

Hochschule Anhalt (FH)

Fachbereich Landwirtschaft, Ökotropologie und Landschaftsentwicklung



Bachelorarbeit

„Analyse des Zusammenhanges zwischen Klimaparametern und den
Maiserträgen am Beispiel des Hochschulstandortes in Strenzfeld.“

Name, Vorname: Wulferding, Arne

Matrikel-Nr.: 4058685

Geboren am: 13.04.1991

Studiengang: Landwirtschaft

1. Gutachter: Prof. Dr. Bernd Dohmen

2. Gutachter: Prof. Dr. Annette Deubel

Bernburg (Saale), den 20.06.2017

Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VI
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	VII
1. Einleitung	1
2. Zielstellung	2
3. Literaturrecherche	3
3.1. Bedeutung der klimatologischen Elemente für den Pflanzenbau.....	3
3.2. Klimaansprüche des Maises	9
3.3. Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Landwirtschaft	14
3.4. Klimaveränderungen Strenzfeld	20
4. Material und Methoden	21
4.1. Standortbeschreibung und Versuchsaufbau.....	22
4.2. Versuchsdaten.....	23
4.3. Berechnung der Klimareferenzperiode 2004-2016.....	25
4.4. Vergleich der Versuchsjahre mit den Klimareferenzperioden und Klimamodellen ..	26
4.5. Extremwertanalyse	27
4.6. Multiple Regressionsanalyse.....	28
4.7. Simulation der Ertragsentwicklung durch die Klimamodelle	31
5. Ergebnisse	32
5.1. Ergebnisse der Klimareferenzperiode 2004-2016	32
5.2. Ergebnisse des Vergleiches der Versuchsjahre mit den Klimareferenzperioden und Klimamodellen	32
5.3. Ergebnisse der Extremwertanalyse	37
5.4. Ergebnisse der Multiplen Regressionsanalyse	41
5.5. Ergebnisse der Ertragssimulation aus den Klimamodellen	45

6. Diskussion	47
6.1. Vergleich der Klimareferenzperioden und der Klimamodelle	47
6.2. Extremwertanalyse	48
6.3. Multiple Regressionsanalyse.....	49
6.4. Ertragssimulation aus den Klimamodellen.....	51
6.5. Gesamtbetrachtung der Analyse.....	52
7. Schlussfolgerung.....	54
8. Zusammenfassung	56
9. Literaturverzeichnis	57
10. Selbstständigkeitserklärung	60

Bibliographische Beschreibung

Name, Vorname: Wulferding, Arne

Thema: „Analyse des Zusammenhanges zwischen Klimaparametern und den Maiserträgen am Beispiel des Hochschulstandortes in Strenzfeld“

2017 / 60 Seiten / 15 Abbildungen / 8 Tabellen / 5 Formeln

Bernburg: Hochschule Anhalt
Fachbereich Landwirtschaft, Ökotropologie und
Landschaftsentwicklung

Autorreferat:

In der vorliegenden Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen den klimatischen Bedingungen und den Körnermaiserträgen am Standort Bernburg-Strenzfeld untersucht. Zur Analyse lagen Klimadaten der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes am Standort Bernburg-Strenzfeld, Daten aus drei regionalisierten Klimamodellen des Deutschen Wetterdienstes, sowie Ertragsdaten des Bodenbearbeitungsversuches „Westerfeld“ der Hochschule Anhalt aus den Jahren 2004 bis 2016 vor. Zunächst wurden die Misserntejahre aus den Ertragsdaten identifiziert und durch die Analyse der Klimaparameter in diesen Jahren eine klimatische Begründung für die Mindererträge gesucht. Desweiteren wurde durch eine Multiple Regressionsanalyse ein statistischer Zusammenhang zwischen den Körnermaiserträgen und ausgewählten Klimaparameter berechnet. Abschließend wurden aus den Daten von drei regionalisierten Klimamodellen des Deutschen Wetterdienstes die durchschnittlichen Erträge für die Jahre 2031 bis 2060 simuliert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einfluss der Temperatur auf die Photosyntheseleistung	11
Abbildung 2:	Wasserbedarf des Maises in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium	12
Abbildung 3:	Lage des Versuchsstandortes Bernburg-Strenzfeld in Deutschland	22
Abbildung 4:	Aufbau des Großparzellenversuches „Westerfeld“	23
Abbildung 5:	Differenzen der Monatsmitteltemperaturen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre	33
Abbildung 6:	Differenzen der Monatsniederschlagssummen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre	34
Abbildung 7:	Differenzen der Anzahl an Sommertagen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre	35
Abbildung 8:	Differenzen der Anzahl an heißen Tagen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre	36
Abbildung 9:	Ertragsabweichungen der Körnermaiserträge 2004-2016 vom Mittelwert der Versuchsjahre	37
Abbildung 10:	Abweichungen der Monatsmitteltemperaturen in den Misserntejahren 2005 und 2006 von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre	38
Abbildung 11:	Abweichungen der Monatsniederschlagssummen in den Misserntejahren 2005 und 2006 von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre	39
Abbildung 12:	Abweichung der Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen in den Misserntejahren 2005 und 2006 von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre	40
Abbildung 13:	Vergleich des modellierten und realen Körnermaisertrages mit linearen Klimavariablen	42
Abbildung 14:	Vergleich des modellierten und realen Körnermaisertrages mit transformierten Klimavariablen	44
Abbildung 15:	Modellierte Erträge des Regressionsmodells	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Frostresistenzen von Nutzpflanzen in verschiedenen Entwicklungsstadien ..	4
Tabelle 2:	Kennwerte der Feldkapazität, des Welkepunktes und der nutzbaren Feldkapazität nach Bodenart	5
Tabelle 3:	Klimaparameter der Referenzperioden 1961-1990 und 1981-2010 am Standort Bernburg-Strenzfeld	20
Tabelle 4:	Mögliche Variablen des Regressionsmodells	29
Tabelle 5:	Monatsdurchschnittswerte verschiedener Klimaparameter in den Versuchsjahren 2004 bis 2016	32
Tabelle 6:	Durchschnittserträge des Körnermaises der Jahre 2004 - 2016 am Versuchsfeld „Westerfeld“	37
Tabelle 7:	Auswahl der linearen Klimavariablen der Multiple Regressionsanalyse	41
Tabelle 8:	Auswahl der transformierten Klimavariablen der Multiple Regressionsanalyse	43
Tabelle 9:	Pradiktorvariablen des Durchschnitts der Versuchsjahre 2004-2016 und der Klimamodelle der Jahre 2031-2060	45

Formelverzeichnis

Formel 1:	Berechnung der monatlichen Temperatursumme (T_s).....	25
Formel 2:	Berechnung der monatlichen Niederschlagssumme (N_s).....	25
Formel 3:	Berechnung der monatlichen Anzahl an Sommertagen (AnzST)	26
Formel 4:	Berechnung der monatlichen Anzahl heißer Tage (AnzHT)	26
Formel 5:	Lineare Regressionsgleichung.....	28
Formel 6:	Ertragsgleichung des Regressionsmodells	43

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

%	Prozent
°C	Grad Celsius
CLM	Climate Local Model
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSC	Climate Service Center Germany
dt/ha	Dezitonnen pro Hektar
DWD	Deutscher Wetterdienst
FK	Feldkapazität
g	Gramm
h	Stunden
ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
l	Liter
l/m ²	Liter pro Quadratmeter
lat.	lateinisch
m ²	Quadratmeter
mg	Milligramm
mm	Millimeter
nFK	nutzbare Feldkapazität
ppm	parts per million
REMO	Regional Modell
TS	Trockensubstanz
UN	Verneinte Nationen
Vol.-%	Volumen-Prozent
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode
WP	Welkepunkt

1. Einleitung

Die Weltbevölkerung wächst rasant. Derzeit leben bereits rund 7,5 Milliarden Menschen auf unserem Planeten. Nach einem Bericht der Vereinten Nationen (UN) wird die Zahl bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf über 11 Milliarden ansteigen (Ehrenstein, 2015). All diese Menschen gilt es zu ernähren. Die Erde verliert jedoch durch unangemessene Landnutzung und Flächenversiegelung immer mehr fruchtbaren Boden. Pro Person stehen aktuell weniger als 2000 Quadratmeter (m²) Ackerfläche zur Verfügung (Leisinger, 2008). Die Landwirtschaft steht demnach vor der großen Herausforderung, aus der begrenzten Fläche, durch stetig steigende Erträge, die Ernährung der Welt sicherzustellen.

Die klimatischen Veränderungen auf der Erde könnten dieses Ziel jedoch gefährden. Der Begriff „Klimawandel“ ist seit Jahren in aller Munde und stellt eines der größten aktuellen Probleme der Menschheit dar. Im letzten Bericht des Weltklimarates von 2014 wurde erneut bewiesen, dass, unter anderem durch den zunehmenden CO₂-Gehalt in der Atmosphäre, die Globaltemperaturen angestiegen sind. Gleiches gilt für die Häufigkeit von Wetterextremen, wie Dürreperioden und Starkregenereignisse. Weltweit sind sich Klimaforscher einig, dass der Klimawandel auch weiter fortschreiten wird, wenn noch mehr Treibhausgase die Umwelt belasten (IPCC, 2014).

Die Agrarbranche nimmt bei dieser Diskussion eine kontroverse Rolle ein. Zum einen gilt die Landwirtschaft, insbesondere durch die intensive Tierhaltung, als Mitverursacher der Treibhausgasemissionen. Zum anderen ist dieser Wirtschaftsbereich wie kaum ein anderer von den Witterungs- und Klimaveränderungen betroffen. Kenngrößen, wie Temperatur und Niederschlag, aber auch der Kohlendioxidgehalt, haben unmittelbaren Einfluss auf die physiologischen Prozesse der Kulturpflanzen und damit auch auf Ertrag und Qualität der Ernteprodukte. Somit wirkt der Klimawandel auch auf die wirtschaftliche Situation eines Produktionsbetriebes, sowie anderer Bereiche des Wirtschaftszweiges ein. Das Ausmaß der klimatischen Veränderungen und der Umgang der Beteiligten mit den neuen Gegebenheiten wird darüber entscheiden, ob man die Wirkungen des Klimawandels nutzen, vermeiden oder zumindest mildern kann.

2. Zielstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft zu bewerten. Dazu soll repräsentativ der Körnermaisbau am Versuchsstandort Bernburg-Strenzfeld untersucht werden. Die Auswertung soll Aufschlüsse darüber geben, ob sich ein Zusammenhang zwischen den Klimaparametern und den Erträgen landwirtschaftlicher Kulturen feststellen lässt und wie die Erträge auf das Klima der Zukunft reagieren.

Konkret werden folgende Fragen im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet:

- Welches Klima herrschte während der Versuchsjahre am Standort Bernburg-Strenzfeld?
- Wie wird sich das Klima in Zukunft entwickeln?
- In welchen Jahren wurden in Bernburg-Strenzfeld Missernten beim Körnermaisbau festgestellt und durch welche Klimaparameter lassen sich diese erklären?
- Welcher mathematische Zusammenhang besteht zwischen Klimaparametern und den Körnermaiserträgen?
- Wie wird sich das zukünftige Klima, ermittelt aus Klimamodellen, auf den Körnermaisertrag auswirken?

Aufbau der Arbeit

Zunächst sollen mittels der Literaturdurchsicht die Ansprüche der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, insbesondere des Körnermaises, an die verschiedenen klimatischen Parameter erläutert werden. Zudem werden die Klimaveränderungen in Deutschland und speziell am Versuchsstandort Bernburg-Strenzfeld aufgezeigt und deren Auswirkungen auf den Pflanzenbau präzisiert.

Für die Analyse des Zusammenhanges zwischen den Klimaparametern und den Körnermaiserträgen soll anschließend aus den Klimadaten des Versuchsstandortes eine klimatische Referenzperiode der Versuchsjahre 2004 bis 2016 erstellt werden. Diese wird hiernach sowohl mit Klimareferenzperioden der Vergangenheit, als auch mit verschiedenen Klimamodellen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verglichen, um das Klima der Versuchsjahre in den zeitlichen Verlauf einzuordnen. Desweiteren werden die Missernten in den Versuchsjahren identifiziert und in den Klimawerten dieser Jahre nach Gründen für die Mindererträge gesucht. Nachfolgend wird durch die Multiple Regressionsanalyse ein mathematischer Zusammenhang zwischen den Körnermaiserträgen und den Werten ausgewählter Klimaparameter in den Versuchsjahren hergestellt. Aus diesen Ergebnissen und mit Hilfe der Daten aus den Klimamodellen werden abschließend die zukünftigen durchschnittlichen Körnermaiserträge am Standort Bernburg-Strenzfeld modelliert und die Resultate diskutiert.

3. Literaturrecherche

3.1. Bedeutung der klimatologischen Elemente für den Pflanzenbau

Die Landwirtschaft ist seit jeher auf das Wetter angewiesen. Die klimatischen Bedingungen stellen neben den Bodeneigenschaften eines Standortes den größten Entscheidungsfaktor des Pflanzenbaues dar. Wesentliche meteorologische Größen des Klimas sind Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, Sonneneinstrahlung oder Windgeschwindigkeit. Diese sind eng miteinander verbunden. Weiterhin wirken raumtypische Einflussgrößen, zum Beispiel die Geografische Breite, die Meeresströmung, die Bodenart oder die Bebauung, auf die Klimagestaltung ein (Kuttler, 2009).

Für einige der Klimatelemente soll im Folgenden ihre Bedeutung für die pflanzliche Entwicklung erläutert werden.

Temperatur und Strahlung

Die Temperatur stellt für die Entwicklung der Kulturpflanzen einen entscheidenden Faktor dar. Da Pflanzen nur eine geringe Menge an Eigenwärme produzieren ist die eingestrahlte Wärme die Voraussetzung für einen aktiven Stoffwechsel. Die Temperatur reguliert die Geschwindigkeit der physiologischen Prozesse in der Pflanze. Laut der Regel nach van't Hoff verdoppeln sich die chemischen Umsätze bei einem Temperaturanstieg um 10 Grad Celsius (°C) (Finck, 2007). Somit besteht zwischen der Temperatur und dem Ertrag der Kulturpflanzen eine hohe Korrelation. Jede Pflanzenart hat ihr eigenes Temperaturoptimum, in dem potentiell die höchste Photosyntheseleistung und damit auch der höchste Ertrag erreicht werden kann. Grundsätzlich muss zwischen C3- und C4-Pflanzen unterschieden werden. C3-Pflanzen, wie Weizen, haben mit 17 bis 23 °C ein deutlich geringeres Temperaturoptimum als wärmeliebende C4-Pflanzen, wie beispielsweise Mais. Deren Optimum liegt bei 25 bis 30 °C. Die Photosyntheseleistung der C4-Pflanzen ist bei hohen Temperaturen durch die geringere Photorespiration deutlich stärker als bei den C3-Pflanzen. Zusätzlich variieren die Wärmeansprüche in den verschiedenen Entwicklungsstadien der Pflanze (Lütke Entrup, et al., 2013).

Die Vegetationsdauer der Pflanzen wird durch die Temperatur bestimmt. Sie beginnt im Frühjahr, wenn der Vegetationsnullpunkt kontinuierlich überschritten wird, und endet im Herbst bei Unterschreitung des Grenzwertes oder bei Vollreife (Beinhauer & Günther, 1990). Bei den meisten Pflanzenarten ist das Wachstum durch Wärmesummen determiniert. Je höher die Temperaturen über dem Vegetationsnullpunkt liegen, desto schneller werden die Temperatursummen erreicht, die zum Abschluss eines Vegetationsabschnittes notwendig sind. Die Wärmesummen wirken zusammen mit der Lichtintensität sowohl auf den Ertrag, als auch auf die Qualität der Ernteprodukte ein (Finck, 2007).

Die Kulturpflanzen können längst nicht alle auftretenden meteorologischen Werte verkraften. Weichen die Temperaturen vom Optimum ab, wird die Entwicklung der Pflanze gestört. Bei Extremwerten können Beschädigungen, oder gar das Absterben der Pflanze die Folge sein. Die meisten Frostschäden treten nicht im Winter, sondern im Herbst und Frühjahr auf, wenn die Pflanzen noch nicht, oder nicht mehr genügend kälteresistent sind. Im Mittel kann man in Deutschland die ersten Fröste Mitte Oktober und die letzten Ende April bis Mitte Mai erwarten (van Eimern & Häckel, 1984). Die Frostverträglichkeit ist bei jeder Pflanze abhängig von

ihrem Entwicklungsstadium. In der Regel gilt, je weiter die Pflanze entwickelt ist, desto größer ist die Frostempfindlichkeit (Beinhauer & Günther, 1990).

Tabelle 1: Frostresistenzen von Nutzpflanzen in verschiedenen Entwicklungsstadien (Beinhauer & Günther, 1990)

Pflanzenart:	Winterruhe	Aufgang	Blüte	Fruchtwachstum
Wintergerste	-18 °C	-7 °C	-2 °C	-1 °C
Mais	-/-	-4 °C	-0,5 °C	0 °C
Winterweizen	-20 °C	-7 °C	-3 °C	-/-
Zuckerrübe	-4 °C	-6 °C	-2 °C	-3 °C

Ebenso senken hohe Temperaturen die physiologische Aktivität der Pflanze. Durch Hitze einwirkung kann es zum Dauerwelken oder zur Zerstörung der Blätter kommen. Gleichmaßen können der Vegetationskegel oder die Wurzeln beschädigt werden. In allen Fällen sind Ertragseinbußen oder ein Totalausfall die Folge. Komplette Zerstörungen sind unter mitteleuropäischen Verhältnissen allerdings eher selten. Jedoch kann es bei sommerlicher Hitze durch erhöhte Atmungsverluste zu Erschöpfungserscheinungen an den Pflanzen kommen (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006). Nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes ist eine Hitzewelle bereits erreicht, wenn an fünf aufeinanderfolgenden Tagen jeweils die Höchsttemperatur von 30 °C erreicht wird (Leyser, 2016). Böttcher, et al. (2016) definieren eine Hitzeperiode dagegen mit einem 14-tägigen Aneinandereihen der Tageshöchsttemperatur von 30 °C.

Neben den Lufttemperaturen nehmen auch die Erdbodentemperaturen Einfluss auf die Pflanzenentwicklung und die Bodenlebewesen. Der Wärmeumsatz im Boden wird durch die Kenngrößen „spezifische Wärmekapazität“ und „Wärmeleitfähigkeit“ definiert. Diese hängen wiederum von der Bodenart, dem Bodenfeuchtegehalt und den Temperaturunterschieden zwischen Boden und Luft ab. Schwere Böden haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Sie übertragen die aufgenommene Wärme rasch in tiefere Schichten und geben diese von dort langsam wieder ab. Durch diesen permanenten Wärmestrom sind die Wurzeln junger Pflanzen geringeren Tagestemperaturschwankungen ausgesetzt. Je schlechter die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, desto größer ist die nächtliche Frostgefahr. Allerdings benötigen die schweren Böden im Frühjahr auch mehr Zeit um sich zu erwärmen (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Als Voraussetzung für die Photosynthese wird neben der Wärme auch Lichtstrahlung benötigt. Die gesamte auf der Erdoberfläche auftreffende Strahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet. Diese umfasst sowohl die direkte Strahlung der Sonne, als auch die an Luft und Wolken reflektierte und gestreute Strahlung (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006). Die Strahlung dient der Pflanze als Energiequelle für die Stoffproduktion. Dadurch besteht zwischen der Lichtintensität und den Erträgen landwirtschaftlicher Kulturen ein hoch korrelierender Zusammenhang. Der Jahresgang der Strahlung folgt dem Sonnenstand. Im Sommer ist der Strahlungseintrag durch die größere Tageslänge und dem höheren Sonnenstand am größten, im Winter am niedrigsten. Da auch Bewölkungsverhältnisse und andere Faktoren auf die Strahlungsintensität wirken, korreliert sie nicht zwangsläufig mit der Höhe der Temperatur. Entscheidend für die Photosyntheseleistung ist neben der Lichtmenge auch die Intensität der Strahlung. Je größer die Beleuchtungsstärke, desto mehr Energie wird den Pflanzen zugeführt (Beinhauer & Günther, 1990).

Niederschlag

Wasser ist das wichtigste Element der Erde. Lebende und stoffwechselaktive Pflanzen bestehen zu 85-90 Prozent (%) aus Wasser. Für einen optimalen Stoffwechsel in der Pflanze wird genügend freies und bewegliches Wasser im Gewebe benötigt. Je größer das Wasserangebot der Pflanze, desto stärker ist auch die Transpirationsleistung. Das Element wirkt sowohl direkt, als auch indirekt auf die Pflanze ein. Wasser ist ein Grundbaustein der organischen Substanz. Es dient weiterhin als Lösungsmittel für Salze, organische Stoffe und Gase, und transportiert die Nährstoffe und Assimilate innerhalb und außerhalb der Pflanze. Zudem erhält es den Turgordruck in den Zellen aufrecht und reguliert die Temperatur der Blattoberfläche (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Nur ein sehr geringer Teil des Niederschlages wird direkt von den Pflanzen aufgenommen. Die größte Menge erreicht die Pflanze über den Boden und die Wurzeln. Daher soll im Folgenden vor allem das Bodenwasser beachtet werden. Es beeinflusst, neben der Pflanzenversorgung, weiterhin die Bodenverwitterung, die Humusanreicherung und die Verlagerung von Bodenteilchen und Nährstoffen (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006). Entscheidend ist das Bodenwasser in der von Wurzeln erreichbaren Schicht. Das Wasser, welches sich in den Bodenhohlräumen befindet, wird durch verschiedene Kräfte im Boden gehalten oder bewegt sich als Sickerwasser nach unten. Um dem Boden das Wasser zu entziehen, müssen die Pflanzen die Saugspannung des Bodens überwinden. Der maximale Bodenwassergehalt wird durch die Feldkapazität (FK) definiert. Steigt die Saugspannung durch Wasserverlust so stark an, dass die Pflanzenwurzeln dem Boden kein Wasser mehr entziehen können, so ist der Welkepunkt (WP) erreicht. Den Pflanzen steht also maximal die Wassergehaltsdifferenz zwischen Feldkapazität und Welkepunkt zur Verfügung. Dieses Saldo ergibt die nutzbare Feldkapazität (nFK). Die Feldkapazität und der Welkepunkt hängen im wesentlichen von der Bodenart ab. Je kleiner die Korngrößen des Bodens, desto größer ist die Bodensaugspannung. Damit steigt die Wasserspeicherkapazität, jedoch auch der Totwasseranteil, der nach Erreichen des Welkepunktes für die Pflanzen nicht verfügbar ist (Emeis, 2000).

In der folgenden Tabelle sind Kennwerte der Bodenwassergehalte für die unterschiedlichen Bodenarten in Volumen-Prozent (Vol.-%) angegeben.

Tabelle 2: Kennwerte der Feldkapazität, des Welkepunktes und der nutzbaren Feldkapazität nach Bodenart (van Eimern & Häckel, 1984)

Bodenart:	Sand	Lehmiger Sand	Sandiger Lehm	Lehm	Löß	Ton	Moor
FK (Vol.-%)	14	21	25	35	37	42	66
WP (Vol.-%)	4	6	8	15	13	20	34
nFK (Vol.-%)	10	15	17	20	24	22	32

Die nutzbare Feldkapazität des Lehmbodens ist doppelt so groß wie die des Sandbodens. Durch den größeren Wasserspeicher in guten Böden, fallen niederschlagsfreie Phasen weniger, beziehungsweise erst später ins Gewicht. Je leichter der Boden, desto größer ist die Trockenstressgefahr für die Pflanzen. Der Boden hat oft einen größeren Einfluss auf die Stresssituationen eines Bestandes als die Witterung (van Eimern & Häckel, 1984).

Wie auch bei der Temperatur, sind die Bedürfnisse der Pflanze je nach Vegetationsstadium unterschiedlich. Die Pflanzen, sowie auch die Bodenorganismen, finden meist optimale Bedingungen vor, wenn die Feldkapazität etwa zu 70-80 % gefüllt ist. Weichen die Bodenwassergehalte vom Optimum ab, wird die Entwicklung der Pflanzen gestört. Sowohl ein Überschuss, als auch ein Mangel an Wasser wirken schädigend (Bernhofer, et al., 2015).

Bei einem länger anhaltenden niederschlagsfreien Zeitraum, verbunden mit Hitze, spricht man von einer Dürreperiode. Bei kurzen Trockenperioden wird meist nur das Wachstum der Pflanze gehemmt. In heißen Mittagsstunden kommt es zu Welkeerscheinungen an den Blättern, die sich über Nacht wieder erholen. Hält die Trockenheit dagegen länger an, sind irreversible Schäden die Folge. Ab einer Bodenfeuchte von unter 30 % nFK bis zum Erreichen des Welkepunktes liegt akuter Wassermangel vor (van Eimern & Häckel, 1984). Die Pflanzen können nur noch wenig Wasser aufnehmen und schließen regelmäßig die Stomata der Blätter, um den Wasserverlust zu mindern. Dadurch erhalten die Chloroplasten der C3-Pflanzen weniger CO₂, welches für die Photosynthese benötigt wird. Es kommt zu größeren Entwicklungsstörungen, Schädigungen und Ertragsminderungen, bis hin zum Totalausfall durch den Tod der Pflanze (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Hitzewellen und Dürren wirken oft parallel, wodurch sich ihre Schadwirkung kaum voneinander trennen lässt. Das Ausmaß der Dürreschäden ist, neben dem Zeitraum der Dürrewirkung, von der Pflanzenart und dem Entwicklungsstadium abhängig. Die Entwicklung des Wurzelsystems gibt vor, wie viel des Bodenwasservorrates von der Pflanze ausgeschöpft werden kann und wie schnell der Welkepunkt erreicht ist. Ebenso kann trockener Wind die Schäden deutlich erhöhen. Eine allgemeine Definition von „Dürre“ ist schwierig, da der Eintritts- und Endzeitpunkt nur wage zu bestimmen sind. Im Nationalen Klimareport von Böttcher et al. (2016) ist eine Trockenperiode mit mindestens zehn aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag festgelegt. Nach Bernhofer et al. (2015) präzisieren fünfzehn aufeinanderfolgende Tage ohne Niederschlag eine Dürre, oder es fällt in 21 Tagen eine Niederschlagssumme von weniger als ein Drittel des Normalwertes.

Auch ein deutlicher Wasserüberschuss hat negative Folgen für die Pflanzen. Steigt die nutzbare Feldkapazität durch hohe Niederschläge auf über 80 % an, wird der Bodenlufthaushalt gestört und die Bodenwurzeln leiden unter Sauerstoffmangel. Dadurch werden die Lebensvorgänge eingeschränkt und das Wachstum verringert. Sichtbar wird dies durch eine Gelbfärbung der Keimpflanzen, oder, bei weiter entwickelten Beständen, durch eine Aufhellung der Blätter (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Bei extremen Niederschlägen durch Dauer-, oder Starkregen wird die Feldkapazität des Bodens überschritten. In der Folge kommt es zum Versickern des überschüssigen Wassers in die Grundwasserzone oder zur Bodenerosion durch oberflächlichen Abfluss. In beiden Fällen gehen organische Substanz und Nährstoffe verloren. Der Boden wird ausgelaugt und die Bodenfruchtbarkeit sinkt. Der Verlust von Bodenmaterial lässt sich nur sehr schwer beheben. Die Bodenneubildung ist mit weniger als einer Tonne pro Hektar und Jahr äußerst gering (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006). Schwere Böden können durch die kleineren Poren weniger Wasser pro Zeiteinheit aufnehmen als Sandböden und sind daher stärker erosionsgefährdet. Auch die Hangneigung nimmt entscheidenden Einfluss auf den Bodenabtrag (van Eimern & Häckel, 1984).

Luftfeuchte

Die Luftfeuchtigkeit ist definiert als die Summe des in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdampfes. Sie hat sowohl Einfluss auf das Wettergeschehen, als auch auf Vorgänge in der Natur. Alle lebenden Organismen, egal ob Pflanze, Tier oder Mensch, reagieren auf Schwankungen der Luftfeuchtigkeit. Der Anteil kann bis zu 4 % in der Atmosphäre betragen. Je höher die Temperatur, desto aufnahmefähiger ist die Luft für Wasserdampf. Wird der Sättigungsdampfdruck überschritten, kondensiert der Wasserdampf und setzt sich als Nebel, Tau oder Reif ab. Tau- und Reifwasser kann 2-5 % der gesamten Niederschlagsmenge ergeben (van Eimern & Häckel, 1984).

Die Luftfeuchte spielt insbesondere bei Hitzeeinwirkungen eine Rolle, denn mit steigender Luftfeuchte erhöht sich die Hitzeempfindlichkeit der Pflanzen. Eine hohe Luftfeuchte, zusammen mit ausreichender Wärme, bietet zudem günstige Bedingungen für die Entwicklung vieler Krankheitserreger und steigert die Anfälligkeit der Kulturpflanzen für selbige (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Verdunstung und Photosynthese

Aus dem Zusammenspiel der zuvor beschriebenen klimatischen Faktoren ergibt sich die Verdunstungs- und Photosyntheseleistung der Pflanzen. Je besser die Faktoren aufeinander abgestimmt sind, desto größer ist die biologische Aktivität der Pflanzen. Bei der Verdunstung wird zwischen der unproduktiven Evaporation über der Bodenoberfläche und der Transpiration der Pflanzen unterschieden. Je üppiger der Pflanzenbestand, desto größer ist der Anteil der Transpiration an der Verdunstung. Da beide Vorgänge messtechnisch kaum zu trennen sind, bezeichnet man die gesamte, von Boden und Pflanzen abgegebene Wassermenge, als Evapotranspiration. Aus der Differenz der Niederschlagsmenge und Verdunstungsleistung ergibt sich die klimatische Wasserbilanz. Sie drückt den Grad der Trockenheit eines Standortes aus. Ist die klimatische Wasserbilanz negativ, herrscht arides Klima vor, bei einer positiven Bilanz ist das Klima humid. Die Strahlungsintensität, sowie die Luft- und Bodentemperatur bestimmen die für die Verdunstung bereitstehende Energie. Diese wird von den Blättern der Pflanzen aufgenommen. Die maximale Strahlungsaufnahme ist bei den meisten Pflanzenarten erst erreicht, wenn die Summe der Blattfläche ein vielfaches der Bodenfläche erreicht. Das Verhältnis der Blattfläche zur Erdoberfläche wird im Blattflächenindex definiert. Desweiteren beeinflussen die Luftfeuchte und die Windgeschwindigkeit den Gasaustausch der Pflanzen mit der Umgebungsluft. Bei geringer relativer Feuchte ist das Wasserdampfdefizit zwischen den Stomata und der Luft groß und es kann mehr Wasserdampf von der Pflanze abgegeben werden als bei einem hohen Feuchtegehalt. Sorgt zudem ein ausreichend starker Wind für einen raschen Austausch der abgekühlten und mit Wasserdampf angereicherten Luft durch wärmere und trockenere Luft, liegen gute Bedingungen für eine hohe Photosyntheseleistung vor. Alles in allem kann ein Pflanzenbestand jedoch nur Höchstwerte bei der Verdunstung erreichen, wenn genügend Wasser für die Transpiration der Blätter aus dem Boden nachgeliefert wird. Welche Klimabedingungen letztlich zu einem gewünschten Ertrag führen, hängt von der Pflanzenart und -sorte, von Bodenart und -zustand, von der Fruchtfolge und von dem Entwicklungsstand der Pflanze ab. Auch die Bodenbearbeitung, sowie Düngung und Pflanzenschutz spielen eine entscheidende Rolle (van Eimern & Häckel, 1984).

Indirekte Wirkungen der Klimafaktoren

Das Wetter nimmt nicht nur unmittelbaren Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen, sondern bestimmt auch die pflanzliche Umgebung, sowie die Arbeit des Landwirtes. Hierbei sind zunächst die Krankheiten und Schädlinge zu nennen. Sowohl deren Wirkkraft, als auch die Anfälligkeit der Wirtspflanze für Erkrankungen, hängen im hohen Maße von den Umweltbedingungen ab. Vor allem Temperatur und Luftfeuchte sind wirksam. Aber auch der Wind kann die Verbreitung durch Sporen stärken. Ist der Bestand einmal infiziert, wird auch der Krankheitsverlauf durch das Wetter bestimmt. Daneben sind eine Vielzahl der ackerbaulichen Arbeiten vom Wetter beeinflusst. Hierzu zählen etwa die Vorbereitung des Saatbettes, die Bestellung, Dünge- und Pflanzenschutzmaßnahmen sowie die Ernte. Bei allen Arbeitsgänge muss die Befahrbarkeit des Bodens gegeben sein, da sonst Schadverdichtungen erzeugt werden. Pflanzenschutzmaßnahmen haben zusätzlich, je nach eingesetztem Mittel, differenzierte Anforderungen an die Witterung, um eine optimale Wirkung gewährleisten zu können (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Insgesamt erhöhen ungünstige Witterungsbedingungen die Arbeitserledigungskosten. Der Grund ist eine geringere Arbeitszeit für termingerechte Arbeitsgänge und die darauffolgende Erhöhung der Schlagkraft. Betroffen sind vor allem Löhne, Sozialabgaben, Lohnarbeitskosten, Maschinenmiete oder Treibstoffkosten. Die Höhe der abweichenden Kosten ist abhängig von dem Ausmaß der Wetterabnormalität, sowie der Bodenart und der Betriebsstruktur. Reagiert man nicht mit einer Erhöhung der Schlagkraft, so muss man Gewinnverluste durch Ertragsminderungen in Kauf nehmen (Beinhauer & Günther, 1990).

3.2. Klimaansprüche des Maises

Mais (*lat. Zea mays*) gehört zur Familie der Süßgräser und ist die Getreideart mit der größten Formenvielfalt hinsichtlich Pflanzenlänge, Wachstumszeit und Kornform. Das Genzentrum liegt in Südamerika. Von dort gelangte der Mais infolge der Domestikation nach Europa. Aufgrund seiner Herkunft ist Mais eher an tropische Klimabedingungen angepasst. Durch züchterische Anpassung wird die Kultur heute jedoch in unterschiedlichsten Klimaverhältnissen angebaut. Lediglich Spät- und Frühfröste grenzen seine Ausbreitung ein. Der Vegetationszeitraum von Mais liegt in Deutschland meist in den Monaten April bis Oktober (Lütke Entrup, et al., 2013).

Temperatur und Strahlung

Mais ist eine wärmeliebende Pflanze. Die Wärmesumme eines Standortes ist ein entscheidender Faktor für die Ausreife und Ertragsbildung des Maises. Nach Orzessek (2014) variiert der durchschnittliche Wärmebedarf während der Hauptvegetationszeit von Mai bis September je nach Reifezahl des Körnermais zwischen 13,5 °C und 15,5 °C. Zudem benötigt der Mais eine hohe Sonnenscheindauer von mindestens 900 Stunden zwischen Feldaufgang und Reife (Degener, 2013).

Die Maisreifezahlen, auch FAO-Zahlen genannt, stehen in direkter Beziehung zur Temperatur. Hohe Zahlen drücken große Wärmeansprüche zur Abreife aus. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass sich mit steigender FAO-Zahl die Vegetationszeit, und damit auch der potentielle Ertrag, bei einer bestimmten Temperatur verlängert. Durch eine dem Standort angepasste Sortenwahl kann das Ertragspotential des Maises optimal ausgeschöpft werden. Eine Differenz von 10 Reifeeinheiten ergibt unter mitteleuropäischen Verhältnissen einen Reifeunterschied von ein bis zwei Tagen (Lütke Entrup, et al., 2013). Nach Angaben der KWS SAAT SE (2017) ist für eine Abreife des Silomais mit 32 % Trockensubstanz (TS) bei frühreifen Sorten eine Wärmesumme von 1450 °C nötig. Für Körnermais mit 65 % TS und der Reifezahl K210 liegt dieser Wert bei 1580 °C. Mittelfrühe Sorten um die Reifezahl K240 benötigen 1630 °C zur Abreife und mittelspäte Sorten um K270 gar 1680 °C. Alle Angaben beziehen sich auf die Summe der Tagesmitteltemperaturen über 6 °C, dem Vegetationsnullpunkt des Maises. Je eher die nötige Temperatursumme erreicht wird, desto früher ist der Mais erntereif.

Zur Keimung ist die Temperatur neben Wasser und Sauerstoff die dritte Grundvoraussetzung. Mais hat sehr hohe Ansprüche an die Keimtemperatur. Es sind mindestens 8 bis 10 °C Bodentemperatur in 5 cm Tiefe nötig (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006). Dadurch erfolgt hierzulande die Aussaat in der Regel erst Mitte April bis Anfang Mai. Erhöht sich die Bodentemperatur in der Ablagetiefe von 5 cm um 1 °C, so verkürzt sich der Feldaufgang um etwa 1,5 Tage. Eine gleichmäßige Keimung erfolgt bei Temperaturen von über 13 °C und ausreichender Bodenfeuchte in der Regel innerhalb von einer Woche (Beinhauer & Günther, 1990). Zu tiefe Temperaturen sorgen für einen ungleichmäßigen Feldaufgang. Dies führt zu Ertragseinbußen, da später auflaufende Pflanzen eine geringere Konkurrenzkraft in Bezug auf Sonneneinstrahlung, Wasser und Nährstoffe besitzen. Ist das Saatkorn bereits gequollen, stören niedrige Temperaturen die weitere Entwicklung erheblich. Mais ist sowohl im Frühjahr als auch im Herbst Frostgefährdet. Spätfröste nach dem Feldaufgang, die unter -4 °C gehen, führen zur Eiskristallbildung im Interzellularraum (Vgl. Tabelle 1, Seite 4). Im Samen sind lediglich fünf bis sechs Blattanlagen vorhanden. Die restlichen Blätter werden nach der Keimung im Vegetationskegel angelegt. Befindet sich dieser außerhalb der Bodenober-

fläche unter Frosteinwirkung, sterben zunächst Blattanlagen und gegebenenfalls die ganze Pflanze ab. Auch die Kolben- und Rispenausbildung wird bereits in diesem Stadium beeinträchtigt. Nach Beinbauer und Günther (1990) verzögern länger anhaltende Lufttemperaturen unter 10 °C die Jugendentwicklung. An den Blättern zeigen sich Aufhellungen oder chlorotische Flecken, die den Photosyntheseumsatz, und damit auch den Zuwachs, verringern. Entscheidend ist die Dauer der Kühleeinwirkung, die Nährstoffverfügbarkeit und die Kältetoleranz der Sorte. Auch Frühfröste im Herbst werden schlecht vertragen. Es kommt zu einer vorzeitigen Kornabreife.

Die empfindlichste Phase für Umwelteinwirkungen ist die Blüte, etwa Mitte bis Ende Juli. Auf den Maispflanzen sind die Blüten geschlechtlich und örtlich getrennt. Die Fahne oder Rispe zeigt die männlichen Blüte, der Kolben die weiblichen Blüte. Im Kolben entwickelt sich für jede Samenanlage ein Narbenfaden, der nach 7 bis 10 Tagen aus den Lieschblättern wächst. Ist der Pollen aufgenommen, dauert es etwa 24 Stunden, bis der Pollenschlauch den Narbenfaden durchwachsen hat und die Samenanlage befruchtet ist (Lütke Entrup et al., 2013). Wirkt in der Phase der Blüte Stress auf die Pflanze ein, sinkt der Kornertrag. Dieser setzt sich aus den Parametern „Anzahl Kornreihen“ und „Körner pro Reihe“ zusammen. Bereits einige Wochen vor der weiblichen Blüte wird die Größe des Hauptkolbens differenziert. Während die Anzahl der Kornreihen im Kolben weitestgehend durch die Genetik bestimmt ist, kann die Anzahl der Körner pro Reihe, sowie die Größe der Körner durch die Umweltbedingungen, wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Wasser- und Nährstoffangebot, stark beeinflusst werden. Gute Bedingungen lassen den Kolben in die Länge wachsen. Die Blühdauer der Fahne beträgt, je nach Witterung, 10 bis 14 Tage und beginnt einige Tage vor dem Erscheinen der Narbenfäden am Kolben. Für die Befruchtung ist eine feuchtwarme Witterungsperiode von Vorteil. Herrscht hingegen kaltes und regnerisches Wetter, werden keine Pollen ausgeschüttet. Bei heißen Temperaturen können die Pollen durch ihre dünne Membran schnell austrocknen und steril werden. Hitzeperioden mit über 30 °C reduzieren daher die Fruchtbarkeit, was durch eine geringe Luftfeuchte oder Trockenheit zusätzlich verstärkt wird. Es werden weniger Kornanlagen im Kolben befruchtet und der Kornertrag sinkt. Um die hohen Temperaturen zu umgehen, findet die Pollenausschüttung vorwiegend am Vormittag und spätem Nachmittag statt (Lütke Entrup & Schäfer, 2011).

Etwa 55 Tage nach der Aussaat beginnt die Kornfüllungsphase. Hohe Nachttemperaturen erhöhen die Atmungsverluste, wodurch den befruchteten Körnern die Assimilate zum wachsen fehlen. Im schlimmsten Fall reduzieren sich die Kornanlagen. Die Befruchtung verläuft vom Kolbengrund zur Kolbenspitze. Dementsprechend tragen die Anlagen an der Kolbenspitze das höchste Risiko einer möglichen Reduzierung. So erklärt sich das typische Bild der ungefüllten Kolbenspitze zur Ernte in Stressjahren (Kühne, 2016).

Im Handbuch Mais (Lütke Entrup, et al., 2013) sind für die Vegetationsabschnitte des Maises die jeweiligen Temperaturansprüche angegeben. So benötigt der Mais von der Aussaat bis zum Feldaufgang eine Temperatursumme von 100 bis 120 °C, berechnet aus der Tagesmaximaltemperatur abzüglich 10°C Basistemperatur. Im Abschnitt Aussaat bis zur Blüte bedarf der Mais circa 800 °C (hier Tagesmitteltemperatur abzüglich 8 °C Basistemperatur) mit Sorten- und jahresabhängigen Schwankungen von 200 °C. Von der Blüte bis zur Teigreife werden 600 °C benötigt.

Für den Photosyntheseumsatz sind nicht nur die Wärmesummen, sondern auch die direkt auf die Pflanze einwirkenden Temperaturen von Bedeutung.

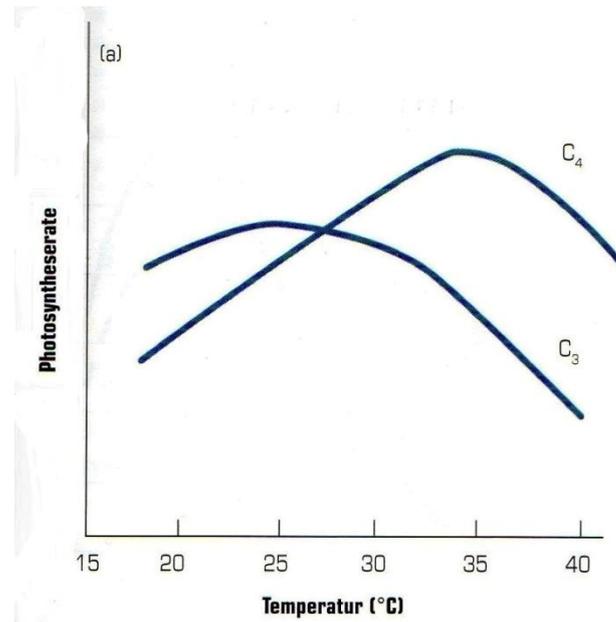


Abbildung 1: Einfluss der Temperatur auf die Photosyntheseleistung (Lütke Entrup, et al., 2013)

Zwischen 15 und 30 °C Lufttemperatur zeigen die C₄-Pflanzen einen nahezu lineareren Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Photosyntheseumsatz. Bei circa 35 °C ist das Maximum erreicht. Höhere Temperaturen senken wiederum die Leistung. Diese Angaben beziehen sich auf die Bruttophotosynthese. Abzüglich der Atmungsverluste erhält man den Nettophotosyntheseumsatz, dessen Optimum im niedrigeren Bereich liegt. Generell wird zwar mit zunehmender Temperatur die Einlagerung der Assimilate begünstigt, gleichwohl verringert sich die Assimilatmenge durch die zunehmende Atmung. Der Tagestemperaturverlauf ist sehr wichtig. Ein relativ warmer Tag bietet optimale Bedingungen für den Aufbau von Stoffen, wohingegen eine kühle Nacht die Atmungsverluste gering hält (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006)

Ein weiteres Kriterium für eine hohe Photosyntheseleistung ist die Strahlungsaufnahme der Pflanze. Insbesondere zur Blüten- und Kornfüllungsphase sollte die Maispflanze mindestens 90 % der nutzbaren Strahlung aufnehmen. Dies gewährleistet der Mais durch einen hohen Blattflächenindex von ca. 6 m² Blattfläche je m² Bodenfläche. Die Blattflächenentwicklung wird entscheidend durch die Temperatur beeinflusst. Je niedriger die Temperaturen, desto langsamer entwickeln sich die Blätter. Jedoch ist die Gesamtblattmasse unter moderaten Temperaturen größer. Höhere Temperaturen gehen meist mit einer stärkeren Strahlungsintensität einher. Dadurch ist die Pflanze bereits bei geringer Blattmasse strahlungsgesättigt und bildet insgesamt weniger Blattmasse aus. Im Herbst, bei abnehmender Strahlungsintensität, führt dies zu einer geringeren Assimilatproduktion (Lütke Entrup, et al., 2013).

Niederschlag

Betrachtet man den spezifischen Wasserbedarf zur Bildung von Trockenmasse, auch Transpirationskoeffizient genannt, so ist Mais als C4-Pflanze, im Vergleich zu anderen Kulturen, besonders effizient. Um einen Kilo Trockenmasse umzusetzen, benötigt Mais 170 bis 220 Liter (l) Wasser. Der Gesamtwasserbedarf ist damit nicht allzu hoch. Jedoch ist durch die kurze Vegetationszeit die Verteilung der Niederschläge von großer Bedeutung (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Die Trockenstressempfindlichkeit ist stark abhängig vom Entwicklungsstadium der Pflanze.

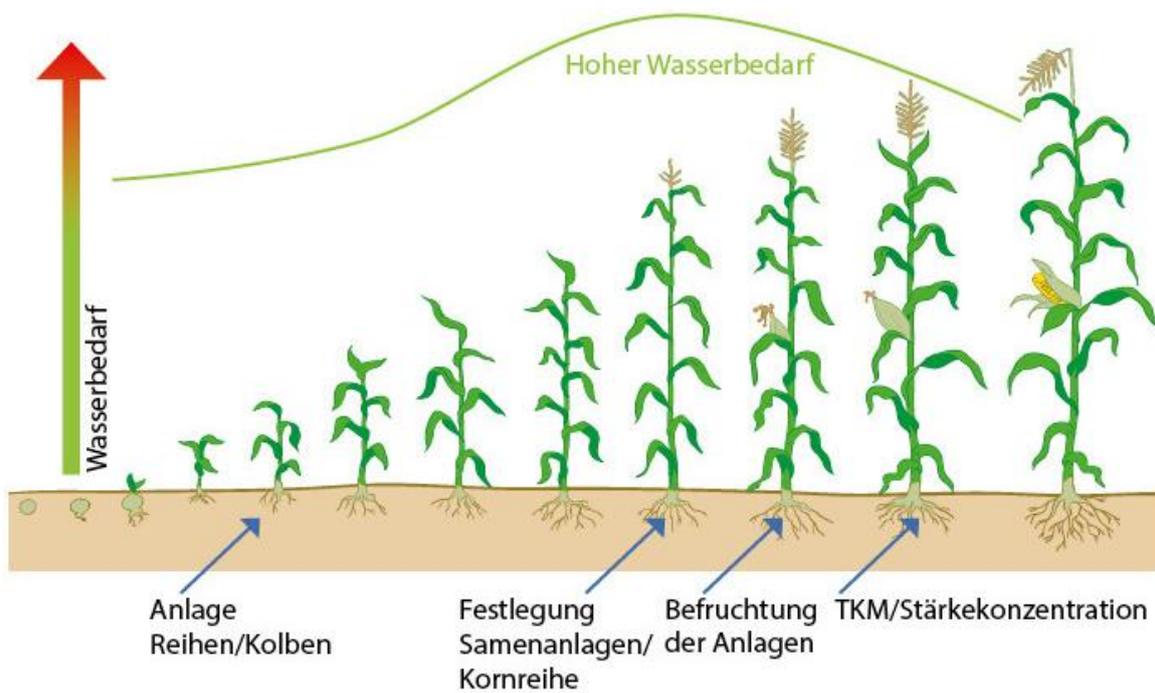


Abbildung 2: Wasserbedarf des Maises in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (Kühne, 2016)

Bereits zum Keimvorgang ist eine ausreichende Bodenfeuchte erforderlich. Durch die Wasseraufnahme beginnt die Quellung und die Atmung wird aktiviert. Hierfür wird Sauerstoff benötigt. Ist der Boden zu stark mit Wasser gesättigt, verzögert sich die Keimung oder sie bleibt aus. Auch bei verdichteten Böden oder einer zu tiefen Saatablage erreicht das Maiskorn zu wenig Sauerstoff. Das Wurzelwachstum, welches mit der Blüte endet, ist maßgeblich vom Bodenwassergehalt, sowie der Nährstoffversorgung geprägt. Maximales Längenwachstum zeigen die Wurzeln im Bereich mittlerer Bodenwassergehalte. Eine zu hohe Bodenfeuchte, sowie ein Überangebot an Nährstoffen während der Jugendentwicklung, vermindern die Trockenresistenz der Maispflanze. Durch das eingeschränkte Sauerstoffangebot und das leicht erreichbare Wasser bildet sich eine geringe Wurzelmasse. Das verfügbare Wasserangebot kann damit in späteren Vegetationsabschnitten nicht voll ausgeschöpft werden und es kommt trotz ausreichender Bodenfeuchte zu Dürreschäden und Ertragsminderungen. Dagegen führt Wassermangel zu einem großen Wurzelmassenanteil. Auf Spross und Kolben entfallen weniger Assimilate und der Ertrag sinkt. Liegen optimale Bedingungen vor, erreichen die Kronen- und Seitenwurzeln der Maispflanze eine seitliche Ausdehnung von maximal 1,80 m und eine Tiefe von 2,50 m (Lütke Entrup, et al., 2013).

Der größte Wasserbedarf besteht von Beginn des Fahnenschiebens bis zur Milchreife (BBCH 55-71), mit bis zu 6 l/m² pro Tag. In dieser etwa 50-tägigen Periode, im Juli und August, produziert die Pflanze bis zu 60 % seiner Trockenmasse. Der Umwelteinfluss auf Ertrag und Qualität ist in dieser Phase am größten. Die Feldkapazität des Bodens sollte ab dem 6- bis 7-Blattstadium stets über 50 % gefüllt sein, um Stickstoff im Boden zu mobilisieren und die Nährstoff- und Wasseransprüche des Maises zu erfüllen (Lütke Entrup & Schäfer, 2011). In der Blüte werden zunächst die Samenanlagen und damit die Kornanzahl je Kornreihe festgelegt. Anschließend werden die Anlagen befruchtet. Die Narbenfäden der Samenanlagen haben einen sehr hohen Wasseranteil. Bei Trockenstress verzögert sich deren Ausbildung. Der Zeitraum der männlichen Blüte wird hingegen kaum beeinflusst. Dadurch verkürzt sich die effektive Befruchtungszeit der Samenanlagen und die Kornanzahl je Kolben sinkt. Im Extremfall schlägt die Befruchtung der Narbenfäden gänzlich fehl und es bilden sich kolbenlose Pflanzen. Aus den Differenzen der Zeiträume der männlichen und weiblichen Blüte ergibt sich die Stresstoleranz einer Maissorte. Im weiteren Verlauf der Entwicklung nimmt die Photosyntheseleistung der Pflanze klimabedingt ab, unterdessen der Assimilatbedarf des Kolbens zunimmt. Deshalb werden die in der Restpflanze gespeicherten Reservestoffe mobilisiert und dem Kolben zur Verfügung gestellt. Der Kolben nimmt an Trockenmasse zu, während die Restpflanze durch die Seneszenz an Masse verliert. Bei ausreichendem Wassergehalt in der Pflanze sind genügend Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen gelöst und die Remobilisierung erfolgt vorwiegend aus dem Stängel. Bei Wassermangel wird die Mobilisierung auf die Blätter erweitert. Durch die Blattseneszenz wird die Photosyntheseleistung gehemmt. Unabhängig von der Masse des Endosperms stoppt die Stärkeeinlagerung bei einem Wassergehalt im Korn von 35 bis 40 %. Wassermangel in der Kornfüllungsphase lässt diese daher schneller enden. Kornanzahl, Korngröße (Tausendkornmasse) sowie Kornqualität (Stärkekonzentration) nehmen ab (Lütke Entrup, et al., 2013).

Bei ausreichender Wasserversorgung kann der Kolben bis zur Hälfte des Trockenmasseanteils ausmachen. Je größer der Trockenstress, desto höher ist der Sprossanteil am Trockenmassegehalt. Insgesamt beschleunigt Wassermangel die Abreife der Pflanze. Es kommt zur Notreife der Körner. Besteht hingegen ein Überangebot an Wasser, steigt der Blattanteil. Dadurch verzögert sich die Reife und die Standfestigkeit nimmt ab. Bei Staunässe bilden sich durch den Sauerstoffmangel Chlorosen an den Blättern und die Pflanze kann im Ausnahmefall absterben (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Neben Temperatur, Strahlung und Wasserversorgung des Bodens, beeinflusst auch das Angebot an mineralischen Nährstoffen den Wasserverbrauch der Maispflanze. Je mehr Nährstoffe zur Verfügung stehen, desto gehaltvoller ist die Nährlösung für die Pflanze. Es ist weniger Transpiration erforderlich, um die nötigen Nährstoffe zu erhalten. Besonders in trockenen Jahren zeigt ein gut versorgter Boden einen niedrigeren Transpirationskoeffizienten und somit höhere Erträge als ein schlecht versorgter Boden (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

3.3. Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Landwirtschaft

Deutschland gehört zu einer warm-gemäßigten Klimazone, in der das maritime Klima Westeuropas und das kontinentale Klima Osteuropas ineinander übergehen. Charakteristisch für das deutsche Klima ist die große interannuelle Variabilität der Jahreszeiten. Das Klima wird unter anderem durch die Topografie des Landes, wie Gebirgserhöhungen, und die Entfernung zum Meer strukturiert (Böttcher, et al., 2016).

Das Klima der Erde ist keineswegs eine starre Erscheinung. Es befindet sich durch viele natürliche Faktoren, wie die Plattentektonik, die Verschiebung der Erdbahnparameter oder Vulkanausbrüche im stetigen Wandel (Häckel, 2016). Seit Beginn der Industrialisierung, Mitte des 18. Jahrhunderts, nehmen auch wir Menschen entscheidenden Einfluss auf die klimatischen Bedingungen unseres Planeten. Durch großflächige Landnutzungsänderungen, wie Siedlungsflächenausbau und Waldrodungen, wird die Rückstrahlung der Sonnenenergie und der Wasserkreislauf der Erde beeinflusst. Zudem verändern Viehzucht, Industrie und Verkehr die atmosphärische Zusammensetzung. Klimarelevante Gase wie CO₂, Methan oder Lachgas werden vermehrt ausgestoßen. So hat sich der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre seit dem Jahr 1850 von 288 ppm auf über 390 ppm erhöht (Brasseur, et al., 2017). Laut Gröbmaier (2012) wird bis Mitte des 21. Jahrhunderts ein Wert über 500 ppm erwartet. Wie stark sich das Klima in Zukunft verändern wird, ist von der weiteren Entwicklung der Treibhausgasemissionen abhängig.

Durch ihre unmittelbare Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen gehört die Landwirtschaft zu den am stärksten Betroffenen des Klimawandels. Von den Veränderungen sind nicht nur die Kulturpflanzen selbst, sondern auch die Böden, Schädlinge, Krankheitserreger und Nutztiere betroffen, welche in großer Wechselbeziehung stehen. Durch den Klimawandel sind sowohl positive als auch negative Folgen zu erwarten. Entscheidend dafür ist sowohl die Intensität der Klimaveränderungen, als auch die Empfindlichkeit der Organismen und die Anpassungsmaßnahmen des Landwirtes.

Für die Ermittlung der Folgen des Klimawandels, wurden in den letzten Jahren Klimamodelle entwickelt, die Projektionen des zukünftigen Klimas zeigen. Diese numerischen Modelle helfen uns das komplexe Zusammenspiel der Komponenten und Prozesse des Klimasystems zu interpretieren. Es werden verschiedene Annahmen über die Entwicklung der Weltbevölkerung, des Lebensstandards oder auch der Klimapolitik gemacht, woraus sich unterschiedliche Klimaszenarien mit differenzierten Emissionswerten der Treibhausgase ergeben. Aussagen zum zukünftigen Klima basieren daher immer auf einem Bündel von Klimasimulationen und sind mit einer Unsicherheit durch Abschätzungen behaftet. Trotz der differierenden Modellergebnisse wird der Trend des Klimawandels durch die Klimaprojektionen insgesamt bestätigt. Es entstehen zunächst globale Klimamodelle, die durch unterschiedliche Methoden regional verfeinert und räumlich höher aufgelöst werden (Brasseur, et al., 2017).

Den gegenwärtigen Stand des globalen Klimas und die Ergebnisse der Klimamodelle werden alle fünf bis sieben Jahre im Weltklimabericht des IPCC, oft auch „Weltklimarat“ genannt, veröffentlicht. Dieser bestätigt, dass sich durch den Konzentrationsanstieg der Klimagase die Erdoberfläche erwärmt. Infolgedessen gehen die Gletscher zurück, die Klima- und Vegetationszonen verschieben sich zu den Polen, und der Meeresspiegel steigt an. Als Ergänzung zu diesen globalen Ergebnissen hat sowohl das Climate Service Center Germany (CSC) in ihrem Bericht von 2017 (Brasseur, et al., 2017), als auch der Deutsche Wetterdienst (DWD) in ihrem Nationalen Klimareport (Böttcher, et al., 2016) die wissenschaftlichen Informationen

zum Klimawandel für Deutschland zusammengetragen und die Folgen für die Landwirtschaft in Deutschland diskutiert:

Temperatur und Strahlung

Von 1881 bis 2015 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur für Deutschland um 1,4 °C gestiegen. Dabei betrug die Zunahme alleine in den letzten 30 Jahren 0,7 °C (Vergleich der Referenzperioden 1961-1990 und 1981-2010). Die Dekade von 2001 bis 2010 war die wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnung. Der Temperaturanstieg unterliegt kaum jahreszeitlichen Unterschieden und betrifft sowohl den Sommer als auch den Winter. Es gibt jedoch regionale Unterschiede. Während der Anstieg im Norddeutschen Tiefland mit 0,9 °C am geringsten ausgefallen ist, erhöhte sich die Temperatur im rheinischen Mittelgebirge um 1,5 °C. Die Beobachtungsdaten zeigen eine allgemeine Zunahme warmer Temperaturextreme bei gleichzeitiger Abnahme kalter Extreme. Die Anzahl heißer Tage im Jahr, mit Tagesmaximaltemperaturen von über 30 °C, sind in Deutschland seit den 1950er-Jahren von durchschnittlich drei auf neun Tage angestiegen. Auch länger anhaltende Hitzeperioden von 14 heißen Tagen oder mehr haben zugenommen. Zeitgleich ist die Anzahl der Eistage mit Tagesmaximaltemperaturen bis 0 °C von durchschnittlich 28 auf 19 Tage gesunken. Parallel zur Temperatur hat sich auch die Strahlungsintensität in Deutschland verändert. In den letzten 60 Jahren schien die Sonne im Tagesdurchschnitt neun Minuten länger, was einen Anstieg von 3,5 % entspricht. Auch hier sind regional starke Differenzen vorhanden. Die Klimamodelle sehen für Deutschland in den nächsten 100 Jahren eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von 1 °C bis 4 °C voraus, abhängig vom Emissionsszenario der Treibhausgase. Hierbei ist zu beachten, dass die Auswirkungen im Süden und Osten Deutschlands durch den zunehmenden kontinentalen Einfluss stärker ausfallen werden, als im bundesweiten Durchschnitt. Zusätzlich ist mit einer Häufung der Temperaturextreme, insbesondere Hitzewellen und Dürren, sowie durchschnittlich milderem Wintern zu rechnen. Die Entwicklung der Sonnenscheinintensität lässt sich mit den aktuellen Klimamodellen nur unsicher vorhersagen (Böttcher, et al., 2016).

Durch die Temperaturerhöhung verfrüht und verlängert sich die Vegetationsphase. Dabei werden Wärmesummen zügiger erreicht und die phänologischen Phasen schneller durchlaufen. So verkürzt sich unter anderem die Kornfüllungsphase bei Getreide oder Körnermais, was in der Regel Ertragseinbußen zur Folge hat. Zunehmende Hitzeperioden im Sommer erhöhen die Häufigkeit von Fertilisationsproblemen während der Blüte. Auch die milderen Wintertemperaturen können, je nach Pflanzenart, Probleme hervorbringen. Bei Winterkulturen kann sich der Pflanzenbestand bis zur Vegetationsruhe stärker entwickeln, wodurch die Gefahr der Auswinterung steigt. Viele Kulturen benötigen im Winter einen Kältereiz zur Vernalisation. Reicht dieser nicht aus, entsteht ein ungleichmäßiger Übergang zur generativen Phase. Temperaturveränderungen können obendrein die Erntequalität beeinflussen. Sowohl die Inhaltsstoffe, als auch die Korngrößen variieren. Nur wenige Kulturen, darunter der Wein, können durch die steigenden Temperaturen die Qualitäten verbessern. Durch die zunehmenden Temperaturschwankungen zwischen den Jahren nimmt gleichermaßen die Ertragsvariabilität zu. Für den Landwirt birgt dies ein höheres unternehmerisches Risiko und schlechtere Planbarkeit.

Es gibt jedoch auch positive Aspekte des Klimawandels. Für Kulturen, deren Entwicklung nicht durch Wärmesummen definiert wird, wie Zuckerrüben oder Grünland, kann eine Temperaturerhöhung durchaus den Gesamtertrag steigern. Aus dem Plus an zugeführter Energie können zusätzliche Assimilate gebildet werden. Die von Wärmesummen bestimmten Kultu-

ren erreichen durch den früheren Vegetationsbeginn eher das Blühstadium. Dies mildert die Gefahr von Hitzestress in der Blüte. Andererseits können zunehmend spätreife Sorten angebaut werden, ohne deren Abreife zu gefährden. Aus ihnen kann durch die längere Kornfüllungsphase potentiell mehr Ertrag generiert werden (Brasseur, et al., 2017).

Niederschlag

In den Jahren 1961-1990 fielen im Bundesdurchschnitt 789 Millimeter (mm) Niederschlag pro Jahr, davon etwa 60 % im Sommerhalbjahr. Während die Niederschlagsmenge und auch die Anzahl der Regentage von Westen nach Osten abnimmt, verhält es sich mit der potentiellen Verdunstung, aufgrund des zunehmenden kontinentalen Einflusses, umgekehrt. Durch höhere Temperaturen und stärkere Strahlung liegen die Jahresverdunstungswerte in Ostdeutschland durchschnittlich 150 l/m² höher (Sourell, et al., 2010). Demzufolge ist der Osten des Landes gegenüber dem Westen klimatisch benachteiligt. Auch die Höhenlage ist entscheidend für die Niederschlagsmenge. In den Alpen ist die Niederschlagsmenge etwa doppelt so hoch wie in den flachen Ebenen. Obendrein entstehen hinter Gebirgszügen Regenschattengebiete, die das Niederschlagsverhalten zusätzlich differenzieren. Die Menge des Niederschlages der Jahre 1981 bis 2010 hat sich im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 um etwa 10 % erhöht. Davon waren insbesondere die Wintermonate (+26%) betroffen, wohingegen im Sommer kaum Veränderungen erkannt wurden. Zudem ist in den letzten 15 Jahren ein deutlicher Rückgang der Frühjahrsniederschläge (März bis Mai) beobachtet worden. Da im gleichen Zeitraum die Temperatur und somit die Verdunstung zunahm, ging die Bodenfeuchte zurück. Die klimatisch relevanten Niederschläge fallen oft als Schauer. Tage mit stärkeren Niederschlagsmengen über 10 mm pro Tag haben in den letzten 50 Jahren nachweislich zugenommen. Auch Trockenperioden, die durch 10 aufeinander folgende Tage ohne Niederschlag definiert werden, sind unter den heutigen klimatischen Verhältnissen keine Seltenheit mehr. Sowohl das IPCC, als auch der Deutsche Wetterdienst rechnen in Zukunft mit einer Zunahme der Anzahl und Intensität von Starkregenereignissen oder Extremereignissen, wie Überschwemmungen. Auch die Zunahme winterlicher Niederschläge wird sich fortsetzen. Der Sommer wird durch die Temperaturzunahme und der kaum veränderten Niederschläge trockener ausfallen. Ob die Trockenperioden im Frühjahr zunehmen werden, lässt sich derzeit nicht ermitteln. In der Summe wird für Deutschland ein leichter Anstieg der jährlichen Niederschläge prognostiziert (Böttcher, et al., 2016).

Für die Landwirtschaft werden die Niederschlagserhöhungen jedoch kaum Vorteile haben. Durch die zunehmende Verdunstung wird sich die klimatische Wasserbilanz in Deutschland nur wenig ändern. Entscheidend für den Pflanzenbau ist die Verteilung der Niederschläge während der Wachstumsphase. Insbesondere die zunehmenden Frühjahrs- und Sommertrockenheiten sorgen für niedrigere Erträge mit schlechteren Qualitäten. Bei Obst und Gemüse muss durch die schlechtere Wasserversorgung häufiger mit einem Totalausfall gerechnet werden. Insgesamt führt eine geringe Bodenfeuchte zu einer schlechteren Nährstoffverfügbarkeit, einem verringerten Humusaufbau, einem verminderten Wirkungsgrad von Pflanzenschutzmitteln und einer erhöhten Winderosionsgefahr. Im Spätsommer bis September werden zwar leicht zunehmende Niederschlagssummen erwartet, jedoch mit höherem Starkregenanteil. Extreme Regenereignisse können insbesondere im Zusammenhang mit Stürmen die Lagergefahr der Ernte erhöhen. Sowohl die Erntemengen, als auch die Qualitäten werden so zunehmend unsicherer (Brasseur, et al., 2017).

CO₂-Gehalt

Der erwartete Anstieg des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre wird unter den Klimaveränderungen die positivsten Auswirkungen auf den Pflanzenbau haben. Das Kohlendioxid bildet die Grundlage für die Assimilation der Pflanzen. Der darin enthaltene Kohlenstoff dient als Ausgangsprodukt für die organischen Syntheseprodukte, wie Zucker oder Stärke. Das Pflanzenwachstum und der atmosphärische CO₂-Gehalt sind daher eng miteinander verbunden (van Eimern & Häckel, 1984). C3-Pflanzen, wie die Getreidesorten, benötigen für ein optimales Wachstum eine höhere CO₂-Konzentration als die derzeitig gegebene. In Kurzzeitexperimenten zeigten Pflanzen, die unter erhöhter CO₂-Anteilen (im Mittel 567 ppm) wuchsen, eine Zunahme der Photosyntheserate. Dieser sogenannte CO₂-Düngeeffekt erklärt sich durch die kürzeren Spaltöffnungsphasen. Bei erhöhter CO₂-Konzentration benötigt die Pflanze eine kürzere Zeitspanne, um über die geöffneten Stomata die gleiche Menge Kohlendioxid aufzunehmen. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigender Temperatur (Köhler, et al., 2008).

C4-Pflanzen, wie Mais, haben einen CO₂-Konzentrationsmechanismus, wodurch die Kohlendioxidaufnahme ab einer atmosphärischen Konzentration von circa 200 ppm nahezu konstant verläuft. Daher reagiert Mais auf einer erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentration kaum mit einer gesteigerten Photosyntheserate, wohl aber mit abnehmender Verdunstung. Daraus resultiert eine verbesserte Wassernutzungseffizienz. Trockenheitsbedingte Ertragsverluste, insbesondere in den Sommermonaten, können dadurch teils kompensiert werden. Allerdings wird durch die geringere Verdunstung der Wasserstrom in der Pflanze gebremst und der Kühleffekt des Wassers gemindert. Die Temperatur der Blattoberflächen wird sich erhöhen, wodurch wiederum Ertragsminderungen folgen können. Insgesamt aber tolerieren die Kulturpflanzen unter höheren Kohlendioxidkonzentrationen Hitze besser als unter den heutigen CO₂-Anteilen (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Die Kohlendioxidbedingungen wirken sich weiterhin auf die Inhaltsstoffe der Ernteprodukte aus. Bei Getreide, das unter erhöhtem Kohlendioxidanteil wuchs, wurde ein um 10 bis 15 % geringerer Stickstoffanteil in den Körnern gemessen (van Eimern & Häckel, 1984). Die positive Wirkung des Kohlendioxidgehaltes kann jedoch nur unter künstlichen Umweltbedingungen, zum Beispiel in Gewächshäusern, getestet werden. Inwieweit sich der CO₂-Düngeeffekt auch unter Feldbedingungen auswirkt, hängt erheblich von der Witterung, der Nährstoff- und Wasserversorgung, sowie den Sorteneigenschaften der Pflanze ab (Böttcher, et al., 2016).

Auswirkungen auf Schadorganismen und Nützlinge

Weitere Akteure, die stark von den Klimafaktoren beeinflusst werden, sind die Schadorganismen. Zu ihnen zählen Bakterien, Pilze, Viren, Insekten und Unkräuter. Die Witterung bestimmt zum einen die Aktivität der Schädlinge, zum anderen die Anfälligkeit der Wirtspflanze. Daher können, infolge der Klimaveränderungen, Krankheiten an Pflanzen verstärkt oder gemindert auftreten. Zudem können bestehende Schadorganismen aus Gebieten verschwinden und neue erscheinen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das gesamte Bild der Schadorganismen kann man nur schwer messen oder bewerten. Das komplexe Zusammenspiel zwischen Schädlingen und Wirt, zwischen Schädling und Nützlichling, sowie den Schädlingen untereinander ist durch Zukunftsmodelle nicht kalkulierbar. Es wird angenommen, dass agronomische Faktoren, wie die Bodenbearbeitung oder die Fruchtfolge, größeren Einfluss auf die Schädlingsentwicklung haben als die Klimaänderungen (Brasseur, et al., 2017).

Ferner sind auch Effekte der Nützlinge der Landwirtschaft vom Klimawandel betroffen. Die Pflanzenentwicklung ist vor allem durch Wärmesummen determiniert, wohingegen bestäubende Insekten vorrangig auf Licht reagieren. Durch den Klimawandel verschiebt sich die entscheidende Blütenphase der Pflanzen zeitlich nach vorne. Hier stellt sich die Frage, ob die Insekten auf die veränderten Klimabedingungen reagieren können und ihre Aktivität früher im Jahr aufnehmen oder von Tieren aus südlicheren Regionen verdrängt werden (Lütke Entrup & Oehmichen, 2006).

Zusammenfassung

Nach Gröbmaier (2012) sind durch den Klimawandel für den europäischen Raum leicht positive Ertragseffekte zu erwarten. Vom CO₂-Düngeeffekt werden vor allem C3-Pflanzen profitieren. Wird sich jedoch eine Temperaturerhöhung von über 2 °C einstellen, ergeben sich für eine Vielzahl der Kulturen negative Folgen. Sowohl die Erträge als auch die Qualitäten werden sinken. Die Auswirkungen werden regional sehr heterogen auftreten. Während die trockenen und kontinental geprägten Gebiete Ostdeutschlands durch zunehmenden Hitzestress und Wassermangel eher zu den Verlierern des Klimawandels zählen werden, könnten die maritimen nördlichen Gebiete, sowie einige Höhenlagen durchaus profitieren. Für wärmeliebende Kulturen wie Mais werden sich die Anbaugrenzen nach Norden verschieben. Gröbmaier (2012) rechnet mit einer 40 bis 50 % höheren potentiellen Anbaufläche. Insgesamt werden die Erträge aller Kulturen, sowohl jährlich als auch regional, einer stärkeren Variabilität unterliegen.

Anpassungsmaßnahmen an die klimatischen Veränderungen

Trotz der großen Abhängigkeit von der Witterung bieten sich dem Landwirt diverse Möglichkeiten, um auf veränderte klimatische Bedingungen zu reagieren. Die Wahl der Anpassungsmaßnahmen entscheidet darüber, wie stark die Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft ausfallen, beziehungsweise welche Vorteile daraus genutzt werden können. Das Spektrum an Maßnahmen ist groß und umfasst sowohl Einzelentscheidungen, als auch das gesamtbetriebliche Management. Bereits bei der Anbauplanung gilt es, klimatisch geeignete Kulturen und Sorten auszuwählen. Es sollte zunehmend auf eine hohe Trockenheits- und Hitzeresistenz geachtet werden (Kühne, 2016). Desweiteren müssen die Aussaattermine, die Saatchichten und die Reihenabstände den Klimabedingungen angeglichen werden. Letztere sollten vornehmlich an die Wasserverfügbarkeit angepasst werden (Häckel, 2016).

Neue Techniken, wie Wetter- und Bodensensoren, sowie Techniken des Precision Farmings können dem Landwirt Informationen zur Verfügung stellen, um schneller und direkter Einfluss auf die Bestandesführung zu nehmen. Im Bereich der Produktionstechnik kann durch eine konservierende Bodenbearbeitung die Evaporation reduziert und mehr Wasser im Boden gespeichert werden. Eine Verbesserung des Humusgehaltes erhöht die Wasserspeicherkapazität und schützt den Boden zusätzlich vor Erosion, was durch die zunehmenden Starkniederschlagsereignisse mehr Beachtung finden muss. Die umfassendste und wirkungsvollste Maßnahme zur Sicherstellung der Wasserversorgung der Pflanzen ist die Feldberegnung. Hierbei sollten jedoch die erheblich anfallenden Kosten gegenüber dem Nutzen verglichen werden. Künftig sollte dem Risikomanagement größere Beachtung geschenkt werden. Durch die Zunahme der Ertragsvariabilität wird die Liquidität und Stabilität der landwirtschaftlichen Betriebe gefährdet. Um sich vor Extremwetter Szenarien wie Hagel zu schützen, empfehlen sich Ernteversicherungen. Neuerdings werden auch Wetterderivate zum Schutz vor Witterungsrisiken angeboten. Die Leistungen der Wetterderivate beziehen sich

nicht, wie bei den herkömmlichen Ernteversicherungen, auf den Ertragsausfall, sondern alleine auf klimatische Parameter, wie Temperatur oder Niederschlag. Werden gewisse Schwellenwerte der Indikatoren über- oder unterschritten, wird ein Ausgleich gezahlt, unabhängig vom erzielten Ertrag. Aus dem breiten Portfolio an Risikomanagementmaßnahmen sollte letztlich betriebsindividuell, je nach Risikoeinstellung des Betriebsleiters, die optimale Anpassung an die gestiegenen Risiken ausgewählt werden (Gröbmaier, 2012).

3.4. Klimaveränderungen Strenzfeld

Im Folgenden soll speziell auf die Klimaveränderungen des Versuchsstandortes eingegangen werden. Falk Böttcher, Mitarbeiter des Deutschen Wetterdienstes und einer der Autoren des Nationalen Klimaberichtes (Böttcher, et al., 2016), befasste sich im Jahr 2012 in seiner Masterarbeit mit der agrarmeteorologischen Auswertung des Standortes Bernburg-Strenzfeld. Hierbei wurden die Veränderungen der klimatischen Randbedingungen anhand ausgewählter Parameter der dreißigjährigen Referenzperioden 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010 dargestellt (Böttcher, 2012).

Tabelle 3: Klimaparameter der Referenzperioden 1961-1990 und 1981-2010 am Standort Bernburg-Strenzfeld (Böttcher, 2012)

Klimaparameter:	1961 - 1990	1981 - 2010	Differenz
Mittlerer Jahresniederschlag	464,2 mm	511,1 mm	+46,9 mm
Jahresmitteltemperatur	9,1 °C	9,7 °C	+ 0,6 °C
Mittlere Kältesumme des Winters	174,1 °C	134,8 °C	-39,3 °C
Mittlere Dauer der thermischen Vegetationsperiode	244 Tage	254 Tage	+ 10 Tage
Mittlere Anzahl der Sommertage	35 Tage	45 Tage	+ 10 Tage
Mittlere Anzahl der Heißen Tage	6 Tage	10 Tage	+ 4 Tage
Mittlere Jahressonnenscheindauer	1482,7 Stunden	1650,7 Stunden	+ 168 Stunden

Der zuvor beschriebene Trend der Klimaveränderungen in Deutschland zeigt sich auch am Standort Bernburg-Strenzfeld. Alle ausgewählten Parameter zeigen eine deutliche Veränderung zu wärmeren Bedingungen. Der mittlere Jahresniederschlag hat sich um 10 % auf 511,1 mm erhöht. Bei monatlicher Betrachtung zeigt sich bei neun Monaten eine Zunahme der Niederschläge, insbesondere in den Herbst- und Wintermonaten. Sowohl die Jahresmitteltemperatur, als auch die mittlere Kältesumme, welche die Summe der negativen Tagesmitteltemperaturen im Winter darstellt, zeigen eine durchschnittliche Erwärmung. Folglich hat sich auch die Anzahl der Ereignistage gewandelt. Die thermische Vegetationsperiode, in der die mittlere Lufttemperatur von 5 °C dauerhaft überschritten wird, hat sich um 10 Tage verlängert. Der Sommer ist anhand der Kriterien Sommertage (Tagesmaximaltemperatur über 25 °C) und heißer Tage (Tagesmaximaltemperatur über 30 °C) merklich wärmer geworden. Mit den steigenden Temperaturen haben auch die täglichen Sonnenstunden um 11 % zugenommen.

4. Material und Methoden

Im Folgenden Kapitel sollen die Klimaveränderungen am Standort Bernburg-Strenzfeld und deren Auswirkungen auf den Körnermaisertrag ermittelt werden. Die Untersuchung basieren auf langjährigen Klimadaten der Wetterstation Bernburg-Strenzfeld und Klimamodellen des Deutschen Wetterdienstes, sowie Daten des Bodenbearbeitungsversuches „Westerfeld“ der Hochschule Anhalt.

Als Vorbetrachtung der in der vorliegenden Arbeit dargestellten und ausgewerteten Ergebnisse soll zunächst auf die örtlichen Gegebenheiten des Versuchsstandortes Bernburg-Strenzfeld, sowie auf den Aufbau und die Durchführung des Bodenbearbeitungsversuches am „Westerfeld“ eingegangen werden. Weiterhin wird der Umfang der Klimadaten und der Klimamodelle des Deutschen Wetterdienstes erläutert.

Anschließend wird eine Klimareferenzperiode für die Versuchsjahre 2004 bis 2016 erstellt um diese mit der in Böttcher (2012) angegebenen Referenzperioden der Jahre 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010, sowie die in den Klimamodellen angegebenen Referenzperiode der Jahre 2031-2060 zu vergleichen. In der darauffolgenden Extremwertanalyse werden die Erträge der Versuchsjahre 2004 bis 2016 dargestellt und besonders negative Erträge selektiert. Für diese wird untersucht, welche Klimaparameter für den Minderertrag verantwortlich gewesen sein könnten. Die Multiple Regressionsanalyse soll letztlich den statistischen Zusammenhang zwischen den Klimafaktoren und den Körnermaiserträgen bestimmen und unter Zuhilfenahme der Klimavariablen aus den Klimamodellen die Änderung der Körnermaiserträge für die Zukunft ermittelt. Als Anhaltspunkt dient hier die Auswertung in der Dissertation von Gröbmaier (2012).

Zur Auswertung und Darstellung wird die Standardsoftware Microsoft® EXCEL® verwendet. Bei der Regressionsanalyse ist zusätzlich ein Excel® Business-Tool im Einsatz, welches sowohl die Regressionsgleichung, als auch die statistischen Parameter bestimmt.

4.1. Standortbeschreibung und Versuchsaufbau

Die im Folgenden betrachteten Körnermaisenerträge stammen von Versuchsergebnissen der Hochschule Anhalt am Standort Bernburg-Strenzfeld in Sachsen-Anhalt. Das Versuchsgelände der Hochschule befindet sich am Südrand der Magdeburger Börde und unterliegt dem Einfluss des Harzer Regenschattens. Die Höhe beträgt durchschnittlich 80 m über NN.



Abbildung 3: Lage des Versuchsstandortes Bernburg-Strenzfeld in Deutschland (Hs Anhalt, 2012)

Der Bördestandort verfügt über fruchtbare Lössschwarzerde aus schluffigem Lehm, mit Übergängen zur Pararendzina, deren Bodenwertzahl zwischen 86 und 100 Punkten beträgt. Die Bodenauflage über dem Kalkgestein ist mit 70 bis 120 cm gering. Bei einer durchschnittlichen Auflage von einem Meter ergibt sich eine FK von 260 mm, wovon 220 mm nutzbar sind. Der Humusgehalt liegt zwischen 2,5 und 3,0 %, bei einem C/N-Verhältnis von 10 zu 1 und einem leicht basischen pH-Wert von 7,5 (Orzessek, et al., 2016).

Die vorliegenden Ertragsdaten wurden auf dem Versuchsfeld „Westerfeld“, südwestlich des Hochschulgeländes erhoben. Es handelt sich um einen Bodenbearbeitungsversuch mit Parzellen von jeweils 1,2 Hektar (ha) Größe. Dieser wurde 1992 angelegt und 2004 digitalisiert. In der fünfgliedrigen Fruchtfolge dient Winterweizen dem Körnermais als Vorfrucht. Darauf folgt erneut Winterweizen, sowie Wintergerste und Winterraps. Die Koppelprodukte verbleiben jedes Jahr auf dem Feld.

Die Nährstoffgehalte des Bodens liegen weitestgehend im anzustrebenden bis leicht erhöhtem Bereich. Die Grunddüngung für Phosphor und Kalium erfolgt in der Regel alle zwei Jahre. Kupfer, Zink und Phosphor (P_2O_5) sind in der mittleren Gehaltsklasse C im Boden enthalten. Kalium ist der Gehaltsklasse D eingeordnet und damit im leicht erhöhtem Bereich. Bor und Magnesium entsprechen der Gehaltsklasse E. Lediglich der Mikronährstoff Mangan ist mit der Gehaltsklasse A sehr niedrig eingestuft (Orzessek, et al., 2016)

Großparzelle

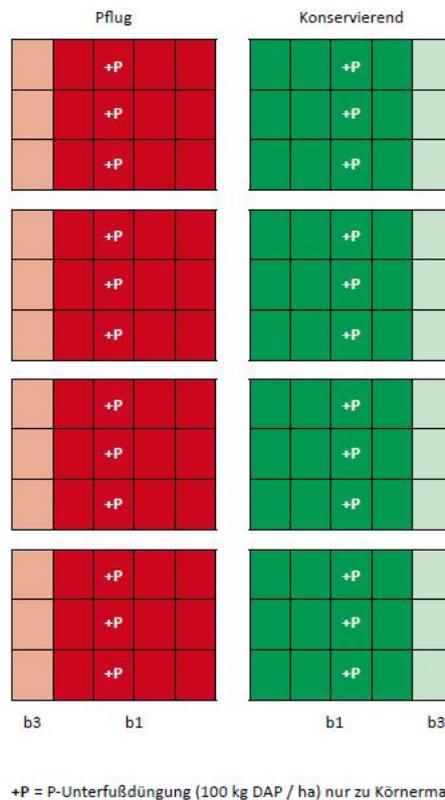


Abbildung 4: Aufbau des Großparzellenversuches „Westerfeld“ (Orzessek, et al., 2016)

Der Versuch ist unterteilt in die Varianten der konventionellen, wendenden Bodenbearbeitung, sowie der konservierenden Bodenbearbeitung mit dem Grubber. Als weiteren Faktor wurde eine extensive und intensive Düngungsvariante, sowie eine Unterfußdüngung angewandt. In der Auswertung wird jedoch nur die intensive Düngungsvariante berücksichtigt.

4.2. Versuchsdaten

Die in den folgenden Kapiteln untersuchten Klimadaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt. Insgesamt umfasst der Datensatz die Messjahre 1961 bis 2016. Für die Temperatur liegen Tageswerte der Durchschnitts-, Maximal- und Minimallufttemperaturen aus zwei Metern Höhe über der Bodenoberfläche vor. Zusätzlich wurden ab dem Jahr 1975 die Minimaltemperaturen in 5 cm Höhe über dem Erdboden gemessen. Alle Angaben erfolgen in Grad Celsius (°C). Desweiteren sind Tagesniederschlagssummen in Liter pro Quadratmeter (l/m²), die durchschnittliche relative Feuchte in Prozent (%) und die tägliche Sonnenscheindauer in Stunden (h) vorhanden. Durch Übernahmen der Station, sowie Änderungen im Zuge der Deutschen Einheit, sind geringfügige Datenlücken entstanden, davon die größte im Jahr 1971. Die Zeiträume der Datenlücken fallen jedoch nicht in die zu analysierenden Ertragsjahre und werden nur zur Untersuchung der langjährigen Klimaveränderungen verwendet. Durch einen Vergleich mit den geschlossen vorliegenden Daten der Stationen Magdeburg und Halle-Kröllwitz, beziehungsweise für die Niederschläge der Stationen Baalberge, Brumby und Neugattersleben, wurde der Datensatz vervollständigt. Für die

durchschnittlichen Klimadaten sollte dies keine nennenswerten Auswirkungen nach sich ziehen. In der Excel®-Datei der Klimadaten wurden die ersetzten Werte gekennzeichnet.

Für die Analyse der möglichen Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Maisertrag stehen Daten aus drei verschiedenen regionalisierten Klimamodellen des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung. Diese wurden im Rahmen der Masterarbeit über die agrarmeteorologische Beschreibung des Standortes Bernburg-Strenzfeld (Böttcher, 2012) vom Autor zusammengetragen. Es handelt sich um die Klimamodelle WETTREG (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode), CLM (Climate Local Modell) und REMO (Regional Modell). Während das WETTREG Klimamodell auf statistische Zusammenhänge zwischen den Beobachtungen von Klimavariablen zurückzuführen ist, beschreiben die Klimamodelle CLM und REMO dynamische Vorgänge in der Atmosphäre durch nichtlineare Gleichungssysteme (Umweltbundesamt, 2013). Alle Modelle beruhen auf dem gleichen globalen Zirkulationsmodell der Atmosphäre mit dem eingesetzten Emissionsszenario A1B. Letzteres wurde durch den IPCC festgelegt und beschreibt eine Welt mit einem starken ökonomischen Wachstum und einer Bevölkerungszunahme bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (Böttcher, et al., 2016). Da für den Versuchsstandort beim Deutschen Wetterdienst keine expliziten Daten vorliegen, basieren die Klimaprojektionen auf gewichteten Mittelwerten der Klimaprojektionsdaten der Standorte Magdeburg, Wittenberg und Bad Lauchstädt. Für jedes der drei regionalisierten Klimamodelle (WETTREG, CLM und REMO) wurde eine Klimanormalperiode der Jahre 2031 bis 2060 erstellt. Diese umfassen folgende Monatsdurchschnittswerte:

- Lufttemperaturmittel (in °C)
- Niederschlagshöhe (in l/m²)
- Anzahl der Sommertage (Tagesmaximaltemperatur ≥ 25 °C)
- Anzahl der heißen Tage (Tagesmaximaltemperatur ≥ 30 °C)

Aus dem Großparzellenversuch am „Westerfeld“ liegen die Daten der Versuchsjahre 2004 bis 2016 vor. Relevante Daten wie Aussaat- und Erntetermine, sowie die Sortenbezeichnungen wurden in Arbeitskalendern erfasst. Die Sorten wurden alle zwei bis vier Jahre gewechselt. Die Reifezahlen der Sorten variieren zwischen K200 und K260 mit einem Durchschnitt von K220. Die Körnermaiserträge wurden für jede Parzelleneinheit in Dezitonnen pro Hektar (dt/ha) mit einer Trockenmasse von 86 % angegeben.

Alle Ausgangsdaten sind digital im Anhang hinterlegt.

4.3. Berechnung der Klimareferenzperiode 2004-2016

Um die klimatischen Bedingungen der Versuchsjahre mit Werten der Vergangenheit und der Zukunft vergleichen zu können, soll zunächst eine Referenzperiode erstellt werden. Der Umfang dieser Referenzperiode richtet sich an die in den Klimamodellen angegebenen Klimaparameter (Vgl. Kapitel 4.2.).

Aus den Tageswerten der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes werden zunächst die nötigen Parameter Mitteltemperatur, Maximumtemperatur und Niederschlag der Jahre 2004 bis 2016 herausgefiltert.

Für die Mitteltemperatur wird aus allen Tageswerten aller Versuchsjahre für jeden Monat über die Excel®-Funktion MITTELWERT eine Durchschnittstemperatur ermittelt. Um später die Berechnungen zu erleichtern, wird zusätzlich über die Funktion SUMME eine mittlere Monatstemperatursumme bestimmt. In gleicher Weise bilden sich die durchschnittlichen Niederschlagssummen.

Formel 1: Berechnung der monatlichen Temperatursumme (Ts)

$$Ts = \sum_{i=1}^n Temp_d$$

mit:

- Ts = Temperatursumme
- $Temp_d$ = Tagesmitteltemperatur
- n = Anzahl der Tage eines Monats

Formel 2: Berechnung der monatlichen Niederschlagssumme (Ns)

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

mit:

- Ns = Niederschlagssumme
- N_d = Tagesniederschlag
- n = Anzahl der Tage eines Monats

Die Anzahl der Sommertage sind durch das Erreichen oder Überschreiten einer Tagesmaximaltemperatur von 25 °C definiert. Sie werden mittels der Funktion ZÄHLENWENN aus den Maximaltemperaturen für jeden Monat eines jeden Jahres gezählt.

Formel 3: Berechnung der monatlichen Anzahl an Sommertagen (AnzST)

$$Anz(ST) = \sum_{i=1}^n T_{max_d} \geq 25^{\circ}C$$

mit:

- $Anz(ST)$ = Anzahl der Sommertage
- T_{max_d} = Tagesmaximaltemperatur
- n = Anzahl der Tage eines Monats

Gleichermaßen wird die Anzahl der heißen Tage bestimmt, deren Grenzwert bei 30 °C erreicht ist.

Formel 4: Berechnung der monatlichen Anzahl heißer Tage (AnzHT)

$$Anz(HT) = \sum_{i=1}^n T_{max_d} \geq 30^{\circ}C$$

mit:

- $Anz(HT)$ = Anzahl der heißen Tage
- T_{max_d} = Tagesmaximaltemperatur
- n = Anzahl der Tage eines Monats

Für alle Parameter wird zusätzlich ein Jahresdurchschnitt über die Funktion MITTELWERT, beziehungsweise eine Jahressumme mit der Funktion SUMME berechnet

4.4. Vergleich der Versuchsjahre mit den Klimareferenzperioden und Klimamodellen

Im Folgenden soll das Klima der Versuchsjahre in den zeitlichen Verlauf zwischen der Vergangenheit und der Zukunft eingeordnet werden. Dies dient zum einen dem Vergleich der Klimaveränderungen am Standort Bernburg-Strenzfeld mit den bundesweiten Klimaveränderungen in der Literatur, zum anderen können die Ergebnisse der folgenden Ertrags-simulation durch die Klimamodelle besser bewertet werden.

Für den Vergleich der Versuchsjahre mit der Vergangenheit werden in Anlehnung an die Auswertung von Böttcher (2012) die selben Parameter (Mitteltemperatur, Niederschlags-summe und die Anzahl der Sommertage und heißen Tage) für die Referenzperioden 1961 bis 1990, sowie 1981 bis 2010 erstellt. Die nötigen Klimadaten werden aus dem Datensatz des DWD entnommen und die Parameter nach den selben Methoden, die in Kapitel 4.3 Anwendung fanden, ermittelt.

Die Referenzperioden und die Klimamodelle CLM, REMO und WETTREG wurden untereinander in der Arbeit von Böttcher (2012) bereits hinreichend verglichen. Daher soll in der folgenden Betrachtung vorwiegend auf die Differenzen der Durchschnittswerte der Versuchsjahre mit den jeweiligen Referenzperioden und Klimamodellen eingegangen werden.

Zur Darstellung werden die monatlichen Mittelwerte der Klimareferenzperioden 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010, sowie der Klimamodelle CLM, REMO und WETTREG jeweils von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre aus Kapitel 4.3 subtrahiert und die Differenzen in einem Diagramm dargestellt und verglichen.

Nach Durchsicht der Arbeitskalender lagen die Aussaattermine in den Ertragsjahren zwischen dem 17. und 25. April. Geerntet wurde frühestens am 22. September und spätestens am 21. Oktober. Zur besseren Übersicht werden die zu analysierenden Daten auf den Vegetationszeitraum der Monate April bis Oktober reduziert.

4.5. Extremwertanalyse

Durch die Extremwertanalyse sollen die Ertragsschwankungen der Versuchsjahre dargestellt, und Missernten mit besonders niedrige Erträge identifiziert werden. Anschließend soll der klimatische Verlauf in den Misserntejahren untersucht werden, um zu überprüfen, ob sich bereits anhand weniger Klimaindikatoren meteorologische Gründe für die geringen Erträge erkennen lassen.

Die Einflüsse der Bodenbearbeitung und der Unterfußdüngung sollen nicht berücksichtigt werden. Daher werden zunächst die Erträge der Parzellen der intensiven Düngungsvariante herausgefiltert und für jedes der Ertragsjahre 2004 bis 2016 der mittlere Ertrag über die Excel®-Funktion MITTELWERT bestimmt. Über die gleiche Funktion wird der mittlere Ertrag aller Versuchsjahre erstellt. Zusätzlich wird die Standardabweichung der Stichprobe über die Excel®-Funktion STABW berechnet.

Anschließend werden die Differenzen der einzelnen Ertragsjahre zum mittleren Ertrag über Subtraktion ermittelt und in einem Diagramm dargestellt. Besonders negative Abweichungen werden nach Gröbmaier (2012) mit dem 10. Perzentil ermittelt. Das Perzentil ist ein Streuungsmaß, welches geordnete Datenreihen in zwei Gruppen einteilt. So zeigt das 10. Perzentil jenen Schwellenwert, bei dem 10 % aller Ergebnisse kleiner und 90 % der Ergebnisse größer sind. Das 10. Perzentil der Datenreihe wurde über die Funktion QUANTIL ermittelt und als Grenzwert im Diagramm hinterlegt.

Die identifizierten Misserntejahre sollen anhand der selben Indikatoren der Referenzperiode bewertet werden, um mögliche klimatischen Gründe für die geringen Erträge darzustellen. Dazu werden die monatlichen Werte der Parameter Mitteltemperatur, Niederschlagssumme, Anzahl Sommertage und Anzahl heiße Tage der ermittelten Misserntejahre herausgefiltert und deren Abweichungen von den in Kapitel 4.3 kalkulierten Mittelwerten aller Versuchsjahre errechnet und dargestellt.

4.6. Multiple Regressionsanalyse

Methodik

Die Multiple Regressionsanalyse stellt eine Beziehung zwischen einer abhängigen Variablen, in diesem Fall der Ertrag, und zwei oder mehr unabhängigen Variablen, hier die Klimaparameter, her. Ziel dieser Regressionsanalyse ist die möglichst vollständige Beschreibung der Abhängigkeit des Ertrages von den Klimavariablen mit einer Funktion.

Setzt man den Zusammenhang als linear voraus, wird der Ertrag im Regressionsmodell durch folgende Regressionsgleichung beschrieben:

Formel 5: Lineare Regressionsgleichung

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 \dots + \beta_n \times x_n + \varepsilon$$

mit:

\hat{y} = abhängige Variable oder Zielvariable

β_0 = Regressionskonstante

β_i = Regressionskoeffizient (i=1,2,...,n)

x_i = unabhängige Variable (i=1,2,...,n)

ε = Standardfehler

Der Ertrag ist hierbei durch die abhängige Kriteriumsvariable (\hat{y}) beschrieben, während die Klimaelemente die unabhängigen Prädiktorvariablen (x_i) darstellen. Die Regressionskonstante (β_0), sowie die Regressionskoeffizienten (β_i) werden durch das Excel®-Tool über die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (Universität Zürich, 2017). Der Standardfehler (ε) definiert das Residuum des Regressionsmodells.

Aufbereitung der Klimavariablen

Es sollen später durch die Klimamodelle die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Ertrag bestimmt werden. Daher müssen die Klimavariablen sowohl aus den Klimadaten der Versuchsjahre 2004 bis 2016, als auch den Daten der Klimamodelle ermittelt werden können. In diesem Fall begrenzen die Klimamodelle die Auswahl der Klimavariablen auf die Monatswerte der Mitteltemperatur, des Niederschlages, sowie der Anzahl der Sommertage und heißen Tage.

Um eine breitere Palette an Zeiträumen zu erhalten, werden zusätzlich zu den monatlichen Werten jeweils zweimonatige Durchschnitts- oder Summenwerte aggregiert. Anschließend erfolgt dies für einen drei- und viermonatigen Zeitraum, sowie für die Vegetationszeit von April bis Oktober. Für den Niederschlag wird zusätzlich eine Summe der Monate Januar bis März, sowie Januar bis Oktober ermittelt, um das Bodenwasser vor der Aussaat und das gesamte, dem Boden zugeführte und für den Mais potentiell zur Verfügung stehende, Niederschlagswasser zu beschreiben.

Zusammenfassend ergeben sich aus der Aufbereitung der Klimaparameter folgende Variablen und Zeiträume für das Regressionsmodell:

Tabelle 4: Mögliche Variablen des Regressionsmodells (Eigene Darstellung)

Variable:	Zeiträume:
<ul style="list-style-type: none"> • Durchschnittstemperatur (Temp) oder Temperatursumme (Ts) • Niederschlagssumme (Ns) • Anzahl Sommertage (AnzST) • Anzahl heiße Tage (AnzHT) 	<ul style="list-style-type: none"> • monatlich • zwei-, drei-, viermonatlich • Vegetationszeitraum (April-Oktober) • Januar bis März (nur Ns) • Januar bis Oktober (nur Ns)

Auswahl der Klimavariablen

Nach der Aufbereitung der Klimavariablen steht nun eine Vielzahl an Variablen zur Verfügung. Aus denen muss diejenige Kombination ausgewählt werden, die den Ertrag in der Regressionsgleichung mit größtmöglicher Genauigkeit beschreibt.

Einige Variablen können bereits nach Durchsicht der Literatur und unter Betrachtung der Parameterwerte ausgeschlossen werden. So werden beispielsweise die Werte der Monate Januar bis März, sowie November und Dezember nicht berücksichtigt, da diese außerhalb des Vegetationszeitraumes liegen und keinen direkten Einfluss auf die Entwicklung des Körnermais ertrages nehmen. Ausgenommen sind hier die Niederschlagssummen vor dem Vegetationszeitraum. Wie aus der Literatur ersichtlich reagiert der Körnermais insbesondere in und um die Zeit der Blüte umweltsensibel. Daher soll die Auswahl der Parameter vorwiegend auf die Monate Mai bis August fallen.

Für die endgültige Bestimmung der Klimavariablen wird eine stufenweise Regression angewendet. Die Variablen werden dabei sequenziell in das Modell aufgenommen. Ausschlaggebend für die Aufnahme in das Modell sind die folgenden statistischen Kriterien:

- F-Test
- Multikollinearität
- Bestimmtheitsmaß (R^2)
- Standardfehler (ϵ)

Der F-Test prüft das Regressionsmodell auf Signifikanz. Es wird untersucht, ob das geschätzte Modell auch über die Stichprobe hinaus für die Grundgesamtheit Gültigkeit besitzt (Schäfer, 2009). Je nach Größe der Stichprobe und Anzahl der Variablen ergibt sich ein individueller Grenzwert, der 95 % der Grundgesamtheit darstellt. Wird dieser unterschritten, ist das Modell nicht signifikant. Die Multikollinearität bestimmt das Maß, inwieweit die unabhängigen Variablen untereinander korrelieren. Es wird getestet, zu welchem Anteil eine unabhängige Variable durch die lineare Funktion einer anderen unabhängigen Variablen beschrieben wird. Eine gewisse Korrelation unter den Variablen lässt sich nicht vermeiden, jedoch sollte der Grenzwert von 90 % nicht überschritten werden. Liegt eine große Multikollinearität vor, sollte eine Variable aus dem Modell entfernt und gegebenenfalls ersetzt werden (Universität Zürich, 2017).

Letztlich zeigt das Bestimmtheitsmaß, wie gut das geschätzte Modell zu den erhobenen Daten passt. Es ist als Anteil der durch die Regressionsfunktion erklärten Streuung an der gesamten Streuung der abhängigen Größe (\hat{y}) definiert (Grunert, 2014). Im dargestellten Fall

gibt das Bestimmtheitsmaß also an, wie viel Prozent der Streuung des Ertrages durch die Klimavariablen erklärt werden kann. Es sollten mindestens 50 % erreicht werden, um von einem statistischen Zusammenhang sprechen zu können und das Modell zu validieren. Je größer das Bestimmtheitsmaß, desto kleiner ist auch der Standardfehler der Schätzung. Dieser gibt die durchschnittliche Abweichung des geschätzten Ertrages aus dem Regressionsmodell von dem realen Ertrag an.

Bei der schrittweisen Selektion der Variablen, auch Vorwärts-Selektion genannt, wird zunächst mit allen Variablen eine Einfachregression durchgeführt. Davon wird diejenige unabhängige Variable als erstes in das Modell aufgenommen, welche am stärksten mit der abhängigen Variablen (dem Ertrag) korreliert. Im Anschluss daran wird jene unabhängige Variable eingefügt, die die Modellgüte (R^2) am meisten erhöht. Nach jeder neu eingefügten Variablen wird zusätzlich getestet, ob sich durch Eliminieren einer bereits im Modell vorhandenen Variablen das Bestimmtheitsmaß verbessert. Dabei ist stets die Signifikanz, sowie die Multikollinearität zu überprüfen. Dieser Prozess wird solange durchgeführt, bis diejenige Kombination an Klimavariablen gefunden ist, welche die größte Modellgüte (R^2) aufweist. Aus diesen Klimavariablen werden dann die Erträge der Versuchsjahre 2004 bis 2016 durch das Regressionsmodell berechnet. Die Ergebnisse werden von dem durchschnittlichen Ertrag der Versuchsjahre subtrahiert, wie es in Kapitel 4.5 bereits für die realen Erträge erfolgt ist. Anschließend werden die Ertragsanomalien des Regressionsmodells und der realen Erträge in einem Diagramm dargestellt und verglichen.

Transformation der Klimavariablen

Mittels der Variablentransformation soll versucht werden, das Regressionsmodell weiter zu verbessern. In der bisherigen Auswertung wurde der Einfluss der Klimavariablen als linear vorausgesetzt, was jedoch nicht immer der Realität entspricht. Die Variablen können beispielsweise einen degressiven Zusammenhang mit dem Ertrag aufweisen. Hierbei wird der Ertrag bei einem niedrigen Variablenwert stark beeinflusst. Der Ertragszuwachs nimmt dann mit zunehmender Größe der Variable ab. Wenn dagegen der Einfluss auf den Ertrag am Anfang gering ausfällt und sich mit zunehmender Größe der Variable verstärkt, besteht ein progressiver Zusammenhang.

Im Folgenden soll daher untersucht werden, ob die Klimavariablen einen degressiven, progressiven oder linearen Einfluss auf den Ertrag haben. Hierfür müssen die Werte der Variablen transformiert werden. Für einen progressiven Verlauf können die Prädiktoren quadriert (x^2) werden. Der degressive Zusammenhang wird dagegen durch den natürlichen Logarithmus ($\ln(x)$) ausgedrückt (Universität Zürich, 2017).

Die Werte der Klimavariablen werden nacheinander, jeweils quadriert oder logarithmiert, in das Regressionsmodell eingesetzt. Dabei werden die Änderungen der statistischen Kriterien (Bestimmtheitsmaß, Standardfehler, F-Test und Multikollinearität) beobachtet und weiterhin überprüft, ob sich durch das Eliminieren oder Hinzufügen einer Variablen die Modellgüte verbessert.

Um nachfolgend einen Vergleich des Regressionsmodells mit den gemessenen Erträgen anstellen zu können, sollen die Anomalien der modellierten und realen Erträge in einem Diagramm dargestellt und verglichen werden.

4.7. Simulation der Ertragsentwicklung durch die Klimamodelle

Im letzten Abschnitt der Analyse werden die durchschnittlichen Erträge für die Jahre 2031 bis 2060 aus den Daten der Klimamodelle und der ermittelten Ertragsgleichung des Regressionsmodells simuliert. Hieraus sollen Aussagen über den Einfluss des Klimawandels auf den Ertrag abgeleitet werden.

Dazu werden zunächst die nötigen Klimavariablen und ihre Zeiträume, die in Kapitel 4.6 ermittelt wurden, aus dem Datensatz der Klimamodelle berechnet und in einer Tabelle mit den Mittelwerten der Versuchsjahre verglichen. Abschließend werden jene Klimavariablen in die Gleichung des Regressionsmodells eingesetzt und die jeweiligen mittleren Erträge der Klimamodelle berechnet.

5. Ergebnisse

5.1. Ergebnisse der Klimareferenzperiode 2004-2016

Aus den Klimadaten wurden die Mittelwerte der Parameter Mitteltemperatur, Niederschlags-summe, Anzahl der Sommertage und Anzahl der heißen Tage für den Zeitraum der Jahre 2004 bis 2016 berechnet. Die Klimareferenzperiode der Versuchsjahre setzt sich daher aus den folgenden Werten zusammen:

Tabelle 5: Monatsdurchschnittswerte verschiedener Klimaparameter in den Versuchsjahren 2004 bis 2016 (Eigene Berechnung)

	Mitteltemperatur (°C)	Niederschlags-summe (mm)	Anzahl Sommer-tage	Anzahl heiße Tage
Januar	1,0	39,2	0,0	0,0
Februar	1,6	23,5	0,0	0,0
März	4,9	26,7	0,0	0,0
April	10,1	28,1	1,1	0,1
Mai	13,7	66,3	4,2	0,5
Juni	17,0	47,2	9,4	2,6
Juli	19,7	79,2	18,5	7,0
August	18,7	61,9	15,2	3,5
September	15,3	58,1	6,5	1,2
Oktober	10,2	34,9	0,3	0,0
November	5,8	42,9	0,0	0,0
Dezember	2,5	30,4	0,0	0,0
Jahr	10,0	538,4	55,3	14,9

Der wärmste und zugleich auch regenreichste Monat der Versuchsjahre war der Juli. Zudem fiel der Mai, sehr feucht aus. Die Monate Februar bis April wiesen wiederum den geringsten Niederschlag auf. Von den Sommertagen entfielen etwa zwei Drittel auf die Monate Juli und August. In den beiden Monaten war durchschnittlich jeder zweite Tag ein Sommertag. Auch die heißen Tage lagen zumeist in diesem Abschnitt, davon am häufigsten im Juli. Sie waren frühestens im April und spätestens im September festzustellen.

5.2. Ergebnisse des Vergleiches der Versuchsjahre mit den Klimareferenzperioden und Klimamodellen

Die in den Versuchsjahren ermittelten Monats- und Jahreswerte der Klimaparameter wurden sowohl mit der Vergangenheit, als auch mit der Zukunft verglichen. Hierzu wurden zum einen die Klimareferenzperioden 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010 ermittelt, sowie die Daten der drei Klimamodelle CLM, REMO und WETTREG für die Jahre 2031 bis 2060 herangezogen. Nachfolgend werden die Abweichungen von den Klimaparametern der Versuchsjahre getrennt voneinander dargestellt.

Temperatur

Die Jahresdurchschnittstemperatur der Versuchsjahre ist mit 10,0 °C etwa ein Grad höher als der Durchschnitt der Jahre 1961 bis 1990 und 0,3 °C höher als die Referenzperiode 1981 bis 2010 (Vgl. Abbildung 5, Legende). Die Jahreswerte der Klimamodelle CLM und WETTREG liegen etwa auf dem Niveau der Jahre 1981 bis 2010. Dagegen zeigt das Klimamodell REMO mit 10,9 °C einen deutlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur.

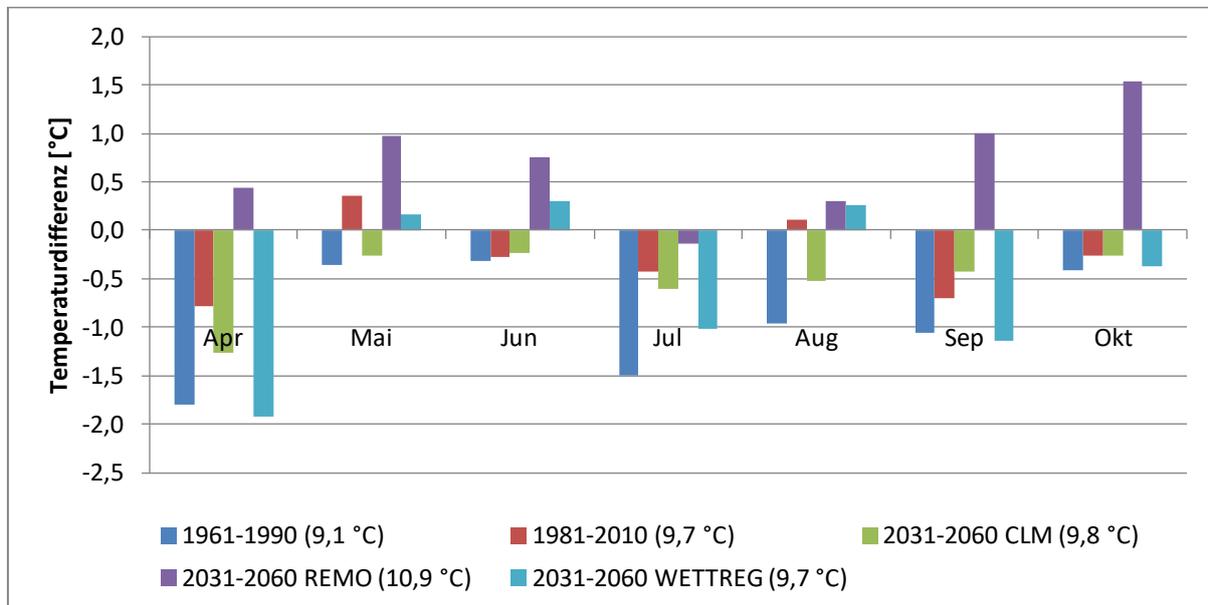


Abbildung 5: Differenzen der Monatsmitteltemperaturen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

Auch bei Betrachtung der Monatswerte sind die Versuchsjahre im Mittel wärmer ausgefallen als in der Vergangenheit. Lediglich der Mai und im geringem Maße der August sind kälter verlaufen als noch in den Jahren 1981 bis 2010.

Zwischen den Klimamodellen bestehen große Differenzen. Im Modell CLM werden durchweg niedrigere Temperaturen als in den Versuchsjahren erreicht. Vor allem im April, aber auch in den Sommermonaten Juli und August liegen die Temperaturen niedriger.

Auch das Modell WETTREG zeigt insgesamt sinkende Temperaturen. Auffällig sind die Monate April, Juli und September, die über einen Grad kälter erwartet werden. Dagegen rechnet man im Mai, Juni und August mit leicht steigenden Temperaturen. Die höchsten Werte weist das Klimamodell REMO auf. Mit Ausnahme des Julis liegen die Temperaturen teils deutlich über den Werten der Gegenwart. Besonders große Anstiege zeigen sich in den Herbstmonaten September und Oktober, aber auch im Vorsommer (Mai und Juni).

Niederschlag

In den Versuchsjahren 2004 bis 2016 sind, mit durchschnittlich 538 l/m², etwa 15 % mehr Niederschlag gefallen als in der Referenzperiode 1961 bis 1990, beziehungsweise 5 % mehr als in den Jahren 1981-2010 (Vgl. Abbildung 6, Legende). Die beiden dynamischen Klimamodelle CLM und REMO sehen für die Zukunft einen weiteren deutlichen Anstieg der Jahresniederschlagssummen voraus. 717,0 l/m², beziehungsweise 737,3 l/m², würden eine durchschnittliche Erhöhung von etwa 35 % ergeben. Dahingegen errechnet das Klimamodell WETTREG einen Rückgang der Niederschläge auf durchschnittlich 399,8 l/m².

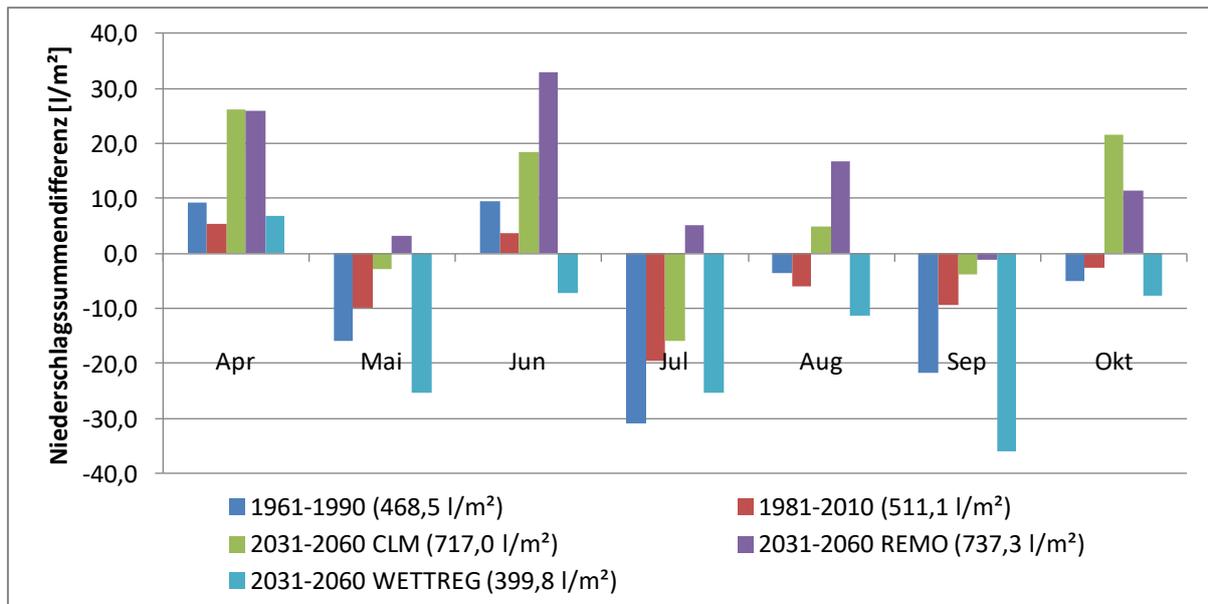


Abbildung 6: Differenzen der Monatsniederschlagssummen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

Entscheidender als die Jahresniederschläge ist die Verteilung im Vegetationsverlauf. In den Versuchsjahren ist in den meisten Monaten mehr Niederschlag gefallen als in der Vergangenheit. Lediglich der April und der Juni sind im Mittel trockener ausgefallen. Dagegen haben insbesondere im Juli die Niederschläge zugenommen. Die Klimamodelle weichen auch bei monatsweiser Betrachtung deutlich voneinander ab. Das CLM-Modell lässt in allen Monaten einen höheren Niederschlag als die Referenzperioden der Vergangenheit erkennen. Verglichen mit der Niederschlagsverteilung der Versuchsjahre 2004 bis 2016, ist das Verhältnis zwischen den Monaten mit steigenden und sinkenden Niederschlägen etwa ausgeglichen. Der April, Juni und Oktober zeigen deutlich höhere Niederschläge auf, während der Juli etwa so trocken ausfallen wird, wie in den Jahren 1981 bis 2010. Das Modell REMO zeigt insbesondere im April, Juni und August deutlich höhere Niederschläge. Auch der Oktober signalisiert einen Anstieg. In den anderen Monaten sind dagegen keine signifikanten Unterschiede zu den Versuchsjahren zu erkennen. Die Niederschläge des Klimamodells WETTREG weichen am deutlichsten von den Versuchsjahren ab. Dabei zeigt lediglich der April eine Erhöhung. In allen anderen Monaten, darunter insbesondere der Mai, Juni und September, gehen die Niederschläge zurück.

Anzahl der Sommertage

Die Anzahl der Sommertage ist in der Vergangenheit kontinuierlich angestiegen und weist in den Versuchsjahren 2004 bis 2016 mit durchschnittlich 55 Tagen den höchsten Wert auf (Vgl. Abbildung 7, Legende). In den Klimamodellen reduzieren sich die Sommertage wieder. Das Klimamodell REMO, welches unter den drei Modellen den höchsten Anstieg der Jahresmitteltemperatur aufweist, hat mit 38 Sommertagen die geringste Anzahl vorzuweisen.

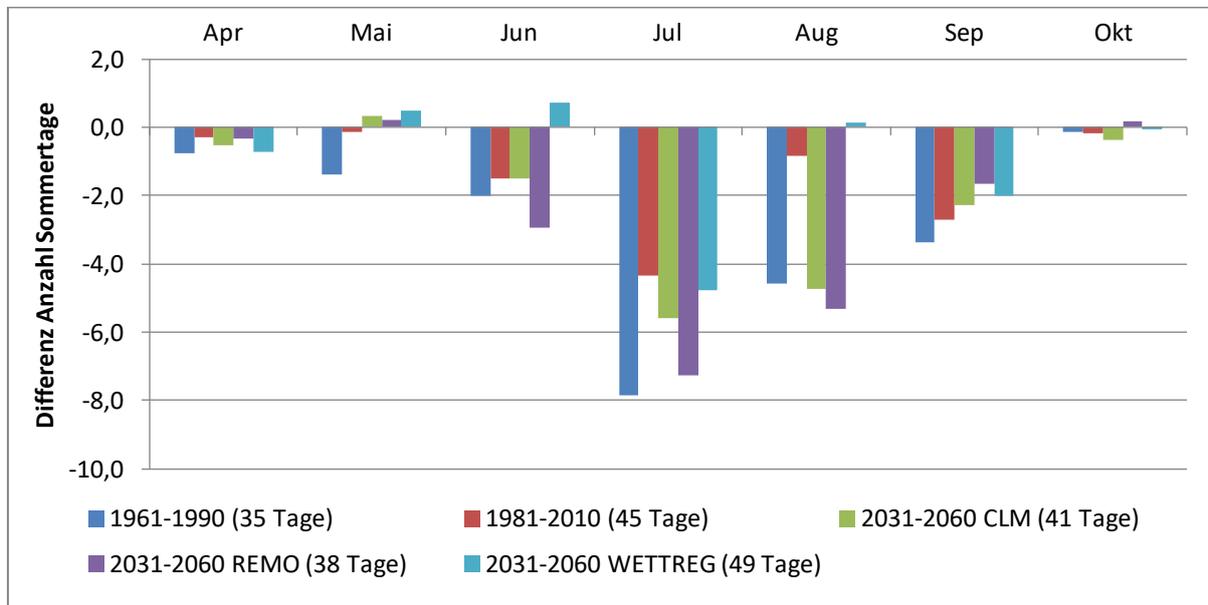


Abbildung 7: Differenzen der Anzahl an Sommertagen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

Die Monate April, Mai und Oktober weisen weder unter den Referenzperioden der Vergangenheit, noch unter den Klimamodellen nennenswerte Unterschiede auf. Dies lässt sich auf die allgemein geringe Anzahl an Sommertagen in diesen Monaten zurückführen. In allen anderen untersuchten Monaten sind in den Versuchsjahren deutlich mehr Sommertage registriert worden. Die vier zusätzlichen Sommertage im Juli bedeuten einen Anstieg von etwa 25 %. Im September verdoppelt sich die Anzahl.

In der Zukunft werden die Juliwerte je nach Klimamodell um fünf bis sieben Sommertage zurückgehen. Auch in den anderen Sommermonaten zeigt sich ein Rückgang der Sommertage für die Jahre 2031 bis 2060. Lediglich nach dem Klimamodell WETTREG werden im Juni mit 10 Sommertagen und im August mit 15 Sommertagen in etwa die Werte der Versuchsjahre erreicht.

Anzahl der heißen Tage

Die Auswertung der heißen Tage zeigt ein ähnliches Bild wie die der Sommertage. Auch diese sind in der Vergangenheit konstant angestiegen. In den Versuchsjahren wurden im Mittel 15 heiße Tage gemessen. Diese Anzahl wird auch laut dem Klimamodell CLM erwartet. Nach den Daten der Klimamodelle REMO und WETTREG gehen die heißen Tage mit neun beziehungsweise zehn wieder auf das Niveau der Jahre 1981 bis 2010 zurück.

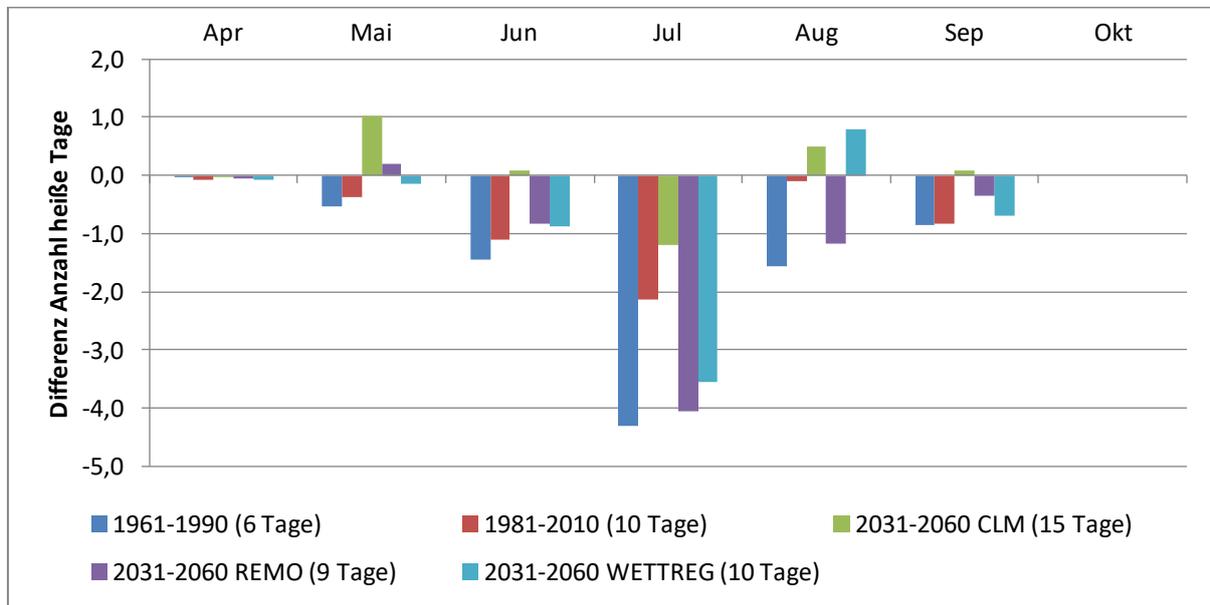


Abbildung 8: Differenzen der Anzahl an heißen Tagen der Referenzperioden und Klimamodelle von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

Das Klimamodell CLM weist bereits im Mai eine Zunahme der heißen Tage gegenüber der Versuchsjahre auf. Im Juli wird dagegen im Mittel ein heißer Tag weniger erwartet. Bei den Klimamodellen REMO und WETTREG gehen die heißen Tage im Juli auf einen mittleren Wert von drei zurück, wodurch sich die Anzahl mehr als halbieren würde. Im August zeigen die Klimamodelle CLM und WETTREG eine leichte Erhöhung gegenüber den Versuchsjahren, wohingegen das Modell REMO einen Tag weniger aufweist. Insgesamt verteilen sich die heißen Tage in den Klimamodellen zunehmend, während die sommerlichen Spitzenwerte etwas abflachen.

5.3. Ergebnisse der Extremwertanalyse

Aus dem Datensatz des Bodenbearbeitungsversuches am „Westerfeld“ wurden die mittleren Erträge der intensiv gedüngten Parzellen jeweils für die Jahre 2004 bis 2016 bestimmt, um die Ertragsschwankungen darzustellen und Misserntejahre zu identifizieren. In der folgenden Tabelle sind die Durchschnittserträge des Körnermaises dargestellt.

Tabelle 6: Durchschnittserträge des Körnermaises der Jahre 2004 - 2016 am Versuchsfeld „Westerfeld“ (Eigene Berechnung)

Versuchsjahr	Ertrag [dt/ha]
2004	109,4
2005	76,8
2006	50,5
2007	84,0
2008	92,6
2009	91,0
2010	107,4
2011	119,4
2012	109,2
2013	102,4
2014	110,6
2015	96,5
2016	85,2

Der mittlere Ertrag der Jahre 2004 bis 2016 beträgt 95,0 dt/ha bei 86 % Trockenmassegehalt. Die Standardabweichung der untersuchten Erträge liegt bei 18,3 dt/ha. Insgesamt haben sieben der dreizehn Ertragsjahre überdurchschnittliche Erträge erzielt, mit einem Höchstwert von 119,4 dt/ha im Jahr 2011. In den Ertragsjahren 2005 bis 2009, sowie 2015 und 2016 lagen die Erträge dagegen unter dem Mittelwert.

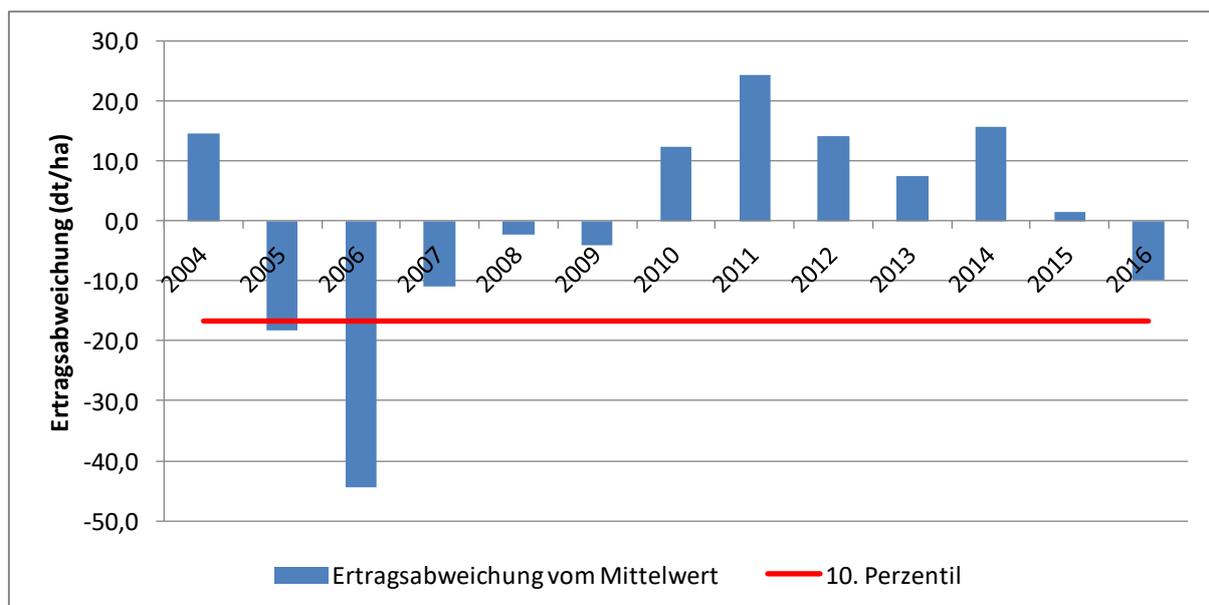


Abbildung 9: Ertragsabweichungen der Körnermaiserträge 2004-2016 vom Mittelwert der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

In der Abbildung 9 stellt der mittlere Ertrag der Versuchsjahre die Abszissenachse dar. Die Analyse des 10. Perzentils hat einen Schwellenwert für Missernten von 78,3 dt/ha, beziehungsweise eine negative Abweichung vom Mittelwert von -16,7 dt/ha ergeben. Darunter fällt das Erntejahr 2005 mit 76,8 dt/ha und besonders das Jahr 2006 mit 50,5 dt/ha Ertrag.

In den folgenden Abbildungen werden die Abweichungen der Klimaparameter in den Misserntejahren 2005 und 2006 von den Mittelwerten der Versuchsjahre dargestellt. Diese sind zur besseren Übersicht auf die Vegetationsperiode von April bis Oktober beschränkt.

Monatsmitteltemperatur

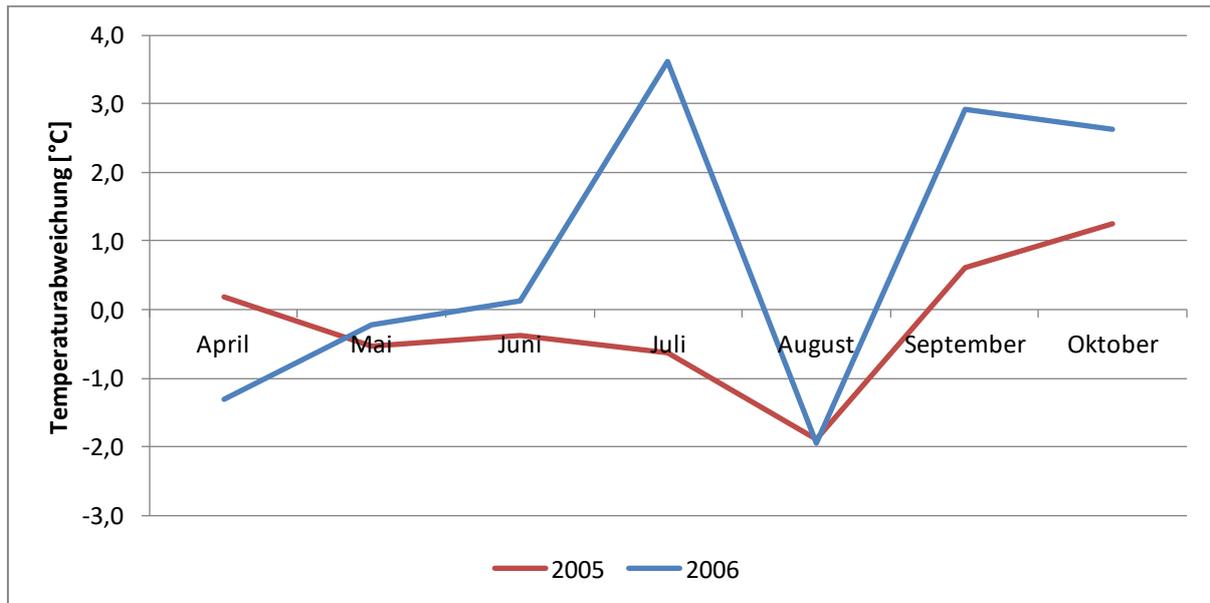


Abbildung 10: Abweichungen der Monatsmitteltemperaturen in den Misserntejahren 2005 und 2006 von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

Das Misserntejahr 2005 war insgesamt kühler ausgefallen als der Durchschnitt der Versuchsjahre. Lediglich der April, sowie der Herbst verliefen etwas wärmer. Die größte Abweichung besteht im August mit einer etwa 2 °C niedrigeren Mitteltemperatur. Auch das Jahr 2006 weist im August eine solch niedrige Temperatur auf. Ebenso zeigt der April geringe Temperaturwerte. Ansonsten verlief das Jahr deutlich wärmer und unterlag größeren Schwankungen. Besonders der Juli fiel mit 23,3 °C fast 4 °C wärmer aus als das Mittel der Jahre 2004 bis 2016. Auch die Herbstmonate September und Oktober waren überdurchschnittlich warm.

Monatsniederschlagssummen

Bereits die Betrachtung der Jahresniederschlagssummen (Vgl. Abbildung 11, Legende) zeigt, dass das Jahr 2006 deutlich trockener ausgefallen war, als im Mittel der Versuchsjahre. Im Jahr 2005 fiel dagegen etwa 60 l/m² mehr Regen.

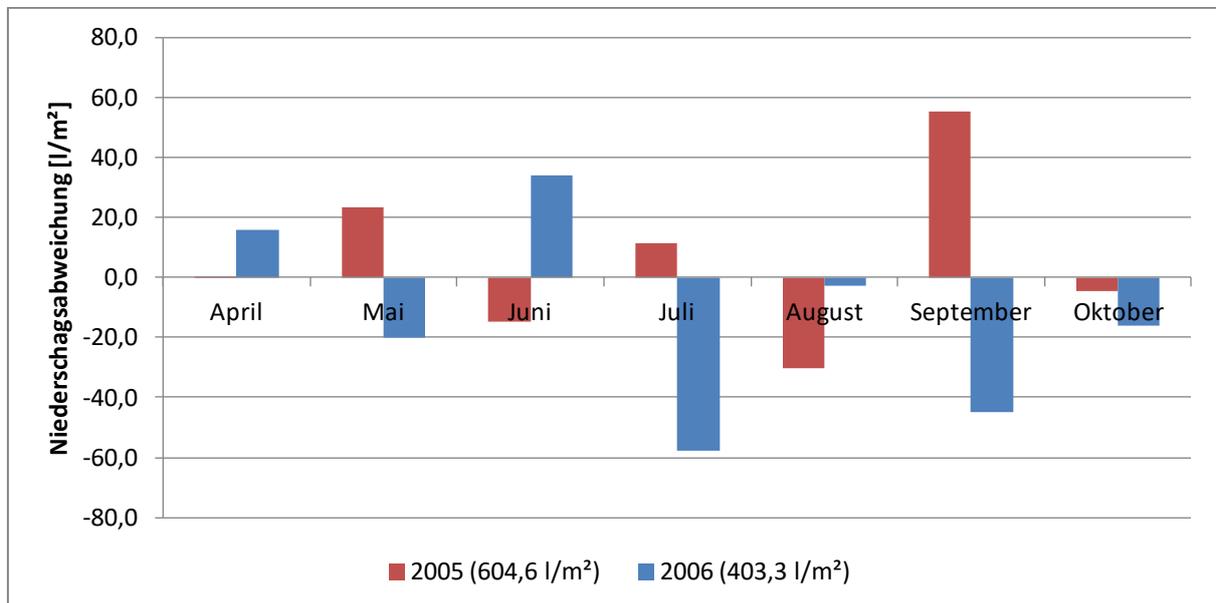


Abbildung 11: Abweichungen der Monatsniederschlagssummen in den Misserntejahren 2005 und 2006 von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

Im Jahr 2005 war der September der regenreichste Monat. Auch die Monate Mai und Juli wiesen mehr Niederschlag auf als das Mittel der Versuchsjahre. Dagegen waren die Monate Juni und August, mit jeweils etwas mehr als 30 l/m² Niederschlag, zu trocken. Im Jahr 2006 war trotz des insgesamt höheren Niederschlages in einigen Monaten weniger Niederschlag gefallen als 2005. Insbesondere der Sommermonat Juli, sowie der September wiesen niedrige Werte auf. Dagegen waren der April und der Juni überdurchschnittlich feucht. Insgesamt unterlagen die Monatsniederschlagssummen sehr großen Schwankungen.

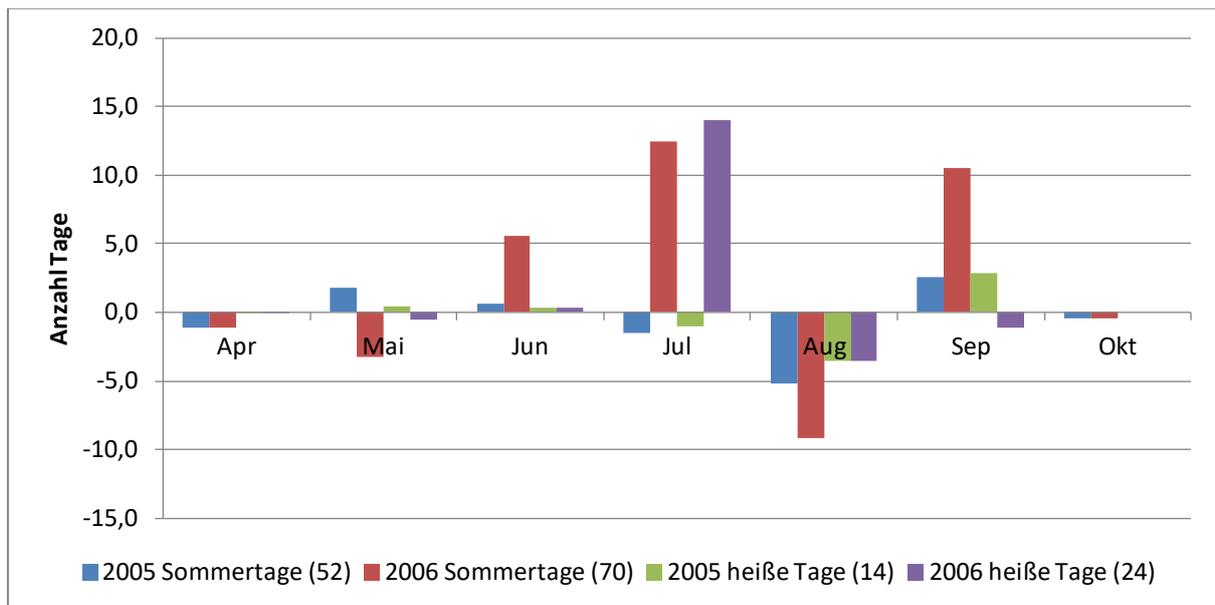
Anzahl der Sommertage / heißen Tage

Abbildung 12: Abweichung der Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen in den Misserntejahren 2005 und 2006 von den Durchschnittswerten der Versuchsjahre (Eigene Berechnung)

Im Jahr 2005 sind in der Summe drei Sommertage weniger gemessen worden als im Durchschnitt der Versuchsjahre (Vgl. Abbildung 12, Legende). Die Anzahl der heißen Tage war dagegen um zwei Tage höher. Der August zeigte fünf Sommertage und drei heiße Tage weniger auf. In den anderen Monaten wichen die Werte nur geringfügig von den Mittelwerten ab. Das Jahr 2006 verlief dagegen sehr wechselhaft. Insgesamt ist sowohl die Anzahl der Sommertage, als auch die der heißen Tage erhöht gewesen. Insbesondere im Juli erreichten beide Kenngrößen Spitzenwerte. Vergleicht man die Abweichungen mit den absoluten Werten, so war jeder Tag des Julis ein Sommertag und zwei Drittel der Tage ein heißer Tag. Im Juni und September waren dagegen lediglich die Sommertage erhöht, während die heißen Tage kaum abwichen. Der August ist ebenso wie im Jahr zuvor kälter ausgefallen als im Durchschnitt der Jahre.

5.4. Ergebnisse der Multiplen Regressionsanalyse

Auswahl der Klimavariablen

Die Klimadaten der Versuchsjahre wurden zu Klimavariablen aufbereitet und durch die schrittweise Selektion, unter der Berücksichtigung der statistischen Kriterien, in das Regressionsmodell aufgenommen. Die in der folgenden Tabelle 7 dargestellte Kombination an Variablen stellte sich als am höchsten korrelierend heraus. Jede anderweite Zusammenstellung mit anderen oder zusätzlichen Prädiktorvariablen minderte den statistischen Zusammenhang zwischen den Erträgen und dem Klima, oder ergab keinen, mit der Literatur schlüssigen Bezug. Insbesondere die Vorzeichen der Koeffizienten waren entscheidend. Die Koeffizienten geben an, um wie viel dt/ha sich der Ertrag mehrt oder mindert, wenn sich die dazugehörige Variable um eine Einheit erhöht, unter der Voraussetzung, dass alle anderen Variablen konstant gehalten werden.

Tabelle 7: Auswahl der linearen Klimavariablen der Multiple Regressionsanalyse (Eigene Berechnung)

Klimavariablen:	Zeitraum:	Koeffizient:
Niederschlagssumme (Ns)	Juli-August	+0,267
Temperatursumme (Ts)	Juli-August	+0,283
Anzahl heiße Tage (AnzHT)	Juni-August	-3,243

Für die Niederschlagssumme im Zeitraum Juli bis August ergibt sich ein positiver Koeffizient. Dadurch steigt der Ertrag mit zunehmendem Niederschlag. Auch der Einfluss der Temperatur wird durch die Temperatursumme der Monate Juli bis August beschrieben. Somit stimmen die Zeiträume des Niederschlages und der Temperatur überein. Der Koeffizient signalisiert ebenfalls eine positive Korrelation zum Ertrag.

Bei der Anzahl der Sommertage und der heißen Tage gehen die Ertragseffekte auseinander. Während die Anzahl der Sommertage den Ertrag positiv beeinflusst, setzen heiße Tage den Ertrag herab. Die Sommertage hatten jedoch eine zu hohe Korrelation zu der Temperatursumme, wodurch keine Aufnahme in das Modell erfolgte. Für die Anzahl der heißen Tage zeigt der Zeitraum Juni bis August den größten statistischen Zusammenhang. Darin sind durchschnittlich 13 der 15 heißen Tage im Jahr enthalten (Vgl. Tabelle 5, Seite 32).

Ergebnisse des Regressionsmodells

Das Regressionsmodell wies ein Bestimmtheitsmaß von 71,2 %, mit einem Standardfehler für den Ertrag von 9,8 dt/ha auf. Durch den F-Test wurde das Modell als signifikant eingestuft. Die höchste Multikollinearität bestand zwischen der Temperatursumme und der Anzahl an heißen Tagen mit 63 %. Dies war jedoch zu erwarten, da beide Variablen auf der Temperaturmessung basieren. Die Interkorrelationen zwischen den unabhängigen Variablen lagen jedoch alle unterhalb des Grenzwertes.

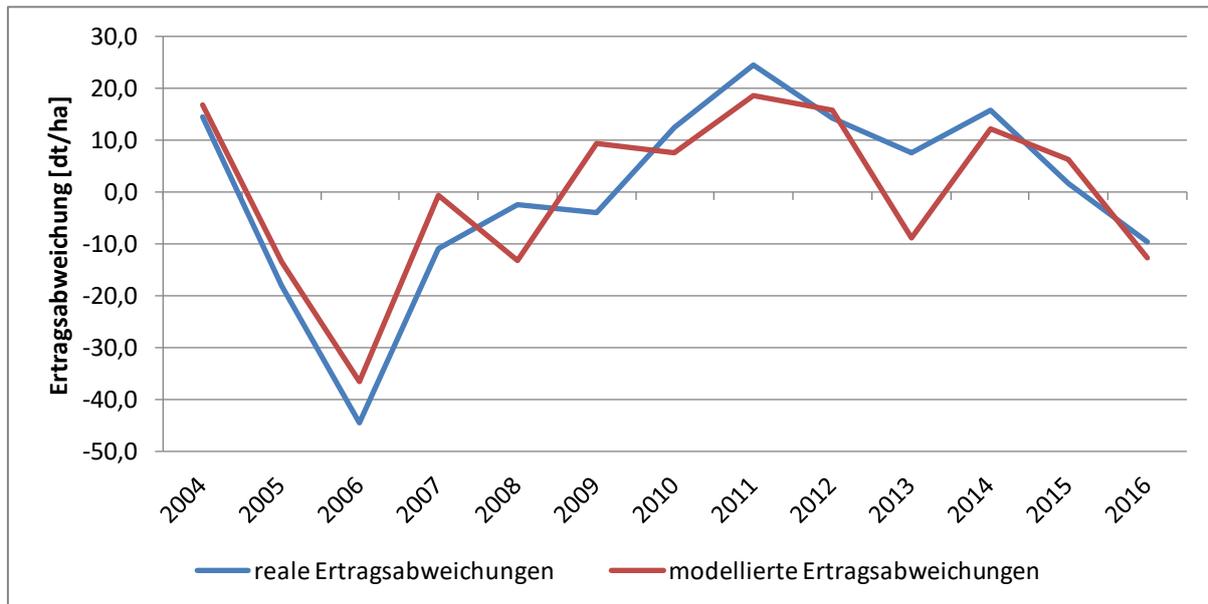


Abbildung 13: Vergleich des modellierten und realen Körnermaisertrages mit linearen Klimavariablen (Eigene Berechnung)

Die Abbildung 13 zeigt, dass die Erträge des Körnermaises augenscheinlich gut durch das Regressionsmodell erklärt werden können. Bei den Extremwerten (50,5 dt/ha und 119,4 dt/ha) sind die Differenzen zwischen dem erwarteten Ertrag des Regressionsmodells und dem realen Ertrag unter 8 dt/ha. Größere Abweichungen des Modells ergeben sind insbesondere bei Normalerträgen um 95 dt/ha.

Ergebnisse der Variablentransformation

Durch die Transformation der Variablen sollte das Regressionsmodell zusätzlich verbessert werden. Nach der Durchführung wurden folgende Variablen für das Modell ausgewählt:

Tabelle 8: Auswahl der transformierten Klimavariablen der Multiple Regressionsanalyse (Eigene Berechnung)

Klimavariablen:	Zeitraum:	Koeffizient:
Niederschlagssumme (Ns)	Juli-August	+0,285
Temperatursumme (Ts)	Juli-August	+0,293
(Anzahl heiße Tage (AnzHT)) ²	Juni-August	-0,108

Die Variablentransformation zeigte nur geringe Auswirkungen auf die Auswahl der Variablen. Es sind weder Klimaparameter ersetzt oder hinzugefügt, noch sind die Zeiträume der bestehenden Klimavariablen verändert worden. Für die Niederschlagssumme und die Temperatursumme ergab weder ein degressiver, noch ein progressiver Verlauf eine bessere Modelgüte. Auch für die Anzahl der Sommertage war durch die Transformation keine Aufnahme in das Modell erfolgt. Lediglich eine Quadrierung der Anzahl heißer Tage ergab einen höheren statistischen Zusammenhang.

Das Regressionsmodell wird durch folgende Ertragsgleichung beschrieben:

Formel 6: Ertragsgleichung des Regressionsmodells

$$\hat{y} = -270,35 + 0,285 \times Ns_{Jul-Aug} + 0,293 \times Ts_{Jul-Aug} - 0,108 \times (Anz(HT)_{Jun-Aug})^2 \pm 8,90$$

mit:

\hat{y}	=	modellierter Ertrag
$Ns_{Jul-Aug}$	=	Niederschlagssumme Juli-August
$Ts_{Jul-Aug}$	=	Temperatursumme Juli-August
$(Anz(HT)_{Jun-Aug})^2$	=	quadrierte Anzahl heißer Tage Juni-August

Trotz der Änderung von nur einer Variablen zeigte das Regressionsmodell durch die Transformation eine erkennbar bessere Gesamtgüte. Das Bestimmtheitsmaß hatte sich durch die Variablentransformation um über fünf Prozentpunkte auf einen Wert von $R^2=0,765$ verbessert. Der Standardfehler war um eine Dezitonne auf 8,9 dt/ha gesunken. Das Modell war weiterhin signifikant (F-Test) und die Multikollinearität zwischen der Temperatursumme und der Anzahl heißer Tage war auf 60 % zurückgegangen.

Betrachtet man erneut die Ertragsabweichungen der Jahre 2004 bis 2016 vom Durchschnitt aller Versuchsjahre und vergleicht diese mit den Ertragsabweichungen des Regressionsmodells, so ergibt sich ein differenziertes Bild.

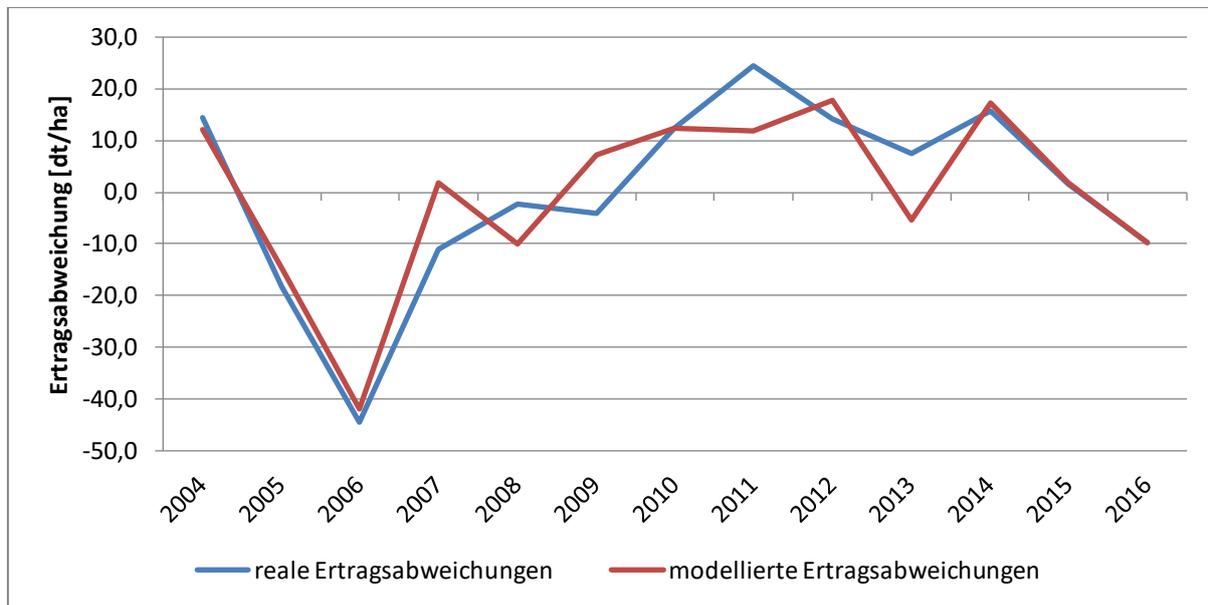


Abbildung 14: Vergleich des modellierten und realen Körnermaisertes mit transformierten Klimavariablen (Eigene Berechnung)

Abbildung 14 zeigt, dass drei der Ertragswerte (2010, 2015 und 2016) nahezu optimal durch das Regressionsmodell beschrieben werden. Auch in den Misserntejahren 2005 und 2006, sowie in den Jahren 2004, 2012 und 2014 weicht das Modell nur geringfügig vom real gemessenen Ertrag ab. Mit jeweils etwa 12,5 dt/ha Anomalie werden die Versuchsjahre 2007, 2009, 2011 und 2013 am schlechtesten durch das Modell erklärt.

5.5. Ergebnisse der Ertragssimulation aus den Klimamodellen

Die Klimavariablen wurden für jedes Klimamodell berechnet, um diese für das Regressionsmodell bereitzustellen. In der folgenden Tabelle werden diese zusammen mit den Durchschnittswerten der Ertragsjahre 2004 bis 2016 gegenübergestellt und verglichen. Die Anzahl heißer Tage ist hier untransformiert vermerkt, wurde jedoch als Quadratsumme in das Modell aufgenommen.

Tabelle 9: Prädiktorvariablen des Durchschnitts der Versuchsjahre 2004-2016 und der Klimamodelle der Jahre 2031-2060 (Eigene Berechnung)

	Ø 2004-2016	CLM 2031-2060	REMO 2031-2060	WETTREG 2031-2060
Niederschlagssumme Juli-August [l/m²]	141,2	130,1	163,0	104,6
Temperatursumme Juli-August [°C]	1187,9	1152,7	1193,0	1164,5
Anzahl heißer Tage Juni-Juli	13,2	12,5	7,1	9,5

Das Klimamodell CLM weist gegenüber den Versuchsjahren in allen drei Variablen geringere Werte auf. Die Niederschlagssumme und die Anzahl heißer Tage weichen jedoch nur gering von den Mittelwerten der Jahre 2004 bis 2016 ab. Dabei hat die Temperatursumme den geringsten Wert unter den Klimamodellen. Das Klimamodell REMO beinhaltet den größten Niederschlag. Auch die Temperatursumme ist leicht erhöht gegenüber den Versuchsjahren. Dagegen ist die geringste Anzahl an heißen Tagen festzustellen. Im Modell WETTREG zeigen sich, ebenso wie im CLM-Modell, durchweg niedrigere Werte als in den Versuchsjahren. Insbesondere die Niederschlagssumme fällt deutlich kleiner aus, aber auch die Anzahl der heiße Tage ist gemindert.

Durch das Einsetzen der berechneten Klimavariablen der Klimamodelle in die Regressionsgleichung ergaben sich die durchschnittlichen Erträge für die Jahre 2031 bis 2060.

Im folgenden Diagramm sind die modellierten Erträge der Klimamodelle und der modellierte Durchschnittsertrag der Versuchsjahre dargestellt. Zusätzlich ist die Standardabweichung des Regressionsmodells als Fehlerindikator angezeigt.

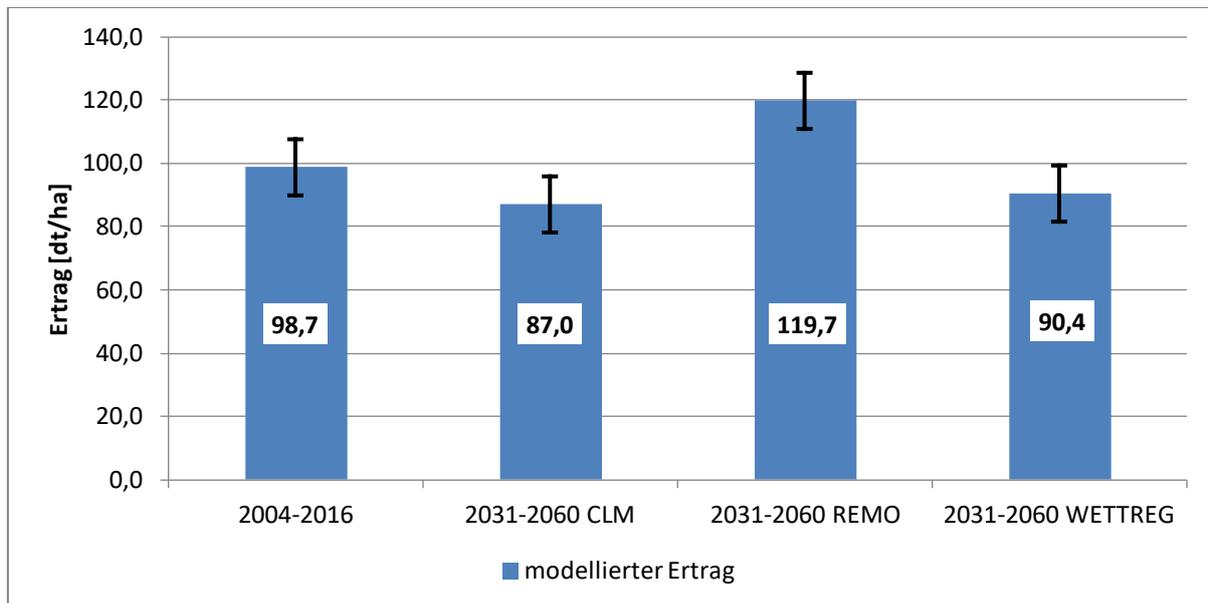


Abbildung 15: Modellierte Erträge des Regressionsmodells (Eigene Berechnung)

Aus den durchschnittlichen Klimavariablen der Versuchsjahre ergibt sich ein Ertrag von 98,7 dt/ha. Somit berechnet das Modell einen 3,7 dt/ha höheren Wert gegenüber dem realen Durchschnittsertrag.

Das Klimamodell CLM weist unter den Modellen den niedrigsten Ertrag auf. Es wurde ein durchschnittlicher Ertrag der Jahre 2031 bis 2060 von 87,0 dt/ha berechnet, was einer Minderung von 11,9 % entspricht. Das Modell WETTREG zeigt die geringsten Abweichungen zu den Erträgen der Versuchsjahre. Die durchschnittlichen 90,4 dt/ha liegen nur geringfügig über dem Wert des Modells CLM. Im Gegensatz dazu erreicht das Modell REMO Ertragswerte, die mehr als 20 dt/ha über den Versuchsjahren liegen. Mit 119,7 dt/ha würde sich der Ertrag um 21,3 % erhöhen.

6. Diskussion

Ziel dieser Untersuchungen war es, die klimatischen Veränderungen des Standortes Bernburg-Strenzfeld darzustellen und deren Auswirkungen auf die Pflanzenproduktion am Beispiel des Körnermaisbaues zu analysieren. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden bewertet und mit der Literatur verglichen.

6.1. Vergleich der Klimareferenzperioden und der Klimamodelle

Die Auswertung der Klimareferenzperiode der Versuchsjahre und deren Vergleich mit vergangenen Klimareferenzperioden und Klimamodellen sollte die Veränderungen und die mögliche Entwicklung des Klimas am Standort Bernburg-Strenzfeld aufzeigen und diese mit Angaben aus der Literatur vergleichen. Zudem galt es, das Klima der Versuchsjahre gegenüber der Vergangenheit und der Zukunft einzuordnen, um die Ertragssimulationen durch das Regressionsmodell später beurteilen zu können. Untersucht wurden die Klimanormalperioden der Jahre 1961 bis 1990 sowie 1981 bis 2010, die Versuchsjahre 2004 bis 2016 und die drei Klimamodelle CLM, REMO und WETTREG, jeweils für die Jahre 2031 bis 2060.

Der Vergleich dieser Daten bestätigt weitestgehend den nach Brasseur, et al. (2017) und Böttcher, et al. (2016) dargelegten und für die Zukunft prognostizierten Wandel des Klimas in Deutschland. Die Differenz des Jahresmittels der Lufttemperatur zwischen den Klimareferenzperioden 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010 entspricht genau dem bundesweit durchschnittlichen Anstieg. Durch den erneuten deutlichen Temperaturanstieg in den Versuchsjahren kann die Aussage bestätigt werden, dass die erste Dekade dieses Jahrtausends die wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnung war. Auch die Zunahme der warmen und heißen Temperaturextreme konnte bewiesen werden.

Für die Zukunft konnte dagegen eine weitere Zunahme der Temperatur für den Standort Bernburg-Strenzfeld nur teilweise erkannt werden. Die Klimamodelle CLM und WETTREG unterscheiden sich in den Jahresdurchschnittstemperaturen nicht signifikant von den Werten der Periode 1981 bis 2010. Gegenüber den Versuchsjahren sinken die Temperaturen wieder. Lediglich das Modell REMO attestiert den Trend der Klimaerwärmung, jedoch nicht für die Sommermonate. Auch die erwartete Zunahme der Temperaturextreme kann durch die Klimamodelle nicht bestätigt werden. Sowohl die Anzahl der Sommertage, als auch die der heißen Tage nehmen gegenüber den Versuchsjahren ab.

Die Gesamtsumme der Niederschläge hat sich zwischen den Klimareferenzperioden 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010, übereinstimmend mit den Durchschnittswerten für Deutschland, um etwa 10 % erhöht. Auch die Versuchsjahre zeigen einen erneuten Anstieg der Niederschläge. Bei Betrachtung der einzelnen Monate April bis Oktober hat sich jeweils der Trend der Niederschlagszunahme und -abnahme bestätigt. Ist der Niederschlag in den Jahren 1981 bis 2010 gegenüber den Jahren 1961 bis 1990 angestiegen, so wurde auch in den Versuchsjahren ein größerer Wert gemessen. Gleichmaßen ging der Niederschlag in den Versuchsjahren zurück, wenn die Niederschlagssumme in der Periode 1981 bis 2010 kleiner ausfiel.

Zieht man in den Sommermonaten einen Vergleich mit der Literatur, so kann die Aussage, dass sich die Niederschläge in dieser Jahreszeit kaum veränderten, nicht verifiziert werden (Brasseur, et al., 2017). Insbesondere im Juli der Versuchsjahre ist ein Anstieg der

Niederschlagssumme gegenüber den vergangenen Referenzperioden gemessen worden. In der Summe steigen demnach die Sommerniederschläge. Auch der Rückgang der Frühjahrsniederschläge kann nur für den April bestätigt werden. Im Mai nehmen die Niederschläge widererwartend zu.

Insgesamt zeigt die Auswertung, dass sowohl die Temperatur-, als auch die Niederschlagswerte der Versuchsjahre bereits deutlich von den Werten der Referenzperiode 1981 bis 2010 abweichen, obwohl sich die Perioden in einigen Jahren überlappen. Dies deutet darauf hin, dass der Klimawandel in den letzten Jahren und Jahrzehnten deutlich schneller vorangeschritten ist, als in der Vergangenheit.

Durch die bereits deutlich wärmeren Bedingungen in den Versuchsjahren gegenüber den vergangenen Perioden, ist die Differenz zu den Klimamodellen gering. Fässt man alle Klimaparameter zusammen, so fällt das Modell CLM, gegenüber der Periode 2004 bis 2016, feuchter und leicht kühler aus, jedoch mit gleichbleibendem Auftreten von Extremtemperaturen. Das Modell REMO ist deutlich feuchter und zugleich wärmer, jedoch mit abnehmenden Temperaturextremen. Das Modell WETTREG zeigt sowohl geringere Temperaturen und Temperaturextreme, als auch einen drastisch Rückgang des Niederschlages.

6.2. Extremwertanalyse

Die Extremwertanalyse zielte darauf, die Missernten unter den Versuchsjahren zu bestimmen und die Mindererträge anhand weniger klimatischer Indikatoren zu ergründen. Als Missernten stellten sich die Jahre 2005 und 2006 heraus.

Die untersuchten Klimaparameter verliefen zwischen den beiden Jahren insgesamt sehr unterschiedlich. Sowohl die Temperaturen, als auch die Niederschläge verlaufen in entgegengesetzten Richtungen. Während das Jahr 2005 kälter ausfiel, sind 2006 deutlich höhere Temperaturen registriert worden. Als gemeinsamer Indikator kann die Wärmesumme des August festgelegt werden. In beiden Jahren verlief dieser im Mittel etwa zwei Grad kälter. Da der Mais sich in dieser Zeit in der Kornfüllungsphase befindet, könnte die geringere Wärmezufuhr die Photosyntheseleistung und damit die Assimilatumlagerung in die Körner schwächen. Zudem sind in beiden Jahren überhöhte Herbsttemperaturen festgestellt worden, die eine vorzeitige Abreife der Pflanzen vermuten lässt. Auch dies kann zum geringeren Ertrag beitragen.

Für das Jahr 2005 kann der insgesamt kältere Temperaturverlauf für die niedrigen Erträge verantwortlich sein. Unterdurchschnittliche Wärme im Frühjahr, wie es 2005 der Fall war, verzögern nach Beinbauer & Günther (1990) die Jugendentwicklung. Ein geringerer Zuwachs ist die Folge. Auch die späteren Entwicklungsphasen werden dadurch verlangsamt.

Im Jahr 2006 deuten sowohl die Durchschnittstemperaturen, als auch die Anzahl der Sommertage und heißen Tage darauf hin, dass der Mais im Juli und September unter Hitzestress gelitten hat. Alleine im Juli hat sich die Anzahl der heißen Tage gegenüber dem Mittel der Versuchsjahre verdreifacht. Die Anzahl heißer Tage gilt nach Gröbmaier (2012) als Indiz für den Hitzestress der Pflanzen. Je mehr heiße Tage im Sommer vorliegen, desto wahrscheinlicher ist es auch, dass diese aufeinanderfolgen. Sowohl die Hitzestressdefinition nach Leyser (2016), die fünf aufeinanderfolgende Tage mit einer Tagesmaximaltemperatur über 30 °C beinhaltet, als auch die des Deutschen Wetterdienstes (Böttcher, et al., 2016), bei der

eine 14-tägige Periode der selben Grenztemperatur nötig ist, können in diesem Jahr erreicht worden sein.

Bei Betrachtung des Niederschlages kann die Jahresniederschlagssumme lediglich für das Jahr 2006 als Argument für die Mindererträge herangezogen werden. Im Jahr 2005 fiel überdurchschnittlich viel Niederschlag. Für den Mais ist jedoch die Verteilung der Niederschläge entscheidend.

2005 ist im Mai mehr Niederschlag gefallen als im Mittel der Versuchsjahre. Dies hat keine direkte Auswirkung auf den Ertrag, doch der erhöhte Niederschlag geht mit niedrigeren Temperaturen einher. Aufgrund der geringeren Verdunstungsleistung kann der Mais das Wasserangebot in diesem Zeitraum nicht im vollen Umfang nutzen. Im August fallen mit den geringeren Temperaturen und dem Niederschlagsdefizit zwei Faktoren zusammen. Diese mindern die Photosyntheseleistung in der Kornfüllungsphase des Mais. Der größte Anteil der Niederschlagerhöhung entfällt auf den Monat September. Die Wassermenge übersteigt jedoch deutlich den zu dieser Zeit vorherrschenden Bedarf der Maispflanze und kann dadurch kaum noch genutzt werden. Insgesamt zeigt sich, dass ein hoher Jahresniederschlag kein Garant für eine hohe Ertragsleistung darstellt.

Die geringeren Niederschläge im Mai des Jahres 2006 sollten keinen entscheidenden Einfluss auf den Ertrag genommen haben. Das Defizit wird durch den Überschuss in den Monaten April und Juni kompensiert. Zudem sind in dieser Phase der Vegetation die Wasseransprüche verhältnismäßig gering. Dagegen fällt der besonders geringe Niederschlag im Juli in die Blütenphase. Nach Lütke Entrup, et al. (2013) wird durch Trockenstress in dieser Phase sowohl die Ausschüttung der Pollen, als auch die Ausbildung der Narbenfäden beeinträchtigt. Die dadurch teilweise fehlschlagende Befruchtung verringert die Kornzahl je Kolben. Obendrein können die mäßigen Septemberrniederschläge, zusammen mit den erhöhten Temperaturen, die Abreife der Körner beschleunigt und dadurch die Tausendkornmasse gesenkt haben.

Überblickt man die Methode der Extremwertanalyse im Ganzen, so lässt sich bestätigen, dass sich bereits anhand weniger Klimaparameter Erklärungen für die meteorologisch bedingte Ertragskomponente erkennen lassen. Sowohl einzelne Stressphasen, als auch Defizite über die gesamte Vegetationsperiode können erkannt werden. Insgesamt lässt diese Methode zwar Rückschlüsse auf Ursachen niedriger Erträge zu, bietet allerdings noch keine Möglichkeit, Aussagen über die zukünftige Ertragsentwicklung landwirtschaftlicher Kulturen zu treffen, da die Effekte der Klimaparameter nicht quantifiziert werden können.

6.3. Multiple Regressionsanalyse

Durch die Multiple Regressionsanalyse sollten die klimatischen Bedingungen und die Erträge der Versuchsjahre in einen mathematischen Zusammenhang gebracht werden. Der Ertrag wird hierbei anhand mehrerer Variablen des Klimas berechnet. Nach gründlicher Untersuchung der Variablen anhand statistischer Kriterien sind drei Klimaparameter eines jeweiligen Zeitraumes ausgewählt worden.

Für den Niederschlag und für die Temperatur flossen die Werte der Monate Juli und August in das Modell ein. Der Zeitraum fällt in die in der Literatur beschriebenen umweltsensiblen Blütenphase des Mais. Auch das positive Vorzeichen der Koeffizienten ist nachvollziehbar. So steigt der Ertrag mit zunehmendem Niederschlag und steigendem Wärmeangebot.

Zwar nimmt die Ertragsleistung bei einem zu hohen Bodenwassergehalt wieder ab, doch ist es für den Versuchsstandort und für den ausgewählten Zeitraum sehr unüblich, dass durch übermäßige Niederschläge die Feldkapazität des Bodens erreicht, beziehungsweise überschritten wird. Auch zu hohe Temperaturen können der Pflanzenentwicklung schaden. Für die Beurteilung des Hitzestresses auf die Pflanze wurde die Anzahl der heißen Tage der Monate Juni bis August in das Regressionsmodell aufgenommen. Hitzeperioden über 30 °C mindern nach Lütke Entrup & Schäfer (2011) die Fruchtbarkeit des Pollens und erhöhen zudem die Atmungsverluste. Alle Effekte führen letztlich zu einem verminderten Ertrag, wie es auch das Vorzeichen des Koeffizienten beschreibt.

Andere Zeiträume vor der Blüte hatten keinen nachweisbaren Zusammenhang mit der Ertragsentwicklung, obwohl aus der Literatur, beispielsweise für die Keimphase, Ansprüche an den Niederschlag bekannt sind. Möglicherweise ist dies auf den Boden des Versuchsstandortes zurückzuführen. Die Lößschwarzerde hat ein großes Wasserspeichervermögen. Fällt in diesem Zeitraum weniger Niederschlag als gewöhnlich, puffert die Bodenfeuchte den noch geringen Wasserbedarf der Pflanzen größtenteils ab. Auch die Temperaturwerte in der Keimphase, sowie zu Beginn der Jugendentwicklung sind für die statistische Berechnung des Ertrages widererwartend nicht relevant gewesen. Da die Keimung in der Regel keinen ganzen Monat Zeit in Anspruch nimmt, können die Temperaturbedingungen zu dieser Phase durch einen Monatswert nicht hinreichend beschrieben werden. Zudem kann sich die Keimung auch über die Monatsgrenze zwischen April und Mai hinweg vollziehen, wenn spät im April ausgesät wurde. Um diesen Parameter berücksichtigen zu wollen, wäre eine Erfassung der Temperatursumme direkt nach, beziehungsweise um den Termin der Aussaat nötig.

Bei der Auswahl der Klimavariablen ist besonders aufgefallen, dass mit steigender Anzahl der Variablen der statistische Zusammenhang zum Ertrag meist schlechter wurde. Zum einen ging das Bestimmtheitsmaß zurück, zum anderen wurde vermehrt eine Interkorrelation zwischen den Variablen festgestellt. Daher begrenzte sich das Modell auf die drei Parameter.

Das Regressionsmodell erzielte ein hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,712$. Dies bedeutet, dass 71,2 % der Ertragsvarianzen durch das Modell erklärt werden können. Der Mindestwert von 50 %, ab dem man von einem statistischen Zusammenhang sprechen kann, wurde somit erreicht. Auch der Standardfehler lag mit 9,8 dt/ha im akzeptablen Bereich.

Durch die Variablentransformation konnte das Modell nochmals verbessert werden. Für die Variable der Anzahl heißer Tage wurde durch das Quadrieren der Werte ein progressiver Zusammenhang zum Ertrag dargelegt. Dies verstärkt die Ertragseinbußen durch Hitzestress. Während einzelne heiße Tage von der Maispflanze verkraftet werden können und den Ertrag kaum beeinflussen, steigt durch eine höhere, aufeinanderfolgende Anzahl heißer Tage die Wahrscheinlichkeit für Ertragseinbußen durch Hitzestress.

Nach Durchsicht der Literatur war für die Parameter Temperatur und Niederschlag ein degressiver Zusammenhang zum Ertrag vermutet worden. Dieser hat sich widererwartend nicht bestätigt. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass die Zahlenwerte der beiden Klimavariablen zu hoch sind, um den degressiven Effekt durch das Logarithmieren darzustellen. Keiner der Werte in den untersuchten Zeiträumen geht annähernd auf den Nullwert zurück. Möglicherweise würde die Verwendung der Temperatur- und Niederschlagsabweichungen vom Mittelwert der Versuchsjahre, gegenüber den Summenwerten, den Zusammenhang genauer beschreiben.

Das Modell mit den transformierten Variablen ergab eine Modellgüte von $R^2=0,765$. Der Standardfehler hat sich auf einen Wert von 8,9 dt/ha reduziert. Durch die verhältnismäßig geringe Anzahl an Klimavariablen, die längst nicht den gesamten Vegetationszeitraum des Mais abdecken, ist diese Modellgüte beachtlich. Gröbmaier (2012) erreichte in seiner Dissertation für den Körnermais ein Bestimmtheitsmaß von 53 % und 61 %. Da es sich jedoch um eine abweichende Auswahl und Anzahl an Klimaparametern, anderen Standorten und einem längeren Beobachtungszeitraum handelt, sollte ein solcher Vergleich nicht stichhaltig.

Die Abweichungen der modellierten Erträge aus dem Regressionsmodell von den realen Erträgen fallen in vier der dreizehn Ertragsjahre größer aus als die Standardabweichung des Modells. In diesen Jahren müssen daher vermehrt andere Klimafaktoren, beziehungsweise die Klimaeinwirkungen aus anderen Zeiträumen den Ertrag beeinflusst haben. Allerdings übertreffen die maximalen Abweichungen die Standardabweichung lediglich um etwa 4 dt/ha. Es sind keine extremen Abweichungen zwischen dem Modell und den realen Erträgen festgestellt worden.

6.4. Ertragssimulation aus den Klimamodellen

Durch die Daten der Klimamodelle konnten die durchschnittlichen Erträge der Jahre 2031 bis 2060 simuliert werden. Zusätzlich wurde die Modellgüte durch das Einsetzen der durchschnittlichen Klimavariablen der Ertragsjahre überprüft. Das Modell ergab für den Zeitraum der Jahre 2004 bis 2016 einen durchschnittlichen Ertrag von 98,7 dt/ha, welcher somit 3,7 dt/ha über dem realen Durchschnittsertrag lag. Grund hierfür ist die Variable der Anzahl heißer Tage. Diese setzt sich aus der Quadratsumme des Mittelwertes der Anzahl heißer Tage zusammen und nicht aus dem Mittelwert der Quadratsummen der Anzahl heißer Tage. Da letzteres für die Bestimmung der Klimavariablen aus den Daten der Klimamodelle nicht möglich war, wurde zur Vergleichbarkeit erstere Methode verwendet. Die Abweichung liegt jedoch im Rahmen der Standardabweichung des Modells und ist daher vertretbar.

Die Durchschnittserträge des Klimamodells CLM lagen 11,7 dt/ha unter dem Wert der Versuchsjahre. Betrachtet man rückwirkend die in Kapitel 6.1 beschriebenen klimatischen Abweichungen des Modells zu den Ertragsjahren und vergleicht diese mit den in Tabelle 9 dargestellten Klimawerten für das Regressionsmodell, so sieht man, dass der Jahresniederschlag dieses Modells deutlich über den Werten der Versuchsjahre liegt. Dafür sind die Niederschläge in den für das Modell relevanten Monaten Juli und August niedriger ausgefallen. Insgesamt müssen deshalb die geringeren Niederschläge und die geringeren Temperaturen in den Monaten Juli bis August gleichermaßen für den Minderertrag verantwortlich sein. Die Anzahl der heißen Tage wird den Ertrag hingegen leicht positiv beeinflusst haben.

Aus den Daten des Modells WETTREG ergab sich ein um 8,3 dt/ha niedrigerer Ertrag im Vergleich zu den Versuchsjahren. Der Hauptfaktor für den Ertragsrückgang ist die geringe Niederschlagssumme in den Monaten Juni bis August. In relativen Zahlen ausgedrückt, wird über 25 % weniger Niederschlag erwartet. Die geringere Anzahl an heißen Tagen dämpft dagegen den Ertragsrückgang. Würden diese sich auf dem Niveau der Versuchsjahre befinden, ginge der Ertrag deutlich stärker zurück.

Insgesamt dürfen die Abweichungen der Modelle CLM und WETTREG jedoch nicht überbewertet werden. Ergänzt man die Erträge um den Standardfehler des Regressionsmodells

(Vgl. Kapitel 5.4), so erreichen beide Modelle (CLM: 95,9 dt/ha; WETTREG: 99,3 dt/ha) die Durchschnittswerte der Versuchsjahre.

Das Modell REMO prognostiziert als einziges eine Ertragszunahme gegenüber den Jahren 2004 bis 2016. Diese fällt mit 119,7 dt/ha auch sehr deutlich aus. Der Wert befindet sich auf dem Niveau des Höchstertrages in den Versuchsjahren (Vgl. Tabelle 6). Subtrahiert man die Standartabweichung vom Durchschnittsertrag dieses Modells und addiert selbige zum modellierten Durchschnittsertrag der Versuchsjahre, so ergeben sich keine Überschneidungen. Daher kann man bei diesen Modellergebnissen mit größerer Sicherheit von einer Veränderung des Ertrages sprechen, als in den anderen beiden Modellen. Alle drei Faktoren beeinflussen den Ertrag zum Positiven. Ein höherer Niederschlag, sowie eine größere Temperatursumme, bei gleichzeitig sinkender Hitzestressgefahr, führen zu dem hohen Ertragswert.

6.5. Gesamtbetrachtung der Analyse

Die Analyse der Versuchsdaten und der Daten der Klimamodelle hat gezeigt, dass der Klimawandel Auswirkungen auf den Körnermaisbau haben wird. Jedoch variieren die Ergebnisse der Ertragsschätzung unter den verschiedenen Klimamodellen sehr deutlich. Es gibt sowohl positive als auch negative Folgen für den Körnermaisertrag. Der Grund für die differierenden Modellergebnisse können die unterschiedlichen Berechnungsmethoden der Klimamodelle sein. Zwar basieren alle Modelle auf dem gleichen Emissionsszenario, doch wird zwischen dynamischen und statistischen Modellen unterschieden (Vgl. Kapitel 4.2). Zudem handelt es sich bei den Daten der Klimamodelle nicht um direkte Klimaprojektionsdaten des Standortes Bernburg-Strenzfeld. Die Werte wurden aus den Projektionsdaten der Standorte Magdeburg, Wittenberg und Bad Lauchstädt gemittelt. Dies stellt zwar eine gute Methode zur Erstellung ortsspezifischer Klimaprojektionen dar, ist aber mit Ungenauigkeiten behaftet. Darüber hinaus sollten die generellen Unsicherheiten der Klimamodelle nicht außer acht gelassen werden. Für viele Zusammenhänge und Wechselwirkungen können in den Modellen nur Vermutungen angenommen werden, die nicht genügend wissenschaftlich belegt sind.

Für eine genauere Analyse des Klimawandels müsste man den Umfang der zu untersuchenden Klimaparameter ausweiten. Im Datensatz des Deutschen Wetterdienstes standen neben den untersuchten Parametern noch weitere zur Verfügung. So könnte man über die die Minimumtemperaturen die Frosteinwirkung auf den Mais, oder die nächtlichen Atmungsverluste verdeutlichen. Durch die Strahlungsintensität würde die Photosyntheseleistung quantifiziert werden. Ebenso beeinflusst die Luftfeuchte die Transpirationsleistung und die Hitzestressempfindlichkeit. Die untersuchten Klimamodellen waren jedoch auf die Werte der Mitteltemperatur, der Niederschlagssumme und der Anzahl der Sommertage und heißen Tage begrenzt. Eine Modellierung der Minimaltemperaturen wäre gegebenenfalls möglich gewesen. Andere Parameter sind jedoch durch die Klimamodelle nur mit unzureichender Sicherheit ermittelbar. Eine weitere Möglichkeit, die Auswertung zu präzisieren, wäre eine größere Auflösung der Modelldaten. Mit Hilfe von 10-tägigen, wöchentlichen oder gar täglichen Werten könnten kürzere, prägnante Phasen der Körnermaisentwicklung genauer analysiert werden. Hier sind unter anderem die Frosteinwirkung, Hitze- und Dürreperioden oder der insgesamt kurze Vegetationsabschnitt der Keimung zu nennen.

Schaut man zurück auf die Versuchsdurchführung der Hochschule Anhalt, so konnten einige außerklimatische Einflussfaktoren auf den Ertrag durch den kontinuierlichen Versuchsaufbau

und -ablauf außer Kraft gesetzt werden. Darunter zählen zum Beispiel die Düngemengen, die Fruchtfolge, sowie die Bodenbearbeitung. Andere Komponenten konnten dagegen bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden. So beeinflussen zum Beispiel Saattermin, Sortenwahl, Pflanzenschutzstrategie, Düngungstermine, Pflanzenkrankheiten oder Schädlinge den Ertrag in jedem Jahr in unterschiedlichem Maße. Auch bei den klimatischen Faktoren werden einige Auswirkungen nicht einkalkuliert. So wird beispielsweise der Hagel als Niederschlag gemessen, dessen schadende Wirkung auf die Pflanzen jedoch nicht erfasst. Zudem muss der Einfluss des Niederschlages auf den Pflanzenbau nach Emeis (2000) unter Berücksichtigung der Bodenart bewertet werden. Der in dieser Arbeit untersuchte Körnermais ist auf einem Boden mit sehr großem Wasserspeichervermögen gewachsen. Die Verteilung der Niederschläge ist daher nicht so stark ins Gewicht gefallen, wie auf leichteren Standorten. Allgemein würde eine Messung der Bodenfeuchte den Klimafaktor „Wasser“ für die Pflanze besser beschreiben als die Niederschlagsmessung.

Bei der Bewertung der Versuchsergebnisse sollte man auch den Versuchsumfang einbeziehen. Es wurden nur 13 Jahre des Körnermaisversuches untersucht und auch nur die Klimadaten dieser Jahre in die Auswertung aufgenommen. Die durchschnittlichen Klimadaten der Versuchsjahre sind nicht mit einer 30-jährigen Klimareferenzperiode des Deutschen Wetterdienstes gleichzusetzen. Würde man den Untersuchungszeitraum, wie in der Auswertung nach Gröbmaier (2012) erfolgt, auf eine 30-jährige Periode ausweiten, würden zum einen die Durchschnittswerte der Klimaparameter auf einer breiteren Grundlage basieren, zum anderen hätte man für die Analyse eine größere Anzahl an Misserntejahren.

Alles in allem bleibt abzuwarten, wie die Landwirtschaft auf den Klimawandel reagieren wird. Die Möglichkeiten zur Anpassung an die klimatischen Veränderungen wurden bereits im Kapitel 0 erläutert. Bezüglich der Ertragsprognosen aus den Klimamodellen sollte noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich sowohl bei den Klimawerten, als auch bei den ermittelten Erträgen um Durchschnittswerte einer 30-jährigen Periode handelt. Schaut man auf die Erträge der Versuchsjahre, so zeigt sich eine Schwankung von fast 70 dt/ha (Vgl. Tabelle 6, Seite 37). Es muss damit gerechnet werden, dass die natürliche Variabilität der Erträge und des Klimas, den Trend der Ertragszunahme oder -abnahme, sowie die mittleren klimatischen Veränderungen überlagern werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine gute Grundlage für weiterführende Analysen. Wie bereits erläutert, könnte durch die Ausweitung der Klimaparameter oder des Untersuchungszeitraumes versucht werden, die Genauigkeit der Ertragsmodellierung durch das Regressionsmodell zu erhöhen. Dabei wäre eine Auswertung anderer Kulturen und anderer Standorte möglich. Desweiteren könnte die ermittelte Regressionsgleichung mit Klima- und Ertragsdaten der kommenden Erntejahre überprüft werden. Allgemein sollte vor einer Ertragssimulation auf den Umfang und die Genauigkeit der Daten aus den Klimamodellen geachtet werden.

7. Schlussfolgerung

Nach der Analyse des Zusammenhanges zwischen den klimatischen Bedingungen und den Körnermaiserträgen, sowie den Auswirkungen des Klimawandels auf die Körnermaiserträge am Standort Bernburg-Strenzfeld, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Das Klima in den Versuchsjahren 2004 bis 2016 am Bernburg-Strenzfeld bestätigt den kontinuierlich fortschreitenden Klimawandel. Gegenüber den Referenzperioden 1961 bis 1990, sowie 1981 bis 2010 haben sowohl die Temperaturen und Temperaturextreme, als auch die Niederschläge zugenommen.
- Die für die Zukunft prognostizierten durchschnittlichen Klimaveränderungen können aus den Klimamodellen nicht vollständig bestätigt werden. Das Klimamodell WETTREG sieht für die Jahre 2031 bis 2060 insgesamt trockenere und kühlere Bedingungen als in den Versuchsjahren 2004 bis 2016 voraus, während das Modell REMO deutlich feuchter und wärmer ausfällt. Im Modell CLM wird dagegen feuchteres, jedoch auch kühleres Wetter erwartet. Somit lässt sich keine allgemeine Aussage über die zukünftig erwarteten Klimabedingungen treffen.
- Die Mindererträge in den Misserntejahren lassen sich durch verschiedene Parameter ergründen. In beiden Jahren sind die Augusttemperaturen kühler ausgefallen, wodurch die Kornfüllung geschwächt wird. Zudem könnten erhöhte Herbsttemperaturen zu einer schnelleren Abreife der Körner geführt haben. Durch den insgesamt kälteren Vegetationsverlauf im Jahr 2005 wurden vermutlich die Wärmeansprüche der Pflanzen nicht erfüllt und der Ertrag gemindert. Die Anzahl heißer Tage im Juli 2006 lassen Hitzestress vermuten.
- Für den Einfluss des Niederschlages auf den Körnermaisertrag ist vor allem die Verteilung in der Vegetationsphase entscheidend. Die größten Ertragsminderungen sind durch ein Niederschlagsdefizit zum Zeitraum der Blüte im Monat Juli zu erwarten. Diese lassen sich nicht durch eine spätere Niederschlagserhöhung ausgleichen.
- Um den Körnermaisertrag aus Klimaparametern berechnen zu können, ist vorwiegend die Witterung zur Blüte und zur Kornfüllung ausschlaggebend. Klimaerscheinungen zur Keimung, Jungendentwicklung und Kornabreife zeigen keinen ausreichenden statistischen Zusammenhang zum Körnermaisertrag.
- Die Niederschlagssumme, sowie die Temperatursumme, der Monate Juli und August nehmen einen positiven Einfluss auf den Ertrag. Die Anzahl der heißen Tage der Monate Juni bis August mindert den Ertrag. Sie verdeutlicht die Hitzestresseinwirkung auf den Körnermais.
- Das Regressionsmodell zeigt durch die drei Klimavariablen eine hohe Modellgüte durch ein Bestimmtheitsmaß von 76,5 %. Die Erträge können mit einer durchschnittlichen positiven oder negativen Abweichung von 8,9 dt/ha modelliert werden.
- Die Simulation der Durchschnittserträge der Jahre 2031 bis 2060 durch die Klimamodelle weist große Schwankungen auf. In den Modellen CLM und WETTREG gehen die Erträge um 11,7 dt/ha, beziehungsweise 8,3 dt/ha zurück. Dagegen werden

für das Modell REMO im Mittel 21,0 dt/ha mehr Ertrag erwartet. Aufgrund der Klimaparameterwerte der Klimamodelle lässt sich schlussfolgern, dass sich die größten Ertragszunahmen in Zukunft durch steigende Temperatur- und Niederschlagswerte im Sommer, bei gleichzeitiger Abnahme der Temperaturextreme erzielen lassen. Ob diese klimatischen Bedingungen eintreten werden, lässt sich nicht mit ausreichender Sicherheit vorhersagen.

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen den klimatischen Bedingungen und den Körnermaiserträgen, sowie die Auswirkungen des Klimawandels auf den Körnermaisanbau am Standort Bernburg-Strenzfeld analysiert. Untersuchungsgegenstand waren die Körnermaiserträge der Jahre 2004 bis 2016 des Bodenbearbeitungsversuches der Hochschule Anhalt, langjährige Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes der Wetterstation Bernburg-Strenzfeld, sowie Daten regionalisierter Klimamodelle der Jahre 2031 bis 2060.

Zunächst wurden die klimatischen Bedingungen der Versuchsjahre anhand der monatlichen Parameter Mitteltemperatur, Niederschlagssumme, sowie der Anzahl der Sommertage und heißen Tage mit Klimareferenzperioden der Jahre 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010, sowie den Klimamodellen verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass die Versuchsjahre bereits deutlich wärmere Bedingungen gegenüber der Vergangenheit aufzeigen. Aus den Klimamodellen entstanden unterschiedliche Zukunftsprognosen, die im Vergleich mit den Versuchsjahren sowohl nasser und wärmer, als auch trockener und kühler ausfallen.

Anschließend wurden aus den Körnermaiserträgen die Versuchsjahre 2005 und 2006 als Misserntejahre herausgefiltert und die Abweichungen der klimatischen Verläufe in diesen Jahren von dem Durchschnitt der Versuchsjahre bewertet. Es konnten verschiedene mögliche Gründe für die Mindererträge gefunden werden. So sind zum einen Hitzeperioden und Niederschlagsdefizite in der umweltsensiblen Blütephase des Maises ausschlaggebend. Aber auch eine insgesamt kühlere Vegetationsperiode oder eine beschleunigte Abreife durch hohe Herbsttemperaturen können den Ertrag gemindert haben.

In der darauffolgenden multiplen Regressionsanalyse wurde die statistischen Zusammenhänge zwischen den Körnermaiserträgen und ausgewählten Klimaparametern quantifiziert. Das Regressionsmodell mit der größten Modellgüte ergab sich aus den drei Klimavariablen der Temperatursumme, sowie der Niederschlagssumme der Monate Juli und August, und der Anzahl heißer Tage der Monate Juni bis August. Es konnten 76,5 % der Ertragsvarianzen dadurch erklärt werden.

Aus den Daten der Klimamodelle wurden abschließend die durchschnittlichen Erträge für die Jahre 2031 bis 2060 simuliert. Die Klimamodelle CLM und WETTREG zeigten einen mittleren Ertragsrückgang gegenüber den Versuchsjahren, während das Modell REMO deutliche Ertragszuwächse verzeichnet. Daraus kann geschlossen werden, dass sich in Zukunft höhere Erträge erzielen lassen, wenn die Temperaturen und Niederschläge in den Sommermonaten zunehmen und gleichzeitig weniger Extremtemperaturen auftreten. Ob selbiges eintreffen wird, lässt sich aufgrund der schwankenden Prognosen der Klimamodelle nicht hinreichend sicher belegen.

9. Literaturverzeichnis

- Beinhauer, R., & Günther, J. (1990). *Agrarmeteorologische Arbeitsunterlagen und Planungshilfen für Norddeutschland*. Kiel: Wissenschaftsverlag Vauk.
- Bernhofer, C., Hänsel, S., Schaller, A., & Pluntke, T. (2015). *Untersuchungen zur Erfassung und Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit*. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Böttcher, F. (2012). Die agrarmeteorologische Beschreibung des Standortes Bernburg-Strenzfeld als Managementwerkzeug für optimierten Pflanzenbau. Bernburg.
- Böttcher, F., Deutschländer, T., Friedrich, A., Friedrich, K., Fröhlich, K., Früh, B., . . . Walter, A. (2016). *Nationaler Klimareport 2016*. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst.
- Brasseur, G., Jacob, D., & Schuck-Zöller, S. (2017). *Klimawandel in Deutschland*. Springer Spektrum.
- Bundesamt für Naturschutz. (2012). *Bundesamt für Naturschutz*. Abgerufen am 2. Februar 2017 von http://www.bfn.de/0311_landschaft.html?&no_cache=1&tx_isprofile_pi1%5Blandschaft%5D=583&tx_isprofile_pi1%5Baction%5D=show&tx_isprofile_pi1%5Bcontroller%5D=Landschaft&cHash=8bc6ab6576615b24e25e74d1e546bcad
- Degener, J. F. (2013). Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf die Entwicklung der Biomasseerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Nutzpflanzen in Niedersachsen. Göttingen.
- Deutscher Wetterdienst. (2017). *Deutscher Wetterdienst*. Abgerufen am 9. 05 2017 von <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101334&lv3=101456>
- Ehrenstein, C. (2015). Welt. *Afrikas Bevölkerung vervierfacht sich*. Abgerufen am 2017. 05 2017 von <https://www.welt.de/politik/deutschland/article144603847/Afrikas-Bevoelkerung-vervierfacht-sich.html>
- Emeis, S. (2000). *Meteorologie in Stichworten*. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntrauger.
- Finck, A. (2007). *Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten* (6. Ausg.). Stuttgart: Gebrüder Bornträger.
- Gröbmaier, J. (2012). *Ökonomische Auswirkungen des Klimawandels auf den Markfruchtbau und Bewertung von Anpassungsoptionen am Beispiel von Ernteversicherungen*. München.
- Grunert, H. (2014). Skript Regressionsrechnung: 3.2 Regressionsanalyse. Bernburg.
- Häckel, H. (2016). *Meteorologie* (8. Auflage Ausg.). Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- Hs Anhalt. (2012). *Lage Bernburg*. Abgerufen am 18. 05 2017 von <http://www.loel.hs-anhalt.de/aktuelles/klimakonferenz-2012/veranstalter.html>

- IPCC. (2014). *Klimaänderungen 2014: Synthesebericht*. Bonn.
- Jacob, F., Jäger, E. J., & Ohmann, E. (1994). *Botanik* (4. Auflage Ausg.). Jena: Gustav Fischer Verlag.
- Köhler, I., Auerswald, K., & Schnyder, H. (2008). *Physiologische Wassernutzungseffizienz im Grünland*. Freising: Technische Universität München.
- Kühne, B. (2016). Trockenstress auf trockenen, sandigen Standorten vermeiden. *Praxisnah - Züchtung, Produktion, Verwertung*, S. 6-7.
- Kuttler, W. (2009). *Klimatologie*. Paderborn: Ferdinand Schöningh.
- KWS SAAT SE. (2017). *KWS SAAT SE*. Abgerufen am 20. 05 2017 von <http://www.kws.de/aw/Anbautipps/Anbautipps/Standortansprueche/~eqp/>
- Leisinger, K. M. (2008). *Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung*. Abgerufen am 29. 05 2017 von <http://www.berlin-institut.org/online-handbuchdemografie/umwelt/land.html>
- Leyser, A. (2016). *Hitzewelle oder Hitze-Intermezzo?* (D. W.-V.-u. Beratungszentrale, Hrsg.) Abgerufen am 23. 5 2017 von http://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2016/7/17.html
- Lütke Entrup, N., & Oehmichen, J. (2006). *Lehrbuch des Pflanzenbaues - Band 1: Grundlagen* (3. Auflage Ausg.). Soest.
- Lütke Entrup, N., & Schäfer, B. C. (2011). *Lehrbuch des Pflanzenbaues - Band 2: Kulturpflanzen* (3. Auflage Ausg.). Bonn: AgroConcept GmbH.
- Lütke Entrup, N., Schwarz, F., & Heilmann, H. (2013). *Handbuch Mais - Grundlagen, Anbau, Verwertung & Ökonomie*. Bonn: DLG-Verlag GmbH.
- Orzessek, D. (2014). *Skript Pflanzenproduktion II - Teil Futter*. Bernburg.
- Orzessek, D., Deubel, A., Kratzsch, G., & Gille, S. (2016). *Versuchsfeldführer 2016*. Bernburg.
- Schäfer, T. (2009). *Methodenlehre II - Multiple Regression*. Abgerufen am 22. 5 2017 von <https://www.tu-chemnitz.de/hsw/psychologie/professuren/method/homepages/ts/methodenlehre/met h9.pdf>
- Sourell, H., Löpmeier, F.-J., Thörmann, H.-H., & Höppner, F. (2010). *Feldberechnung IV*. Braunschweig: Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL).
- Statistisches Bundesamt. (2017). *Destatis.de*. Abgerufen am 10. 04 2017 von <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/FeldfruechteGruenland/AktuellFeldfruechte1.html>

Umweltbundesamt. (2013). *Umweltbundesamt - Klimamodelle und Szenarien*. Abgerufen am 02. 06 2017 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimamodelle-szenarien#textpart-1>

Universität Zürich. (2017). *Methodenberatung: Multiple Regressionsanalyse*. Abgerufen am 22. 5 2017 von <http://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse/zusammenhaenge/mreg.html>

USDA Foreign Agricultural Service. (2016). *Statista*. Abgerufen am 09. 11 2016 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/456592/umfrage/erntemenge-von-mais-weltweit/>

van Eimern, J., & Häckel, H. (1984). *Wetter- und Klimakunde* (4. Ausg.). Stuttgart: Ulmer.

10. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen und beschriebenen Software, benutzt habe.

Bernburg, den 20.06.2016

(Arne Wulferding)