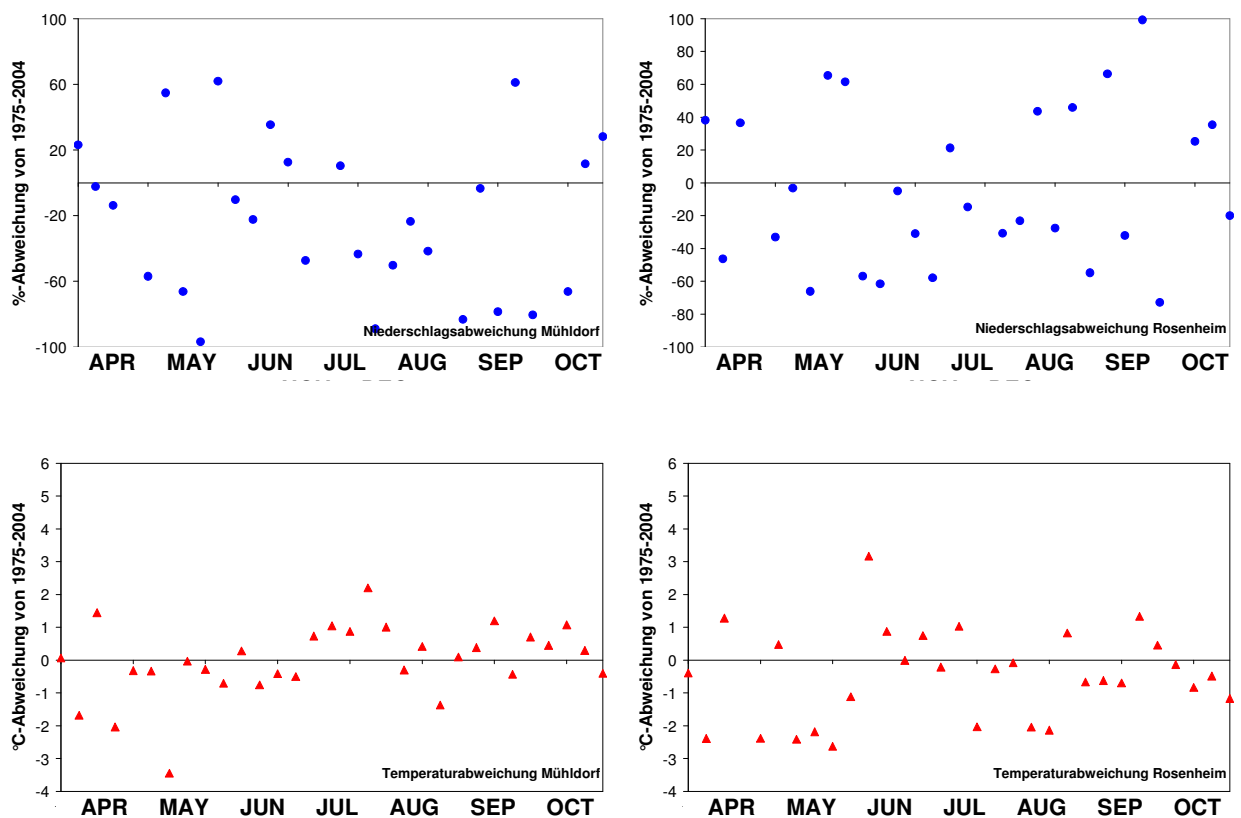
Auch die Temperatur ist ein entscheidender Klimafaktor für die Entwicklung des Winterweizens. Vorteilhaft sind kühle Frühjahrstemperaturen, während Hitze während der Kornreife die Kornzahl und Kornausbildung beeinträchtigt (SCHALLER und WEIGEL 2007). Besonders kalte Temperaturen im Februar bedeuten nach SOJA und SOJA (2003) eine Verlangsamung der Bodenerwärmung im Frühjahr und unter Umständen auch eine längere Dauer der Schneedecke, was eine Verkürzung der für Wachstum und Biomasseakkumulation zur Verfügung stehenden Wachstumsperiode bedeuten kann. Auch die Gefahr der Auswinterung besteht. Wie Abbildung 3-4 (vor allem für den

Standort Mühldorf) zeigt, sind in den Missjahren im Februar deutliche Abweichungen der Temperatur von der Referenzperiode zu beobachten. Nach SOJA und SOJA (2003) sind vor allem die Februartemperaturen für die Entwicklung eines Jahres zum Missjahr relevant. Im weiteren Verlauf werden in den Missjahren vor allem Abweichungen der Temperatur nach oben deutlich. Nach SCHALLER und WEIGEL 2007 können bereits Temperaturen oberhalb von 28 °C zu Hitzestress und damit zu Ernteeinbußen bei Weizen führen.

Silomais

Nachfolgend zeigt Abbildung 3-5 die Abweichung von Niederschlag und Temperatur der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 für die Kultur Silomais.

Abbildung 3-5: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Silomais)



Quelle: Eigene Berechnungen

Mais ist eine wärmeliebende und frostempfindliche Pflanze. Er keimt erst ab einer Bodentemperatur von ca. 8 °C und wächst dann ab einer Bodentemperatur von ca. 10 °C relativ rasch. Der Wasserbedarf ist bei Mais als C4-Pflanze mit einem Transpirationskoeffizienten von 200 l kg⁻¹ Trockenmasse geringer als bei den Getreidesorten des C3-

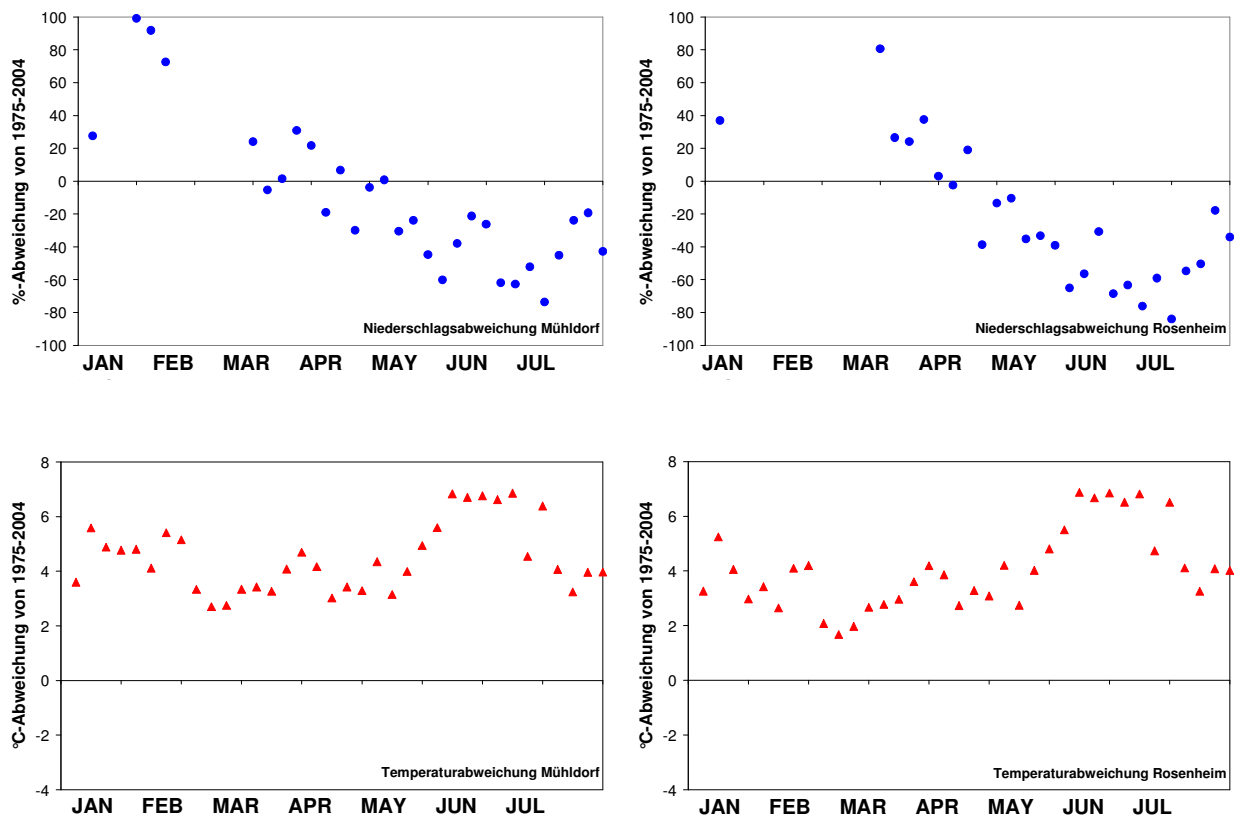
Typs, allerdings kann Wassermangel vor allem im Juli und August zu Ertragseinbußen führen (SCHALLER und WEIGEL 2007). Auch SOJA und SOJA (2003) weisen auf die Empfindlichkeit von Mais gegenüber sommerlichen Trockenperioden hin. Wie Abbildung 3-5 zeigt, ist das Niederschlagsdefizit im Landkreis Mühldorf in den Monaten Juli und August wahrscheinlich eine Ursache für Missernten. Besonders deutlich werden die Auswirkungen von zu wenig Niederschlag auch bei Grünland (siehe Kapitel 9.1). Im Landkreis Rosenheim hingegen waren andere Faktoren ein Auslöser für Missernten. Beim Betrachten des Temperaturverlaufs fällt auf, dass bei beiden Standorten zu Vegetationsbeginn niedrige Temperaturen vorgeherrscht haben, worin eine weitere Ursache für Missernten liegt.

3.4.1.3 Einfluss des Klimawandels auf Klimaparameter

Im Folgenden werden die durch den Klimawandel prognostizierten Änderungen der Klimaparameter Niederschlag und Temperatur für den Durchschnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zum Durchschnittswert der Jahre von 1975 bis 2004 dargestellt. Dabei wird im Folgenden beispielhaft auf die für die Kulturen Winterweizen und Silomais relevanten Anbauzeiträume eingegangen. Die Darstellungen für die weiteren Ackerkulturen und Grünland unterscheiden sich hinsichtlich des Anbauzeitraums und befinden sich im Anhang (siehe Kapitel 9.1). Es werden jeweils die Klimaparameter von Beginn des Kalenderjahres bis zum Erntemonat dargestellt.

Nachfolgend zeigt Abbildung 3-6 die Abweichung von den Durchschnittswerten von Niederschlag und Temperatur im Zeitraum von 2070 bis 2099 von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 bezogen auf die Kultur Winterweizen. Die einzelnen Datenpunkte stehen jeweils für den Durchschnitt der Klimaparameter einer Woche im Zeitraum 2070 bis 2099. Die Abszisse repräsentiert den Mittelwert der Wochenwerte der Jahre 1975 bis 2004. Eine Abweichung des Wochenwertes der Klimaparameter nach oben bzw. nach unten steht dann für eine Niederschlags- oder Temperaturabweichung nach oben bzw. nach unten für die jeweilige Woche im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099.

Abbildung 3-6: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Winterweizen)



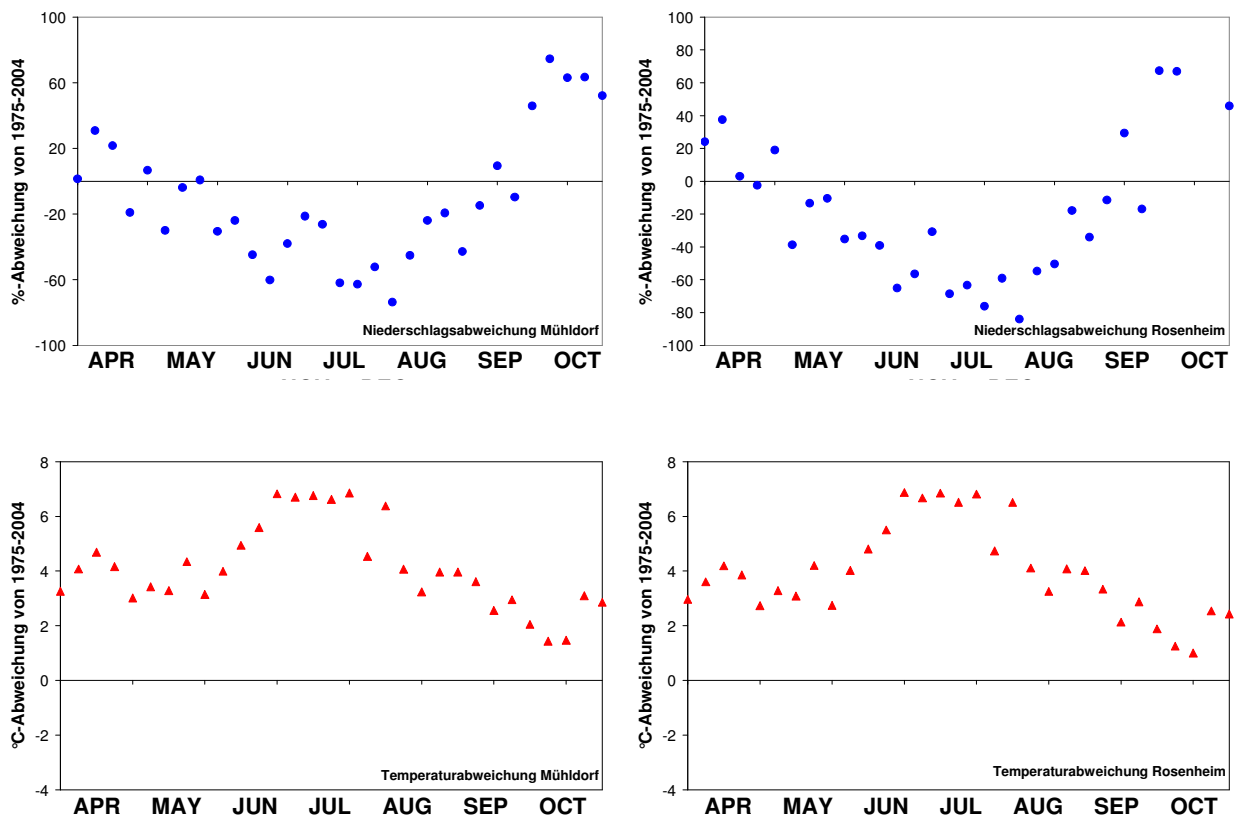
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-6 zeigt, dass es in den Wintermonaten zu einer Niederschlagszunahme kommt, während etwa ab dem Monat Mai der durchschnittliche Wochenniederschlag in den Jahren 2070 bis 2099 niedriger ist als in der Referenzperiode der Jahre 1975 bis 2004. Die Niederschläge in den Wintermonaten hingegen sind teilweise über doppelt so hoch als der Niederschlag im Referenzzeitraum. Das bedeutet, dass es zum einen zu Ertragsminderungen aufgrund eines Niederschlagsdefizits in den Sommermonaten kommen kann. Zum anderen können Starkregenereignisse in den Wintermonaten die zu diesem Stadium noch gering entwickelten Pflanzen schädigen. Des Weiteren besteht die Gefahr der Erosion und der Verschlämmung des Bodens. Die durchwegs höheren Temperaturen im Zukunftszeitraum können vor allem während sensibler phänologischer Phasen die Ertragsleistung von Winterweizen beeinträchtigen. Da nach SCHALLER und WEIGEL (2007) Winterweizen, wie die meisten Getreidearten Mitteleuropas über Temperatursummen determiniert ist, werden Entwicklungsstadien schneller durchschritten, was zu Ertragseinbußen führen kann. Die Standorte Mühldorf und Rosenheim weisen allerdings gegenwärtig eine vergleichsweise geringe Jahresdurchschnittstemperatur auf, weshalb das Ertragsniveau aufgrund der Temperaturzunahme auf diesen Standorten, von Hitzewellen abgesehen, nicht zu sehr abnehmen sollte und

teilweise sogar von den wärmeren Temperaturen profitieren kann. Über geeignete Sortenwahl und eine Anpassung der Aussattermine können sich Landwirte an diese veränderten klimatischen Bedingungen anpassen.

Nachfolgend zeigt Abbildung 3-7 die Abweichung von den Durchschnittswerten von Niederschlag und Temperatur im Zeitraum von 2070 bis 2099 von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 bezogen auf die Kultur Silomais.

Abbildung 3-7: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Silomais)



Quelle: Eigene Berechnungen

Auch hier zeigt sich eine Verschiebung der Saisonalität der Niederschläge mit einer Zunahme im Frühjahr und Herbst und einer Abnahme in den Sommermonaten. Die Niederschlagsdefizite ab dem Monat Mai können sich hier ertragsmindernd auswirken. Die Temperaturen sind im Zukunftszeitraum gegenüber der Referenzperiode deutlich erhöht. Mais ist als C4-Pflanze wärmeliebend und frostempfindlich. Demzufolge dürfte der Mais hiervon profitieren, allerdings unter der Voraussetzung, dass genügend Wasser zur Verfügung steht.

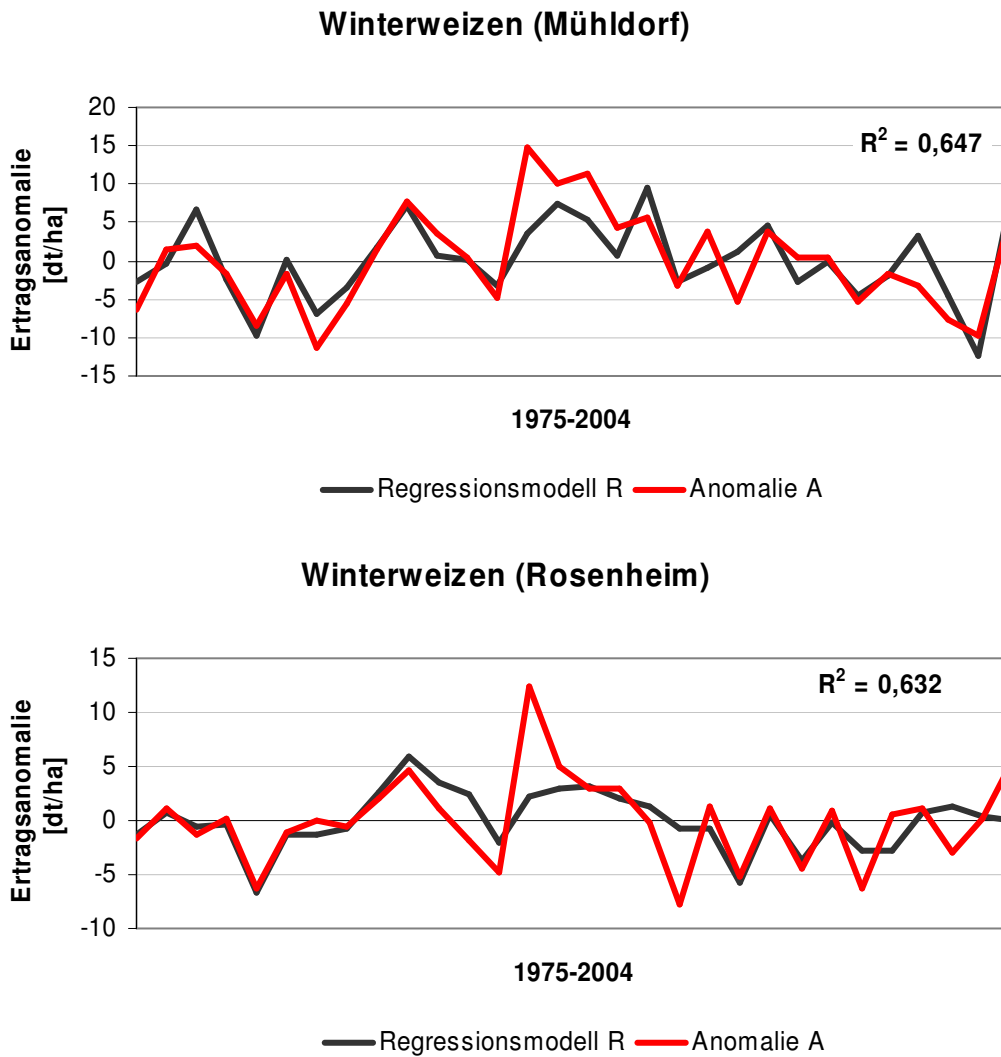
Der hier verwendete Ansatz lässt zwar nur eine qualitative Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen zu. Insgesamt

deuten die Ergebnisse jedoch darauf hin, dass das Ertragsrisiko unter zukünftigen Klimabedingungen wohl zunehmen wird.

3.4.2 Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen

Das Ziel der multiplen linearen Regressionsanalysen ist es, Ertragsschwankungen durch den Witterungsverlauf zu erklären. Dabei soll der Einfluss von Klimavariablen auf die interannuelle Ertragsvariabilität bestimmt und damit der Zusammenhang zwischen Wetter und Ertrag quantifiziert werden. Des Weiteren wird untersucht, inwieweit eine Simulation von Ertragsanomalien mit Daten aus Klimamodellen möglich ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Regressionsanalysen exemplarisch für die Kulturen Winterweizen und Silomais an den Standorten Mühldorf und Rosenheim dargestellt. Die Ergebnisse für die weiteren untersuchten Kulturen befinden sich im Anhang (siehe Kapitel 9.1). Zunächst zeigt nachfolgend Abbildung 3-8 die durch das Regressionsmodell geschätzten Ertragsanomalien und die tatsächlich beobachteten Ertragsanomalien für die Kultur Winterweizen an den Standorten Mühldorf und Rosenheim.

Abbildung 3-8: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Winterweizen)

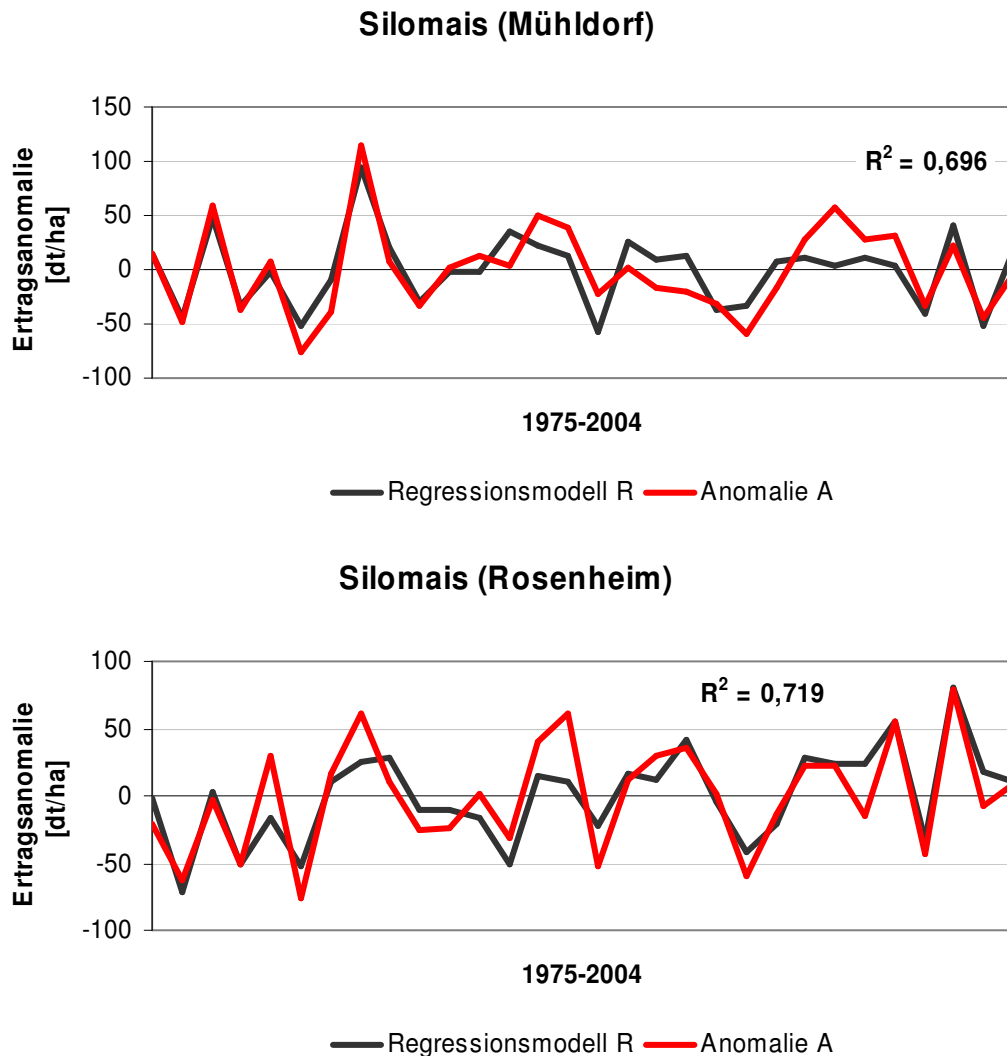


Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-8 zeigt, dass durch das Regressionsmodell von Winterweizen für den Landkreis Mühldorf 64,7 % der Gesamtvariation der Daten und für den Landkreis Rosenheim 63,2 % erklärt werden können.

Nachfolgend zeigt Abbildung 3-9 die Ergebnisse für die Kultur Silomais an den Standorten Mühldorf und Rosenheim.

Abbildung 3-9: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Silomais)



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-9 zeigt, dass die Ertragsschwankungen von Silomais augenscheinlich recht gut durch die Regressionsmodelle abgebildet werden können. Wie das Bestimmtheitsmaß anzeigt, erklärt das Regressionsmodell für den Landkreis Mühldorf 69,6 % der Gesamtvariation der Daten und für den Landkreis Rosenheim 71,9 %.

Nachfolgend zeigt Tabelle 3-5 eine Übersicht über statistische Parameter der berechneten Regressionsmodelle für die untersuchten Kulturen an den Standorten Mühldorf und Rosenheim. Eine zusammenfassende Übersicht der Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen findet sich im Anhang (siehe Kapitel 9.2)

Tabelle 3-5: Statistische Parameter der Regressionsmodelle

Kultur	Standort	Anzahl unabhäng. Variablen	R ²	Shapiro-Wilk-Test ¹⁾	Goldfeld-Quandt-Test ²⁾	Durbin-Watson-Test ³⁾	EW ⁴⁾ der Residuen
WW	MÜ	11	0,65	0,97	0,63	1,90	0,0
	RO	4	0,63	0,97	1,02	1,93	0,0
WG	MÜ	7	0,53	0,90 ^{a)}	0,35	1,55	0,0
	RO	5	0,51	0,98	1,62	1,83	0,0
SG	MÜ	8	0,52	0,96	1,21	1,42 ^{c)}	0,0
	RO	9	0,61	0,98	4,92 ^{b)}	2,13	0,0
SM	MÜ	6	0,69	0,95	2,43 ^{b)}	1,62	0,0
	RO	7	0,72	0,97	0,17	2,20	0,0
KM	MÜ	10	0,61	0,98	0,79	1,57	0,0
	RO	7	0,53	0,96	0,81	1,44 ^{c)}	0,0
WR	MÜ	7	0,72	0,93	0,39	1,71	0,0
	RO	4	0,48	0,99	1,46	1,25 ^{c)}	0,0
GL	MÜ	5	0,72	0,91 ^{a)}	1,25	1,98	0,0
	RO	5	0,76	0,96	0,69	2,06	0,0

¹⁾ H₀: „Residuen sind normalverteilt“; H₀ wird verworfen, wenn der Wert der Teststatistik kleiner ist als der kritische Tabellenwert

^{a)} kritischer Tabellenwert bei $\alpha = 0,05$ wurde unterschritten; H₀ wird verworfen, d.h. die Residuen sind nicht normalverteilt

²⁾ H₀: „Residuen sind homoskedastisch“; H₀ wird verworfen, wenn der berechnete GQ-Wert größer ist als der kritische F-Wert der F-Verteilung

^{b)} kritischer Tabellenwert bei $\alpha = 0,05$ wurde überschritten; H₀ wird verworfen, d.h. die Residuen sind heteroskedastisch

³⁾ wenn der Wert des Durbin-Watson-Tests im Bereich von 2 liegt, dann sind die Residuen nicht autokorreliert

^{c)} Wert weicht um mehr als 0,5 von 2 ab, d.h. es kann schwache Autokorrelation vermutet werden

⁴⁾ EW = Erwartungswert

Quelle: Eigene Berechnungen

Wie aus Tabelle 3-5 ersichtlich ist, schwankt die Anzahl der unabhängigen Variablen zwischen den einzelnen Regressionsmodellen zwischen vier und elf Variablen.

Das Bestimmtheitsmaß (R²) ist als der Quotient aus erklärter Varianz und Gesamtvarianz definiert und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je näher der Wert 1 erreicht wird, desto größer ist der Anteil der erklärten Varianz durch das Regressionsmodell. Tabelle 3-5 zeigt, dass je nach Kultur zwischen 48,2 % (Winterraps/Rosenheim) und 75,7 % (Grünland/Rosenheim) der Varianz der Ertragsanomalien durch die Klimavariablen in Regressionsmodellen erklärt werden können.

Die Prüfung der Residuen auf Normalverteilung erfolgt mit dem Shapiro-Wilk-Test. Tabelle 3-5 kann entnommen werden, dass mit Ausnahme der Regressionsmodelle „Wintergerste/Mühldorf“ und „Grünland/Mühldorf“, die Null-Hypothese „Residuen sind normalverteilt“ nicht abgelehnt werden kann.

Die Prüfung der Residuen auf Homoskedastizität erfolgt mit dem Goldfeld-Quandt-Test. Tabelle 3-5 zeigt, dass die Null-Hypothese „Residuen sind homoskedastisch“ für den Großteil der Regressionsmodelle nicht abgelehnt werden kann. Bei den Modellen „Sommergerste/Rosenheim“ und „Silomais/Mühldorf“ zeigt die Überschreitung des kritischen Tabellenwertes Heteroskedastizität an.

Die Prüfung der Residuen auf Autokorrelation erfolgt mit dem Durbin-Watson-Test. Der Durbin-Watson-Koeffizient kann nach SAVIN und WHITE (1977) Werte zwischen 0 und 4 annehmen. Je näher der Wert des Koeffizienten an 2 liegt, desto geringer ist das Ausmaß der Autokorrelation.

Aus Tabelle 3-5 wird ersichtlich, dass die Residuen bei den drei Regressionsmodellen „Sommergerste/Mühldorf“, „Körnermais/Rosenheim“ und „Winterraps/Rosenheim“ schwach autokorreliert sind.

Der Erwartungswert der Residuen ist bei allen Regressionsmodellen 0 und entspricht damit den notwendigen Voraussetzungen.

3.4.3 Ergebnisse der Simulation von zukünftigen Ertragsschwankungen

Da die Residuen bei einzelnen Regressionsmodellen teilweise nicht normalverteilt, heteroskedastisch oder autokorreliert sind, werden zur Ertragssimulation nur solche Modelle herangezogen, bei denen dies nicht der Fall ist. Zudem werden nur Regressionsmodelle mit einer hohen Anpassungsgüte für die Simulation von zukünftigen Ertragsschwankungen verwendet. Hierzu werden diejenigen Regressionsmodelle ausgewählt, bei denen die Bestimmtheitsmaße im oberen Drittel liegen. Aufgrund dieser, im Hinblick auf die Qualität der Ergebnisse getroffenen Einschränkungen, werden letztlich nur für drei Kulturen (Silomais/Rosenheim, Winterraps/Mühldorf, Grünland/Rosenheim) Ertragsanomalien für den zukünftigen Betrachtungszeitraum simuliert.

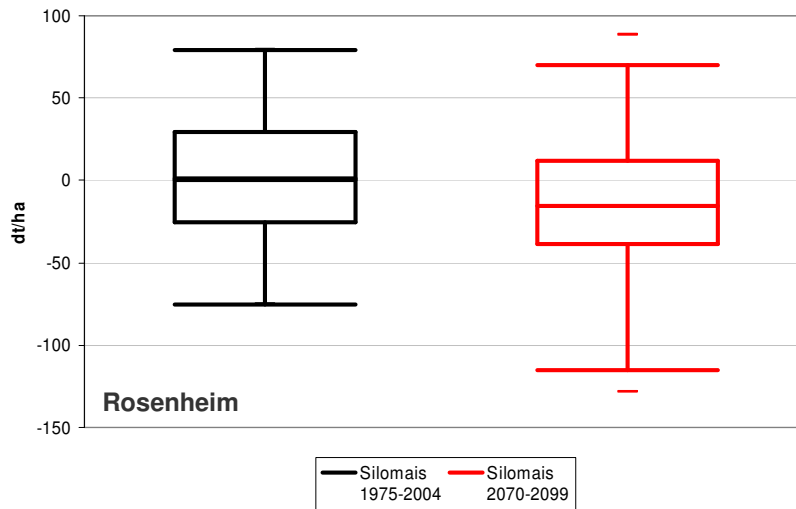
Für die nicht ausreichende Güte verschiedener Regressionsmodelle gibt es mehrere Gründe. Ein Grund liegt darin, dass die Klimavariablen für die Regressionsmodelle aus Temperatur- und Niederschlagsdaten ermittelt wurden, wodurch sich beispielsweise Extremwetterereignisse, wie z. B. Hagel nicht erfassen lassen und dadurch die Regressionsmodelle verfälschen. Außerdem sind auch Ungenauigkeiten in der Güte der Ausgangsdaten, v. a. bei den Ertragsdaten zu vermuten, da es sich um regionale Durchschnittsdaten handelt. Des Weiteren unterliegt die Ertragsbildung komplexen dynamischen Wechselwirkungen, die sich nicht vollständig durch statistische Ansätze erfassen lassen. Das wird noch dadurch verstärkt, dass die Klimadaten an nur einer Wetterstati-

on innerhalb eines Landkreises gemessen wurden, die Erträge jedoch über den Landkreis verteilt erfasst wurden, wodurch sich die Korrelation zwischen Klima- und Ertragsdaten verringert.

Mit den Regressionsmodellen von hoher Güte werden Ertragsanomalien im zukünftigen Betrachtungszeitraum berechnet, um Aussagen über die Beeinflussung der Ertragsvariabilität durch die prognostizierten klimatischen Änderungen abzuleiten. Dazu werden die Tagesdaten von Temperatur und Niederschlag an den Standorten Mühlendorf und Rosenheim für den Zeitraum 2070 bis 2099 zu den entsprechenden Klimavariablen aufbereitet und in die Regressionsfunktionen der berechneten Modelle (mit hoher Güte) der verschiedenen Kulturen eingesetzt.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 3-10 bis Abbildung 3-12) zeigen die Ergebnisse der Ertragssimulationen jeweils in einem Box-Whisker-Plot. Als Box wird das durch die Quartile bestimmte Rechteck bezeichnet, in dem sich 50 % der Ergebnisse befinden. In der Box ist der Median eingezeichnet. 25 % der Ergebnisse innerhalb der Box befinden sich daher unterhalb des Medians und 25 % darüber. Die Lage des Medians innerhalb der Box gibt daher einen Eindruck über die Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung. Durch die Länge der Box ist der Interquartilsabstand (interquartile range, IQR) abzulesen. Dies ist ein Maß der Streuung, welches durch die Differenz des oberen und des unteren Quartils bestimmt ist. Als Whisker werden die vertikalen Linien bezeichnet. Die Länge der Whisker beträgt maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstands. Werte, die über dieser Grenze liegen, werden separat in das Diagramm eingetragen und als Ausreißer bezeichnet (vgl. TOUTENBURG und HEUMANN 2006, S. 83 f.).

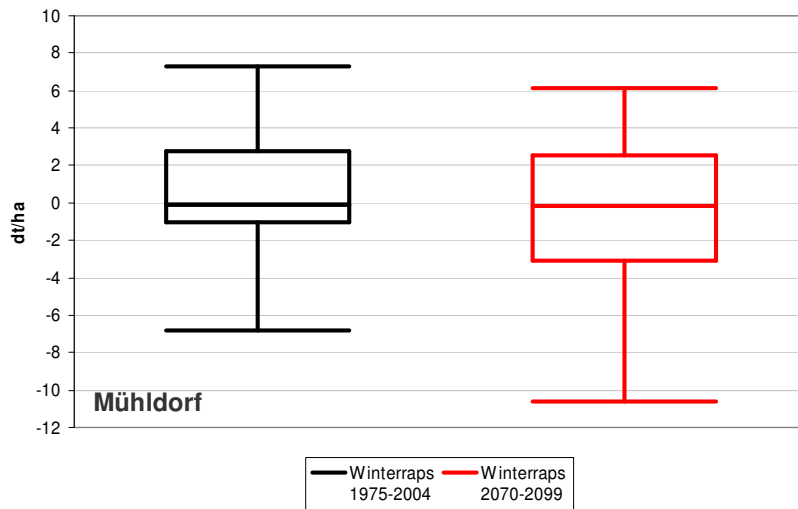
Abbildung 3-10: Verteilung der Ertragsanomalien von Silomais (1975 bis 2004 vs. 2070 bis 2099) am Standort Rosenheim



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-10 zeigt die Ergebnisse der Ertragssimulation für Silomais in Rosenheim. Für Mühlendorf wurde aufgrund der nicht ausreichenden Modellgüte keine Ertragssimulation durchgeführt. Es zeigt sich insgesamt eine Verlagerung nach unten, was anhand der Lage der Box zu erkennen ist. Das bedeutet, dass die klimatischen Bedingungen in der Zukunft tendenziell zu größeren Ertragsabweichungen nach unten führen. Ebenso ist zu erkennen, dass extreme Abweichungen nach unten größer werden. Ein Ausreißer findet sich in der Zukunftszeitscheibe bei -129 dt/ha. Dass die Abweichungen nach unten zunehmen, lässt sich mit dem intensiveren Auftreten von kritischen Klimaparametern in der Zukunft (Hitzestress, Trockenheit) erklären (vgl. Kapitel 3.4.1.3).

Abbildung 3-11: Verteilung der Ertragsanomalien von Winterraps (1975 bis 2004 vs. 2070 bis 2099) am Standort Mühldorf

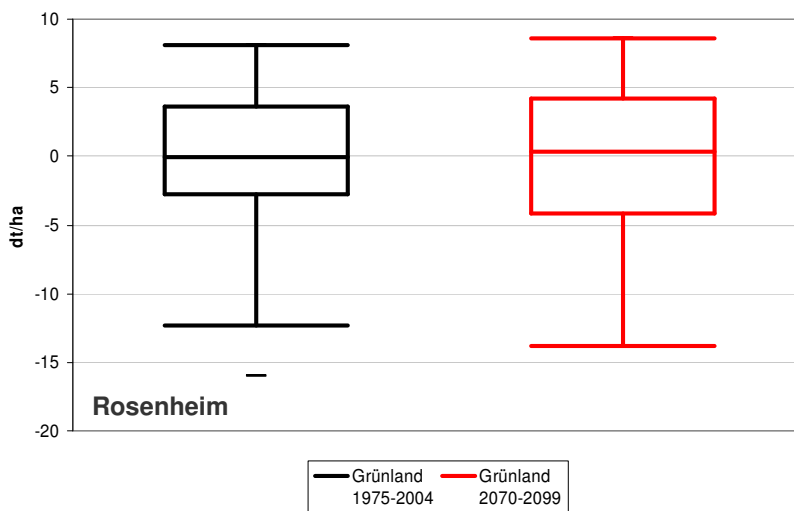


Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-11 zeigt den Box-Whisker-Plot für Winterraps am Standort Mühldorf. Es wird deutlich, dass bei der Kultur Winterraps am Standort Mühldorf die Schwankungsbreite zunimmt, da der Interquartilsabstand größer wird. Die höhere Schwankungsbreite resultiert vor allem auf einer Abweichung der Ertragsschwankungen nach unten. Für den zukünftigen Betrachtungszeitraum ergibt sich eine maximale Abweichung nach unten in Höhe von rd. -10,5 dt/ha.

Abbildung 3-12 zeigt den Box-Whisker-Plot für Grünland am Standort Rosenheim. Die Schwankungsbreite insgesamt nimmt zu, sowohl leicht nach oben, als auch in stärkerem Maße nach unten. Das bedeutet eine Zunahme der negativen Abweichungen nach unten, wobei sich in der Ertragsverteilung der Vergangenheit ein stärkerer Ausreißer nach unten findet als in der Ertragsverteilung der Zukunft.

Abbildung 3-12: Verteilung der Ertragsanomalien von Grünland (1975 bis 2004 vs. 2070 bis 2099) am Standort Rosenheim



Quelle: Eigene Berechnungen

3.5 Zwischenfazit: Klimafolgenanalyse durch statistische Untersuchungen

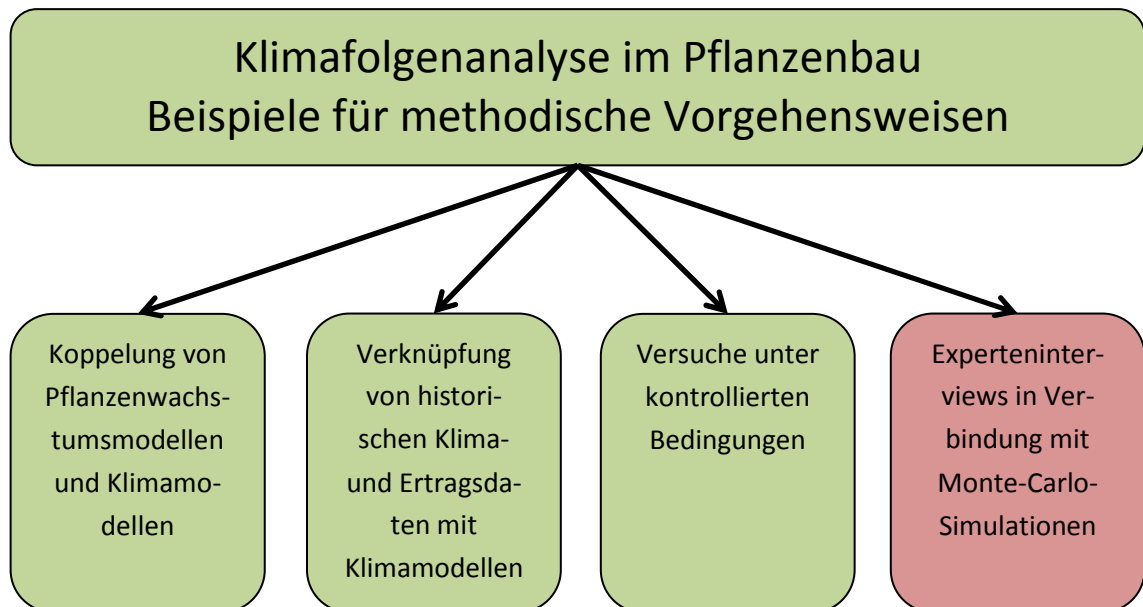
Das Ziel der bisherigen Untersuchungen war es, durch statistische Untersuchungen Zusammenhänge zwischen Ertrags- und Wetterdaten zu finden. Zunächst haben dabei Extremwertanalysen ergeben, dass kritische Klimaparameter für Missernten im zukünftigen Betrachtungszeitraum im Hinblick auf ihre Ausprägung zunehmen werden. Mit multiplen Regressionsanalysen wurde untersucht, ob auf Basis weniger Variablen bzw. sehr einfacher Wetterindizes statistische Zusammenhänge zwischen Wetter und Ertrag hergestellt werden können und ob diese Zusammenhänge auf zukünftige Klimaprognosen angewendet, zu plausiblen Aussagen führen. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass die prognostizierten klimatischen Veränderungen zu einer Erhöhung der Ertragsvariabilität und damit zu einem höheren Produktionsrisiko für die Landwirte führen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Anpassung an die klimatischen Veränderungen vor allem im betrieblichen Risikomanagement.

Insgesamt sollten durch die Untersuchungen Ertragsdaten unter zukünftigen Klimabedingungen abgeleitet werden, um daraus mit Modellrechnungen ökonomische Conse-

quenzen abzuleiten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass statistische Ansätze auf der Basis historischer Erträge sowie die Kopplung mit Klimamodellen nur bedingt geeignet sind, zukünftige Ertragsschwankungen zu simulieren. Da das Wetter nicht die einzige Ursache für Ertragsschwankungen darstellt, ist es nur möglich, einen gewissen Anteil der Ertragsschwankungen durch Klimavariablen zu erklären. Daher konnten nur für wenige Kulturen Ertragssimulationen durchgeführt werden, was darauf aufbauende ökonomische Untersuchungen erschwert. Des Weiteren hat sich im Laufe der Untersuchungen auch gezeigt, dass der Zukunftszeitraum, der sich aufgrund der Datengrundlage ergibt, von geringer Relevanz für die Planungsprozesse der praktischen Landwirtschaft ist, da er zu weit in der Zukunft liegt. Ursprünglich wurde dieser Zeitraum gewählt, da insbesondere in der zweiten Jahrhunderthälfte mit starken Klimaänderungen gerechnet werden muss. Es zeigte sich jedoch, dass die Sensibilität für mögliche Auswirkungen des Klimawandels umso mehr abnimmt, je weiter der Prognosezeitraum in der Zukunft liegt. Für weiterführende ökonomische Untersuchungen und die Bewertung von Anpassungsmaßnahmen ist es daher wichtig, einen nicht so fern in der Zukunft liegenden Prognosezeitraum zu wählen.

Das Ziel der weiteren Untersuchungen ist es daher zunächst, mit einer anderen Methode quantitative Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge in Deutschland abzuleiten und daraufhin die ökonomischen Konsequenzen dieser Auswirkungen zu bestimmen. Da der in dieser Untersuchung verwendete statistische Ansatz nicht geeignet ist, genügend Daten zu erzeugen, um darauf basierende ökonomische Modellierungen durchzuführen, wird eine weitere Methode erprobt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge abzuleiten (siehe Abbildung 3-13).

Abbildung 3-13: Klimafolgenanalyse Pflanzliche Produktion – weiteres methodisches Vorgehen



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 3-13 zeigt die bereits unter Abbildung 3-1 beschriebenen möglichen Vorgehensweisen zur Klimafolgenanalyse im Pflanzenbau. Der verwendete statistische Ansatz, indem historische Ertrags- und Klimadaten verknüpft und mit Klimamodellen gekoppelt wurden, hat sich, wie beschrieben, für darauf aufbauende ökonomische Untersuchungen als ungeeignet herausgestellt. Die Verwendung von Daten aus Pflanzenwachstumsmodellen wäre eine weitere Möglichkeit zur Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion und deren ökonomischer Bewertung. Nach TRNKA et al. (2011) basieren Projektionen europäischer Ernteerträge unter dem Einfluss des Klimawandels bislang fast ausschließlich auf Pflanzenwachstumsmodellen. Dies ermöglicht zwar eine gute Schätzung der Auswirkungen von klimatischen Faktoren, Bodenbeschaffenheit und dem Management auf den Ernteertrag, in der Regel können damit jedoch nicht alle wichtigen Aspekte im Zusammenhang mit Bestandesführung oder relevanten Umweltfaktoren erfasst werden. Darüber hinaus haben Pflanzenwachstumsmodelle oft schwerwiegende Einschränkungen in Bezug auf die Anzahl der untersuchten Kulturen oder der räumlichen Ausdehnung. Dieser Ansatz wird daher hier nicht weiter verfolgt, da es auch ein Ziel dieser Arbeit ist, einen weiteren Ansatz zur Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion zu erproben. Versuche unter kontrollierten Bedingungen eignen sich aufgrund des hohen Aufwands auch nicht für die in dieser Arbeit angestrebten ökonomischen Untersuchungen. Deshalb wird für den weiteren Verlauf der Arbeit ein methodischer Ansatz unter Verwendung von Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen verwendet und erprobt. Damit soll auch einer weiteren Schwä-

che der bisher durchgeführten statistischen Analysen begegnet werden. Diese haben nämlich auch den Nachteil, dass nur vergangene Ertrags- und Klimadaten ausgewertet und die daraus ermittelten Zusammenhänge für die Ertragsprojektionen herangezogen werden. Wenn sich nun die klimatischen Rahmenbedingungen aufgrund des Klimawandels grundlegend ändern, führt dies zu einer insgesamt eher geringen Aussagekraft der Ergebnisse. Daher sollen durch die Einbindung von Expertenwissen auch die zukünftigen klimatischen Rahmenbedingungen und deren Auswirkungen auf die Erträge von Kulturpflanzen entsprechend berücksichtigt werden.

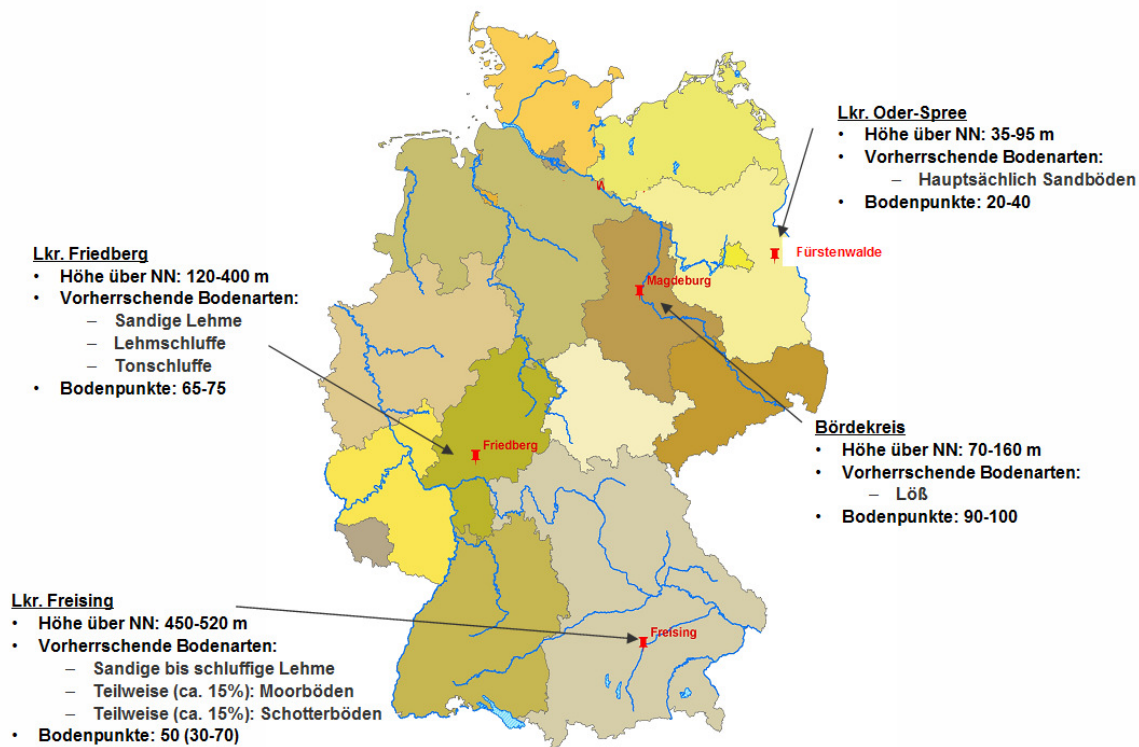
4 Klimafolgenanalyse durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen

4.1 Untersuchungsgegenstand

Kapitel 3 hat grundsätzlich gezeigt, dass kritische Klimaparameter für Missernten in der Zukunft hinsichtlich ihrer Ausprägung zunehmen werden und dass das Ertragsrisiko aufgrund der prognostizierten klimatischen Veränderungen zukünftig zunehmen wird. Es wurde auch deutlich, dass der Prognosezeitraum aufgrund der sich daraus ergebenden geringeren praktischen Relevanz nicht allzu fern in der Zukunft liegen sollte. Auf diese Erkenntnisse aufbauend soll nun ein weiterer Ansatz zur Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion erprobt werden. Hierbei werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen abgeleitet. Die Eingangswerte für die Monte-Carlo-Simulationen werden dabei durch von Experten geschätzten Ertragsverteilungen für die Zukunft festgestellt. Grundlage für diese Schätzungen sind historische Ertragsverteilungen von Hektarerträgen auf Landkreisebene sowie Aussagen über die mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 simulierten standörtlichen Klimaänderungen in der Zukunft (2021 bis 2050) im Vergleich zur Ist-Situation (1971 bis 2000) (SPEKAT et al. 2007).

Ziel dieser Untersuchungen ist es, Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von vier landwirtschaftlichen Kulturen (Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Körnermais) durch Monte-Carlo-Simulationen abzuleiten. Monte-Carlo-Simulationen werden oftmals verwendet, um eine große Datenmenge aus beobachteten Daten kurzer Zeitreihen zu generieren (IGLESIAS und QUIROGA 2007). Dabei werden vier Standorte innerhalb Deutschlands untersucht (siehe Abbildung 4-1).

Abbildung 4-1: Untersuchungsstandorte



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BGR (2007) und WENDLAND et al. (1993)

In Abbildung 4-1 sind die vier Standorte dargestellt, die in den Untersuchungen berücksichtigt werden. Im Unterschied zu den statistischen Untersuchungen in Kapitel 3 wird hier eine breitere Datengrundlage herangezogen. Dabei wird auf eine Heterogenität hinsichtlich der Standortgüte und damit auch der Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel geachtet. Die Ergebnisse sollen dadurch insgesamt aussagekräftiger werden. Dargestellt sind neben der geografischen Verteilung der Standorte auch die Höhenlage, die vorherrschenden Bodenarten sowie die Bodengüte der einzelnen Standorte. Diese Angaben dienen als Input im Rahmen der Experteninterviews (vgl. Kapitel 4.2.2).

4.2 Material und Methoden

Zunächst werden zwölfjährige historische Zeitreihen der Hektarerträge auf Landkreisebene der oben beschriebenen Standorte ausgewertet und daraus der minimale, der maximale und der wahrscheinlichste Ertrag ermittelt. Die historischen Erträge wurden von den jeweiligen statistischen Landesämtern der einzelnen Standorte zur Verfügung gestellt. Dazu gehören das Amt für Statistik Berlin Brandenburg, das Statistische Landesamt Sachsen-Anhalt, das Hessische Statistische Landesamt und das Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung. Für die jeweiligen Zeitreihen der einzelnen

Kulturen für die verschiedenen Standorte ließ sich mittels statistischer Tests kein signifikanter Ertragstrend nachweisen.

Es werden Daten auf Landkreisebene verwendet, da dies eine konsistente und damit vergleichbare Datenquelle für historische Erträge darstellt. Des Weiteren ist es nicht empfehlenswert, eine niedrigere Aggregierungsstufe als die Landkreisebene zu wählen, da schlag- bzw. betriebsbezogene Daten durch eine Vielzahl anderer Effekte (z. B. Sortenwahl, Saattermin, Düngestrategie, Vorfruchteffekte) überlagert werden. Bei landkreisbezogenen Daten hingegen sind die Ertragsschwankungen zu einem großen Teil auf die Witterung zurückzuführen, andererseits wird aufgrund der auftretenden Standortheterogenität die langjährige Ertragsvarianz tendenziell unterschätzt. Da die Experten die Auswirkungen veränderter Klimabedingungen auf die Verteilung der Erträge abschätzen sollen, ist es notwendig, Daten zu verwenden, deren Schwankungsbreite vor allem durch die Witterung bedingt ist.

Aus regionalisierten Klimaszenarien werden die Veränderungen pflanzenbaulich relevanter Klimaparameter im zukünftigen Zeitraum (2021 bis 2050) im Vergleich zum historischen Zeitraum (1971 bis 2000) (Ist-Situation) aufbereitet und dienen als Input für Experteninterviews. Dabei werden Daten aus Klimaszenarien verwendet, die aus den mit dem Modell WETTREG regionalisierten Datensätzen des Umweltbundesamtes für das IPCC-Emissionsszenario A1B stammen. Das Szenario A1B gehört zur Szenarienfamilie A1, die eine zukünftige Welt mit starkem Wirtschaftswachstum und einer bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wachsenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung sowie die rasche Einführung neuer und effizienterer Technologien beschreibt. Die drei Untergruppen A1FI, A1T und A1B unterscheiden sich hinsichtlich der Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Energiequellen, wobei das Szenario A1B (= balanced) von einer ausgewogenen Nutzung beider Energiequellen ausgeht (vgl. NAKICENOVIC et al. 2000). Das WETTREG-Verfahren ist eine statistische Methode, mit der, basierend auf den IPCC-Szenariorechnungen des globalen Klimamodells ECHAM5, regionale Klimaänderungen modelliert werden können. Dadurch ist es möglich, räumliche Muster und zeitliche Entwicklungen des Klimasignals bis zum Jahr 2100 zu analysieren (vgl. SPEKAT et al. 2007).

Die Rohdaten werden vom World Data Center for Climate des Max-Planck-Institutes in Hamburg zur Verfügung gestellt und entstammen einer Online-Datenbank, die unter der URL „<http://cera-www.dkrz.de/>“ abrufbar ist (siehe ENKE und KREIENKAMP 2006). Diese Rohdaten werden für die Expertenbefragung grafisch aufbereitet (siehe Kapitel 4.2.1). Aufgrund dieser Angaben und der Standortinformationen (siehe Abbildung 4-1) schätzen Experten (Details zur Expertenbefragung folgen noch) die standortspezifischen Werte für den minimalen, den maximalen und den wahrscheinlichsten Ertrag unter zukünftigen Klimabedingungen, woraus mittels Monte-Carlo-Simulationen die Verteilung zukünftiger Erträge simuliert wird (siehe Kapitel 4.2.3).

4.2.1 Auswertung von Klimaszenarien

Wie bereits in Kapitel 2.2 näher beschrieben, stellen Temperatur und Niederschlag entscheidende Faktoren für das Pflanzenwachstum dar. Deshalb werden die WETTREG-Klimaszenarien vor allem hinsichtlich Temperatur- und Niederschlagsänderungen ausgewertet. Des Weiteren werden auf Grundlage von Temperatur- und Niederschlagsdaten die Veränderungen von klimatologischen Kennzahlen ermittelt. Nachfolgend gibt Tabelle 4-1 einen Überblick über diejenigen Klimaparameter, die als Input für die Expertenbefragungen ausgewertet werden.

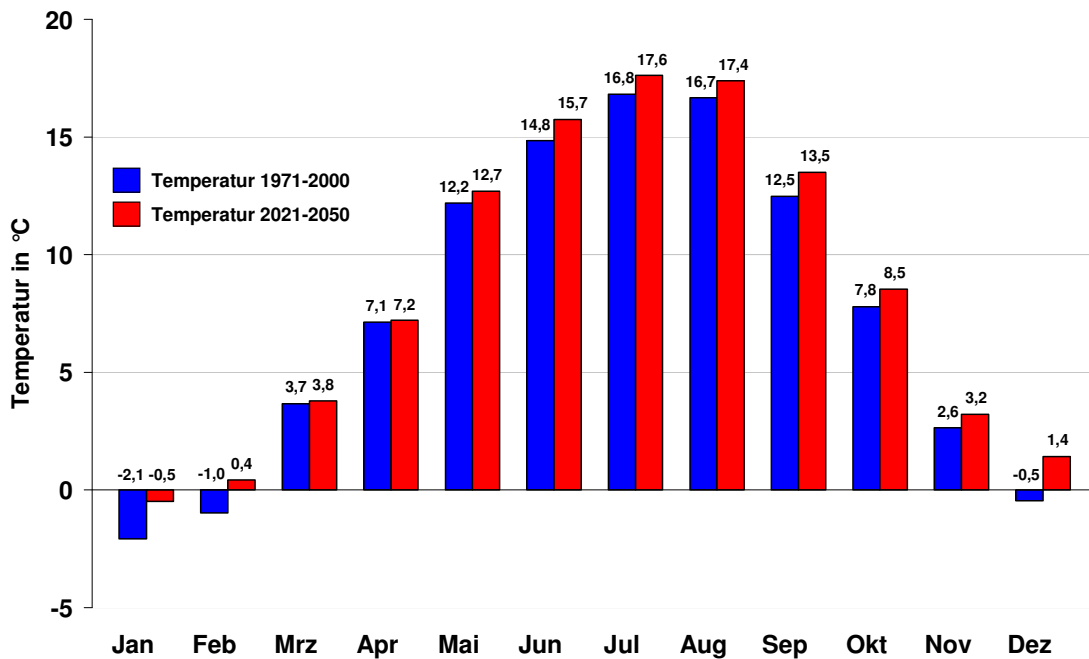
Tabelle 4-1: Ausgewertete Klimaparameter

Klimavariablen	Erklärung
Durchschnittstemperatur	Änderung und Schwankungsbreite der Änderung der Durchschnittstemperatur in den einzelnen Kalendermonaten
Niederschlagssumme	Änderung und Schwankungsbreite der Änderung der Niederschlagssumme in den einzelnen Kalendermonaten
Trockentage	Änderung von Tagen mit einem Tagesniederschlag < 1 mm
Sommertage	Änderung von Tagen mit einer Maximaltemperatur $\geq 25\text{ °C}$
Heiße Tage	Änderung von Tagen mit einer Maximaltemperatur $\geq 30\text{ °C}$
Vegetationstage	Änderung von Tagen mit einer Durchschnittstemperatur $\geq 5\text{ °C}$
Frosttage	Änderung von Tagen mit einer Minimaltemperatur $\leq 0\text{ °C}$
Eistage	Änderung von Tagen mit einer Maximaltemperatur $\leq 0\text{ °C}$
Letzter Spätfrost nach Jahresbeginn	Änderung des letzten Tages im Jahr mit einer Minimaltemperatur $\leq 0\text{ °C}$

Quelle: Eigene Darstellung nach DWD (2009)

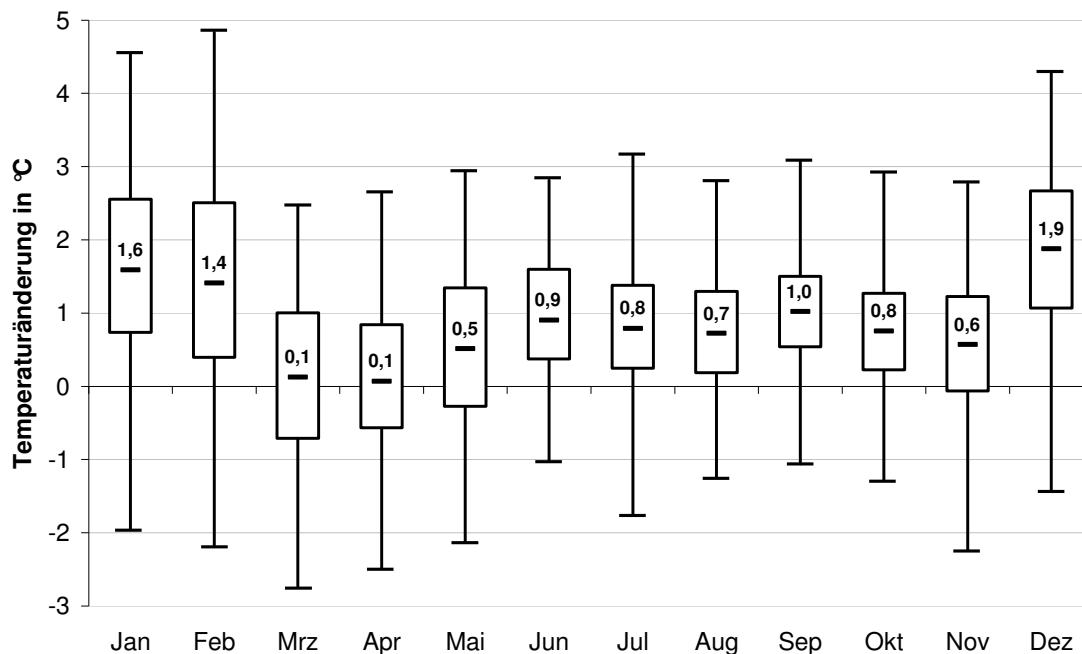
Im Folgenden werden nun beispielhaft für den Standort Freising die aufbereiteten Klimaparameter gezeigt, welche als Basis für die Schätzung von zukünftigen Ertragsverteilungen durch die Experten dienen. Der Fragebogen mit den Werten der anderen Standorte findet sich im Anhang (siehe Kapitel 9.3). Nachfolgend zeigt Abbildung 4-2 eine Gegenüberstellung der Mittelwerte der Temperatur in den jeweiligen Kalendermonaten der beiden Zeiträume für den Standort Freising.

Abbildung 4-2: Monatsmittel der Temperatur für das Basisszenario (1971-2000) und das Zukunftsszenario (2021-2050) (Standort Freising)



Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ENKE und KREIENKAMP (2006)

In Abbildung 4-2 sind die 30-jährigen Monatsmittelwerte der Temperatur der beiden Zeiträume (1971 bis 2000 vs. 2021 bis 2050) einander gegenübergestellt. Damit die Experten die Temperaturänderung einschätzen können, wird für die Expertenbefragung eine zusätzliche Grafik angefertigt, die die Schwankungsbreite der Mittelwerte der Temperaturänderung zeigt (siehe Abbildung 4-3).

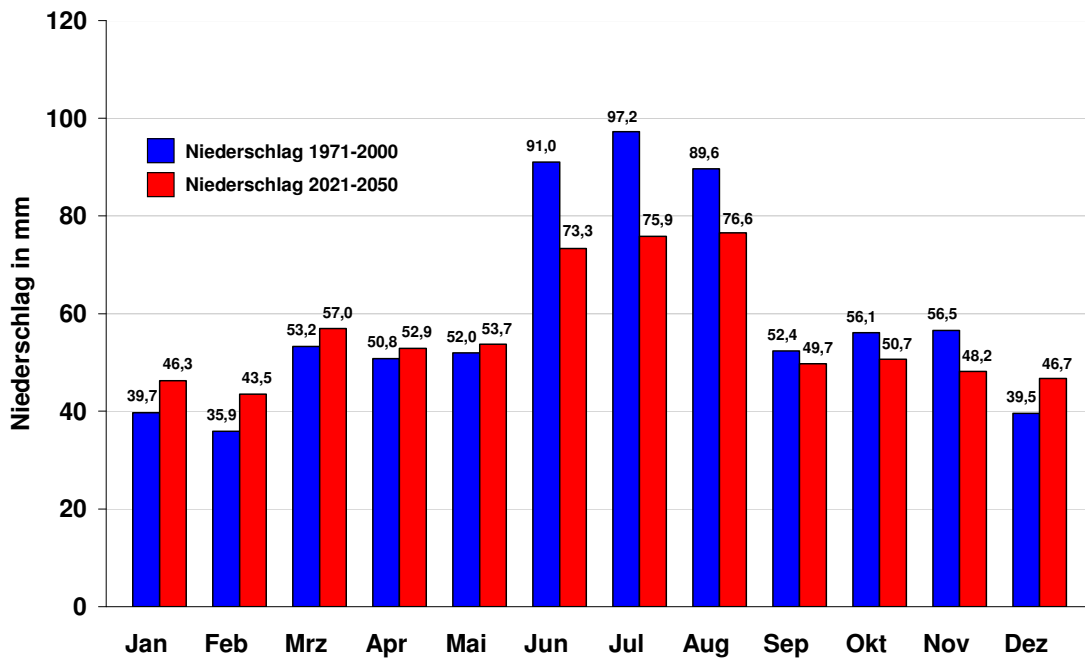
Abbildung 4-3: Schwankungsbreite der Temperaturänderung (Standort Freising)


Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ENKE und KREIENKAMP (2006)

Abbildung 4-3 zeigt in einem Box-Whisker-Plot die Schwankungsbreite der Mittelwerte der Temperaturänderung. Der horizontale Strich, der sich innerhalb der Box befindet zeigt den Mittelwert der Temperaturänderung relativ zum Mittelwert der Temperatur in der Zeitscheibe der Jahre 1971 bis 2000 (x-Achse). Die Box repräsentiert 50 % der Ergebnisse der Abweichungen von diesem Mittelwert in den einzelnen Jahren. Die vertikalen Linien (Whisker) reichen dann jeweils bis zur minimalen bzw. maximalen Abweichung eines Ergebnisses vom Mittelwert. Bezogen auf den Monat Januar bedeutet dies, dass im zukünftigen Zeitraum die durchschnittliche Temperatur um 1,6 °C höher liegt als im historischen Zeitraum. 50 % der Abweichungen von diesem Mittelwert schwanken zwischen 0,7 °C und 2,6 °C (Größe der Box). In einzelnen Jahren kann die mittlere Temperatur im zukünftigen Zeitraum aber auch stark von diesem Mittelwert abweichen und bezogen auf den Monat Januar in einem Jahr um 2,0 °C niedriger und in einem Jahr um 4,5 °C höher liegen als der Mittelwert der Temperatur im historischen Zeitraum (Länge der Whisker).

Die nächsten beiden Grafiken (Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5) dienen zur Veranschaulichung der prognostizierten Änderung des Niederschlags im Zeitraum von 2021 bis 2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum von 1971 bis 2000. Nachfolgend sind in Abbildung 4-4 die Mittelwerte des Niederschlags in den jeweiligen Kalendermonaten der beiden Zeiträume einander gegenübergestellt.

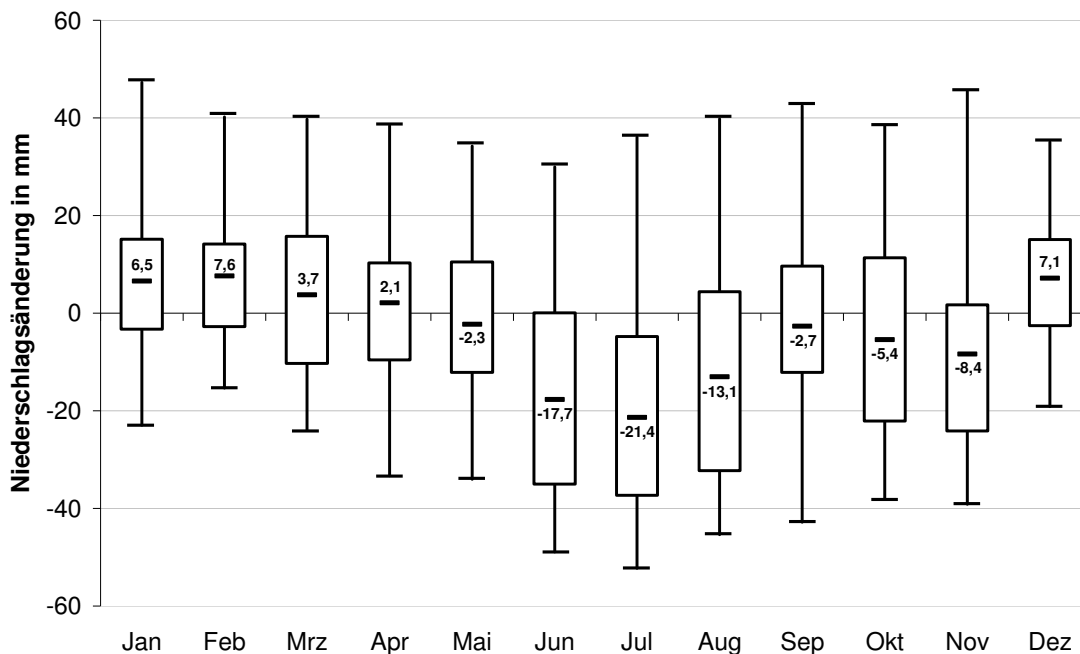
Abbildung 4-4: Änderung des Niederschlags (Mittelwerte) (Standort Freising)



Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ENKE und KREIENKAMP (2006)

Abbildung 4-4 zeigt die 30-jährigen Monatsmittelwerte des Niederschlags der beiden Zeitscheiben von 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050. Auch hier wird zur besseren Einordnung dieser Mittelwerte durch die Experten die Schwankungsbreite der Niederschlagsänderung ermittelt. Diese ist nachfolgend in Abbildung 4-5 dargestellt.

Abbildung 4-5: Schwankungsbreite der Niederschlagsänderung (Standort Freising)

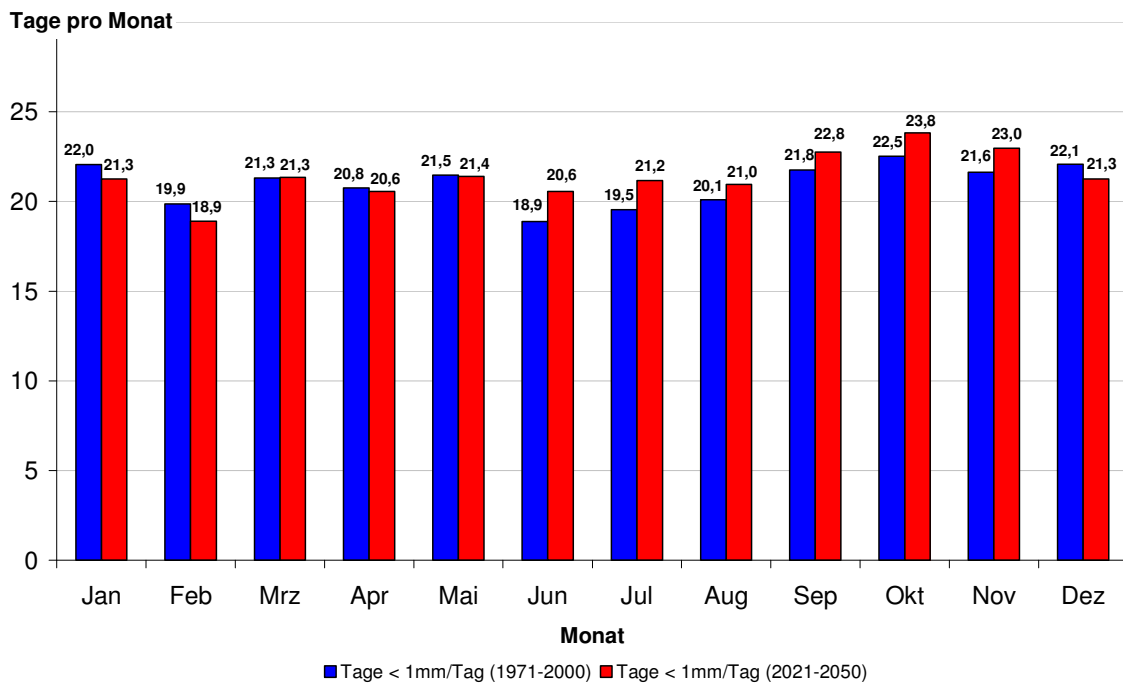


Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ENKE und KREIENKAMP (2006)

In Abbildung 4-5 ist in einem Box-Whisker-Plot die Schwankungsbreite der Mittelwerte der Niederschlagsänderung dargestellt. Die Abbildung ist analog zu Abbildung 4-3 zu interpretieren. Deutlich wird die Veränderung der Saisonalität der Niederschläge mit einer Zunahme in den Wintermonaten und einer Abnahme in den Sommermonaten.

Die nächsten beiden Grafiken (Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7) dienen zur Veranschaulichung der prognostizierten Änderung von klimatologischen Kennzahlen im Zeitraum von 2021 bis 2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum von 1971 bis 2000. In Abbildung 4-6 sind nachfolgend die Anzahl der Trockentage (Tage mit Niederschlag < 1 mm) in den jeweiligen Kalendermonaten der beiden Zeiträume einander gegenübergestellt.

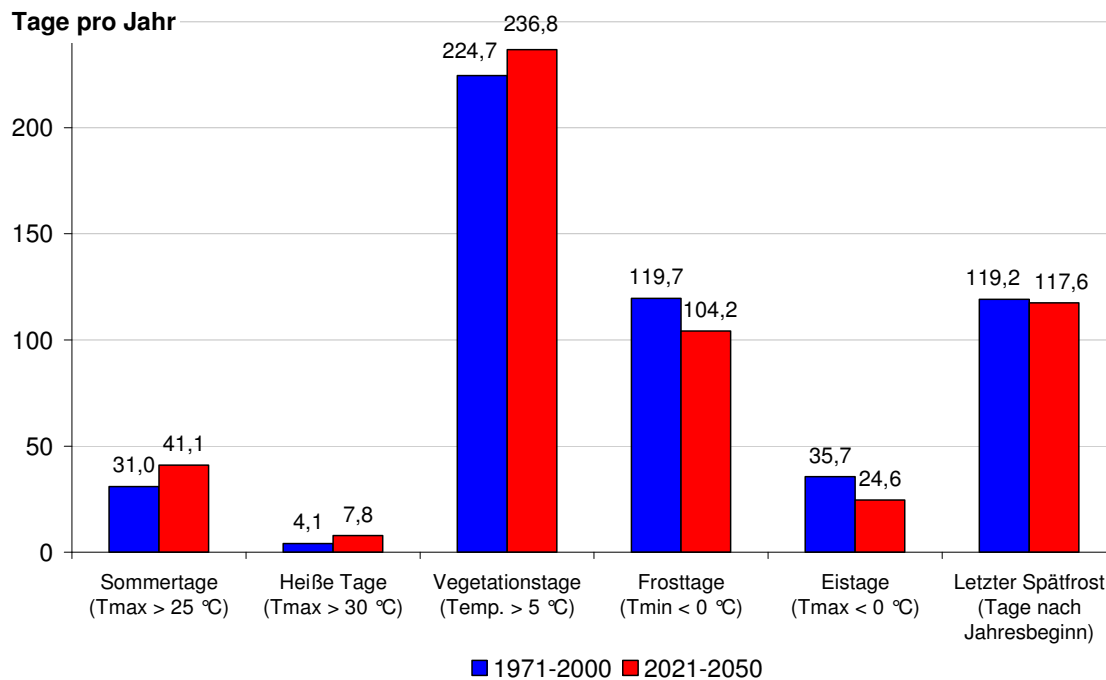
Abbildung 4-6: Veränderung der Trockentage (Standort Freising)



Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ENKE und KREIENKAMP (2006)

Wie Abbildung 4-6 zeigt, zeigen die Trockentage im zukünftigen Zeitraum in den Wintermonaten eine abnehmende Tendenz. In den Sommermonaten ist zukünftig jedoch mit einer Zunahme von Trockentagen zu rechnen. So wird hier für die Monate Juni und Juli ein Anstieg von rund 9 % prognostiziert. Abbildung 4-7 zeigt nachfolgend die Veränderung weiterer klimatologischer Kenngröße, die auf Basis von Temperaturdaten ermittelt werden.

Abbildung 4-7: Veränderung weiterer klimatologischer Kenntage (Standort Freising)



Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von ENKE und KREIENKAMP (2006)

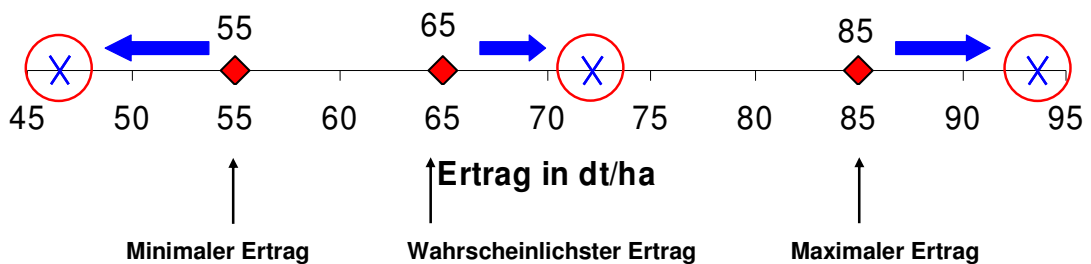
In Abbildung 4-7 ist die Veränderung von durch die Temperatur definierten klimatologischen Kenntagen im Zeitraum von 2021 bis 2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum von 1971 bis 2000 dargestellt. Hier wird deutlich, dass Hitzeereignisse (Sommertage und heiße Tage) eine zunehmende Tendenz zeigen, während Kälteereignisse (Frosttage, Eistage, letzter Spätfrost) abnehmen. Die Vegetationsperiode, definiert durch Tage mit einer Durchschnittstemperatur von > 5 °C wird länger.

4.2.2 Expertenbefragung

Nach MÜßHOFF und HIRSCHAUER (2010), S. 315 gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, um Wahrscheinlichkeitsinformationen zu erhalten. Dabei wird zwischen objektiven und subjektiven Wahrscheinlichkeiten unterschieden. Bei Experteneinschätzungen wird versucht, die subjektiven Wahrscheinlichkeitseinschätzungen zu erfassen, die kompetente Experten auf der Grundlage eigener Erfahrungen und Überlegungen gebildet haben. Naturgemäß können dabei Einschätzungen zwischen Befragten stark schwanken und die Informationsgrundlage ist weniger transparent als bei objektiven Wahrscheinlichkeiten. Trotz dieser Nachteile ist die Gewinnung von subjektiven Wahrscheinlichkeiten durch Experteneinschätzungen von großer Relevanz und sie kommt immer dann zum Einsatz, wenn weder designbasierte Wahrscheinlichkeiten noch aussagekräftige Zeitreihen- oder Querschnittsdaten vorliegen, die statistisch analysiert werden können (MÜßHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 316).

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse erscheint es für diese Arbeit sinnvoll, eine Expertenbefragung durchzuführen, um darauf basierend Aussagen über die Auswirkungen klimatischer Änderungen auf die Pflanzenproduktion abzuleiten. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurden daraufhin 17 Experten ermittelt, die pflanzenbauliche Kenntnisse sowie Erfahrungen im Bereich der Klimafolgenanalyse haben. Dadurch soll ein homogener Wissensstand gewährleistet werden, was sich positiv auf die Qualität der Ergebnisse auswirken sollte. Zunächst wurden potentielle Experten telefonisch kontaktiert und über den Zweck und die Inhalte der Befragung informiert. Bei Bereitschaft der Experten zur Teilnahme an der Befragung wurde daraufhin der Fragebogen per Post an die betreffenden Experten versandt. Nach Erhalt der Unterlagen wurde der Fragebogen in einem zweiten Telefongespräch detailliert erörtert und die Experten hatten die Möglichkeit Fragen zu stellen, um Unklarheiten zu beseitigen. Auf Basis der in Kapitel 4.2.1 dargestellten Veränderungen von pflanzenbaulich relevanten Klimaparametern sowie der in Abbildung 4-1 dargestellten Standortinformationen erfolgte dann die Schätzung der regionalspezifischen Werte für den minimalen, den maximalen und den wahrscheinlichsten Ertrag unter zukünftigen Klimabedingungen durch die Experten, welche den Fragebogen anschließend zur Auswertung zurücksandten. Nachfolgend zeigt Abbildung 4-8 ein Beispiel für eine Ertragsverteilung auf der Grundlage historischer Ertragsdaten.

Abbildung 4-8: Beispiel für eine Ertragsverteilung



Quelle: Eigene Darstellung

In diesem Beispiel beträgt der minimale Ertrag 55 dt/ha, der maximale Ertrag 85 dt/ha und der wahrscheinlichste Ertrag, also derjenige, der am häufigsten erreicht wird 65 dt/ha. Die Veränderung dieser drei Werte wird von den Experten auf Basis der gezeigten Klimadaten geschätzt und in die jeweilige Darstellung für die vier Kulturen Winterweizen, Winterrap, Wintergerste und Körnermais eingetragen, was hier beispielhaft mit Kreuzchen dargestellt ist. Den Einfluss des technischen Fortschritts sollten die Experten nicht beurteilen, da anzunehmen ist, dass hierüber die Meinungen weit auseinander gehen und somit die Ergebnisse negativ beeinflusst werden. Auch der Einfluss

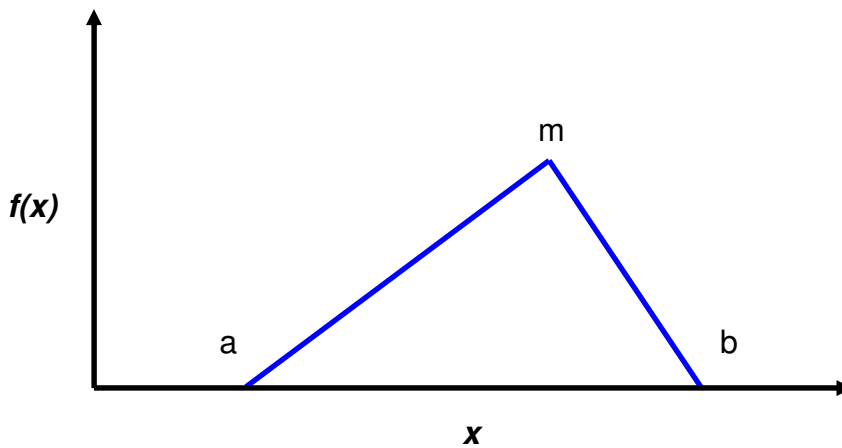
einer steigenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wird nicht berücksichtigt, da deren Auswirkung nicht im Erfahrungsbereich der Experten liegt.

4.2.3 Stochastische Simulation zukünftiger Erträge durch Monte-Carlo-Simulationen

Bei einer stochastischen Simulation bzw. Monte-Carlo-Simulation wird ein Zufallsexperiment modelliert, dessen Ergebnis eine Zufallsvariable (z. B. Ertrag) ist. Daraufhin wird eine große Stichprobe von Zufallszahlen (z. B. Erträge) erzeugt. Basierend auf der Auswertung der Häufigkeit von einzelnen Erträgen aus dieser Stichprobe kann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt werden, mit der dann festgestellt werden kann, mit welcher Wahrscheinlichkeit z. B. ein Ertrag von 80 dt/ha erreicht wird. Durch eine hohe Anzahl an Simulationsläufen ist dann eine Annäherung an die tatsächliche Wahrscheinlichkeitsverteilung möglich (Gesetz der großen Zahl nach Bernoulli) (vgl. FINKE 2005, S. 99, PRECHT et al. 2005, S. 95 f.).

Nach KRÖBER et al. (2009) wird bei einer Monte-Carlo-Simulation zunächst ein Simulationsmodell konstruiert. Anschließend werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die unsicheren Inputgrößen geschätzt. Für die jeweiligen Inputgrößen werden dabei Wahrscheinlichkeitsfunktionen aufgestellt, durch die mit einem Simulationsprogramm Zufallswerte der jeweiligen Inputgröße erzeugt werden. Somit kann den Stichprobenergebnissen der Zufallsvariable eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugewiesen werden. Da in der landwirtschaftlichen Praxis überwiegend keine diskreten (z. B. Anzahl der Feldarbeitstage), sondern stetige Zufallsvariablen (z. B. Ertrag) vorliegen, existieren keine Einzelwahrscheinlichkeiten für den Eintritt eines bestimmten Ereignisses, sondern es existiert eine Dichtefunktion, die anzeigt, welcher Wertebereich am wahrscheinlichsten auftritt (vgl. KRÖBER et al. 2009). Im Rahmen dieser Untersuchungen wird angenommen, dass die Erträge einer Dreiecksverteilung unterliegen (siehe Abbildung 4-9). Auch in einer Reihe anderer Studien wird die Annahme dreiecksverteilter Erträge getroffen (vgl. FOCK et al. 2008b, FUCHS et al. 2009, KRÖBER et al. 2009).

Abbildung 4-9: Dichtefunktion einer stetigen Dreiecksverteilung



Quelle: Eigene Darstellung nach BRANDES und BUDE (1981)

Die Parameter a , b und m stellen die Eckpunkte der Dreiecksverteilung dar. Der linke Schnittpunkt der Verteilung mit der Abszisse (a) stellt den kleinsten möglichen Wert der Inputgröße dar. Entsprechend zeigt der rechte Schnittpunkt (b) den maximalen Wert an. Der Parameter (m) (Modalwert bzw. Modus) stellt den wahrscheinlichsten Wert dar, also denjenigen, bei dem die Dichtefunktion ihr Maximum besitzt. Diese Form der Verteilung hat nach BRANDES und BUDE (1981) den Vorteil, dass die Parameter einfach zu erheben sind, dass sich die Verteilung über einen begrenzten Wertebereich erstreckt und dass auch asymmetrische Wertverteilungen erfasst werden können. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die benötigten Parameter a , b und m durch eine Expertenbefragung für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen und Standorte unter zukünftigen Klimabedingungen ermittelt.

In einem weiteren Schritt wird nun das Stichprobenergebnis (die Zufallsvariablen) selbst durch stochastische Simulation unter Zuhilfenahme eines Zufallszahlengenerators mit Hilfe der Software SIMETAR (vgl. RICHARDSON et al. 2006) erzeugt. Durch die Wiederholung der Simulation werden viele verschiedene Szenarien mit entsprechenden Ergebniswerten der Zufallsvariablen generiert. Das Zufallsexperiment kann beliebig oft wiederholt werden. Mit Hilfe des mehrmaligen Ablaufs der Simulation kann eine Häufigkeitsverteilung der Outputgröße aufgetragen werden. Je häufiger die Simulation durchgeführt wird, desto homogener wird die Häufigkeitsverteilung. Diese relativen Häufigkeiten entsprechen näherungsweise der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße. Anhand dieser können Aussagen getroffen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein gewisser Zielwert erreicht wird (vgl. HANF 1991, S. 79, FINKE 2005, S. 95 ff., KRÖBER et al. 2009, MURHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 365). Im Rahmen dieser Untersuchungen werden 1.000 Simulationsläufe durchgeführt. Basierend auf den von den Experten geschätzten Werten für die Parameter a , b und m werden somit Ertrags-

verteilungen unter zukünftigen Klimabedingungen für die jeweiligen Kulturen an den verschiedenen Standorten abgeleitet.

Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass für die unsicheren Inputgrößen beliebige parametrische Verteilungen unterstellt werden können. Im Gegensatz zu analytischen Methoden können bei der Monte-Carlo-Simulation also die Verteilungen verarbeitet werden, die am besten zu vergangenen Beobachtungswerten oder Expertenaussagen passen. Folglich können also auch über Expertenbefragungen gewonnene Verteilungsinformationen verarbeitet werden (MURHOF und HIRSCHAUER 2010, S. 365). Aufgrund dieser Vorteile wird das Verfahren der Monte-Carlo-Simulation im Rahmen dieser Untersuchungen angewandt.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Ergebnisse der Experteninterviews

Im Folgenden wird nun die Einschätzung der Experten bezüglich der zukünftigen Erträge der vier Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Körnermais unter dem Einfluss prognostizierter klimatischer Änderungen an den vier Standorten Freising, Friedberg, Magdeburg und Fürstenwalde dargestellt. Dabei werden die Mittelwerte sowie die Schwankungsbreite (Standardabweichung und Variationskoeffizient) der Schätzwerte für jeden Standort dargestellt (siehe Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Durch Experteninterviews ermittelte Schätzergebnisse zukünftiger Erträge unter dem Einfluss prognostizierter klimatischer Änderungen an vier Standorten

Freising												
	Winterweizen			Wintergerste			Körnermais			Winterraps		
	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min
MW	81	64	56	66	60	48	104	89	72	43	35	23
Stabw	3,3	3,9	4,3	4,0	2,5	2,5	5,9	4,6	4,9	1,9	1,5	1,3
CV	4%	6%	8%	6%	4%	5%	6%	5%	7%	4%	4%	6%
Friedberg												
	Winterweizen			Wintergerste			Körnermais			Winterraps		
	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min
MW	93	79	66	75	64	56	110	98	80	42	37	29
Stabw	1,8	3,2	2,8	2,9	3,0	4,3	2,7	4,2	6,5	2,2	1,9	1,6
CV	2%	4%	4%	4%	5%	8%	2%	4%	8%	5%	5%	5%
Magdeburg												
	Winterweizen			Wintergerste			Körnermais			Winterraps		
	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min
MW	93	81	65	89	77	56	102	82	57	47	43	27
Stabw	2,5	3,9	2,2	2,9	3,9	3,9	2,4	5,9	7,1	1,6	2,4	2,1
CV	3%	5%	3%	3%	5%	7%	2%	7%	12%	3%	6%	8%
Fürstenwalde												
	Winterweizen			Wintergerste			Körnermais			Winterraps		
	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min	Max	Mod	Min
MW	66	51	31	66	55	17	84	67	26	43	28	13
Stabw	3,0	2,4	3,1	3,1	2,7	1,5	4,4	5,7	2,4	1,8	2,1	0,9
CV	5%	5%	10%	5%	5%	9%	5%	8%	9%	4%	7%	7%

Anmerkungen: Max: Maximalwert, Mod: Modalwert, Min: Minimalwert, MW: Mittelwert, Stabw: Standardabweichung; jeweils Angaben in dt/ha; CV: Variationskoeffizient (Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert)

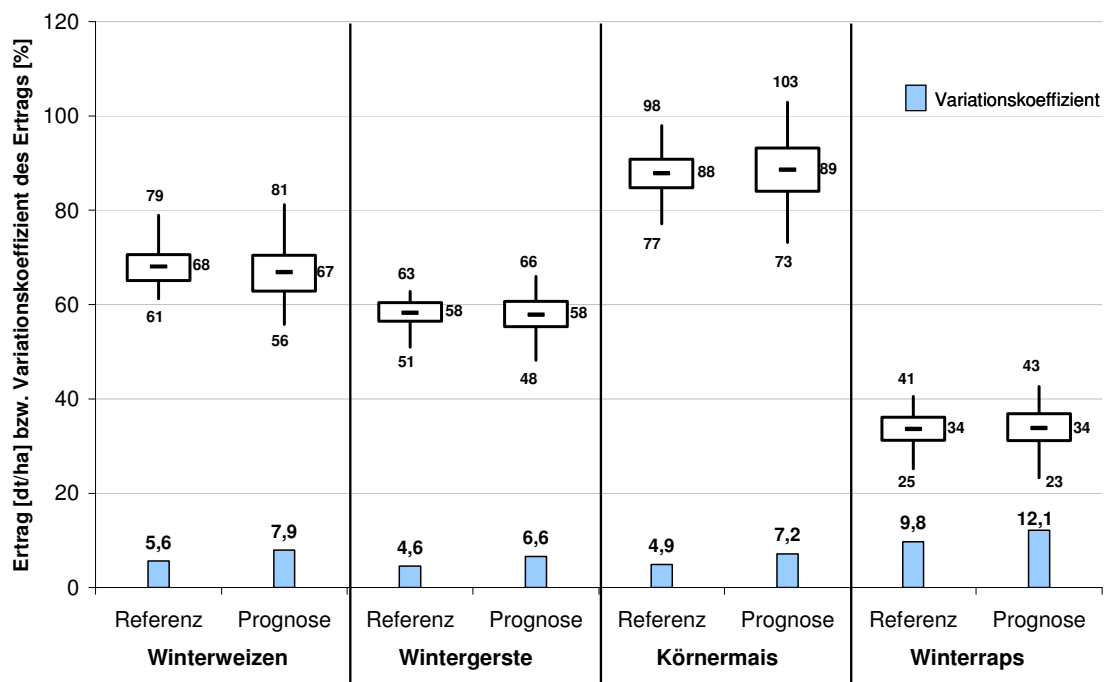
Quelle: Eigene Berechnungen; n = 17

Tabelle 4-2 zeigt den Mittelwert sowie die Standardabweichung und den Variationskoeffizient der Schätzergebnisse der Experten. Der Variationskoeffizient stellt nach SACHS (2003), S. 140 den Quotienten aus Standardabweichung und Mittelwert dar und ist eine Maßzahl für die relative Streuung der einzelnen Ergebnisse um den Mittelwert. In der Literatur wird bei Werten von unter 10 % in der Regel von einer relativ geringen Streuung ausgegangen. Die blau markierten Felder zeigen besonders stabile Ergebnisse an (Variationskoeffizient $\leq 5\%$). Insgesamt gesehen ist die Schwankungsbreite der durch die Experten geschätzten Einzelergebnisse relativ gering, was auf eine hohe Stabilität der Aussagen hindeutet.

4.3.2 Ergebnisse der Ertragssimulationen

Mit den jeweiligen Eckwerten der Ertragsverteilung der einzelnen Kulturen im historischen und im zukünftigen Zeitraum werden Monte-Carlo-Simulationen (1.000 Simulationenläufe) durchgeführt. Daraus ergeben sich modellierte Ertragsverteilungen für den Referenzzeitraum (1971-2000) sowie Prognosen für zukünftige Ertragsverteilungen unter dem Einfluss klimatischer Änderungen (2021-2050). Die Ergebnisse sind nachfolgend in Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-13 dargestellt. Die Verteilung der Erträge ist jeweils als Box-Whisker-Plot dargestellt. Innerhalb der Box ist der Erwartungswert der Erträge dargestellt. Die Box selbst wird durch das 25 %-Quantil und das 75 %-Quantil begrenzt. Die Länge der Whisker gibt den maximalen und den minimalen Wert der Ertragssimulation an. Des Weiteren zeigen die blauen Säulen die Variationskoeffizienten der Verteilung in der Referenzsituation und in der prognostizierten Situation. Abbildung 4-10 zeigt nachfolgend die Ergebnisse für den Standort Freising.

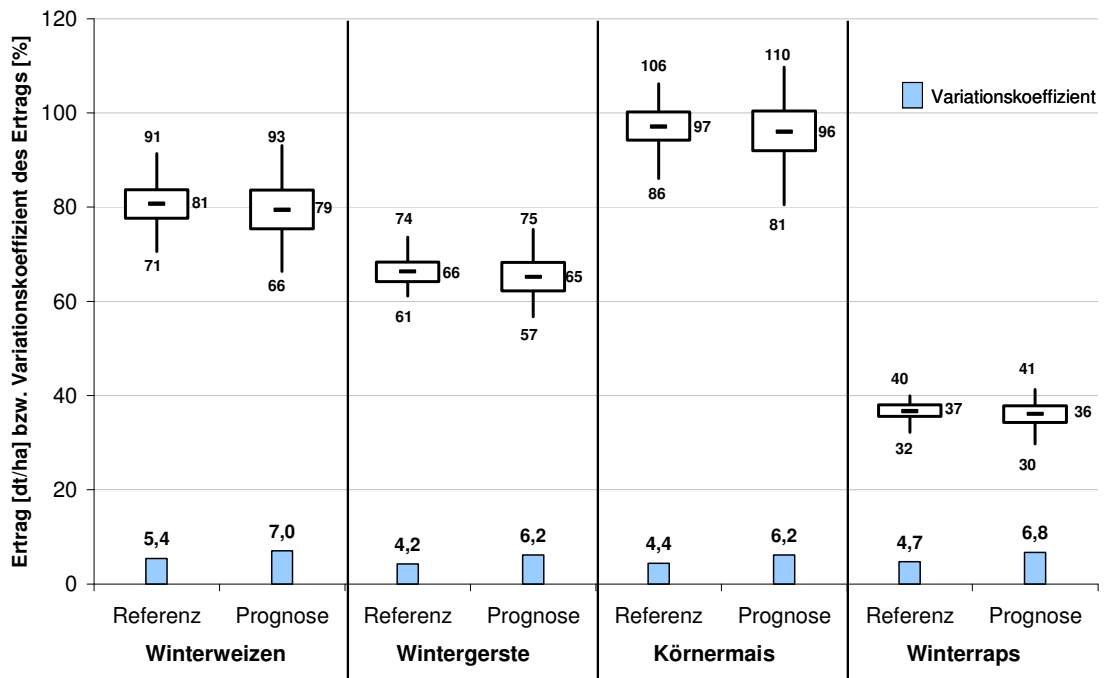
Abbildung 4-10: Ergebnisse der Ertragssimulation (Freising)



Quelle: Eigene Berechnungen; n = 17

Abbildung 4-10 zeigt, dass am Standort Freising die Ertragsvariabilität bei Winterraps am höchsten ist und sich im Prognoseszenario noch erhöht. Auch bei den anderen Kulturen wird die Spannweite der Erträge im Prognoseszenario höher. Besonders deutlich wird das beim Körnermais, wo der maximale Ertrag um 5 dt/ha zunimmt und der minimale Ertrag um 4 dt/ha abnimmt. Der Erwartungswert der Erträge wird bei allen Kulturen von Experten als relativ unverändert eingeschätzt.

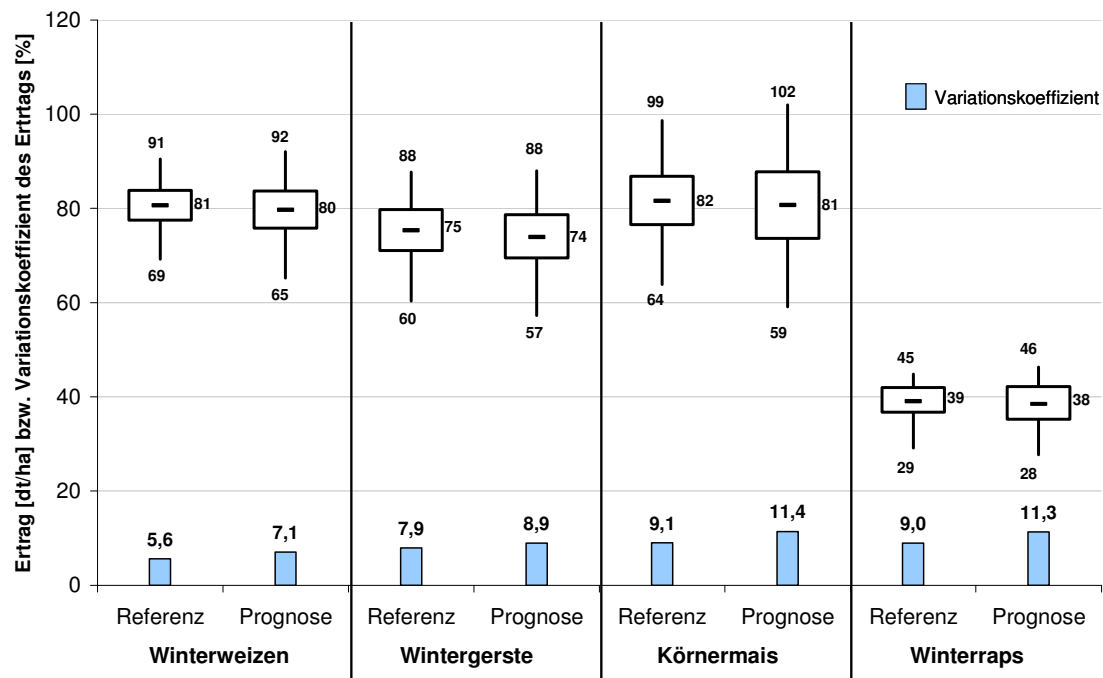
Abbildung 4-11: Ergebnisse der Ertragssimulation (Friedberg)



Quelle: Eigene Berechnungen; n = 17

Abbildung 4-11 zeigt, dass der Standort Friedberg ein relativ ertragssicherer Standort ist und es wohl auch bleiben wird. Hinsichtlich der maximalen Erträge profitiert er den Simulationen zufolge von den prognostizierten klimatischen Veränderungen, während der Erwartungswert des Ertrags relativ gleich bleibend eingeschätzt wird.

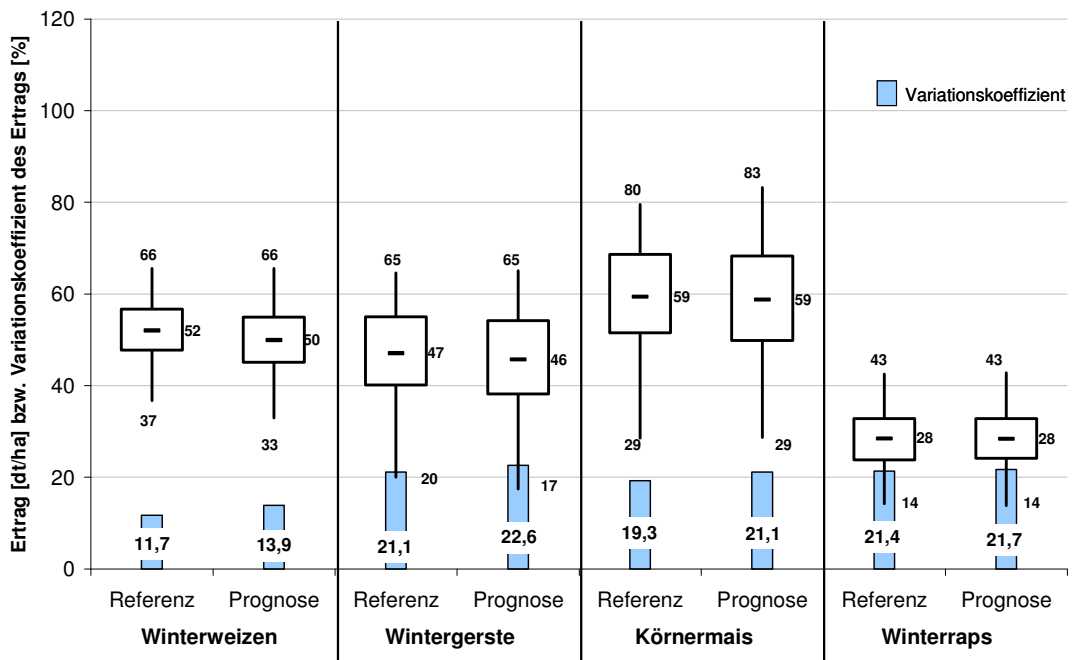
Abbildung 4-12: Ergebnisse der Ertragssimulation (Magdeburg)



Quelle: Eigene Berechnungen; n = 17

Wie aus Abbildung 4-12 ersichtlich wird, ist die Ertragsvariabilität am Standort Magdeburg im Referenzszenario relativ gering, erhöht sich aber im Prognoseszenario. Die Spannweite der Erträge erhöht sich bei allen Kulturen im Prognoseszenario sowohl nach oben als auch nach unten. Der Erwartungswert der Erträge ist im Prognoseszenario bei allen Kulturen etwas geringer als im Referenzszenario.

An dieser Stelle lässt sich bereits festhalten, dass die Ergebnisse dieser Untersuchungen durchaus konsistent mit den Ergebnissen anderer Studien sind. Dort wird ebenfalls eine in Folge des Klimawandels erhöhte Ertragsvariabilität prognostiziert (siehe auch Kapitel 6.2).

Abbildung 4-13: Ergebnisse der Ertragssimulation (Fürstenwalde)


Quelle: Eigene Berechnungen; n = 17

Abbildung 4-13 zeigt, dass die Ertragsvariabilität am Standort Fürstenwalde bereits im Referenzszenario deutlich höher ist als bei den anderen Standorten, was zum einen auf die geringere Bodengüte und zum anderen auf die unsichere Niederschlagsituation zurückzuführen ist. Im Prognoseszenario erhöht sich die Variabilität noch.

4.4 Zwischenfazit: Klimafolgenanalyse durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen

Insgesamt liefert der in Kapitel 4 verfolgte methodische Ansatz der Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion plausible und vor allem für weitere Analysen operationalisierbare Ergebnisse. Diese erlauben in Kapitel 5 daran anknüpfende ökonomische Modellrechnungen vor dem Hintergrund einer erhöhten Ertragsvariabilität infolge klimatischer Veränderungen. Die Schätzwerte der Eckpunkte der jeweiligen Ertragsverteilungen durch die Experten schwanken nur gering, was sich in den niedrigen Variationskoeffizienten ausdrückt. Somit konnten durch Monte-Carlo-Simulationen quantitative Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge in Deutschland abgeleitet werden. Die Methode hat allerdings dahingehend eine Einschränkung, dass ein wichtiger Faktor der Klimaänderung, nämlich der Anstieg des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre nicht entsprechend berücksichtigt werden kann. Die Änderung des CO₂-Gehaltes als Input für die Ertragsschätzung wurde auf Ratschlag von Experten hin nicht berücksichtigt, da dies nicht in deren Erfahrungsbereich liegt und somit nicht hinreichend bewertet werden kann.

5 Ableitung ökonomischer Konsequenzen und Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen – dargestellt am Beispiel des Marktfruchtbaus

In diesem Kapitel werden zum einen die ökonomischen Konsequenzen der in Kapitel 4 durchgeführten Ertragssimulationen abgeleitet. Zum anderen werden Modellrechnungen zur Bewertung des Nutzens von Ernteversicherungen unter zukünftigen prognostizierten Klimabedingungen angestellt. Zunächst wird jedoch der Untersuchungsgegenstand dieses Kapitels erörtert. Bei der Beschreibung von Material und Methoden wird dann auf die entscheidungstheoretischen Grundlagen eingegangen, bevor Datenanalyse und Simulation erläutert werden. Das Kapitel endet mit den Ergebnissen der empirischen Untersuchungen zu den ökonomischen Konsequenzen der Ertragssimulationen und zum Nutzen von Ernteversicherungen sowie einem Zwischenfazit.

5.1 Untersuchungsgegenstand

Ziel der Untersuchungen in diesem Kapitel ist zum einen die Ableitung der ökonomischen Konsequenzen der in Kapitel 4 beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen. Zum anderen sollen der wirtschaftliche Nutzen und die risikoreduzierende Wirkung von Ernteversicherungen bewertet werden. Die Ergebnisse der ökonomischen Modellrechnungen werden dabei exemplarisch für zwei der in Kapitel 4.1 beschriebenen Untersuchungsstandorte dargestellt (Freising und Magdeburg). Dadurch soll auch die Heterogenität der Vulnerabilität von Marktfruchtbaubetrieben innerhalb Deutschlands gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels und der möglichen Nachfrage nach Ernteversicherungen deutlich gemacht werden, da sich die beiden Standorte z. B. hinsichtlich standörtlichen Voraussetzungen oder betrieblichen Gegebenheiten unterscheiden. Die Ergebnisse der weiteren Standorte finden sich im Anhang (siehe Kapitel 9.1 und Kapitel 9.2).

Mit einem Simulationsmodell wird empirisch untersucht, wie stark das ökonomische Risiko durch den Abschluss von Ernteversicherungen gesenkt werden kann. Konkret wird dabei mit Simulationsrechnungen in Risikoanalysen die Variabilität des Erlöses abzüglich der Kosten für die Ernteversicherung untersucht. Der Zweck des Simulationsmodells besteht darin, die Verteilung des versicherungskostenbereinigten Erlöses für verschiedene Handlungsalternativen so zu schätzen, dass ein Entscheider bessere Managemententscheidungen treffen kann.

An dieser Stelle ist es angebracht, Risiken zu definieren. Für die Bestimmung des Begriffs „Risiko“ lässt sich in der Literatur keine einheitliche Definition finden. Im Rahmen dieser Arbeit erscheint jedoch folgende Definition passend. Nach SCHULTE (1998) resultiert Risiko ursachenbezogen aus der Unsicherheit zukünftiger Ereignisse – wobei dies regelmäßig mit einem unvollständigen Informationsstand einhergeht – und schlägt sich wirkungsbezogen in einer negativen Abweichung von einer festgelegten Zielgröße nieder. Diese Definition ist insofern passend, als dass zukünftige klimatische Veränderungen und dabei vor allem die Häufigkeit und Intensität des Eintretens von extremen Wetterereignissen unsicher sind. Wenn diese Wetterereignisse jedoch künftig häufiger auftreten, wird dies negative Abweichungen von einer festgelegten Zielgröße (z. B. Erlös) zur Folge haben. In Marktfruchtbaubetrieben stellen neben schwankenden Erzeuger- und Betriebsmittelpreisen, der Höhe der Zinsen für Fremdkapital oder der Höhe der Pachtpreise vor allem die Witterungsverhältnisse einen bedeutenden Risikofaktor dar. Da der Betriebsleiter keine bzw. nur eingeschränkte Kontrolle über diesen Risikofaktor hat, kann als Risiko auch derjenige Teil unternehmerischer Entscheidungen bezeichnet werden, den der Betriebsleiter nicht kontrollieren kann. Dementsprechend muss bei den nachfolgenden Untersuchungen Risiko entsprechend berücksichtigt werden, um effiziente Entscheidungen treffen zu können.

5.2 Material und Methoden

5.2.1 Grundlegendes zu Risikoanalysen

Insgesamt kann die Risikoanalyse als Bestandteil des Risikomanagements gesehen werden. Der Ablauf des Risikomanagements besteht nach MÜßHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 323 f. aus den vier Bereichen: (1) Gefahrenidentifikation, (2) Risikobewertung, (3) Bewertung von Risikomanagementmaßnahmen und (4) Entscheidung und Umsetzung von Risikomanagementmaßnahmen. Vor allem die ersten beiden Aspekte stellen hier die Risikoanalyse im engeren Sinne dar, während die letzten beiden Aspekte insbesondere die Bewältigung des Risikos zum Ziel haben.

Für konkrete Entscheidungssituationen, bei denen Unsicherheit bzw. Risiko berücksichtigt werden soll, schlägt HANF (1991), S. 77 ein stufenweises Vorgehen zur Risikoanalyse vor, das aus folgenden Schritten besteht:

1. Definition von alternativen Handlungsmöglichkeiten,
2. Ableitung möglicher Ergebnisräume der Zielvariablen und
3. Wahl der optimalen Handlungsalternative.

1. Definition von alternativen Handlungsmöglichkeiten

Die Festlegung der zur Wahl stehenden Handlungsalternativen kann intuitiv oder mit Hilfe deterministischer Planungsmodelle erfolgen (HANF 1991, S. 77). Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen bestehen die Handlungsalternativen darin, die Naturalerträge durch eine Ernteversicherung (mit verschiedenen Stufen der Prämiensubvention) abzusichern oder sich gegen diese zu entscheiden.

2. Ableitung möglicher Ergebnisräume der Zielvariablen

Der Ergebnisraum der Zielvariablen kann mit verschiedenen methodischen Vorgehensweisen abgeleitet werden, z. B. mit Stabilitäts- oder Sensitivitätsanalysen oder mit Simulationsexperimenten (HANF 1991, S. 77). Im Rahmen dieser Arbeit werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zielvariablen (Erlös abzgl. Versicherungskosten) durch Simulationsrechnungen (Monte-Carlo-Simulationen) abgeleitet.

3. Wahl der optimalen Handlungsalternative

Die Wahl der optimalen Handlungsalternative kann auf Basis der Information über den Ergebnisraum der Zielvariablen getroffen werden. Die Wahl kann dabei entweder intuitiv oder auf der Basis von definierten Entscheidungsregeln erfolgen (HANF 1991, S. 77). Orientiert sich der Entscheidende beispielsweise nur am Erwartungswert der Zielgröße (z. B. Gewinn), verhält er sich risikoneutral (vgl. Hanf 1991, S. 80 f.). In der Realität dürfte dies allerdings eher die Ausnahme darstellen und die Schwankungsbreite der Zielgröße dürfte sehr wohl die Entscheidung für oder gegen eine Handlungsalternative beeinflussen.

Im Folgenden werden verschiedene Maßzahlen und Methoden, die als Entscheidungsparameter zur Wahl einer Handlungsalternative dienen können, genauer beschrieben.

5.2.2 Lage- und Streuungsparameter

Für jedes Szenario werden ausgewählte Lage- bzw. Streuungsparameter berechnet. Dies ermöglicht eine Einschätzung der Verteilung von Zufallsvariablen und damit die Wahl einer Handlungsalternative. In der vorliegenden Untersuchung werden daher für jedes Szenario der Erwartungswert, der Variationskoeffizient sowie der Minimal- und Maximalwert des versicherungskostenbereinigten Erlöses berechnet.

5.2.3 Das Konzept der stochastischen Dominanz

Eine Entscheidungsregel unter Unsicherheit ist die Risikoanalyse mit Hilfe der stochastischen Dominanz, die häufig bei Entscheidungen mit einer großen Auswahl an Alternativen angewandt wird (vgl. dazu HANF 1991, S. 91 ff., KUHLMANN 2003, S. 110 ff. und MUßHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 371 ff.).

Grundlegendes

Bei der Wahl einer Handlungsalternative ist grundsätzlich eine Nutzenfunktion des Entscheidenden erforderlich. Das Problem dabei ist, dass zwar eine theoretische Nutzenfunktion verfügbar ist, diese allerdings nur aufwändig empirisch quantifiziert werden kann. Daher werden Annahmen über die Nutzenfunktion getroffen. Der Vorteil bei der stochastischen Dominanz liegt vor allem darin, dass hier relativ wenige Annahmen bezüglich der Risikonutzenfunktion des Entscheidenden erforderlich sind (vgl. HANF 1991, S. 91).

Spezifizierung der Entscheidungsregeln

Um eine hohe diskriminierende Wirkung dieser Anwendung zu erreichen, können drei Stufen der stochastischen Dominanz berechnet werden, die stochastische Dominanz 1., 2. und 3. Grades. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Annahmen über die Nutzenfunktion des Entscheidenden. Bei der stochastischen Dominanz 1. Grades wird eine monoton steigende Nutzenfunktion angenommen, was bedeutet, dass der Entscheidende ein Mehr in Bezug auf das Ergebnis einem Weniger vorzieht. Beispielsweise wird also bei dieser Annahme ein höherer Gewinn einem niedrigeren vorgezogen.

Bei der stochastischen Dominanz 2. Grades wird zusätzlich ein abnehmender Grenznutzen angenommen. Das bedeutet, dass der Nutzenzuwachs von z. B. einem zusätzlichen Euro bei einem Gewinn von 100 € höher bewertet wird als der Nutzenzuwachs von einem zusätzlichen Euro bei einem Gewinn von 1.000 €. Formal wird hier also eine monoton steigende und strikt konkave Nutzenfunktion angenommen, dies bedeutet, dass der Entscheidende sich risikoavers verhält. Über das Ausmaß der Risikoaversion wird dabei allerdings noch keine Annahme getroffen.

Bei der stochastischen Dominanz 3. Grades wird zusätzlich die Annahme getroffen, dass die Risikoaversion mit zunehmendem Vermögensniveau abnimmt. Diese Annahme ist hingegen schon etwas problematischer, da auch argumentiert werden könnte, dass mit zunehmendem Reichtum eher die Tendenz einer zunehmenden Angst vor dem Verlust von Reichtum auftritt (HANF 1991, S. 93 f.).

Überprüfung der stochastischen Dominanz

Durch die Berechnung der stochastischen Dominanz werden effiziente von ineffizienten Auswahlmöglichkeiten selektiert und dadurch ihre relative Vorzüglichkeit dargestellt. Die Grundlage zur Prüfung der stochastischen Dominanz ist die kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zielgröße einer Handlungsalternative.

Beispielhaft soll dies anhand dreier Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen $f(x)$, $g(x)$ und $h(x)$ der Gewinne x von drei Handlungsalternativen F , G und H dargestellt werden (siehe HANF 1991, S. 96 ff.). Es handelt sich dabei um beschränkte Funktionen mit a als

unterer und b als oberer Grenze. Der Wertebereich zwischen a und b wird als R bezeichnet. Zur Prüfung auf stochastische Dominanz 1. Grades wird zuerst die kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung entsprechend folgender Gleichung gebildet:

$$F_1(R) = \int_a^b f(x) dx$$

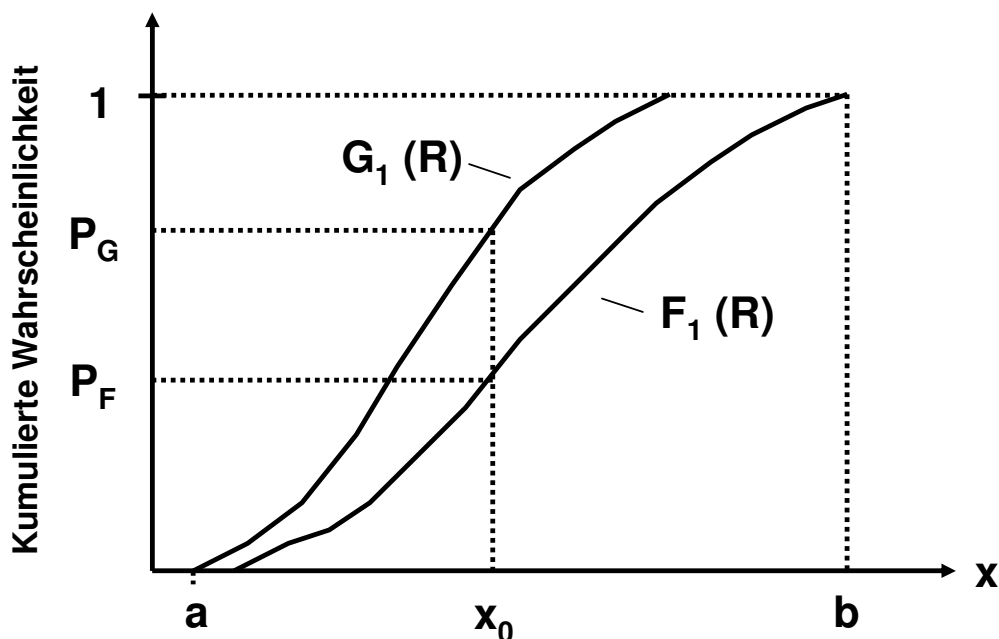
Entsprechende kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen $G_1(R)$ und $H_1(R)$ müssen ebenfalls gebildet werden. Die Handlungsalternative F gilt als stochastisch dominant 1. Grades gegenüber der Handlungsalternative G , wenn gilt:

$$F_1(R) \leq G_1(R)$$

für alle R (und wenn mindestens für ein R gilt, dass $F_1(R) < G_1(R)$ ist).

Grafisch dargestellt bedeutet dies, dass die Verteilungsfunktion der Handlungsalternative F rechts von der entsprechenden Verteilungsfunktion von G liegt (siehe Abbildung 5-1).

Abbildung 5-1: Stochastische Dominanz 1. Grades



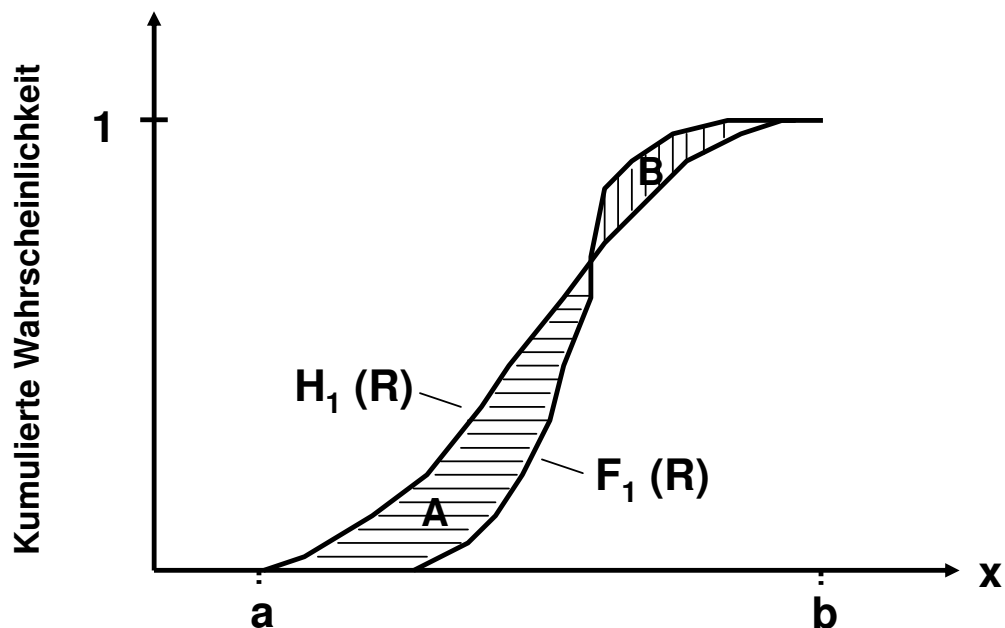
Quelle: Eigene Darstellung nach HANF (1991), S. 98

Die Verteilungsfunktion von F ist in diesem Fall stochastisch dominant 1. Grades gegenüber G . Ausgehend von einem beliebigen Wert x_0 zwischen den Werten a und b

bedeutet dies, dass in jedem Fall die Wahrscheinlichkeit einen geringeren Gewinn als x_0 zu erhalten bei der Handlungsalternative G größer ist als bei F bzw., dass F auf jedem Wahrscheinlichkeitsniveau einen höheren Gewinn erzielt als G.

Überschneiden sich die kumulativen Verteilungen jedoch, reicht die 1. Dominanzregel nicht aus, um ohne weitere Annahmen eine Entscheidung zugunsten einer Handlungsalternative zu treffen. Eine Entscheidung kann hier evtl. durch Berechnung der stochastischen Dominanz 2. Grades gefällt werden (vgl. Abbildung 5-2).

Abbildung 5-2: Stochastische Dominanz 2. Grades



Quelle: Eigene Darstellung nach HANF (1991), S. 98

Abbildung 5-2 zeigt, dass die Verteilungsfunktion von F günstigere Bedingungen im unteren Wertebereich aufweist, während die Verteilungsfunktion von H günstigere Bedingungen im oberen Wertebereich hat. Inhaltlich lässt sich dies folgendermaßen interpretieren. Da in Abbildung 5-2 die waagrecht schraffierte Fläche A größer ist als die senkrecht schraffierte Fläche B, wird sich ein risikoaverser Entscheider für die Handlungsalternative F entscheiden, da er den Wahrscheinlichkeitsvorteil von F im unteren Bereich stärker gewichtet, als den von H im oberen Bereich. Solange die waagrecht schraffierte Fläche größer ist als die senkrecht schraffierte Fläche, muss keine Annahme über den Grad der Risikoaversion getroffen werden. Ist dies nicht der Fall, so müssen zusätzliche Gewichtungsfaktoren eingeführt werden, oder es kann auf stochastische Dominanz 3. Grades geprüft werden, worauf hier nicht näher eingegangen wird.

Zur mathematischen Prüfung auf stochastische Dominanz 2. Grades werden die kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen erneut integriert. Formal wird folgendermaßen vorgegangen:

$$F_2(R) = \int_a^b F_1(x) dx$$

und entsprechend $H_2(R)$.

Die Verteilung F ist dann stochastisch dominant 2. Grades über die Verteilung H , wenn gilt:

$$F_2(R) \leq H_2(R)$$

für alle R .

Insgesamt stellt das Konzept der stochastischen Dominanz eine Hilfestellung bei der Auswahl einer effizienten Handlungsalternative dar. Von Nachteil ist dabei allerdings die häufig geringe diskriminierende Kraft dieses Konzepts. So bringt z. B. der Abschluss einer Versicherung eine Risikoreduktion, gleichzeitig sinkt aber auch der Erwartungswert der Zielgröße. Um eine Handlungsempfehlung aussprechen zu können, ist es daher meist notwendig, den Grad der Risikoaversion des Entscheiders zu berücksichtigen (MÜßHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 372). Aus diesem Grund erfolgt zudem eine Bewertung der Versicherungsmodelle mit dem Erwartungsnutzen-Prinzip, welches im Folgenden näher erläutert wird.

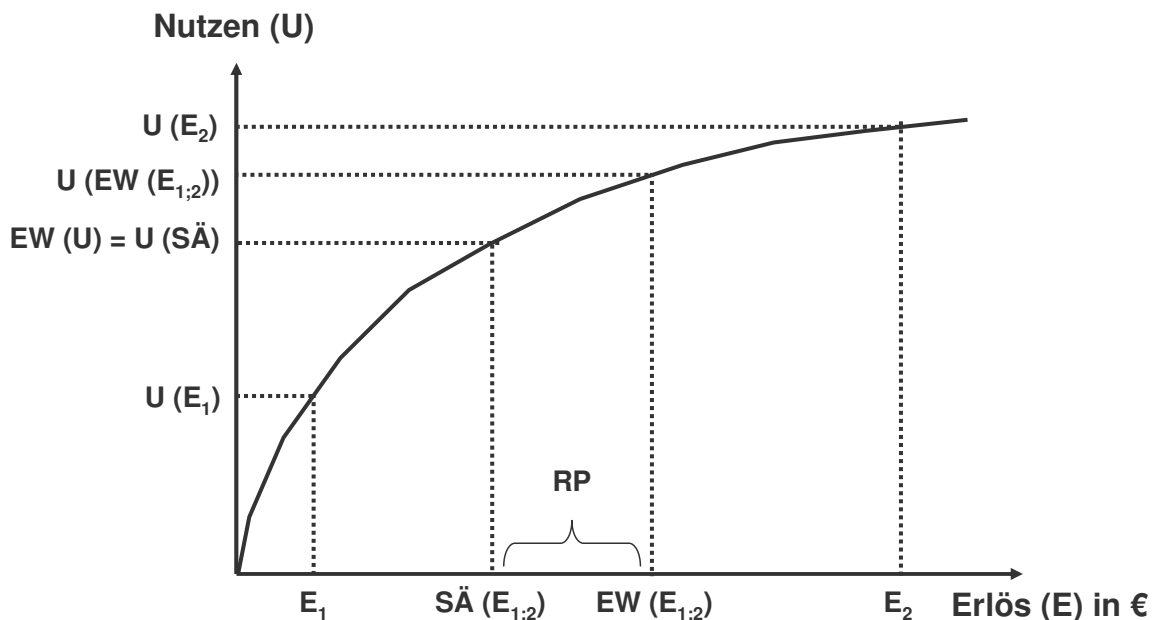
5.2.4 Das Erwartungsnutzen-Prinzip

Orientiert sich ein Entscheider nur am Erwartungswert einer Zielgröße und vernachlässigt deren Streuung, verhält er sich risikoneutral. In der unternehmerischen Realität dürfte dies allerdings die Ausnahme darstellen und es ist eher von risikoaverssem Verhalten auszugehen, zumindest dann, wenn durch eine zu große Streuung der Zielgröße die wirtschaftliche Existenz gefährdet ist. Dieser Zusammenhang wurde bereits im Jahr 1738 von Daniel Bernoulli erkannt und im Jahr 1947 durch von Neumann und Morgenstern axiomatisch begründet (BERG 1997). Demnach existiert unter bestimmten Voraussetzungen (vgl. dazu MÜßHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 375) für den Entscheider eine Risikonutzenfunktion, mit welcher alle möglichen Werte der Zielgröße in eine dimensionslose Nutzengröße überführt werden können. Das Beurteilungskriterium zur Wahl einer Handlungsalternative ist dann der Erwartungswert des Nutzens. In diesem Zusammenhang bedeuten ein konkaver Verlauf der Risikonutzenfunktion Risikoaversi-

on, ein linearer Verlauf Risikoneutralität und ein konvexer Verlauf Risikofreude (BERG 1997, MUßHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 374 ff.).

Beim Erwartungsnutzen-Prinzip werden also sowohl das Risiko der unsicheren Zielgröße, als auch die Risikoeinstellung des Entscheiders berücksichtigt. Die Beziehung zwischen dem Erwartungsnutzen einer sicheren und einer unsicheren Alternative kann nach MUßHOFF und HIRSCHAUER (2010), S. 377 auch mit Hilfe der Risikoprämie und des Sicherheitsäquivalents beschrieben werden. Das Sicherheitsäquivalent kennzeichnet den sicheren Geldbetrag, der für einen Entscheidungsträger mit einer bestimmten Risikonutzenfunktion denselben Nutzen stiftet wie der Erwartungswert einer Alternative mit unsicherem Ausgang. Ist ein risikoaverser Entscheidungsträger mit verschiedenen Alternativen konfrontiert, so wählt er diejenige mit dem höchsten Sicherheitsäquivalent. Die Risikoprämie stellt die Differenz zwischen dem Erwartungswert der unsicheren Alternative und dem Sicherheitsäquivalent dar. Nach BERG (1997) ist die Risikoprämie für einen risikoaversen Entscheidungsträger stets positiv und kennzeichnet den erforderlichen Kompensationsbetrag für die Übernahme des Risikos einer unsicheren Alternative. Das Sicherheitsäquivalent eines risikoaversen Entscheiders ist damit stets geringer als der Erwartungswert der Zielgröße. Nachfolgend zeigt Abbildung 5-3 den grafischen Zusammenhang dieses Sachverhalts.

Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Erwartungswert (EW), Erwartungsnutzen (EW (U)), Sicherheitsäquivalent (SÄ) und Risikoprämie (RP)



Quelle: Eigene Darstellung nach MUßHOFF und HIRSCHAUER (2010), S. 377

Zur Bewertung der verschiedenen Handlungsalternativen wird im Rahmen dieser Arbeit eine von HARDAKER et al. (2004b) vorgeschlagene Methode zur Schätzung von Si-

cherheitsäquivalenten verwendet. Diese Methode liefert für eine Bandbreite von absoluten Risikoaversionskoeffizienten auf der Basis einer Stichprobe mit n Beobachtungen und den jeweiligen Werten der Zielgröße Schätzwerte für das Sicherheitsäquivalent. Der absolute Risikoaversionskoeffizient drückt die Risikoeinstellung des Entscheiders aus und wird durch den Quotient aus relativem Risikoaversionskoeffizienten und dem Vermögen des Entscheiders berechnet (MURHOFF und HIRSCHAUER 2010, S. 378). Als Vermögen des Entscheiders wird die Eigenkapitalausstattung in Euro pro Hektar LF herangezogen. Dieser Wert wird für die Untersuchungsstandorte den jeweiligen regionaltypischen Daten des Testbetriebsnetzes des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz entnommen und beträgt demnach bei Marktfuchtbaubetrieben für den Standort Freising 12.834 €/ha LF und für den Standort Magdeburg 2.010 €/ha LF (Wirtschaftsjahr 2008/09) (vgl. BMELV 2010). Dieser Unterschied kommt vor allem durch die Höhe des Anteils der Pachtflächen zustande. Der fortwährende Strukturwandel induziert betriebliches Wachstum, was zu niedrigeren Eigenkapitalquoten führt und dadurch letztlich auch die Risikoexposition der Betriebe erhöhen dürfte. Durch die Verwendung des absoluten Risikoaversionskoeffizienten kann nun berücksichtigt werden, inwieweit das Vermögen, das der Entscheider besitzt, seine Risikoeinstellung beeinflusst. Nach MURHOFF und HIRSCHAUER (2010), S. 378 sinkt dabei die Risikoaversion mit steigendem Vermögen bzw. bleibt allenfalls konstant. In einer Reihe von Studien, in denen mit Hilfe ökonomischer Ansätze die relative Risikoaversion von Landwirten geschätzt wurde, wurden Werte von 1 bis 2 (ANTLE 1987), 0 bis 2 (BARDSLEY und HARRIS 1987) und 1 bis 3 (MYERS 1989) geschätzt. Weitere in der Literatur vorgeschlagene Werte für die relative Risikoaversion liegen bei 0,5 bis 1,2 (NEWBERY und STIGLITZ 1981), 0 bis 4 (LITTLE und MIRRELES 1974, HAMAL und ANDERSON 1982) und ca. 1 (ARROW 1971). Nach Auswertung dieser Literatur kommen GANDORFER et al. (2011) zu dem Schluss, dass Werte zwischen 0 und 4 die Risikoeinstellung der meisten Landwirte erfassen sollten. Daher wurde dieser Bereich für die weiteren Untersuchungen verwendet. Ein relativer Risikoaversionskoeffizient von 0 entspricht dabei einem risikoneutralen Entscheidungsträger, während ein Koeffizient von 4 einen stark risikoscheuen Entscheidungsträger darstellt.

Das Sicherheitsäquivalent lässt sich nach MURBHOFF und HIRSCHAUER (2010), S. 380 mit Hilfe der Umkehrfunktion der Risikonutzenfunktion berechnen. Hier wird eine exponentielle Risikonutzenfunktion unterstellt.

Formel 5-1: Risikonutzenfunktion

$$U(E) = \alpha - \beta * e^{-\lambda * E}; \text{ mit } \beta, \lambda > 0$$

mit:

$$U(E) = \text{Nutzen}$$

$$E = \text{Erlös}$$

$$\alpha, \beta = \text{Koeffizienten der Risikonutzenfunktion}$$

$$\lambda = \text{absoluter Risikoaversionskoeffizient}$$

Die Umkehrfunktion lautet folgendermaßen:

Formel 5-2: Umkehrfunktion der Risikonutzenfunktion

$$E(U) = -\ln \frac{\alpha - U}{\beta} * \frac{1}{\lambda}$$

Wird anstelle des Erwartungsnutzens der Wert der Umkehrfunktion berechnet, so ergibt sich das Sicherheitsäquivalent.

Formel 5-3: Sicherheitsäquivalent

$$S\ddot{A} = -\ln \frac{\alpha - EW[U(E)]}{\beta} * \frac{1}{\lambda}$$

Die Bewertung der Handlungsalternativen erfolgt dann durch einen Vergleich der Sicherheitsäquivalente des Erlöses pro Hektar mit Versicherung und ohne Versicherung.

5.2.5 Datenanalyse und Simulation

Im landwirtschaftlichen Betrieb resultieren Risiken aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Faktoren mit unterschiedlich starker Ausprägung. In Marktfruchtbaubetrieben sind die Schwankung von Erträgen und Preisen von entscheidender Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Betriebs. Die Überlagerung dieser beiden Faktoren kann sich dabei sowohl positiv als auch negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Da der Fokus der bisherigen Ausführungen auf die klimabedingten Schwankungen der Naturalerträge gelegt wurde, wird auch in den folgenden Simulationsrechnungen der Schwer-

punkt auf die Untersuchung der ökonomischen Konsequenzen der in Kapitel 4 beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturalerträge sowie damit einhergehend die Bewertung der Effizienz von Ernteversicherungen gelegt. Im Folgenden werden die Modelldaten und Modellannahmen sowie der Aufbau und die Funktionsweise des Simulationsmodells beschrieben.

5.2.5.1 Modelldaten und Modellannahmen

In einem Simulationsmodell werden Modellrechnungen für die Standorte Freising und Magdeburg durchgeführt. Im Simulationsmodell werden dabei im Referenzszenario die modellierten Ertragsverteilungen für den Referenzzeitraum (1971 bis 2000) sowie im Prognoseszenario die zukünftigen Ertragsverteilungen unter dem Einfluss klimatischer Änderungen (2021 bis 2050) verwendet. Da zwischen den historischen Ertragsdaten der einzelnen Feldfrüchte teilweise Korrelationen bestehen, müssen diese im Simulationsmodell entsprechend berücksichtigt werden. Hierfür werden zunächst die Korrelationskoeffizienten ermittelt (siehe Anhang-Tabelle 3 und Anhang-Tabelle 4). Die identifizierten Zusammenhänge werden dann im Simulationsmodell mit Hilfe von korrelierten Zufallszahlen berücksichtigt (vgl. RICHARDSON et al. 2006, S 25 f.). Es wird der Erlös einer repräsentativen Fruchtfolge bezogen auf ein Hektar LF betrachtet. Der Anbauumfang der einzelnen Kulturen umfasst dabei zu 40 % Winterweizen, zu 20 % Wintergerste, zu 30 % Winterraps und zu 10 % Körnermais.

Die Preisdaten für die einzelnen Kulturen gehen als deterministische Größen in das Simulationsmodell ein und orientieren sich an Durchschnittswerten von Preisdaten der Jahre 1997 bis 2008 (ZMP, verschiedene Jahrgänge). Aufgrund der zunehmenden Liberalisierung der Agrarmärkte und einem zunehmenden Volumen des Weltagrarhandels wird die Annahme getroffen, dass Preise und Erträge voneinander unabhängige Variablen darstellen. Eine Studie von GANDORFER et al. (2011), in der gezeigt wird, dass bayerische Ertrags- und Preisdaten im Zeitraum von 1997 bis 2008 nicht miteinander korrelieren, bestätigt diese Annahme.

5.2.5.2 Beschreibung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell dient dazu, die ökonomischen Konsequenzen der in Kapitel 4 ermittelten Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen abzuleiten sowie die Effizienz einer Ernteversicherung (hier: Ertragsgarantieversicherung) im Hinblick auf die Stabilität des Erlöses im Marktfruchtbau exemplarisch darzustellen. Unter einer Ertragsgarantieversicherung wird nach HIRSCHAUER und MURHOFF (2008) eine schadensbezogene Ernteversicherung verstanden, mit welcher der Ertrag einer Kultur im einzelnen Betrieb versichert werden kann. Dabei kommt es zu einer Versicherungsleistung, wenn der gemessene betriebliche Durchschnittsertrag der versicherten Kultur den vertraglich festgelegten Normertrag unterschreitet. Dieser Normertrag wird z. B. auf der Grundlage historischer Erträge des Betriebs und unter

Berücksichtigung eines Selbstbehaltes ermittelt. Bei Ertragsgarantieversicherungen sind Schäden im Unterschied zu Ertragsverlustversicherungen (z. B. Hagelversicherung) unabhängig von ihrer Ursache versichert. Zur Berechnung der Versicherungsleistung wird ein Normpreis festgelegt, mit dem der versicherte Minderertrag multipliziert wird. Dieser entspricht im Simulationsmodell dem deterministischen Marktpreis.

Das Simulationsmodell kann grundsätzlich dazu verwendet werden, eine Vielzahl von Kombinationen verschiedener Versicherungskonzepte (z. B. Variation von Ertrags- oder Preisdeckung) darzustellen. In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt vor allem darauf gelegt, den wirtschaftlichen Nutzen und die risikoreduzierende Wirkung einer Ernteversicherung unter derzeitigen und künftigen Klimabedingungen darzustellen. Damit soll beurteilt werden, ob und unter welchen Umständen Ernteversicherungen brauchbare Instrumente sind, um die Einkommen landwirtschaftlicher Betriebe, gemessen am Erlös in Euro pro Hektar LF, zu stabilisieren.

Ableiten der ökonomischen Konsequenzen der Ertragssimulation und Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens einer Ertragsgarantieversicherung

Als zentrale Untersuchungsgröße wird der Erlös abzgl. Versicherungskosten (versicherungskostenbereinigter Erlös) gewählt, da Ernteversicherungen vor allem dazu dienen sollen, das Einkommen landwirtschaftlicher Betriebe zu stabilisieren. Die Berechnung des Erlöses abzgl. Versicherungskosten erfolgt im Rahmen der Modellrechnungen in dieser Arbeit anhand des nachfolgenden Schemas (siehe Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Schema zur Ermittlung der Erfolgskenngröße

Rechenschritt	Nr.
Ertrag Kultur i (dt/ha) x Preis Kultur i (€/dt)	1
- Versicherungsprämie Kultur i (optional) (€/ha)	2
+ Versicherungsleistung Kultur i (optional) (€/ha)	3
= Erlös abzgl. Versicherungskosten Kultur i (€/ha) x relativer Anbauumfang (%)	4
+ ...	5
+ Erlös abzgl. Versicherungskosten Kultur n (€/ha) x relativer Anbauumfang (%)	6
= Ø Erlös abzgl. Versicherungskosten (€/ha)	7

Quelle: Eigene Darstellung

Rechenschritt Nr. 2 und Nr. 3 werden dabei nur durchgeführt, wenn eine Ernteversicherung abgeschlossen wird. Zur Ableitung der ökonomischen Konsequenzen der in Kapitel 4 ermittelten Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen werden diese Schritte also nicht durchgeführt, da hier c. p. die ökonomischen Auswirkungen klimawandelbedingter Ertragsvarianzen ermittelt werden sollen.

Beschreibung des Versicherungskonzepts

Um den Effekt von Ernteversicherungen auf die Variabilität des Erlöses darzustellen, werden folgende Annahmen getroffen:

- **Ertragsdeckung:**
 - 100 % des Erwartungswerts des Ertrags (d. h. kein Selbstbehalt, da regionale Ertragsdaten verwendet werden)
- **Preisdeckung:**
 - 90 % (d. h. Ertragsausfälle werden zu 90 % des durchschnittlichen Marktpreises entschädigt)
- **Versicherungsprämie:**
 - Die zu entrichtende Prämie entspricht dem Erwartungswert der Versicherungsleistung im versicherungstechnischen Sinne (Erwartungswert des Schadens) zzgl. einem Aufschlag von 25 % (für administrative Kosten und Gewinnmarge).
 - Betrachtung von drei Subventionsstufen:
 - Stufe 0: keine staatliche Prämiensubvention
 - Stufe 1: 20 % staatliche Prämiensubvention (Übernahme des Aufschlags des Versicherungsunternehmens auf die faire Prämie durch den Staat; $0,2 \times 1,25$ (Prämie zzgl. Aufschlag) = 0,25)
 - Stufe 2: 50 % staatliche Prämiensubvention

Die Ertragsdeckung multipliziert mit dem Erwartungswert des Ertrags ergibt diejenige Ertragshöhe, bei welcher eine Zahlung der Versicherung ausgelöst wird. In diesem Fall wird kein Selbstbehalt vorgegeben, da es sich bei den Ertragsdaten um Regionaldaten handelt, die eine geringere Schwankungsbreite als betriebliche Daten aufweisen. Ertragsausfälle werden zu 90 % des durchschnittlichen Marktpreises entschädigt, da Landwirte dadurch den Anreiz haben, immer den höchstmöglichen Ertrag anzustreben und somit Moral Hazard vermieden werden soll. Die Versicherungsprämie wird kalkuliert, indem der Erwartungswert der Versicherungsleistung berechnet wird. Wenn die Versicherungsprämie fair ist, entspricht sie dem Erwartungswert der Versicherungsleistung und verändert den erwarteten Erlös des Landwirts nicht. Weder Produktionskosten noch Versicherungsprämie haben dann einen Einfluss auf die Wahl der optimalen Versicherungsdeckung. Es wird jedoch mit einem Aufschlag von 25 % auf die faire Prämie gerechnet, mit welchem das Versicherungsunternehmen seine administrativen Kosten abdeckt und eine Gewinnmarge erhebt. Dies entspricht nach HIRSCHAUER und

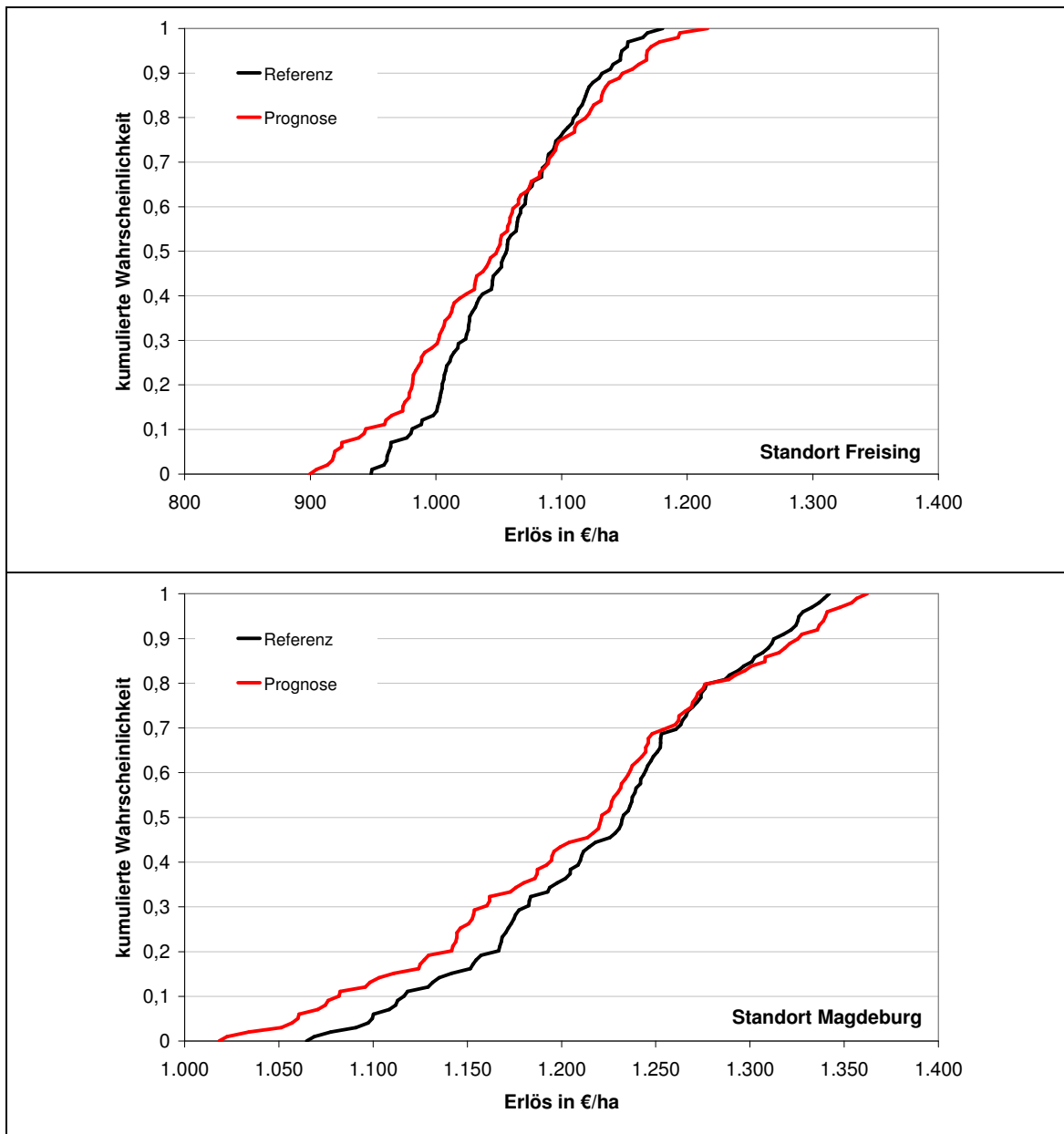
MUßHOFF (2008) in etwa dem Aufpreis, der bei Extremwetterversicherungen gefordert wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Subventionsstufen (s. o.) betrachtet.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Ableitung ökonomischer Konsequenzen

Im Folgenden werden die ökonomischen Konsequenzen der in Kapitel 4 beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturalerträge landwirtschaftlicher Kulturen vorgestellt. Dabei werden exemplarisch für die Standorte Freising und Magdeburg die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses einer repräsentativen Fruchtfolge (40 % Winterweizen, 20 % Wintergerste, 30 % Winterraps, 10 % Körnermais) pro Hektar dargestellt (siehe Abbildung 5-4).

Abbildung 5-4: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Erlöses an den Standorten Freising und Magdeburg



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-4 zeigt, dass die Spannweite des Erlöses am Standort Freising im Referenzszenario von rd. 950 € bis rd. 1.180 € reicht. Im Prognoseszenario ist der Bereich größer und reicht von rd. 900 € bis rd. 1.220 €. Der Erwartungswert des Erlöses ist im Prognoseszenario etwas geringer als im Referenzszenario. Die Schwankungsbreite des Erlöses insgesamt ist am Standort Freising geringer als am Standort Magdeburg, was die Ertragssituation widerspiegelt.

Auch am Standort Magdeburg wird die Spannweite des Erlöses im Prognoseszenario größer. Außerdem wird ersichtlich, dass hier im Prognoseszenario die Wahrscheinlichkeit einen geringeren Erlös als im Referenzszenario zu erhalten bei rd. 70 bis 80 % liegt.

Zu 20 % wird jedoch ein höherer Erlös erreicht, der im Prognoseszenario rd. 20 € mehr betragen kann als im Referenzszenario. Der minimale Erlös sinkt im Prognoseszenario um knapp 50 € im Vergleich zum Referenzszenario ab.

5.3.2 Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Risikoanalysen zur Bewertung der ökonomischen Effizienz von Ernteversicherungen dargestellt. Dabei werden jeweils für die beiden Untersuchungsstandorte Freising und Magdeburg für den Referenzzeitraum und für den Prognosezeitraum die Ergebnisse der Szenarien „ohne Versicherung“ und „mit Versicherung“ (mit drei verschiedenen Subventionsstufen) dargestellt. Der Referenzzeitraum repräsentiert dabei die historische Ertragssituation, wohingegen im Prognosezeitraum die Folgen des Klimawandels die Naturalerträge der landwirtschaftlichen Kulturen beeinflussen (vgl. Kapitel 4). Die risikoreduzierende Wirkung und der wirtschaftliche Nutzen von Ernteversicherungen werden bewertet, indem die Variabilität des Erlöses der beiden Szenarien „mit Versicherung“ und „ohne Versicherung“ miteinander verglichen werden. Das Risiko wird im Simulationsmodell zum einen durch die Veränderung der Erwartungswerte, der Variationskoeffizienten sowie der Minimal- und Maximalwerte des Erlöses quantifiziert. Zum anderen werden kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jeweiligen Erlöse erzeugt, um zu überprüfen, ob bestimmte Handlungsalternativen stochastisch dominant ersten bzw. zweiten Grades gegenüber anderen sind. Des Weiteren werden die Sicherheitsäquivalente der Erlöse der einzelnen Handlungsalternativen berechnet, um den Grad der Risikoaversion des Entscheiders berücksichtigen zu können.

5.3.2.1 Lage- und Streuungsparameter des Erlöses

Nachfolgend werden in Tabelle 5-2 die mittels Simulationsrechnungen abgeleiteten Parameter Erwartungswert, Variationskoeffizient sowie Minimal- und Maximalwert des Erlöses der einzelnen Versicherungsvarianten für den Standort Freising dargestellt.

Tabelle 5-2: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Freising

		Versicherungsstrategien			
Kennzahl	Szenario	o. Vers. ³⁾	m. Vers. (0%) ⁴⁾	m. Vers. (20%) ⁵⁾	m. Vers. (50%) ⁶⁾
Erwartungswert	Ref ¹⁾	1.056 €	1.048 €	1.056 €	1.065 €
	Prog ²⁾	1.047 €	1.039 €	1.047 €	1.060 €
Variationskoeffizient	Ref ¹⁾	5,36 %	3,22 %	3,20 %	3,17 %
	Prog ²⁾	7,22 %	4,33 %	4,29 %	4,24 %
Min	Ref ¹⁾	949 €	1.012 €	1.019 €	1.029 €
	Prog ²⁾	900 €	991 €	999 €	1.011 €
Max	Ref ¹⁾	1.180 €	1.148 €	1.154 €	1.164 €
	Prog ²⁾	1.216 €	1.175 €	1.183 €	1.195 €

Anmerkungen: ¹⁾ Referenzszenario, ²⁾ Prognoseszenario, ³⁾ ohne Versicherung, ⁴⁾ mit Versicherung (0 % Prämiensubvention), ⁵⁾ mit Versicherung (20 % Prämiensubvention), ⁶⁾ mit Versicherung (50 % Prämiensubvention)

Quelle: Eigene Berechnungen

Bei einem Vergleich von Referenz- und Prognoseszenario zeigt sich, dass im Szenario „ohne Versicherung“ der Erwartungswert des Erlöses im Prognoseszenario geringer, der Variationskoeffizient hingegen höher ist. Das liegt vor allem an den negativen Erlösabweichungen, denn der minimale Erlös sinkt im Prognoseszenario um rd. 50 € gegenüber dem Referenzszenario.

Beim Vergleich der Versicherungsvarianten wird deutlich, dass alle Versicherungsvarianten die Variabilität des Erlöses, gemessen am Variationskoeffizienten, reduzieren. Der Erwartungswert des Erlöses sinkt dadurch naturgemäß bei Subventionsstufe 0 (keine Prämiensubvention) ab und bleibt bei Subventionsstufe 1 (20 % Prämiensubvention) gleich hoch. Das liegt daran, dass bei Subventionsstufe 1 das Entgelt für die Versicherungsprämie der durchschnittlichen Versicherungsleistung entspricht. Subventionsstufe 2 (50 % Prämiensubvention) erhöht hingegen den Erwartungswert des Erlöses, was auf eine Einkommensstützung durch die Ernteversicherung schließen lässt. Die negativen Abweichungen des Erlöses lassen sich durch alle Versicherungsvarianten verringern. Der maximal mögliche Erlös ist hingegen jeweils beim Szenario „ohne Versicherung“ am höchsten.

Die entsprechenden Ergebnisse für den Standort Magdeburg sind nachfolgend in Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Magdeburg

		Versicherungsstrategien			
Kennzahl	Szenario	o. Vers. ³⁾	m. Vers. (0%) ⁴⁾	m. Vers. (20%) ⁵⁾	m. Vers. (50%) ⁶⁾
Erwartungswert	Ref ¹⁾	1.220 €	1.216 €	1.220 €	1.236 €
	Prog ²⁾	1.210 €	1.200 €	1.210 €	1.225 €
Variationskoeffizient	Ref ¹⁾	5,75 %	3,19 %	3,17 %	3,14 %
	Prog ²⁾	7,15 %	4,02 %	3,99 %	3,94 %
Min	Ref ¹⁾	1.065 €	1.166 €	1.174 €	1.186 €
	Prog ²⁾	1.018 €	1.139 €	1.149 €	1.164 €
Max	Ref ¹⁾	1.342 €	1.304 €	1.312 €	1.323 €
	Prog ²⁾	1.362 €	1.312 €	1.322 €	1.337 €

Anmerkungen: ¹⁾ Referenzszenario, ²⁾ Prognoseszenario, ³⁾ ohne Versicherung, ⁴⁾ mit Versicherung (0 % Prämiensubvention), ⁵⁾ mit Versicherung (20 % Prämiensubvention), ⁶⁾ mit Versicherung (50 % Prämiensubvention)

Quelle: Eigene Berechnungen

Dadurch dass im Prognoseszenario die negativen Abweichungen des Erlöses zunehmen, sinken dort insgesamt die Erwartungswerte des Erlöses. Die Maximalwerte des Erlöses sind hingegen im Prognoseszenario durchgehend höher als im Referenzszenario. Die Variabilität des Erlöses wird also zukünftig am Standort Magdeburg zunehmen, was sich auch in den höheren Werten des Variationskoeffizienten im Prognoseszenario ausdrückt.

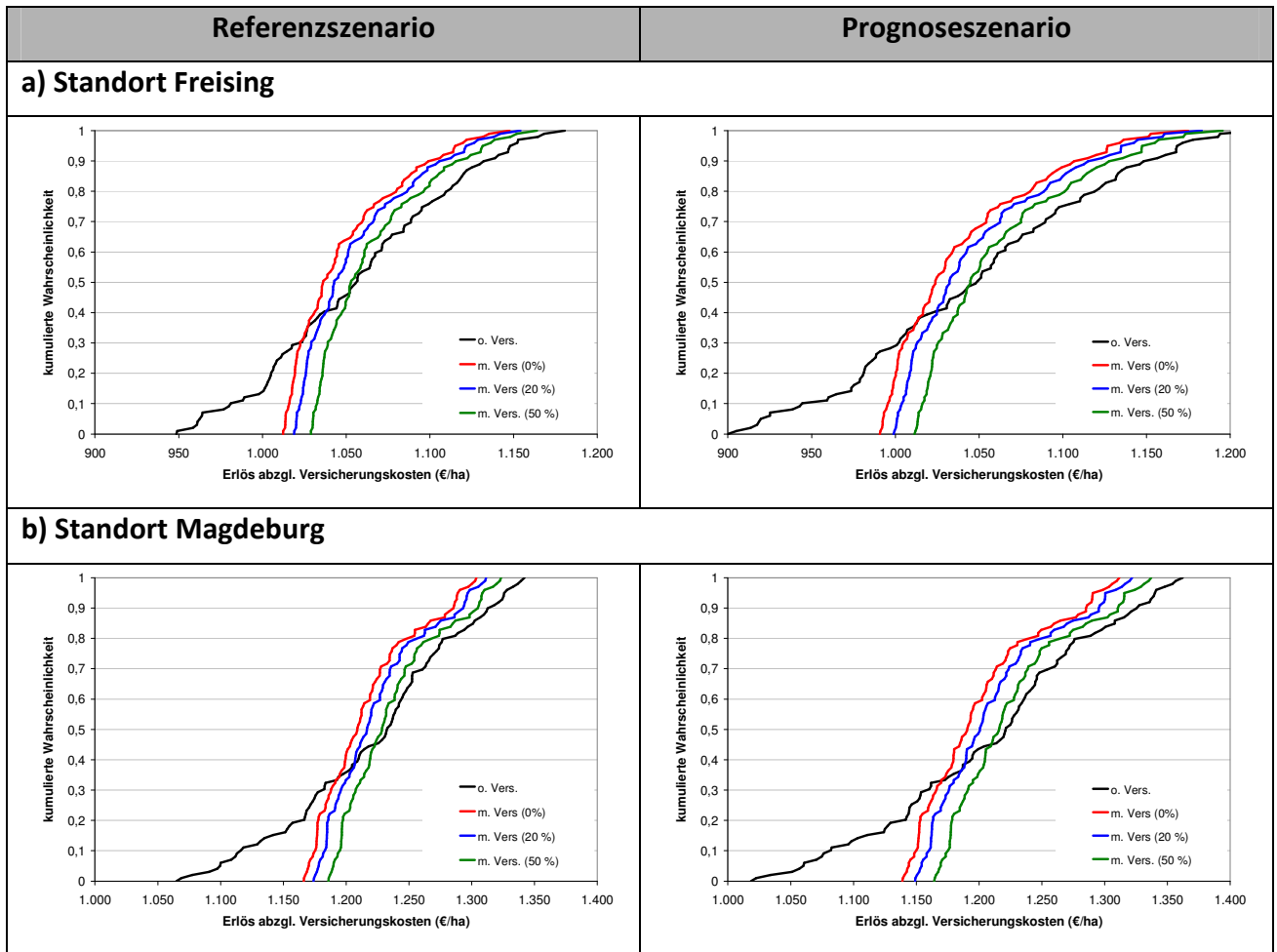
Durch Ernteversicherungen lässt sich das Risiko sowohl im Referenz- als auch im Prognoseszenario reduzieren, wodurch sich die negativen Erlösabweichungen einschränken lassen. Das führt allerdings auch zu einer Reduzierung des maximal möglichen Erlöses und einem geringeren Erwartungswert des Erlöses, zumindest dann, wenn die Versicherung nicht subventioniert wird.

Zu beachten ist außerdem, dass aufgrund der Verwendung von regionalen Ertragsdaten, die Situation auf der einzelbetrieblichen Ebene deutlich unterschätzt wird, was sich auch in der geringen Höhe der Versicherungsprämie widerspiegelt (vgl. dazu auch Kapitel 6.2 und 6.3).

5.3.2.2 Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses

Abbildung 5-5 zeigt nachfolgend die kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses der einzelnen Versicherungsvarianten für die Standorte Freising und Magdeburg.

Abbildung 5-5: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-5a zeigt jeweils für das Referenzszenario und das Prognoseszenario die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses für die verschiedenen Versicherungsvarianten am Standort Freising. Dabei ist die Versicherungsvariante mit der jeweils höheren Subventionsstufe stochastisch dominant ersten Grades über der jeweils geringer subventionierten Versicherungsvariante. Deutlich zu erkennen ist auch die jeweils größere Schwankungsbreite des Erlöses im Szenario „ohne Versicherung“, die im Prognoseszenario noch zunimmt.

Die Varianten „mit Versicherung“ schneiden im unteren Teil der Verteilung besser ab, wohingegen die Variante „ohne Versicherung“ im oberen Teil der Verteilung günstigere Bedingungen aufweist. Aufgrund dieser Überschneidung lassen sich mit den Kriterien der stochastischen Dominanz ersten Grades noch keine eindeutigen Präferenzen für eine bestimmte Variante ableiten und es muss zusätzlich auf stochastische Dominanz zweiten Grades geprüft werden. Hier hat sich gezeigt, dass die Variante „mit Versicherung (50 %)“ über alle anderen Varianten dominiert, falls der Entscheider risikoavers ist.

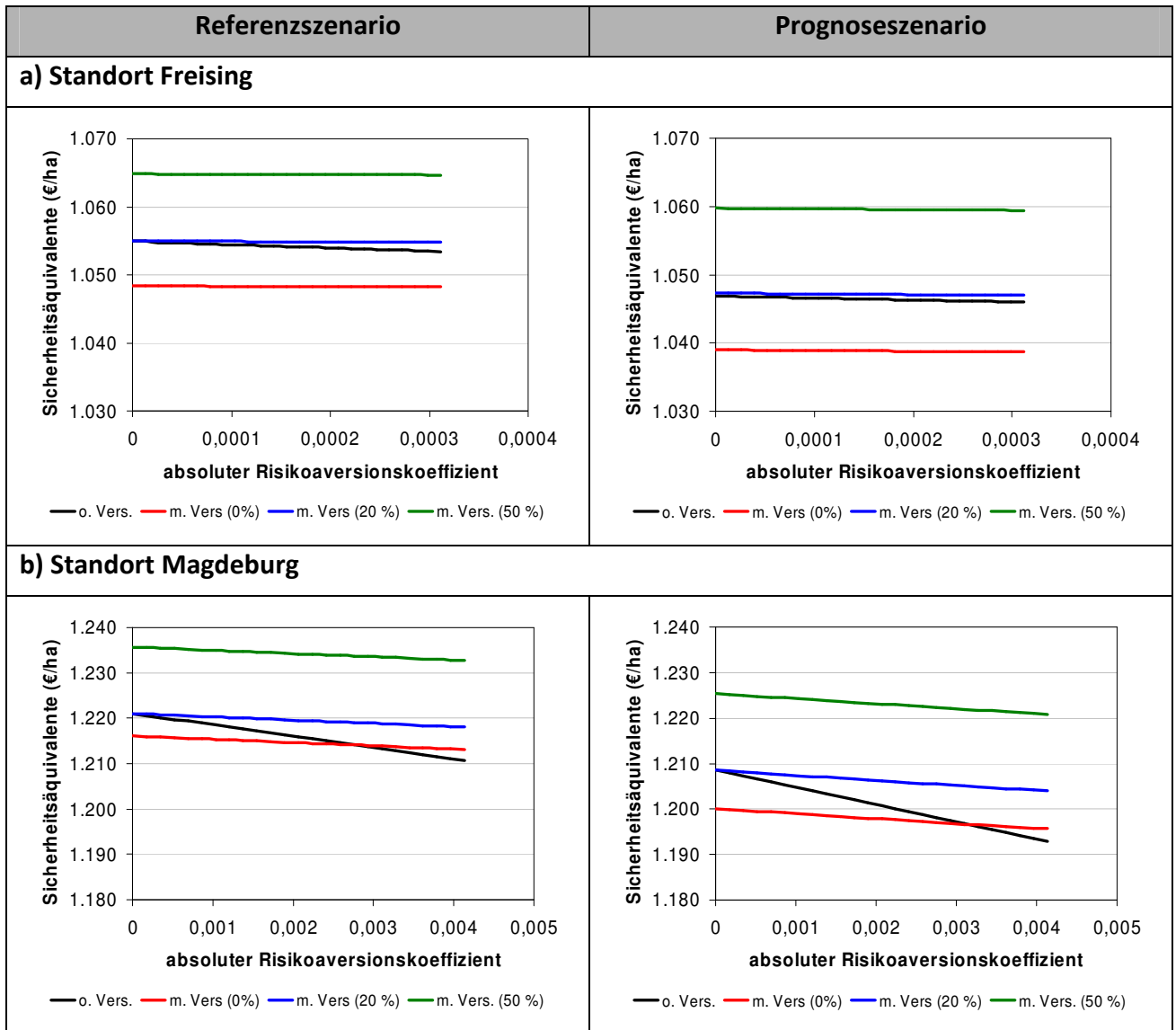
Wie aus Abbildung 5-5b ersichtlich wird, verlaufen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Varianten beim Standort Magdeburg ähnlich denen am Standort Freising. Auch hier zeigt sich eine Zunahme des ökonomischen Risikos im Prognoseszenario, da im Szenario „ohne Versicherung“ eine Zunahme der Wahrscheinlichkeit niedriger Erlöse zu erkennen ist. Durch Ernteversicherungen lässt sich die Schwankungsbreite des Erlöses verringern. Da auch hier die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Versicherungsvariante mit der jeweils höheren Subventionsstufe rechts von den anderen liegt, kann gefolgert werden, dass die Versicherungsvariante mit dem höchsten Subventionsgehalt stochastisch dominant ersten Grades über den anderen ist.

Aufgrund der Überschneidung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen lässt sich jedoch auch hier keine eindeutige Empfehlung für eine bestimmte Handlungsalternative nach den Kriterien der stochastischen Dominanz ersten Grades ableiten. Die Prüfung auf stochastische Dominanz zweiten Grades ergibt, dass auch hier die Verteilungsfunktion der Variante „mit Versicherung (50 %)“ stochastisch dominant zweiten Grades über die Verteilungsfunktionen der anderen Varianten ist, falls der Entscheider grundsätzlich risikoavers eingestellt ist.

5.3.2.3 Sicherheitsäquivalente des Erlöses

In Abbildung 5-6 sind jeweils für das Referenz- und das Prognoseszenario die Sicherheitsäquivalente des Erlöses der einzelnen Handlungsalternativen in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung für die beiden Standorte Freising und Magdeburg dargestellt. Auf der Abszisse ist der absolute Risikoaversionskoeffizient angetragen, der sich aus dem relativen Risikoaversionskoeffizienten und dem Vermögen des Entscheiders (hier: Eigenkapitalausstattung) ergibt (vgl. Kapitel 5.2.4). Nach rechts hin nimmt der Grad der Risikoaversion zu und das Sicherheitsäquivalent sinkt entsprechend ab.

Abbildung 5-6: Sicherheitsäquivalente des Erlöses



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-6a zeigt, dass am Standort Freising beim Szenario „mit Versicherung“ in der Subventionsstufe 0 (keine Prämiensubvention) die Sicherheitsäquivalente sowohl im Referenz- als auch im Prognoseszenario am niedrigsten sind. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Erwartungswert des Erlöses aufgrund der zu entrichtenden Versicherungsprämie absinkt und die Minderung der Variabilität des Erlöses den Nutzen nicht entsprechend erhöht. Die Variante „mit Versicherung“ in der Subventionsstufe 1 (20 % Prämiensubvention) verläuft im Referenzszenario annähernd gleich zur Variante „ohne Versicherung“. Das heißt, auch bei sehr starker Risikoaversion schafft der risiko-reduzierende Effekt der Versicherung keinen hohen Nutzengewinn, was sich auf die gute Eigenkapitalausstattung am Standort Freising zurückführen lässt (vgl. Kapitel 5.2.4). Dies bedeutet, dass sogar eine Ernteversicherung, die zur fairen Prämie angeboten wird, an diesem Standort kaum nachgefragt werden würde. Die Variante „mit

Versicherung“ in der Subventionsstufe 2 (50 % Prämiensubvention) weist in beiden Szenarien die höchsten Sicherheitsäquivalente auf, was die sowohl risikoreduzierende als auch erwartungswerterhöhende Wirkung dieser Variante deutlich macht. Auffällig ist der relativ flache Verlauf der Sicherheitsäquivalente, was auf die relativ hohe Eigenkapitalausstattung zurückzuführen ist.

Abbildung 5-6b zeigt die Sicherheitsäquivalente der Erlöse der einzelnen Handlungsalternativen abhängig vom Grad der Risikoaversion für den Standort Magdeburg. Aufgrund der geringeren Eigenkapitalausstattung verlaufen die Sicherheitsäquivalente hier mit zunehmender Risikoaversion steiler. Auch hier weist die Variante „mit Versicherung“ in der Subventionsstufe 2 (50 % Prämiensubvention) in beiden Szenarien die höchsten Sicherheitsäquivalente im Vergleich zu den anderen Varianten auf. Es zeigt sich auch, dass bei schwacher bis moderater Risikoaversion sowohl im Referenz- als auch im Prognoseszenario die Sicherheitsäquivalente der Variante „ohne Versicherung“ höher sind als bei der Variante „mit Versicherung“ in der Subventionsstufe 0 (keine Prämiensubvention) und sich die Situation dann bei weiter zunehmender Risikoaversion ändert. Je stärker ausgeprägt die Risikoaversion ist, desto mehr gewinnt die Variante „mit Versicherung“ in der Subventionsstufe 0 an Vorzüglichkeit gegenüber der Variante „ohne Versicherung“. Das bedeutet, dass am Standort Magdeburg Ernteversicherungen theoretisch auch ohne Prämiensubventionierung von äußerst risikoaversen Landwirten nachgefragt werden würden. Da der Nutzengewinn, gemessen an der Differenz der Sicherheitsäquivalente (mit und ohne Versicherung) relativ gering ist, ist jedoch in der Realität mit nur einer marginalen Nachfrage zu rechnen. Zu beachten ist jedoch stets auch, dass in der Analyse regionale Ertragsdaten verwendet werden, so dass sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf die einzelbetriebliche Ebene übertragen lassen (vgl. auch Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3). Da die Situation im Prognoseszenario ähnlich der im Referenzszenario ist, lässt sich folgern, dass eine nicht subventionierte Ernteversicherung unter den im Rahmen dieser Untersuchungen abgeleiteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge keinen höheren Nutzengewinn als im Referenzszenario stiftet. Des Weiteren wird deutlich, dass sich der Abstand der Sicherheitsäquivalente der Varianten „ohne Versicherung“ und „mit Versicherung“ in der Subventionsstufe 1 (20 % Prämiensubvention) mit zunehmender Risikoaversion vergrößert. Daraus kann gefolgert werden, dass eine Ernteversicherung, die am Standort Magdeburg mit einer 20 %-igen Prämiensubvention zur fairen Prämie angeboten wird, im Prognoseszenario aufgrund des höheren Ertragsrisikos einen geringfügig höheren Nutzengewinn stiftet als im Referenzszenario.

5.4 Zwischenfazit

Die hier verwendete Methode der Simulationsrechnung eignet sich grundsätzlich zum Ableiten der ökonomischen Konsequenzen klimawandelbedingter Ertragsvarianzen im

Marktfruchtbau. Das entwickelte Simulationsmodell ist hierfür geeignet, die Schwierigkeit liegt jedoch in der Quantifizierung der Einflüsse des Klimawandels auf die Erträge. Das Problem bei den Eingangsdaten besteht darin, dass sie aus Regionaldaten auf Landkreisebene abgeleitet wurden und nicht auf betrieblichen bzw. schlagbezogenen Ertragsdaten basieren. Naturgemäß ist bei regionalen Durchschnittserträgen die Schwankungsbreite geringer, da z. B. extreme Wetterereignisse oft nur sehr lokal begrenzt sind, und Ertragsverluste daher in einer festgelegten Region teilweise ausgeglichen werden können. In weiterführenden Untersuchungen sollte daher versucht werden schlag- bzw. betriebsbezogene Ertragsdaten als Eingangsgröße zu verwenden. Diese könnten z. B. durch Pflanzenwachstumsmodelle gewonnen werden und auf betrieblichen Aufzeichnungen basieren. Sollen jedoch mehrere Standorte in Deutschland untersucht werden, so ist es schwierig, eine vergleichbare Güte der Ertragsdaten zu gewährleisten, da die historischen Ertragsaufzeichnungen von anderen Effekten, wie z. B. Vorfruchteffekte, Sortenwahl oder Düngemanagement überlagert sein können. Entsprechend wäre bei der Verwendung betrieblicher bzw. schlagbezogener Ertragsdaten dann auch ein höherer Selbstbehalt bei den Versicherungsvarianten erforderlich.

Mit dem Simulationsmodell zur Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens und der risikoreduzierenden Wirkung von Ernteversicherungen konnten Aussagen darüber getroffen werden, wie stark das ökonomische Risiko, gemessen in der Variabilität des Erlöses, durch den Abschluss von Ernteversicherungen gesenkt werden kann und wie der Grad der Risikoaversion des Entscheiders die Nachfrage nach bestimmten Versicherungsvarianten beeinflusst. Die Risikoeinstellung wird wiederum von der wirtschaftlichen Stabilität des Betriebs bestimmt, wobei vor allem die Höhe der Eigenkapitalausstattung eine wesentliche Rolle spielt. Im Hinblick auf die Heterogenität der Höhe des Eigenkapitals in Marktfruchtbaubetrieben innerhalb Deutschlands lieferte das Simulationsmodell schlüssige Ergebnisse hinsichtlich einer möglichen Nachfrage nach Ernteversicherungen. Bei Inanspruchnahme einer nicht subventionierten Ernteversicherung wird im Durchschnitt ein geringerer Erlös als bei Verzicht auf entsprechenden Versicherungsschutz erzielt. Ebenso kann allerdings durch den Abschluss einer Ernteversicherung die Wahrscheinlichkeit niedriger Erlöse reduziert werden. In der Realität werden dabei neben der Eigenkapitalausstattung auch die Fremdkapitalbelastung bzw. die Zahlungsverpflichtungen eines Betriebes eine Rolle spielen, was im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wurde. Betriebe mit geringen pagatorischen Kosten werden einen geringeren Versicherungsschutz anstreben als Betriebe mit hohen Zahlungsverpflichtungen. Diese werden hingegen eher Ernteversicherungen nachfragen, weil dann das wirtschaftliche Überleben des Betriebes sicherer ist.

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Hinblick auf zunehmende Ertragsschwankungen aufgrund des Klimawandels sowie stärkerer Preisvolatilität infolge der Liberalisierung der Agrarmärkte, gewinnt betriebliches Risikomanagement immer mehr an Bedeutung. Wie die Diskussionen um die Weiterentwicklung der Gemeinsamen EU-Agrarpolitik (GAP) nach 2013 zeigen, rückt es damit auch stärker in den Fokus der Politik. So schlägt die EU-Kommission vor, dass ein Instrumentarium für das Risikomanagement eingeführt werden sollte, mit dem die Mitgliedsstaaten auf Erzeugungs- und Einkommensrisiken reagieren können. Die Palette der Vorschläge umfasst dabei u. a. auch die verstärkte Förderung von Versicherungsinstrumenten (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010).

Ein Ziel dieser Arbeit ist daher zunächst die Entwicklung einer Methode zur Ableitung der prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturalerträge wichtiger landwirtschaftlicher Kulturen an verschiedenen Standorten in Deutschland. Dazu wird neben bekannten Ansätzen ein neuer Ansatz erprobt, wobei – mit Hilfe von durch Experten geschätzten Eckpunkten von Ertragsverteilungen – Ertragssimulationen unter Verwendung der Monte-Carlo-Methode durchgeführt werden. Ein weiteres Ziel der Arbeit besteht darin, ökonomische Konsequenzen der prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels im Marktfruchtbau abzuleiten sowie eine Bewertungsmethodik darzustellen, mit der die Effekte von Ernteversicherungen auf den Erlös einer repräsentativen Fruchtfolge (unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen), berücksichtigt werden können.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie das dabei verwendete Material und die Methoden werden im Folgenden kritisch diskutiert sowie entsprechende Schlussfolgerungen daraus gezogen.

6.1 Diskussion der Klimafolgenanalyse durch statistische Untersuchungen

6.1.1 Diskussion der Extremwertanalysen

Da die größte Vulnerabilität der Landwirtschaft gegenüber dem Klimawandel aus der Empfindlichkeit landwirtschaftlicher Kulturen gegen eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von meteorologischen Extremereignissen resultiert (vgl. ROSENZWEIG et al. 2002, MEEHL und TEBALDI 2004, UBA 2005, BENISTON et al. 2007), ist es notwendig einen Überblick über den Einfluss extremer Wetterereignisse auf landwirtschaftliche Kulturen sowie das Ausmaß der Zunahme kritischer Klimaparameter unter zukünftigen Klimabedingungen zu erhalten. Dazu wurde zunächst eine Extremwertanalyse durch-

geführt, die ergeben hat, dass kritische Klimaparameter für Missernten hinsichtlich ihrer Ausprägung im zukünftigen Betrachtungszeitraum zunehmen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Auswirkungen von Extremereignissen sowohl kulturartenspezifisch als auch standortspezifisch gesehen werden müssen. Das liegt daran, dass verschiedene Kulturen je nach Entwicklungsstadium unterschiedlich auf extreme meteorologische Situationen reagieren. Zudem unterscheiden sich die Empfindlichkeiten von Kulturen gegenüber Extremwetterereignissen an verschiedenen Standorten.

Auch andere Studien bestätigen diesen Sachverhalt. So haben SOJA und SOJA (2003) in einer Studie auf der Basis von Wetterdaten auf Monatsbasis untersucht, welche Klimaparameter zu Missernten führen. Dazu wurden österreichische Ertragsdaten auf Bundesland- und Bezirksebene auf ein gleitendes Mittel normalisiert und die relativen sowie absoluten Abweichungen berechnet. Als negative Jahre wurden solche identifiziert, die unterhalb des 5%-Perzentils liegen. Dabei hat sich beispielsweise für Winterweizen gezeigt, dass sich Jahre mit besonders geringem Winterweizenertrag durch besonders kalte Temperaturen im Februar und besonders viel Niederschlag im Juli auszeichneten. Die Sensitivität von Winterweizen gegenüber besonders kalten Temperaturen im Februar konnte auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden.

CHMIELEWSKI und POTTS (1995) untersuchten den Zusammenhang zwischen meteorologischen Variablen und Getreideerträgen aus einem Langzeit-Feldversuch in Südengland. Um den Einfluss einer bestimmten Witterung (warm, kalt, trocken oder feucht bzw. Kombinationen daraus) auf Getreideerträge zu bestimmen, berechneten sie die oberen und unteren Quartile der Temperatur- und Niederschlagsdaten der jeweiligen Wachstumsperioden im Untersuchungszeitraum. Jahre mit Durchschnittswerten der meteorologischen Variablen oberhalb des oberen Quartils bzw. unterhalb des unteren Quartils wurden dabei als Jahre mit ungewöhnlicher Witterung ausgesondert. Anschließend wurden die Erträge betrachtet, die in den jeweiligen Jahren aufgetreten sind. Dabei hat sich gezeigt, dass die niedrigsten Getreideerträge immer in kalt-feuchten und warm-feuchten Jahren aufgetreten sind. Außerdem stellten die Autoren fest, dass sich relativ trockene aber auch kalte Witterung positiv auf die Erträge auswirkt. Diese Erkenntnisse decken sich hinsichtlich der in dieser Arbeit untersuchten Getreidearten nur zum Teil.

Auch CHANGNON und WINSTANLEY (2000) analysierten langfristige Aufzeichnungen von Maiserträgen und saisonalen Wetterbedingungen in Illinois und fanden dabei große zeitliche und räumliche Einflüsse der saisonalen Wetterbedingungen auf die Erträge, die positive bzw. negative Ertragsabweichungen zur Folge hatten. Die Autoren stellten dabei auch fest, dass sich die Reaktion der Erträge auf bestimmte Arten von Wetterbedingungen im Verlauf des 20. Jahrhunderts teilweise verändert hat. Diese ex-post-

Analyse verdeutlicht auch die Schwierigkeit, präzise Auswirkungen von zukünftigen Wetterbedingungen auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen abzuleiten.

Als vorteilhaft bei der im Rahmen dieser Untersuchungen angewandten Methode hat sich die Verwendung von Perzentilgrenzen zur Identifikation von Missjahren erwiesen. Da diese von der Streuung unabhängig sind, sind sie besser geeignet als Streuungsmaße, die von der spezifischen Varianz im Untersuchungszeitraum bei einer bestimmten Kulturart abhängen (vgl. SOJA und SOJA 2003). Die Aussagekraft der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Extremwertanalysen wird allerdings dadurch eingeschränkt, dass sie nur für zwei Standorte durchgeführt werden, deren Auswahl sich aufgrund der Datengrundlage der entsprechenden Klimadaten ergibt. Um allgemeingültigere Aussagen abzuleiten, wäre es notwendig, die Untersuchungen auf weitere Standorte auszudehnen. Darüber hinaus wäre auch noch eine größere Datenmenge erforderlich. Die Datenbasis, die für die hier durchgeführten Extremwertanalysen 30-jährige Zeitreihen umfasst, ist als eher gering einzustufen und es werden eigentlich noch längere Zeitreihen benötigt, um die Datenbasis entsprechend zu vergrößern. Hinsichtlich der verwendeten Klimadaten ist anzumerken, dass sie auf dem globalen Klimamodell ECHAM4 basieren. Dieses unterscheidet sich von der neueren Version ECHAM5 in einigen Bereichen. Die ECHAM4-Szenarien stellen jedoch nach KLIWA (2007) weiterhin eine Datengrundlage dar, die neben den ECHAM5-Szenariorechnungen verwendet werden können.

Die Extremwertanalysen bieten insgesamt nur eine Hilfestellung zur qualitativen Bewertung von Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen. Diesbezügliche statistisch abgesicherte quantitative Aussagen, wie die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen auf klimatische Änderungen in der Zukunft reagieren werden, können mit dieser Methode nicht getroffen werden. Darüber hinaus eignet sich diese Methode auch nicht dafür, die Auswirkungen einer Zunahme des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre auf die Ertragssituation im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen zu beurteilen.

6.1.2 Diskussion der multiplen Regressionsanalysen und der Simulation von zukünftigen Ertragsschwankungen

Da für weiterführende ökonomische Analysen der Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen vor allem eine Quantifizierung der zukünftigen Ertragssituation erforderlich ist, wurde mit multiplen Regressionsanalysen versucht, Zusammenhänge zwischen Ertrags- und Wetterdaten zu quantifizieren, um darauf basierend unter Verwendung von Daten aus Klimamodellen zukünftige Ertragsschwankungen zu simulieren.

In einer Reihe von Studien wurden multiple Regressionsanalysen verwendet, um den Zusammenhang zwischen Wetter und Ertrag zu quantifizieren. ALEXANDROV und HOOGENBOOM (2001) entwickelten in diesem Zusammenhang ein statistisches Modell, mit

dem schrittweise multiple Regressionsanalysen durchgeführt wurden, um den Zusammenhang zwischen Klimaparametern und Winterweizenerträgen auf lokaler Ebene in Georgia, USA zu quantifizieren. Dazu verwendeten sie in ihrer Studie trendbereinigte Ertragsanomalien sowie Temperatur- und Niederschlagsanomalien. Die monatlichen bzw. mehr-monatlichen Prädiktoren, die aus täglichen Klimadaten von 85 Klimastationen abgeleitet wurden, erklärten rd. 60 % der Ertragsvarianz. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Bestimmtheitsmaße der Regressionsmodelle liegen damit in etwa der gleichen Größenordnung.

Die durchschnittlichen Bestimmtheitsmaße der Regressionsmodelle, die CHMIELEWSKI und KÖHN (1999) ermittelt haben, liegen ebenfalls bei rd. 60 %. In ihrer Studie über Zusammenhänge zwischen Sommergerste- und Hafererträgen (aus einem Langzeit-Feldversuch bei Berlin) und meteorologischen Variablen haben sie über Regressionsanalysen herausgefunden, dass die Erträge von Sommergerste hauptsächlich von Bestandesdichte und Anzahl der Körner pro Ähre beeinflusst werden. Die einzelnen Ertragskomponenten sind den Autoren zufolge stark vom Wetter in verschiedenen Monaten beeinflusst. Dieser Sachverhalt wird auch in der vorliegenden Arbeit so gefunden. Je nach Entwicklungsstadium der jeweiligen Pflanze haben einzelne Klimavariablen in unterschiedlichen Monaten eine andere Auswirkung auf den Ertrag.

IGLESIAS und QUIROGA (2007) erprobten ebenfalls ein multiples lineares Regressionsmodell. Dabei wurden zunächst Prädiktoren aus Klimadaten abgeleitet, um den Zusammenhang zwischen diesen Klimaparametern und der Ertragsvariabilität von Weizen in Spanien zu untersuchen. Da die Ertragsdaten einen Trend aufwiesen, führten die Autoren anstelle einer linearen Trendbereinigung technologische und Management-Variablen in das Modell ein, um so den Trend zu erklären. Dadurch konnte die Qualität der Ergebnisse verbessert werden und die Bestimmtheitsmaße reichten zwischen den fünf Untersuchungsstandorten von 0,68 bis 0,94. Durch das Hinzufügen dieser Variablen konnte somit in dieser Studie ein größerer Teil der Varianz als in der vorliegenden Arbeit erklärt werden. Die Klimavariablen erklärten bei IGLESIAS und QUIROGA (2007) jedoch stets einen größeren Teil der Varianz als die technologischen Variablen. Da in Spanien Trockenheit eine wichtige Rolle spielt, waren Trockenereignisse eine Schlüsselvariable im Regressionsmodell. Es stellte sich heraus, dass Trockenheitsereignisse und Hitzestress die Erträge am stärksten negativ beeinflussen. Dieser Sachverhalt hat sich auch in der vorliegenden Arbeit bestätigt. Des Weiteren konnten die Autoren einen signifikanten Anstieg der Ertragsvariabilität im Zeitraum von 1970 bis 2000 im Vergleich zum Zeitraum von 1940 bis 1970 nachweisen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Untersuchungen durch die hohe zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten (Tageswerte), was die Berechnung von Trocken- und Hitzestressindices erlaubte, begünstigt wurden. Dies wirkt sich auch positiv auf die Qualität der Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen aus. Es konnte abgeleitet

werden, dass die prognostizierten klimatischen Veränderungen zu einer Erhöhung der Ertragsvariabilität führen und die Landwirte damit zukünftig mit einem höheren Produktionsrisiko konfrontiert sein werden. Allerdings hat die Methode, Erträge unter zukünftigen Klimabedingungen durch Regressionsmodelle abzuleiten, auch einige Schwächen. Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die Methode nur bei einer hohen Korrelation zwischen Wetter- und Ertragsdaten gute Ergebnisse liefert (vgl. STERZEL 2007). Des Weiteren können damit auch bestimmte Faktoren nicht berücksichtigt werden. Dazu zählt beispielsweise, dass die klimatischen Veränderungen auch einen Einfluss auf Pflanzenkrankheiten, Schädlingsbefall oder Unkrautdruck haben werden (vgl. dazu Kapitel 2.2.3), was mit dieser Methode nicht erfasst werden kann. Darüber hinaus werden im Rahmen dieser Untersuchungen auch Klimavariablen verwendet, die über bestimmte Zeiträume (z. B. Monat) aggregiert werden. Unter zukünftigen Klimabedingungen werden sich allerdings auch z. B. Saat- oder Erntetermine verschieben (vgl. dazu Kapitel 2.3.1). Das bewirkt je nach Ausmaß der Verschiebung der Zeitpunkte unter zukünftigen Klimabedingungen eine mehr oder weniger starke Einschränkung der Aussagekraft der mit dieser Methode gewonnenen Erkenntnisse. Die verwendete Vorgehensweise hat generell den Nachteil, dass nur vergangene Daten ausgewertet und die daraus ermittelten Zusammenhänge für die Ertragsprojektionen herangezogen werden. Wenn sich nun die klimatischen Rahmenbedingungen aufgrund des Klimawandels grundlegend ändern, führt dies zu einer eher geringen Aussagekraft der Ergebnisse.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass statistische Ansätze auf der Basis historischer Ertragsdaten sowie die Kopplung mit Daten aus Klimamodellen nur bedingt geeignet sind, zukünftige Ertragsschwankungen, als Grundlage für weiterführende ökonomische Untersuchungen, zu simulieren. Da die Ertragsbildung komplexen dynamischen Wechselwirkungen unterliegt, kann sie – wie oben beschrieben – nicht vollständig durch statistische Ansätze erfasst bzw. abgebildet werden. Dies hat z. B. auch Konsequenzen für die in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Wetterderivate. Dadurch dass die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen im Normalfall nicht perfekt mit Witterungsvariablen korrelieren, verbleibt ein mehr oder weniger hohes Basisrisiko beim Landwirt. Falls nun ein Wetterderivat auf einem nicht korrektem bzw. nicht vollständigem Index basiert, können zum einen Ertragsverluste auftreten, die nicht entschädigt werden und zum anderen Entschädigungen resultieren, obwohl es keinen Ertragsverlust gibt. Diese Unwägbarkeiten stellen ein beträchtliches Hindernis hinsichtlich der Entwicklung eines Marktes für Wetterderivate im Bereich des Marktfruchtbaus dar.

Da nicht für jede Kultur Ertragssimulationen abgeleitet werden konnten, werden darauf aufbauende ökonomische Untersuchungen erschwert. Demzufolge war es notwendig, eine neue Methode zu erproben, die im Folgenden diskutiert wird.

6.2 Diskussion der Klimafolgenanalyse durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen

Eine ausreichend große Menge von vergleichbaren Ertragsdaten unter derzeitigen und zukünftigen Klimabedingungen ist notwendig, um darauf basierend Modellrechnungen zur Ableitung ökonomischer Konsequenzen zu entwickeln. Daher wurde ein neuer methodischer Ansatz der Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion erprobt, der auf der Schätzung von Ertragsverteilungen unter zukünftigen klimatischen Bedingungen durch Experten basiert. Die Grundlage für die Schätzung sind historische Zeitreihen der Hektarerträge auf Landkreisebene sowie standortbezogene Informationen über Bodenverhältnisse und prognostizierte Klimaänderungen. Die Schätzwerte der Eckpunkte der jeweiligen Ertragsverteilungen durch die Experten schwanken nur gering. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die Experten aufgrund der zur Verfügung gestellten Klimainformationen sowie der in der Vorauswahl sichergestellten Erfahrungen im Bereich der Klimafolgenanalyse einen relativ homogenen Wissensstand haben, wodurch die Qualität der Ergebnisse positiv beeinflusst wurde. Viele Experten, die im Rahmen dieser Untersuchungen befragt wurden, hielten diese Methode für grundsätzlich geeignet. Jedoch gaben manche auch zu bedenken, dass die Aufgabenstellung auch für Experten mit pflanzenbaulicher bzw. klimafolgenanalytischer Erfahrung recht komplex ist und viel Konzentration erfordert. Außerdem wurde angemerkt, dass die Bewertung auf der Grundlage nur eines Klimaszenarios stattfindet, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt wird. Im Vorfeld der Befragung wiesen Experten auch darauf hin, dass neben den Klimainformationen vor allem auch Informationen über den Standort (insbesondere Bodengüte) wichtig seien und dass die Klimainformationen grafisch aufbereitet sein müssten, was im Fragebogen entsprechend berücksichtigt wurde. Es hat sich auch gezeigt, dass bei diesem Ansatz unbedingt darauf geachtet werden muss, dass den Experten einerseits genügend Klimainformationen zur Verfügung gestellt werden, aber andererseits keine Informationsüberlastung vorliegt. Dies muss in entsprechenden Pretests abgeklärt werden. Mittels Monte-Carlo-Simulationen wurden anschließend aus den jeweiligen geschätzten Ertragsverteilungen Ertragsdaten unter zukünftigen Klimabedingungen simuliert. Insgesamt kann diese Methode als bedingt geeignet zur Klimafolgenanalyse in der Pflanzenproduktion angesehen werden. Es konnten damit quantitative Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge in Deutschland abgeleitet werden, mit denen es möglich war, weiterführende ökonomische Modellrechnungen durchzuführen.

In der aktuellen wissenschaftlichen Literatur finden sich relativ wenige Studien, in der unter Verwendung der Monte-Carlo-Methode Ertragsdaten simuliert werden, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion zu analysieren. IGLESIAS und QUIROGA (2007) verwenden zwar einen ähnlichen Ansatz, um das Risiko der Klimavariabilität für die Weizenproduktion an fünf Standorten in Spanien zu messen. Im

Rahmen dieser Studie erfolgt allerdings keine empirische Untersuchung der Auswirkungen zukünftiger klimatischer Änderungen, sondern eine ex-post-Analyse des Einflusses der historischen Klimavariabilität auf die Weizenerträge. Basierend auf beobachteten Ertragszeitreihen simulierten sie Ertragsverteilungen. Darauf aufbauend entwickelten sie einen Risikofaktor-Index, der einen Vergleich der Reaktion der Erträge auf die klimatischen Bedingungen zwischen verschiedenen Standorten erlaubt.

Auch GIBBONS und RAMSDEN (2005) führten Monte-Carlo-Simulationen von Ertragsdaten in Verbindung mit einem Betriebsmodell durch, um den Einfluss von Ertragsschwankungen unter zukünftigen Klimabedingungen auf die Rentabilität von fiktiven Betriebsbetrieben in England zu bewerten. Die Eingangsdaten für die Simulation der Erträge basieren bei dieser Studie im Unterschied zur vorliegenden Arbeit jedoch nicht auf von Experten geschätzten zukünftigen Ertragsverteilungen, sondern stammen aus Pflanzenwachstumsmodellen. Die Autoren beschreiben diese Vorgehensweise als geeignet, um unsichere Faktoren, wie den Ertrag angemessen in Modellrechnungen berücksichtigen zu können und damit die Empfindlichkeit und Robustheit gegenüber Modellen, die auf Durchschnittswerten basieren, zu prüfen. Darauf aufbauend seien auch eine Berücksichtigung des Grades der Risikoaversion der Betriebsleiter sowie die Bewertung verschiedener Anpassungsoptionen im Bereich des Cash Flow-Managements möglich. Die Untersuchungen von GIBBONS und RAMSDEN (2005) haben eine zunehmende Ertragsvariabilität für bestimmte Kulturen (z. B. Körnermais, Sommergerste, Kartoffeln) aufgrund klimatischer Änderungen ergeben. Auch andere Studien deuten, zumindest für bestimmte Regionen Europas, auf eine Zunahme der Ertragsvariabilität unter zukünftigen Klimabedingungen hin (vgl. JONES et al. 2003, LUO et al. 2005, QUIROGA und IGLESIAS 2009, FINGER et al. 2010, TRNKA et al. 2011).

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz erscheint grundsätzlich geeignet für weiterführende ökonomische Untersuchungen. Allerdings weist diese Methode auch Nachteile auf, die die Eignung hinsichtlich der Weiterverwendung der Ergebnisse zur Ableitung ökonomischer Konsequenzen im Marktfruchtbau und einer darauf basierenden Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen einschränken. Das ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die im Simulationsmodell verwendeten Basis-Ertragsdaten auf historischen Zeitreihen der Hektarerträge auf Landkreisebene basieren. Das heißt, die Schwankung der Erträge in den Basis-Ertragsdaten und damit auch in den durch Monte-Carlo-Simulationen erzeugten Ertragsdaten ist geringer als die Ertragsschwankung auf betrieblicher Ebene. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass zum einen extreme Wetterereignisse oft nur sehr lokal begrenzt sind und somit Ertragsverluste in einer festgelegten Region teilweise ausgeglichen werden können. Zum anderen führen auf der betrieblichen Ebene noch eine Vielzahl weiterer Faktoren, wie z. B. Sortenwahl, Saattermin, Düngestrategie oder Vorfruchteffekte dazu, dass die Ertragsschwankungen dort größer sind.

Eine weitere Schwäche der hier verwendeten Methode liegt darin, dass der Effekt eines Anstiegs des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre nicht entsprechend berücksichtigt werden kann, da dies nicht von den Experten erfragt werden konnte. Im Vorfeld der Untersuchungen wurde die Änderung des CO₂-Gehaltes als Input für die Ertragschätzung auf Ratschlag von Experten hin nicht berücksichtigt, da dies nicht in deren Erfahrungsbereich liegt und somit nicht hinreichend bewertet werden kann. Eine Möglichkeit, um den CO₂-Effekt berücksichtigen zu können, wäre die Verwendung von Daten aus Pflanzenwachstumsmodellen, die in der Lage sind, den Einfluss eines steigenden CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre abzubilden. Diesen Ansatz haben auch GIBBONS und RAMSDEN (2005) gewählt und konnten dadurch zeigen, dass die Zunahme der Erwartungswerte der Erträge von Marktfrüchten von 2000 bis 2050 zu großen Teilen auf den CO₂-Düngeeffekt zurückzuführen ist. Darüber hinaus ist noch zu erwähnen, dass der Einfluss von Extremereignissen (z. B. Starkregen) auf den Ertrag mit dieser Methode nur sehr begrenzt abgebildet werden kann. Bei den Klimainformationen, die im Rahmen der Expertenbefragung verwendet wurden, sind zwar Schwankungsbreiten (z. B. des Niederschlags) angegeben. Der konkrete Einfluss eines extremen Wetterereignisses auf den Ertrag lässt sich dadurch jedoch nicht ableiten.

Insgesamt ist auch noch eine grundsätzliche Schwäche bei der Einschätzung von Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen zu diskutieren, nämlich, dass es hierbei insgesamt noch relativ große Unsicherheiten gibt, was nach CARTER et al. (1999) vor allem auf drei wichtige Ursachen zurückzuführen ist:

1. Schwierigkeit der Vorhersage des zukünftigen Niveaus von Treibhausgasen
2. Unterschiede in der Modellierung der globalen Klimaänderung aufgrund der Sensitivität verschiedener globaler Klimamodelle; dies ist auf Unterschiede in der Art, wie physikalische Prozesse und Rückkopplungen in verschiedenen Modellen simuliert werden, zurückzuführen
3. Unsicherheiten bei der Prognose regionaler Klimaänderungen für die gleiche mittlere globale Erwärmung; dies ergibt sich aus Unterschieden in der regionalen Prognose des Klimawandels durch verschiedene regionalisierte Klimamodelle

Der kumulierte Grad der Unsicherheit nimmt demnach von Nr. 1 bis Nr. 3 zu und wird noch mal größer, wenn die Klimainformationen in Ertragseffekte transformiert werden. Auch aus den Basis-Ertragsdaten, auf denen die Ertragschätzungen der Experten basieren, können aufgrund ungenauer Messungen weitere Unsicherheiten resultieren. Alles in allem ergibt sich also ein relativ hoher Grad der Unsicherheit, der die Aussagekraft der Ergebnisse verringert. Eine Möglichkeit, diesem Sachverhalt zu begegnen, wäre z. B. die Verwendung von Pflanzenwachstumsmodellen, wobei natürlich die Ergebnisse von Pflanzenwachstumsmodellen selbst mit größeren Unsicherheiten belegt

sind und es somit angebracht wäre, mehrere Pflanzenwachstumsmodelle zu berücksichtigen. Dabei könnten Ausgangsdaten verschiedener Klimamodelle verwendet werden, wodurch die Abbildung von Bandbreiten möglich wird. Um eine solch breite Datenbasis, wie im Rahmen dieser Untersuchungen zu erhalten, ist jedoch ein beträchtlicher Aufwand für die Erfassung von Daten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung sowie für die Modellierung erforderlich.

6.3 Diskussion der Ableitung ökonomischer Konsequenzen und der Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens von Ernteversicherungen

Ein klares Verständnis der Beziehung zwischen Wetter bzw. Klima und Ertragsverteilungen ist entscheidend bei der Identifizierung von geeigneten Anpassungsstrategien, um die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion zu minimieren. Die Ergebnisse der Klimafolgenanalyse durch Experteninterviews und Monte-Carlo-Simulationen für ausgewählte Kulturen haben gezeigt, wie der Klimawandel die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion an verschiedenen Standorten in Deutschland beeinflussen könnte. Diese Informationen können bei der Ausarbeitung möglicher Optionen zum Umgang mit diesen Veränderungen helfen. Obwohl es im Hinblick auf die beschriebenen Unsicherheiten möglicherweise zu früh ist, Schlussfolgerungen zu ziehen, zeichnet sich eine Steigerung der Ertrags- und Erlösvariabilität ab. Aus den Ergebnissen der Ertragssimulationen kann gefolgert werden, dass klimatische Änderungen zu einer größeren Ertragsunsicherheit beitragen. Die darauf basierende Ableitung ökonomischer Konsequenzen hat gezeigt, dass dadurch auch das ökonomische Risiko, ausgedrückt in der Variabilität des Erlöses, zunimmt.

Viele empirische Studien über Klima und Ernteversicherungen konzentrieren sich nach CABRERA et al (2007) auf die Auswahl der besten Versicherungsprodukte für Landwirte (z. B. MJELDE et al. 1996, LEIGH und KUHNEL 2001, CABRERA et al. 2006) oder haben neue Parameter für potentielle Versicherungsprodukte entwickelt (z. B. MARTIN et al. 2001, TURVEY et al. 2006). Weniger häufig hingegen wurde der Aspekt des Klimawandels in die Untersuchungen einbezogen. Auf diese Thematik gingen z. B. ROSENZWEIG et al. (2002) ein. In dieser Studie wird ein dynamisches Pflanzenwachstumsmodell modifiziert, um einen wichtigen Effekt von Starkregenereignissen – nämlich Schäden aufgrund von Bodenvernässung – auf das Pflanzenwachstum zu simulieren. Den Autoren zufolge resultieren aufgrund dieses Faktors unter dem gegenwärtigen Klima bereits erhebliche Schäden, die sich innerhalb der nächsten 30 Jahre aufgrund prognostizierter klimatischer Änderungen verdoppeln könnten. Versicherungsprogramme werden daher an Bedeutung gewinnen.

Auch CHEN und CHANG (2005) ziehen in ihrer Studie ähnliche Schlussfolgerungen. Die Vorgehensweise bei ihren Untersuchungen war dabei ähnlich der in der vorliegenden Arbeit. Zunächst analysierten sie mit ökonometrischen Methoden die Reaktion von

Erträgen auf Klimaänderungen. Die daraus abgeleiteten Ertragsverteilungen wurden dann in Sektormodellen weiterverwendet. Darin wurden verschiedene Versicherungsvarianten, unter dem Einfluss unterschiedlicher Klimaszenarien, einer Bewertung unterzogen. Es zeigte sich, dass Ernteversicherungen einkommensstabilisierend wirken und Landwirte vor der Gefährdung durch wetterbedingte Ertragsrisiken schützen können. Des Weiteren berichten CHEN und CHANG (2005), dass es für die Untersuchung der ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels notwendig sei, regionsspezifische Klimafolgenanalysen durchzuführen. Dies wurde in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt, indem unterschiedliche Standorte in die Untersuchung einbezogen wurden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell eignet sich grundsätzlich zum Ableiten der ökonomischen Konsequenzen klimawandelbedingter Ertragsvarianzen im Marktfruchtbau sowie zur Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens und der risikoreduzierenden Wirkung von Ernteversicherungen unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen. Es lieferte plausible Ergebnisse darüber, wie das ökonomische Risiko, gemessen in der Variabilität des Erlöses, durch den Klimawandel beeinflusst wird und durch den Abschluss von Ernteversicherungen gesenkt werden kann. Daraus können mögliche Entwicklungstendenzen hinsichtlich der Nachfrage nach Ernteversicherungen abgeleitet werden. Dabei spielen sowohl das Ausmaß der klimatischen Änderungen am jeweiligen Standort als auch die Risikoeinstellung, die wesentlich von der Höhe der Eigenkapitalausstattung abhängt, sowie die Höhe der Prämiensubvention eine wichtige Rolle.

Die im Simulationsmodell dargestellte Heterogenität der Höhe des Eigenkapitals in Marktfruchtbaubetrieben innerhalb Deutschlands macht deutlich, dass der Nutzengewinn durch eine Ernteversicherung von Standort zu Standort variiert. So ist der Nutzengewinn einer Ernteversicherung am Standort Freising aufgrund der guten Eigenkapitalausstattung viel geringer als am Standort Magdeburg. So würden am Standort Magdeburg Ernteversicherungen auch ohne Prämiensubventionierung von äußerst risikoaversen Landwirten nachgefragt werden. Eine Ernteversicherung, die zur fairen Prämie angeboten wird, würde am Standort Magdeburg im Vergleich zum Standort Freising stärker nachgefragt werden. Insgesamt zeigen die Untersuchungsergebnisse jedoch, dass die Vorteile, gemessen am Sicherheitsäquivalent, selbst bei sehr hoher Risikoaversion relativ gering sind, so dass es auch zukünftig kaum zu einer Nachfrage nach Ernteversicherungen ohne Prämiensubventionen kommen dürfte. Zu beachten ist dabei jedoch auch, dass aufgrund der Verwendung von regionalen Ertragsdaten bei der Ableitung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsverteilungen der höheren Ertragsvariabilität auf der einzelbetrieblichen Ebene nicht ausreichend Rechnung getragen werden kann. Somit wird der Einfluss des Klimawandels auf die Ertragsvariabilität und damit auch auf die Erlösvariabilität tendenziell unterschätzt, was sich auch auf die einzelbetriebliche Nachfrage nach Ernteversicherungen auswirkt. Die im Rahmen dieser Untersuchungen abgeleiteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Er-

träge zeigen auch, dass eine Ernteversicherung, die am Standort Magdeburg mit einer 20 %-igen Prämiensubvention zur fairen Prämie angeboten wird, im Prognoseszenario einen höheren Nutzengewinn stiftet als im Referenzszenario, was das durch den Klimawandel erhöhte Erlösrisiko verdeutlicht.

Die Untersuchungen machten deutlich, dass die Höhe der Eigenkapitalausstattung eine wichtige Rolle hinsichtlich einer möglichen Nachfrage nach Ernteversicherungen spielt. In der Realität werden dabei neben der Eigenkapitalausstattung auch die Fremdkapitalbelastung bzw. die Zahlungsverpflichtungen eines Betriebes eine Rolle spielen, was im Rahmen dieses Simulationsmodells nicht berücksichtigt wurde. Aufgrund des Strukturwandels wird der Anteil spezialisierter Pachtbetriebe mit hohen Fremdkapitalanteilen weiterhin zunehmen (WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011). Aus dem betrieblichen Wachstum resultieren dann höhere pagatorische Kosten (vgl. TLL 2010, S. 29). Daraus lässt sich ableiten, dass die Risikotragfähigkeit von Betrieben mit einem hohen Anteil an pagatorischen Kosten abnimmt und damit die Bedeutung von betrieblichem Risikomanagement, z. B. in Form von Ernteversicherungen zunimmt.

Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben außerdem gezeigt, dass der Nutzen und damit die Nachfrage nach Ernteversicherungen auch von der Höhe der Prämiensubvention abhängen. Diese haben auf der einzelbetrieblichen Ebene einen positiven Effekt und führen im Szenario einer 50 %-igen Subventionierung der Versicherungsprämien sogar zu einem höheren Erwartungswert des Erlöses. Eine generelle Subventionierung von Ernteversicherungen lässt sich daraus jedoch nicht ableiten, da zum einen nicht klar ist, mit welchen Mitteln dies geschehen sollte und zum anderen volkswirtschaftliche Aspekte hier noch nicht berücksichtigt sind. HIRSCHAUER und MUßHOFF (2008) befassten sich in ihrer Studie zu verschiedenen Risikomanagementinstrumenten u. a. damit, ob eine staatliche Subventionierung von Versicherungsprämien gerechtfertigt wäre. Beim Vergleich der Transfereffizienz einer subventionierten Hoferlösversicherung mit einer Direktzahlung kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Subventionierung von Hofertrags- bzw. Hoferlösversicherungen zu einer geringen Transfereffizienz führt (rd. 41 %), und es dadurch zu Wohlfahrtsverlusten kommt. Eine Umwidmung von Direktzahlungen für die Subventionierung von Versicherungsprämien ist deshalb – auch aus landwirtschaftlicher Sicht – nicht sinnvoll. Sie schlagen daher vor, dass der Staat, anstelle der Subventionierung einzelner Risikomanagementinstrumente, durch Beratungs- und Aufklärungsmaßnahmen günstige Rahmenbedingungen für das Zustandekommen eines transparenten Handels und fairen Wettbewerbs zwischen verschiedenen Produkten und Anbietern schaffen sollte.

Durch den Klimawandel tritt allerdings eine neue Situation ein, die zu echten Unsicherheiten mit bislang unbekanntem Wahrscheinlichkeitsverteilungen für das Auftreten bestimmter Risiken führen kann. Hier und im Falle systemischer Risiken (Trockenheit, Überschwemmungen) wären staatliche Eingriffe in Form von Prämiensubventionen

oder der Beteiligung an privatwirtschaftlichen Rückversicherungen denkbar (vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK 2011). Entscheidend ist dann, ob ein genügend großer Versicherungspool aufgebaut werden kann, mit dem es möglich ist, ausreichend hohe Rücklagen zu bilden, die es erlauben, die Prämien (und damit auch die staatliche Unterstützung) absinken zu lassen. Eine Pflichtversicherung für alle Landwirte wäre nicht zielführend, da die Risikoexposition landwirtschaftlicher Betriebe aufgrund unterschiedlicher Auswirkungen des Klimawandels an verschiedenen Standorten sowie aufgrund unterschiedlicher betrieblicher Gegebenheiten stark variiert.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass es im Laufe der nächsten Jahrzehnte ein zentrales Ziel landwirtschaftlicher Entscheidungsprozesse sein wird, das Risiko im Zusammenhang mit einem sich ändernden Klima zu vermindern. Grundlegend für dieses Ziel ist die Entwicklung der Fähigkeit, Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel an verschiedenen geografischen Standorten zu quantifizieren und darauf aufbauend Anpassungsstrategien zu entwickeln. In einem Portfolio verschiedener Anpassungsmaßnahmen können Ernteversicherungen in Abhängigkeit von den standörtlichen Bedingungen und betrieblichen Gegebenheiten eine gewisse Rolle einnehmen, die jedoch auch nicht überbewertet werden sollte.

7 Zusammenfassung

Die prognostizierten klimatischen Änderungen werden Auswirkungen auf viele gesellschaftliche, wirtschaftliche und ökologische Bereiche haben. Die Landwirtschaft, als direkt vom Klima und Wetter abhängiger Sektor, ist dabei in besonderer Weise betroffen. Einerseits kann der Klimawandel für die Landwirtschaft zusätzliche Chancen bedeuten, z. B. aufgrund einer verlängerten Vegetationsperiode, andererseits birgt er auch Risiken. Letztere resultieren insbesondere aus einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterereignissen, wie z. B. Dürren, Starkregen oder Stürme. In der vorliegenden Arbeit werden vor allem die Aspekte des Klimawandels im Zusammenhang mit dem Ertrags- bzw. Erlösrisiko in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion näher betrachtet. Dazu werden zunächst Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Wetter und Ertrag durchgeführt sowie Analysen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsvariabilität an verschiedenen Standorten in Deutschland angestellt. Darauf aufbauend werden ökonomische Konsequenzen der prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels im Marktfruchtbau abgeleitet. Des Weiteren wird eine Bewertungsmethodik dargestellt, mit der die Effekte von Erntever sicherungen auf den Erlös einer repräsentativen Fruchtfolge (unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen) berücksichtigt werden können.

Zu Beginn wird die aktuelle wissenschaftliche Literatur in Bezug auf das Ausmaß der prognostizierten Klimaänderungen im Zuge des Klimawandels, deren Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion unter mitteleuropäischen Verhältnissen sowie möglichen Anpassungsoptionen ausgewertet. Aus dieser Literaturanalyse kann geschlossen werden, dass für den europäischen Raum (mit großen regionalen Schwankungen) leicht positive Ertragseffekte zu erwarten sind, die insbesondere auch aus dem zu erwartenden CO₂-Düngeeffekt resultieren. Dies gilt jedoch nur, wenn sich die Temperaturen um nicht mehr als 2 °C erhöhen. Außerdem werden regionale Limitierungen durch eine Verknappung des Wassers auftreten. Abrupte strukturelle Veränderungen der Landwirtschaft im Bereich der Pflanzenproduktion sind zunächst nicht zu erwarten, da das graduelle Fortschreiten des Klimawandels bedeutet, dass Landwirte Zeit zur Anpassung an die klimatischen Änderungen haben werden und dass Zeit zur Entwicklung von Bewirtschaftungstechnologien, Pflanzen und Anbausystemen, die besser an das neue Klima angepasst sind, vorhanden ist. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass der Klimawandel zu einer deutlichen Notwendigkeit für Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft führt. Geeignete Maßnahmen zur Anpassung der Landwirtschaft an die graduellen Klimaänderungen bestehen z. B. innerhalb der Pflanzenzüchtung, der Bestandesführung oder der Bodenbearbeitung.

Die Literaturanalyse zeigt auch, dass durch eine Zunahme und Verstärkung von Extremwetterereignissen die Ertragsvariabilität und damit letztlich auch das Einkommensrisiko zunehmen werden, was die Liquidität und Stabilität landwirtschaftlicher Betriebe gefährden kann. Zukünftig sind daher größere Anforderungen an das betriebliche Risikomanagement notwendig, um auf das mit dem Klimawandel verbundene erhöhte Produktionsrisiko reagieren zu können. Die vorliegenden Ausführungen zeigen, dass das Instrumentarium des Risikomanagements zur Reaktion auf klimatische Veränderungen sehr breit gefächert ist. Da das jeweilige Mittel der Wahl von der Risikoeinstellung des Betriebsleiters sowie der Risikoexposition des Betriebs abhängt, lässt sich keine eindeutige Empfehlung für oder gegen ein bestimmtes Instrument aussprechen. Die optimale Anpassung an das durch den Klimawandel erhöhte Produktionsrisiko ist daher ein betriebsindividueller Strategiemix. Der Exkurs zum Bereich Ernteversicherungen zeigt, dass auf den Märkten für umfassende Ernteversicherungen in anderen Ländern, z. B. durch Prämiensubventionen oder verstaatlichte bzw. teilverstaatlichte Rückversicherung eine hohe Eingriffsintensität besteht. In Deutschland ist dies nicht der Fall und es hat sich hier bisher noch kein umfassendes und nachhaltiges Erntemehrgefahrenversicherungssystem entwickelt.

Die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Pflanzenproduktion werden in dieser Arbeit zum einen durch eine Analyse des Zusammenhangs zwischen Wetter und Ertrag mit Extremwertanalysen, sowie einer Ertragsprojektion unter zukünftigen Klimabedingungen unter Verwendung von statistischen Methoden (multiple Regressionsanalysen) untersucht. Zum anderen werden auf Expertenbefragungen basierende Monte-Carlo-Simulationen zur Quantifizierung zukünftiger Ertragsverteilungen durchgeführt.

Die Extremwertanalysen zeigen, dass kritische Klimaparameter für Missernten hinsichtlich ihrer Ausprägung zukünftig zunehmen werden. Die Ertragsprojektionen auf der Basis von multiplen Regressionsanalysen ergeben, dass die prognostizierten klimatischen Veränderungen zu einer Erhöhung der Ertragsvariabilität und damit zu einem höheren Produktionsrisiko für Landwirte führen. Daraus ergibt sich vor allem für das betriebliche Risikomanagement die Notwendigkeit einer Anpassung an die klimatischen Veränderungen. Es stellt sich jedoch auch heraus, dass statistische Ansätze auf der Basis historischer Ertragsdaten sowie die Kopplung mit Daten aus Klimamodellen nur bedingt geeignet sind, zukünftige Ertragsschwankungen zu simulieren. Daher konnten nicht für jede untersuchte Kultur zukünftige Ertragsschwankungen abgeleitet werden, was darauf aufbauende ökonomische Untersuchungen erschwert. Das liegt vor allem daran, dass die Ertragsbildung komplexen dynamischen Wechselwirkungen unterliegt, die sich nicht vollständig durch statistische Ansätze erfassen lassen. Multiple Regressionsanalysen haben hier insbesondere den Nachteil, dass nur vergangene Daten ausgewertet und die daraus ermittelten Zusammenhänge für die Ertragsprojek-

tionen herangezogen werden. Wenn sich nun die klimatischen Rahmenbedingungen aufgrund des Klimawandels grundlegend ändern, führt dies zu einer insgesamt eher geringen Aussagekraft der Ergebnisse.

Zur Ableitung der Auswirkungen klimatischer Änderungen auf die Erträge ausgewählter landwirtschaftlicher Kulturen wird daher ein neuer methodischer Ansatz angewandt, der durch die Einbindung von Expertenwissen auch die zukünftigen klimatischen Rahmenbedingungen und deren Auswirkungen auf die Erträge von Kulturpflanzen entsprechend berücksichtigt. Hierbei werden die Auswirkungen prognostizierter klimatischer Änderungen auf die Erträge durch Monte-Carlo-Simulationen abgeleitet. Die Eingangswerte für die Monte-Carlo-Simulationen werden dabei durch von Experten geschätzten Ertragsverteilungen für die Zukunft festgestellt. Grundlage für diese Schätzungen sind Aussagen über die mit dem Klimamodell WETTREG simulierten standörtlichen Klimaänderungen in der Zukunft (2021 bis 2050) im Vergleich zur Ist-Situation (1971 bis 2000).

Insgesamt liefert dieser neue Ansatz in der Klimafolgenanalyse belastbare Ergebnisse und es können quantitative Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge in Deutschland getroffen werden. Es zeigt sich auch hier, dass die Ertragsvariabilität zunimmt. Außerdem konnte mit diesem Ansatz eine ausreichend große Menge von vergleichbaren Ertragsdaten erzeugt werden, die es erlaubt, darauf basierend ökonomische Modellrechnungen durchzuführen.

Auf der Grundlage dieser zukünftigen Ertragsverteilungen werden die ökonomischen Konsequenzen modelliert, sowie der Nutzen von Ernteversicherungen bewertet. Grundsätzlich lassen sich mit diesem Ansatz die ökonomischen Konsequenzen der prognostizierten Auswirkungen klimatischer Änderungen auf die Erträge ableiten und es konnten Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses einer repräsentativen Fruchtfolge unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen berechnet werden. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass die Grenzen dieses methodischen Ansatzes in der Quantifizierung der Einflüsse des Klimawandels auf die Erträge liegen. Dies ist mit der verwendeten Vorgehensweise nicht ausreichend möglich, was daran liegt, dass die Eingangsdaten ursprünglich aus Regionaldaten auf Landkreisebene abgeleitet wurden und nicht auf betrieblichen bzw. schlagbezogenen Ertragsdaten basieren. Dadurch wird der auf der einzelbetrieblichen Ebene höheren Ertragsvariabilität nicht ausreichend Rechnung getragen.

Mit der Anwendung des Simulationsmodells zur Bewertung des Nutzens und der risikoreduzierenden Wirkung von Ernteversicherungen können Aussagen darüber getroffen werden, wie stark das ökonomische Risiko, gemessen in der Variabilität des Erlöses, durch den Abschluss von Ernteversicherungen gesenkt werden kann. Die Auswahl

von effizienten Handlungsalternativen erfolgt dabei anhand der Kriterien der stochastischen Dominanz, des Erwartungsnutzenprinzips (Sicherheitsäquivalenten-Methode) sowie ausgewählten Lage- und Streuungsparametern der Verteilung des Erlöses.

Durch die Berechnung der Sicherheitsäquivalente des Erlöses in verschiedenen Versicherungsszenarien (mit unterschiedlich hohen Prämiensubventionen) kann gezeigt werden, wie der Grad der Risikoaversion des Entscheiders den Nutzen von und damit auch die Nachfrage nach bestimmten Versicherungsvarianten beeinflusst. Die Wahl des Versicherungsschutzes hängt dabei stark von der Risikoeinstellung des Entscheiders ab, die wiederum von der wirtschaftlichen Stabilität des Betriebs bestimmt wird, wobei vor allem die Höhe der Eigenkapitalausstattung eine wesentliche Rolle spielt.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass es im Laufe der nächsten Jahrzehnte ein zentrales Ziel landwirtschaftlicher Entscheidungsprozesse sein wird, das Risiko im Zusammenhang mit einem sich ändernden Klima zu vermindern. Grundlegend für dieses Ziel ist die Entwicklung der Fähigkeit, Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel an verschiedenen geografischen Standorten zu quantifizieren und darauf aufbauend Anpassungsstrategien zu entwickeln. Die vorliegende Arbeit liefert in diesem Zusammenhang einen wichtigen Beitrag, verdeutlicht aber auch, dass noch weiterer Forschungsbedarf – vor allem hinsichtlich räumlich möglichst scharf aufgelöster Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge – besteht. Hier hat der verwendete Ansatz die beschriebenen Grenzen, was in weiteren Arbeiten entsprechend berücksichtigt werden sollte. Vor dem Hintergrund eines steigenden Produktions- und Einkommensrisikos ist es wichtig, dass den Landwirten eine möglichst breite Palette an Risikomanagementinstrumenten zur Verfügung steht, um damit vor allem Liquiditätsengpässe vermeiden zu können. In einem solchen Portfolio können Ernteversicherungen in Abhängigkeit von Risikoexposition der Betriebe und Risikoaversion der Betriebsleiter ein Element darstellen, das aber aufgrund der hier dargestellten Ergebnisse nicht überbewertet werden sollte. Eine diesbezügliche generelle EU-weite Regelung, wie sie derzeit im Rahmen der Weiterentwicklung der gemeinsamen EU-Agrarpolitik diskutiert wird, ist demnach nicht erforderlich.

8 Summary

The projected climate change will impact a wide range of societal, economic and ecological sectors. Agriculture, being directly dependent on climate and weather, is particularly affected. On the one hand, climate change can result in new opportunities in the agricultural sector, e. g. through prolonged vegetation periods. On the other hand, it also bears risks. The latter predominantly arise from the increased frequency and intensity of extreme weather events, such as droughts, heavy rains or storms. The primary focus of the present study is the close inspection of climate change aspects in connection with yield and revenue risks in agricultural plant production. For this purpose, investigations into the relationships between weather and yield are conducted and analyses of the effects of climate change on yield variability are produced for several locations. Building upon these results, economic consequences of projected climate change effects on cash crop farming are extrapolated. Furthermore, a valuation methodology is represented, that is able to consider the effects of crop insurances on the revenue of a representative crop rotation (under present and future climate conditions).

First, the current scientific literature is analysed with regard to the extent of the projected climate changes, their effects on agricultural plant production in Central European conditions as well as potential adaptation options. It can be concluded from this literature analysis that for the European area (with large regional variations) slightly positive yield effects are to be expected, resulting in particular from the expected CO₂ fertiliser effect. However, this applies only when the temperatures do not increase by more than 2 °C. In addition, regional limitations are caused by a shortage of water. Sudden structural changes in agriculture in the area of crop production are not expected at first, since the gradual progression of climate change means that farmers will have time to adapt to the climatic changes and that there is time for the development of management technologies, crops and farming systems that are better adapted to the new climate. However, on the whole it shows, that climate change leads to a clear need for adaptation measures in agriculture. Suitable measures to adapt the agricultural sector to the gradual climate changes exist e.g. in plant breeding, crop management and soil cultivation.

The literature review also reveals that the greater frequency and intensity of extreme weather events will increase yield variability and consequently also the income risk, potentially endangering the liquidity and stability of farms. Higher demands on operational risk management will therefore be necessary in the future in order to ensure a

suitable response to the increased production risks due to climate change. The present work illustrates that there is a wide range of risk management instruments for the reaction to climatic changes. Since the measures of choice in each case depend on the individual farmer's risk attitude and the risk exposure of the individual farm, no definite recommendation for or against any particular instrument can be made. The optimal adaptation to the increased production risks due to climate change is therefore a mix of strategies customised at the farm level. The digression on the crop insurance sector shows that there is high degree of intervention in the markets for comprehensive crop insurance in other countries, e.g. through premium subsidies or (partly) nationalised reinsurances. In Germany, this is not the case, and no comprehensive and sustainable system for multi-peril crop insurances has been developed here to date.

The effects of climate change on plant production are assessed in two ways in this thesis: An analysis of the correlation between weather and yield and a yield projection under future climate conditions using statistical methods (extreme value analyses, multiple regression analyses) is performed. Furthermore, Monte Carlo Simulations for the quantification of future yield distributions are conducted based on expert interviews.

The extreme value analyses show that critical climate parameters for crop failures will increase in the future with regard to their expression. The yield projections based on multiple regression analyses indicate that the projected climatic changes lead to an increase in yield variability and hence to a higher production risk for farmers. An adaptation to climatic changes is therefore particularly necessary in the area of operational risk management. It is also found, however, that the suitability of statistical approaches on the basis of historic yield data and the combination with data from climate models is limited when future yield variability is to be simulated. Therefore, future yield variations could not be deduced for each investigated crop, complicating subsequent economic investigations. This is mainly due to the fact that yield formation is subject to complex dynamic interactions which cannot be captured completely using statistical approaches. Multiple regression analyses have particularly the disadvantage that only past data is analysed and the resulting correlations are used for the yield projections. Now when climatic conditions change due to climate change fundamentally, this leads to a rather low overall significance of the results.

In consequence, a new methodical approach using the Monte Carlo Technique is used for the derivation of the effects of projected climatic changes on the yields of selected agricultural crops. By the integration of expert knowledge, this approach considers appropriately the future climatic conditions and their effects on the yield of crops. The input values for the Monte Carlo Simulations are determined by the future yield distri-

butions which were estimated by experts. The basis for these estimates consists of the statements regarding the future local climate changes (2021 to 2050) compared to the current situation (1971 to 2000) which were simulated by the climate model WET-TREG.

Overall, this new approach in climate impact analysis delivers resilient results and enables quantitative projections regarding climate change effects on agricultural yields in Germany. As with previous analyses, an increase in yield variability is shown here as well. Furthermore, using this approach a sufficiently large volume of comparable yield data was generated, allowing for subsequent economic modelling.

Based on these future yield distributions, economic consequences are modelled and the benefits of crop insurances are evaluated. In principle, the economic consequences of the predicted effects of climate change on yields can be derived using this approach, and the probability distributions of the revenue of a representative crop rotation under present and future climate conditions could be calculated. It has also been found, however, that the limits of this methodological approach lie in the quantification of the climate change influences on the yields. The presented approach lacks in this ability, which is due to the fact that the input data were originally derived from regional data on a county scale and were not based on farm or plot related yield data. The higher yield variability at the single farm level is therefore insufficiently accounted for.

With the application of the simulation model for the assessment of the benefit and the risk-reducing effect of crop insurances, statements can be made regarding the degree to which the economic risk, measured in the variability of the revenue, can be lowered by the conclusion of crop insurances. Efficient alternative courses of action are selected using the criteria of stochastic dominance, the Expected Utility Principle (certainty equivalent method) as well as selected location and variance parameters of the distribution of the revenue.

By calculating the certainty equivalents of the revenue in various insurance scenarios (with different levels of premium subsidies) it is shown how the degree of the decider's risk aversion influences the use of, and thus the demand for certain insurance options. The choice of insurance coverage depends high on the risk attitude of the decider. This is determined by the economic stability of the farm, which in turn is heavily influenced by the size of the equity base.

Overall it can be concluded that a central goal of agricultural decision processes in the coming decades will be to reduce the risks associated with the changing climate. The development of the ability to quantify climate-related risks at various geographic locations and to design adaptation strategies based on these risks is fundamental in reaching this goal. This work provides an important contribution in this regard, but also

makes clear that further research is needed, particularly with regard to spatially resolved as sharp as possible statements about the effects of climate change on yields. Here, the approach has the described limits, which should be taken into account in further studies. In the light of an increasing production and income risk, it is important that farmers have a wide range of risk management instruments at their disposal to especially avoid liquidity bottlenecks. In such a portfolio, crop insurances can, depending on the individual risk exposure of farms and the individual risk attitude of farmers, constitute an element, but which should not be overstated due to the results presented here. In this regard, a general EU-wide regulation, as it is currently discussed under the further development of the EU common agricultural policy, is therefore not necessary.

9 Anhang

9.1 Anhang-Abbildungen

Anhang-Abbildung 1: Anomalien der trendbereinigten Winterweizenerträge (Lkr. Rosenheim).....	142
Anhang-Abbildung 2: Anomalien der trendbereinigten Wintergerstenerträge (Lkr. Mühldorf)	142
Anhang-Abbildung 3: Anomalien der trendbereinigten Wintergerstenerträge (Lkr. Rosenheim).....	142
Anhang-Abbildung 4: Anomalien der trendbereinigten Sommergerstenerträge (Lkr. Mühldorf)	143
Anhang-Abbildung 5: Anomalien der trendbereinigten Sommergerstenerträge (Lkr. Rosenheim).....	143
Anhang-Abbildung 6: Anomalien der trendbereinigten Silomaiserträge (Lkr. Mühldorf)	143
Anhang-Abbildung 7: Anomalien der trendbereinigten Silomaiserträge (Lkr. Rosenheim).....	144
Anhang-Abbildung 8: Anomalien der trendbereinigten Körnermaiserträge (Lkr. Mühldorf)	144
Anhang-Abbildung 9: Anomalien der trendbereinigten Körnermaiserträge (Lkr. Rosenheim).....	144
Anhang-Abbildung 10: Anomalien der trendbereinigten Winterrapserträge (Lkr. Mühldorf)	145
Anhang-Abbildung 11: Anomalien der trendbereinigten Winterrapserträge (Lkr. Rosenheim).....	145
Anhang-Abbildung 12: Anomalien der trendbereinigten Grünlanderträge (Lkr. Mühldorf)	145
Anhang-Abbildung 13: Anomalien der trendbereinigten Grünlanderträge (Lkr. Rosenheim).....	146
Anhang-Abbildung 14: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Wintergerste).....	147
Anhang-Abbildung 15: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Sommergerste).....	147

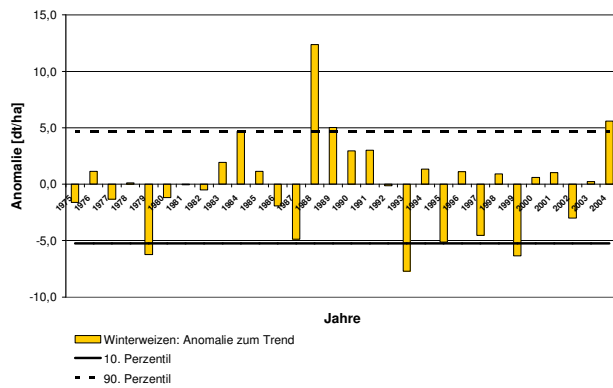
Anhang-Abbildung 16: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Körnermais)	148
Anhang-Abbildung 17: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Winterraps).....	148
Anhang-Abbildung 18: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Grünland).....	149
Anhang-Abbildung 19: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Wintergerste).....	150
Anhang-Abbildung 20: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Sommergerste)	150
Anhang-Abbildung 21: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Körnermais)	151
Anhang-Abbildung 22: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Winterraps).....	151
Anhang-Abbildung 23: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Grünland)	152
Anhang-Abbildung 24: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Wintergerste).....	153
Anhang-Abbildung 25: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Sommergerste)	153
Anhang-Abbildung 26: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Körnermais)	154
Anhang-Abbildung 27: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Winterraps).....	154
Anhang-Abbildung 28: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Grünland).....	155
Anhang-Abbildung 29: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Erlöses am Standort Friedberg.....	156
Anhang-Abbildung 30: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Erlöses am Standort Fürstenwalde	156
Anhang-Abbildung 31: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses am Standort Friedberg.....	157

Anhang-Abbildung 32: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses
am Standort Fürstenwalde..... 157

Anhang-Abbildung 33: Sicherheitsäquivalente des Erlöses am Standort Friedberg.... 158

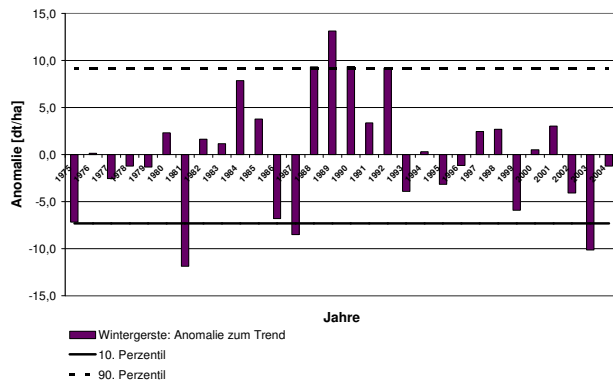
Anhang-Abbildung 34: Sicherheitsäquivalente des Erlöses am Standort
Fürstenwalde..... 158

Anhang-Abbildung 1: Anomalien der trendbereinigten Winterweizenerträge (Lkr. Rosenheim)



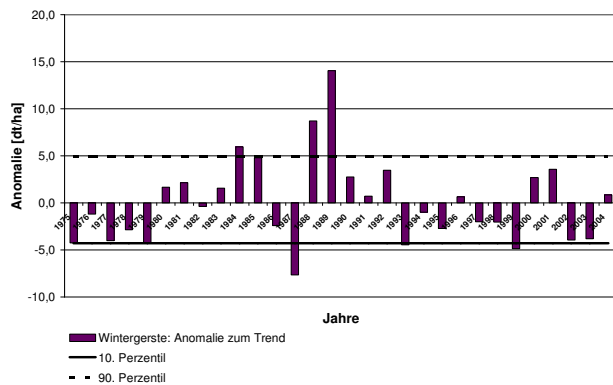
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 2: Anomalien der trendbereinigten Wintergerstenerträge (Lkr. Mühldorf)



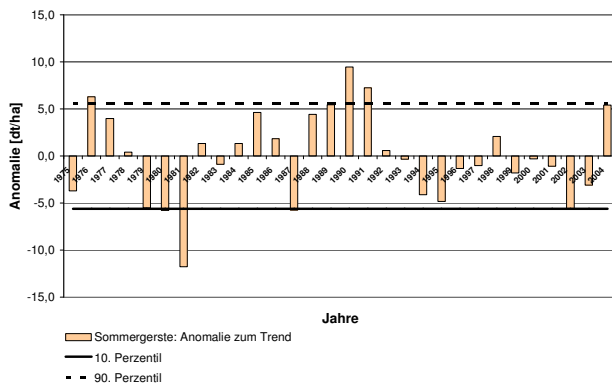
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 3: Anomalien der trendbereinigten Wintergerstenerträge (Lkr. Rosenheim)



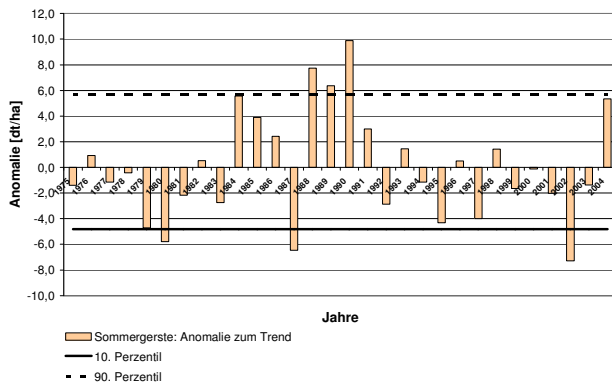
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 4: Anomalien der trendbereinigten Sommergerstenerträge (Lkr. Mühlendorf)



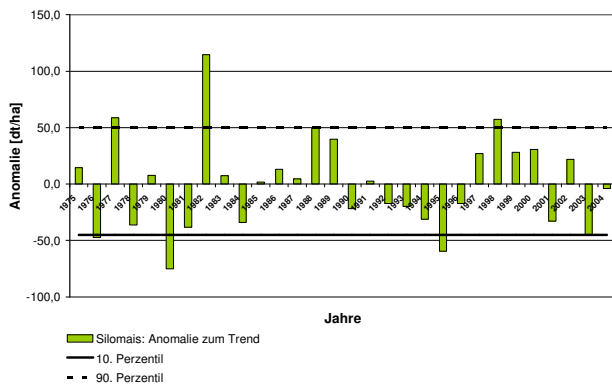
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 5: Anomalien der trendbereinigten Sommergerstenerträge (Lkr. Rosenheim)



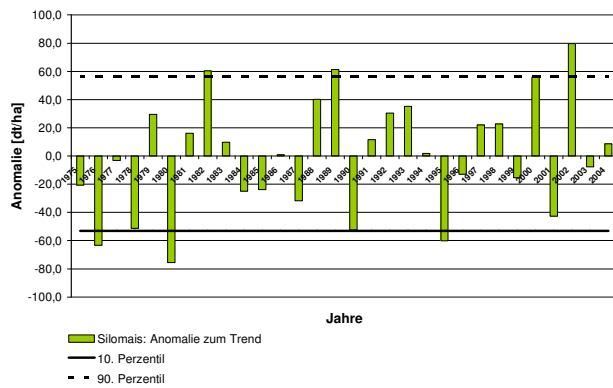
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 6: Anomalien der trendbereinigten Silomaiserträge (Lkr. Mühlendorf)



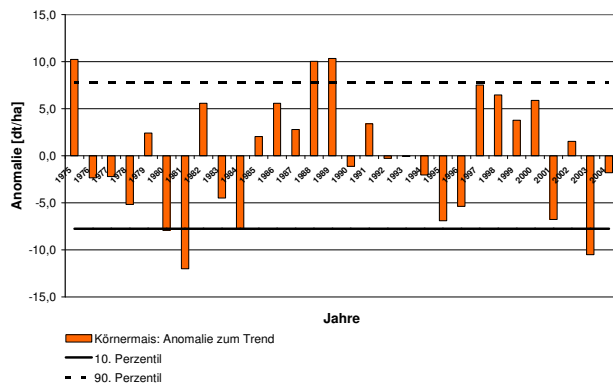
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 7: Anomalien der trendbereinigten Silomaisserträge (Lkr. Rosenheim)



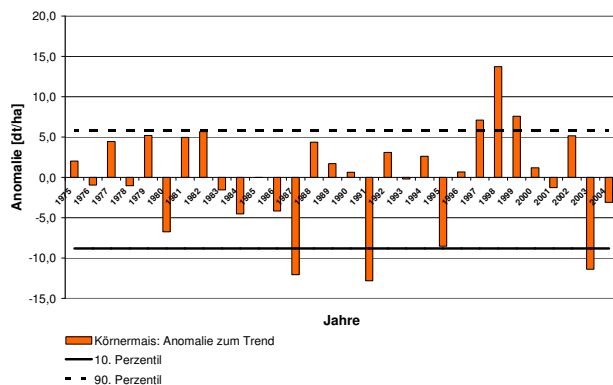
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 8: Anomalien der trendbereinigten Körnermaiserträge (Lkr. Mühldorf)



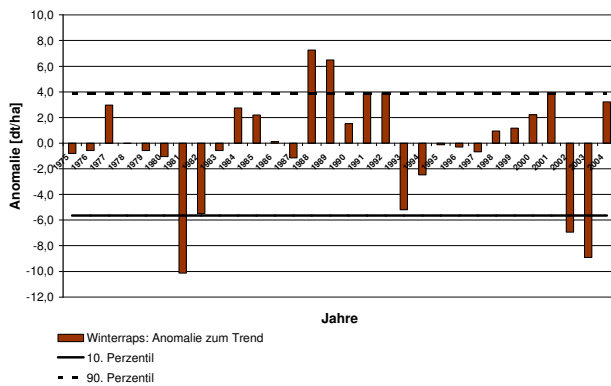
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 9: Anomalien der trendbereinigten Körnermaiserträge (Lkr. Rosenheim)



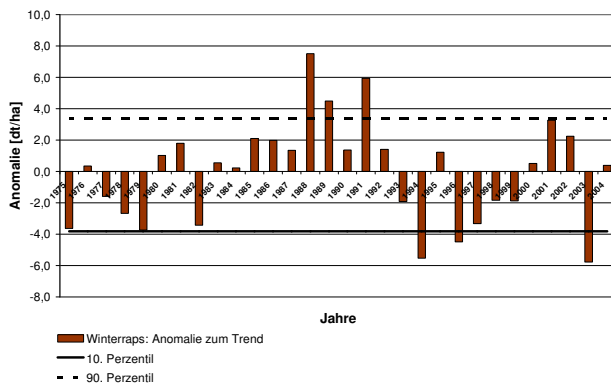
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 10: Anomalien der trendbereinigten Wintererträge (Lkr. Mühlendorf)



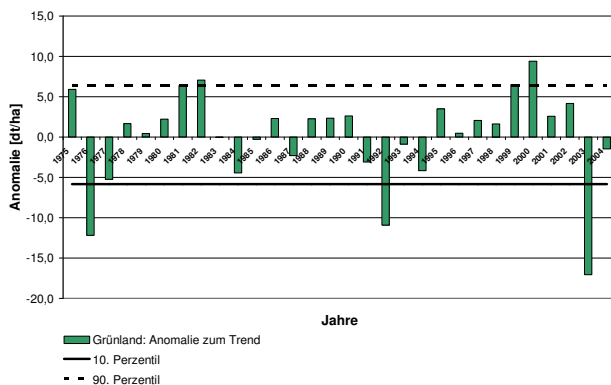
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 11: Anomalien der trendbereinigten Wintererträge (Lkr. Rosenheim)



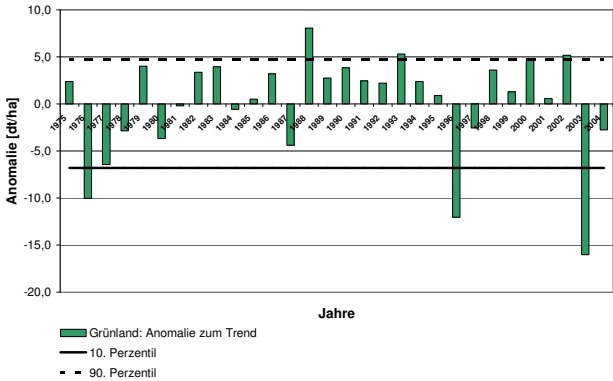
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 12: Anomalien der trendbereinigten Grünlanderträge (Lkr. Mühlendorf)



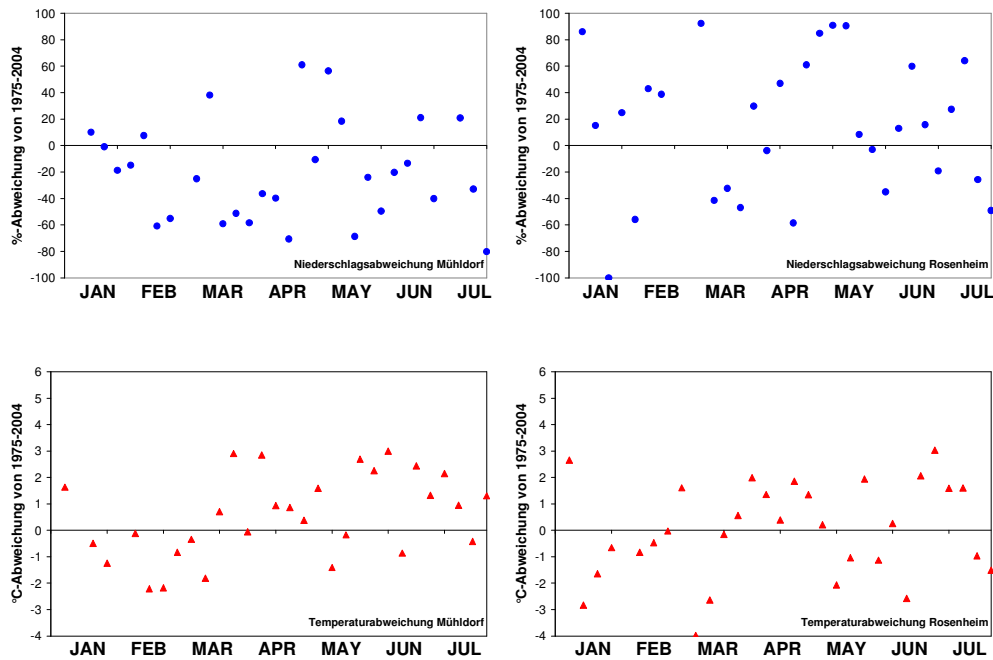
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 13: Anomalien der trendbereinigten Grünlanderträge (Lkr. Rosenheim)



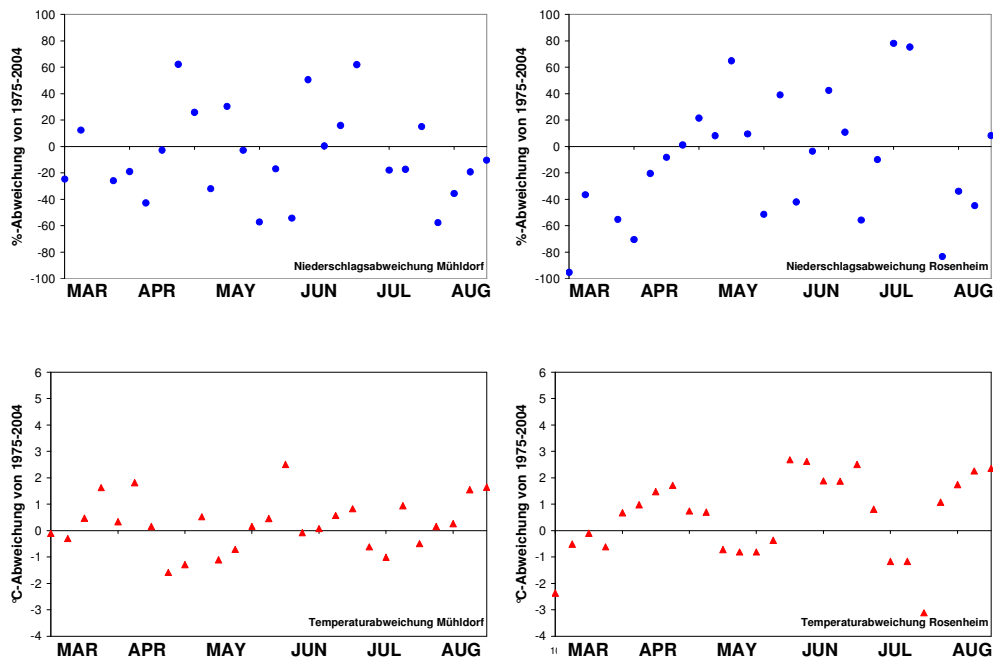
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 14: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Wintergerste)



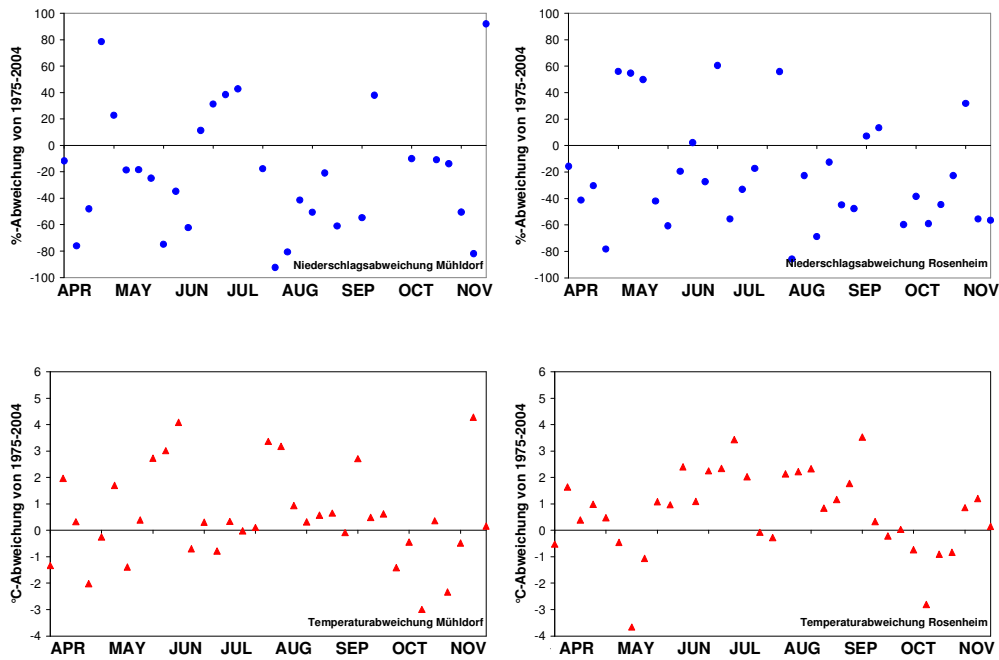
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 15: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Sommergerste)



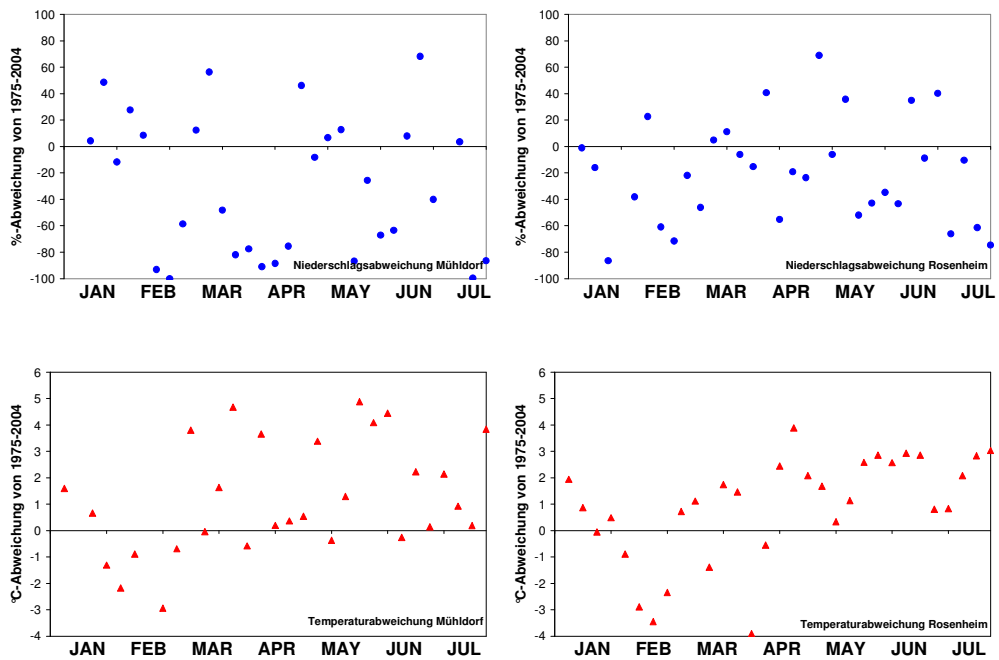
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 16: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Körnermais)



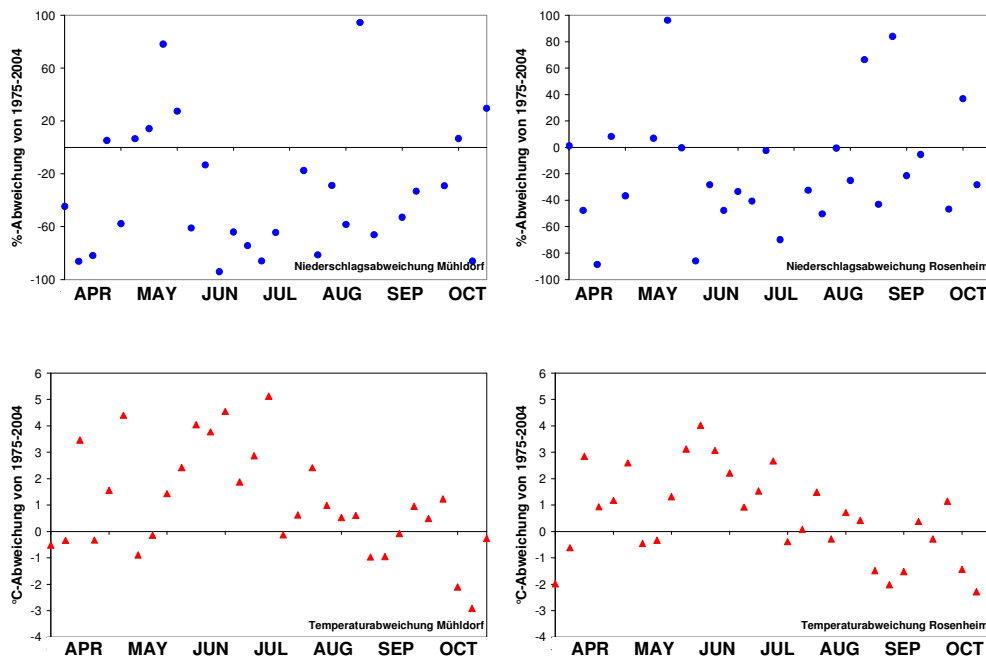
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 17: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Winterraps)



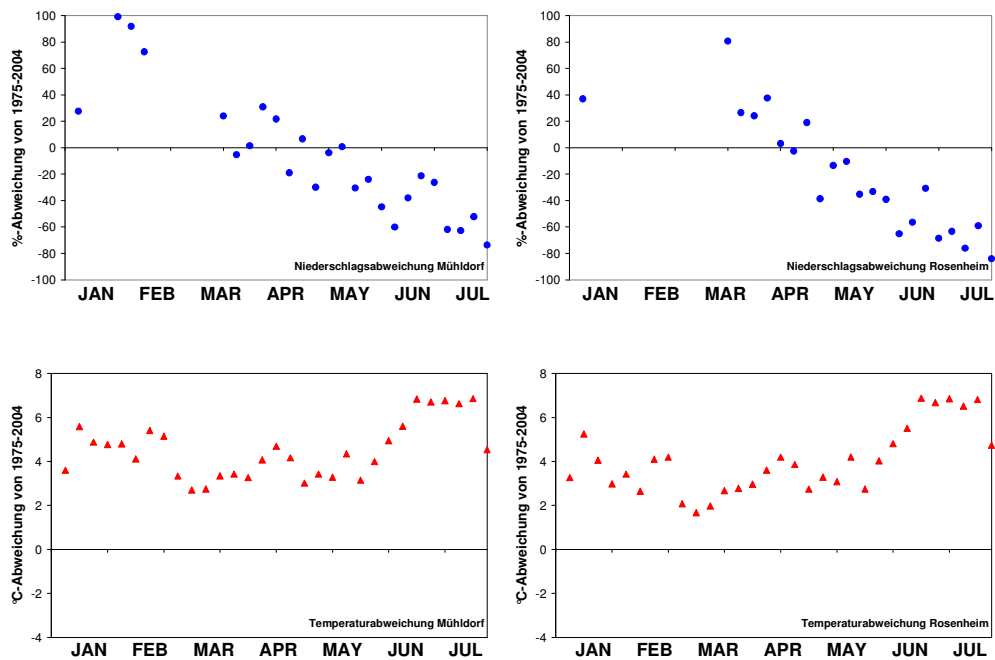
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 18: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) der Missjahre von den Mittelwerten der Jahre 1975 bis 2004 (Grünland)



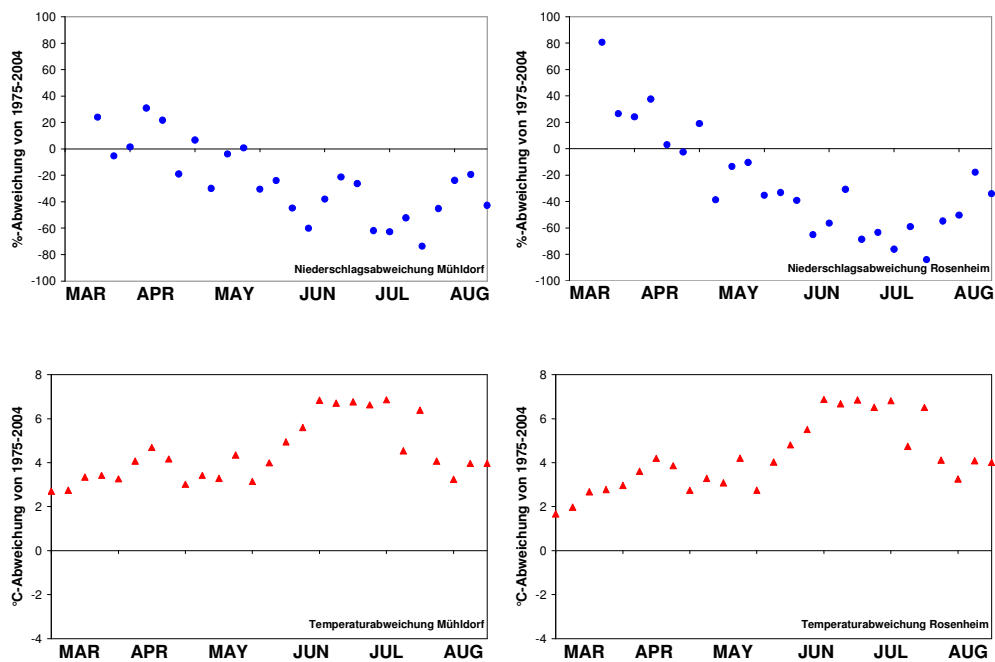
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 19: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Wintergerste)



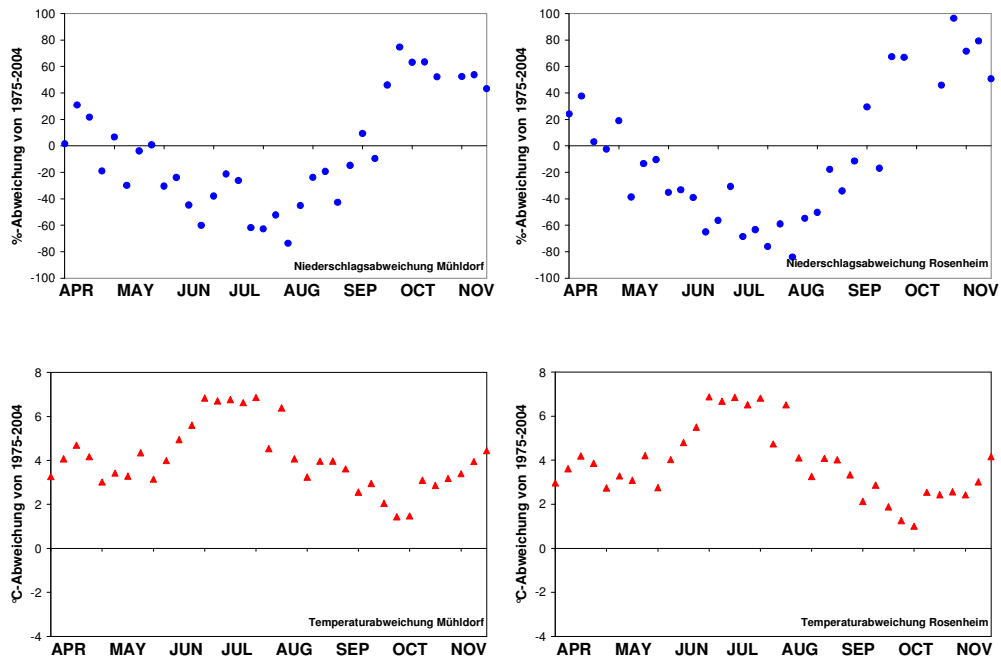
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 20: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Sommergerste)



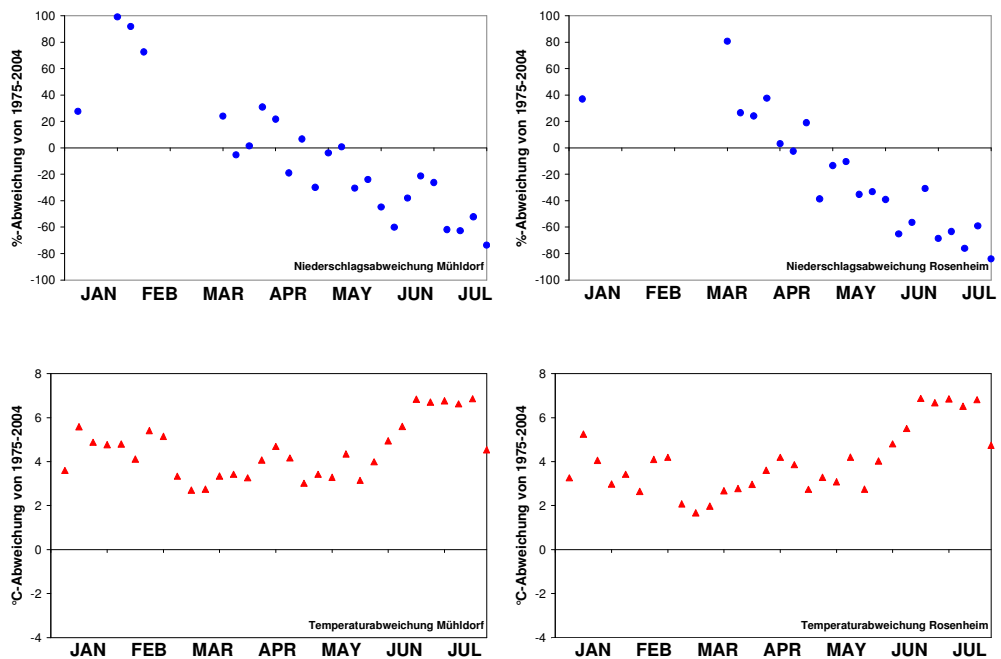
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 21: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Körnermais)



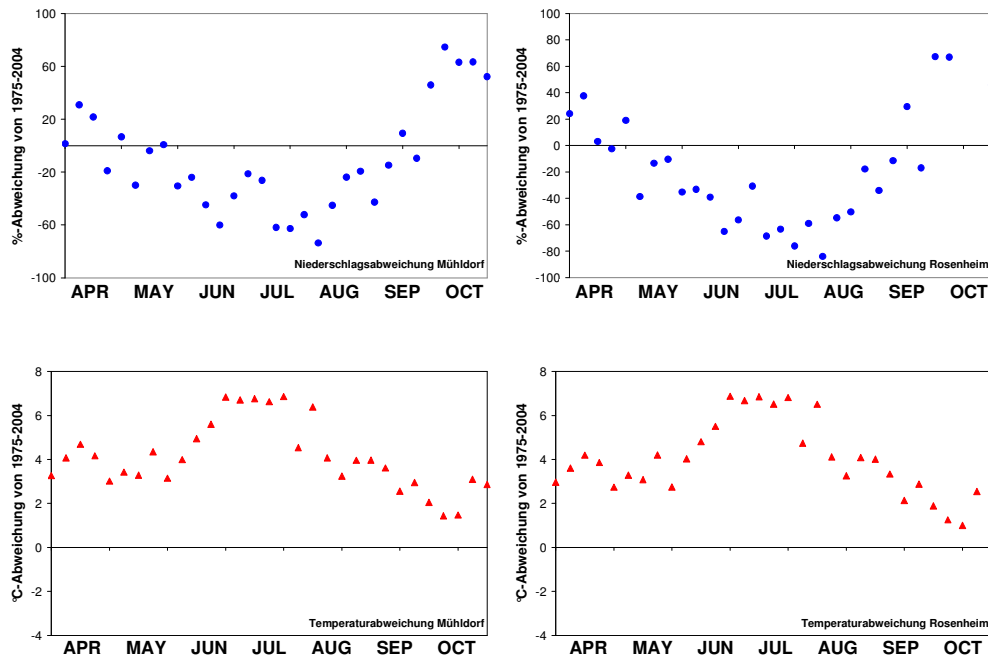
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 22: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Winterraps)



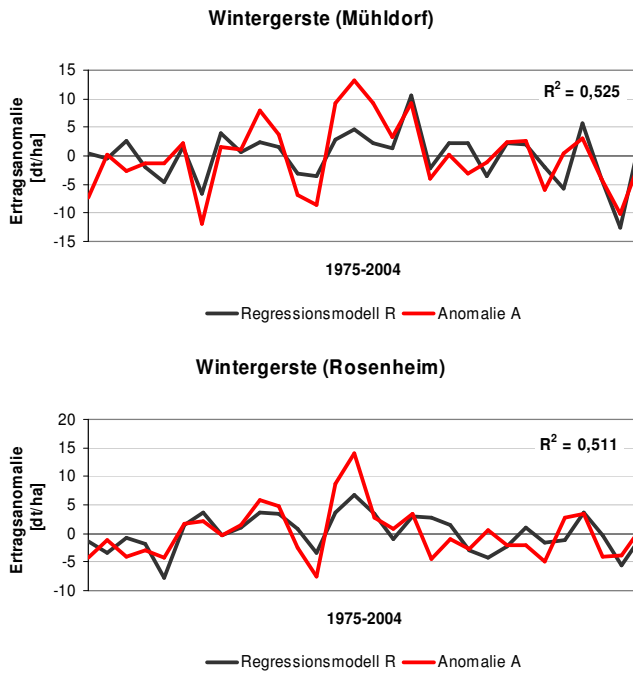
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 23: Abweichung von Niederschlag (●) und Temperatur (▲) im Schnitt der Jahre 2070 bis 2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1975 bis 2004 (Anbauzeitraum Grünland)



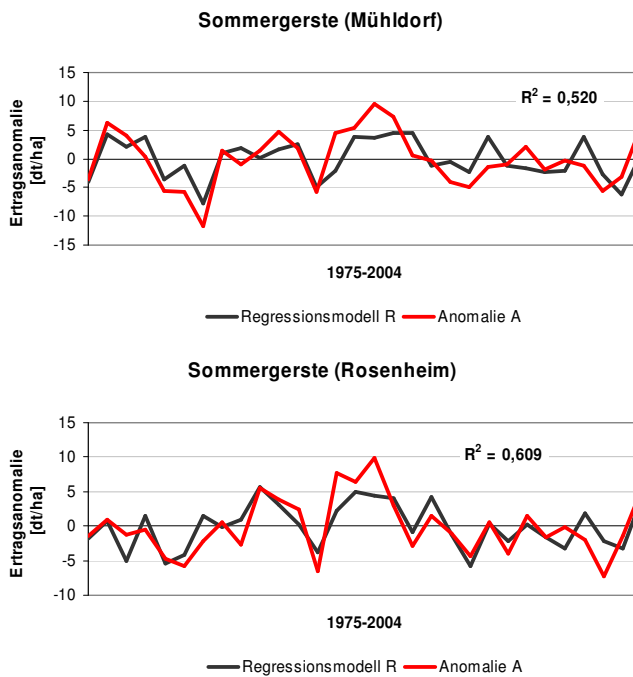
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 24: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Wintergerste)



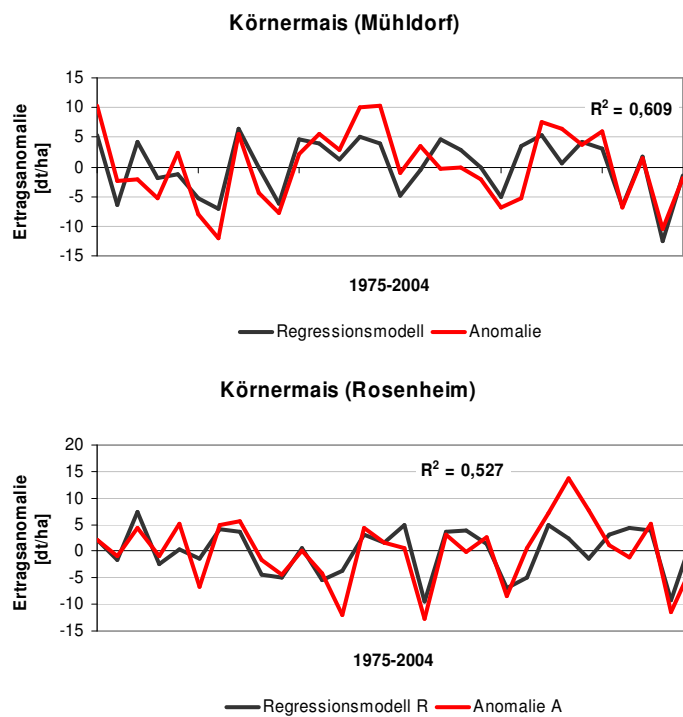
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 25: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Sommergerste)



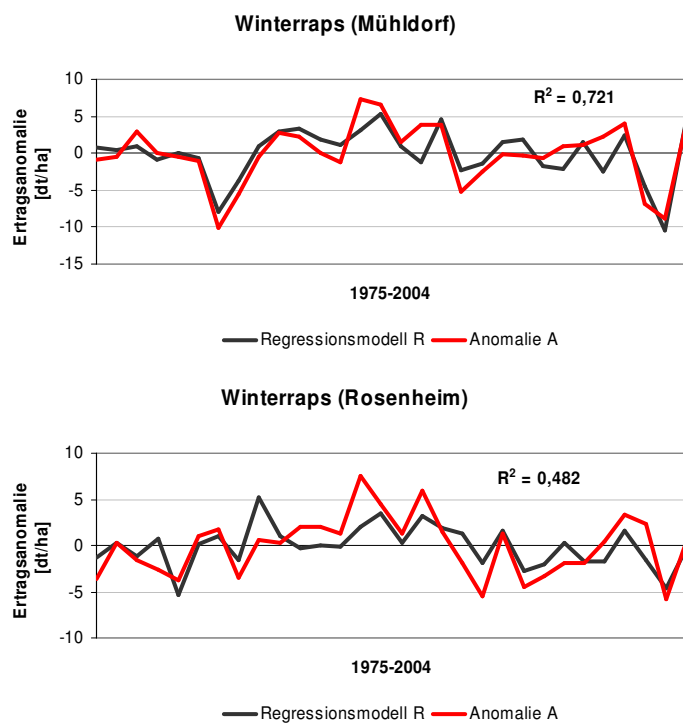
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 26: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Körnermais)



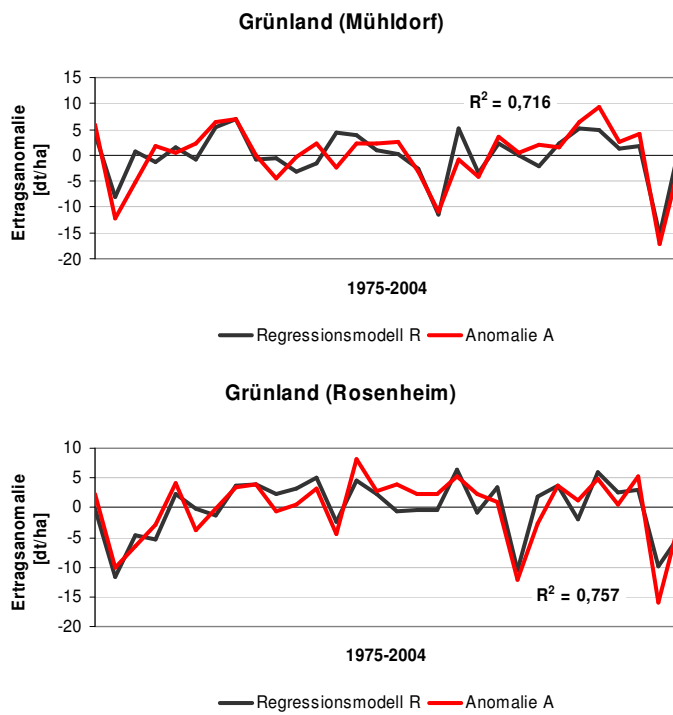
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 27: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Winterraps)



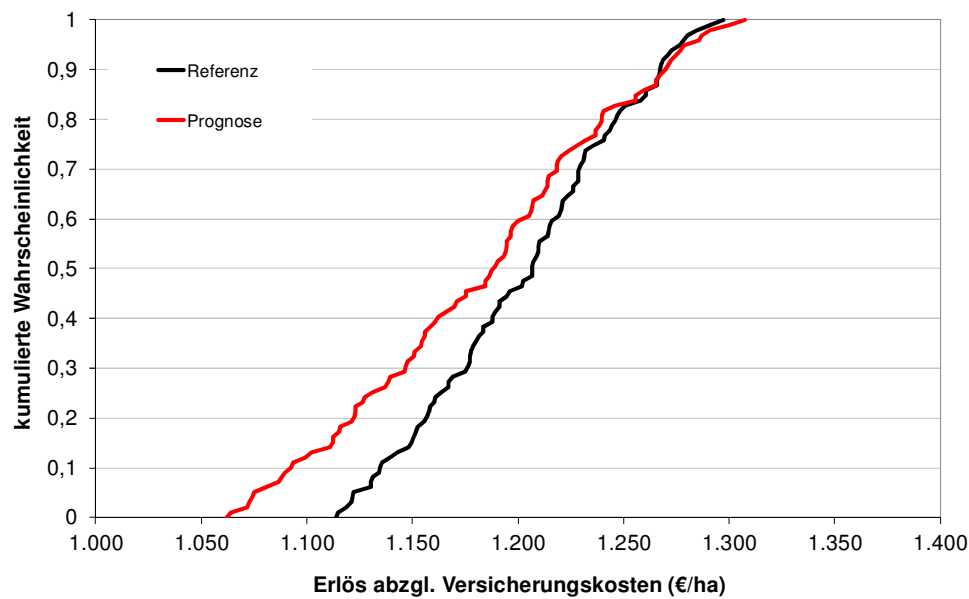
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 28: Beobachtete und modellierte Ertragsanomalien (Grünland)



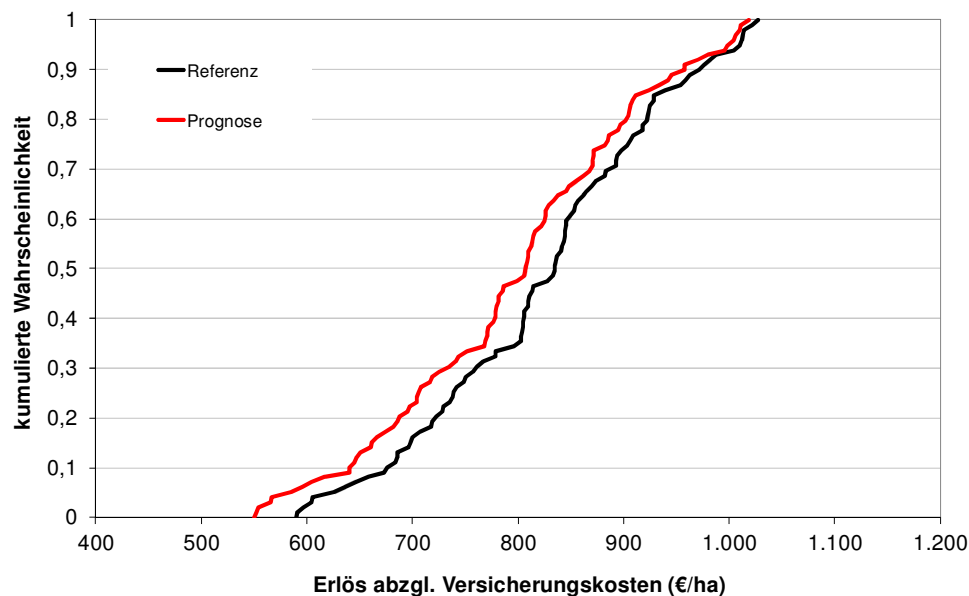
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 29: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Erlöses am Standort Friedberg



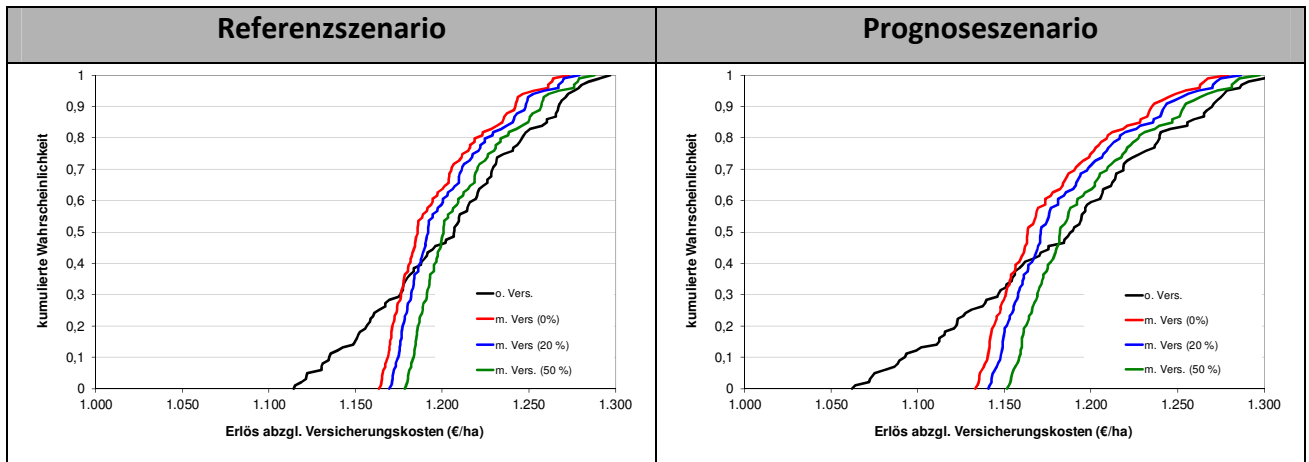
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 30: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Erlöses am Standort Fürstenwalde



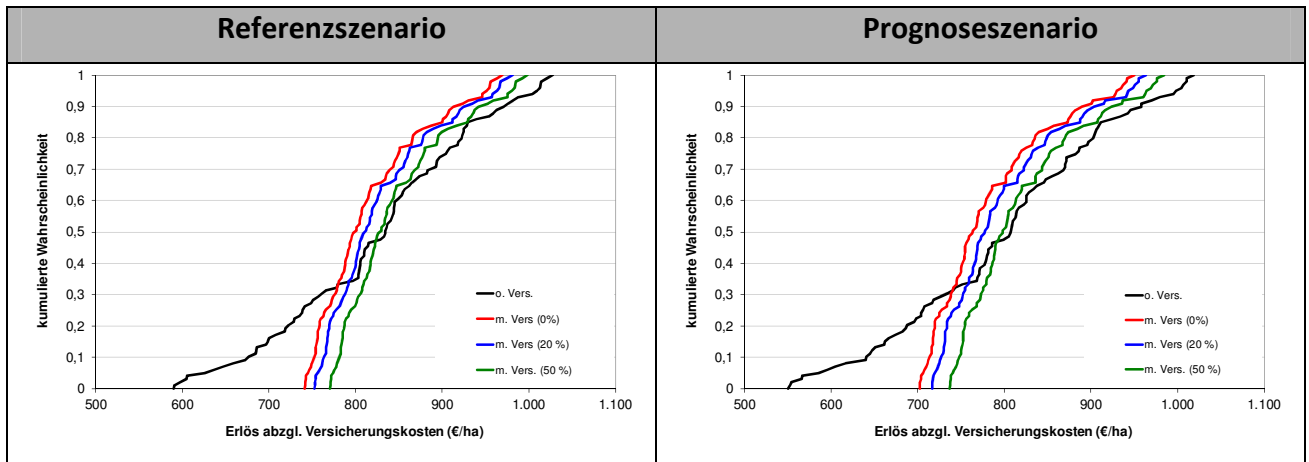
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 31: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses am Standort Friedberg



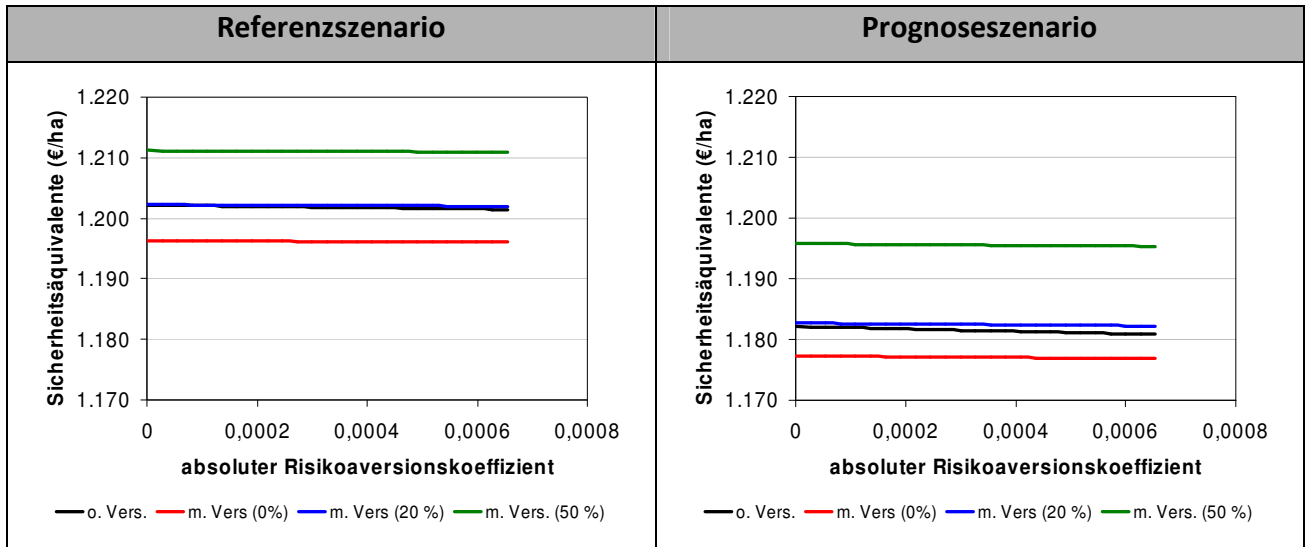
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 32: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Erlöses am Standort Fürstenwalde



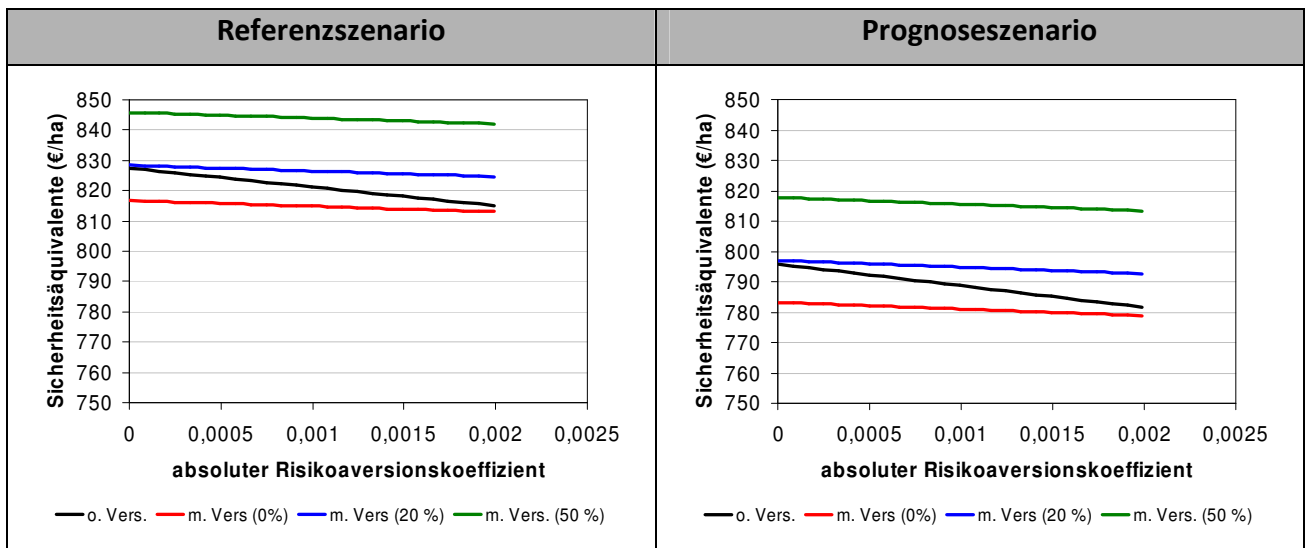
Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 33: Sicherheitsäquivalente des Erlöses am Standort Friedberg



Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Abbildung 34: Sicherheitsäquivalente des Erlöses am Standort Fürstenwalde



Quelle: Eigene Berechnungen

9.2 Anhang-Tabellen

Anhang-Tabelle 1: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen	160
Anhang-Tabelle 2: Erläuterung der Abkürzungen der Variablen	161
Anhang-Tabelle 3: Korrelationsmatrix der Erträge am Standort Freising	161
Anhang-Tabelle 4: Korrelationsmatrix der Erträge am Standort Magdeburg.....	161
Anhang-Tabelle 5: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Friedberg	162
Anhang-Tabelle 6: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Fürstenwalde.....	162

Anhang-Tabelle 1: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalysen

Kultur	Mühdorf		Rosenheim	
	Variable	Wert	Variable	Wert
Winterweizen (WW)	Konstante	58,031 **	Konstante	18,578 **
	Ns _{Mar-Jul}	-0,057 *	Ns _{Okt}	-0,024
	Ns _{Jun-Aug}	0,020	Ns _{Mar-Jul}	-0,030 **
	Temp _{Mai}	-2,636	EDI _{Jun}	0,125
	Temp _{Jun}	-2,667	HS _{Jun}	-0,012
	Temp _{Jul}	-3,655 **		
	EDI _{Apr}	0,843 *		
	EDI _{Jun}	0,472		
	EDI _{Mar-Jul}	-0,333 *		
	HS _{Mai}	0,142		
	HS _{Jun}	-0,022		
	GDD _{WW}	0,053 *		
Wintergerste (WG)	Konstante	25,339	Konstante	19,662
	Ns _{Mai}	-0,044	Ns _{Mai}	-0,044 **
	Ns _{Mar-Jul}	-0,004	Ns _{Jun}	-0,045 **
	Temp _{Jun}	-2,038 *	Temp _{Jun}	-1,649 **
	EDI _{Mai}	-0,089	EDI _{Jun}	0,143
	EDI _{Mar-Jul}	-0,100	GDD _{WG}	0,012
	HS _{Mai}	-0,137 *		
	GDD _{WG}	0,007		
Sommergerste (SG)	Konstante	35,564 *	Konstante	23,509 *
	Ns _{Jul}	-0,040	Ns _{Mar-Jul}	-0,032 **
	Temp _{Mai}	-1,541	Temp _{Apr}	0,854
	Temp _{Jun}	-1,771	Temp _{Mar-Jul}	3,387
	Temp _{Jul}	-2,383 *	EDI _{Jun}	0,277 *
	Temp _{Jahr}	-4,269	EDI _{Jun-Aug}	-0,103
	Temp _{Mar-Jul}	+7,866 *	HS _{Mai}	0,048
	EDI _{Mar-Jul}	-0,174	HS _{Jul}	0,022
	HS _{Mai}	-0,195	HS _{Mar-Jul}	-0,034 *
			GDD _{SG}	-0,034
Silomais (SM)	Konstante	-764,008 **	Konstante	-267,974 **
	Ns _{Jun-Aug}	-0,101	Ns _{Jul}	0,305 **
	Temp _{Aug}	-22,759 **	Ns _{Aug}	0,228 *
	Temp _{Jun-Aug}	-72,772 **	Ns _{Mar-Jul}	-0,165 *
	EDI _{Jul}	+3,799 *	EDI _{Jul}	-2,714 **
	EDI _{Jun-Aug}	+0,962	EDI _{Okt}	1,988 **
	HS _{Mar-Jul}	-0,310 **	HS _{Aug}	-0,165 *
			GDD _{SM}	0,303 **
Körnermais (KM)	Konstante	-19,237	Konstante	-11,129
	Ns _{Sep}	-0,066 *	Ns _{Jun}	-0,053 *
	Temp _{Mai}	1,130	Ns _{Jun-Aug}	0,048 *
	Temp _{Aug}	-3,326	EDI _{Mai}	-0,620 **
	Temp _{Jun-Aug}	-4,244	EDI _{Jul}	-0,603 *
	EDI _{Jun}	-0,733	EDI _{Mar-Jul}	0,274 **
	EDI _{Aug}	-0,517	EDI _{Jun-Aug}	-0,252 *
	EDI _{Jun-Aug}	0,545 *	HS _{Jun-Aug}	-0,023
	HS _{Aug}	-0,124		
	HS _{Mar-Jul}	-0,152 *		
	HS _{Jun-Aug}	0,136 *		
Winterraps (WR)	Konstante	28,751 **	Konstante	-23,302 **
	Ns _{Jun}	-0,037 *	Ns _{Mai}	-0,010
	Ns _{Jul}	-0,029 *	Temp _{Mai}	-1,443 **
	Temp _{Jun}	-1,316 *	HS _{Jun}	-0,034 **
	EDI _{Apr}	0,614 **	GDD _{WR}	0,022 **
	EDI _{Jun}	0,269		
	EDI _{Mar-Jul}	-0,157 *		
	HS _{Mar-Jul}	-0,016 *		
Grünland (GL)	Konstante	-35,834 *	Konstante	-23,297 *
	Ns _{Jun}	0,038 *	Ns _{Mai}	-0,087 **
	Ns _{Aug}	-0,038 *	Ns _{Jun}	-0,048 **
	EDI _{Jun-Aug}	0,236 **	Ns _{Mar-Jul}	0,023 *
	HS _{Aug}	-0,615	EDI _{Jun-Aug}	0,333 **
	GDD _{GL}	0,021 **	GDD _{GL}	0,015 **

Anmerkungen: Signifikanzniveaus: **: p-Werte ≤ 0,01; *: p-Werte ≤ 0,05; Erläuterung der Abkürzungen der Variablen: siehe Anhang-Tabelle 2

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Tabelle 2: Erläuterung der Abkürzungen der Variablen

Variable	Abkürzung	Rechenweg *
Durchschnittstemperatur	Temp	$Temp = \frac{\left(\sum_{i=1}^n Temp_d \right)}{n}$
Niederschlagssumme	Ns	$Ns = \sum_{i=1}^n Ns_d$
Trockenheitsindex	EDI	$EDI = \sum_{i=1}^n EDI \leq -1,0$
Index für Hitzestress	HS	$HS = \sum_{i=1}^n T_{max} \geq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$
Growing-Degree-Days	GDD	$GDD = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} - T_{Basis} \right)$

* siehe auch Formel 3-3 bis Formel 3-7

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang-Tabelle 3: Korrelationsmatrix der Erträge am Standort Freising

	Winterweizen	Wintergerste	Winterraps	Körnermais
Winterweizen	1	0,65	0,69	0,51
Wintergerste		1	0,43	0,19
Winterraps			1	0,54
Körnermais				1

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Tabelle 4: Korrelationsmatrix der Erträge am Standort Magdeburg

	Winterweizen	Wintergerste	Winterraps	Körnermais
Winterweizen	1	0,65	0,81	-0,17
Wintergerste		1	0,58	-0,01
Winterraps			1	-0,06
Körnermais				1

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Tabelle 5: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Friedberg

		Versicherungsstrategien			
Kennzahl	Szenario	o. Vers. ³⁾	m. Vers. (0%) ⁴⁾	m. Vers. (20%) ⁵⁾	m. Vers. (50%) ⁶⁾
Erwartungswert	Ref ¹⁾	1.202 €	1.196 €	1.202 €	1.211 €
	Prog ²⁾	1.182 €	1.177 €	1.182 €	1.196 €
Variationskoeffizient	Ref ¹⁾	3,97 %	2,38 %	2,37 %	2,35 %
	Prog ²⁾	5,38 %	3,21 %	3,19 %	3,16 %
Min	Ref ¹⁾	1.114 €	1.164 €	1.170 €	1.178 €
	Prog ²⁾	1.062 €	1.133 €	1.141 €	1.152 €
Max	Ref ¹⁾	1.297 €	1.273 €	1.279 €	1.288 €
	Prog ²⁾	1.307 €	1.279 €	1.286 €	1.297 €

Anmerkungen: ¹⁾ Referenzszenario, ²⁾ Prognoseszenario, ³⁾ ohne Versicherung, ⁴⁾ mit Versicherung (0 % Prämiensubvention), ⁵⁾ mit Versicherung (20 % Prämiensubvention), ⁶⁾ mit Versicherung (50 % Prämiensubvention)

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang-Tabelle 6: Lage- bzw. Streuungsparameter des Erlöses am Standort Fürstenwalde

		Versicherungsstrategien			
Kennzahl	Szenario	o. Vers. ³⁾	m. Vers. (0%) ⁴⁾	m. Vers. (20%) ⁵⁾	m. Vers. (50%) ⁶⁾
Erwartungswert	Ref ¹⁾	828 €	817 €	828 €	846 €
	Prog ²⁾	797 €	783 €	797 €	819 €
Variationskoeffizient	Ref ¹⁾	13,53 %	7,69 %	7,58 %	7,43 %
	Prog ²⁾	15,03 %	8,72 %	8,57 %	8,36 %
Min	Ref ¹⁾	590 €	741 €	753 €	770 €
	Prog ²⁾	550 €	702 €	716 €	737 €
Max	Ref ¹⁾	1.028 €	969 €	981 €	998 €
	Prog ²⁾	1.019 €	950 €	964 €	984 €

Anmerkungen: ¹⁾ Referenzszenario, ²⁾ Prognoseszenario, ³⁾ ohne Versicherung, ⁴⁾ mit Versicherung (0 % Prämiensubvention), ⁵⁾ mit Versicherung (20 % Prämiensubvention), ⁶⁾ mit Versicherung (50 % Prämiensubvention)

Quelle: Eigene Berechnungen

9.3 Anhang-Sonstiges (Fragebogen Expertenbefragung)



Befragung

Regionale Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion

Ziel dieser Befragung ist es, quantitative Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge in Deutschland abzuleiten.

Dazu sind im Folgenden Auswertungen eines regionalisierten Klimamodells (Modell WETTREG, SRES-Szenario A1B, Zeiträume: 1971-2000 vs. 2021-2050) für vier Standorte in Deutschland dargestellt. Dabei wurden Temperatur- und Niederschlagsänderungen sowie die Änderung von klimatologischen Kenntagen ausgewertet.

Diese Auswertungen sollen als Basis zur Schätzung einer Ertragsverteilung unter zukünftigen Klimabedingungen dienen. Als Grundlage hierfür wurden 12-jährige historische Verteilungen von Hektarerträgen auf Landkreisebene aufbereitet.

Der Fragebogen ist für die vier Standorte jeweils in **zwei** Teile gegliedert:

- **Standörtliche Klimaänderungen**

Dieser Teil enthält Auswertungen über die prognostizierten standörtlichen Klimaänderungen.

Hinweis:

Neben den Änderungen der Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag in den einzelnen Monaten ist auch die Schwankungsbreite dieser Mittelwerte durch einen Box-Whisker-Plot dargestellt. Innerhalb der Box befinden sich 50 % der Abweichungen vom Mittelwert, die vertikalen Whisker markieren die maximale bzw. die minimale Abweichung der Ergebnisse der einzelnen Jahre vom Mittelwert.

- **Ertragsschätzung**

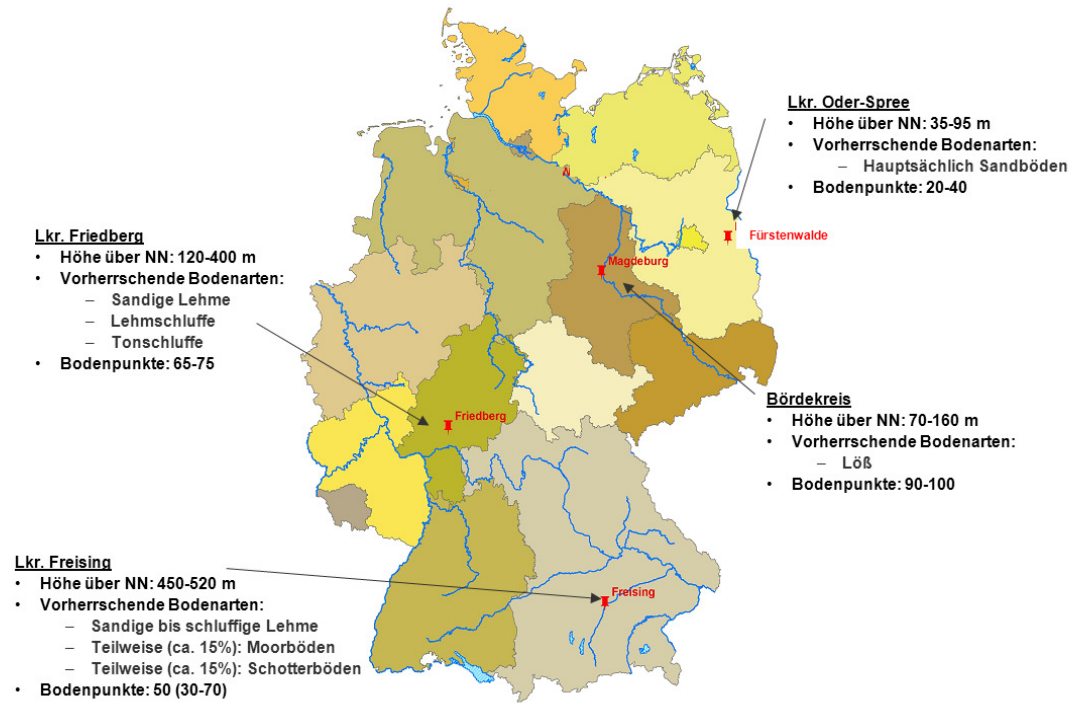
Dieser Teil beinhaltet eine Einschätzung der Auswirkungen der im ersten Teil vorgestellten Klimaänderungen auf die Ertragsverteilungen von vier Kulturen (Winterweizen, Wintergerste, Körnermais und Winterraps).

Nachfolgend ist die Verteilung der vier Standorte innerhalb Deutschlands dargestellt. Des Weiteren sind zur besseren Charakterisierung der einzelnen Standorte Informationen über die Standorteigenschaften (Höhe über NN, vorherrschende Bodenarten, durchschnittliche Bodenpunkte) angegeben.

Übersicht Standorte



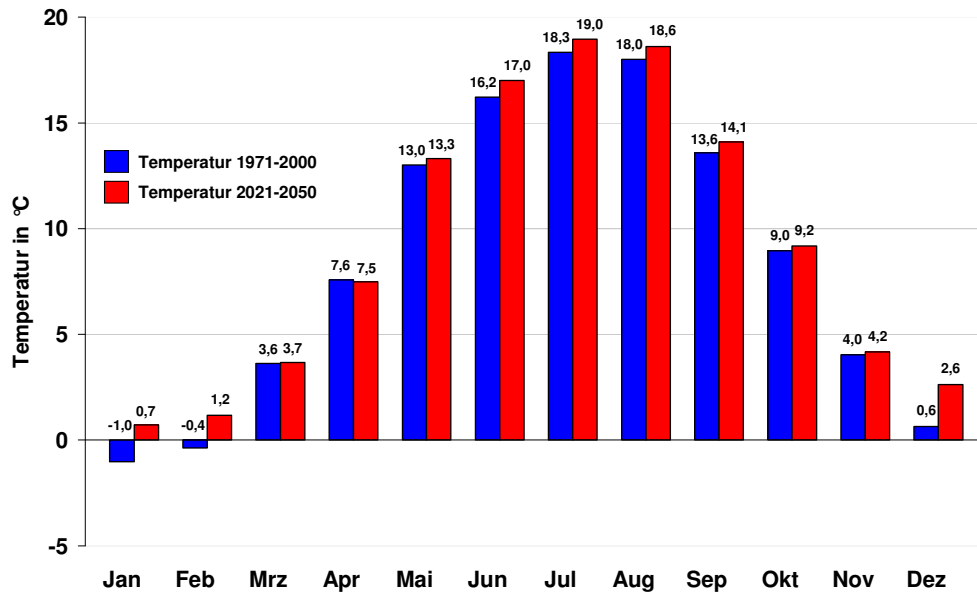
Standorte



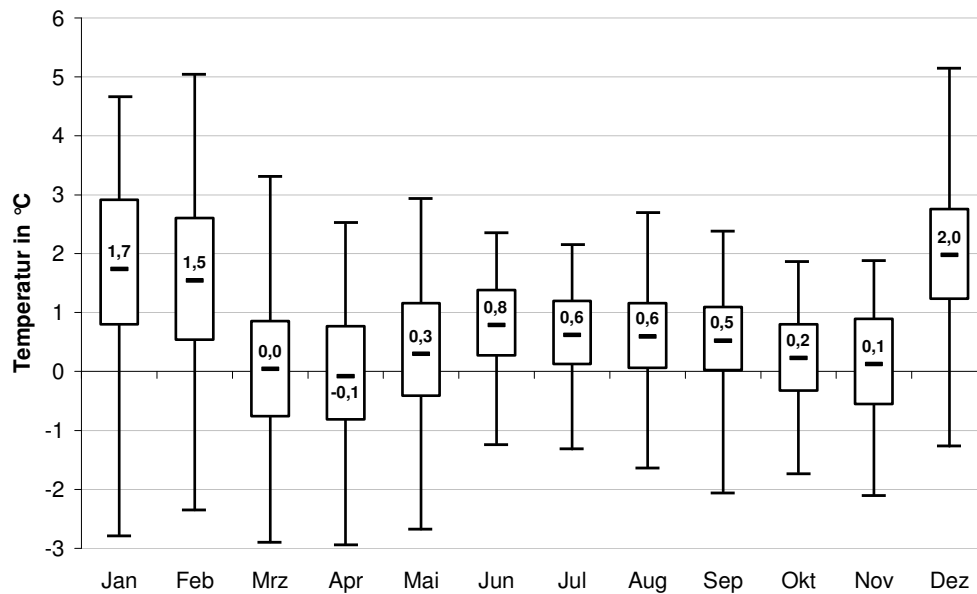
Standörtliche Klimaänderungen - Fürstenwalde



Änderung der Temperatur am Standort Fürstenwalde



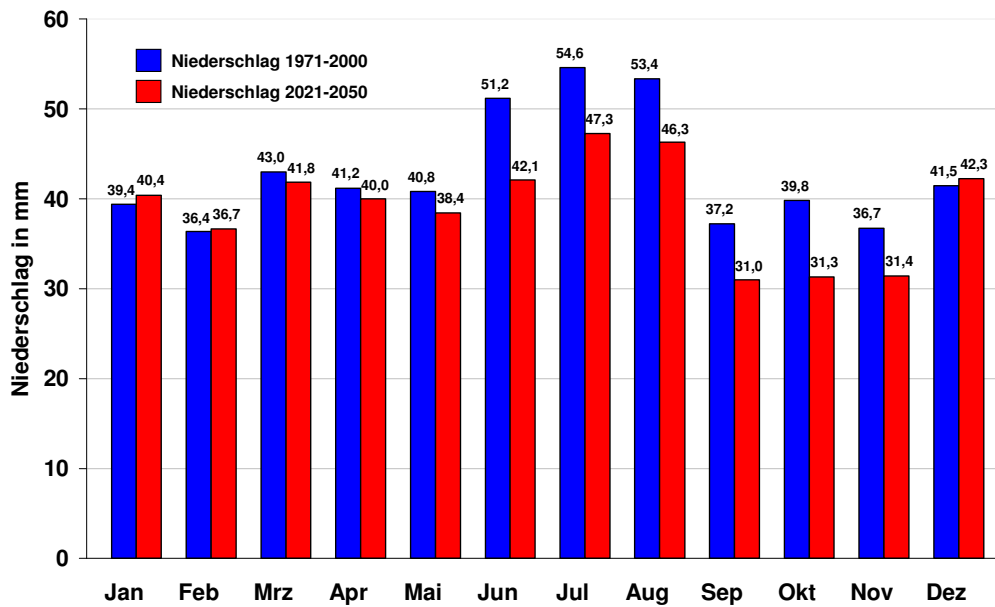
Schwankungsbreite der Temperaturänderung am Standort Fürstenwalde



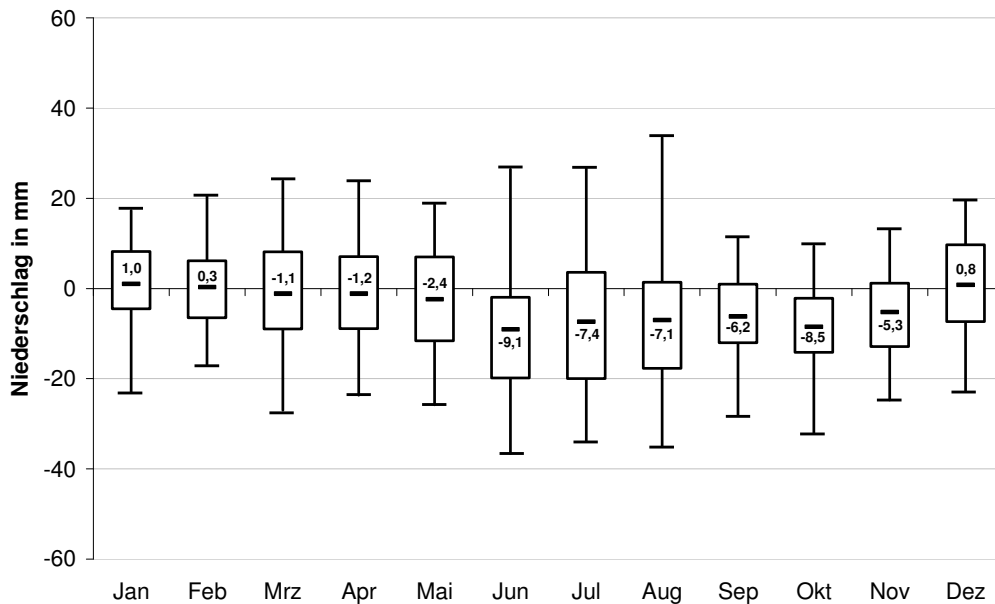
Standörtliche Klimaänderungen Fürstenwalde



Änderung des Niederschlags am Standort Fürstenwalde



Schwankungsbreite der Niederschlagsänderung am Standort Fürstenwalde

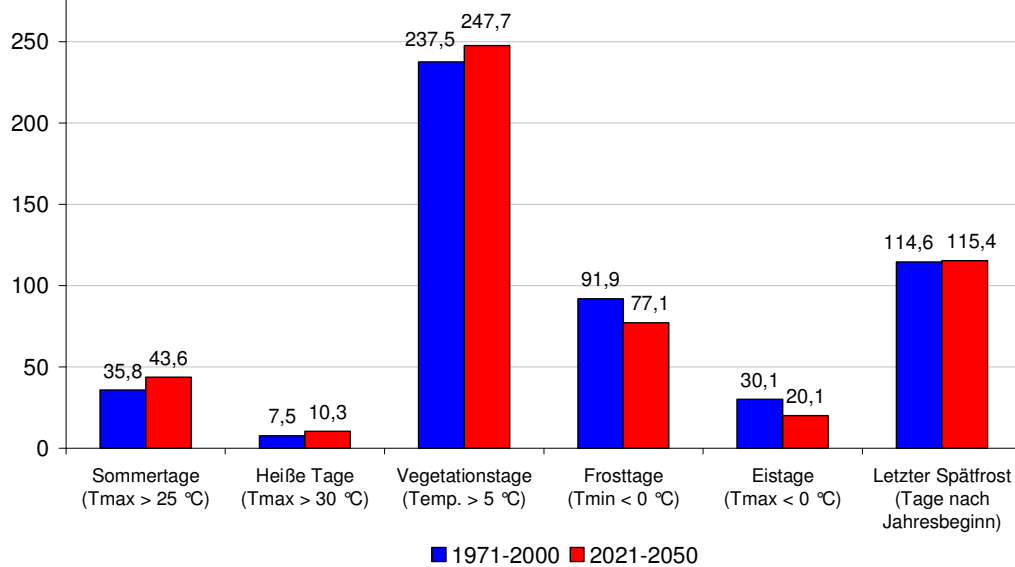


Standörtliche Klimaänderungen Fürstenwalde



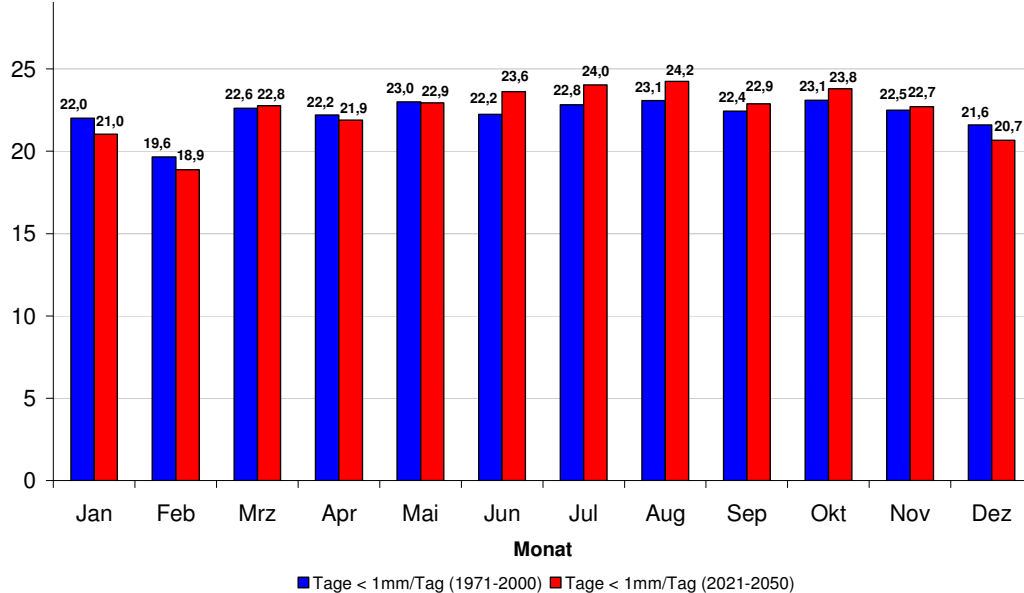
Veränderung klimatologischer Kenntage am Standort Fürstenwalde

Tage pro Jahr



Veränderung der Trockentage am Standort Fürstenwalde

Tage pro Monat



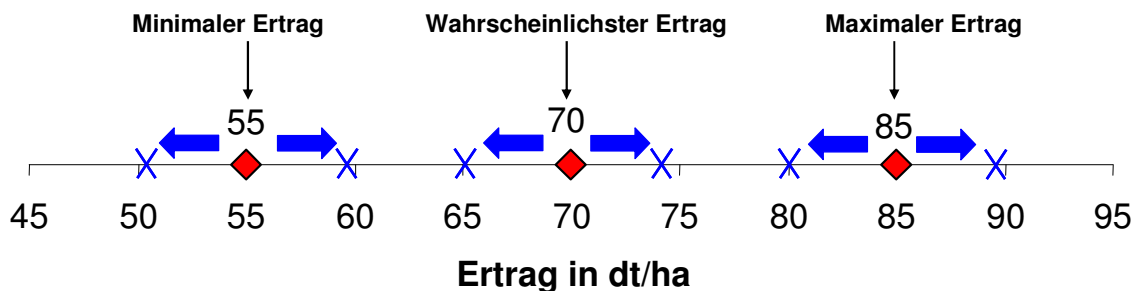
Ertragsschätzung - Allgemeines



Ertragsverteilung (historisch und zukünftig)

Aufgrund der dargestellten Veränderung von pflanzenbaulich relevanten Klimaparametern sollen nun die regionalspezifischen Werte für den minimalen, den maximalen und den wahrscheinlichsten Ertrag unter diesen zukünftigen Klimabedingungen geschätzt werden. Die nachfolgende Grafik zeigt ein Beispiel für eine Ertragsverteilung auf der Grundlage historischer Ertragsdaten.

Ertragsverteilung – Beispiel



X = erwartete Veränderung in der Zukunft

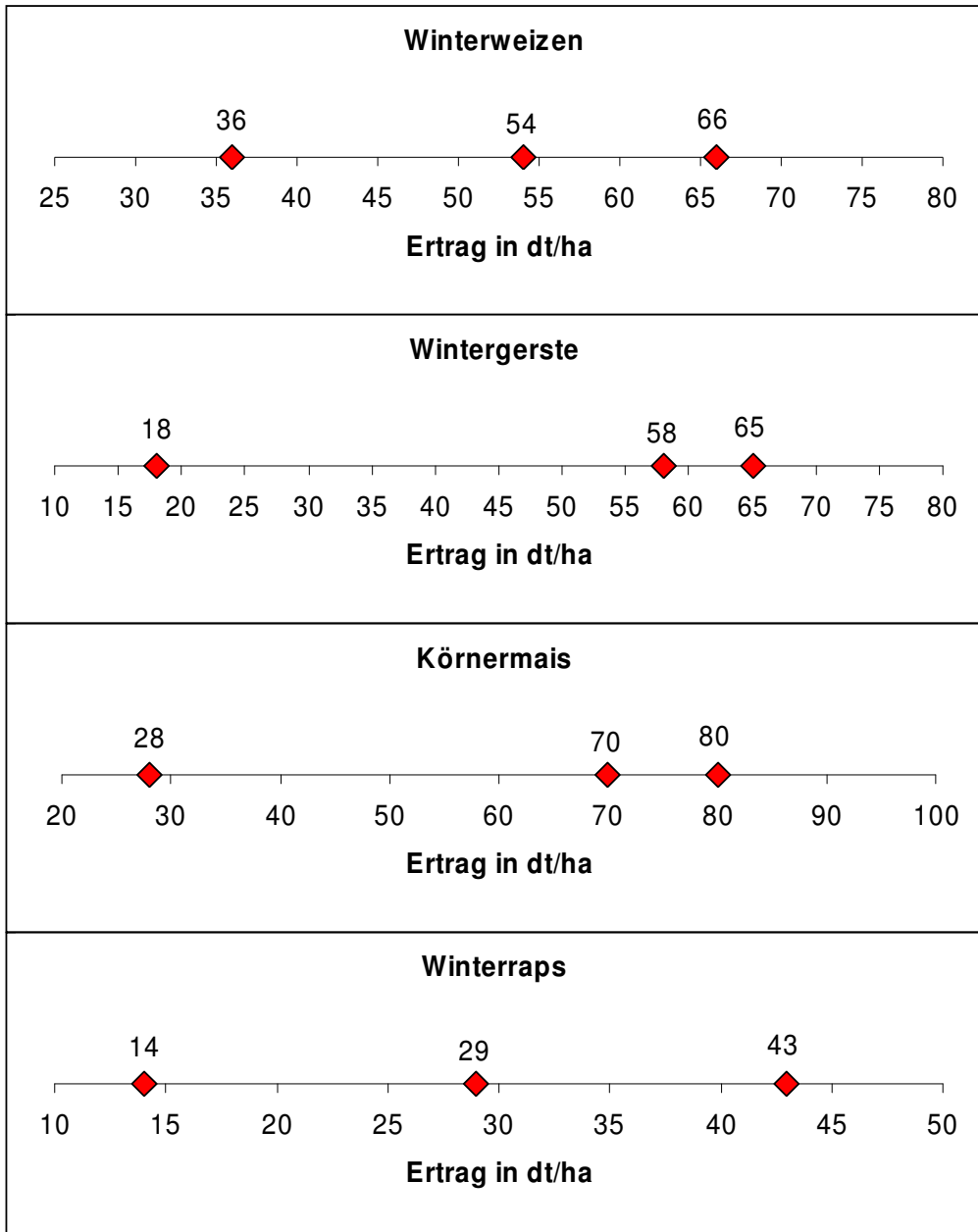
In diesem Beispiel beträgt der minimale Ertrag 55 dt/ha, der maximale Ertrag 85 dt/ha und der wahrscheinlichste Ertrag, also derjenige, der am häufigsten erreicht wird 70 dt/ha. Diese drei Werte können sich zukünftig durch den prognostizierten Klimawandel ändern. Die Pfeile zeigen entweder eine Veränderung des jeweiligen Wertes nach oben bzw. nach unten an.

Die Veränderung dieser drei Werte soll nun auf Basis der gezeigten Klimadaten für die einzelnen Standorte geschätzt und nachfolgend in die jeweilige Darstellung für die vier Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Körnermais und Wintererbsen eingetragen werden. Falls die Skala nicht ausreicht, kann sie per Hand verlängert werden.

Ertragsschätzung - Fürstenwalde



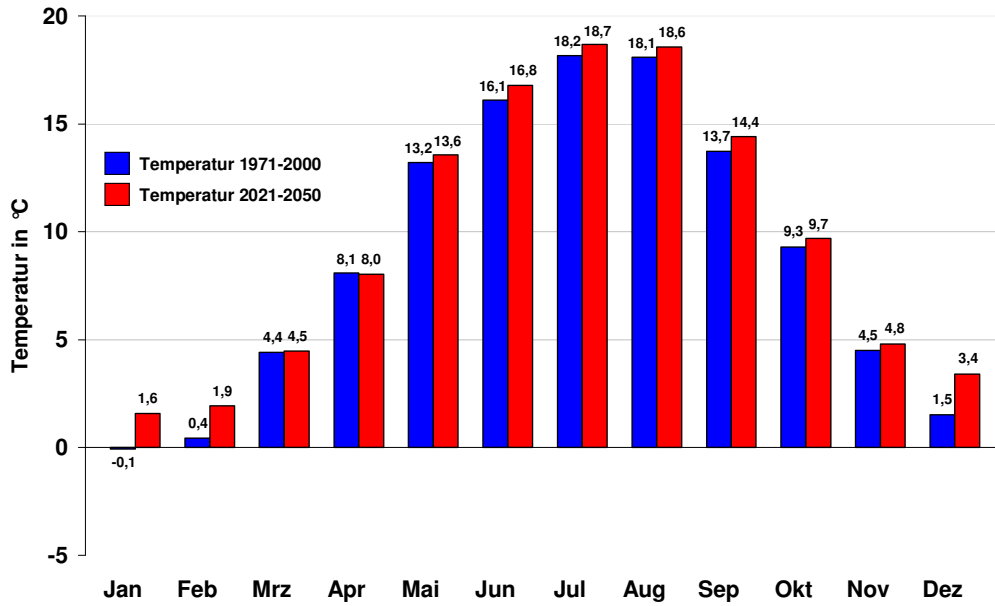
Bitte tragen Sie die von Ihnen erwartete Veränderung der drei Werte in die jeweilige Skala für die vier Kulturen ein (Kennzeichnung durch Ankreuzen sowie Hinschreiben des Wertes).



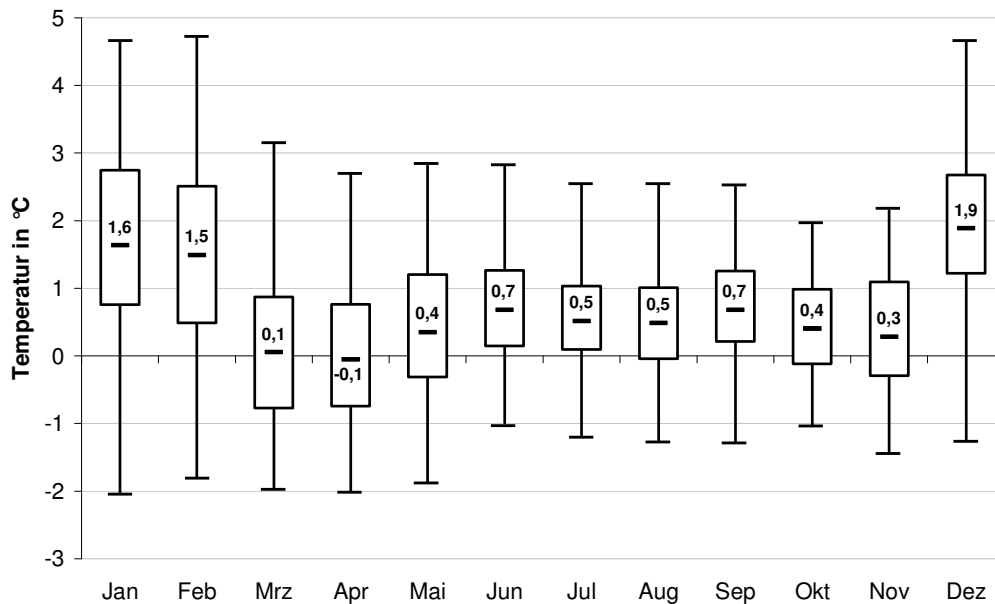
Standörtliche Klimaänderungen - Magdeburg



Änderung der Temperatur am Standort Magdeburg



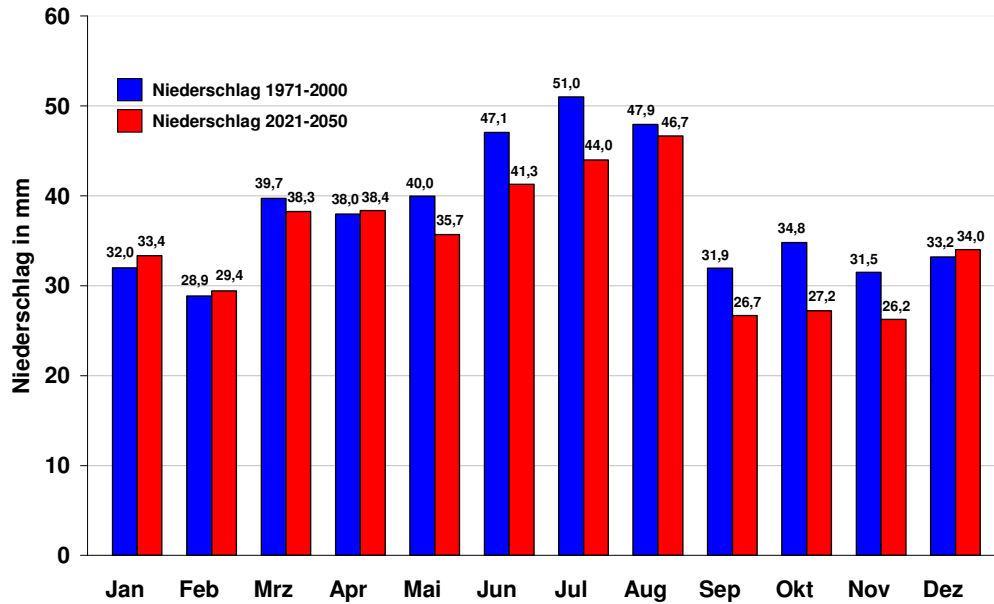
Schwankungsbreite der Temperaturänderung am Standort Magdeburg



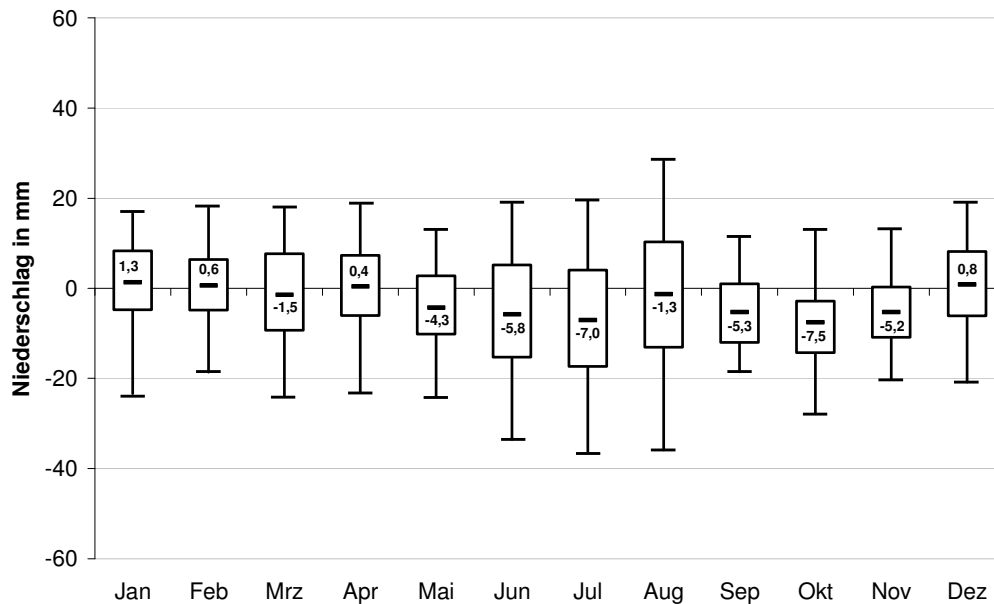
Standörtliche Klimaänderungen - Magdeburg



Änderung des Niederschlags am Standort Magdeburg



Schwankungsbreite der Niederschlagsänderung am Standort Magdeburg

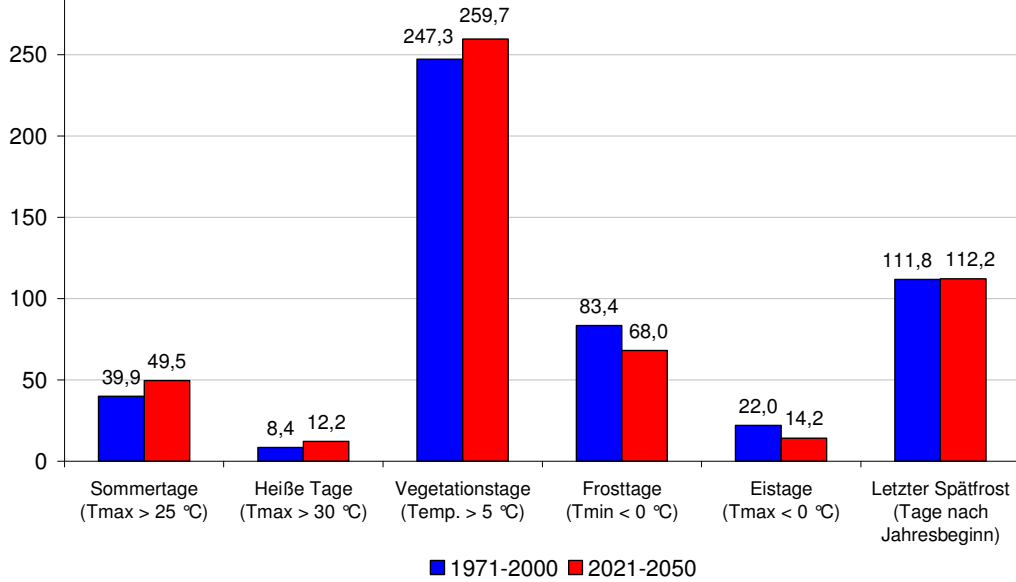


Standörtliche Klimaänderungen - Magdeburg



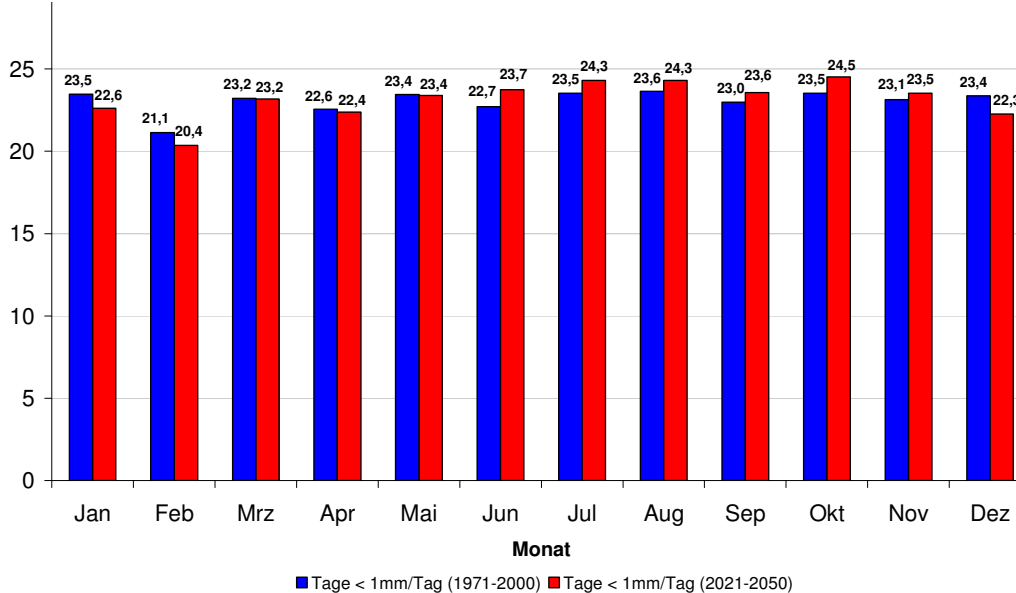
Veränderung klimatologischer Kenntage am Standort Magdeburg

Tage pro Jahr



Veränderung der Trockentage am Standort Magdeburg

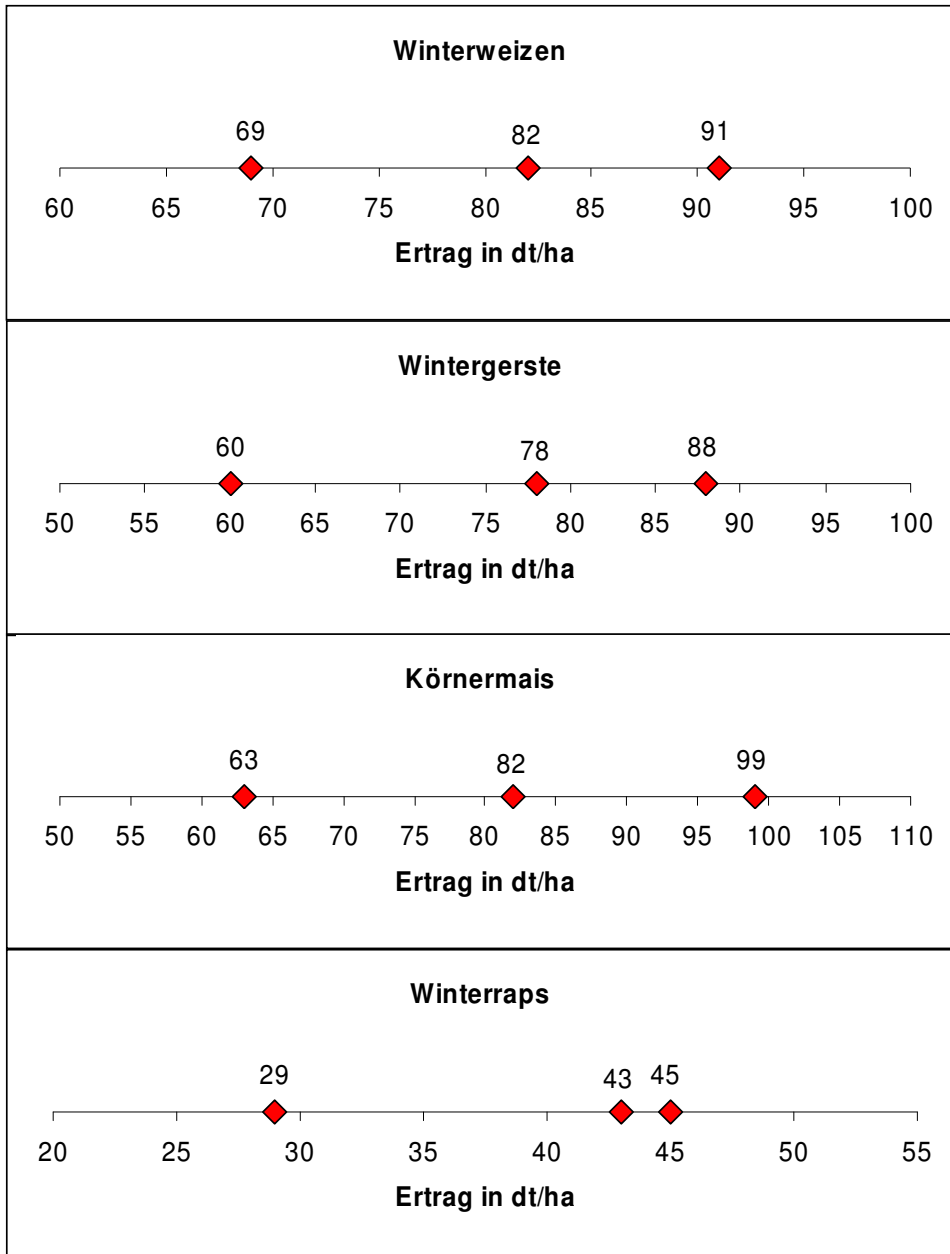
Tage pro Monat



Ertragsschätzung - Magdeburg



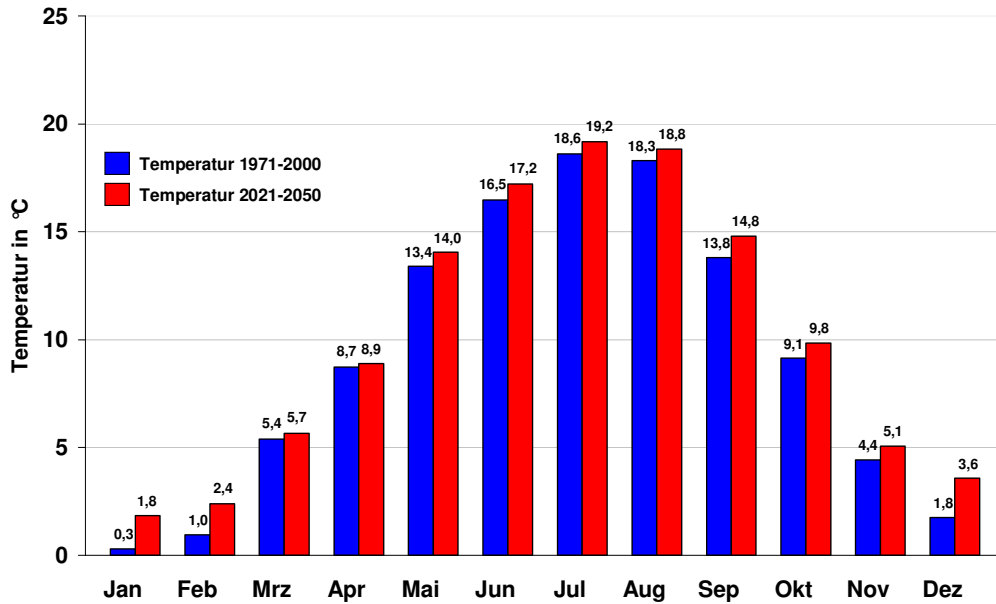
Bitte tragen Sie die von Ihnen erwartete Veränderung der drei Werte in die jeweilige Skala für die vier Kulturen ein (Kennzeichnung durch Ankreuzen sowie Hinschreiben des Wertes).



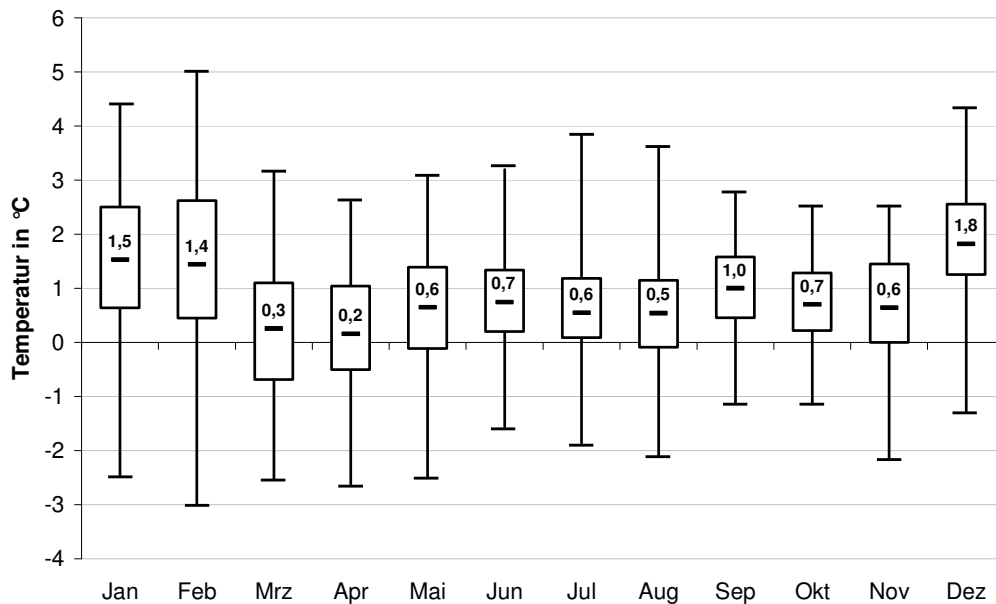
Standörtliche Klimaänderungen - Friedberg



Änderung der Temperatur am Standort Friedberg



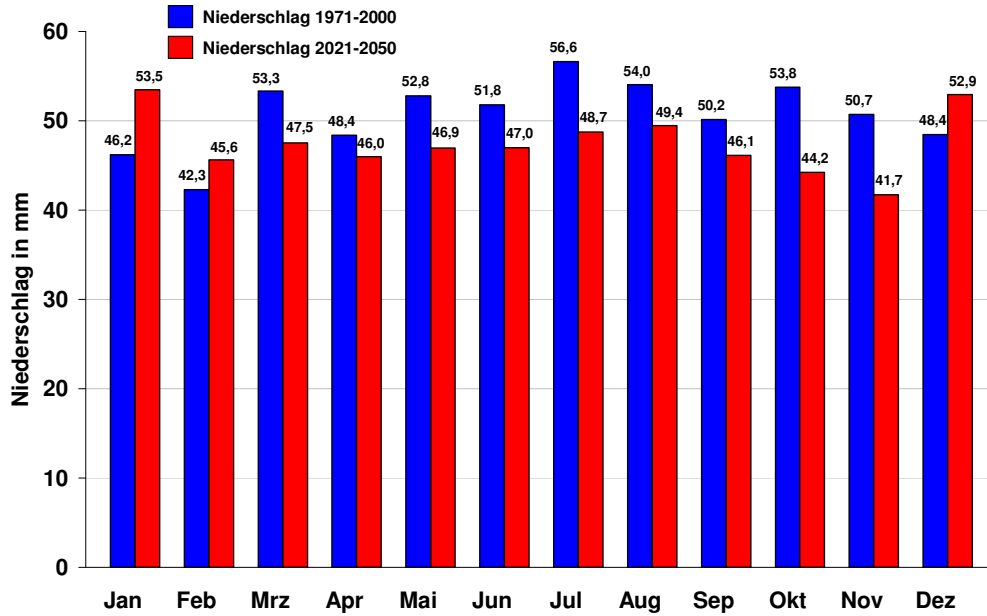
Schwankungsbreite der Temperaturänderung am Standort Friedberg



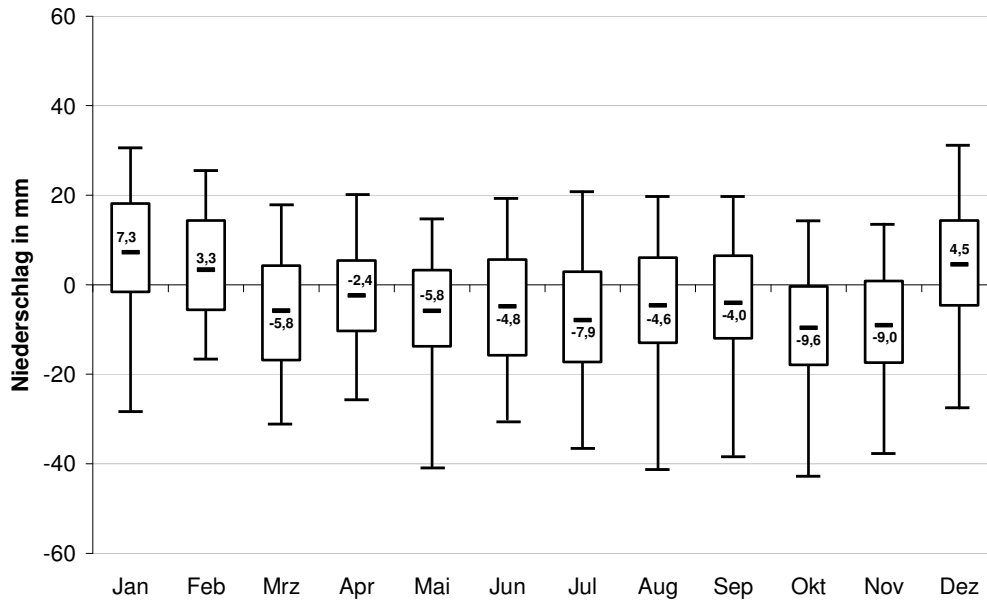
Standörtliche Klimaänderungen - Friedberg



Änderung des Niederschlags am Standort Friedberg



Schwankungsbreite der Niederschlagsänderung am Standort Friedberg

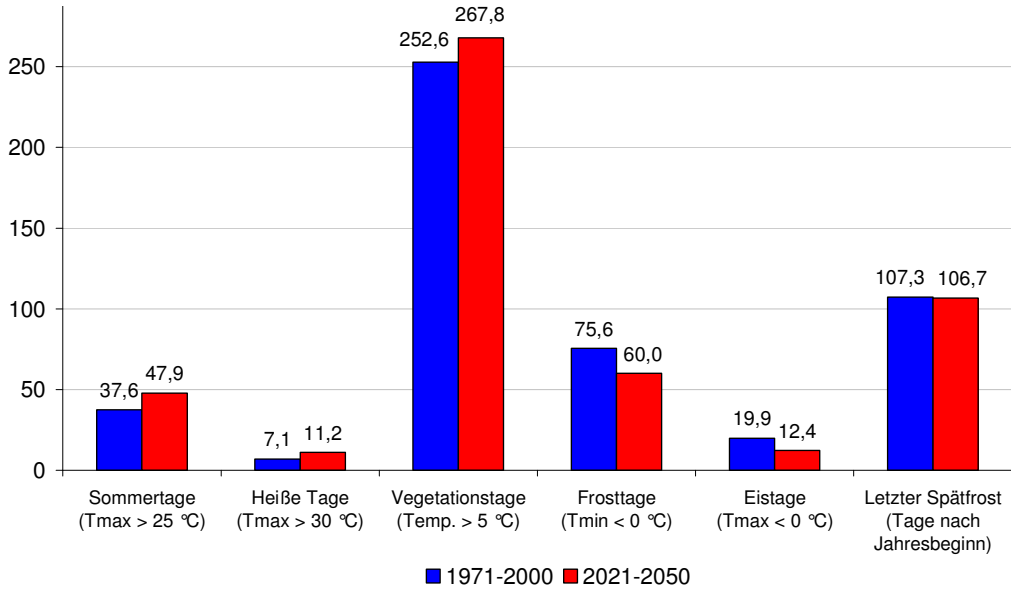


Standörtliche Klimaänderungen - Friedberg



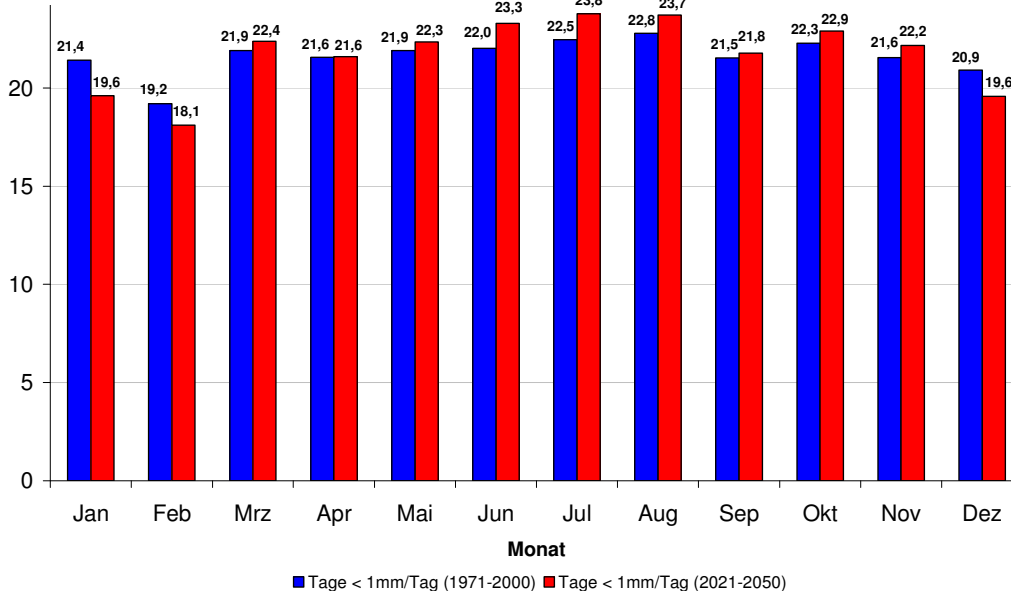
Veränderung klimatologischer Kenntage am Standort Friedberg

Tage pro Jahr



Veränderung der Trockentage am Standort Friedberg

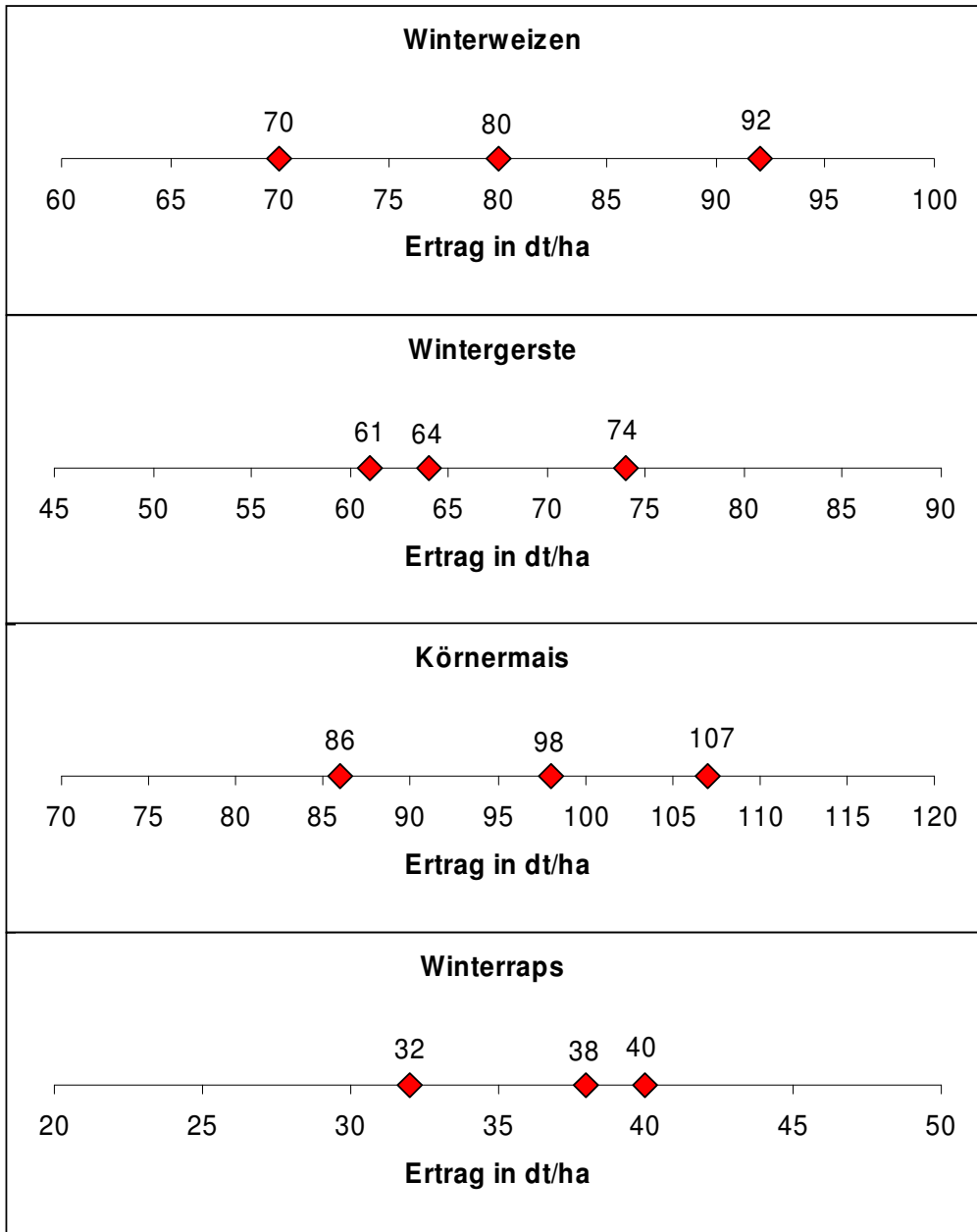
Tage pro Monat



Ertragsschätzung - Friedberg



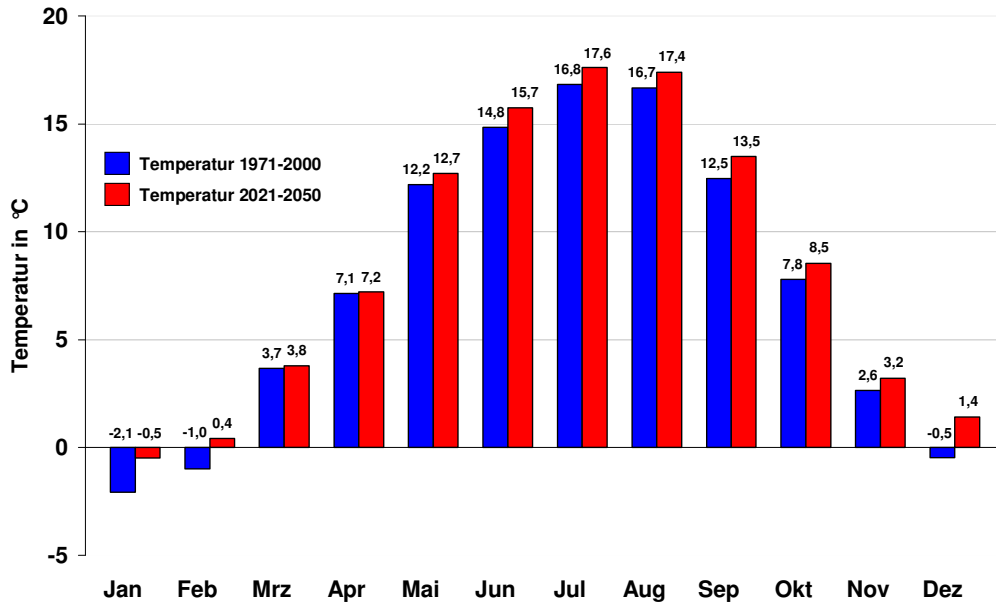
Bitte tragen Sie die von Ihnen erwartete Veränderung der drei Werte in die jeweilige Skala für die vier Kulturen ein (Kennzeichnung durch Ankreuzen sowie Hinschreiben des Wertes).



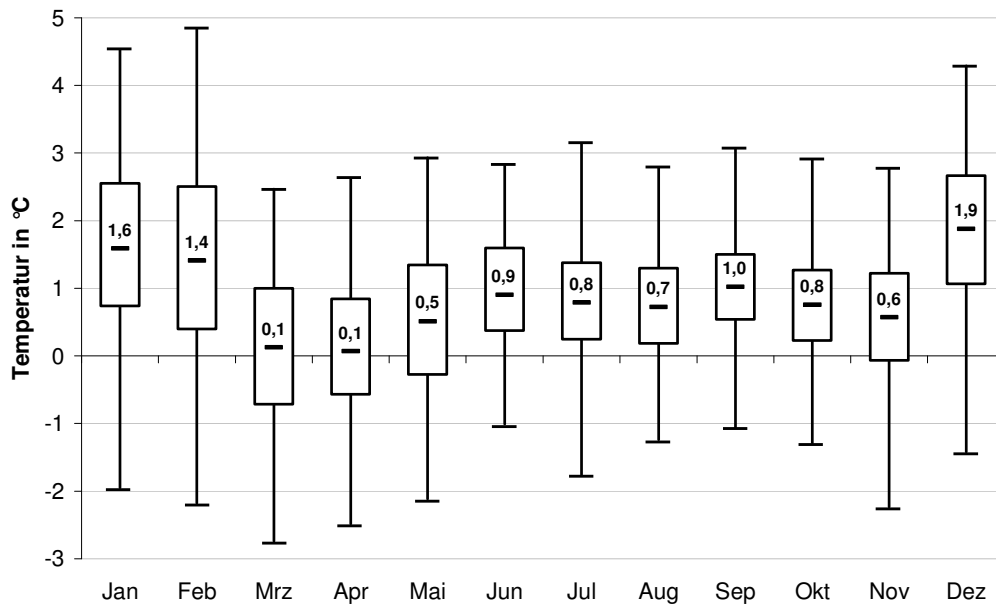
Standörtliche Klimaänderungen - Freising



Änderung der Temperatur am Standort Freising



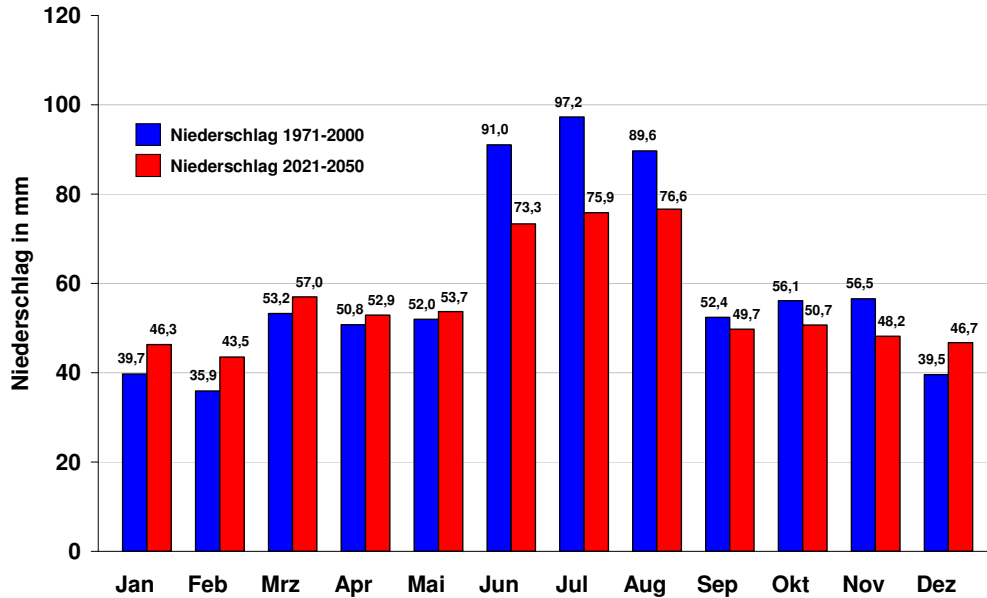
Schwankungsbreite der Temperaturänderung am Standort Freising



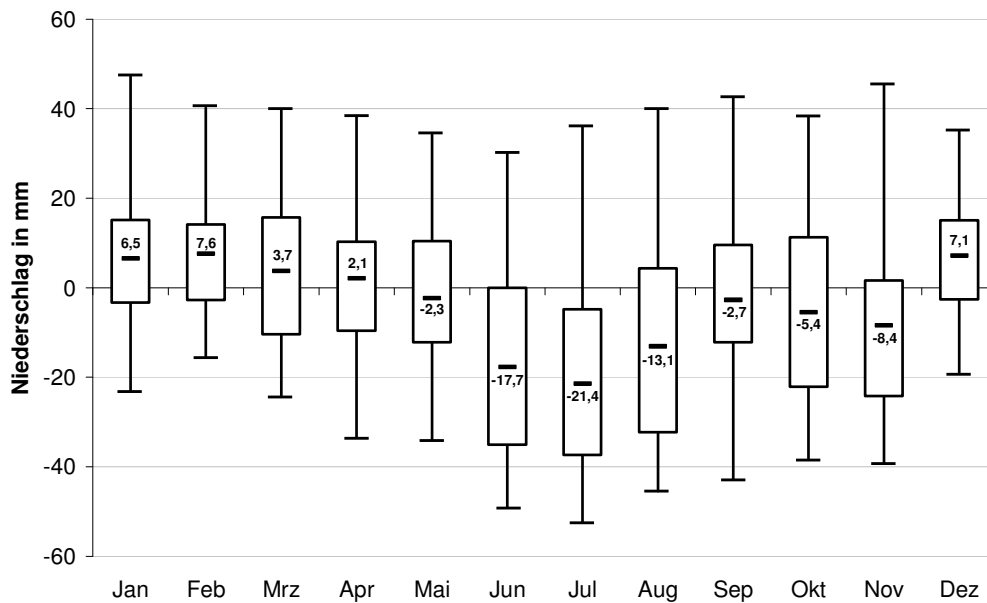
Standörtliche Klimaänderungen - Freising



Änderung des Niederschlags am Standort Freising



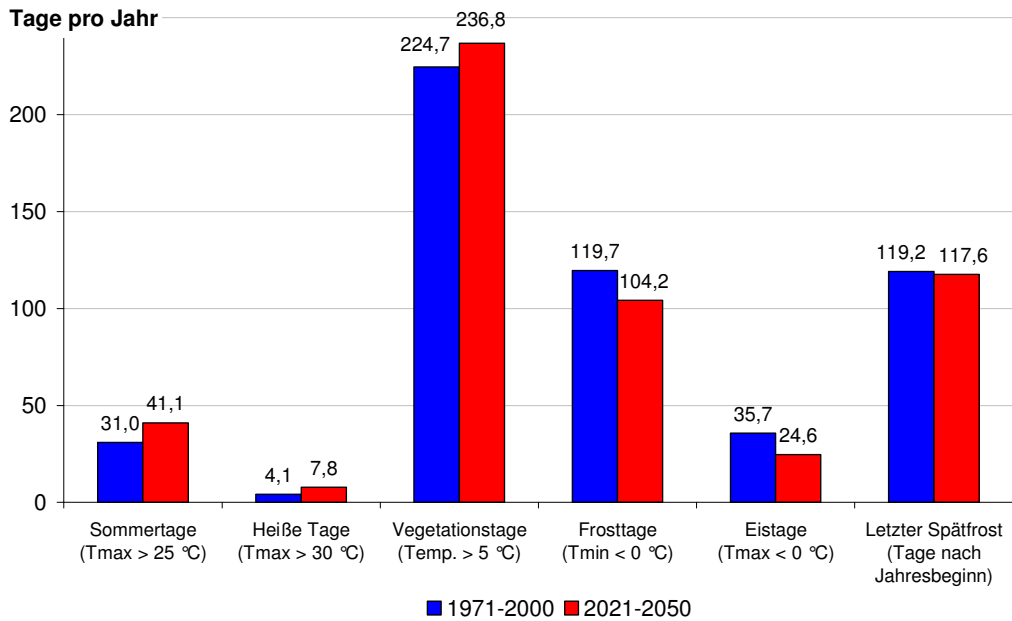
Schwankungsbreite der Niederschlagsänderung am Standort Freising



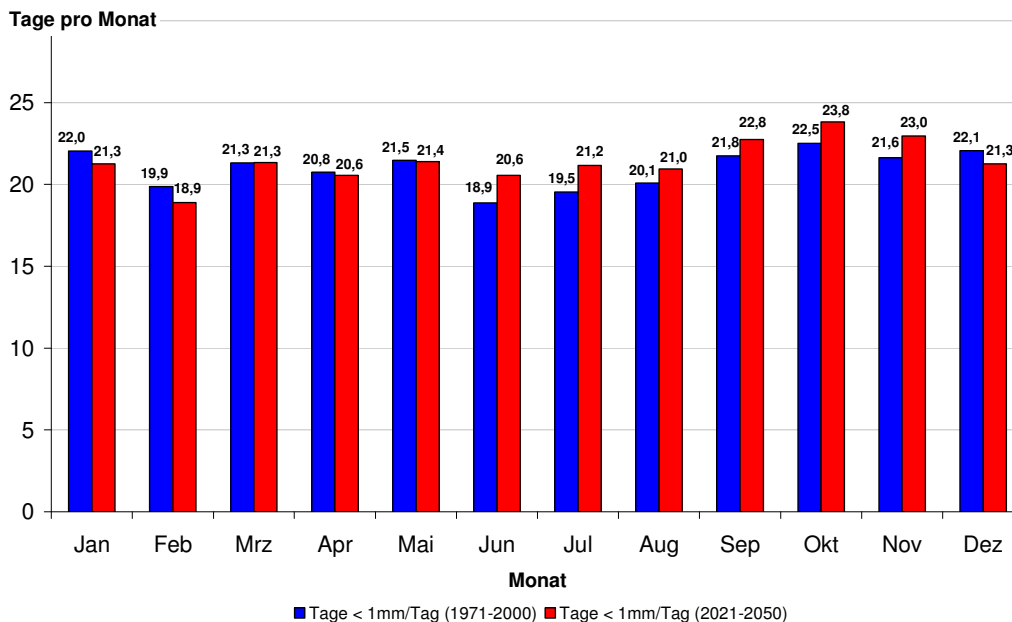
Standörtliche Klimaänderungen - Freising



Veränderung klimatologischer Kenntage am Standort Freising



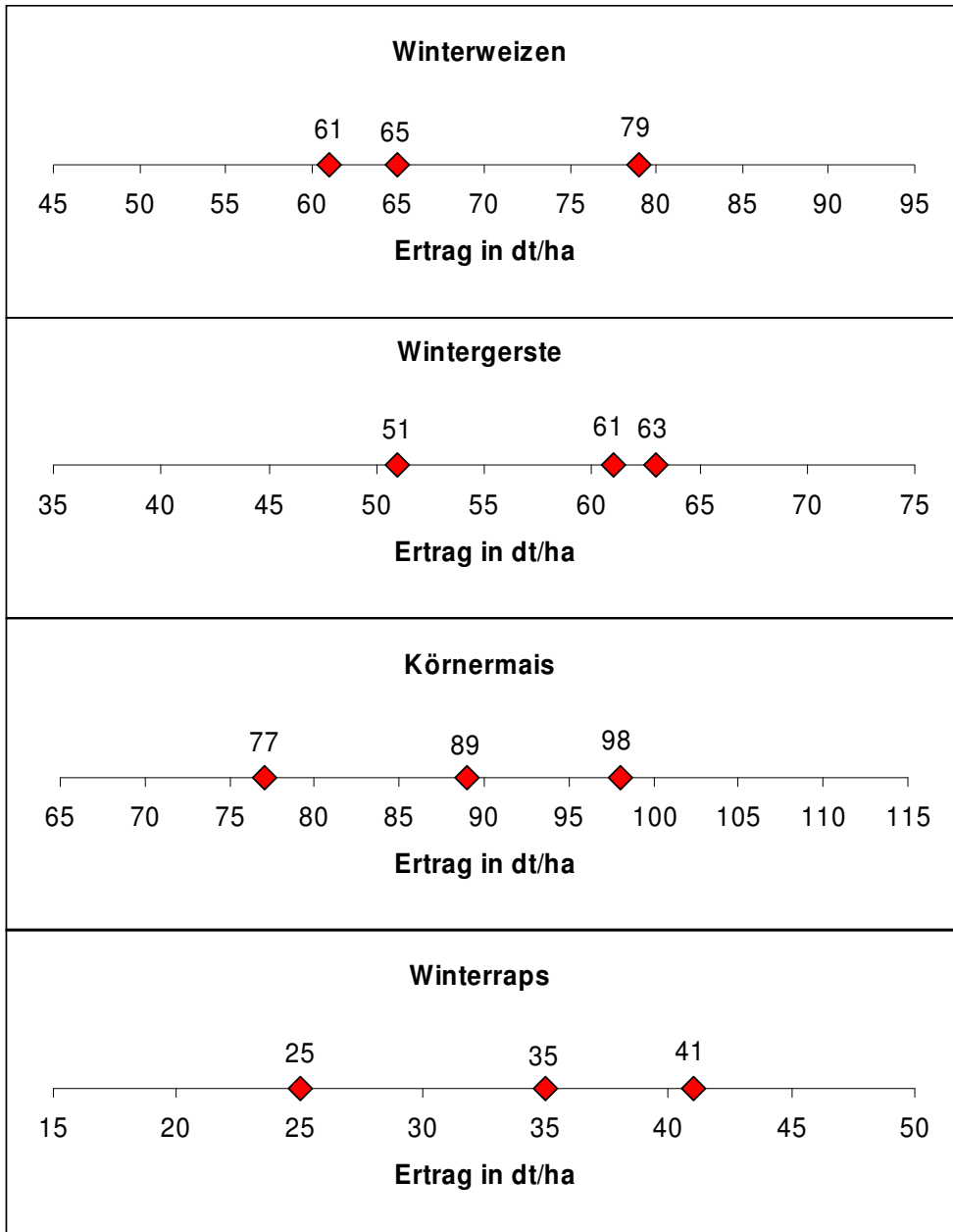
Veränderung der Trockentage am Standort Freising



Ertragsschätzung - Freising



Bitte tragen Sie die von Ihnen erwartete Veränderung der drei Werte in die jeweilige Skala für die vier Kulturen ein (Kennzeichnung durch Ankreuzen sowie Hinschreiben des Wertes).





Quelle Klimadaten:

Enke; Kreienkamp, 2006: WETTREG A1B SCENARIO RUN, UBA PROJECT, World Data Center for Climate. <http://cera-www.dkrz.de/>

Quelle Ertragsdaten:

- Amt für Statistik Berlin Brandenburg, 2009
- Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, 2009
- Hessisches Statistisches Landesamt, 2009
- Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, 2009

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!

10 Literaturverzeichnis

- Ainsworth E.A., J.M. McGrath. Direct Effects of Rising Atmospheric Carbon Dioxide and Ozone on Crop Yields. In: *Climate Change and Food Security: Adapting Agriculture to a Warmer World*. Buchreihe Advances in Global Change Research. Band 37. Herausgegeben von: D. Lobell und M. Burke. 109–130.
- Alcamo J., J.M. Moreno, B. Nováky, M. Bindi, R. Corobov, R.J.N. Devoy, C. Giannakopoulos, E. Martin, J.E. Olsen, A. Shvidenko. 2007. Europe. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change*. Herausgegeben von: Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. Cambridge, UK. Cambridge University Press. 541–580.
- Alexandrov, V., G. Hoogenboom. 2001. Climate variation and crop production in Georgia, USA during the twentieth century. *Climate Research* 17. 33–43.
- Alexandrov, V., J. Eitzinger, V. Cajic, M. Oberforster. 2002. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Global Change Biology* 8. 372–389.
- Alten von, G. 2008. *Das Risikoverhalten von Landwirten – eine Studie am Beispiel der Erntemehrgefahrenversicherung*. Cuvillier Verlag. Göttingen.
- Antle, J.M. 1987. Econometric Estimation of Producers Risk Attitudes. *American Journal of Agricultural Economics* 69. 509–522.
- Antle, J.M., S.M. Capalbo. 2010. Adaptation of Agricultural and Food Systems to Climate Change: An Economic and Policy Perspective. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 32 (3). 386–416.
- Arrow, K.J. 1971. *Essays in the Theory of Risk Bearing*. Verlag North Holland. Amsterdam.
- Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke, R. Weiber. 2006. *Multivariate Analysemethoden*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.

- Bardsley, P., M. Harris. 1987. An Approach to the Econometric Estimation of Attitudes to Risk in Agriculture. *Australian Journal of Agricultural Economics*. 31. 112–126.
- Beniston, M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, A.T.F. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler, K. Woth. 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81. 71–95.
- Berg, E. 1997. Der Einfluss von Unsicherheit und Risikoeinstellung auf die Intensität des Produktionsprogramms im Ackerbau. Working paper. Universität Bonn.
- Berg, E. 2001. Analyse des Systems der Ernte- und Einkommensversicherungen in den USA. Abschlussbericht zum DFG Forschungsvorhaben BE 1341/4-1. Bonn.
- Bielza, M., J. Stroblmaier, J. Gallego. 2007. Agricultural Risk Management in Europe. Paper prepared for presentation at the 101st EAAE Seminar “Management of Climate Risks in Agriculture”. Agrifish Unit JRC. Brüssel.
- Bielza Diaz-Caneja, M., C.G. Conte, F.J. Gallego Pinilla, J. Stroblmair, R. Catenaro, C. Dittmann. 2009. Risk Management and Agricultural Insurance Schemes in Europe. Joint Research Centre of the European Commission. Luxembourg.
- Blanck, N., E. Bahrs. 2011. Die Wirksamkeit und das Budgetbelastungspotenzial einer Risikoausgleichsrücklage in der deutschen Landwirtschaft. Vortrag anlässlich der 51. Jahrestagung der GEWISOLA „Unternehmerische Landwirtschaft zwischen Marktanforderungen und gesellschaftlichen Erwartungen“.
http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/114505/2/Blanck_Bahrs.pdf (Abrufdatum: 25.03.2012)
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz). 2010. Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe – Buchführungsergebnisse der Testbetriebe 2008/09. <http://www.bmelv-statistik.de/de/testbetriebsnetz/buchfuehrungsergebnisse-landwirtschaft/>. (Abrufdatum: 07.07.2010).
- Bradshaw, B., H. Dolan, B. Smit. 2004. Farm-Level Adaptation to Climatic Variability and Change: Crop Diversification in the Canadian Prairies. *Climatic Change* 67. 119–141.
- Brandes, W., H.-J. Budde. 1981. Simulation von Betriebsentwicklungsmodellen mit COMPRI. *Agrarwirtschaft* 30 (4). 105–115.

- Breustedt, G., C. Drepper, Latacz-Lohmann, U. 2010. Wie können Marktfrucht- und Veredelungsbetriebe auf zunehmende Ertrags- und Preisrisiken reagieren? In: Sammelband zum Symposium der Edmund Rehwinkel-Stiftung: Auswirkungen der Finanzkrise und volatiler Märkte auf die Agrarwirtschaft. Band 26. Landwirtschaftliche Rentenbank. Frankfurt am Main. 89–119.
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). 2007. Bodenarten in Oberböden Deutschlands.
http://www.bgr.bund.de/cIn_092/nn_333592/DE/Themen/Boden/Produkte/Karten/DOWN-loads/Karte_Bodenarten_Deutschlands,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Karte_Bodenarten_Deutschlands.pdf (Abrufdatum: 08.07.2009).
- Byun, H.R., D.A. Wilhite. 1999. Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate* 12 (9), 2747–2756.
- Cabrera, V., C. Fraise, D. Letson, G. Podestá, J. Novak. 2006. Impact of Climate Information on Reducing Farm Risk by Optimizing Crop Insurance Strategy. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 49. 1223–1233.
- Cabrera, V., D. Solis, D. Letson. 2007. Optimal Crop-Insurance Strategies under Climate Variability: Contrasting Insurer and Farmer Interests. Paper prepared for presentation at the American Agricultural Economics Association Annual Meeting. Portland.
- Carter, T. R., M. Hulme, M. Lal. 1999. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, version 1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.
- Changnon S.A., D. Winstanley. Long-term variations in seasonal weather conditions important to corn production in Illinois. *Climatic Change* 47. 353–372.
- Charpentier, A. 2011. On the return period of the 2003 heat wave. *Climatic Change* 109. 245–260.
- Chen, C.-C., C.-C. Chang. The impact of weather on crop yield distribution in Taiwan: some new evidence from panel data models and implications for crop insurance. *Agricultural Economics* 33. 503–511.

- Chmielewski, F.-M., J.M. Potts. 1995. The relationship between crop yields from an experiment in southern England and long-term climate variations. *Agricultural and Forest Meteorology* 73. 43–66.
- Chmielewski F.-M., W. Köhn. 1999. Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology* 96. 49–58.
- CRU (Climatic Research Unit). 2012. Information Sheet 1.
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/> (Abrufdatum: 06.04.12).
- Cubasch, U., I. Fast 2007. Perspektiven der Klimamodellierung. In: Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin (Hrsg.) *Der belebte Planet* 2. 28–35.
- DBV (Deutscher Bauernverband). 2008. DBV fordert Risikoausgleichsrücklage für die Landwirtschaft. <http://www.bauernverband.de/?redid=220209> (Abrufdatum: 11.05.09).
- Demmeler, M., A. Heißenhuber, R. Zahlauer. 2004. Zukunftspotenziale der regionalen Landwirtschaft – in der Region Chiemgau-Inn-Salzach. Teil 1: Regionale Strukturanalyse. Endbericht des Forschungsprojektes gefördert durch das BMVEL im Rahmen von „Region aktiv – Land gestaltet Zukunft“. Unveröffentlicht. Weihenstephan.
- Dietze, L.H. Externe Performancemessung von Corporate Bond-fonds. 2007. Berliner Wissenschaftsverlag GmbH. Berlin.
- Duller, C. 2005. Einführung in die Statistik mit Excel und SPSS. Physica-Verlag. Heidelberg.
- DWD (Deutscher Wetterdienst). verschiedene Jahrgänge. Agrarmeteorologischer Monatsbericht für Bayern. Herausgegeben von: Deutscher Wetterdienst, Niederlassung Weihenstephan. Zolling.
- DWD (Deutscher Wetterdienst). 2009. Klimatologische Kenntage. <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=K&DAT=Klimatologische-Kenntage> (Abrufdatum: 28.05.09).
- Eckey, H.-F., R. Kosfeld, C. Dreger. 2004. *Ökonometrie: Grundlagen, Methoden, Beispiele*. Gabler-Verlag. Wiesbaden.

- Enke, F., W. Kreienkamp. 2006. WETTREG A1B Scenario Run, UBA Project. World Data Center for Climate. <http://cera-www.dkrz.de/> (Abrufdatum: 20.03.2009).
- Europäische Kommission. 2005. Arbeitsunterlage der Kommissionsdienststellen über Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft. http://ec.europa.eu/agriculture/publi/communications/risk/workdoc_de.pdf (Abrufdatum: 12.05.2009).
- Europäische Kommission. 2008. Klimawandel: Die Herausforderungen für die Landwirtschaft. Factsheet. http://ec.europa.eu/agriculture/publi/fact/climate_change/2008_de.pdf (Abrufdatum: 30.08.2010).
- Europäische Kommission. 2010. Die GAP bis 2020: Nahrungsmittel, natürliche Ressourcen und ländliche Gebiete – die künftigen Herausforderungen. Mitteilung der Kommission vom 18. November 2010. KOM (2010) 672.
- European Commission. 2001. Risk Management Tools for EU Agriculture with a special focus on insurance. Working Document.
- European Commission. 2008. Agricultural Insurance Schemes. Final report. Joint Research Centre. Ispra.
- Ewert, F. M.D.A. Rounsevell, I. Reginster, M.J. Metzger, R. Leemans. 2005. Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107. 101–116.
- Fangmeier, A., H.-J. Jäger. 2001. Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen. In: *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie Band 2a: Terrestrische Ökosysteme*. Herausgegeben von: R. Guderian. Springer-Verlag. Berlin.
- FAOSTAT. 2008. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567> (Abrufdatum: 10.07.2008).
- Ferreira R. A., G.P. Podestá, C.D. Messina, D. Lestón, J. Dardanelli, E. Guevara, S. Meira. 2001. A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology* 107.177–192.

- Finger, R., S. Schmid. 2008. Modeling Agricultural Production Risk and the Adaptation to Climate Change. *Agricultural Finance Review* 68 (1). 25–41.
- Finger, R., W. Hediger, S. Schmid. 2010. Irrigation as adaptation strategy to climate change — a biophysical and economic appraisal for Swiss maize production. *Climatic Change* 105. 509–528.
- Finke, R. 2005. *Grundlagen des Risikomanagements*. Wiley Verlag. Weinheim.
- Fock, T., C. Fuchs, J. Kasten. 2008a. Spanien ist kein Vorbild. *DLG Mitteilungen* 9/08. 30–33.
- Fock, T., C. Fuchs, J. Kasten, M. Mahlau, T. Seyfferth. 2008b. Risikostrategien für den Marktfruchtbau in Nordost-Deutschland. In: *Sammelband zum Symposium der Edmund Rehwinkel-Stiftung: Risikomanagement in der Landwirtschaft*. Band 23. Landwirtschaftliche Rentenbank. Frankfurt am Main. 54–90.
- Franzaring, J., I. Henning-Müller, R. Funk, W. Hermann, V. Wulfmeyer, A. Fangmeier. 2006. Auswirkungen solarer, klimatischer und atmosphärischer Komponenten auf landwirtschaftliche Erträge. *Berichte des Instituts für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim*. Heft 14/15/16. 67–78. Herausgegeben von: R. Böcker und A. Fangmeier. Stuttgart-Hohenheim.
- Freckleton R.P., A.R. Watkinson, D.J. Webb, T.H. Thomas. 1999. Yield of sugar beet in relation to weather and nutrients. *Agricultural and Forest Meteorology* 93. 39–51.
- Fuchs C., T. Fock, J. Kasten. 2009. Notwendigkeiten für eine Risikoabsicherung im Ackerbau dargestellt am Beispiel Nordostdeutschlands. *Berichte über Landwirtschaft* 87 (2). 266–294.
- Gandorfer, M., C.-K. Kersebaum. 2008a. Auswirkungen des Klimawandels auf das Produktionsrisiko in der Weizenproduktion – dargestellt am Beispiel dreier bayerischer Standorte. *Yearbook of Socioeconomics in Agriculture* 2008. 161–182.
- Gandorfer, M., C.K. Kersebaum. 2008b. Auswirkungen des Klimawandels auf das ökonomische Risiko im Weizenanbau dargestellt am Beispiel von drei bayerischen Standorten. Vortrag anlässlich der Jahrestagung der Schweizerischen Gesellschaft für Agrarökonomie und Agrarsoziologie am 03.04.2008 in Rapperswil. http://www.markus-gandorfer.de/fileadmin/markus-gandorfer/images/Vortrag_Produktionsrisiko.pdf (Aburfdatum: 26.01.2009).

- Gandorfer, M., K.C. Kersebaum. 2009. Einfluss des Klimawandels auf das Produktionsrisiko in der Weizenproduktion unter Berücksichtigung des CO₂-Effekts sowie von Beregnung. In: Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie, Band 18 (3). 47–56.
- Gandorfer, M., D.J. Pannell, A. Meyer-Aurich. 2011. Analyzing the Effects of Risk and Uncertainty on Optimal Tillage and Nitrogen Fertilizer Intensity for field crops in Germany. *Agricultural Systems* 104 (8). 615–622.
- GDV (Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e. V.). 2008. Konzept einer umfassenden und nachhaltigen Mehrgefahrenversicherung für landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland. Herausgegeben von: GDV. Berlin.
- Gröbmaier, J., M. Gandorfer, A. Heißenhuber. 2009. Handlungsmöglichkeiten zur Beeinflussung des durch den Klimawandel induzierten Risikos in der Landwirtschaft. In: Eitzinger, J., K. C. Kersebaum, H. Formayer. *Landwirtschaft im Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft Mitteleuropa*. Verlag Agrimedia. Bergen/Dumme.
- Hamal, K.B., J.R. Anderson. 1982. A note on decreasing absolute risk aversion among farmers in Nepal. *Australian Journal of Agricultural Economics* 26. 220–225.
- Hanf, C.H. 1985. Waiting costs – a relevant cost element in farm machinery investment decisions. *Agrarwirtschaft* 34. 137–146.
- Hanf, C.-H. 1991. *Entscheidungslehre*. R. Oldenbourg Verlag GmbH. München, Wien.
- Hansen J.W., J.W. Jones. 2000. Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agricultural Systems* 65. 43–72.
- Hardaker, J.B., R.B.M. Huirne, J.R. Anderson, G. Lien. 2004a. *Coping with risk in agriculture*. Oxfordshire: CABI Publishing.
- Hardaker, J.B., J.W. Richardson, G. Lien und K.D. Schumann. 2004b. Stochastic efficiency analysis with risk aversion bounds: a simplified approach. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 48. 253–270.

- Heißenhuber, A., M. Gandorfer. 2008. Landbewirtschaftung und Klimawandel: Die trivalente Rolle der Landwirtschaft als Verursacher, Betroffener und Beschützer. Mitteilungen des DVW-Bayern e.V., Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. Heft 3/08. 381–390.
- Hildén, M., H. Lehtonen, I. Bärlund, K. Hakala, T. Kaukoranta, S. Tattari. 2005. The practice and process of adaptation in Finnish agriculture. FINADAPT Working Paper 5, Finnish Environment Institute Mimeographs 335. Helsinki.
- Hirschauer, N., O. Mußhoff. 2008. Risikomanagementinstrumente im Vergleich: Sollte man landwirtschaftliche Ernteversicherungen subventionieren? – Gute Alte Argumente in einem neuen Streit. In: Risiken in der Agrar- und Ernährungswirtschaft und ihre Bewältigung. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus. Band 44. Herausgegeben von: Berg, E., M. Hartmann, T. Heckeley, K. Holm-Müller, G. Schiefer. 113–126.
- Holden, N.M., A.J. Brereton. 2006. Adaptation of water and nitrogen management of spring barley and potato as a response to possible climate change in Ireland. *Agricultural Water Management* 82. 297–317.
- Houghton, R.A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus* 55B. 378–390.
- Hulme, M., T. Carter. 1999. The changing climate of Europe. In: Assessment of the Potential Effect of Climate Change in Europe. Herausgegeben von: Parry, M.L. University of East Anglia. Norwich.
- Idso, S.B., B.A. Kimball, G. Pettit, L. Garner, R. Backhaus. 2000. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on the growth and development of *Hymenocallis littoralis* (Amaryllidaceae) and the concentrations of several antineoplastic and antiviral constituents of its bulbs. *American Journal of Botany* 87. 769–773.
- Iglesias A., C. Rosenzweig, D. Pereira. 2000. Agricultural impacts of climate in Spain: developing tools for a spatial analysis. *Global Environmental Change* 10. 69–80.
- Iglesias, A., A. Quiroga. 2007. Measuring the risk of climate variability to cereal production at five sites in Spain. *Climate Research* 34. 47–57.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Geneva.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2012. Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Herausgegeben von: Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK und New York, NY, USA. 1–19.
- Jones, P.D., D.H. Lister, K.W. Jaggard, J.D. Pidgeon. 2003. Future climate impact on the productivity of sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) in Europe. *Climatic Change* 58. 93–108.
- KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft). 2007. Resümee des KLIWA-Fachgesprächs „Regionale Klimaszenarien“ am 23.02.2007 in Würzburg <http://www.kliwa.de/download/fg2007/Fazit.pdf> (Abrufdatum: 28.07.2011).
- Köhler, W., G. Schachtel, P. Voleske. 2007. *Biostatistik*. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg.
- Kreitmayr, J., K. Mayr. 2007. Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt - aus der Sicht der Bodenbearbeitung. In: Tagungsband der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft zum 6. Kulturlandschaftstag: Klimaänderung und Landwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern. Herausgegeben von: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising: 47–62.
- Kröber, M., K. Hank, J. Heinrich, P. Wagner. 2009. Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Energieholzanbaus in Kurzumtriebsplantagen – Risikoanalyse mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation. In: *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.* 44. 127 – 139.
- Kuhlmann, F. 2003. *Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft*. DLG Verlag. Frankfurt am Main.
- Landtag Baden-Württemberg. 2008. Antrag der Abg. Dr. Reinhard Löffler u. a., CDU und Stellungnahme des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum. Risikomanagement in der Landwirtschaft. Drucksache 14/2691.
- Langner, R. 2007. Klimawandel und Anbauintensität erfordern neue Deckungskonzepte. Herausgegeben von: Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft (RKL). Rendsburg

- Leigh, R., I. Kuhnel. 2001. Hailstorm Loss Modelling and Risk Assessment in the Sydney Region, Australia. *Natural Hazards* 24. 171–185.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft). 2008. Buchführungsergebnisse des Wirtschaftsjahres 2006/2007. München.
- LfStAD (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung). 2008. Datenbank Genesis. <http://www.statistik.bayern.de/daten/genesis/> (Abrufdatum: 12.09.2008).
- Little, I.M.D., J.A. Mirrlees. 1974. *Project Appraisal and Planning for Developing Countries*. Heinemann. London.
- Lobell D.B., J.I. Ortiz-Monasterio, G.P. Asner, R. Naylor, W. Falcon, P. Matson. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research* 94. 250–256.
- Lobell D.B., J.I. Ortiz-Monasterio. 2006. Regional importance of crop yield constraints: linking simulation models and geostatistics to interpret spatial patterns. *Ecological Modeling* 196. 173–182.
- Lowenberg-DeBoer, J. 1999. Risk Management Potentials of Precision Farming Technologies. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 31. 275–285.
- Luo, Q., R. N. Jones, M. Williams, B. Bryan, W. Bellotti. 2005. Probabilistic distributions of regional climate change and their application in risk analysis of wheat production. *Climate Research* 29. 41–52.
- Mäder, C. 2009. *Klimaänderung – Wichtige Erkenntnisse aus dem 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC)*. Herausgegeben von: Umweltbundesamt. Dessau.
- Maracchi, G., O. Sirotenko, M. Bindi. 2005. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Climatic Change* 70. 117–135.
- Martin, S., B. Barnett, K. Coble. 2001. Development and Pricing Precipitation Insurance. *Journal of Agricultural and Resource Economics* 26. 261–274.

- Marx, A., M. Mast, R. Knoche, H. Kunstmann. 2008. Global climate change and regional impact on the water balance - Case study in the German alpine area. *Wasserwirtschaft* 98 (9). 12-16.
- McMaster, G.S., W.W. Wilhelm. 1999. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87. 291–300.
- Meehl, G.A., C. Tebaldi. 2004. More intense, more frequent and longer lasting heat waves in the 21st Century. *Science* 305. 994–997.
- Meuwissen, M.P.M., R.B.M. Huirne, J.B. Hardaker. 1999. Income insurance in European agriculture. European Commission, Directorate-General for Economic and Financial Affairs. Brüssel.
- Mjelde, J., T. Thompson, C. Nixon. 1996. Government Institutional Effects on the Value of Seasonal Climate Forecasts. *American Journal of Agricultural Economics* 78. 175–188.
- Moberg, A., D.M. Sonechkin, K. Holmgren, N. M. Datsenko, W. Karlén. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature* 433. 613 – 617.
- Munich Re. 2007. Zwischen Hoch und Tief – Wetterrisiken in Mitteleuropa. Edition Wissen. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft. München.
- Mußhoff, O., N. Hirschauer. 2008. Die Suche nach mehr Sicherheit. *DLG Mitteilungen* 2/08. 30–33.
- Mußhoff, O., M. Odening, W. Xu. 2005. Zur Reduzierung niederschlagsbedingter Produktionsrisiken mit Wetterderivaten. Working Paper 73/2005. Humboldt-Universität Berlin.
- Mußhoff, O., N. Hirschauer. 2010. *Modernes Agrarmanagement*. Verlag Franz Vahlen. München.
- MWVLW (Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz). 2010. Merkblatt für die Gewährung einer Unterstützung zur Hagelversicherung von Rebflächen nach der Verordnung über die einheitliche GMO. <http://www.mwvlw.rlp.de/Weinbau/Initiativen-Programme/Hagelversicherung-fuer-Rebflaechen/> (Abrufdatum: 30.06.2010).

- Myers, R.J. 1989. Econometric Testing for Risk Averse Behaviour in Agriculture. *Applied Economics* 21. 541–552.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T.J. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H.M. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S.J. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, Z. Dadi. 2000. Special Report on Emissions Scenarios : A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. New York.
- Newbery, D.M.G., S.E. Stiglitz. 1981. *The Theory of Commodity Price Stabilization – A Study in the Economics of Risk*. Clarendon. Oxford.
- Olesen, J.E., M. Bindi. 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16. 239–262.
- Olesen, J.E., T.R. Carter, C.H. Díaz-Ambrona, S. Fronzek, T. Heidmann, T. Hickler, T. Holt, M.I. Mínguez, P. Morales, J.P. Palutikof, M. Quemada, M. Ruiz-Ramos, G.H. Rubaek, F. Sau, B. Smith, M.T. Sykes. 2007. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change* 81. 123–143.
- Overbeck von, J., B. Baldinger Pirotta 2000. Die Gefahrengemeinschaft.
<http://www.unipublic.uzh.ch/archiv/magazin/wirtschaft/2000/genversicherung/index.html> (Abrufdatum: 23.08.2011).
- Pannell, D.J. 2010. Policy for climate change adaptation in agriculture.
<http://cyllene.uwa.edu.au/~dpannell/dp1003.htm> (Abrufdatum: 16.05.2011).
- Pannell, D.J., G. Hailu, A. Weersink, A. Burt. 2008. More reasons why farmers have so little interest in futures markets, *Agricultural Economics* 39(1). 41–50.
- Parry, M.A., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, G. Fisher. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14. 53–67.
- Pavlik, D., D. Söhl, T. Pluntke, A. Mykhnovych, C. Bernhofer. 2012. Dynamic downscaling of global climate projections for Eastern Europe with a horizontal resolution of 7 km. *Environmental Earth Sciences* 65(5). 1475–1482.

- Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davisk, G. Delaygue, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzmank, M. Stievenard. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399. 429–436.
- Pimentel, D., P. Hepperly, J. Hanson, D. Douds, R. Seidel. 2005. Environmental, Energetic and Economic Comparisons of Organic and Conventional Farming Systems. *BioScience* 55 (7). 573–582.
- Precht, M., R. Kraft. 1993. *Bio-Statistik 2*. R. Oldenbourg Verlag GmbH. München, Wien.
- Precht, M., R. Kraft, M. Bachmaier. 2005. *Angewandte Statistik 1*. R. Oldenbourg Verlag GmbH. München, Wien.
- Prettenthaler, F., S. Strametz, C. Töglhofer, A. Türk. 2006. Anpassungsstrategien gegen Trockenheit: Bewertung ökonomisch-finanzieller versus technischer Ansätze des Risikomanagements. Wissenschaftlicher Bericht Nr. 8/2006. Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel der Karl-Franzens-Universität. Graz.
- Quiroga S, A. Iglesias. 2009. A comparison of the climate risks of cereal, citrus, grapevine and olive production in Spain. *Agricultural Systems* 101. 91–100.
- Reilly, J.M., D. Schimmelpfennig. 1999. Agricultural Impact Assessment, Vulnerability, and the Scope for Adaptation. *Climatic Change* 43. 745-788.
- Richardson, J.W., K.D. Schumann, P.A. Feldmann. 2006. *Simetar: Simulation & Econometrics to Analyze Risk*. Simetar Inc. Texas A&M University, College Station. Texas, USA.
- Richter, G.M., M.A. Semenov. 2005. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: Assessing drought risks. *Agricultural Systems* 84. 77–97.
- Rodríguez-Puebla, C., S.M. Ayuso, M.D. Frías, L.A. García-Casado. 2007. Effects of climate variation on winter cereal production in Spain. *Climate Research* 34. 223–232.

- Roeckner, E., G. Brasseur, M. Giorgetta, D. Jacob, J. Jungclaus, C. Reick, J. Sillmann. 2006. Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. Herausgegeben von: Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M). 1–28.
- Rosenzweig, C., F.N. Tubiello, R. Goldberg, E. Mills, J. Bloomfield. 2002. Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Global Environmental Change* 12. 197–202.
- Saarikko R.A., T.R. Carter. 1996. Estimating the development and regional thermal suitability of spring wheat in Finland under climatic warming. *Climate Research* 7. 243–252.
- Sachs, L. 2003. *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest.
- Sachs, L. 2004. *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest.
- Savin, N.E., K. White. 1977. The Durbin- Watson Test for serial Correlation with extreme sample sizes or many regressors. *Econometrica* 45 (8). 1989–1996.
- Schaller, M., H.-J. Weigel. 2007. Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 316*. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft. Braunschweig.
- Schönwiese, C.D. 2006. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Gebrüder Borntraeger. Berlin-Stuttgart.
- Schulte, M. 1998. *Risikopolitik in Kreditinstituten*. Bankakademieverlag. Frankfurt am Main.
- Shein, K.A. (Hrsg.). 2006. State of the Climate in 2005. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87. 1–102.
- Skees, J.R. 1997. Agricultural insurance in a transition economy. *Proceedings of Seminar on agricultural finance and credit infrastructure in transition economies*. OECD. Paris.
- Skees, J.R., B.J. Barnett. 1999. Conceptual and practical considerations for sharing catastrophic or systemic risks. *Review in Agricultural Economics* 21. 424–441.

- Smit, B., M.W. Skinner. 2002. Adaptation Options in Agriculture to Climate Change: A Typology. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 7. 85–114.
- Soja, G., A.M. Soja. 2003. Dokumentation von Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf die landwirtschaftliche Produktion. ARC Seibersdorf Research.
- Spekat A., W. Enke, F. Kreienkamp. 2007. Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Kimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Umweltbundesamt. Dessau.
- Stafford, N. 2007. The other greenhouse effect. Nature. 448 (2). 526–528.
- Steffen, G., D. Born. 1987. Betriebs- und Unternehmensführung in der Landwirtschaft. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart.
- Sterzel, T. 2007. Correlation analysis of climate variables and wheat yield data on various aggregation levels in Germany and the EU-15 using GIS and statistical methods, with a focus on heat wave years. Herausgegeben von: F.-W. Gerstengarbe. Berlin.
- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) (Hrsg.). 2010. Kurzfassungen der Vorträge der 12. Jahrestagung Thüringer Landwirtschaft. Jena.
- Torriani, D., P. Calanca, S. Schmid, M. Beniston, J. Fuhrer, 2007. Potential effects of changes in mean climate and climate variability on the yield of winter and spring crops in Switzerland. Climate Research 34. 59–69.
- Toutenburg, H., Heumann, C. 2006. Eine Einführung in Methoden und Anwendungen mit SPSS. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.
- Trnka M., J. E. Olesen; K.-C. Kersebaum; A. O. Skjelvag, J. Eitzinger, N. Seguin; P. Peltonen-Sainio; R. Rötter, A. Iglesias; S. Orlandini; M. Dubrowsky; P. Hlavinka; K. Balek; H. Eck-ersten; E. Cloppet, P. Calanca, A. Gobin; V. Vucetic; P. Nejedlik; S. Kumar; B. Lalic; A. Mestre; F. Rossi. J. Kozyra. V. Alexandrov, D. Semerádova, Z. Zalud. 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. Global Change Biology 17 (7). 2298–2318.

- Turvey, C., A. Weersink, A. Chiang. 2006. Pricing Weather Insurance with a Random Strike Price: The Ontario Ice-Wine Harvest. *American Journal of Agricultural Economics* 88. 696–709.
- UBA (Umweltbundesamt). 2005. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland. Herausgegeben von: Umweltbundesamt. Dessau. 83–112.
- Weber, R., T. Kraus, O. Mußhoff, M. Odening, I. Rust. 2008. Risikomanagement mit indexbasierten Wetterversicherungen – Bedarfsgerechte Ausgestaltung und Zahlungsbereitschaft. In: Sammelband zum Symposium der Edmund Rehwinkel-Stiftung: Risikomanagement in der Landwirtschaft. Band 23. Landwirtschaftliche Rentenbank. Frankfurt am Main. 9–52.
- Weigand, S., H. Tischner. 2007. Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt – aus der Sicht des Pflanzenschutzes. In: Tagungsband der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft zum 6. Kulturlandschaftstag: Klimaänderung und Landwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern. Herausgegeben von: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising. 33–46.
- Weigel, H.-J. 2005. Gesunde Pflanzen unter zukünftigem Klima – Wie beeinflusst der Klimawandel die Pflanzenproduktion? *Gesunde Pflanzen* 57. 6–17.
- Wendland, F.H., M. Albert, R. Bach, R. Schmidt (Hrsg.). 1993. Atlas zum Nitratstrom in der Bundesrepublik Deutschland. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, Hong Kong, Barcelona, Budapest.
- Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. 2010. Gutachten zur EU-Agrarpolitik nach 2013. <http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/GutachtenGAP.html> (Abrufdatum: 07.07.2010).
- Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. 2011. Stellungnahme zum Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft. <http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/StellungnahmeRisiko-Krisenmanagement.html> (Abrufdatum: 31.05.2011).
- WMO (World Meteorological Organisation). climatological standard normals. 2006. <http://meteoterm.wmo.int/meteoterm/> (Abrufdatum: 12.08.2008).

Wolf J., L.G. Evans, M.A. Semenov, H. Eckersten, A. Iglesias. 1996. Comparison of wheat simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analysis. *Climate Research* 7. 271–281.

ZMP (Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle GmbH) (Hrsg.). verschiedene Jahrgänge. ZMP Marktbilanz: Getreide, Ölsaaten, Futtermittel. Bonn.

Zweifel P., R. Eisen. 2000. *Versicherungsökonomie*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio.