



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Fakultät Life Sciences
Studiengang Ökotrophologie

**Klimawandel und Weinanbau: Potential der Metropolregion Hamburg
als zukünftiges Anbaugebiet ausgewählter Weißweinrebsorten**

Bachelorarbeit

Valentina Kind

Vorgelegt am 16.01.2020

1. Gutachter: Prof. Dr. Andrea Bauer (HAW Hamburg)
2. Gutachter: Dipl.oec.troph. Holger Koopmann (HAW Hamburg)

*Witness the water which falls from the skies upon our vineyards;
and then passes into the roots of the vine, to be converted into wine;
a constant proof that God loves us, and that he is pleased to see us happy.*

Benjamin Franklin, 1779

Abstract

The climate influences the viticulture all over the world. Rising temperatures have already led to changes in the vegetation period, the grape composition and the geographical distribution of the growing areas. Further changes are expected under future climate conditions. Thus climate change is becoming an unavoidable challenge in many traditional wine-growing areas, while at the same time it enables the development of new areas. In order to determine the cultivation potential of the Hamburg Metropolitan Region, three thermal climate indices (Winkler Index, Huglin Index, Cool Night Index and Hydrothermal Index) were calculated using climate projections and described with regard to the cultivation suitability of selected white wine grape varieties. By the end of the 21st century, the south-east of the Hamburg metropolitan region will be suitable for the cultivation of the grape varieties Riesling, Mueller-Thurgau, Pinot Gris, Pinot Blanc and Silvaner, while in the north-western coastal areas the hardly changing amount of precipitation with an increase in temperature at the same time will favour the occurrence of fungal diseases.

Zusammenfassung

Das Klima beeinflusst den Weinanbau weltweit. Steigende Temperaturen haben bereits zu Veränderungen der Vegetationsperiode, der Traubenzusammensetzung und der geografischen Verteilung der Anbaugebiete geführt. Weitere Veränderungen werden unter zukünftigen Klimabedingungen erwartet. Der Klimawandel wird damit zu einer unausweichlichen Herausforderung in vielen traditionellen Weinanbaugebieten und ermöglicht gleichzeitig die Erschließung neuer Gebiete. Um das Anbaupotential der Metropolregion Hamburg zu ermitteln, wurden mithilfe von Klimaprojektionen vier thermale Klimaindizes (Winkler-Index, Huglin-Index, Cool-Night-Index und Hydrothermischer Index) berechnet und in Hinblick auf die Anbaueignung ausgewählter Weißweinrebsorten beschrieben. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird der Südosten der Metropolregion Hamburg für den Anbau der Rebsorten Riesling, Müller-Thurgau, Grauburgunder, Weißburgunder und Silvaner geeignet sein, während die sich in den nordwestlich gelegenen Küstengebieten kaum verändernde Niederschlagsmenge bei gleichzeitig steigender Temperatur das Auftreten von Pilzkrankheiten begünstigen wird.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
2. Grundlagen der Rebe.....	2
2.1 Klimatische Mindestanforderungen.....	2
2.2 Verbreitung	3
2.3 Phänologische Entwicklung.....	4
2.4 Zusammensetzung der Traube	5
2.4.1 Zucker.....	5
2.4.2 Säure	5
2.4.3 Aromen	6
2.5 Ausgewählte Rebsorten im Überblick	6
2.5.1 Riesling.....	7
2.5.2 Müller-Thurgau	8
2.5.3 Grauburgunder.....	8
2.5.4 Weißburgunder	9
2.5.5 Silvaner.....	9
3. Klima und Klimawandel	9
3.1 Globale Sicht.....	9
3.2 Klimawandel in Deutschland.....	10
4. Einfluss des Klimawandels auf den Weinanbau	10
4.1 Veränderung von Verlauf und Länge der Wachstumsperiode.....	11
4.2 Veränderung der Traubenqualität	13
4.2.1 Zuckergehalt	14
4.2.2 Säuregehalt	14
4.2.3 Aromaprofil	15
4.2.4 Weitere Traubeneinhaltsstoffe	16
4.3 Verschiebung der geeigneten Anbauggebiete.....	16
5. Methoden und Daten	18
5.1 Auswahl der Klimaszenarien	18
5.2 Auswahl der Klimamodelle	20
5.3 Klimaindizes	21
5.3.1 Der Winkler-Index.....	21
5.3.2 Der Huglin-Index.....	22

5.3.3	Der Cool-Night-Index	24
5.3.4	Der Hydrothermische Index	24
5.4	Aktuelles Klima in der Metropolregion Hamburg.....	25
6.	Ergebnisse	26
6.1	Klimaänderungen im Verlauf des 21. Jahrhunderts.....	26
6.1.1	Temperaturänderungen.....	26
6.1.2	Niederschlagsänderungen.....	27
6.2	Anbaupotential der Metropolregion Hamburg	27
6.3	Anbaueignung der ausgewählten Rebsorten.....	27
6.4	Feuchtigkeitsbedingtes Krankheitsrisiko	30
6.4.1	Graufäule (Botrytis).....	31
6.4.2	Falscher Mehltau (Peronospora).....	32
6.4.3	Schwarzfleckenkrankheit (Phomopsis)	33
7.	Diskussion	33
7.1	Ergebnisse.....	33
7.2	Unsicherheiten bei Klimaprojektionen	34
7.3	Schwächen der Klimaindizes.....	35
8.	Zusammenfassung und Fazit.....	36
	Literaturverzeichnis	39
	Eidesstattliche Erklärung	44
	Anhang	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phänologische Entwicklung der Rebe (Fraga et al., 2012, S. 97)	4
Abbildung 2: Phänologische Daten für Austrieb, Blüte und Reifebeginn der Rebsorten Grauburgunder, Spätburgunder, Silvaner, Riesling und Müller-Thurgau in Hainfeld (Pfalz) von 1975-2015 (Koch & Oehl, 2018, S. 254)	12
Abbildung 3: Mostgewicht in °Oe der Rebsorten Grauburgunder, Spätburgunder, Silvaner, Riesling und Müller-Thurgau in Hainfeld (Pfalz) von 1975 bis 2015 (Koch & Oehl, 2018, S. 251)	14
Abbildung 4: Potentieller Alkoholgehalt, Gesamtsäuregehalt und pH-Wert des Traubenmosts zum Zeitpunkt der Lese in Languedoc (Frankreich) von 1984 bis 2013 (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017, S. 148)	15
Abbildung 5: Mögliche Verschiebung der Weinanbaugebiete bis Ende des 21. Jahrhunderts aufgrund der globalen Erderwärmung unter dem A1B-Emissionsszenario (Jones et al., 2012, S. 126)	18
Abbildung 6: Globale Mittelwerte der Erderwärmung an der Erdoberfläche als Fortsetzung der Simulationen für das 20. Jahrhundert (links) und projizierte Änderungen der Erdoberflächentemperatur für das frühe und späte 21. Jahrhundert im Vergleich zum Zeitraum 1980-1999 (rechts) für die SRES-Szenarien A2, A1B und B1 (IPCC, 2007, S. 49)	19
Abbildung 7: Karte der Metropolregion Hamburg mit den dazugehörigen Landkreisen in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern (Metropolregion Hamburg)	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Der Einfluss des Klimas auf die Eigenschaften von Wein (Jones et al., 2012, S. 117) ..	16
Tabelle 2: Tageslängenkoeffizient (d) in Abhängigkeit zur geografischen Breite (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 85).....	22
Tabelle 3: Erweiterung des Tageslängenkoeffizienten (d).....	22
Tabelle 4: Anbaueignung verschiedener Rebsorten anhand des Huglin-Index (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 86) (Stock et al., 2007, S. 92)	23
Tabelle 5: Die Klassen des Cool-Night-Index (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 86).....	24
Tabelle 6: Winkler-Index in °C auf Grundlage der Klimaprojektionen.....	27
Tabelle 7: Huglin-Index auf Grundlage der Klimaprojektionen	28
Tabelle 8: Cool-Night-Index in °C auf Grundlage der Klimaprojektionen.....	29
Tabelle 9: Hydrothermischer Index in °Cmm auf Grundlage der Klimaprojektionen	31
Tabelle 10 : Monats- und Jahresmittel der Temperatur in °C für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 38).....	46
Tabelle 11: Monats- und Jahreswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 38).....	46
Tabelle 12: Monats- und Jahreswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 39).....	46
Tabelle 13: Mittlere Niederschlagshöhen im mm für den Bezugszeitraum 1971-2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 42).....	47
Tabelle 14: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen in K 2036-2065 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 52)	48
Tabelle 15: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen in K 2071-2100 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 52)	48
Tabelle 16: Mittlere saisonale Temperaturänderungen in K	48
Tabelle 17: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen in % 2036-2065 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 52)	49
Tabelle 18: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen in % 2071-2100 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen,	

die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 53)	49
.....	49
Tabelle 19: Mittlere saisonale Niederschlagsänderung in %	49
Tabelle 20: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario	50
Tabelle 21: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario.....	50
Tabelle 22: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario	50
Tabelle 23: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2035-2065 im B1-Szenario.....	50
Tabelle 24: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario ...	51
Tabelle 25: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario.....	51
Tabelle 26: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario	51
Tabelle 27: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2035-2065 im A1B-Szenario..	51
Tabelle 28: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario.....	52
Tabelle 29: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario	52
Tabelle 30: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario	52
Tabelle 31: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2035-2065 im A2-Szenario.....	52
Tabelle 32: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario.....	53
Tabelle 33: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario.....	53
Tabelle 34: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario	53
Tabelle 35: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario.....	53
Tabelle 36: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario ...	54
Tabelle 37: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario.....	54
Tabelle 38: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario	54
Tabelle 39: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario..	54
Tabelle 40: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario.....	55
Tabelle 41: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario	55

Tabelle 42: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario	55
Tabelle 43: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario.....	55
Tabelle 44: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario	56
Tabelle 45: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario	57
Tabelle 46: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario	58
Tabelle 47: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario	59
Tabelle 48: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario	60
Tabelle 49: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario	61
Tabelle 50: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Referenzzeitraum 1971-2000.....	62

Abkürzungsverzeichnis

A1, A1B, A1F1, A1T, A2	SRES-Klimaszenarien
B1, B2	SRES-Klimaszenarien
CI	Cool-Night-Index
COSMO	Europäische Wetterdienste (Consortium for Small Scale Modelling)
COSMO-CLM	Regionales Klimamodell (COSMO model in CLimate Mode)
ECHAM	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Hamburg
HI	Huglin-Index
HyI	Hydrothermischer Index
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change)
MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
REMO	Regionales Klimamodell des MPI-M (REgional MOdel)
SRES	IPCC-Sonderbericht über Emissionsszenarien (Special Report on Emission Scenarios)
STAR	Regionales Klimamodell des PIK (STATistisches Regionalisierungsmodell)
WETTREG	Regionales Klimamodell (WETTERlagen-basierte REGionalisierungsmethode)
WI	Winkler-Index

1. Einleitung

Das Klima ist einer der wichtigsten Faktoren für den Erfolg aller landwirtschaftlichen Systeme. Das Klima bestimmt, ob eine Pflanze für eine bestimmte Region geeignet ist oder nicht, es beeinflusst das Wachstum der Pflanze, Ertrag und Qualität der Ernte und entscheidet nicht zuletzt über die wirtschaftliche Nachhaltigkeit des Anbaus (Jones, 2016, S. 2).

Die Weinrebe wird seit Tausenden von Jahren angebaut. Während dieser Zeit sind zahlreiche Anbaugebiete entstanden, deren Klima eine wesentliche Rolle bei der Ausbildung eines bestimmten Weincharakters spielt (Schultz, Hofmann & Jones, 2009, S. 12). Bis Ende des letzten Jahrhunderts galt das Klima einer Anbauregion, abgesehen von einigen jahrgangsbedingten Schwankungen, als gegeben. Erst ab 1990 wurden Wissenschaftler darauf aufmerksam, dass die anhaltend steigenden Temperaturen erhebliche Auswirkungen auf den Weinanbau haben könnten (van Leeuwen et al., 2019, S. 514-515).

Um den Einfluss des Klimawandels auf den Weinanbau zu beschreiben, müssen folgende Punkte untersucht werden (Jones, Reid & Vilks, 2012, S. 109):

- Die Klimafaktoren, die das Wachstum und die Qualität der Trauben beeinflussen
- Die klimatischen Anforderungen der verschiedenen Rebsorten
- Das Klima in den Anbaugebieten
- Der Einfluss des Klimawandels auf das Klima in den Anbaugebieten

Während es in Südeuropa allmählich zu warm wird für die Produktion von Qualitätswein, wird der Weinanbau in nördlichen Regionen zunehmend attraktiver. Dabei ist der Gedanke, Wein im hohen Norden anzubauen, nicht neu. Zwischen 900 und 1300 n. Chr. wurde in nördlichen Regionen viel Weinbau betrieben; im 12. und 13. Jahrhundert fand die Weinlese sogar häufig schon im frühen September statt. Die kleine Eiszeit zwischen dem 14. und 19. Jahrhundert führte jedoch dazu, dass viele Weinberge „ausstarben“ und die Wachstumsperiode in den meisten Gebieten so kurz war, dass der Weinanbau sogar in Südeuropa zur Herausforderung wurde (Jones, White, Cooper & Storchmann, 2005, S. 321).

In einigen Teilen der Metropolregion Hamburg wie in Bad Oldesloe (Albrod, 2019) und in der Holsteinischen Schweiz (Schneider, D., 2019) wird bereits seit einigen Jahren Wein angebaut. Durch die Kultivierung von kälteresistenten Sorten wie Muscaris oder Solaris gelingt der Anbau trotz der kühlen Temperaturen in der Region. Doch wie sieht es mit

namhafteren Rebsorten aus? Können unter dem sich wandelnden Klima zukünftig auch Sorten wie Riesling oder Grauburgunder erfolgreich in der Metropolregion Hamburg kultiviert werden? Diese Frage zu beantworten, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

In den ersten Kapiteln werden die Grundlagen der Rebe sowie des Klimawandels erklärt und miteinander in Beziehung gesetzt. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Weinanbau werden auf der Grundlage von Beobachtungen in den Anbaugebieten beschrieben. Um das Potential der Metropolregion Hamburg als zukünftiges Anbaubiet zu ermitteln, werden mithilfe von Klimamodellen insgesamt vier Klimaindizes berechnet. Anschließend werden die Methoden und Ergebnisse diskutiert und Herausforderungen für den Weinanbau im untersuchten Raum zusammengefasst.

Da die steigende Temperatur der Hauptmesseffekt des Klimawandels ist (van Leeuwen & Darriet, 2016, S. 152), liegt der Fokus dieser Arbeit auf den Auswirkungen der globalen Erderwärmung. Zusätzlich werden Veränderungen in der Niederschlagsmenge und -verteilung der Metropolregion Hamburg herausgearbeitet und in ihrer Bedeutung für das Anbaupotential der Region interpretiert. Andere Auswirkungen des Klimawandels, wie die erhöhte Kohlenstoff- oder Stickstoffkonzentration in der Atmosphäre, werden jedoch nicht untersucht und bleiben lediglich erwähnt.

2. Grundlagen der Rebe

2.1 Klimatische Mindestanforderungen

Die Weinrebe hat sehr spezifische klimatische Bedürfnisse. Während des vegetativen Wachstums und der Traubenreife braucht sie hohe Temperaturen und Strahlungsintensitäten. Im Frühjahr benötigt sie eine mittlere Temperatur von 10°C, um den Wachstumszyklus einzuleiten. Im Sommer bevorzugt sie höhere Temperaturen von 20-30°C, wobei die optimale Temperatur von Rebsorte zu Rebsorte variiert (Cardell, Amengual & Romero, 2019, S. 1). Von Vorteil für den Anbau hochqualitativer Trauben und damit für die spätere Produktion von Qualitätswein sind hohe Tagestemperaturen mit relativ kühlen Nächten (Malheiro, Santos, Fraga & Pinto, 2010, S. 164). Eine Anzahl von mindestens 1.250 Sonnenstunden im Jahr gehört ebenfalls zu den klimatischen Mindestanforderungen der Rebe (Stock et al., 2007, S. 91), nur so können optimale Photosyntheselevel erreicht werden,

wodurch den Trauben ausreichend Energie für Wachstum und Reifung zur Verfügung steht (Jones et al., 2012, S. 110).

Wetterextreme mag die Rebe gar nicht. Extreme Temperaturen über 40-45°C können physiologische Prozesse beeinträchtigen und niedrigere Ernteerträge sowie eine schlechtere Traubenqualität zur Folge haben (Fraga, Malheiro, Moutinho-Pereira & Santos, 2013, S. 910).

Im Frühjahr und Herbst ist die Rebe anfällig für Früh- und Spätfrost. Obwohl sie im Winter kurzzeitig extreme Temperaturen von 15-20°C unter dem Nullpunkt aushält, können Temperaturen von weniger als -1°C im Frühjahr die jungen Knospen, Blätter und Triebe schädigen (Malheiro et al., 2010, S. 163).

Aufgrund ihres tiefen Wurzelsystems benötigt die Rebe nicht besonders viel Niederschlag (Fraga, Malheiro, Moutinho-Pereira & Santos, 2012, S. 103). Bei guter Verteilung reichen bereits 450mm im Jahr aus, große Niederschlagsmengen von über 700mm jährlich können den Anbau jedoch erschweren (Lott, Pfaff, Prior & Hillebrand, 2010, S. 20). Wichtig ist eine hohe Bodenfeuchtigkeit während des Austriebs und der Entwicklung der Blüten, gefolgt von trockenen und stabilen Witterungsbedingungen während der Blüte und Reife (Malheiro et al., 2010, S. 164).

2.2 Verbreitung

Aufgrund dieser speziellen Bedürfnisse an das Klima sind die meisten Weinanbaugebiete auf der Nordhalbkugel zwischen dem 30. und 50. Breitengrad gelegen, wo die mittlere Temperatur während der Wachstumszeit 12-22°C beträgt (Fraga et al., 2013, S. 910). In tropischen und subtropischen Regionen ist es fast unmöglich Qualitätswein zu produzieren, ebenso schwierig ist es in sehr hohen Breitengraden (van Leeuwen & Darriet, 2016, S. 151). Auf der Südhalbkugel befinden sich die meisten Weinanbaugebiete zwischen dem 30. und 40. Breitengrad (Lott et al., 2010, S. 20).

Die schmale geografische Ausbreitung der einzelnen Rebsorten macht die Rebe anfälliger für Klimaänderungen als Pflanzen mit einer größeren geografischen Ausbreitung (Jones, White et al., 2005, S. 322).

2.3 Phänologische Entwicklung

Phänologie (Erscheinungslehre) beschreibt in der Pflanzenlehre die meist witterungs- bzw. klimaabhängig jährlich wiederkehrenden Wachstumserscheinungen wie das oberirdische Erscheinen von Pflanzenorganen, die Blütenbildung oder den Laubfall (Freudig, 1999).

Hauptantreiber des phänologischen Zyklus ist die Temperatur (Parker et al., 2013, S. 250).

Während der Wachstumszeit werden drei phänologische Ereignisse unterschieden: Austrieb, Blüte und Reifebeginn (Véraison) (Duchêne, Huard, Dumas, Schneider & Merdinoğlu, 2010, S. 194). Die Lese (Weinernte) wird häufig auch dazu gezählt, allerdings ist der Erntezeitpunkt kein richtiges phänologisches Ereignis, da er auf subjektiven Bewertungen der optimalen Fruchtzusammensetzung beruht, die oft ein Ausdruck der individuellen Interpretation ist oder von Trends und Marktzwängen abhängt (Mira de Orduña, 2010, S. 1845). Abbildung 1 zeigt die phänologische Entwicklung der Rebe im Jahresverlauf.

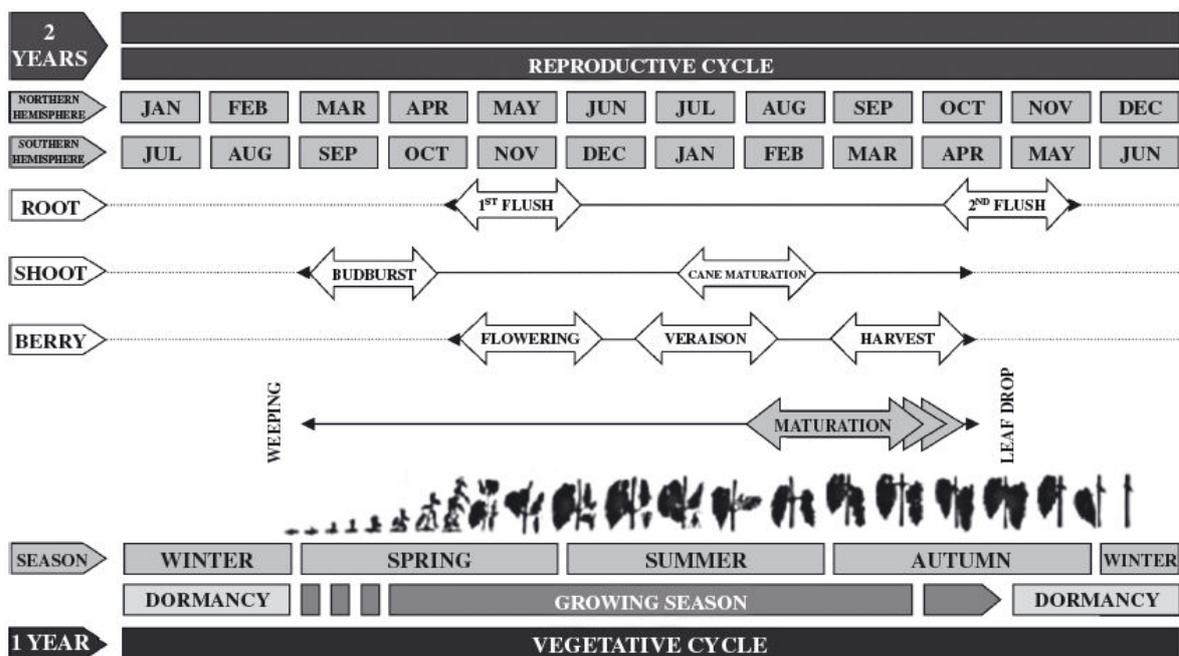


Abbildung 1: Phänologische Entwicklung der Rebe (Fraga et al., 2012, S. 97)

Der Austrieb (Knospenaufbruch) im Frühjahr stellt den Beginn der Wachstumsperiode dar. Vom Austrieb bis zur vollen Blüte entwickelt die Rebe ihre vegetativen Organe, Blätter und Blüten. Die volle Blüte ist erreicht, wenn der Fertilisierungsprozess (Befruchtung) in die Bildung der Beeren übergeht (Duchêne et al., 2010, S. 194).

Nach der Blüte beginnt das Beerenwachstum, das durch Phytohormone gesteuert wird. Zu Beginn vergrößern sich die Beeren durch Zellteilung und sind dabei nur wenig von der Umwelt beeinflusst. Je nach Rebsorte dauert dies 25-46 Tage. Danach wird die Zellteilung

durch den Abfall des Auxin-Spiegels (Wachstumshormon) abgeschlossen. Die Beeren haben zu diesem Zeitpunkt einen noch relativ geringen Zuckergehalt. Nach der Zellteilung setzt der Reifebeginn ein (Jakob, L., 2012, S. 70).

Der Reifebeginn findet bei frühreifen Rebsorten wie Müller-Thurgau bereits Mitte Juli statt, bei spätreifen Sorten wie Riesling erst ab der 3. Augustwoche. In der anschließenden Reifephase tritt keine Zellteilung mehr ein, sondern nur noch eine Vergrößerung der bereits vorhandenen Zellen. Dies erfolgt durch die Einlagerung von Zucker (Jakob, L., 2012, S. 69). Gleichzeitig wird Säure abgebaut und entweder in Zucker umgewandelt oder veratmet. Diese Phase dauert in der Regel 35-50 Tage (Jakob, L., 2012, S. 416).

Die einzelnen Rebsorten unterscheiden in Hinblick auf die phänologischen Eintrittstermine untereinander deutlich (van Leeuwen et al., 2019, S. 521). Das ist entscheidend für die Auswahl von Rebsorten, die für den Anbau in einer Region unter zukünftigen klimatischen Bedingungen geeignet sind.

2.4 Zusammensetzung der Traube

Die Zusammensetzung der Trauben verändert sich während des Beerenwachstums kontinuierlich. Die Zusammensetzung zum Zeitpunkt der Lese ist ausschlaggebend für die spätere Zusammensetzung des Weins (Jakob, L., 2012, S. 75).

2.4.1 Zucker

Während der Reife steigt der Zuckergehalt in den Trauben mit der Temperatur an, während der Gehalt an Säure sinkt (van Leeuwen & Darriet, 2016, S. 151). Kurz vor der Lese ist das Verhältnis von Zucker und Säure das Hauptqualitätsmerkmal der Trauben und ein wichtiger Indikator für die Traubenreife (Bock, Sparks, Estrella & Menzel, 2011, S. 70).

Die relative Süße des Traubensaftes wird in Grad Öchsle (°Oe) gemessen und beschreibt den Anteil der gelösten Stoffe (hauptsächlich Zucker) am Traubensaft (Most), man spricht daher von Mostgewicht (Bock et al., 2011, S. 71). Reife Trauben haben ein Mostgewicht zwischen 74 und 106°Oe, was einem potentiellen Alkoholgehalt von 9,3 bis 17 Vol.-% entspricht (Johnson, Ferstl, Vogel & Brook, 2013, S. 23).

2.4.2 Säure

Während der der Gehalt an Zucker, phenolischen Verbindungen und Kationen wie Kalium während der Reife steigt, sinkt der Gehalt an organischen Säuren, insbesondere der Gehalt an Äpfelsäure (Mira de Orduña, 2010, S. 1845). Die zum Reifezeitpunkt optimale Trau-

benzuzusammensetzung in Hinblick auf das Verhältnis von Zucker und Säure wird erreicht, wenn die Traubenreife unter gemäßigten Temperaturen eintritt (van Leeuwen et al., 2019, S. 515).

2.4.3 Aromen

Die aromatische Vielfalt eines Weins beeinflusst seine sensorische Qualität erheblich (Rusjan, 2010, S. 411). Diese Qualität basiert auf der Wahrnehmung von Aromastoffen unterschiedlicher Intensität und Komplexität, die auf das Vorhandensein von flüchtigen Verbindungen im Wein zurückzuführen ist. Die Kombination dieser flüchtigen Verbindungen ist oft Ausdruck einer einzelnen Rebsorte bzw. trägt zu ihrer Typizität bei (Pons et al., 2017, 142).

In den letzten Jahrzehnten konnten über 1.000 dieser flüchtigen Verbindungen mit Gehalten von weniger als 10pg bis über 100mg pro Liter nachgewiesen werden. Der Geruchsschwellenwert der einzelnen Verbindungen fällt sehr unterschiedlich aus, liegt aber im Pikogramm-Bereich bzw. im unteren Milligramm-Bereich für weniger geruchsintensive Verbindungen und liegt damit noch unterhalb der Erfassungsgrenze analytischer Methoden.

Die meisten aromatischen Verbindungen existieren bereits als Vorstufen (Präkursoren) in den Trauben, allerdings sind sie dort in der Regel an Zucker gebunden und dadurch sensorisch größtenteils unwirksam (Jakob, L., 2012, S. 51). Die Temperatur spielt vor allem während der Reifeperiode eine wesentliche Rolle bei der Bildung und dem Erhalt von Aromavorstufen (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 82). Kühlere Temperaturbedingungen während der Nacht sind in der Weißweinproduktion notwendig, um Weine mit intensiven und komplexen Aromen zu erhalten (van Leeuwen et al., 2019, S. 515).

Weitere Aromen entstehen während der Weinherstellung durch Prozesse wie die alkoholische Fermentation oder die Eichenfasslagerung (Poni et al., 2018, S. 447).

2.5 Ausgewählte Rebsorten im Überblick

Die Lage der Weinanbaugebiete ist naturgebunden und kaum veränderbar. Das heißt, der Winzer muss sich mit der Wahl der Rebsorte an den Standort anpassen. Fehlentscheidungen können später nicht korrigiert werden, weder auf dem Weinberg noch im Weinkeller (Lott et al., 2010, S. 364). Über 10.000 verschiedene Rebsorten sind bekannt, die alle signifikante Unterschiede in Hinblick auf Phänologie und Traubenzusammensetzung aufweisen (Mira de Orduña, 2010, S. 1845).

Die unterschiedliche Zusammensetzung der verschiedenen Rebsorten ist für die Art des Weins und seinen Charakter von großer Bedeutung. Einige Sorten enthalten auch im reifen Zustand noch viel Säure bei geringem Zuckergehalt und geben eher neutrale Weine. Andere Sorten haben ein besonders harmonisches Zucker-Säure-Verhältnis und eignen sich daher für die Herstellung von Qualitätswein (Jakob, L., 2012, S. 393).

Deutschland ist in Europa das klassische Land der Weißweine (Lott et al., 2010, S. 59). In dieser Arbeit wird daher das Anbaupotential der Metropolregion Hamburg für die fünf Weißweinrebsorten mit dem größten Anteil an der Rebfläche Deutschlands untersucht, dazu gehören in absteigender Reihenfolge Riesling, Müller-Thurgau, Grauburgunder, Weißburgunder und Silvaner (Deutsches Weininstitut, 2019).

2.5.1 Riesling

Der Weiße Riesling ist eine der berühmtesten Rebsorten. Er besitzt die Fähigkeit, den eigenen Stil beizubehalten und gleichzeitig die Merkmale einer Lage so stark zum Ausdruck zu bringen, wie es kaum einer anderen Rebsorte gelingt (Jakob, L., 2012, S. 327). Obwohl Riesling zu den spätreifenden Sorten gezählt wird, werden auch in kühleren Regionen beste Ergebnisse erzielt, weshalb er vor allem in den nördlichen Anbaugebieten Deutschlands so stark verbreitet ist.

Der Austrieb der Rieslingknospen findet mittelspät bis spät, die Blüte und Reife zu einem späten bis sehr späten Zeitpunkt statt. Die Vollreife erreicht die Rieslingbeere in Süddeutschland etwa Anfang Oktober, in nördlicheren Gebieten nicht vor Mitte Oktober. Die Rieslingrebe besitzt eine ausgezeichnete Winterfrosthfestigkeit und übersteht Winterfröste von -20°C, teils sogar von -25°C.

Als Träger der fruchtigen Rieslingart ist die Säure sein wichtigstes Qualitätsmerkmal. Je nach Reifegrad schwankt ihr Gehalt zum Zeitpunkt der Lese zwischen 9 und 15g/l. Der Geschmack junger Rieslingweine zeichnet sich durch fruchtige Aromen nach Zitrone, Apfel, Pfirsich, Grapefruit und Passionsfrucht aus, im Verlauf der Reife werden diese jedoch mehr und mehr durch mineralische Noten verdrängt (Lott et al., 2010, S. 61-68). Je nach Anbaugebiet hat der Riesling aus Deutschland eine blassgrüne (Mosel) bis goldgelbe Farbe (Rheinland-Pfalz) (Johnson et al., 2013, S. 10).

In Hinblick auf Krankheiten gehört Riesling zu den nicht besonders anfälligen Rebsorten. Es besteht keine Überempfindlichkeit gegenüber dem Falschen Mehltau, der Schwarzfleckenkrankheit oder Oidium, dafür wird die Rieslingrebe leicht vom Roten Brenner befallen. Bei jahgangsbedingt früher Reife bei hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit ist die Rieslingbeere platanfällig, was ihr Fäulnisrisiko stark erhöht (Lott et al., 2010, S. 65).

2.5.2 Müller-Thurgau

Müller-Thurgau ist nach Riesling die am zweithäufigsten angebaute Weißweinrebsorte in Deutschland und wird als Kreuzung aus den Rebsorten Riesling und Silvaner betrachtet.

Im Vergleich zum Riesling ist die Müller-Thurgau-Rebe nicht so kälteresistent. Bereits zwei bis drei Wintertage mit Temperaturen von unter -15°C können Erfrierungserscheinungen hervorrufen (Lott et al., 2010, S. 73-74).

Müller-Thurgau erreicht die Vollreife etwas früher als Riesling, in guten Jahren oft schon am 15. September, in schlechteren Ende September bis Anfang Oktober. Der Säuregehalt sinkt zum Zeitpunkt der Reife häufig unter 10g/l , in manchen Jahren sogar auf 5g/l , was in nördlichen Anbaugebieten als zu gering angesehen wird und weshalb der Säureabbau in vielen Jahren unterdrückt werden muss (Lott et al., 2010, S. 77). Müller-Thurgau-Weine zeichnen sich durch ein feinblumiges Muskataroma und eine milde Säure aus (Jakob, L., 2012, S. 283).

In Hinblick auf Krankheiten gehört die Müller-Thurgau-Rebe zu den eher anfälligen Sorten, vor allem gegen den Falschen Mehltau, aber auch gegen die Schwarzfleckenkrankheit, Esca und den Roten Brenner. Bei feuchtem Herbstwetter ist die Rebe außerdem anfällig für Stiel- und Beerenfäule (Lott et al., 2010, S. 74-76).

2.5.3 Grauburgunder

Der Grauburgunder hat erst in den letzten Jahren eine so starke Verbreitung in Deutschland gefunden. Er zählt zu den mittelspäten Rebsorten, seine Reife fällt oft mit der des Silvaners zusammen. Mit $5\text{-}6\text{g/l}$ ist sein Säuregehalt relativ gering, dafür gehören die gehaltvollen Grauburgunder-Weine zu den extraktreichsten Sorten unter den Weißweinen (Lott et al., 2010, S. 87-91). Um den typischen Charakter des Grauburgunders zu erhalten, sollten die Trauben im reifen, aber nicht überreifen Zustand geerntet werden (Jakob, L., 2012, S. 201).

2.5.4 Weißburgunder

Der Weißburgunder hat in vielen Regionen Deutschlands den Silvaner verdrängt, hat hierzulande jedoch noch lange nicht die Anerkennung erlangt, die er in einigen Anbaugebieten Frankreichs genießt.

Die Reife des Weißburgunders fällt ebenfalls mit der des Silvaners zusammen und kann als mittelspät bezeichnet werden. Er besitzt mit 10-12g/l eine ausgewogene Fruchtsäure. Anders als der Name es vermuten lässt, unterscheidet sich seine Stilistik deutlich von der des Grauburgunders. Die Weißburgunderweine sind eleganter und ihre fruchtigen Aromen wesentlich dezenter als die des Grauburgunders (Lott et al., 2010, S. 91-94).

2.5.5 Silvaner

Die Reife der Silvanerbeere ist fast 14 Tage vor der des Rieslings erreicht, die Lese findet in manchen Jahren bereits in den letzten Septembertagen, meist jedoch Anfang Oktober statt. Bei der Ernte werden Spätlesen bevorzugt, da die spitze Säure bei längerer Reife abnimmt und in den Beeren noch weitere Aromastoffe gebildet werden.

Die Säure des Silvaners beträgt bei der Lese zwischen 3 und 4 g/l und unterscheidet sich mit ihrer spritzigen und grasigen Note deutlich von der fruchtigen Rieslingsäure. Silvanerweine besitzen eine ausgewogene und eher neutrale Geschmacksnote und zeichnen sich durch dezent fruchtige Aromen nach grünem Apfel und Stachelbeere sowie Aromen nach frischem Heu und Minze aus.

Gegen Frost ist die Silvanerrebe nicht besonders resistent und sollte daher nicht in Senken oder Mulden gepflanzt werden, wo sich kalte Luft sammeln kann (Lott et al., 2010, S. 81-85).

3. Klima und Klimawandel

3.1 Globale Sicht

Beobachtungen des letzten Jahrhunderts zeigen, dass sich das Klima weltweit verändert. Historisch gesehen sind Klimaänderungen zwar normal, doch viele der seit 1950 beobachteten Veränderungen sind über Jahrzehnte bis Jahrtausende vorher noch nie aufgetreten. Die jüngsten anthropogenen Treibhausgasemissionen sind höher als jemals zuvor (IPCC, 2014, S. 40) und immer mehr Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Mensch durch eben jene Treibhausgasemissionen aufgrund des schnellen Wirtschafts- und Bevölkerungs-

wachstums der Hauptverursacher der seit Mitte des letzten Jahrhunderts beobachteten Erderwärmung ist (IPCC, 2014, S. 4).

Mithilfe von Computermodellen kann unter verschiedenen Annahmen über zukünftige Treibhausgasemissionen die zukünftige Klimaentwicklung projiziert werden. Je nach Szenario ist bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein globaler Temperaturanstieg von 1,7-4,4°C zu erwarten (Schmidt, Eyring, Latif, Rechid & Sausen, 2017, 15). Die Klimaänderungen fallen dabei in nördlich gelegenen Regionen stärker aus als im Mittelmeerraum. Das liegt daran, dass polwärts gerichtete Gebiete stärker auf den Klimawandel reagieren (Schultze & Sabbatini, 2019, S. 1142). Außerdem unterliegen Küstenregionen schwächeren Auswirkungen als Inlandregionen (Duchêne et al., 2010, S. 193).

3.2 Klimawandel in Deutschland

In Mitteleuropa und Deutschland sind die Jahresdurchschnittstemperaturen von 1881 bis 2014 um 1,3°C gestiegen. Die jährlichen Niederschläge haben im Vergleich zum langjährigen Mittelwert von 1961-1990 um 10,2% zugenommen (Kaspar & Mächel, 2017, S. 24).

Mithilfe regionaler Klimamodelle, wie sie in Kapitel 5.2 beschrieben werden, sind für Deutschland bis zum Ende des Jahrhunderts Temperaturerhöhungen von 1,3-4,8°C im Sommer und 1,2-4,6°C im Winter projiziert, die Projektionen für die Niederschlagsentwicklung unterscheiden sich von Region zu Region stark (Jacob, Kottmeier, Petersen, Rechid & Teichmann, 2017, S. 32).

4. Einfluss des Klimawandels auf den Weinanbau

Veränderungen in der phänologischen Entwicklung der Rebe, im Ernte- und Reifepotential sowie in der Zusammensetzung der Trauben haben sich bereits ereignet und werden voraussichtlich auch im weiteren Verlauf des Jahrhunderts als Reaktion auf zukünftige Klimaänderungen stattfinden (Malheiro et al., 2010, S. 164).

Der Klimawandel kann sich direkt und/oder indirekt auf den Weinanbau auswirken. Durch die Veränderung von Temperatur, Niederschlagshöhen und der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre werden die physiologischen Prozesse von Pflanzen und damit auch Ertrag und Qualität der Ernte beeinflusst (direkter Einfluss des Klimawandels). Durch die Veränderung von strukturellen und funktionellen Eigenschaften von Ökosyste-

men, hierzu gehört zum Beispiel das Auftreten von Pflanzenkrankheiten, wirkt sich das Klima zusätzlich auf die Pflanzenproduktion aus (indirekter Einfluss des Klimawandels).

Wie stark sich der Klimawandel auf den Weinanbau auswirkt und welche Folgen er nach sich zieht, hängt von seiner Art und Intensität, der Empfindlichkeit der einzelnen Rebsorten und der Einführung von Anpassungsstrategien ab (Gömann, Frühauf, Lüttger & Weigel, 2017, S. 184).

4.1 Veränderung von Verlauf und Länge der Wachstumsperiode

Der Klimawandel bewirkt, dass die phänologischen Stadien schneller durchlaufen werden und die phänologischen Ereignisse früher eintreten (Jones, Duchêne et al., 2005, S. 54).

Im Elsass (Frankreich) findet der Austrieb der Knospen heute etwa 10 Tage früher statt als noch im Jahr 1950, die Blüte tritt 23 Tage, die Reife sogar 39 Tage früher ein, gefolgt von einem etwa 25 Tage früheren Lesetermin (van Leeuwen et al., 2019, S. 518).

Ähnliche Trends sind weltweit zu beobachten, so zum Beispiel in der Pfalz, wo der Austrieb für die Rebsorten Müller-Thurgau, Riesling, Silvaner, Spätburgunder und Grauburgunder heute etwa 11-15 Tage früher stattfindet, die Blüte 18-22 Tage und die Reife 16-22 Tage früher eintritt als noch im Jahr 1975 (Koch & Oehl, 2018, S. 253). Die Entwicklung wird in Abbildung 2 veranschaulicht.

Grund für diese Entwicklung sind vor allem die erhöhten Temperaturen. Steigt die Temperatur im Sommer nur an wenigen Tagen über 30°C, kann dies von Vorteil sein für das Reifepotential der Trauben. Längere Perioden über 30°C hingegen lösen in der Rebe Hitzestress aus und führen zu einem verfrühten Reifebeginn (Jones et al., 2012, S. 112). Dies kann nachteilig für die Qualität der Trauben sein. Wenn die Trauben ihre volle Reife in der heißesten Zeit des Jahres (auf der Nordhalbkugel im Juli und August) erreichen, haben die Beeren zum Zeitpunkt der Lese zwar einen hohen Zuckergehalt, einige Aromen sind jedoch noch nicht fertig ausreift. Weinen aus diesen Trauben mangelt es an Frische und komplexen Aromen (van Leeuwen et al., 2019, S. 521). Zwar gibt es technische Möglichkeiten, die Reife hinauszuzögern, zum Beispiel durch Rebschnitt-Techniken, allerdings ist deren Effekt auf wenige Tage limitiert und damit nicht als langfristige Anpassungsstrategie geeignet (Duchêne et al., 2010, S. 202).

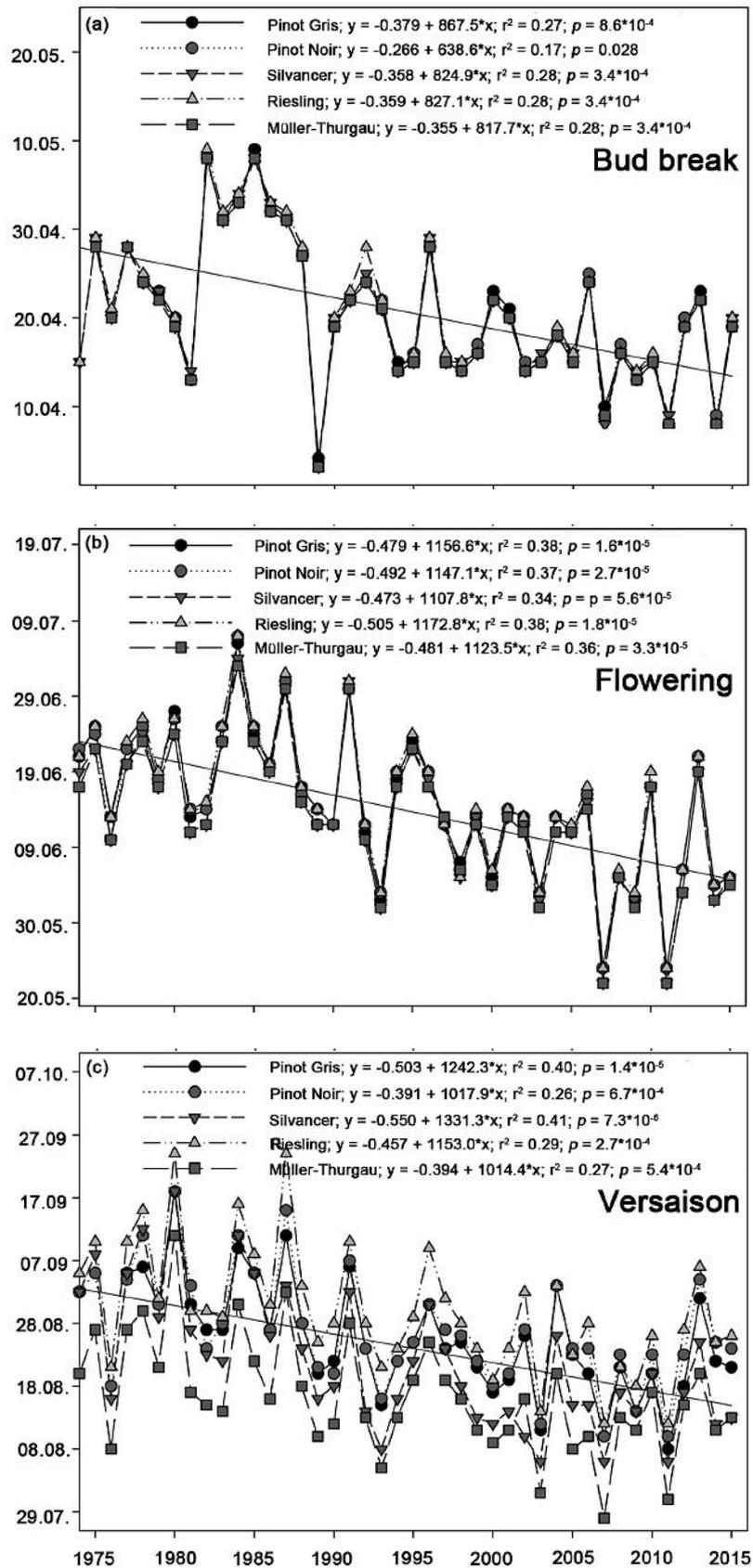


Abbildung 2: Phänologische Daten für Austrieb, Blüte und Reifebeginn der Rebsorten Grauburgunder, Spätburgunder, Silvaner, Riesling und Müller-Thurgau in Hainfeld (Pfalz) von 1975-2015 (Koch & Oehl, 2018, S. 254)

Ein weiteres Problem durch den früheren Eintritt der phänologischen Ereignisse ist, dass Pflanzen im Frühjahr besonders sensibel auf Temperaturschwankungen reagieren (Gömann et al., 2017, S. 185). Der frühere Austrieb macht die Rebe, deren Kälteresistenz durch die vorangegangene Wärmeperiode bereits reduziert sein kann, anfällig für Spätfrost (van Leeuwen et al., 2019, S. 518)

Zwar ist die Rebphenologie weitgehend von den Rebsorten und nicht allein vom Klima abhängig, allerdings sind die Rebsorten in den traditionellen Weinanbaugebieten Europas gezielt so ausgewählt worden, dass die optimale Reife unter den lokalen klimatischen Bedingungen zwischen dem 10.09. und 10.10. eintritt (van Leeuwen et al., 2019, S. 518).

4.2 Veränderung der Traubenqualität

Während die Einnahmen aus landwirtschaftlichen Erzeugnissen im Wesentlichen vom Ernteertrag getragen werden, ist beim Weinanbau vor allem die Qualität der Trauben entscheidend, da diese die Qualität des Weins signifikant beeinflusst und damit auch den Preis, den der Verbraucher bereit ist zu bezahlen (van Leeuwen et al., 2019, S. 514).

Die Qualität eines Weins wird von vielen Umweltfaktoren beeinflusst, vom Klima und Wetter genauso wie von der Landschaft und vom Boden. Dieses Zusammenspiel der Umweltfaktoren wird als „Terroir“ bezeichnet (Dougherty, 2012, S. 14-15). Von allen umweltbedingten Einflussfaktoren ist das Klima der größte (van Leeuwen & Darriet, 2016, S. 151).

Zwar beeinflusst die Temperatur die Zusammensetzung und die Qualität der Trauben, es ist jedoch ein Irrtum anzunehmen, dass höhere Jahresdurchschnittstemperaturen grundsätzlich zu einer höheren Weinqualität führen (Lott et al., 2010, S. 365). Der Temperaturanstieg während der Wachstumsperiode verbessert die Traubenqualität zwar grundsätzlich, allerdings nur bis zu einem bestimmten Optimum. Steigt die Temperatur über dieses Optimum, sinkt die Traubenqualität wieder (Jones, White et al., 2005, S. 327).

Die Veränderungen der Traubenzusammensetzung mit besonderer Betrachtung des Zucker- und Säuregehalts sowie der Aromen werden im Folgenden beschrieben. Es muss jedoch erwähnt werden, dass Veränderungen in der Fruchtzusammensetzung nicht allein durch höhere Temperaturen, sondern auch durch den steigenden CO₂-Gehalt in der Luft, veränderte Strahlungsintensitäten und weitere Klimafaktoren zu erklären sind. Um den Einfluss jeden einzelnen Faktors auf die Fruchtzusammensetzung zu bestimmen, bedarf es allerdings noch weiterer Forschungsarbeit (van Leeuwen & Darriet, 2016, S. 154).

4.2.1 Zuckergehalt

Hohe Temperaturen während der Reife begünstigen den Anstieg des Zuckergehalts in den Trauben. Dieser hat in den vergangenen Jahrzehnten um 2,4°Oe pro Dekade zugenommen (Bock et al., 2011, S. 79). In Hainfeld (Pfalz) wurde seit 1970 eine Mostgewichtszunahme der Weißweinrebsorten Riesling, Silvaner und Müller-Thurgau um etwa 9-17°Oe festgestellt, was in Abbildung 3 zu erkennen ist. Der einzige Wert, der nicht gestiegen ist, ist das Mostgewicht des Grauburgunders, der seit 1975 allerdings ausnahmslos die Rebsorte mit der höchsten Konzentration ist (Koch & Oehl, 2018, S. 250).

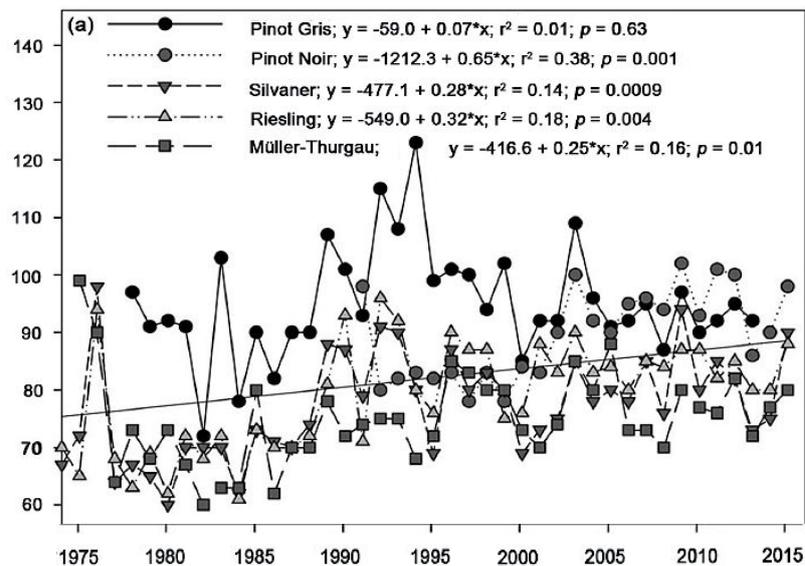


Abbildung 3: Mostgewicht in °Oe der Rebsorten Grauburgunder, Spätburgunder, Silvaner, Riesling und Müller-Thurgau in Hainfeld (Pfalz) von 1975 bis 2015 (Koch & Oehl, 2018, S. 251)

4.2.2 Säuregehalt

Die steigenden Temperaturen während der Reifezeit führen zu einer Beschleunigung der Reifung und zu einer schnelleren Zersetzung der Äpfelsäure, die entweder veratmet oder in Zucker umgewandelt wird. Die Folge sind Weine mit einem höheren Alkohol- oder Restzuckergehalt. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung des Gesamtsäuregehalts sowie die des pH-Werts und des potentiellen Zuckergehalts des Traubenmosts in Languedoc (Frankreich) im Verlauf der letzten Jahrzehnte.

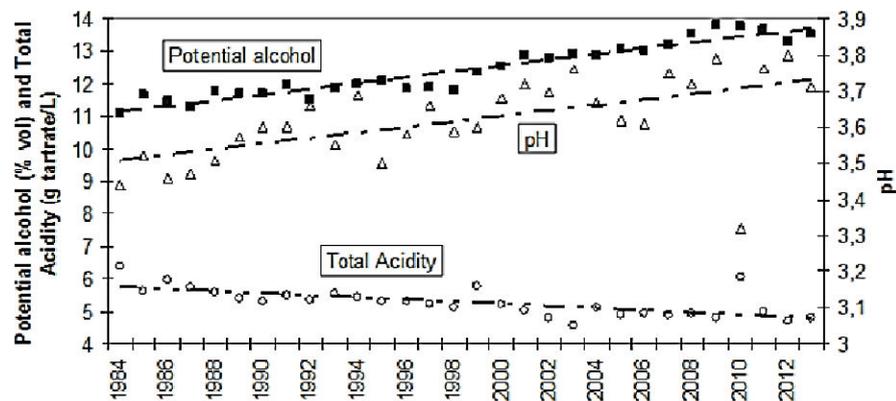


Abbildung 4: Potentieller Alkoholgehalt, Gesamtsäuregehalt und pH-Wert des Traubenmosts zum Zeitpunkt der Lese in Languedoc (Frankreich) von 1984 bis 2013 (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017, S. 148)

In nördlich gelegenen Weinanbaugebieten kann diese Entwicklung zum Verlust der Typizität (sensorischer Weincharakter) führen. Möglicherweise wird eine spätere Anreicherung mit Säure, was gesetzlich eigentlich nur in extremen Jahren erlaubt ist, häufiger vorkommen (Bock et al., 2011, S. 80), da der Gesamtsäuregehalt nicht nur die sensorischen Eigenschaften beeinflusst, sondern auch die chemische und mikrobiologische Stabilität und damit das Alterungspotential eines Weins (Poni et al., 2018, S. 446).

Der Einfluss der Temperaturerhöhung auf Aminosäuren ist, verglichen mit dem auf die Äpfelsäure, gering. Auch die Tatarsäure, die in größeren Mengen im Wein vorkommt, ist relativ stabil in Hinblick auf Temperaturschwankungen (Mira de Orduña, 2010, S. 1845).

4.2.3 Aromaprofil

Riesling, Silvaner und die verschiedenen Burgundersorten aus Südwestdeutschland genießen aufgrund ihrer Qualität und ihres unverwechselbaren Geschmacks weltweit Anerkennung, ebenso sind Weine aus der Pfalz auf der ganzen Welt geschätzt (Koch & Oehl, 2018, S. 248). Bis jetzt wird der Klimawandel in diesen Anbaugebieten in Hinblick auf das aromatische Potential von Weißweinen als positiv wahrgenommen, da sich vor allem die blumigen und fruchtigen Noten mit steigender Temperatur besser entfalten können (Pons et al., 2017, 145). Auf lange Sicht wird sich die Typizität der Weißweine in den traditionellen Anbaugebieten jedoch deutlich verändern, denn unter verschiedenen Temperaturbedingungen kann eine Rebsorte sehr unterschiedliche Weine hervorbringen, wie Tabelle 1 zeigt. Rebsorten wie Riesling oder Silvaner können unter relativ kühlen Bedingungen von 14-16°C frische Weine mit Aromen von Apfel oder Birne hervorbringen, während sie unter wärmeren Bedingungen von 16-18°C eher Pfirsich- und Melonnennoten entfalten (Jones et al., 2012, S. 117).

Tabelle 1: Der Einfluss des Klimas auf die Eigenschaften von Wein (Jones et al., 2012, S. 117)

Wine characteristic	Cool climate	Intermediate to warm climate	Warm to hot climate
Fruit style	Lean, Tart	Ripe, Juicy	Overripe, Lush
White flavors	Apple, Pear	Peach, Melon	Mango, Pineapple
Red flavors	Cranberry, Cherry	Berry, Plum	Fig, Prune
Body	Light	Medium	Full
Acidity	Crisp, Tangy	Integrated	Soft, Smooth
Alcohol	Low to moderate	Moderate to high	High to very high
Overall style	Subtle, Elegant	Medium intensity	Bold

Für die Ausbildung der Aromen benötigt die Rebe viel Zeit, ab der Blüte etwa 100 Tage (Gömann et al., 2017, S. 185). Findet die Lese früher statt, weil die Traubenreife abhängig von Zucker- und Säuregehalt früher eintritt, sind einige Aromen und Aromavorstufen möglicherweise noch nicht ausgereift.

Der Einfluss der Temperatur auf einzelne Aromakomponenten ist derzeit noch nicht ausreichend untersucht und bedarf noch weiterer Studien (Keller, 2010, S. 60).

4.2.4 Weitere Traubeninhaltsstoffe

Auf einige Traubeninhaltsstoffe wie auf die sekundären Pflanzenstoffe wirkt sich die globale Erderwärmung bisher positiv aus. Die Synthese von Anthocyanen erreicht bei 30°C ihr Optimum. Doch auch hier existiert ein oberer Grenzwert von 35°C, bei dessen Überschreitung der Gehalt an Anthocyanen in der Trauben wieder abnimmt (Keller, 2010, S. 60). Da Anthocyane vor allem für die Rotweinfärbung entscheidend sind und für Weißweine weniger bedeutend, wird in dieser Arbeit nicht weiter darauf eingegangen.

4.3 Verschiebung der geeigneten Anbauggebiete

Das Klima beeinflusst die geografische Verteilung der Weinanbauggebiete weltweit (Malheiro et al., 2010, S. 163). Die aktuelle Verteilung der Anbauggebiete ist begrenzt auf Regionen, in denen die mittlere Temperatur während der Wachstumsperiode zwischen 12°C und 22°C liegt (Fraga et al., 2013, S. 910). Tendenzen zu wärmeren Temperaturen sind in den meisten Regionen spür- und messbar und haben bereits zu Veränderungen im phänologischen Zyklus der Rebe geführt (Jones, Duchêne et al., 2005, S. 54).

Die nördliche Grenze für den Weinanbau liegt auf dem 50. Breitengrad, damit gehören die Anbauggebiete Deutschlands bereits zu den nördlichsten der Welt. Während höhere Temperaturen in vielen Regionen Zentraleuropas theoretisch zu einer beständigeren Weinqualität

führen, konnte beobachtet werden, dass sich viele dieser Regionen bereits am oder in der Nähe ihres Temperaturoptimums befinden, um aus den dort aktuell angebauten Rebsorten Weine von höchster Qualität zu erzeugen (Bock et al., 2011, S. 70).

Der Einfluss des Klimawandels auf eine einzelne Region hängt mit klimatischen Schwellenwerten zusammen. Eine Region mit einer durchschnittlichen Temperatur von 15°C könnte von einer Klimaerwärmung um 1°C profitieren, weil die dort angebauten Rebsorten etwas besser reifen. Eine Klimaerwärmung um 2°C in derselben Region hätte jedoch zur Folge, dass sich die Klimazone der Region verändert und zwar grundsätzlich mehr Rebsorten angebaut werden könnten, es für die bereits angebauten Sorten jedoch tendenziell zu warm wäre. In südlichen Regionen stellt dies die Weinbauern bereits heute vor große Herausforderungen und macht den Weinbau dort in Zukunft vielleicht unmöglich (Jones et al., 2012, S. 123).

Der Einfluss des Klimawandels auf Regionen ist also abhängig von deren Lage. In warmen und trockenen Regionen verschlechtert der Klimawandel die Anbaueignung von Gebieten (van Leeuwen et al., 2019, S. 516), gleichzeitig fördert er die Weinproduktion in Regionen, die aufgrund ihrer geografischen Breite bisher eigentlich nicht oder nur geringfügig für den Weinanbau geeignet sind (Bock et al., 2011, S. 69). Der Klimawandel hat dementsprechend sowohl positive als auch negative Auswirkungen und er hat das Potential, eine erhebliche Verschiebung der geeigneten Weinanbauggebiete auszulösen.

In Zentraleuropa wird mit neuen geeigneten Rebsorten zu rechnen sein (Cardell et al., 2019, S. 4). Bereits heute ist in einigen Regionen Deutschlands zu beobachten, dass weiße Rebsorten von roten verdrängt werden (Malheiro et al., 2010, S. 175). Unter den zukünftigen Klimabedingungen ist eine Ausweitung der geeigneten Anbauggebiete in Richtung Norddeutschland möglich und wahrscheinlich (Santos, Malheiro, Pinto & Jones, 2012, S. 101).

Während die Anbauggebiete in Deutschland sowie fast auf der gesamten Nordhalbkugel nach Norden ausgeweitet werden können, ist dies auf der Südhalbkugel kaum möglich, weil, wie in Abbildung 5 zu sehen ist, dort die Landmassen fehlen (Jones et al., 2012, S. 126).

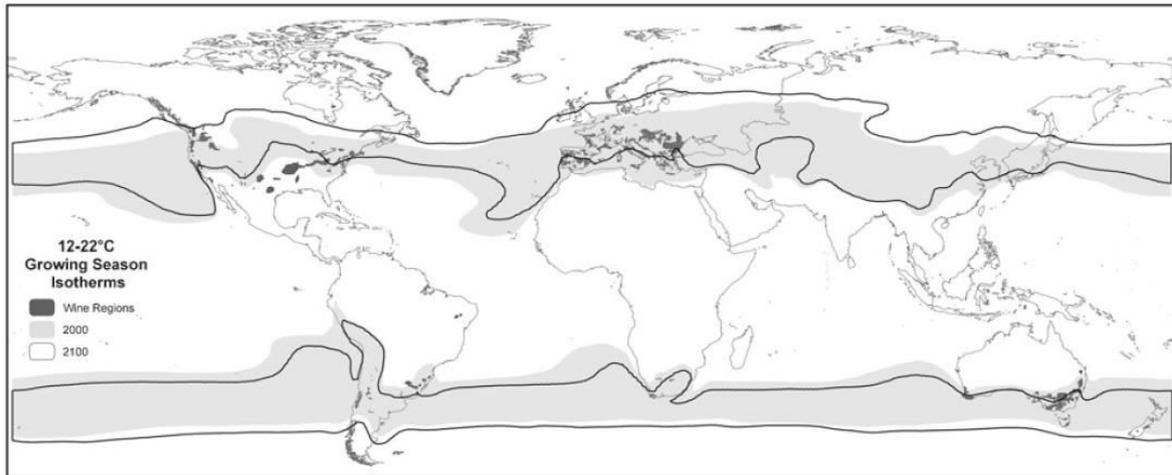


Abbildung 5: Mögliche Verschiebung der Weinanbauggebiete bis Ende des 21. Jahrhunderts aufgrund der globalen Erderwärmung unter dem A1B-Emissionsszenario (Jones et al., 2012, S. 126)

Der Weinanbau hat in vielen Anbauländern Europas eine ökonomische, soziale und kulturelle Bedeutung (Malheiro et al., 2010, S. 163). In den Gebieten, in denen der Weinanbau zur Identität einer Region gehört, wird die kulturelle Landschaft auf lange Sicht unter dem Klimawandel leiden (Bock et al., 2011, S. 80).

5. Methoden und Daten

5.1 Auswahl der Klimaszenarien

Um Klimaprojektionen für die Zukunft erstellen zu können, müssen zuerst Annahmen über mögliche Veränderungen der Atmosphäre gemacht werden. Dafür hat der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) die sogenannten SRES-Szenarien (nach: Special Report on Emissions Scenarios) für den Zeitraum 2001 bis 2100 entwickelt, die auf unterschiedlichen Annahmen über den gesellschaftlichen, demografischen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel basieren und deren Emissionsentwicklungen sich in Stärke und Verlauf unterscheiden (Jakob, D., Göttel, Kotlarski, Lorenz & Sieck, 2008, S. 16).

Die für den 4. Sachstand des IPCC ausgewählten Emissionsszenarien basieren auf folgenden sozioökonomischen Annahmen (Daschkeit, 2011, S. 63-64):

Die A1-Szenarien gehen von einer zukünftigen Welt mit starkem Wirtschaftswachstum und einer schnellen Einführung neuer Technologien aus. Außerdem wird angenommen, dass die Weltbevölkerungszahl Mitte des 21. Jahrhunderts ihr Maximum erreicht und da-

nach rückläufig ist. In Hinblick auf die Energiebereitstellung lassen sich die A1-Szenarien in drei Gruppen unterteilen: A1F1 beschreibt die intensive Nutzung fossiler Brennstoffe, A1T beschreibt den Verzicht auf fossile Energiequellen und A1B beschreibt eine ausgewogene Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Energieträgern.

Das A2-Szenario geht von einer sehr heterogenen Welt aus mit einer langsamen wirtschaftlichen, regional orientierten Entwicklung, in der die Einführung neuer Technologien langsamer umgesetzt wird als bei den A1-Szenarien.

Das B1-Szenario ist nachhaltig orientiert und nimmt einen schnellen Wandel zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft mit emissionsarmen und ressourcenschonenden Technologien an. Die demografische Entwicklung ist ähnlich wie bei den A1-Szenarien.

Das B2-Szenario nimmt für Wirtschaft und Weltbevölkerung eher mittlere Wachstumsraten an. Im Gegensatz zum B1-Szenario wird Nachhaltigkeit nicht auf globaler Ebene verfolgt und regionale Unterschiede in Hinblick auf Technologien bleiben bestehen.

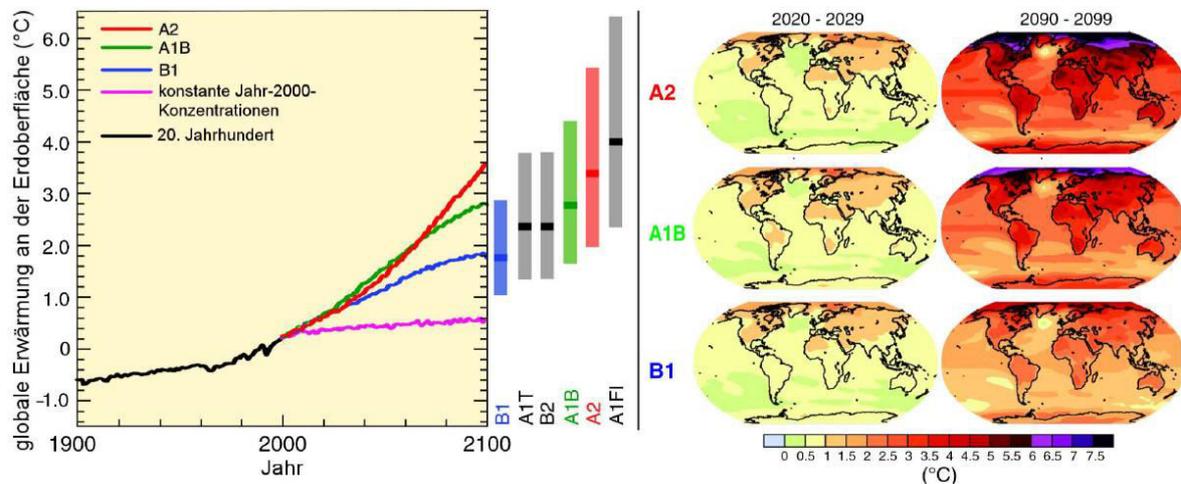


Abbildung 6: Globale Mittelwerte der Erderwärmung an der Erdoberfläche als Fortsetzung der Simulationen für das 20. Jahrhundert (links) und projizierte Änderungen der Erdoberflächentemperatur für das frühe und späte 21. Jahrhundert im Vergleich zum Zeitraum 1980-1999 für die SRES-Szenarien A2, A1B und B1 (rechts) (IPCC, 2007, S. 49)

Abbildung 6 zeigt die projizierte globale Erderwärmung unter den SRES-Szenarien. Alle Szenarien beschreiben mögliche Entwicklungen, die eintreten können, aber nicht müssen. Daher kann ein Szenario nicht als wahrscheinlicher eingestuft werden als ein anderes (Daschkeit, 2011, S. 64).

Für diese Arbeit wurden die Szenarien B1, A1B und A2 ausgewählt, um das Anbaupotential der Metropolregion Hamburg unter möglichst verschiedenen Projektionen zu betrachten. Zudem arbeiten die meisten regionalen Klimamodelle mit diesen Szenarien, sodass für alle drei umfangreiche Auswertungen für die Metropolregion Hamburg vorliegen.

5.2 Auswahl der Klimamodelle

Globale Klimamodelle wurden entwickelt, um unter den verschiedenen Klimaszenarien mögliche Klimaentwicklungen der Zukunft zu berechnen. Um die Auswirkungen der globalen Klimaentwicklung auf Deutschland zu untersuchen, wird ein regionales Klimamodell in ein globales Klimamodell eingebettet. Diese Methode wird als „Nesting“ bezeichnet (Jakob, D. et al., 2008, S. 14-16). Weil regionale Klimamodelle eine höhere Auflösung besitzen, können sie regionale Gegebenheiten wie Höhen, Tiefen und Unregelmäßigkeiten der Erdoberfläche (Topografie) besser abbilden (Daschkeit, 2011, S. 62).

Für Deutschland wurden viele regionale Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert erstellt, die sich alle untereinander in den verwendeten Modellen, Szenarien und Startbedingungen der Simulationen unterscheiden. Aus diesen Simulationen können unter anderem mögliche Temperatur- und Niederschlagsänderungen abgeleitet werden. Im Gegensatz zu Prognosen sind die Projektionen keine Vorhersagen, sondern lediglich Beschreibungen möglicher Entwicklungen unter verschiedenen Annahmen zur Entwicklung des Bevölkerung- und Wirtschaftswachstums sowie des technologischen Fortschritts, die eintreten können, aber nicht zwingend eintreten müssen (Rechid, Petersen, Schoettler & Jacob, 2014, S. 1-2).

Bei der Regionalisierung eines globalen Klimamodells unterscheidet man dynamische und statistische Methoden (Jacob et al., 2017, S. 28):

Bei der dynamischen Klimamodellierung wird ein hochaufgelöstes regionales Modell unter Vorgabe der Anfangs- und Randbedingungen in ein globales Modell eingebettet. Um das Modell noch weiter zu verfeinern, kann mit der gleichen Methode ein weiteres lokales Modell eingefügt werden. Dynamische Modelle berücksichtigen die Wechselwirkung von Erdoberfläche und Atmosphäre. Beispiele für dynamische Modelle sind REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg und COSMO-CLM (kurz: CLM), das von den nationalen europäischen Wetterdiensten betrieben wird.

Im Gegensatz zu den dynamischen Methoden werden bei der statistischen Klimamodellierung statt physikalischer Gesetzmäßigkeiten statistische Zusammenhänge zwischen gemessenen Daten verwendet. Das bedeutet, dass diese Modelle die tatsächlichen physikalischen

Prozesse der Atmosphäre nicht abbilden und daher auch nicht die Wechselwirkungen zwischen Landoberfläche und Atmosphäre berücksichtigen. Beispiele für statistische Modelle sind STAR vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und WETTREG der Climate & Environment Consulting GmbH (CES) in Potsdam.

Die statistische Klimamodellierung setzt die Verfügbarkeit von Daten voraus, die jedoch nicht in jeder Region gegeben ist. Außerdem verwenden statistische Klimamodelle lange Beobachtungszeitreihen, um statistische Beziehungen zwischen den Messwerten und Klimaphänomenen herzustellen. Das setzt jedoch voraus, dass das Klima in Zukunft die gleichen statistischen Beziehungen aufweist wie das Klima des Beobachtungszeitraums, was in einem sich wandelnden Klima nicht zwingend der Fall ist (Daschkeit, 2011, S. 62-63).

Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf Berechnungen mit den dynamischen Modellen REMO und CLM, da mithilfe dieser Modelle von Rechid et al. (2014) umfangreiche Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg erstellt und ausführlich ausgewertet worden sind. Dafür wurden die regionalen Modelle REMO und CLM in das globale Modell ECHAM5/MPI-OM eingebettet (Rechid et al., 2014, S. 7). REMO kommt für Berechnungen von 50x50km bis 10x10km zum Einsatz, CLM mit einer horizontalen Auflösung von 7-50km (Daschkeit, 2011, S. 65).

5.3 Klimaindizes

In den letzten Jahrzehnten haben sich mehrere Klimaindizes etabliert, um das Anbaupotential einer Region zu beschreiben. Vier Indizes werden in dieser Arbeit ausführlich vorgestellt und für die Metropolregion Hamburg unter zukünftigen klimatischen Bedingungen berechnet und ausgewertet.

5.3.1 Der Winkler-Index

Der Winkler-Index (WI) basiert auf der Annahme, dass das Rebenwachstum erst beginnt, wenn die mittlere Tagestemperatur 10°C übersteigt. Der Index summiert dementsprechend von allen Tagen der Wachstumsperiode (Nordhalbkugel: April bis Oktober; Südhalbkugel: Oktober bis April), auf die das zutrifft, den Wert, um den der 10°C-Schwellenwert überschritten wird, und gibt das Ergebnis als Wärmesumme in °C an (Cardell et al., 2019, S. 3). Erst wenn eine Region eine Wärmesumme von 1.000°C oder mehr erreicht, wird sie für den Weinanbau interessant (Bauer, Regner & Friedrich, 2018, S. 154).

5.3.2 Der Huglin-Index

Der Huglin-Index (HI), ebenfalls ein Wärmesummenindex, berücksichtigt die Tagesmitteltemperatur, die Tagesmaximaltemperatur sowie die Tageslänge in Abhängigkeit zur geografischen Breite und wird berechnet für die Monate April bis September, in denen die meisten Stoffwechselforgänge stattfinden (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 83-84). Auf der Südhalbkugel wird der HI für die Monate Oktober bis März berechnet. Der Huglin-Index lässt sich wie folgt berechnen:

$$HI = \sum_{01.04}^{30.09} \frac{[(T - 10) + (T_x - 10)]}{2} d$$

T = Tagesmitteltemperatur in °C; T_{max} = Tagesmaximaltemperatur in °C; d = Tageslängenkoeffizient (s. Tab. 2)

Tabelle 2: Tageslängenkoeffizient (d) in Abhängigkeit zur geografischen Breite (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 85)

Breitengrad	Tageslängenkoeffizient (d)
≤ 40°00'	1,00
40°01' – 42°00'	1,02
42°01' – 44°00'	1,03
44°01' – 46°00'	1,04
46°01' – 48°00'	1,05
48°01' – 50°00'	1,06

Da die längeren Tage in höheren Breitengraden niedrige Temperaturen teilweise ausgleichen können, kann der Tageslängenkoeffizient für den 50.-60. ergänzend berechnet werden (Malheiro et al., 2010, S. 165-168).

Tabelle 3: Erweiterung des Tageslängenkoeffizienten (d)

Breitengrad	Tageslängenkoeffizient (d)
50°01' – 52°00'	1,07
52°01' – 54°00'	1,08
54°01' – 56°00'	1,09
56°01' – 58°00'	1,10
58°01' – 60°00'	1,11

Im Gegensatz zum Winkler-Index, der nur auf der Anzahl der Tage mit einer mittleren Temperatur von mindestens 10°C beruht, berücksichtigt der Huglin-Index zusätzlich die Tagesmaximaltemperatur sowie die Tageslängen und erlaubt daher eine bessere Beurteilung des Zuckerpotentials bestimmter Rebsorten (Malheiro et al., 2010, S. 168).

Die HI-Klassen stehen im Zusammenhang mit den verschiedenen Temperaturanforderungen der einzelnen Rebsorten. Ein niedriger HI-Wert bedeutet nicht, dass eine Region weniger für Weinanbau geeignet ist als eine mit hohem HI, sondern nur, dass dort klimatische Bedingungen vorliegen, für die einige Rebsorten besser und andere schlechter geeignet sind (Fraga et al., 2013, S. 914). Niedrige HI-Werte sind geeignet für frühreife Sorten, hohe HI-Werte für eher spätreife (Malheiro et al., 2010, S. 168).

Ein HI von weniger als 1500 gilt als unterste klimatische Grenze für den Weinanbau, unter diesen Bedingungen reifen nur sehr frühe Rebsorten. Ein HI von 1500 bis 1800 dagegen erlaubt eine größere Auswahl an Rebsorten, darunter Weißweinsorten wie Riesling und Chardonnay, aber auch einige Rotweinsorten wie Spätburgunder (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 86). In Tabelle 4 sind die verschiedenen HI-Klassen mit Beispielen für geeignete Rebsorten aufgeführt.

Tabelle 4: Anbaueignung verschiedener Rebsorten anhand des Huglin-Index nach (Stock et al., 2007, S. 92) und (Hoppmann, Schaller & Stoll, 2017, S. 18)

Index	Geeignete Rebsorten
≤ 1500	kein Anbau empfohlen
> 1500 ≤ 1600	Müller-Thurgau
> 1600 ≤ 1700	Weißburgunder, Grauburgunder
> 1700 ≤ 1800	Riesling, Silvaner, Chardonnay, Spätburgunder
> 1800 ≤ 1900	Cabernet Franc
> 1900 ≤ 2000	Cabernet Sauvignon, Merlot, Chinon Blanc
> 2000 ≤ 2100	Ugni Blanc
> 2100 ≤ 2200	Syrah, Grenache Noir
> 2200 ≤ 2300	Carignan
> 2300 ≤ 2400	Aramon
> 2400 ≤ 3000	Anbau aller Rebsorten theoretisch möglich
> 3000	Kein Anbau empfohlen

Andere Studien ziehen auch Regionen als Anbauggebiete in Betracht, in denen der HI zwischen 900 und 1200 liegt, um auch nördliche Gebiete miteinzuschließen, die geringfügig günstige Anbaubedingungen aufweisen (Fraga et al., 2013, S. 911)

Der HI ist für europäische Regionen entwickelt worden und kann sich für die Beurteilung der Anbaueignung bestimmter Rebsorten auf anderen Kontinenten als nicht geeignet erweisen (Neumann & Matzarakis, 2011, S. 168).

5.3.3 Der Cool-Night-Index

Der Cool-Night-Index (CI) bildet die Nachttemperatur des Monats ab, in dem normalerweise die Reife eintritt, auf der Nordhalbkugel ist das in der Regel der September, auf der Südhalbkugel der März. Der CI soll das qualitative Anbaupotential einer Region in Hinblick auf Farbstoffe und Aromen beschreiben (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 85). Er wird mit der niedrigsten mittleren Lufttemperatur (T_{\min}) in °C gleichgesetzt (Malheiro et al., 2010, S. 165). Tabelle 5 zeigt die Einordnung der Tagesminimaltemperatur in vier Klimaklassen.

Tabelle 5: Die Klassen des Cool-Night-Index (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 86)

Kurzform	Weinbauklima	Index in °C
CI + 2	sehr kühle Nächte	≤ 12
CI + 1	kühle Nächte	$> 12 \leq 14$
CI - 1	temperierte Nächte	$> 14 \leq 18$
CI - 2	warme Nächte	> 18

Kühle Nachttemperaturen während der Reifepériode sind essentiell, um den Verlust von Aromen und Farbstoffen zu verhindern. Dies gilt allerdings nur unter heliothermalen Bedingungen, die für die Beerenreife ausreichend sind. Bei Nachttemperaturen zwischen 12°C und 14°C tritt die Traubenreife bereits unter kühlen Bedingungen ein. Fallen die Temperaturen im Schnitt unter 12°C, entscheidet das heliothermale Potential der Trauben (Huglin-Index) darüber, ob diese die Traubenreife erreichen (Tonietto & Carbonneau, 2004, S. 87).

5.3.4 Der Hydrothermische Index

Der Hydrothermische Index (HyI) berücksichtigt neben dem thermischen Faktor der mittleren Temperatur zusätzlich die Niederschlagsmenge und soll damit bei der Beschreibung

der Anbaueignung einer Region Klimabedingungen ausschließen, die das Auftreten von Krankheiten und Schädlingen im Weinberg begünstigen. Der HyI lässt sich wie folgt für die Monate April bis August berechnen (Fraga et al., 2013, S. 911):

$$\sum_{April}^{Aug.} (T * P)$$

T = Temperatur in °C; P = Niederschlagshöhe in mm

Ein Anbaugbiet gilt als geeignet, wenn der HyI unter 7500°Cmm liegt, ab einem HyI von 5100°Cmm steigt allerdings das Risiko für das Auftreten feuchtigkeitsbedingter Krankheiten wie das des Falschen Mehltaus (Santos et al., 2012, S. 94).

5.4 Aktuelles Klima in der Metropolregion Hamburg

Die Metropolregion Hamburg umfasst den Stadtstaat Hamburg, acht Landkreise in Niedersachsen, neun in Schleswig-Holstein und drei in Mecklenburg-Vorpommern (s. Abb. 7 im Anhang).

Während die meisten Regionen im Süden Europas ein typisch mediterranes Klima mit langen, warmen und trockenen Sommern haben, ist Zentral- und Nordeuropa durch ein kontinentales und/oder feuchtes Klima mit milden und verregneten Sommern geprägt (Fraga et al., 2012, S. 95). Die Metropolregion Hamburg liegt in einer feuchtwarmgemäßigten Klimazone, im Südosten beginnt der Übergang zum feucht-kontinentalen Klima. Da der Wind häufig aus dem Westen kommt, überwiegen maritime Klimateinflüsse und führen zu kühlen Sommern und milden Wintern mit ganzjährlichen Niederschlägen (Rechid et al., 2014, S. 5).

Die durchschnittliche mittlere Jahrestemperatur liegt bei 8,8°C. Die Küstengebiete in der Metropolregion Hamburg erwärmen sich um die Mittagszeit und im Sommer nicht so stark wie das Landesinnere, kühlen dafür aber auch nachts und im Winter nicht so stark aus. (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 37).

Die durchschnittliche Jahresniederschlagshöhe liegt bei 796 mm. Die Niederschlagsmengen sind relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt, wobei im Sommer und Winter etwas mehr Niederschlag fällt als im Frühling und Herbst. (Rechid et al., 2014, S. 5). In den Küstenregionen fällt ebenfalls mehr Niederschlag als im Landesinneren (Daschkeit, 2011, S. 67).

Um auch innerhalb der Metropolregion Hamburgs Unterschiede herauszuarbeiten und in Hinblick auf die Anbaueignung differenziert zu betrachten, wurden drei Orte ausgewählt, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Lage an der Küste (Cuxhaven), im Norden der Großstadt Hamburg (Hamburg-Fuhlsbüttel) und tiefer im Landesinneren (Lüchow-Danneberg) die klimatische Vielfalt der Region repräsentieren sollen.

Die Monats- und Jahreswerte für die mittlere Tagestemperatur, die mittlere Tagesmaximal- und Tagesminimaltemperatur sowie für die mittlere Niederschlagshöhe der ausgewählten Orte im Bezugszeitraum 1971-2000 können aus den Tabellen 10-13 im Anhang entnommen werden. Die statistischen Kenngrößen dienen als Grundlage für die Erstellung der Klimaprojektionen, die zur Berechnung der Klimaindizes verwendet werden.

6. Ergebnisse

6.1 Klimaänderungen im Verlauf des 21. Jahrhunderts

Die Temperatur- und Niederschlagsänderungen, wie sie in Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 beschrieben werden, basieren auf dem Mittelwert der jeweils größten und kleinsten Änderung in den Simulationen mit REMO und CLM (s. Tab. 14-19 im Anhang).

6.1.1 Temperaturänderungen

Die Temperatur der Metropolregion Hamburg nimmt im Vergleich zur historischen Periode (1971-2000) bis Mitte des Jahrhunderts je nach Szenario um 1,2°C (B1) bis 1,7°C (A1B) zu, bis zum Ende des Jahrhunderts sogar um etwa 2,0°C (B1) bis 3,0°C (A2) (Reich et al., 2014, S. 14). Die höchsten Temperaturzunahmen finden im Herbst und Winter statt, im Frühling und Sommer zeigen sich niedrigere Temperaturanstiege. Insgesamt fallen die Temperaturänderungen in den Szenarien A1B und A2 ähnlich aus (s. Tab. 16 im Anhang)

Die Anzahl an Sommertagen (Tagesmaximaltemperatur > 25°C) wird steigen. Unter dem B1 Szenario sind bis zur Mitte des Jahrhunderts 2-4 zusätzliche Sommertage zu erwarten, bis zum Ende des Jahrhunderts 5-8. Unter dem AB1 Szenario sind es 5-10 zusätzliche Sommertage bis zur Mitte des Jahrhunderts und 11-18 bis zu seinem Ende. Auch die Zahl der Hitzetage (Tagesmaximaltemperatur \geq 30°C) und die der Tropennächte (Tagesminimaltemperatur > 20°C) wird steigen. Die Zahl der Eistage (Tagesmaximaltemperatur < 0°C) und die der Frosttage (Tagesminimaltemperatur < 0°C) hingegen wird abnehmen,

Spätfrosttage (Tagesminimaltemperatur April bis Juli < 0°C) werden unter allen Szenarien nur noch sehr selten auftreten (Rechid et al., 2014, S. 30-33).

6.1.2 Niederschlagsänderungen

Die jährliche Niederschlagshöhe nimmt je nach Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa 6% (A1B) bis 13% (A2) zu, wobei sich jahreszeitliche Unterschiede zeigen: Im Winter nimmt die Niederschlagshöhe um etwa 17% (B1) bis 27% (A2) zu, während im Sommer sogar eine Abnahme zwischen etwa -4% (A2) und -16% (A1B) zu erwarten ist. Die vollständigen Werte können aus Tabelle 19 im Anhang entnommen werden.

6.2 Anbaupotential der Metropolregion Hamburg

Aktuell liegt die Wärmesumme der Metropolregion Hamburg unterhalb des Schwellenwerts von 1000°C und ist damit uninteressant für Weinanbau (vgl. Kap. 5.3.1). Dies wird sich unter den erstellten Klimaprojektionen jedoch ändern, wie die in Tabelle 6 zusammengefassten Ergebnisse zeigen. Der WI wurde mit der durchschnittlichen Tagesmitteltemperatur der Monate April bis Oktober berechnet (s. Tab. 44-49 im Anhang).

Tabelle 6: Winkler-Index in °C auf Grundlage der Klimaprojektionen

	2036-2065			2071-2100		
	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Cuxhaven	968	1070	1013	1116	1264	1261
Hamburg	962	1064	1007	1110	1261	1264
Lüchow	975	1076	1019	1122	1274	1277

Die Entwicklung ist in allen Szenarien die gleiche, unterscheidet sich aber im zeitlichen Verlauf, wie in Tabelle 6 zu sehen ist. In den Szenarien A1B und A2 erreichen Cuxhaven, Hamburg und Lüchow bereits Mitte des 21. Jahrhunderts einen Winkler-Index von über 1000°C und werden damit zu geeigneten Weinanbaugebieten. Im B1-Szenario erreichen dies alle drei Orte erst zum Ende des 21. Jahrhunderts. Das bedeutet, dass Weinanbau in der Metropolregion unter zukünftigen Temperaturbedingungen theoretisch möglich ist.

6.3 Anbaueignung der ausgewählten Rebsorten

Aktuell ist Norddeutschland mit einem HI von unter 1500 (s. Tab. 50 im Anhang) noch eine relativ kalte Region für Weinanbau. Die kühlen Bedingungen der Metropolregion Hamburg erfordern daher die Auswahl gut angepasster Rebsorten, die resistent gegen Frost

sind, eine späte Blüte haben und zu den frühreifen Sorten gehören (Bock et al., 2011, S. 70). Diese sind rein wirtschaftlich jedoch nicht besonders attraktiv (Jones & Schultz, 2016, S. 51). Unter zukünftigen Klimabedingungen könnten weitere Weißweinrebsorten kultiviert werden, wie die folgenden HI-Werte zeigen.

Die Berechnung des Huglin-Index wird in Kapitel 5.3.2 ausführlich erklärt. Für die Berechnung wurde entsprechend Tabelle 3 in Kap. 5.3.2 ein Tageslängenkoeffizient von 1,08 verwendet, da sich alle drei Orte zwischen dem 52. und 54. nördlichen Breitengrad befinden (Cuxhaven: 53°52' N; Hamburg-Fuhlsbüttel: 53°37' N; Lüchow-Danneberg: 52°58' N) (Menz, 2019). Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Huglin-Index auf Grundlage der Klimaprojektionen

	2036-2065			2071-2100		
	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Cuxhaven	1259	1367	1325	1417	1578	1583
Hamburg	1431	1539	1497	1588	1750	1755
Lüchow	1525	1633	1591	1683	1844	1849

Unter dem B1-Szenario erreicht bis Mitte des Jahrhunderts nur Lüchow einen HI von über 1500, Cuxhaven (HI=1259) und Hamburg (HI=1431) bleiben unterhalb dieser Grenze. Damit eignet sich Lüchow (HI=1525) für den Anbau der Rebsorte Müller-Thurgau. Bis Ende des Jahrhunderts wird dies dann auch in Hamburg (HI=1588) möglich sein. In Lüchow (HI=1683) wird zu diesem Zeitpunkt sogar der Anbau von Weiß- und Grauburgunder-Reben möglich.

Unter dem A1B-Szenario erreichen bis Mitte des Jahrhunderts Hamburg (HI=1539) und Lüchow (HI=1633) einen HI von über 1500, womit sie sich für den Anbau der gleichen Rebsorten eignen wie im B1-Szenario erst zum Ende des Jahrhunderts. Bis Ende des Jahrhunderts eignen sich alle ausgewählten Orte für den Anbau einzelner ausgewählter Weißweinrebsorten. In Cuxhaven (HI=1578) kann die Müller-Thurgau-Rebe kultiviert werden, in Hamburg (HI=1750) die Rebsorten Riesling und Silvaner und in Lüchow (HI=1844) ist zu diesem Zeitpunkt sogar schon tendenziell zu warm für die ausgewählten Rebsorten.

Das A2-Szenario ähnelt in seinen Ergebnissen dem A1B-Szenario. Die HI-Werte liegen im A2-Szenario bis Mitte des Jahrhunderts etwas unter denen des A1B-Szenarios, dafür liegen

sie zum Ende des Jahrhunderts sogar knapp darüber, daher können die gleichen Rebsorten kultiviert werden wie im A1B-Szenario, mit einer Ausnahme von Hamburg, in dem der HI in der Mitte des Jahrhunderts knapp unter dem Schwellenwert von 1500 liegt (HI =1497).

Die Zuordnung der geeigneten Rebsorten beruht auf den HI-Klassen aus Tabelle 4 in Kapitel 5.3.2. Zusammenfassend zeigen diese Hochrechnungen, dass die ausgewählten Weißweinrebsorten Riesling, Müller-Thurgau, Grauburgunder, Weißburgunder und Silvaner im Verlauf des 21. Jahrhunderts theoretisch erfolgreich in der Metropolregion Hamburg kultiviert werden könnten. Die Entwicklung ist dabei unter allen Szenarien die gleiche, im B1-Szeanrio treten die Veränderungen allerdings etwa 30 Jahre später ein als in den Szenarien A1B und A2. Des Weiteren zeigen sich auch innerhalb der Metropolregion lokale Unterschiede. Das Landesinnere wird aufgrund seines feucht-kontinental geprägten Klimas im Verlauf des 21. Jahrhunderts für den Anbau eines breiten Rebsortenspektrums geeignet sein, während die Küstenregionen erst zum Ende des Jahrhunderts Temperaturen erreichen, die den Anbau weniger frühreifer Sorten wie Müller-Thurgau ermöglichen.

Während sich hohe Tagestemperaturen positiv auf das Reifepotential der Trauben auswirken, sind kühle Nächte während der Reifeperiode von entscheidender Bedeutung, um in der Weißweinproduktion Weine mit intensiven und komplexen Aromen hervorzubringen (vgl. Kap. 4.2.3). Da die Küstengebiete in der Metropolregion Hamburg nachts nicht so stark auskühlen wie das Landesinnere, sind die Nächte in Cuxhaven wärmer als die in Hamburg oder Lüchow, obwohl das Temperaturmittel dies nicht vermuten lassen würde. Gleiches lässt sich auch unter zukünftigen Klimaprojektionen beobachten.

Der CI ist gleich des mittleren Temperaturminimums im September. Tabelle 8 zeigt die projizierten CI-Werte für Cuxhaven, Hamburg und Lüchow.

Tabelle 8: Cool-Night-Index in °C auf Grundlage der Klimaprojektionen

	2036-2065			2071-2100		
	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Cuxhaven	12,9	13,5	12,9	13,8	14,5	14,4
Hamburg	10,8	11,4	10,8	11,7	12,4	12,3
Lüchow	10,1	10,7	10,1	11,0	11,7	11,6

Nach Tonietto & Carbonneau (2004) sind Nächte mit Temperaturen von 12-14°C „kühle“ Nächte. Dies trifft im B1-Szenario nur auf Cuxhaven zu. Die Nächte in Hamburg (CI=10,8°C) und Lüchow (CI=10,1°C) liegen unter der 12 Grad-Grenze und gelten daher als „sehr kühl“. In diesem Fall entscheidet der HI darüber, ob Trauben ihre Reife erreichen können. In Lüchow liegt dieser zur Mitte des 21. Jahrhunderts über 1500 und erfüllt damit die Voraussetzungen. In Hamburg ist dies erst zum Ende des Jahrhunderts der Fall.

Im A1B-Szenario haben Cuxhaven und Hamburg zur Mitte des Jahrhunderts einen CI von 12-14°C und damit ein hohes qualitatives Anbaupotential in Hinblick auf Aromen, allerdings liegt der HI für Cuxhaven zu diesem Zeitpunkt weit unter 1500, weshalb der Weinanbau trotz des CI von 13,5°C nicht sinnvoll wäre. Im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts wird Cuxhaven die 14°C-Obergrenze überschreiten (CI=14,5°C), für die Weißweinproduktion könnten die Nächte dann sogar schon zu warm sein, obwohl der HI zu diesem Zeitpunkt bei 1578 läge. Die geringe Temperaturdifferenz zwischen Tag und Nacht würde Weine hervorbringen, denen es an Frische und aromatischer Komplexität fehlt. Hamburg (CI=12,4°C) hat zum Ende des Jahrhunderts ein hohes qualitatives Anbaupotential, verbunden mit einem HI von 1750 wäre der Anbau der ausgewählten Rebsorten in Hamburg also theoretisch möglich. Die Nächte in Lüchow bleiben unter dem A1B-Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts sehr kühl, allerdings kann der HI dies über den gesamten Zeitraum ausgleichen, so dass der Weinanbau hier durchaus möglich ist und sogar besonders spritzige und interessante Weine hervorbringen könnte.

Das A2-Szenario liefert bis Mitte des 21. Jahrhunderts geringfügig niedrigere Ergebnisse als das A1B-Szenario, bis zum Ende dafür geringfügig höhere. Die Anbaueignung der ausgewählten Rebsorten in Hinblick auf das aromatische Potential der Trauben fällt daher zum Ende des Jahrhunderts unter beiden Szenarien gleich aus.

6.4 Feuchtigkeitsbedingtes Krankheitsrisiko

Die projizierten Veränderungen von Temperatur und Niederschlag können das Auftreten feuchtigkeitsbedingter Krankheiten begünstigen. Grund hierfür ist die steigende Temperatur in Verbindung mit sich kaum verändernden Niederschlagswerten, was das Risiko für das Auftreten von Pilzkrankungen erhöht (Malheiro et al., 2010, S. 168).

Das Auftreten von Krankheiten und Schädlingsbefall kann ökologische sowie wirtschaftliche Konsequenzen haben (Bois, Zito & Calonnet, 2017, S. 134). Limitieren der Boden oder das Klima die Wasserversorgung, kann dies durch Bewässerung ausgeglichen werden.

Gegen zu viel Niederschlag kann der Winzer hingegen wenig unternehmen. Das Risiko des Auftretens feuchtigkeitsbedingter Rebenkrankheiten kann das Weinanbaupotential der Metropolregion Hamburg daher erheblich einschränken, obwohl sich die Temperaturbedingungen in der Region generell verbessern. Wie in Kapitel 5.3.4 beschrieben, steigt ab einem HyI von 5100°Cmm das Risiko für das Auftreten von Krankheiten wie das des Falschen Mehltaus.

Tabelle 9: Hydrothermischer Index in °Cmm auf Grundlage der Klimaprojektionen

	2036-2065			2071-2100		
	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Cuxhaven	4957	4765	5096	4902	4694	5260
Hamburg	5299	5098	5450	5251	5029	5628
Lüchow	4127	3977	4248	4104	3934	4394

Unter den Szenarien B1 und A1B besteht in beiden Untersuchungszeiträumen nur für Hamburg ein erhöhtes Risiko (HyI=5299 u. 5251). Unter dem A2-Szenario liegt zum Ende des Jahrhunderts zusätzlich für Cuxhaven ein erhöhtes Risiko vor (HyI=5260). In Lüchow liegt der HyI über den gesamten Zeitraum deutlich unter 5100°Cmm, was durch seine Lage im Landesinneren und der damit verbundenen niedrigeren Niederschlagshöhe zu erklären ist. Während der Weinanbau in Hamburg und Cuxhaven aufgrund maritimer Wettereinflüsse und hoher Niederschlagsmengen zur Herausforderung wird, liegt für Lüchow aufgrund kontinentaler Klimaeinflüsse kein besonderes Risiko für das Auftreten feuchtigkeitsbedingter Krankheiten vor.

Im Folgenden werden drei der häufigsten Rebenkrankheiten in Verbindung mit warm-feuchtem Klima vorgestellt und in Hinblick auf die Anfälligkeit der ausgewählten Rebsorten beschrieben.

6.4.1 Graufäule (Botrytis)

Der Botrytis-Pilz befällt neben der Weinrebe auch andere Kulturpflanzen und Wildkräuter, weshalb sich seine Pilzsporen eigentlich immer in der Luft befinden. Erhebliche Schäden im Weinbau, die vor allem durch den Befall der unreifen Beeren (Sauerfäule) entstehen, können auf veränderte klimatische Bedingungen aufgrund des Klimawandels zurückgeführt werden.

Die Grundvoraussetzung für die Entwicklung und Ausbreitung des Schadpilzes sind warme Temperaturen und eine hohe Luftfeuchtigkeit. Bei langanhaltenden Nässeperioden und/oder Starkregenereignissen ist eine Befallshäufigkeit von 80-90% keine Seltenheit, weil die Beeren dadurch aufplatzen können und der austretende Saft einen optimalen Nährboden für den Pilz bietet.

Müller-Thurgau hat eine dünne Beerenhaut und ist daher anfälliger als die Silvanerbeere mit einer dickeren Haut (Mohr, 2012, S. 110-117). Die Rieslingbeere ist nicht besonders anfällig für Beeren-Botrytis, dafür wird die Rieslingrebe öfter von Stielhäule befallen, wodurch es in manchen Jahren zum vorzeitigen Abfall der Trauben kommt (Lott et al., 2010, S. 65).

An reifen Trauben weißer Rebsorten kann Botrytis allerdings auch durchaus erwünscht sein, um aus den befallenen Trauben edelsüße Weine zu erzeugen (Edelfäule). Allerdings tritt dieser Veredelungsprozess erst ab einer bestimmten Reife ein (Jakob, L., 2012, S. 88).

6.4.2 Falscher Mehltau (Peronospora)

Der Falsche Mehltau gilt als die gefährlichste Rebenkrankheit Mitteleuropas und tritt fast in jedem Jahr auf. Das Ausmaß des wirtschaftlichen Schadens ist abhängig von der Temperatur und Feuchte während der Wachstumsperiode, den Pflanzenschutzmaßnahmen und der Anfälligkeit der Rebsorte. Generell sind Weinbaugebiete mit größeren Niederschlagsmengen häufiger betroffen.

Damit die Sporen des Falschen Mehltaus Sporangien ausbilden, muss eine feucht-warme Witterung vorliegen. Für die weitere Entwicklung des Pilzes und den Ausbruch der Krankheit ist danach Dunkelheit notwendig. Die meisten Sporangien bilden sich bei einer Temperatur von 18-22°C und einer acht- bis zehnstündigen Feuchteperiode, was in windstillen Taunächten häufig gegeben ist, wenn die Blattnäse gegen 23 Uhr einsetzt und die Blätter erst gegen 8 Uhr am nächsten Morgen wieder abtrocknen. Kurzzeitige Phasen mit niedriger Luftfeuchtigkeit, zum Beispiel durch Wind nach einem Regenschauer, können die Sporangienbildung jedoch vollständig unterbrechen.

Den Peronospora-Befall erkennt man an gelblichen „Ölflecken“ auf Blättern, aus denen nach warmen und feuchten Nächten ein weißer Pilzrasen hervortritt. Anfällige Sorten wie Müller-Thurgau, Grau- und Weißburgunder, können vollständig entlaubt werden. Auch wenn der Befall erst eintritt, wenn die Trauben bereits vollständig ausgebildet sind, kann

die Zuckerbildung und damit die Qualität der Trauben darunter leiden. Sorten wie Riesling und Silvaner gelten als weniger anfällig (Mohr, 2012, S. 100-105).

6.4.3 Schwarzfleckenkrankheit (Phomopsis)

Die Schwarzfleckenkrankheit tritt meist in Gebieten auf, in denen es während des Austriebs häufig regnet. Der Pilz zerstört die obersten Zellschichten der wachsenden Rebor-gane.

Die Pilzsporen der Schwarzfleckenkrankheit sind in eine gelatinöse Masse eingebettet, die bei ausreichender Feuchtigkeit im Frühjahr aufquillt und in Form weiß-gelblicher „Sporen-ranken“ heraustritt. Der Befall wird an den dunklen, länglichen Flecken an den grünen Triebachsen und an vergilbten Blättern erkennbar, die häufig schon im Juli abfallen. Mit abfließendem Wasser oder weggespritzten Wassertropfen werden die Sporen verbreitet.

Als hochanfällige Sorte gilt Müller-Thurgau. Weniger anfällig sind hingegen Riesling und Silvaner, am wenigsten anfällig sind der Grau- und Weißburgunder (Mohr, 2012, S. 127-129).

7. Diskussion

7.1 Ergebnisse

Zwar wird der Anbau der ausgewählten Rebsorten in Teilen der Metropolregion Hamburg zukünftig möglich sein, doch wird ein Riesling oder Grauburgunder aus Lüchow und der Umgebung niemals so schmecken wie ein Wein derselben Rebsorte, der in Baden-Württemberg oder der Pfalz erzeugt wurde. Auch innerhalb der Metropolregion Hamburg wird es zu Unterschieden innerhalb der Rebsorten kommen, die auf verschiedene Bodenmerkmale, Weinbautechniken und nicht zuletzt auf die Lage innerhalb der Region zurückzuführen sind.

Die Nachfrage nach typischen, regionalen Produkten hat in den vergangenen Jahrzehnten stark zugenommen. Typizität und Authentizität sind gerade beim Wein zu entscheidenden Erfolgsfaktoren am Markt geworden. Wein steht schon lange nicht mehr nur für Genuss, sondern vor allem für Ursprung und Herkunft, für die Geschichte und die Kultur einer Region (Lott et al., 2010, S. 8). Die Hervorhebung bestimmter Eigenschaften, durch die sich ein Weißwein aus der Metropolregion Hamburg von anderen Weißweinen Deutschlands

unterscheidet, kann daher ein wichtiger Schlüssel sein, um Wein aus der Region erfolgreich zu vermarkten.

Die Beurteilung des Anbaupotentials der Metropolregion Hamburg für die ausgewählten Weißweinrebsorten basiert in dieser Arbeit ausschließlich auf den Berechnungen thermaler und hydrologischer Klimaindizes. Andere Einflussfaktoren wie Bodenbeschaffenheit oder Sonneneinstrahlung dürfen bei der Beurteilung des Anbaupotentials einer Region jedoch nicht ignoriert werden (Malheiro et al., 2010, S. 175) und können das Anbaupotential der Metropolregion Hamburg sowohl verbessern als auch verschlechtern.

7.2 Unsicherheiten bei Klimaprojektionen

Regionale Studien zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels sind von großer Bedeutung für die Bewertung von Chancen und Risiken in der Landwirtschaft (Jakob, D. et al., 2008, S. 64). Die Klimavorhersagen sind jedoch sehr komplex, weil viele Einflussfaktoren zusammenwirken. Daher muss man, wenn man die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels diskutieren will, die Unsicherheiten der Modelle mitberücksichtigen.

Klimamodelle sind ein vereinfachtes Abbild des tatsächlichen Klimasystems und nicht alle Klimavariablen können mit der gleichen Genauigkeit berechnet werden. Für die Temperatur geht dies in der Regel relativ einfach und verlässlich, Simulationen zur Niederschlagsentwicklung sind jedoch mit weitaus größeren Unsicherheiten verbunden. Gerade Modelle, die auf Beobachtungen basieren, sind anfällig für Fehler bei Niederschlagsmessungen. Mit 10-20% Fehlerwahrscheinlichkeit können die Ungenauigkeiten relativ groß ausfallen und die Aussagekraft der Ergebnisse, wenn Niederschlagsänderungen von 5, 10 oder 20% projiziert werden, stark einschränken (Daschkeit, 2011, S. 88). Auch darf nicht vergessen werden, dass jedes noch so hochaufgelöste regionale Modell von einem globalen Modell angetrieben wird. Ein regionales Modell ist allerdings nicht dazu in der Lage, großräumige Modellfehler des globalen Modells zu korrigieren (Daschkeit, 2011, S. 62).

Die Klimamodelle, sogar die regionalen, haben eine relativ niedrige Auflösung von 100-200km. Aber auch Modelle mit räumlich höherer Auflösung, wie die für diese Arbeit verwendeten Modelle REMO und CLM, werden durch zeitliche Limitationen (Jahre oder Monate) eingeschränkt (Schultze & Sabbatini, 2019, S. 1142), wodurch mögliche Extremereignisse wie Starkregen oder Tropennächte unter den zukünftigen Klimabedingungen der Metropolregion Hamburg nicht aufgezeigt werden.

Die Szenarien, die für die Klimamodellierung genutzt werden, sind keine Vorhersagen der Zukunft, sondern Abschätzungen über die mögliche Entwicklung der nur bedingt vorher-sagbaren Freisetzung von Treibhausgasen (Storch & Claussen, 2011, S. 1). Außerdem be-inhaltet keins der SRES-Szenarien Maßnahmen zur Verringerung oder Vermeidung von treibhausgasrelevanten Emissionen (Daschkeit, 2011, S. 64), obwohl diesbezüglich im Verlauf des 21. Jahrhunderts große Fortschritte gemacht werden könnten. Die für den 5. Sachstand des IPCC ausgewählten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pa-thways) enthalten zum Teil bereits Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissio-nen und repräsentieren damit auch Szenarien, in denen Klimapolitik gemacht wird (IPCC, 2014, S. 59), allerdings liegen für diese Szenarien noch keine umfangreichen Auswertun-gen für die Metropolregion Hamburg vor, weshalb die Ergebnisse dieser Arbeit auf Be-rechnungen mit den SRES-Szenarien basieren.

Nicht zuletzt bilden die Klimaprojektionen die Metropolregion Hamburg nur so ab, wie sie heute aussieht. Durch topografische Veränderungen wie durch zunehmende Bebauung kann sich jedoch die Luftzirkulation und damit auch die Temperatur und relative Luft-feuchtigkeit in Teilen der Region verändern (Jones et al., 2012, S. 114).

7.3 Schwächen der Klimaindizes

Der Winkler-Index verwendet einen unteren Schwellenwert von 10°C, um zu beurteilen, welche physiologischen Prozesse wichtig für die phänologische Entwicklung der Rebe sind. Es finden jedoch auch physiologische Prozesse unterhalb dieser Temperaturgrenze statt. Dies könnte wichtiger sein, als bisher angenommen, und bedeuten, dass der Wert von 10°C gar nicht die Temperaturvoraussetzung für die physiologischen Prozesse ist, die tat-sächlich für die phänologische Entwicklung verantwortlich sind, auch wenn das im phäno-logischen Modell so veranschaulicht wird (Parker, Garcia de Cortazar-Atauri, van Leeu-wen & Chuine, 2011, S. 211).

Auch dem Huglin-Index gelingt es nicht, alle Temperaturschwankungen einer Umgebung auszudrücken, zum Beispiel berücksichtigt er keine Extremereignisse, die sowohl unter sehr warmen als auch unter sehr kalten Bedingungen auftreten können. Außerdem ist er ein rein thermischer Index, das bedeutet, er berücksichtigt neben der Temperatur keine weite-ren Klimafaktoren. HI-Werte über 1500 bedeuten nicht zwingend, dass eine Region kom-plett geeignet ist für Weinanbau, da weitere Faktoren wie Bodenmerkmale, Hanglage, Nie-

erschlag oder Strahlungsintensitäten ebenfalls wichtig für das Rebenwachstum und die Weinqualität sind.

Der Hydrothermische Index wird angewendet, um ein Anbaugebiet unter anderem in Hinblick auf das Risiko für das Auftreten feuchtigkeitsbedingter Krankheiten zu untersuchen. Allerdings berücksichtigt der Index neben der Niederschlagsmenge und Temperatur keine weiteren Faktoren wie z.B. die Windgeschwindigkeit, die sich ebenfalls auf die Luftfeuchtigkeit auswirkt und nach Starkregenereignissen zu einer schnellen Abtrocknung der Reben führen kann.

Zusätzlich müssten die Klimaindizes aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels auf die phänologischen Eintrittstermine in Zukunft gegebenenfalls angepasst werden. Bei der Berechnung wird von einer Wachstumsperiode von April bis September (HI) bzw. von April bis Oktober (WI) ausgegangen sowie vom Eintritt der Reife im September (CI). Wenn der Austrieb allerdings, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, immer früher stattfindet und die Reife statt im September schon im Juli oder August eintritt, müssten diese Entwicklungen theoretisch auch in der Berechnung Berücksichtigung finden.

Generell ist es schwierig, Grenzwerte der Klimaindizes für jede einzelne Rebsorte festzulegen. Alle Indizes haben sich zwar in der Praxis bisher als hilfreich erwiesen, als theoretische Modelle besitzen sie allerdings auch nur eine begrenzte Aussagekraft.

8. Zusammenfassung und Fazit

Der Klimawandel hat den Wachstumszyklus der Rebe, die Zusammensetzung und Qualität der Trauben sowie die geografische Verteilung der Weinanbaugebiete bereits verändert und wird dies, wenn man sich zukünftige Klimaprojektionen ansieht, mit großer Wahrscheinlichkeit auch weiterhin tun. Der Klimawandel wird damit zu einer unausweichlichen Herausforderung in vielen traditionellen Weinanbaugebieten und ermöglicht gleichzeitig die Erschließung neuer Gebiete.

Aktuell ist die Metropolregion Hamburg mit einer mittleren Jahrestemperatur von 8,8°C und einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhe von 796mm nicht besonders geeignet, um traditionelle Rebsorten wie Riesling, Müller-Thurgau, Grauburgunder, Weißburgunder und Silvaner anzubauen. Um das Anbaupotential der Metropolregion Hamburg unter zukünftigen Klimabedingungen zu ermitteln, wurden mithilfe von Klimaprojektionen

vier thermale Klimaindizes (Winkler-Index, Huglin-Index, Cool-Night-Index und Hydrothermischer Index) berechnet und in Hinblick auf die Anbaueignung der ausgewählten Weißweinrebsorten beschrieben.

Unter den Szenarien A1B und A2 wird die Metropolregion Hamburg im Verlauf des 21. Jahrhunderts für den Anbau vieler bekannter Weißweinrebsorten geeignet sein, allerdings mit lokalen Unterschieden innerhalb der Region. Im Südosten der Region (Lüchow) kann aufgrund kontinentaler Klimaeinflüsse im Verlauf des Jahrhunderts ein weitaus breiteres Rebsortenspektrum angebaut werden als an der kühlen und verregneten Nordseeküste (Cuxhaven), die erst zum Ende des Jahrhunderts ein geeignetes Gebiet für den Anbau einzelner Rebsorten darstellt. Da die Temperaturen an der Nordseeküste nachts nicht so stark abfallen wie in anderen Teilen der Region, ist in dieser Region jedoch mit Nachttemperaturen zu rechnen, die eigentlich zu hoch für die Produktion von Qualitätswein sind. Das bedeutet, selbst wenn der Weinanbau in Cuxhaven und Umgebung grundsätzlich möglich wird, kann der Erhalt von Farbstoffen und Aromen nicht gewährleistet werden und den dort erzeugten Weinen würde es an Frische und komplexen Aromen mangeln. Unter dem B1-Szenario treten die gleichen Veränderungen etwa 30 Jahre verzögert ein.

Die größte Herausforderung für den Weinanbau in den von maritimen Wettereinflüssen geprägten Teilen der Metropolregion Hamburg stellt jedoch die hohe Niederschlagsmenge bei gleichzeitig steigenden Temperaturen dar, die das Auftreten von Rebkrankheiten wie Botrytis, Peronospora und Phomopsis begünstigen. Dies stellt einen erheblichen Limitationsfaktor für den Weinanbau an der Nordseeküste und auch im Elbe-Einzugsgebiet bis nach Hamburg dar. Unter Miteinbeziehung des Krankheitsrisikos eignen sich also nur die Teile der Metropolregion Hamburg für Weinanbau, die sich im Südosten der Region befinden, wo der Übergang zum feucht-kontinentalen Klima beginnt.

Zwar wird der Anbau der ausgewählten Rebsorten im Verlauf des 21. Jahrhunderts in Teilen der Metropolregion Hamburgs möglich sein, jedoch werden die hier erzeugten Weine einen ganz anderen Geschmack und Charakter haben, als man es von süddeutschen Weinen derselben Rebsorten gewohnt ist. Die Hervorhebung bestimmter Eigenschaften, durch die sich ein Weißwein aus der Metropolregion Hamburg von anderen Weißweinen Deutschlands unterscheidet, kann bei der Vermarktung des norddeutschen Weins sowohl hinderlich als auch hilfreich sein.

Erschreckend ist, wie schnell sich die Eignung der einzelnen Rebsorten ändert. Sorten, die Mitte des Jahrhunderts für bestimmte Lagen in der Metropolregion Hamburg geeignet sind, sind es zum Ende des Jahrhunderts möglicherweise schon nicht mehr. Dies erschwert die Planbarkeit von Anbau und Anpassungsstrategien.

Die Klimaprojektionen sind im Gegensatz zu Klimaprognosen keine Vorhersagen über das zukünftige Klima, sondern lediglich Abschätzungen über mögliche Entwicklungen des Klimas, die eintreten können, aber nicht müssen. Die in dieser Arbeit erstellten Projektionen sind daher mit Unsicherheiten verbunden.

Die Beurteilung des Anbaupotentials der Metropolregion Hamburg basiert in dieser Arbeit ausschließlich auf den Berechnungen thermaler und hydrologischer Klimaindizes. Weitere Faktoren wie die Topografie, Bodenbeschaffenheit, Strahlungsintensitäten oder die Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentration in der Atmosphäre können das Anbaupotential der Region sowohl verbessern als auch verschlechtern und sollten in zukünftige Untersuchungen miteinbezogen werden.

Nicht nur im Weinbau wird man mit den Konsequenzen der globalen Erwärmung zu kämpfen haben. Der Klimawandel wird die gesamte Landwirtschaft weltweit beeinflussen, vor allem in warmen und wasserarmen Regionen, in denen bereits heute tausende Hektar produktives Agrarland durch Dürren, Wüstenbildung, Starkregenereignisse, Überschwemmungen oder Erosion verloren gegangen sind (Koch & Oehl, 2018, S. 260). Da die Weinrebe nicht kritisch für das menschliche Überleben ist, macht ihre außergewöhnlich hohe Klimaempfindlichkeit sie zu einem Frühwarnsystem für Veränderungen, mit denen alle Nutzpflanzen in Zukunft konfrontiert sein werden, wenn sich das Klima weiter verändert (Jones & Webb, 2010, S. 103).

Literaturverzeichnis

- Albrod, B. (Lübecker Nachrichten (LN), Hrsg.). (2019, 29. Oktober). *Nur 400 Flaschen: Schleswig-Holsteins seltenster Tropfen*. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://www.in-online.de/Lokales/Stormarn/Bio-Weisswein-aus-Bargteheide>
- Bauer, K., Regner, F. & Friedrich, B. (2018). *Weinbau* (12., akt. Auflage). München: AV Buch.
- Bock, A., Sparks, T., Estrella, N. & Menzel, A. (2011). Changes in the phenology and composition of wine from Franconia, Germany. *Climate Research*, 50 (1), 69-81.
- Bois, B., Zito, S. & Calonnec, A. (2017). Climate vs grapevine pests and diseases worldwide: the first results of a global survey. *OENO One*, 51 (2), 133-139.
- Cardell, M. F., Amengual, A. & Romero, R. (2019). Future effects of climate change on the suitability of wine grape production across Europe. *Regional Environmental Change*, 25 (3), 1-12.
- Daschkeit, A. (2011). Das Klima der Region und mögliche Entwicklungen in der Zukunft bis 2100. In H. von Storch & M. Claussen (Hrsg.), *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg* (S. 61-90). Berlin: Springer.
- Deutsches Weininstitut (Statistisches Bundesamt, Hrsg.). (2019). *Anteil der wichtigsten Weißweinsorten an der Rebfläche in Deutschland in den Jahren 2017 und 2018*. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/73224/umfrage/anteile-der-wichtigsten-weissweinrebsorten-an-der-gesamtrebflaeche/>
- Dougherty, P. H. (2012). Introduction to the Geographical Study of Viticulture and Wine Production. In P. H. Dougherty (Hrsg.), *The Geography of Wine. Regions, Terroir and Techniques* (S. 3-36). Dordrecht, Niederlande: Springer Science+Business Media.
- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C. & Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research*, 41 (3), 193-204.
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J. & Santos, J. A. (2012). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1 (2), 94-110.
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J. & Santos, J. A. (2013). Future scenarios for viticultural zoning in Europe: ensemble projections and uncertainties. *International Journal of Biometeorology*, 57 (6), 909-925.

- Freudig, D. (Springer Spektrum Akademischer Verlag, Hrsg.). (1999). *Phänologie*. Lexikon der Biologie. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/phaenologie/50876>
- Gömann, H., Frühauf, C., Lüttger, A. & Weigel, H.-J. (2017). Landwirtschaft. In G. P. Brasseur, D. Jacob & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* (S. 183-191). Berlin: Springer Spektrum.
- Hoppmann, D., Schaller, K. & Stoll, M. (2017). *Terroir. Wetter, Klima und Boden im Weinbau* (2., akt. Auflage). Stuttgart: Ulmer.
- IPCC. (2007). *Klimaänderung 2007: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen* (Kernauforteam, Pachauri, R. K. & Reisinger, A., Hrsg.). Genf, Schweiz: IPCC. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Berlin, 2008. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/IPCC2007-SYR-german.pdf>
- IPCC. (2014). *Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen* (Kernauforteam, Pachauri, R. K. & Meyer, L. A., Hrsg.). Genf, Schweiz: IPCC. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/IPCC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf
- Jacob, D., Kottmeier, C., Petersen, J., Rechid, D. & Teichmann, C. (2017). Regionale Klimamodellierung. In G. P. Brasseur, D. Jacob & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* (S. 27-35). Berlin: Springer Spektrum.
- Jakob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P. & Sieck, K. (August 2008). *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland. Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland* (Umweltbundesamt, Hrsg.). Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaauswirkungen-anpassung-in-deutschland?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3513>
- Jakob, L. (2012). *Lexikon der Önologie. Kellerwirtschaft, Weinchemie, Weinrecht*. Stuttgart: Ulmer.
- Johnson, H., Ferstl, R., Vogel, S. & Brook, S. (2013). *Der große Johnson. Die Enzyklopädie der Weine, Weinbaugebiete und Weinerzeuger der Welt* (3., überarb. Auflage). München: Hallwag.
- Jones, G. V. (2016). Grapevines in a changing environment: a global perspective. In H. Geros, H. M. Gil, M. M. Chaves & S. Delrot (Hrsg.), *Grapevine in a changing environment. A molecular and ecophysiological perspective* (S. 1-17). Chichester, England: John Wiley & Sons.

- Jones, G. V., Duchêne, E., Tomasi, D., Yuste, J., Braslavská, O., Schultz, H. R. et al. (2005). Changes in European Winegrape Phenology and Relationships with Climate. In *Proceedings GESCO* (Geisenheimer Berichte, S. 54-61).
- Jones, G. V., Reid, R. & Vilks, A. (2012). Climate, Grapes, and Wine: Structure and Suitability in a Variable and Changing Climate. In P. H. Dougherty (Hrsg.), *The Geography of Wine. Regions, Terroir and Techniques* (S. 109-133). Dordrecht, Niederlande: Springer Science+Business Media.
- Jones, G. V. & Schultz, H. R. (2016). Climate change and emerging cool climate wine regions. *Wine & Viticultural Journal*, 31 (6), 51-53.
- Jones, G. V. & Webb, L. B. (2010). Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research*, 21 (2), 103-106.
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R. & Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73 (3), 319-343.
- Kaspar, F. & Mächel, H. (2017). Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In G. P. Brasseur, D. Jacob & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* (S. 17-26). Berlin: Springer Spektrum.
- Keller, M. (2010). Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16 (1), 56-69.
- Koch, B. & Oehl, F. (2018). Climate Change Favors Grapevine Production in Temperate Zones. *Agricultural Sciences*, 9 (3), 247-263.
- Lott, H., Pfaff, F., Prior, B. & Hillebrand, W. (2010). *Taschenbuch der Rebsorten* (14., neubearb. Aufl.). Mainz: Fraund.
- Malheiro, A. C., Santos, J. A., Fraga, H. & Pinto, J. G. (2010). Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research*, 43 (3), 163-177.
- Menz, P. (2019). *Längengrad und Breitengrad / GPS-Koordinaten*. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://www.laengengrad-breitengrad.de/>
- Metropolregion Hamburg. *Karte der Metropolregion Hamburg*. Hamburg. Verfügbar unter <https://metropolregion.hamburg.de/karte/>
- Mira de Orduña, R. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43 (7), 1844-1855.

- Mohr, H. D. (Hrsg.). (2012). *Farbatlas Krankheiten, Schädlinge und Nützlinge an der Weinrebe* (2., überarb. u. erw. Auflage). Stuttgart: Ulmer.
- Neumann, P. A. & Matzarakis, A. (2011). Viticulture in southwest Germany under climate change conditions. *Climate Research*, 47 (3), 161-169.
- Parker, A. K., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Chuine, I., Barbeau, G., Bois, B., Boursiquot, J.-M. et al. (2013). Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: A case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 249-264.
- Parker, A. K., Garcia de Cortazar-Atauri, I., van Leeuwen, C. & Chuine, I. (2011). General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17 (2), 206-216.
- Poni, S., Gatti, M., Palliotti, A., Dai, Z., Duchêne, E., Truong, T.-T. et al. (2018). Grapevine quality: A multiple choice issue. *Scientia Horticulturae*, 234 (4), 445-462.
- Pons, A., Allamy, L., Schüttler, A., Rauhut, D., Thibon, C. & Darriet, P. (2017). What is the expected impact of climate change on wine aroma compounds and their precursors in grape? *OENO One*, 51 (2), 141-146.
- Rechid, D., Petersen, J., Schoettler, R. & Jacob, D. (2014). *Klimaprojektionen für die Metropolregion Hamburg* (Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten, Bd. 1). Hamburg: TuTech Verlag. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <http://klimzug-nord.de/index.php/page/2009-05-25-Publikationen>
- Rosenhagen, G. & Schatzmann, M. (2011). Das Klima der Metropolregion auf Grundlage meteorologischer Messungen und Beobachtungen. In H. von Storch & M. Claussen (Hrsg.), *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg* (S. 19-59). Berlin: Springer.
- Rusjan, D. (2010). Aromas in Grape and Wine. In S. Delrot, H. Medrano, E. Or, L. Bavaresco & S. Grando (Hrsg.), *Methodologies and Results in Grapevine Research* (S. 411-442). Dordrecht, Niederlande: Springer Science+Business Media.
- Santos, J. A., Malheiro, A. C., Pinto, J. G. & Jones, G. V. (2012). Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing. *Climate Research*, 51 (1), 89-103.
- Schmidt, H., Eyring, V., Latif, M., Rechid, D. & Sausen, R. (2017). Globale Sicht des Klimawandels. In G. P. Brasseur, D. Jacob & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* (7-16). Berlin: Springer Spektrum.

- Schneider, D. (Lübecker Nachrichten (LN), Hrsg.). (2019, 24. September). *In der Holsteinischen Schweiz beginnt die Weinlese*. Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://www.in-online.de/Lokales/Ostholstein/In-der-Holsteinischen-Schweiz-beginnt-die-Weinlese>
- Schultz, H. R., Hofmann, M. & Jones, G. V. (2009). *Weinbau im Klimawandel: Regionen im Umbruch* (Klimastatusbericht 2009). : Deutscher Wetterdienst (DWD). Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb2009_pdf/artikel2.html
- Schultze, S. R. & Sabbatini, P. (2019). Implications of a Climate-Changed Atmosphere on Cool-Climate Viticulture. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58 (5), 1141-1153.
- Stock, M., Badeck, F., Gerstengarbe, F.-W., Hoppmann, D., Kartschall, T., Österle, H., Werner, P. C. et al. (2007). *Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinanbau in Deutschland (Klima 2050). Schlussbericht zum FDW-Vorhaben: Klima 2050* (PIK Report Nr. 106). Potsdam: Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Zugriff am 15.12.2019. Verfügbar unter <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr106.pdf>
- Storch, H. von & Claussen, M. (2011). Einleitung und Zusammenfassung. In H. von Storch & M. Claussen (Hrsg.), *Klimabericht für die Metropolregion Hamburg* (S. 1-16). Berlin: Springer.
- Tonietto, J. & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (1), 81-97.
- Van Leeuwen, C. & Darriet, P. (2016). The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics*, 11 (1), 150-167.
- Van Leeuwen, C. & Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*, 51 (2), 147-154.
- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, Marguerit et al. (2019). An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *Agronomy*, 9 (9), 514-534.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter der Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Anhang

Die Metropolregion Hamburg

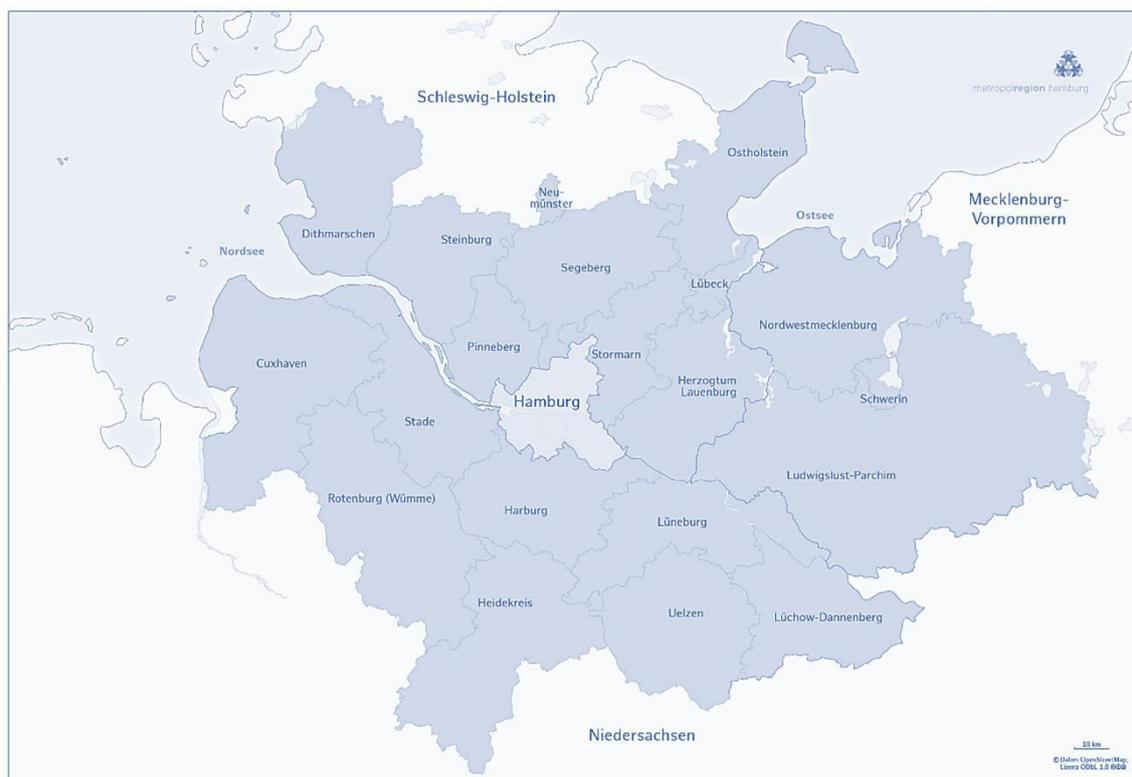


Abbildung 7: Karte der Metropolregion Hamburg mit den dazugehörigen Landkreisen in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern (Metropolregion Hamburg)

Das Klima in der Metropolregion Hamburg:

Monats- und Jahreswerte ausgewählter Standorte für den Bezugszeitraum 1971-2000

Tabelle 10 : Monats- und Jahresmittel der Temperatur in °C für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 38)

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Helgoland	3,1	2,6	4,0	6,5	10,6	13,7	16,3	17,1	14,9	11,6	7,5	4,8	9,4
Cuxhaven	1,8	2,1	4,4	7,5	12,1	14,9	17,1	17,3	14,2	10,2	5,8	3,2	9,2
Hamburg-Fu.	1,3	1,7	4,4	7,8	12,6	15,4	17,4	17,2	13,6	9,4	5,1	2,5	9,0
Lüchow	0,7	1,1	4,3	7,8	13,0	15,6	17,7	17,3	13,4	9,0	4,6	2,1	8,9
Schwerin	0,4	0,9	3,8	7,5	12,5	15,3	17,3	17,3	13,4	9,2	4,5	1,9	8,7

Tabelle 11: Monats- und Jahreswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 38)

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Helgoland	4,4	3,9	5,5	8,4	12,8	15,8	18,3	19,0	16,5	13,0	9,0	6,2	11,1
Cuxhaven	3,8	4,1	7,1	10,7	15,6	18,1	20,2	20,6	17,2	12,9	7,9	5,0	11,9
Hamburg-Fu.	3,5	4,4	8,0	12,3	17,5	19,9	22,0	22,3	17,9	13,0	7,5	4,6	12,7
Lüchow	3,1	4,1	8,2	12,8	18,3	20,8	23,2	23,2	18,5	13,2	7,2	4,2	13,1
Schwerin	2,7	3,7	7,5	12,2	17,8	20,2	22,3	22,3	17,8	12,8	6,9	3,9	12,5

Tabelle 12: Monats- und Jahreswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 39)

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Helgoland	1,4	1,1	2,5	4,7	8,6	11,9	14,5	15,3	13,2	9,9	5,8	3,1	7,7
Cuxhaven	-0,2	-0,1	2,0	4,7	8,9	12,1	14,3	14,5	11,7	7,8	3,7	1,2	6,7
Hamburg-Fu.	-1,4	-1,2	1,1	3,3	7,4	10,5	12,7	12,4	9,6	6,0	2,4	0,0	5,2
Lüchow	-2,0	-2,0	0,8	2,8	6,8	9,8	11,8	11,6	8,9	5,1	1,8	-0,4	4,6
Schwerin	-1,9	-1,6	0,9	3,5	7,8	10,9	13,0	13,0	10,0	6,2	2,3	-0,3	5,3

Tabelle 13: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Bezugszeitraum 1971-2000 (Rosenhagen & Schatzmann, 2011, S. 42)

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Helgoland	57	36	49	35	40	55	55	61	82	82	89	70	712
Cuxhaven	66	40	55	40	50	77	74	67	84	81	81	76	791
Hamburg-Fu.	64	42	62	46	54	77	75	73	68	64	70	78	772
Lüchow	42	30	37	36	47	58	62	48	39	39	38	47	523
Schwerin	50	32	46	41	50	65	67	52	53	48	51	60	614

Temperaturänderungen (REMO & CLM)

Tabelle 14: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen in K 2036-2065 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 52)

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	0.9	1.4	1.4	2.0	1.1	1.6
DJF	1.1	1.9	1.5	2.9	1.2	2.6
MAM	0.2	1.1	0.9	1.7	1.1	1.3
JJA	0.8	1.1	1.3	1.5	1.0	1.5
SON	0.8	1.5	1.5	2.1	0.8	1.5

Tabelle 15: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Temperaturänderungen in K 2071-2100 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 52)

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	1.9	2.1	2.3	3.1	2.7	3.3
DJF	2.4	2.9	2.8	3.9	3.3	4.3
MAM	1.2	2.0	1.8	2.8	1.9	3.2
JJA	1.4	1.8	2.2	2.9	2.3	2.6
SON	1.9	2.3	2.4	3.1	2.3	3.1

Tabelle 16: Mittlere saisonale Temperaturänderungen in K

	2036-2065			2071-2100		
	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Jahr	1,15	1,70	1,35	2,00	2,70	3,00
DJF	1,50	2,20	1,90	2,65	3,35	3,80
MAM	0,65	1,30	1,20	1,60	2,30	2,55
JJA	0,95	1,40	1,25	1,60	2,55	2,45
SON	1,15	1,80	1,15	2,10	2,75	2,70

Niederschlagsänderungen (REMO & CLM)

Tabelle 17: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen in % 2036-2065 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 52)

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	4.0	12.2	3.5	8.8	4.4	13.8
DJF	2.8	13.4	7.4	15.6	6.7	18.0
MAM	5.1	15.9	-1.4	17.6	7.0	19.6
JJA	-2.9	8.9	-9.7	-1.5	-1.9	7.3
SON	3.7	20.4	6.3	26.9	7.9	21.5

Tabelle 18: Zahlenwerte der jährlichen und saisonalen Niederschlagsänderungen in % 2071-2100 gegenüber 1971-2000 für das Gebietsmittel der Metropolregion Hamburg jeweils der Simulationen, die die kleinste und die größte Änderung pro Emissionsszenario zeigen (Rechid et al., 2014, S. 53)

	B1 min	B1 max	A1B min	A1B max	A2 min	A2 max
Jahr	5.2	14.7	3.6	8.2	7.3	19.4
DJF	13.7	20.2	14.7	27.7	17.1	36.4
MAM	10.5	21.8	4.2	16.5	12.9	16.3
JJA	-16.6	4.5	-21.7	-10.3	-10.2	3.1
SON	12.7	21.6	9.0	16.3	17.5	26.7

Tabelle 19: Mittlere saisonale Niederschlagsänderung in %

	2036-2065			2071-2100		
	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2
Jahr	8,10	6,15	9,10	9,95	5,90	13,35
DJF	8,10	11,50	12,35	16,95	21,20	26,75
MAM	10,50	8,10	13,30	16,15	10,35	14,60
JJA	3,00	-5,60	2,70	-6,05	-16,00	-3,55
SON	12,05	16,60	14,70	17,15	12,65	22,10

Projektionen für den Zeitraum 2036-2065

B1-Szenario

Tabelle 20: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	3,3	3,6	5,1	8,2	12,8	15,9	18,1	18,3	15,4	11,4	7,0	4,7	10,4
Hamburg	2,8	3,2	5,1	8,5	13,3	16,4	18,4	18,2	14,8	10,6	6,3	4,0	10,2
Lüchow	2,2	2,6	5,0	8,5	13,7	16,6	18,7	18,3	14,6	10,2	5,8	3,6	10,1

Tabelle 21: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	5,3	5,6	7,8	11,4	16,3	19,1	21,2	21,6	18,4	14,1	9,1	6,5	13,1
Hamburg	5,0	5,9	8,7	13,0	18,2	20,9	23,0	23,3	19,1	14,2	8,7	6,1	13,9
Lüchow	4,6	5,6	8,9	13,5	19,0	21,8	24,2	24,2	19,7	14,4	8,4	5,7	14,3

Tabelle 22: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	1,3	1,4	2,7	5,4	9,6	13,1	15,3	15,5	12,9	9,0	4,9	2,7	7,9
Hamburg	0,1	0,3	1,8	4,0	8,1	11,5	13,7	13,4	10,8	7,2	3,6	1,5	6,4
Lüchow	-0,5	-0,5	1,5	3,5	7,5	10,8	12,8	12,6	10,1	6,3	3,0	1,1	5,8

Tabelle 23: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2035-2065 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	71	43	61	44	55	79	76	69	94	91	91	82	855
Hamburg	69	45	69	51	60	79	77	75	76	72	78	84	835
Lüchow	45	32	41	40	52	60	64	49	44	44	43	51	565

A1B-Szenario

Tabelle 24: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	4,0	4,3	5,7	8,8	13,4	16,3	18,5	18,7	16,0	12,0	7,6	5,4	10,9
Hamburg	3,5	3,9	5,7	9,1	13,9	16,8	18,8	18,6	15,4	11,2	6,9	4,7	10,7
Lüchow	2,9	3,3	5,6	9,1	14,3	17,0	19,1	18,7	15,2	10,8	6,4	4,3	10,6

Tabelle 25: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	6,0	6,3	8,4	12,0	16,9	19,5	21,6	22,0	19,0	14,7	9,7	7,2	13,6
Hamburg	5,7	6,6	9,3	13,6	18,8	21,3	23,4	23,7	19,7	14,8	9,3	6,8	14,4
Lüchow	5,3	6,3	9,5	14,1	19,6	22,2	24,6	24,6	20,3	15,0	9,0	6,4	14,8

Tabelle 26: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	2,0	2,1	3,3	6,0	10,2	13,5	15,7	15,9	13,5	9,6	5,5	3,4	8,4
Hamburg	0,8	1,0	2,4	4,6	8,7	11,9	14,1	13,8	11,4	7,8	4,2	2,2	6,9
Lüchow	0,2	0,2	2,1	4,1	8,1	11,2	13,2	13,0	10,7	6,9	3,6	1,8	6,3

Tabelle 27: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2035-2065 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	74	45	59	43	54	73	70	63	98	94	94	85	840
Hamburg	71	47	67	50	58	73	71	69	79	75	82	87	819
Lüchow	47	33	40	39	51	55	59	45	45	45	44	52	555

A2-Szenario

Tabelle 28: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	3,7	4,0	5,6	8,7	13,3	16,2	18,4	18,6	15,4	11,4	7,0	5,1	10,6
Hamburg	3,2	3,6	5,6	9,0	13,8	16,7	18,7	18,5	14,8	10,6	6,3	4,4	10,4
Lüchow	2,6	3,0	5,5	9,0	14,2	16,9	19,0	18,6	14,6	10,2	5,8	4,0	10,3

Tabelle 29: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	5,7	6,0	8,3	11,9	16,8	19,4	21,5	21,9	18,4	14,1	9,1	6,9	13,3
Hamburg	5,4	6,3	9,2	13,5	18,7	21,2	23,3	23,6	19,1	14,2	8,7	6,5	14,1
Lüchow	5,0	6,0	9,4	14,0	19,5	22,1	24,5	24,5	19,7	14,4	8,4	6,1	14,5

Tabelle 30: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	1,7	1,8	3,3	6,0	10,2	13,4	15,6	15,8	12,9	9,0	4,9	3,1	8,1
Hamburg	0,5	0,7	2,4	4,6	8,7	11,8	14,0	13,7	10,8	7,2	3,6	1,9	6,6
Lüchow	-0,1	-0,1	2,1	4,1	8,1	11,1	13,1	12,9	10,1	6,3	3,0	1,5	6,0

Tabelle 31: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2035-2065 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	74	45	62	45	57	79	76	69	96	93	93	85	863
Hamburg	72	47	70	52	61	79	77	75	78	73	80	88	842
Lüchow	47	34	42	41	53	60	64	49	45	45	44	53	571

Projektionen für den Zeitraum 2071-2100

B1-Szenario

Tabelle 32: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	4,5	4,8	6,0	9,1	13,7	16,5	18,7	18,9	16,3	12,3	7,9	5,9	11,2
Hamburg	4,0	4,4	6,0	9,4	14,2	17,0	19,0	18,8	15,7	11,5	7,2	5,2	11,0
Lüchow	3,4	3,8	5,9	9,4	14,6	17,2	19,3	18,9	15,5	11,1	6,7	4,8	10,9

Tabelle 33: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	6,5	6,8	8,7	12,3	17,2	19,7	21,8	22,2	19,3	15,0	10,0	7,7	13,9
Hamburg	6,2	7,1	9,6	13,9	19,1	21,5	23,6	23,9	20,0	15,1	9,6	7,3	14,7
Lüchow	5,8	6,8	9,8	14,4	19,9	22,4	24,8	24,8	20,6	15,3	9,3	6,9	15,1

Tabelle 34: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	2,5	2,6	3,6	6,3	10,5	13,7	15,9	16,1	13,8	9,9	5,8	3,9	8,7
Hamburg	1,3	1,5	2,7	4,9	9,0	12,1	14,3	14,0	11,7	8,1	4,5	2,7	7,2
Lüchow	0,7	0,7	2,4	4,4	8,4	11,4	13,4	13,2	11,0	7,2	3,9	2,3	6,6

Tabelle 35: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	77	47	64	46	58	72	70	63	98	95	95	89	870
Hamburg	75	49	72	53	63	72	70	69	80	75	82	91	849
Lüchow	49	35	43	42	55	54	58	45	46	46	45	55	575

A1B-Szenario

Tabelle 36: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	5,2	5,5	6,7	9,8	14,4	17,5	19,7	19,9	17,0	13,0	8,6	6,6	11,9
Hamburg	4,7	5,1	6,7	10,1	14,9	18,0	20,0	19,8	16,4	12,2	7,9	5,9	11,7
Lüchow	4,1	4,5	6,6	10,1	15,3	18,2	20,3	19,9	16,2	11,8	7,4	5,5	11,6

Tabelle 37: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	7,2	7,5	9,4	13,0	17,9	20,7	22,8	23,2	20,0	15,7	10,7	8,4	14,6
Hamburg	6,9	7,8	10,3	14,6	19,8	22,5	24,6	24,9	20,7	15,8	10,3	8,0	15,4
Lüchow	6,5	7,5	10,5	15,1	20,6	23,4	25,8	25,8	21,3	16,0	10,0	7,6	15,8

Tabelle 38: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	3,2	3,3	4,3	7,0	11,2	14,7	16,9	17,1	14,5	10,6	6,5	4,6	9,4
Hamburg	2,0	2,2	3,4	5,6	9,7	13,1	15,3	15,0	12,4	8,8	5,2	3,4	7,9
Lüchow	1,4	1,4	3,1	5,1	9,1	12,4	14,4	14,2	11,7	7,9	4,6	3,0	7,3

Tabelle 39: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	80	48	61	44	55	65	62	56	95	91	91	92	838
Hamburg	78	51	68	51	60	65	63	61	77	72	79	95	818
Lüchow	51	36	41	40	52	49	52	40	44	44	43	57	554

A2-Szenario

Tabelle 40: Monatsmittel der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	5,6	5,9	7,0	10,1	14,7	17,4	19,6	19,8	16,9	12,9	8,5	7,0	12,2
Hamburg	5,1	5,5	7,0	10,4	15,2	17,9	19,9	19,7	16,3	12,1	7,8	6,3	12,0
Lüchow	4,5	4,9	6,9	10,4	15,6	18,1	20,2	19,8	16,1	11,7	7,3	5,9	11,9

Tabelle 41: Monatswerte des mittleren täglichen Maximums der Temperatur in °C für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	7,6	7,9	9,7	13,3	18,2	20,6	22,7	23,1	19,9	15,6	10,6	8,8	14,9
Hamburg	7,3	8,2	10,6	14,9	20,1	22,4	24,5	24,8	20,6	15,7	10,2	8,4	15,7
Lüchow	6,9	7,9	10,8	15,4	20,9	23,3	25,7	25,7	21,2	15,9	9,9	8,0	16,1

Tabelle 42: Monatswerte des mittleren täglichen Minimums der Temperatur in °C im Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	3,6	3,7	4,6	7,3	11,5	14,6	16,8	17,0	14,4	10,5	6,4	5,0	9,7
Hamburg	2,4	2,6	3,7	5,9	10,0	13,0	15,2	14,9	12,3	8,7	5,1	3,8	8,2
Lüchow	1,8	1,8	3,4	5,4	9,4	12,3	14,3	14,1	11,6	7,8	4,5	3,4	7,6

Tabelle 43: Mittlere Niederschlagshöhen in mm für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Cuxhaven	84	51	63	46	57	74	71	65	103	99	99	96	897
Hamburg	81	53	71	53	62	74	72	70	83	78	85	99	875
Lüchow	53	38	42	41	54	56	60	46	48	48	46	60	593

Übersicht der Klimaindizes für die erstellten Projektionen

Tabelle 44: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2036-2065 im B1-Szenario

	Monat	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt		
	Tage	30	31	30	31	31	30	31		
Cuxhaven	T	8,15	12,75	15,85	18,05	18,25	15,35	11,35		
	T_{max}	11,35	16,25	19,05	21,15	21,55	18,35			
	T_{min}						12,85			
	P	44,20	55,25	79,31	76,22	69,01				
	WI									968,40
	HI									1258,74
	CI									12,85
	HyI									4956,93
Hamburg	T	8,45	13,25	16,35	18,35	18,15	14,75	10,55		
	T_{max}	12,95	18,15	20,85	22,95	23,25	19,05			
	T_{min}						10,75			
	P	50,83	59,67	79,31	77,25	75,19				
	WI									962,30
	HI									1430,51
	CI									10,75
	HyI									5299,10
Lüchow	T	8,45	13,65	16,55	18,65	18,25	14,55	10,15		
	T_{max}	13,45	18,95	21,75	24,15	24,15	19,65			
	T_{min}						10,05			
	P	39,78	51,94	59,74	63,86	49,44				
	WI									974,70
	HI									1524,85
	CI									10,05
	HyI									4127,02

Tabelle 45: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2036-2065 im A1B-Szenario

	Monat	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	
	Tage	30	31	30	31	31	30	31	
Cuxhaven	T	8,80	13,40	16,30	18,50	18,70	16,00	12,00	
	T_{max}	12,00	16,90	19,50	21,60	22,00	19,00		
	T_{min}						13,50		
	P	43,24	54,05	72,69	69,86	63,25			
	WI								1069,60
	HI								1367,33
	CI								13,50
	HyI								4764,67
Hamburg	T	9,10	13,90	16,80	18,80	18,60	15,40	11,20	
	T_{max}	13,60	18,80	21,30	23,40	23,70	19,70		
	T_{min}						11,40		
	P	49,73	58,37	72,69	70,80	68,91			
	WI								1063,50
	HI								1539,11
	CI								11,40
	HyI								5097,87
Lüchow	T	9,10	14,30	17,00	19,10	18,70	15,20	10,80	
	T_{max}	14,10	19,60	22,20	24,60	24,60	20,30		
	T_{min}						10,70		
	P	38,92	50,81	54,75	58,53	45,31			
	WI								1075,90
	HI								1633,45
	CI								10,70
	HyI								3976,68

Tabelle 46: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2036-2065 im A2-Szenario

	Monat	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	
	Tage	30	31	30	31	31	30	31	
Cuxhaven	T	8,70	13,30	16,15	18,35	18,55	15,35	11,35	
	T_{max}	11,90	16,80	19,35	21,45	21,85	18,35		
	T_{min}						12,85		
	P	45,32	56,65	79,08	76,00	68,81			
	WI								1013,05
	HI								1324,78
	CI								12,85
	HyI								5095,83
Hamburg	T	9,00	13,80	16,65	18,65	18,45	14,75	10,55	
	T_{max}	13,50	18,70	21,15	23,25	23,55	19,05		
	T_{min}						10,75		
	P	52,12	61,18	79,08	77,03	74,97			
	WI								1006,95
	HI								1496,56
	CI								10,75
	HyI								5449,77
Lüchow	T	9,00	14,20	16,85	18,95	18,55	14,55	10,15	
	T_{max}	14,00	19,50	22,05	24,45	24,45	19,65		
	T_{min}						10,05		
	P	40,79	53,25	59,57	63,67	49,30			
	WI								1019,35
	HI								1590,89
	CI								10,05
	HyI								4248,01

Tabelle 47: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2071-2100 im B1-Szenario

	Monat	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	
	Tage	30	31	30	31	31	30	31	
Cuxhaven	T	9,10	13,70	16,50	18,70	18,90	16,30	12,30	
	T_{max}	12,30	17,20	19,70	21,80	22,20	19,30		
	T_{min}						13,80		
	P	46,46	58,08	72,34	69,52	62,95			
	WI								1115,60
	HI								1416,69
	CI								13,80
	HyI								4901,82
Hamburg	T	9,40	14,20	17,00	19,00	18,80	15,70	11,50	
	T_{max}	13,90	19,10	21,50	23,60	23,90	20,00		
	T_{min}						11,70		
	P	53,43	62,72	72,34	70,46	68,58			
	WI								1109,50
	HI								1588,46
	CI								11,70
	HyI								5250,83
Lüchow	T	9,40	14,60	17,20	19,30	18,90	15,50	11,10	
	T_{max}	14,40	19,90	22,40	24,80	24,80	20,60		
	T_{min}						11,00		
	P	41,81	54,59	54,49	58,25	45,10			
	WI								1121,90
	HI								1682,80
	CI								11,00
	HyI								4103,84

Tabelle 48: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2071-2100 im A1B-Szenario

	Monat	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	
	Tage	30	31	30	31	31	30	31	
Cuxhaven	T	9,80	14,40	17,45	19,65	19,85	16,95	12,95	
	T_{max}	13,00	17,90	20,65	22,75	23,15	19,95		
	T_{min}						14,45		
	P	44,14	55,18	64,68	62,16	56,28			
	WI								1264,35
	HI								1578,26
	CI								14,45
	HyI								4694,36
Hamburg	T	10,10	14,90	17,95	19,95	19,75	16,35	12,15	
	T_{max}	14,60	19,80	22,45	24,55	24,85	20,65		
	T_{min}						12,35		
	P	50,76	59,59	64,68	63,00	61,32			
	WI								1261,25
	HI								1750,03
	CI								12,35
	HyI								5029,49
Lüchow	T	10,10	15,30	18,15	20,25	19,85	16,15	11,75	
	T_{max}	15,10	20,60	23,35	25,75	25,75	21,25		
	T_{min}						11,65		
	P	39,73	51,86	48,72	52,08	40,32			
	WI								1273,65
	HI								1844,37
	CI								11,65
	HyI								3934,00

Tabelle 49: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Zeitraum 2071-2100 im A2-Szenario

	Monat	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt		
	Tage	30	31	30	31	31	30	31		
Cuxhaven	T	10,05	14,65	17,35	19,55	19,75	16,90	12,90		
	T_{max}	13,25	18,15	20,55	22,65	23,05	19,90			
	T_{min}						14,40			
	P	45,84	57,30	74,27	71,37	64,62				
	WI									1261,35
	HI									1583,17
	CI									14,40
	HyI									5260,28
Hamburg	T	10,35	15,15	17,85	19,85	19,65	16,30	12,10		
	T_{max}	14,85	20,05	22,35	24,45	24,75	20,60			
	T_{min}						12,30			
	P	52,72	61,88	74,27	72,34	70,41				
	WI									1264,25
	HI									1754,95
	CI									12,30
	HyI									5628,24
Lüchow	T	10,35	15,55	18,05	20,15	19,75	16,10	11,70		
	T_{max}	15,35	20,85	23,25	25,65	25,65	21,20			
	T_{min}						11,60			
	P	41,26	53,86	55,94	59,80	46,30				
	WI									1276,65
	HI									1849,28
	CI									11,60
	HyI									4393,58

Tabelle 50: Übersicht WI, HI, CI und HyI für den Referenzzeitraum 1971-2000

	Monat	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	
	Tage	30	31	30	31	31	30	31	
Cuxhaven	T	7,50	12,10	14,90	17,10	17,30	14,20	10,20	
	T_{max}	10,70	15,60	18,10	20,20	20,60	17,20		
	T_{min}						11,70		
	P	40,00	50,00	77,00	74,00	67,00			
	WI								790,70
	HI								1084,27
	CI								11,70
	HyI								4476,80
Hamburg	T	7,80	12,60	15,40	17,40	17,20	13,60	9,40	
	T_{max}	12,30	17,50	19,90	22,00	22,30	17,90		
	T_{min}						9,60		
	P	46,00	54,00	77,00	75,00	73,00			
	WI								784,60
	HI								1256,04
	CI								9,60
	HyI								4785,60
Lüchow	T	7,80	13,00	15,60	17,70	17,30	13,40	9,00	
	T_{max}	12,80	18,30	20,80	23,20	23,20	18,50		
	T_{min}						8,90		
	P	36,00	47,00	58,00	62,00	48,00			
	WI								797,00
	HI								1350,38
	CI								8,90
	HyI								3724,40