



Klimawandel und Wetterlagen

Schriftenreihe, Heft 9/2015



KLIWETT – Klimawandel und Wetterlagen (Endbericht)

Arne Spekat, Wiebke Miketta, Frank Kreienkamp, Wolfgang Enke

Inhalt

1	Einleitung	17
1.1	Klimawandel, Extreme und Zirkulationsmuster	17
1.2	KLIWETT	20
1.3	Die Untersuchungsregion	22
1.4	Disclaimer	22
2	Daten und Methoden	23
2.1	Verwendete Daten	23
2.1.1	Messungen an Stationen	23
2.1.2	Reanalysedaten	23
2.1.3	Globales Klimamodell	24
2.2	Zu untersuchende Extremereignisse	24
2.2.1	Extreme Trockenperioden	24
2.2.2	Hochwasser	24
2.2.3	Perioden mit hohem Niederschlag	24
2.2.4	Anzahl der heißen Tage	24
2.2.5	Hitzewellen	25
2.2.6	Anzahl der Eistage	25
2.2.7	Anzahl der Tage mit Spätfrost	25
2.2.8	Starkwind	25
2.2.9	Tage mit Schwüle	25
2.2.10	Tropennächte	25
2.2.11	Trockenwarme Tage	25
2.2.12	Feuchtkalte Tage	26
2.2.13	Tage mit hoher PM10-Belastung	26
2.3	Maße der Repräsentativität	26
2.4	Clusterung des Stationskollektivs	27
2.4.1	Prinzip des Verfahrens	27
2.4.2	Praktische Erfahrungen mit dem Stationsclusterverfahren	28
3	Ergebnisse Arbeitspaket 1 – Ableitung objektiverer Großwetterlagen (aGWL)	30
3.1	Kontext	30
3.2	Verfahren	31
3.3	Resultate	32
3.3.1	Trefferquote	32
3.3.2	Zeitliche Entwicklungen im Klima der Gegenwart	32
3.3.3	Nutzung der aGWL in Klimaszenarios	34
3.4	Fazit	35
4	Ergebnisse Arbeitspaket 2 – Darstellbarkeit von Extremindikatoren durch die aGWL	36
4.1	Kontext	36
4.2	Korrelationsbetrachtungen	37
4.3	Verifikation von aGWL als Proxies für Klimaindikatoren	38
4.4	Fazit	41
5	Ergebnisse Arbeitspaket 3 – Methodenentwicklung KlaMuKo	42
5.1	Kontext	42
5.2	Methode	43
5.2.1	Räumliche Fokussierung von Extremen: Das Stations-Clusterverfahren	43
5.2.2	Screening-Prozess	43
5.2.3	Tägliche Regressionen – Quelle der Muster	44
5.2.4	Klassifikation der Muster	44
5.2.5	Zwei Stufen von KlaMuKo	45

5.3	Ergebnisse	46
6	Ergebnisse Arbeitspaket 4 – KlaMuKo Klimastatistik	47
6.1	Kontext	47
6.2	Ergebnisse der KlaMuKo-Klassifikation der Größen TX, TN, RR, DD und FF	48
6.2.1	Maximumtemperatur (TX)	50
6.2.2	Minimumtemperatur (TN)	54
6.2.3	Niederschlag (Klima- und Niederschlagsstationen) (RR)	55
6.2.4	Niederschlag (nur Klimastationen) (RR)	57
6.2.5	Dampfdruck (DD)	58
6.2.6	Windgeschwindigkeit (FF)	59
6.3	Validierung – Korrelation und Varianzreduktion im Vergleich von KlaMuKo/NCAR-Reanalysen	61
6.3.1	Maximumtemperatur (TX)	63
6.3.2	Minimumtemperatur (TN)	65
6.3.3	Niederschlag (Klima- und Niederschlagsstationen) (RR)	66
6.3.4	Niederschlag (nur Klimastationen) (RR)	67
6.3.5	Dampfdruck (DD)	68
6.3.6	Windgeschwindigkeit (FF)	69
6.4	Validierung – Reproduktion der KlaMuKo-Klassenhäufigkeiten durch Reanalysen und 20C-Daten	70
6.5	Fazit	71
7	Arbeitspaket 5 – Diagnose und Projektionen von Extremindikatoren	72
7.1	Kontext	72
7.2	Extremindikatoren	74
7.2.1	Extreme Trockenperioden	74
7.2.2	Hochwasser	77
7.2.3	Perioden mit hohem Niederschlag	82
7.2.4	Heiße Tage	83
7.2.5	Hitzewellen	86
7.2.6	Eistage	88
7.2.7	Spätfröste	90
7.2.8	Starkwinde	92
7.2.9	Schwüle	95
7.2.10	Tropennächte	97
7.2.11	Niederschlagsarme warme Tage	99
7.2.12	Niederschlagsreiche kalte Tage	101
7.2.13	PM ₁₀ -Überschreitungen	103
7.3	Übersicht der KlaMuKo-Ergebnisse (Extremindikatoren)	105
7.4	Fazit	107
8	Arbeitspaket 6 – Neuer NAO-Index	107
8.1	Kontext	107
8.1.1	Phänomenologie des Blockings	108
8.1.2	Regionale Konsequenzen von Blocking für Sachsen – Ergebnisse der BLOCKWETT-Studie	111
8.2	Breitenkreis-flexibler Blockingindex	112
8.2.1	Klassische Methodik mit festen Bezugsbreitenkreisen	112
8.2.2	Im Rahmen von KLIWETT entwickelte Blockingindex-Methodik für verschiedene Breitenkreise	112
8.2.3	Blocking-Trends im rezenten Klima?	116
8.2.4	Blocking in den 20C Klimamodell-Ergebnissen von ECHAM5	117
8.2.5	Blocking in den Projektionsrechnungen von ECHAM5	119
8.2.6	Vergleich NAO-Index und KLIWETT-Blockingindizes	122
8.3	URO-Strings: Identifikation von zonalen Starkgradientbändern	125
8.3.1	Kontext	125
8.3.2	Verfahren	125
8.3.3	Ergebnisse	128

9	Arbeitspaket 7 – Immissionsituation	136
9.1	Kontext	136
9.2	Analyse des Immissionsverhaltens von NO ₂ , PM ₁₀ , und O ₃ im gegenwärtigen Klima	137
9.3	Beschreibung von kritischen Immissionssituationen mit Zirkulationsmustern?	143
9.3.1	Subjektive und objektive Bestimmung von Großwetterlagen	143
9.3.2	Untersuchungen der Häufigkeit von Schwellwert-Überschreitungen der Immissionen und deren Zusammenhang mit Großwettertypen	146
9.3.3	Untersuchungen von Großwettertyp-spezifischen Mittelwerten von PM ₁₀ -Immissionsdaten	148
9.3.4	Relevanz der Identifikations-Kriterien für die Analyse von PM ₁₀ -Schwellwertüberschreitungen	149
9.3.5	Zusammenhang von Großwettertypen und dem regionalen Windregime	152
9.3.6	Beschreibung von PM ₁₀ -Immissionen mit dem EURO-Strings-Verfahren	155
9.3.7	Verifikation von Klassifikationsansätzen	157
9.3.8	Vorhersageleistung der aGWL/aGWT-Klassifikation	158
9.3.9	Vorhersageleistung der KlaMuKo-Klassifikation	159
9.4	Zukunftstendenzen der Auftrittswahrscheinlichkeit von Grenz- bzw. Zielwertüberschreitungen	162
9.5	Fazit	165
10	Zusammenfassung	166
10.1	Übersicht	166
10.2	Grundlagen und diagnostisch gewonnenes Material	167
10.3	Zirkulationsmuster-Klassifikationen und regionale Extreme	167
10.4	Neuentwicklung einer extrembezogenen Klassifikation: KlaMuKo	167
10.5	Modifikation und Novellierung von Zirkulationsindizes	169
10.6	Luftqualität	171

Anhang

Liste der potenziellen Prediktoren (Tabelle 82)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klimastationen im Freistaat Sachsen	22
Abbildung 2: Bildung von 2 (links) bzw. 3 (rechts) Stationsclustern. Element: Jahresmitteltemperatur. Kriterium: Klassenmittelwert.	28
Abbildung 3: Bildung von 2 (links) bzw. 3 (rechts) Stationsclustern. Element: Jahresniederschlag. Kriterium: Klassenmittelwert.	28
Abbildung 4: Bildung von 2 Stationsclustern. Kriterium: Geografische Koordinaten.....	29
Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der Häufigkeit der GWL 1 (WA). Links: Bestimmt nach dem manuellen Verfahren von HESS & BREZOWSKY. Rechts: Bestimmt mit der aGWL-Methodik (jeweils die durchgezogene blaue Linie). Die Trendgerade ist dick und rot gestrichelt eingezeichnet. Die obere und untere Schranke des Vertrauensbereichs ist dünn rot gestrichelt und die dünn blau gestrichelten Linien geben den Vertrauensbereich der GWL-Werte selbst wieder. Bestimmungszeitraum für den Trend: 1971-2010 (Jahreswerte).	33
Abbildung 6: Wie Abbildung 5, jedoch für die GWL 17 (TRM).	33
Abbildung 7: Häufigkeit der 29 aGWL in den Klimamodell-Ergebnissen von ECHAM5-MPI/OM Lauf 1 (bis 2000: 20C-Daten, danach: Szenario A1B). Ermittlung der Häufigkeiten auf der Basis von gleitenden 30-jährigen Mittelwerten.	34
Abbildung 8: Korrelation zwischen den Häufigkeiten und der Zeit (Maß für die Trendneigung; positive Werte: Anstieg, negative Werte: Rückgang) für die aGWL in gleitenden 30-jährigen Perioden (1951-1980, 1961-1990, ..., 2061-2090, 2071-2100). Analysiert wurden die ECHAM5 Läufe 1 bis 3 auf der Basis des SRES-Szenarios A1B.	35
Abbildung 9: Illustration der täglichen Regressionsbestimmung für 15 Beispieltage.....	44
Abbildung 10: Klassifikation auf Basis multipler Regression für den Niederschlag. Eine Stationsgruppierung, wie in Abschnitt 2.4 geschildert, erfolgte anhand des Betrags des Niederschlags; zur Analyse kamen die Stationen in der Gruppe mit dem höchsten Niederschlag. Jahreszeit: Winter (DJF).	46
Abbildung 11: Charakteristika der Maximumtemperatur (HiMax) für das Jahr (oben), SHJ (Mitte) und WHJ (unten), dargestellt durch Box-Whisker-Plots. Die Antennen (Whisker) markieren das 5- und 95-Perzentil der Klassen-spezifischen Temperatur [°C]. Das Minimum (kleinster Datenwert) und Maximum (größter Datenwert) der jeweiligen Klasse werden mit einem X gekennzeichnet. Die obere Achse gibt für jede Klasse die Anzahl der in ihr befindlichen Tage an.....	52
Abbildung 12: Charakteristika der Maximumtemperatur (HiMax) für die vier Jahreszeiten: Frühling (links oben), Sommer (rechts oben), Herbst (links unten) und Winter (rechts unten), dargestellt durch Box-Whisker-Plots. Die Antennen (Whisker) markieren das 5- und 95-Perzentil der Klassen-spezifischen Temperatur [°C]. Das Minimum (kleinster Datenwert) und Maximum (größter Datenwert) der jeweiligen Klasse werden mit einem X gekennzeichnet. Die obere Achse gibt für jede Klasse die Anzahl der in ihr befindlichen Tage an.....	53
Abbildung 13: Zukunftsentwicklung der Trockenperioden. Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KlaMuKo-Klassen der extremen Trockenperioden für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Jahr.....	76
Abbildung 14: Charakteristika der Hochwasserklassen für das Jahr (oben), SHJ (Mitte) und WHJ (unten) dargestellt durch Box-Whisker-Plots. Die Antennen (Whisker) markieren das 5- und 95-Perzentil des Klassen-spezifischen Niederschlags [mm]. Das Minimum (kleinster Datenwert) und Maximum (größter Datenwert) der jeweiligen Klasse werden mit einem X gekennzeichnet. Die obere Achse gibt für jede Klasse die Anzahl der in ihr befindlichen Tage an.....	78
Abbildung 15: Differenzen der absoluten Häufigkeiten für die KlaMuKo-Klassen des Parameters Hochwasser (3 Tage Niederschlag) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 für das Jahr (oben), SHJ (Mitte) und WHJ (unten)	81
Abbildung 16: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KlaMuKo-Klassen für Perioden mit hohem Niederschlag der drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Jahr	83
Abbildung 17: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KlaMuKo-Klassen der Heißen Tage für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ	85

Abbildung 18: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Hitzewellen für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ	87
Abbildung 19: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Eistage für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: WHJ.....	90
Abbildung 20: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen Anteile der Spätfröste für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Vegetationsperiode (AMJ).....	92
Abbildung 21: Differenzen der absoluten Häufigkeiten für die KLaMuKo-Klassen des Parameters Starkwind (prob_30pro) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 für das SHJ (oben) und WHJ (unten).....	94
Abbildung 22: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen des Parameters Schwüle für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ	97
Abbildung 23: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Tropennächte für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ	99
Abbildung 24: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der niederschlagsarmen warmen Tage (prob) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum	101
Abbildung 25: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der feucht-kalten Tage (prob) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Jahr	102
Abbildung 26: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Überschreitungen des Feinstaubgrenzwertes (prob) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: WHJ	105
Abbildung 27: Nordhemisphärische Korrelationskarten der NAO in Jahreszeiten-repräsentativer Form. Quelle: www.cpc.ncep.noaa.gov/products/	108
Abbildung 28: Beispiel für eine Blocking-Situation im Januar 2000. Dargestellt sind die Höhenlinien der 500 hPa-Fläche als Kurvenschar, die Geopotenzialanomalie (Abweichung vom Mittelwert der Karte) als farbige Bereiche und Windpfeile (unterhalb der Karte ist angegeben, wie eine Windgeschwindigkeit von 50 m/s gezeichnet wird). Auffällig ist die sehr starke Antizyklone mit Kern bei 60 N und 10 W, durch die eine Omega-förmige Deformation der Strömung erfolgt. In ihrem Bereich treten zwar ebenfalls hohe Windgeschwindigkeitswerte auf, aber die zonale (breitenkreisparallele) Komponente ist dort zugunsten der meridionalen Komponente besonders gering. Quelle: BLOCKWETT-Bericht (Enke, Spekat, & Kreienkamp, 2007), modifiziert nach einer globalen Karte des Climate Prediction Center des US-Wetterdienstes www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/blocking/background/atlantic_case.shtml	109
Abbildung 29: Beispiel für eine Blocking-Situation im Februar 1986, bei der die Strömung aufgespalten ist. Dargestellt sind die Höhenlinien der 500 hPa-Fläche. Der eingesetzte Rahmen im nördlichen Teil des atlantisch-europäischen Sektors zeigt die Position der Strömungsaufspaltung und des Wirbelpaars. Quelle: BLOCKWETT-Bericht (Enke, Spekat, & Kreienkamp, 2007).....	110
Abbildung 30: Zonale Profile (0°W ... 180°... 0°W) des $KWBI_U$ -Index (links) und des $KWBI_\phi$ -Index (rechts) für die Breitenkreise 72,5°N ... 20°N als Bestimmungsrahmen ($KWBI_U$) bzw. als nördlichem Bezugspunkt ($KWBI_\phi$). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum 1971–2000, gesamtes Jahr	113
Abbildung 31: Jahresmittelwerte von $KWBI_U$ (blaue Kurve) und $KWBI_\phi$ (rote Kurve) im Zeitraum 1971-2000. Datenquelle: NCAR-Reanalysen.....	113
Abbildung 32: Blockingindizes $KWBI_U$ (links) und $KWBI_\phi$ (rechts) für den atlantisch-europäischen Sektor (90°W ... 30°E) im Zeitraum 1971–2000. Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Ausgewählt wurden die Indizes für den Breitenkreisbereich von 65°N bis 50°N.....	114

Abbildung 33: Zonale Profile (0°W ... 180° ... 0°W) des KWBI _U -Index (links) und des KWBI _φ -Index (rechts) für den Breitenkreise 60°N als Bestimmungsrahmen (KWBI _U) bzw. als nördlichem Bezugspunkt (KWBI _φ). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum 1971–2000, gesamtes Jahr	114
Abbildung 34: Nord-Südprofile der Blockinghäufigkeit, ermittelt mit den Blockingindizes KWBI _U (blaue Kurven) und KWBI _φ (rote Kurven) für den Breitenkreisbereich 70°N ... 40°N. Links: Gesamter atlantisch-europäischer Sektor (90°W-30°E); mitte: europäischer maritimer Teil des Sektors (50°W-0°W); rechts: kontinentaler Teil des Sektors (0°W-30°E). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum: 1971–2000, gesamtes Jahr	115
Abbildung 35: Nord-Südprofile der Blockinghäufigkeit im Jahr und den Jahreszeiten, ermittelt mit den Blockingindizes KWBI _U (links) und KWBI _φ (rechts) für den Breitenkreisbereich 70°N ... 40°N. Auswahlregion: Europäischer maritimer Teil des atlantisch-europäischen Sektors (50°W-0°W). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum: 1971–2000.....	115
Abbildung 36: Wie Abbildung 35, jedoch für den kontinentalen Teil des Sektors (0°W-30°E).....	115
Abbildung 37: Entwicklung des Blockings im europäischen Teil (50°W-0°W, links) und im kontinentalen Teil (0°W-30°E, rechts) des atlantisch-europäischen Sektors in den Sommermonaten (JJA) der Jahre 1971-2010. Blau: Blockingindex KWBI _U . Rot: Blockingindex KWBI _φ . Zusätzlich ist im oberen Teil jeder Grafik die Gleichung für den linearen Trend angegeben. Datenquelle: NCAR-Reanalysen	116
Abbildung 38: Wie Abbildung 37, jedoch für den Winter (DJF).....	116
Abbildung 39: Blockingindizes KWBI _U (links) und KWBI _φ (rechts) für den atlantisch-europäischen Sektor (90°W ... 30°E) im Zeitraum 1971–2000. Datenquelle: 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM Lauf 1. Ausgewählt wurden die Indizes für den Breitenkreisbereich 65°N bis 50°N	117
Abbildung 40: Jahresmittelwerte von KWBI _U (blaue Kurve) und KWBI _φ (rote Kurve) im Zeitraum 1971–2000. Datenquelle: 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM Lauf 1	118
Abbildung 41: Nord-Süd-Profile der Differenz zwischen den klimatischen Verhältnissen (Reanalysen) und der Re-Simulation des 20. Jahrhunderts (20C-Daten von ECHAM5-MPI OM, Lauf 1) für verschiedene Jahreszeiten. Dargestellt sind die Verhältnisse im europäischen maritimen Teil (50°W-0°W) des atlantisch-europäischen Sektors. Links: KWBI _U rechts: KWBI _φ . Vergleichszeitraum: 1971-2000. Die Werte für die KWBI _φ -Differenzen in den Zonen bei 67,5°N und 65°N betragen jeweils rund 13.	119
Abbildung 42: Wie Abbildung 41, jedoch für den kontinentalen Teil des Sektors (0°W-30°E).....	119
Abbildung 43: Änderungssignale der Blockinghäufigkeit im atlantisch-europäischen Sektor (90°W-30°E) im Vergleich zu den 20C-Resultaten der Periode 1971–2000 zu den Zeithorizonten 2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100 in verschiedenen Breitenkreislagen (70°N bis 40°N), identifiziert mit dem Blockingindex KWBI _U (links) und dem Blockingindex KWBI _φ (rechts). Benutztes GCM: ECHAM5 MPI-OM Lauf 1, angetrieben mit Szenario A1B.	120
Abbildung 44: Wie Abbildung 43, jedoch für den kontinentalen Teil des atlantisch-europäischen Sektors (0°W-30°E).	120
Abbildung 45: Nord-Süd-Profil der Blocking-Änderung von 1971–2000 (20C-Daten von ECHAM5) zum Zeithorizont 2071–2100 (ECHAM5, Szenario A1B) in den Jahreszeiten. Die Kurven geben die Verhältnisse im europäischen maritimen Teil (50°W-0°W) des atlantisch-europäischen Sektors wieder. Links: KWBI _U ; rechts KWBI _φ	121
Abbildung 46: Wie Abbildung 45, jedoch für den kontinentalen Teil (0°W-30°E) des Sektors.....	121
Abbildung 47: Nord-Süd-Profil der Blockingänderung von 1971–2000 (20C-Daten von ECHAM5) zum Zeithorizont 2071–2100 (ECHAM5) bei Betrachtung der Szenarios A1B (blaue Balken), A2 (rote Balken) und B1 (gelbe Balken) für das gesamte Jahr. Wiedergegeben sind die Verhältnisse im europäischen maritimen Teil (50°W-0°W) des atlantisch-europäischen Sektors. Links: KWBI _U ; rechts KWBI _φ	122
Abbildung 48: Wie Abbildung 47, jedoch für den kontinentalen Teil (0°W-30°E) des Sektors.....	122
Abbildung 49: NAO-Indizes auf der Basis des Stationspaares Stykkishomur/Ponta Delgada (NAO-Station) und der Hauptkomponente einer RPCA-Analyse (NAO-PC), jeweils bezogen auf die <i>linke</i> y-Achse sowie Blocking-Indizes KWBI _U (Blocking-Ales) und KWBI _φ (Blocking-Krei), jeweils bezogen auf die <i>rechte</i> y-Achse – mit einem zum NAO entgegengesetzten Werteverlauf. Linke Teilfigur: europäischer Teil des atlantisch-europäischen Sektors (50°W-0°W). Rechte Teilfigur: kontinentaler Teil des Sektors (0°W-30°E). Dargestellt sind die mit der jeweiligen Standardabweichung normierten Zeitreihen der Jahre 1971–2012	123
Abbildung 50: EURO-Strings für die Maximumtemperatur der Sommermonate (JJA) in Sachsen. Datenbasis: NCAR-Reanalysen der Jahre 1971–2000. Die Wertetabelle unter der Karte zeigt die Charakteristika der 10 Klassen.	128
Abbildung 51: EURO-Strings für den Niederschlag im Winter.....	130
Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der regionalen, über 5 Tage gemittelten Maximumtemperaturwerte (Stationsauswahl: Tieflandstationen) in Sachsen bis 60 Tage nach einem Bezugstag der Jahreszeiten Frühjahr (links) und Sommer (rechts).	

Jede der farbigen Kurven steht für den in einen bestimmten EURO-String (Klasse) beginnenden zeitlichen Verlauf. Die Informationszeile unter der x-Achse gibt den vom Screening bestimmten Prediktor sowie die höchsten und niedrigsten Klassenmittelwerte und die Aufspreizung (Frühjahr: 15,4 °C und Sommer (6,6 °C) an. Die Wertetabellen geben die String-Charakteristika (TX, TN, TM, RR, RF) an.....	133
Abbildung 53: Wie Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der regionalen, über 5 Tage gemittelten Maximumtemperaturwerte (Stationsauswahl: Tieflandstationen) in Sachsen bis 60 Tage nach einem Bezugstag der Jahreszeiten Frühjahr (links) und Sommer (rechts). Jede der farbigen Kurven steht für den in einen bestimmten EURO-String (Klasse) beginnenden zeitlichen Verlauf. Die Informationszeile unter der x-Achse gibt den vom Screening bestimmten Prediktor sowie die höchsten und niedrigsten Klassenmittelwerte und die Aufspreizung (Frühjahr: 15,4 °C und Sommer (6,6 °C) an. Die Wertetabellen geben die String-Charakteristika (TX, TN, TM, RR, RF) an, jedoch für die Jahreszeiten Herbst (links) und Winter (rechts).....	134
Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der regionalen, über 5 Tage gemittelten Niederschlagswerte (Stationsauswahlkriterium: Hohe Niederschlagssummen) in Sachsen bis 60 Tage nach einem Bezugstag der Jahreszeiten Frühjahr (links) und Sommer (rechts). Jede der farbigen Kurven steht für den in einen bestimmten EURO-String (Klasse) beginnenden zeitlichen Verlauf. Die Informationszeile unter der x-Achse gibt den vom Screening bestimmten Prediktor sowie die höchsten und niedrigsten Klassenmittelwerte und die Aufspreizung (Frühjahr: 2,2 mm und Sommer 2,0 mm) an. Die Wertetabellen geben die String-Charakteristika (TX, TN, TM, RR, RF) an.	135
Abbildung 55: Wie Abbildung 54, jedoch für Herbst (links) und Winter (rechts)	135
Abbildung 56: Häufigkeit des Auftretens von Überschreitungen des NO ₂ -, PM ₁₀ - und O ₃ -Grenzwertes an mindestens einer Station in Sachsen zwischen 2000 und 2012 (schwarze durchgezogene Linie). Die dicke gestrichelte rote Linie stellt die Schätzung der Regressionsgeraden dar. Die obere und untere Schranke des Vertrauensbereiches für die Regressionsgerade findet sich in Form von fein gepunkteten roten Linien, fein gepunktete blaue Linien geben den Vertrauensbereich für die Überschreitungsanzahl wieder. Irrtumswahrscheinlichkeit der Vertrauensbereiche: 5 %	138
Abbildung 57: Übersicht der Überschreitungen der Schwellen für NO ₂ , PM ₁₀ und O ₃ im Zeitraum 2000 bis 2012 für das Sommer- und Winterhalb (SHJ, WHJ).....	139
Abbildung 58: Mittlere maximale Konzentrationen von NO ₂ , PM ₁₀ und O ₃ in den einzelnen Monaten des Jahres und für die verschiedenen Stationstypen. Bestimmungszeitraum: 2001-2010.....	142
Abbildung 59: Typische Strömungskonfigurationen im 500 hPa-Geopotenzial (jeweils oben) und in der Bodenwetterkarte (jeweils unten) für die Hess-Brezowsky Großwetterlagen WA (Westlage antizyklonal, links) und BM (Hochdruckbrücke Mitteleuropa), aus (GERSTENGARBE & WERNER, 2005).....	144
Abbildung 60: Anteile der aGWT (in %) bei den Tagen mit NO ₂ -Schwellwertüberschreitungen von 100 (links) bzw. 200 µg/m ³ (rechts). Untersuchungszeitraum: Jahre 2000–2010.	147
Abbildung 61: Wie Abbildung 60 jedoch für O ₃ (links) und PM ₁₀ (rechts). Untersuchungszeitraum: Jahre 2000–2010 (O ₃) bzw. 2004–2010 (PM ₁₀).....	148
Abbildung 62: Windrosen für die Tage der HBGWT 1 bis 11. Zeitraum 2004–2010. Termin: 14:30 UTC. Station: Leipzig-Schkeuditz. Quelle: DWD.....	153
Abbildung 63: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit [in Bft] für die HBGWT 1 bis 11 an der Station Leipzig-Schkeuditz. Untersuchungszeitraum: 2004–2010	154
Abbildung 64: HBGWT-spezifische Abhängigkeit der PM ₁₀ -Konzentration (Mittel über die ausgewählten 9 Stationen in Sachsen) von der Windgeschwindigkeit (Farbcodierung: 0 ... 8 Bft). Verwendet wurden Klimamessungen zum 1430-UTC-Termin an der Klimastation Leipzig-Schkeuditz. Untersuchungszeitraum: 2004–2010	155
Abbildung 65: EURO-Strings-Analyse der Mittelwerte der PM ₁₀ -Immissionen (von 9 ausgewählten Stationen in Sachsen, vgl. S. 150) in den Monaten Oktober-April der Jahre 2004–2010 unter Verwendung von Gradienten im 1.000 hPa-Geopotenzialfeld (tiefpassgefiltert durch eine Mittelung über ±2 Tage). Die Wertetabelle unter der Karte gibt, EURO-String-spezifisch, die mittleren PM ₁₀ -Immissionen sowie die Perzentile P90 und P95 der Immissionen an.	156

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Analysierte meteorologische Variable.....	23
Tabelle 2: Korrelation von KLIWETT-Extremindikatoren mit Großwetterlagen der Typen aGWL und HBGWL	37
Tabelle 3: Beispiel für eine Vierfeldertafel. Nutzung der aGWL-Klasse 1 als Proxy für Sommertage (TX>25°C). Station: Dresden-Klotzsche, Sommermonate (Juni-Juli-August) der Jahre 1981-2010.....	38
Tabelle 4: Verifikationsmaße für einige Extremindikatoren bei Nutzung der aGWL-Klassifikation als Proxy. Station: Dresden-Klotzsche. Zeitraum 1981-2010. Angegeben sind die in den 29 aGWL angetroffenen höchsten (+) bzw. niedrigsten (-) Werte.....	40
Tabelle 5: Liste der Zielgrößen-spezifisch genutzten Stationsgruppen. Zur Nomenklatur der Zielgrößen und der Jahreszeiten finden sich Hinweise auf S. 50	49
Tabelle 6: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Analysiert wurde die Maximumtemperatur an den Teilmengen der Stationen mit hohen (HiMax) und niedrigen (LoMax) Temperaturwerten im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen auf Seite 50 erläutert ist.	50
Tabelle 7: KlaMuKo-Resultate für die Maximumtemperatur. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen.	51
Tabelle 8: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Minimumtemperatur an den Teilmengen der Stationen mit hohen (HiMin) und niedrigen (LoMin) Temperaturwerten im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.	54
Tabelle 9: KlaMuKo-Resultate für die Minimumtemperatur. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen.	55
Tabelle 10: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Niederschlag an der Teilmenge der Klima- und Niederschlagsstationen mit hohen Niederschlagswerten (HiNied) im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.	56
Tabelle 11: KlaMuKo-Resultate für den Niederschlag der Klima- und Niederschlagsstationen. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen	56
Tabelle 12: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Niederschlag an den Teilmengen der Klimastationen mit hohen Niederschlägen (HiNied) im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.	57
Tabelle 13: KlaMuKo-Resultate für den Niederschlag der Klimastationen. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen	57
Tabelle 14: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Dampfdruck an den Teilmengen der Stationen mit hohem (HiDD) und niedrigem (LoDD) Dampfdruck im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.	58
Tabelle 15: KlaMuKo-Resultate für den Dampfdruck. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen	59
Tabelle 16: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Windgeschwindigkeit für die 12 Klimastationen im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.	60
Tabelle 17: KlaMuKo-Resultate für die Windgeschwindigkeit. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen	60
Tabelle 18: Korrelationen (Korr) und RV-Maße (RV _{klim} und RV _{pers}) für die Reproduktion der Maximumtemperatur (1971-2010) mit den KlaMuKo-Klassen für Stationen mit hohen und niedrigen Maximumtemperaturwerten in den Jahreszeiten, den Halbjahren und im Jahr. S0: Stufe 0; 0C: Stufe 0 mit Clusterung; 0R: Stufe 0 mit Regression; S1: Stufe 1; 1C: Stufe 1 mit Clusterung; 1R: Stufe 1 mit Regression. Erläuterungen zum Verfahren und der Nomenklatur auf S. 61.	64
Tabelle 19: Wie Tabelle 18, aber für die Reproduktion der Minimumtemperatur.....	65

Tabelle 20: Korrelationen (Korr) und RV-Maße (RV_{Klim} und RV_{pers}) für die Reproduktion des Niederschlags (1971-2010) mit den KlaMuKo-Klassen für Klima- und Niederschlagsstationen mit hohen Niederschlagswerten in den Jahreszeiten, den Halbjahren und im Jahr. S0: Stufe 0; 0C: Stufe 0 mit Clusterung; 0R: Stufe 0 mit Regression; S1: Stufe 1; 1C: Stufe 1 mit Clusterung; 1R: Stufe 1 mit Regression. Erläuterungen zum Verfahren und der Nomenklatur auf Seite 61	67
Tabelle 21: Wie Tabelle 20, aber für den Niederschlag, gemessen an den Klimastationen Sachsens	67
Tabelle 22: Wie Tabelle 18, aber für die Reproduktion des Dampfdrucks.....	68
Tabelle 23: Wie Tabelle 18, aber für die Reproduktion des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit	69
Tabelle 24: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für die Tagesmaximumtemperatur im Sommer (JJA) an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010.....	70
Tabelle 25: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für die Tagesmaximumtemperatur im Winter (DJF) an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010.....	70
Tabelle 26: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für die Niederschlagsmenge im Sommer (JJA) an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010	71
Tabelle 27: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für die Niederschlagsmenge im Winter an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010	71
Tabelle 28: Liste der in KLIWETT II verwendeten Indikatoren für Extremwerte	73
Tabelle 29: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Extreme Trockenperioden für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr	74
Tabelle 30: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Extreme Trockenperioden für das Mittel der Klimastationen (Jahr)	75
Tabelle 31: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für den Extremindikator „Trockenperioden“ an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010	75
Tabelle 32: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Hochwasser (3 Tage Niederschlag) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Niederschlägen (HiNied). Bestimmungszeitraum: Jahr	77
Tabelle 33: Wie Tabelle 32, aber für das Sommerhalbjahr	77
Tabelle 34: Wie Tabelle 32, aber für das Winterhalbjahr.....	77
Tabelle 35: Tabellarische Darstellung der Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Niederschlagsmenge an drei aufeinanderfolgenden Tagen für das Mittel der Klimastationen (Jahr)	79
Tabelle 36: Wie Tabelle 35, jedoch für das Sommerhalbjahr	79
Tabelle 37: Wie Tabelle 35, jedoch für das Winterhalbjahr	80
Tabelle 38: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Perioden mit hohem Niederschlag ($RR > 5 \text{ mm}$; Mindestdauer 3 Tage) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr.....	82
Tabelle 39: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Perioden mit hohem Niederschlag für das Mittel der Klimastationen (Jahr)	82
Tabelle 40: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Heiße Tage ($TX > 30^\circ\text{C}$) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Maximumtemperaturen (HiMax). Jahreszeit: Sommerhalbjahr.....	84
Tabelle 41: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Wahrscheinlichkeit (zwischen 0 und 100), dass an den analysierten Stationen ein Heißer Tage auftritt (Sommerhalbjahr).....	84
Tabelle 42: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Hitzewellen ($TX > 30^\circ\text{C}$; Mindestdauer 5 Tage) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Sommerhalbjahr	86
Tabelle 43: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Hitzewellen für das Mittel der Klimastationen (Sommerhalbjahr).....	86
Tabelle 44: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Eistage ($TX < 0^\circ\text{C}$) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Maximumtemperaturen (HiMax). Jahreszeit: Winterhalbjahr	88
Tabelle 45: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums ein Eistag identifiziert wurde (Winterhalbjahr)	89

Tabelle 46: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für den Extremindikator „Eistage“ an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971–2010.	89
Tabelle 47: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Spätfröste (TN < -4 °C) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Minimumtemperaturen (HiMin). Jahreszeit: Vegetationsperiode I (AMJ)....	91
Tabelle 48: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums ein Spätfrost identifiziert wurde (Vegetationsperiode I, d. h. April, Mai, Juni)	91
Tabelle 49: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Starkwinde (FF > 8 m/s) wenn 30% der 12 Klimastationen das Kriterium erfüllen. Jahreszeit: Sommerhalbjahr	93
Tabelle 50: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Starkwinde (FF > 8 m/s) wenn 30% der 12 Klimastationen das Kriterium erfüllen. Jahreszeit: Winterhalbjahr	93
Tabelle 51: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Wahrscheinlichkeit, dass an einem Tag des Untersuchungszeitraums an 30 % der Stationen ein Mittelwind über 8 m/s auftrat (Sommerhalbjahr)	93
Tabelle 52: Wie Tabelle 51 jedoch für das Winterhalbjahr	94
Tabelle 53: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Schwüle (DD > 18 hPa) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Dampfdrücken (HiDD). Jahreszeit: Sommerhalbjahr	95
Tabelle 54: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums Schwüle auftrat (Sommerhalbjahr)	96
Tabelle 55: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für den Extremindikator „Schwüle“ an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971–2010	96
Tabelle 56: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Tropennächte (TN > 20°C) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Minimumtemperaturen (HiMin). Jahreszeit: Sommerhalbjahr.....	98
Tabelle 57: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums eine Tropennacht auftrat (Sommerhalbjahr)	98
Tabelle 58: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Anteil der niederschlagsarmen warmen Tage (RR < P25; TM > P75) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr	100
Tabelle 59: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums die Kriterien für trocken-warme Bedingungen zutraten (Jahr).....	100
Tabelle 60: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Anteil der feucht-kalten Tage (RR > P75; TM < P25) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr.....	101
Tabelle 61: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums die Kriterien für feucht-kalte Bedingungen zutraten (Jahr).....	102
Tabelle 62: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Anteil der Überschreitungen des Feinstaubgrenzwertes (PM ₁₀ > 50 µm/m ³) der 36 Luftgütemess-stationen. Jahreszeit: WHJ	103
Tabelle 63: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums eine PM ₁₀ -Grenzwertüberschreitung auftrat (Winterhalbjahr)	104
Tabelle 64: Übersichtsdarstellung der Überschreitungen (Anzahl, prozentualer Anteil und durchschnittliche Anzahl pro Jahr bezogen auf die jeweilige Jahreszeit) der Extremindikatoren im Zeitraum 1971–2000 und die dazugehörigen KlaMuKo-Resultate. Bei Indikatoren, die <i>Perioden</i> analysieren (Nr. 1, 3 und 4) bezieht sich die Anzahl auf die Tage, die sich in einer solchen Periode befinden. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen. RS: Reststreuung	106
Tabelle 65: Korrelationsmatrix für die Zeitreihen des NAO-Index (Varianten auf Stationsbasis und auf Basis der Hauptkomponentenanalyse) und der Blockingindizes KWBI _U und KWBI _Φ für die Ausschnitte 50°W-0°W, 0°W-30°E und 50°W-30°E des atlantisch-europäischen Sektors.....	124
Tabelle 66: Übersicht der Prediktoren, die für die Beschreibung der in Sachsen bestimmten meteorologischen Elemente in den einzelnen Jahreszeiten die größte Relevanz besitzen. Die Spalte „Position/Magnitude“ gibt an, in welchem Verhältnis die Lage und die Stärke zur Beschreibung beitragen und die Spalte „Max-Min“ enthält die Differenz zwischen den jeweils höchsten und den niedrigsten Klassenmitteln der meteorologischen Elemente.....	131
Tabelle 67: Anzahl der Grenzwertüberschreitungen für NO ₂ , PM ₁₀ und O ₃ für den Zeitraum 2000 bis 2010.....	137
Tabelle 68: Stationsliste der 36 Luftgütemessstationen Sachsens und ihre Klassifizierung nach Umgebung der Station, Emissionsquelle (Verkehr und Hintergrund) und Emissionsquellentyp (verkehrsnahe, städtisch und ländlich)	140

Tabelle 69: Häufigkeiten von Großwettertypen in den Jahren 2004–2010 als Aggregation von Hess/Brezwosky-GWL bzw. aGWL. Die obere Teiltabelle gibt die absoluten Zählungen und die untere Teiltabelle die prozentuale Verteilung, jeweils bezogen auf die Spaltensumme, wieder. Rot eingefärbte Zellen weisen Wiedererkennungsraten von 50 % und weniger aus. Gelb eingefärbte Zellen zeigen „Nebenmaxima“ von mehr als 10 % in einzelnen Klassen.	145
Tabelle 70: Häufigkeit der aGWT und der Überschreitungen von Schwellwerten bei NO ₂ , O ₃ und PM ₁₀ an sächsischen Luftgütemessstellen, ausgedrückt in absoluten Zahlen, prozentuaem Anteil für den jeweiligen aGWT und prozentuaem Anteil aller Tage. Untersuchungszeitraum: Jahre 2000–2010 (bei PM ₁₀ 2004–2010). Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.	146
Tabelle 71: Klassenmittelwerte der PM10-Immissionen (in µg/m ³) an 9 ausgewählten Messstationen Sachsens für die Monate Jan–Apr und Okt–Dez in den Jahren 2005–2010 für die Großwettertypen nach Hess/Brezowsky (HBGWT) und deren mit einer objektivierten Methode bestimmten Fassung (aGWT). Das Subscript oBI steht für die Mittelwertbestimmung an allen analysierten Tagen, d. h. ohne Eliminierung von Tagen, die laut LfULG durch Baustellenaktivitäten in der Stationsumgebung charakterisiert waren. Das Subscript mBI steht für die Mittelwertberechnung unter stationsspezifischer Ausblendung von Baustellentagen.	149
Tabelle 72: Klassenspezifische PM ₁₀ -Immissionen für die Großwettertypen HBGWT und aGWT, ermittelt an 9 ausgewählten Stationen in Sachsen in den Monaten Oktober bis April der Jahre 2004–2010 nach verschiedenen Rangfolge-abhängigen Eintreffenskriterien (s. Text). Die höchsten in jeder Spalte auftretenden Werte sind orange markiert, die zweithöchsten gelb und die dritthöchsten hellgrau.	151
Tabelle 73: Wie Tabelle 72, jedoch für verschiedene Perzentil- bzw. Mittelwert-abhängige Eintreffens-kriterien (s. Text). Die Farbgebung der Zellen erfolgte analog zu Tabelle 72.	152
Tabelle 74: Korrelationen zwischen den GWT-Nummern und den Windrichtungen bzw. Windgeschwindigkeiten zu den Klimaterminen 0730, 1430 und 2130 UTC. Station: Leipzig-Schkeuditz (10469). Untersuchungszeitraum: 2004-2010.	153
Tabelle 75: aGWT-Klassifikation als Prediktor für NO ₂ -, PM ₁₀ - und O ₃ -Überschreitung. False Rate Ratio (FAR) und Hit Rate (H) für den Zeitraum 2000–2010.	158
Tabelle 76: Wie Tabelle 70, aber mit der KlaMuKo TX-Klassifikation für die Stationsselektion HiMax. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.	160
Tabelle 77: Wie Tabelle 70, aber mit der KlaMuKo TN-Klassifikation für die Stationsselektion HiMin. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.	160
Tabelle 78: Wie Tabelle 70, aber mit der KlaMuKo RR-Klassifikation für die Stationsselektion HiNied (Klima- und Niederschlagsstationen). Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.	160
Tabelle 79: Wie Tabelle 70, aber mit der KlaMuKo DD-Klassifikation für die Stationsselektion HiDD. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.	161
Tabelle 80: Wie Tabelle 70, aber mit der KlaMuKo FF-Klassifikation für die Stationsselektion HiWind. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.	161
Tabelle 81: Zusammenhang (4 Spalten rechts) und zukünftige Entwicklung der Großwettertypen der GWL-Klassifikation und der KlaMuKo-Klassifikation der Maximumtemperatur (Stationsselektion HiMax), Minimumtemperatur (Stationsselektion HiMin), des Niederschlages (Stationsselektion HiNied), Dampfdruckes (Stationsselektion HiDD) und der Windgeschwindigkeit (Stationsselektion HiWind) in Bezug auf die Grenzwertüberschreitungen von NO ₂ , PM ₁₀ und O ₃ . Gemeinsames Auftreten von deutlichen Zukunftsveränderungen und gut ausgeprägter Assoziation einer Klasse mit einem Luftschadstoff-Überschreitungskriterium sind orange unterlegt.	163
Tabelle 82: Liste der 60 Potenziellen Prediktoren, die dem Screening in KlaMuKo zur Auswahl der Prediktoren zur Verfügung stehen.	175

Abkürzungsverzeichnis

20C	Resimulation des 20. Jahrhunderts
AMJ	April, Mai, Juni
AP	Arbeitspaket
AR4	Fourth Assessment Report (Vierter Sachstandsbericht) des IPCC, erschienen 2007
AR5	Fifth Assessment Report (Fünfter Sachstandsbericht) des IPCC, Erscheinungsdatum des Berichts der WG 1: 27. September 2013
BLOCKWETT	Studie aus dem Jahre 2007 im Auftrag des LfUG zur Untersuchung der Relevanz von Blockingsituation für Sachsen
BM	Hochdruckbrücke Mitteleuropa (GWL)
CCLM	Vom COSMO (s. u.) betriebene Version des CLM
CLM	Klima-Version des DWD-Modells Lokalmodells (LM)
COSMO	Consortium for Small-Scale Modelling
COST	European Cooperation in Science and Technology
DD	Dampfdruck [hPa]
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECHAM5-MPI-OM	Kopplung aus globalem atmosphärischem Zirkulationsmodell (ECHAM5) mit dem Ozeanmodell (MPI-OM) des Hamburger Max-Planck-Instituts (MPI) für Meteorologie
EK	Einfachkorrelation
EOF	Empirische Orthogonalfunktion
ESD	Empirical Statistical Downscaling
FAR	False Rate Ratio, Indikator für Maß der Fehlvorhersagen
feukalt	feucht (niederschlagsreiche) kalte Tage
FF	Windgeschwindigkeit [m/s]
GCM	Global Climate Model
GWL	Großwetterlage
aGWL	automatisiert-algorithmische Großwetterlagen
HBGWL	Großwetterlagen nach Hess-Brezowsky
GWT	Großwettertyp
H	Hit Rate, Trefferquote
HB	Hoch Britische Inseln (GWL)
HFA	Hoch Fennoskandien, antizyklonal (GWL)
HFZ	Hoch Fennoskandien, zyklonal (GWL)
HiDD	Stationsgruppe mit hohen Dampfdrücken
HiMax	Stationsgruppe mit hohen Temperaturmaxima
HiMin	Stationsgruppe mit hohen Temperaturminima
HiNied	Stationsgruppe mit hohen Niederschlägen
HiWind	Stationsgruppe, mit hohen Windgeschwindigkeiten
HM	Hoch Mitteleuropa (GWL)
HNA	Hoch Nordmeer-Island, antizyklonal (GWL)
HNFA	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal (GWL)
HNFZ	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, zyklonal (GWL)
HNZ	Hoch Nordmeer-Island, zyklonal (GWL)
HSS	Heidke Skill Score (Maß für die Güte einer Vorhersage)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

JJA	Juni, Juli, August
KlaMuKo	Klassifikation mit multipler Korrelation
Korr	Korrelation
KWBI	KLIWETT-Blockingindex (s. Abschnitt 8.2) in den Varianten $KWBI_U$ (nach Alessandro) und $KWBI_\phi$ (Weiterentwicklung des Blockingindex MTBI nach Kreienkamp)
LoDD	Stationsgruppe mit niedrigen Dampfdrücken
LoMax	Stationsgruppe mit niedrigen Temperaturmaxima
LoMin	Stationsgruppe mit niedrigen Temperaturminima
LoNied	Stationsgruppe mit niedrigen Niederschlägen
LoWind	Stationsgruppe, mit niedrigen Windgeschwindigkeiten
MK	Multiple Korrelation
MPI-ESM	Erdsystemmodell des Max-Planck-Instituts Hamburg
MTBI	Molteni-Tibaldi-Blockingindex (s. Abschnitt 8.2)
N	Anzahl
NA	Nordlage, antizyklonal (GWL)
NAO	North Atlantic Oscillation
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NEA	Nordostlage, antizyklonal (GWL)
NEZ	Nordostlage, zyklonal (GWL)
Ni3	Niederschlagsmengen an drei aufeinanderfolgenden Tagen, Proxy für Hochwasser
NO ₂	Stickstoffdioxid
NWA	Nordwestlage, antizyklonal (GWL)
NWZ	Nordwestlage, zyklonal (GWL)
NZ	Nordlage, zyklonal (GWL)
O ₃	Ozon
P1...P4	Prediktoren 1, 2, 3, 4 (Regressionsgröße)
P25	25-Perzentil
P75	75-Perzentil
PM ₁₀	Feinstaub kleiner 10 Mikrometer
Pred.-Nr.	Prediktor-Nummer
prob	Wahrscheinlichkeit (probability); an viel vielen Stationen ist das gewählte Kriterium erfüllt [%]
prob_30pro	30% der Stationen erfüllen das gewählte Kriterium
prob_70pro	70% der Stationen erfüllen das gewählte Kriterium
PRUDENCE	Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathways
REMO	Regional Model
RMSE	Root Mean Square Error
RR	Niederschlagsmenge [mm]
RRx	Perioden mit hohem Niederschlag
RS	Reststreuung
RV	Reduktion der Varianz
SA	Südlage, antizyklonal (GWL)
SEA	Südostlage, antizyklonal (GWL)

SEZ	Südostlage, zyklonal (GWL)
SHJ	Sommerhalbjahr
SUMQ	Summe der Quadratzahlen
SRES	Special Report on Emission Scenarios des IPCC
SREX	IPCC-Sachstandsbericht zu Extremen
STAR2	STATistisches Regionalisierungsmodell, regionalisierung des Globalmodells ECHAM5 - MPI-OM für Deutschland
STARS	Statistical Analogue and Resampling Scheme
STARDEX	Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions, Vergleich von verschiedenen „downscaling“-Methoden basierend auf IPCC-Emissionsszenarien A2 und B2, unter Leitung des UBA
Stat.	Station
SWA	Südwestlage, antizyklonal (GWL)
SWZ	Südwestlage, zyklonal (GWL)
SZ	Südlage, antizyklonal (GWL)
TB	Tief Britische Inseln (GWL)
TN	Minimumtemperatur [°C]
TM	Tief Mitteleuropa (GWL)
TM	Mitteltemperatur [°C]
TrK	Extreme Trockenperioden
TRM	Trog Mitteleuropa (GWL)
trowarm	Trocken (niederschlagsarme) warme Tage
TRW	Trog Westeuropa (GWL)
TS	Threat Score (Maß für Vorhersagegüte)
TX	Maximumtemperatur [°C]
UBA	Umweltbundesamt
WA	Westlage, Zyklonal (GWL)
WEREX	Wetterlagen-basierte Regionalisierung für Extreme – auf Sachsen fokussierte Version von WETTREG
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierung
WHJ	Winterhalbjahr
WR10	WETTREG in der Version von 2010
WR13	WETTREG in der Version von 2013
WS	Südliche Westlage (GWL)
WW	Winkelförmige Wetterlage
WZ	Westlage, antizyklonal (GWL)

1 Einleitung

1.1 Klimawandel, Extreme und Zirkulationsmuster

Die Beschreibung des sich abzeichnenden Klimawandels erfordert eine Betrachtung von Veränderungen des mittleren Zustands und darüber hinaus eine Betrachtung der extremen Wetter- und Klimaereignisse. Letztere sind bereits in der Gegenwart mit signifikanten Folgen gekoppelt, die zu den wichtigsten Herausforderungen für die Gesellschaft zählen.

Bezüglich der Infrastruktur-Systeme war es in der Vergangenheit üblich, ein zwar in sich variables, d. h. mit einer gewissen Schwankungsbreite auftretendes, Klima vorauszusetzen, das jedoch als zeitlich stationär, d. h. um einen sich nicht ändernden mittleren Zustand herum schwankend, angenommen wurde. Sowohl eine nachhaltige Entwicklung als auch ein wirksames Risikomanagement erfordern eingehende Studien bezüglich der Häufigkeit und Stärke zukünftiger Extremereignisse sowie der Folgen einer solchen Klimaveränderung. Dies ist zudem im Kontext der regional spezifischen Expositionen und Vulnerabilitäten zu sehen. Globale Untersuchungen dazu erfolgten dazu beispielsweise mit einer umfassenden Studie von Vulnerabilitäten auf der kontinentalen und regionalen Skala (WILSON, ZINYOWERA & MOSS 1998) im Rahmen der Arbeitsgruppe II des IPCC (mehr zum IPCC im nächsten Teilabschnitt). In Form einer UBA-Studie (ZEBISCH et al. 2005) wurden Vulnerabilitäten für Deutschland identifiziert und vorgestellt. In den letzten Jahren entwickelte sich die Diskussion weiter in Richtung Nutz- und Belastbarkeit von Vulnerabilitätsaussagen basierend auf Ergebnissen von Klimamodell-Projektionen (MALONE & ENGLE 2011).

Klimawandel – wissenschaftliche Basis

Eine umfassende Darstellung der wissenschaftliche Basis unseres Wissens um das sich wandelnde Klima findet sich in den Berichten der Arbeitsgruppe I des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)¹. Periodisch wird in ihnen der Erkenntnisfortschritt reflektiert und aktualisiert. Die aktuelle Ausgabe ist der Vierte Sachstandsbericht, Englisch Fourth Assessment Report, AR4, (IPCC, 2007a). Der Fünfte Sachstandsbericht, AR5 mit einer Aktualisierung steht für 2013/2014 an. Erkenntnisse aus dem AR5-Berichtsteil von WG 1² konnten in KLIWETT noch nicht berücksichtigt werden.

Auch wenn die Arbeit des IPCC verbreitet mit der Arbeit der Arbeitsgruppe I (s. o.) gleichgesetzt wird: Es gibt zwei weitere, ebenso wichtige Arbeitsgruppen, die mit jeweils einem Band zum Sachstandsbericht beitragen. Arbeitsgruppe II befasst sich mit Impakten (d. h. Wirkungen), Anpassungen und Vulnerabilitäten bezüglich des Klimawandels (IPCC 2007b). Der Fokus von IPCC-Arbeitsgruppe III liegt bei Mitigationsmaßnahmen, also Konzepten und Aktivitäten, mit denen der sich abzeichnende Klimawandel gemildert oder reduziert werden kann (IPCC 2007c). Neben den in etwa vier- bis sechsjährigen Zyklen erscheinenden Sachstandsberichten geben die IPCC-Arbeitsgruppen auch weitere, themenbezogene Berichte, so genannte Special Reports, heraus.

¹ <http://www.ipcc.ch>; dort sind auch die Sonderberichte (Special Reports) der einzelnen IPCC-Arbeitsgruppen abrufbar.

² Die Berichte der Working Groups (WG) erschienen nacheinander, als erstes derjenige von WG1 (Erscheinungsdatum 27.09.2013); die anderen Erscheinungsdaten waren zur Berichtslegung des KLIWETT-Abschlussberichts noch nicht festgelegt.

Szenarios und Projektionen – zentrale Informationsquellen für Untersuchungen des Klimawandels

Der Charakter eines zukünftigen, gewandelten Klimas lässt sich aus Projektionen ablesen. Diese wiederum basieren auf Szenarios plausibler globaler Entwicklungen. Die Verbindung zwischen Szenario und Projektion sind Globale Klimamodelle (Global Climate Models [GCMs]). Sie simulieren das Klimasystem mit einer Vielzahl von Zustandsgrößen, Prozessen und Wechselwirkungen. Szenarios dienen als Antrieb und das GCM errechnet die Reaktion des Klimasystems auf diesen variablen Antrieb. Wichtig ist dabei, die im Szenario angenommenen globalen Entwicklungen von Bevölkerung, technisch-wissenschaftlichem Fortschritt, Wirtschaft oder Größen wie Umweltethik und Gerechtigkeit für die GCMs adäquat aufzubereiten. In einem Transformationsschritt erfolgt die Umrechnung der o. g. Komponenten in die Dimension der Treibhausgase³. Die Klimaprojektionen seit etwa 2000, also auch die im AR4 und für WEREX benutzten, basieren dabei auf den so genannten SRES-Szenarios (NAKICENOVIC et al. 2000). Im Mittelpunkt steht dort die Abschätzung des **Ausstoßes** von Treibhausgasen, der als Antrieb für die GCMs dient. Zahlreiche globale und regionale Klimaprojektionen, auch für den Freistaat Sachsen (KREIENKAMP, SPEKAT & ENKE 2011a), wurden auf der Basis der SRES-Szenarios A1B, A2 und B1 erstellt⁴.

Eine der besonders wichtigen Aussagen des aktuellen IPCC-Sachstandsberichts ist, dass zunehmendes Vertrauen in die Aussagen besteht, denen zufolge einige Extreme im Verlauf des 21. Jahrhunderts häufiger, verbreiteter und/oder intensiver werden (IPCC 2007a).

Die Projektionen der globalen Modelle sind als Leitgrößen für die sich abzeichnenden Entwicklungen auf der globalen Skala unverzichtbar. Wenn es jedoch um den Klimawandel auf regionaler und lokaler Skala geht, ist es notwendig, weitere Verfahren aufzusetzen, um diese Regionalisierung zu erreichen. Dazu gehören dynamische Verfahren wie REMO (JACOB & PODZUN 1997) oder CCLM (ROCKEL, WILL & HENSE 2008) sowie statistische Verfahren wie WETTREG (KREIENKAMP, SPEKAT & ENKE 2010) oder STAR2 (ORLOWSKY, GERSTENGARBE & WERNER 2008).

Klimawandel, Klimafolgen und Extreme

Vielfach wird in Analysen und Darstellungen des Klimawandels die Veränderung des *mittleren Klimazustands* hervorgehoben. Änderungen dieses Zustands sind als Ausgangsbasis für Studien von Klimafolgen sehr wichtig, aber sie vermitteln nur einen Teil des Bildes. Zukünftige Veränderungen sowohl bezüglich der Häufigkeit als auch bezüglich der Stärke von *Extremen meteorologischer Parameter* besitzen gegenüber denjenigen des mittleren Klimazustands ein bedeutend höheres Schadenspotenzial für Ökosysteme, Infrastruktur etc. (BENISTON & STEPHENSON 2004).

Extreme besitzen ein anderes Verhalten als Mittelwerte und sind daher im Zuge einer „Mathematik der seltenen Ereignisse“ mit anderen Werkzeugen bezüglich ihrer Verteilung und Repräsentativität zu behandeln (COLES 2001). Aussagen zum Extremverhalten meteorologischer Parameter mit Hilfe von Klimamodellen stel-

³ Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass jedwede Umrechnung von globalen Entwicklungen in Treibhausgas-Dimensionen selbst auf einer Reihe von Modellen beruht und daher mit einer Kaskade von Unsicherheiten einhergeht.

⁴ Seit etwa 2008 erfolgte eine Novellierung der Szenario-Philosophie, erstmals ausführlich dargestellt in (MOSS et al. 2008). Die dort präsentierten so genannten Representative Concentration Pathway (RCP)-Szenarios schätzen die zeitliche Entwicklung der **Konzentration** von Treibhausgasen ab, eine Größe, die zum Ersten in der Gegenwart besser zu ermitteln ist als der Treibhausgas-Ausstoß und zum Zweiten über den so genannten Strahlungsantrieb auch passgenauer als Eingangsgröße für GCM dient (LIEPERT 2010; MOSS et al. 2008). RCP-Szenarios sind inzwischen als *State-of-the-Art* sehr gut eingeführt und auch die Grundlage für den 2013/14 erscheinenden AR5 des IPCC. Für das KLIWETT-Vorhaben werden Klimaprojektionen auf der Basis von SRES-Szenarios eingesetzt, wie auch in den bisherigen Phasen von WEREX.

len eine besondere Herausforderung dar (SILLMAN & ROECKNER 2008). Eine oft angewandte Strategie ist, Indikatoren herzuleiten, die bestimmte Aspekte des Extremverhaltens oder die Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremen veranschaulichen (JONAS, STAENGER & SCHÖNWIESE 2005). Mit ihnen können relativ gut vergleich-, vermittel- und interpretierbare Aussagen zum Extremverhalten in einem sich wandelnden Klima getroffen werden (KLEIN TANK, ZWIERS & ZHANG 2009). Diese Strategie wurde auch im Vorhaben KLIWETT eingesetzt. Aus Literaturstudium, Nutzerbefragung und eigenen Entwicklungen wurde ein umfassender Katalog von Extremindikatoren mit Relevanz z. B. für die Untersuchung von Klimafolgen in Sachsen abgeleitet.

Im Rahmen des EU-Projektes STARDEX wurde ein sehr wichtiger weiterer Aspekt von Extremen untersucht, die Regionalisierung von Aussagen zu Klimaextremen (STARDEX 2009). Der IPCC-Sachstandsbericht SREX zu Extremen (FIELD et al. 2012) bietet zusätzlich Information zu regionalen Klimaentwicklungen mit hoher Relevanz für Klimafolgen und einen Thesaurus für relevante Fachbegriffe.

Zirkulationsmuster, Klimawandel und Extreme

Atmosphärische Zustände und Prozesse sind mit Zirkulationsmustern gekoppelt. Diese stellen in Raum und Zeit semi-stabile Strukturen dar, d. h. diese besitzen eine gewisse Dauerhaftigkeit/Ortsfestigkeit. Ein verbreitet verwendetes Konzept zur Veranschaulichung atmosphärischer Zirkulationsmuster ist das der Wetterlagen. Mit dem Wort *Wetterlage* wird die großskalige atmosphärische Situation einer Region beschrieben. Entweder erfolgt dies auf morphologische Weise, d. h. durch Analyse der *Anordnung* von Steuerungszentren (Hoch- oder Tiefdruckgebiete) oder alternativ durch die Analyse großräumiger physikalischer Eigenschaften von Luftmassen. Die meteorologische Forschung und Entwicklung begründet sich auf den Kalender der Großwetterlagen Europas (BAUR, HESS & NAGEL 1943). Phänomenologisch und durch synoptisches Beobachten gelang es BAUR und seinen Mitarbeitern, eine Systematik der Vielfalt von Zirkulationsmustern zu erstellen. Mit Bezug zu Mitteleuropa wurde das Konzept durch HESS & BREZOWSKY seit den 1950er-Jahren weitergeführt (HESS & BREZOWSKY 1952).

Zirkulationsmuster sind ein gutes Mittel zur statistischen Schichtung, d. h. der Zusammenfassung ähnlicher Sachverhalte oder Zustände, die in der Formenvielfalt der atmosphärischen Zirkulation wiederkehren und untereinander eine möglichst hohe Homogenität besitzen. Ein Verfahren, das eine solche Schichtung erzeugt und zur Analyse des regionalen Klimas verwendet wird, heißt auch „Zirkulation zur Umwelt“ oder *Circulation to Environment* (YARNAL 1993). Im Rahmen einer COST Aktion (COST733 Harmonisation and Applications of Weather Types Classifications for European Regions) wurde u. a. eine Bestandsaufnahme der zahlreichen in Europa verwendeten Methoden zur Klassifikation von Zirkulationsmustern durchgeführt (PHILIPP et al. 2010). Ein Ergebnis war, dass sich so gut wie alle praktizierten Methoden der *Circulation to Environment*-Strategie bedienen. Einige, wie die Großwetterlagen, sind empirisch-subjektiv, andere durch mathematische Algorithmen wie Clusteranalyse, EOF oder andere multivariate Verfahren objektivierbar (HUTH et al. 2008).

Wie oben erwähnt, gibt es einen alternativen Ansatz in Form des Prinzips „Umwelt zur Zirkulation“ (*Environment to Circulation*), bei dem eine lokale Wettergröße in Klassen zusammengefasst und die mit ihnen im Zusammenhang stehenden atmosphärischen Muster gesucht werden. Es wird also beispielsweise danach gefragt, welches die mit Kälte, Hitze, starken Niederschlag etc. verbundenen atmosphärischen Muster sind. Dieses Prinzip wird auch bei den WETTREG/WEREX-Regionalisierungen eingesetzt. Der Methodenvergleich im Rahmen der COST733-Aktion ergab, dass mit diesem Prinzip die Variabilität des lokalen und regionalen Klimas besser beschrieben werden kann als durch die *Circulation to Environment*-Ansätze (Spekat, Kreienkamp, & Enke, 2010). Dies bedeutet, dass mit dem WETTREG/WEREX-Prinzip der Bildung von Zirkulationsmustern eine bessere Voraussetzung für die Beschreibung der Verbindung zwischen großräumigem und lokalem Klima

gegeben ist. Davon profitieren wiederum zahlreiche Anwendungen, z. B. in den Bereichen Klima, Extreme, Luftqualität, Waldbrände, Wasserwirtschaft, Zivilschutz oder Ökosysteme.

Ein weiteres wichtiges Resultat aus der COST733-Aktion ist, dass erfolgreiche Klassifikationen, d. h. solche, die eine hohe Varianzreduktion ermöglichen, an die Zielgröße und die geografische Region angelehnt entwickelt werden müssen. Damit wurde ein Vorgehen bestätigt, das schon seit den frühen 1990er-Jahren in den Entwicklungsphasen von WETTREG und WEREX zum Einsatz kam. Die Verbindung zwischen Extremen und Zirkulationsmustern wurde im Zuge dieser Entwicklung beispielsweise im Rahmen von WEREX III untersucht (DEUTSCHLÄNDER & ENKE 2004). Dort stellte sich heraus, dass (i) Trockenheit mit deutlich weniger Erfolg durch Zirkulationsmuster dargestellt werden kann als beispielsweise Niederschlagsepisoden oder Hitzeepisoden und (ii) ein klassenbildendes Verfahren zur Beschreibung von Extremen nicht darauf fokussieren muss, dass *alle* Tage zugeordnet werden (Extreme sind seltene Ereignisse und eine diesbezügliche Klassifikation sollte insbesondere in der Lage sein, sie zu separieren). Ein weiterer Ansatz, Verbindungen zwischen Extremen und Zirkulationszuständen zu identifizieren, wurde im Vorhaben BLOCKWETT (ENKE, SPEKAT & KREIENKAMP 2007) verfolgt: Dort ging es in erster Linie nicht um die Regionalisierung von großräumigen Klimaprojektionen, sondern um hemisphärische dynamische Prozesse, insbesondere zeitlich und räumlich besonders stabile Zirkulationsformen, so genannte Blocking-Lagen. Es wurde ein statistisch-synoptisches Verfahren zur Identifikation und Darstellung entwickelt, das, angewandt auf Klimaprojektionen, auch Aussagen zur Zukunftsentwicklung von Blockings ermöglicht. Ein wichtiges Ergebnis mit Relevanz für das KLIWETT-Vorhaben ist, dass sowohl die natürliche Variabilität im Bereich der hemisphärischen langen Wellen, also Entwicklungen mit einem langen Andauerverhalten, als auch das regional unterschiedliche Auftreten von globalen Klimamodellen gut simuliert werden. Zudem können auch in Szenariorechnungen plausible Blocking-Konstellationen und zeitliche Entwicklungen identifiziert werden (KREIENKAMP, SPEKAT & ENKE 2010). In der zweiten Phase von BLOCKWETT (Spekat, Enke, & Kreienkamp, 2008) wurde darüber hinaus ein weiterer Zusammenhang zwischen atmosphärischer Dynamik und regionalen Extremen untersucht, die Zugbahnen von starken Tiefdruckgebieten und ihre projizierten zukünftigen Änderungen. Im Rahmen dieses Vorhabens entstand u. a. eine objektive Klassifikation von Sturm-Zugbahnen.

1.2 KLIWETT

Das Vorhaben Klimawandel und Wetterlagen – Einfluss auf Witterungsextreme und die Immissionssituation in Sachsen (KLIWETT) ist im Kontext der vorausgegangenen Projekte der WEREX-Serie zu sehen. Dort wurden mit der Regionalisierungsmethode WEREX, einer auf Sachsen fokussierten Fassung der statistischen Methode WETTREG, Aussagen zu den Spezifika des Klimawandels in Sachsen erarbeitet. Diese umfassten Änderungen des mittleren Klimazustands und einige Änderungen bei den Extremen.

Einige Anmerkungen zur dort verwendeten Methodik und der Relevanz für das Vorhaben:

- Zentrales Moment des statistischen Ansatzes ist, dass Beziehungen zwischen der großräumigen Zirkulation und dem regionalen Klima bestehen, ein Paradigma, das von F. Giorgi aufgestellt wurde (HESSELBJERG CHRISTENSEN 2005). Darüber hinaus basiert das WETTREG/WEREX-Verfahren darauf, dass großräumige dynamische Modelle das Klima und den Klimawandel bezüglich dieser großräumigen Muster plausibel wiedergeben. Aus zukünftigen Veränderungen der großräumigen Zirkulation entsteht dann mittels der entwickelten Beziehungen eine regionale und lokale Projektion des Klimawandels.
- Die Ergebnisse von WEREX waren bezüglich der Mittelwerte von hohem Nutzen, z. B. für Entscheidungsprozesse, Klimafolgen-Studien oder die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen.

- Es wurde zudem deutlich, dass die Beschreibung der Extreme eine besondere Herausforderung ist und sowohl die WETTREG/WEREX-Methode weiter ausgebaut werden muss als auch alternative Wege zu suchen sind, die den Extremen unter Umständen besser gerecht werden.

Um der Komplexität des Untersuchungsgegenstands gerecht zu werden, erfolgte die Strukturierung von KLIWETT in Form von zwei Phasen:

Die *erste Phase* wurde 2011 abgeschlossen und umfasste (i) eine Nutzerbefragung zur Ermittlung relevanter Extremen, (ii) die Identifikation von Extrem-Indizes aus der Literatur, (iii) Analysen der Stationarität des Gegenwartsklimas bezüglich einiger Extrem-Indikatoren, (iv) Untersuchungen zur Nutzbarkeit von Zirkulationsmusterklassifikationen als Proxy für Extrem-Indikatoren und (v) eine umfangreiche Identifikation und synoptische Darstellung von Extrem-Episoden zwischen 1971 und 2010.

Die *zweite Phase* von KLIWETT wiederum wurde in *zwei Teilmodulen* mit insgesamt sieben Arbeitspaketen (AP) durchgeführt:

- **AP 1:** Ableitung von Zeitreihen neu erstellter objektivierter HESS & BREZOWSKY-Großwetterlagen (und ihrer Aggregation zu Großwettertypen) für die Vergangenheit und für drei Klimaprojektionen bis 2050. Grundlage war die Jahreszeiten-spezifische Erstellung von mittleren Mustern auf Basis der subjektiven Klassifikation. Ziel war es, die relativ ausgereifte Methodik einer Zirkulationsmuster-Klassifikation im Stile der HESS & BREZOWSKY-Großwetterlagen auch auf Klimamodelle anwenden zu können. Bei dieser Klassifikation handelt es sich bekanntlich um eine manuelle Methode, die aber einen sehr langen Zeitraum – seit 1881 – beschreibt. Mit der Objektivierung wurde angestrebt, ein diagnostisches Werkzeug zu erhalten, die so genannten automatisiert-algorithmischen Großwetterlagen (aGWL). In diesem Bericht werden in Abschnitt 3 wichtige Ergebnisse vorgestellt.
- **AP 2:** Vergleich der Güte des Zusammenhangs der in der ersten KLIWETT-Phase identifizierten Extremereignisse (Extremwettertypen) in Sachsen unter Verwendung der im AP 1 neu entwickelten objektivierten Großwetterlagen (s. Abschnitt 4).
- **AP 3:** Ableitung von Wetterlagen für die in der ersten KLIWETT-Phase identifizierten Extremwettertypen und Berechnung von Zeitreihen der täglichen Wahrscheinlichkeit für Wetterlagen des entsprechenden Extremwetterereignisses für die Vergangenheit und drei Klimaprojektionen bis 2050. Es erfolgte die Neuentwicklung einer Klassifikation, die das Konzept der *Gemeinsamkeit von atmosphärischen Strukturen* in alternativer Form verfolgt. Ziel war es, Extreme besser zu beschreiben. In den „traditionellen“ Ansätzen steht entweder die atmosphärische Morphologie, also die Lage von Steuerungszentren, im Vordergrund (Circulation to Environment) oder es handelt sich um Ansätze, die ein Muster über die vom ihm verursachten regionalen Auswirkungen definieren (Environment to Circulation). Mit dem neuen Ansatz wurden Kombinationen von Ausprägungen atmosphärischer Eigenschaften gesucht, die im Zusammenhang mit Extremen stehen, die Klassifikation mit Multiplen Regressionskoeffizienten (KlaMuKo). In diesem Bericht werden in Abschnitt 5 wichtige Ergebnisse vorgestellt.
- **AP 4:** Vergleich der Güte des Zusammenhangs der in der ersten KLIWETT-Phase ermittelten Extremereignisse (Extremwettertypen) in Sachsen unter Verwendung der in AP3 neu entwickelten Wetterlagen für Extremwettertypen (s. Abschnitt 6).
- **AP 5:** Erstellung einer Klimastatistik für die Vergangenheit und drei Klimaprojektionen für die ausgewählten Wetterlagen-Klassifikationen. Ziel ist eine Bewertung der erzielten Ergebnisse in Hinblick auf Häufigkeit und Intensität ausgewählter Extremereignisse für die untersuchten Klimaprojektionen (s. Abschnitt 7).

- **AP 6:** Untersuchung und Ursachenforschung für das in den letzten Jahren verstärkte Auftreten von Blockierungslagen und die Hinweise auf deren zunehmendes Andauern. Für die Identifikation von Blockierungslagen wird ein „erweiterter NAO Index“ entwickelt, der die Lage und Ausprägung des meridional zwischen 70°N und 40° Nord gemittelten Geopotentials beinhaltet (s. Abschnitt 8).
- **AP 7:** Ermittlung von Zusammenhängen zwischen verschiedenen meteorologischen Parametern (GWL, Druck- und Temperaturverhältnisse etc.) und der Immissionssituation für PM₁₀, NO_x und Ozon (O₃). Ermittlung zukünftiger Trends der Immissionssituation auf Basis der untersuchten Klimaprojektionen (s. Abschnitt 9).

1.3 Die Untersuchungsregion

Die Untersuchungsregion umfasst den Freistaat Sachsen und seine Umgebung. Abbildung 1 zeigt sowohl die Lage der Region mit den Ländergrenzen als auch die Lage von Klimastationen. Zur Beschreibung des Klimas werden Stationsdaten aus Sachsen verwendet. Details zu den meteorologischen Variablen und der Datenlage beschreibt Abschnitt 2.1.1.

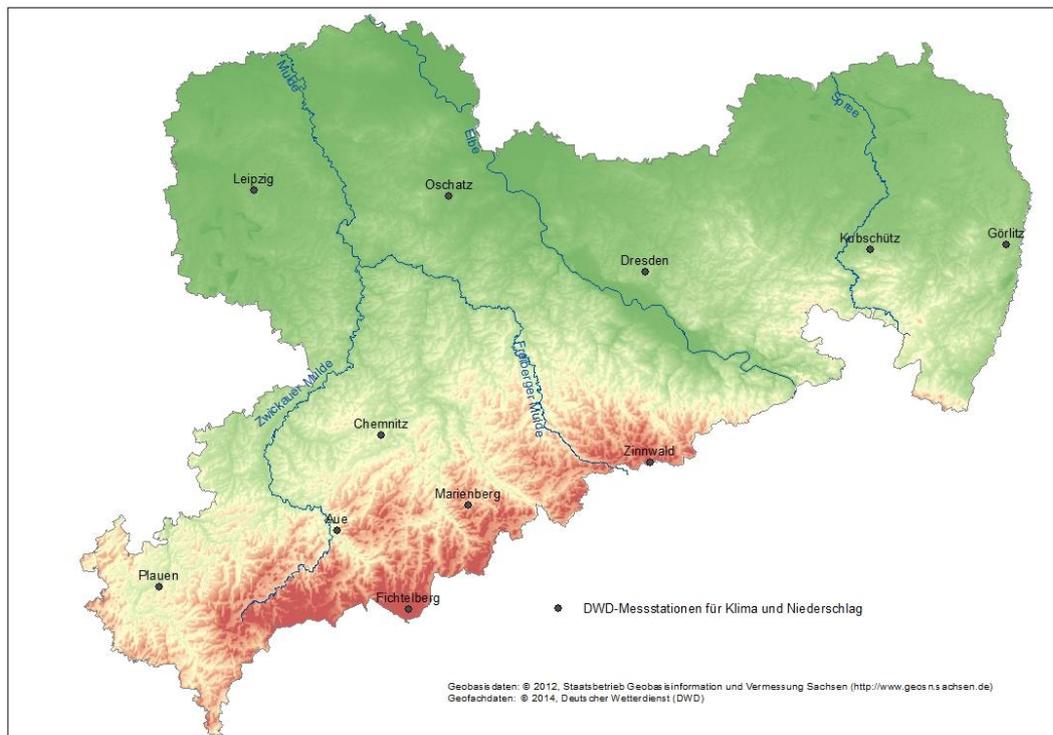


Abbildung 1: Klimastationen im Freistaat Sachsen

1.4 Disclaimer

Die in diesem Bericht gezeigten Darstellungen beruhen auf Basisdaten, die von Dritten erzeugt wurden (Reanalysen, globale Klimamodell-Szenariorechnungen und Beobachtungsdaten). Die Firma Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH übernimmt keine Verantwortung oder Haftung für deren Qualitätskontrolle und geht bei der Anwendung der Methodik und der Interpretation der Resultate von einer höchstmöglichen Qualität der Basisdaten aus.

Die mit den globalen Klimamodellen errechneten Treibhausgas-Szenarios basieren ihrerseits auf Szenarios der Entwicklung der Weltbevölkerung, der Wirtschaft und anderer Globalisierungsfaktoren, für deren Richtigkeit oder Eintreffen keine Garantie übernommen werden kann. Diese Annahmen entsprechen aber dem aktuellen Stand der Wissenschaft, sodass eine bestmögliche Eintreffens-Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann.

Somit gilt auch für die ausgelieferten Daten, dass deren Aussagekraft in Relation mit der Qualität der Basisdaten zu sehen ist. Die Resultate sind nach bestem Wissen und Gewissen entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft gewonnen worden.

2 Daten und Methoden

2.1 Verwendete Daten

2.1.1 Messungen an Stationen

Zur Bestandsaufnahme des Klimas in der Untersuchungsregion (s. Abbildung 1) und zur Definition von Basisgrößen für die KlaMuKo-Klassen sind qualitätskontrollierte, tägliche Klimadaten eines möglichst dichten Stationsnetzes für einen gegenwartsnahen, mindestens 30-jährigen Zeitraum (z. B. 1971–2000) notwendig. Relevante Wetterelemente für die Untersuchung sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Analyisierte meteorologische Variable

Name	Abkürzung	Einheit
Maximum der Temperatur	TX	°C
Tagesmittel der Temperatur	TM	°C
Minimum der Temperatur	TN	°C
Tagessumme des Niederschlages	RR	mm
Tagesmittel des Dampfdrucks	DD	hPa
Tagesmittel der Windstärke	FF	m/s

Die genutzten Stationen stammen aus den Messnetzen des Deutschen Wetterdienstes. Insgesamt wurden Daten von 12 Klimastationen und 224 Niederschlagsstationen (nur Messungen des Niederschlags, nur für einige Auswertungen in Abschnitt 6.2.3 und 6.3.3) verarbeitet. Die zur Verfügung stehenden Klimastationen sind in Abbildung 1 eingetragen – im Raum Leipzig handelt es sich um zwei Stationen (AWST Holzhausen und Flughafen Schkeuditz). Der zur Verfügung gestellte Zeitraum umfasst in der Regel die Jahre 1951-2010, wovon für die Auswertungen der Zeitraum 1971-2000, resp. 1971-2010 verwendet wurde.

2.1.2 Reanalysedaten

Grundgedanke des Reanalyse-Ansatzes ist es, eine Klimatologie der Atmosphäre in drei Dimensionen auf der Basis von Daten hoher Homogenität in Zeit und Raum zu erzeugen. Atmosphärische Messdaten wurden und werden in einer Vielzahl von Verfahren, die sich über die Zeit verändert haben, analysiert, sodass es nicht bruchlos möglich ist, Analysen aus unterschiedlichen Quellen und für unterschiedliche Perioden zu betrachten. Erst durch ihr Re-Analysieren ist ein auf homogenen Daten beruhendes *dreidimensionales* Bild des Kli-

mas der Jetztzeit möglich. Für einige Analysen werden Felder von Geopotenzial, Temperatur und Feuchte in verschiedenen Atmosphären-Niveaus aus den NCEP/NCAR-Reanalysedaten (KALNAY et al. 1996) verwendet.

2.1.3 Globales Klimamodell

Die Projektion eines geänderten Klimas erfolgt mit Läufen des Globalen Klimamodells ECHAM5 MPI-OM (im Bericht mit ECHAM5 abgekürzt), die ihrerseits von Szenarios des Ausstoßes (Szenariotyp SRES, s. Abschnitt 1.1) von Treibhausgasen angetrieben werden.

Anmerkung: Bis zum modellierten Jahr 2001 bei ECHAM5 handelt es sich um Re-Simulationen des Gegenwartsklimas, so genannte 20C-Daten (20C: Simulation des 20. Jahrhunderts). Die eigentlichen Klimaprojektionen, angetrieben mit Treibhausgas-Szenarios, beginnen nach diesem Modelljahr. Im Rahmen von KLIWETT wurden Projektionen mit ECHAM5 MPI-OM (ROECKNER et al. 2003) Lauf 1, angetrieben mit den SRES Szenarios (NAKICENOVIC et al. 2000) A1B, A2 und B1 genutzt.

2.2 Zu untersuchende Extremereignisse

In diesem Abschnitt sind 13 Extremereignisse – acht auf Grund einer Tabelle in der Projektbeschreibung und fünf weitere – zusammengefasst, mit denen Analysen erfolgen. Details finden sich im Abschnitt 7, insbesondere in Tabelle 28.

2.2.1 Extreme Trockenperioden

Als solche sind Zeitabschnitte definiert, an denen mindestens 10 Tage hintereinander diese Bedingung zutrif: Im Mittel über die 12 Klimastationen betrug die Tagesniederschlagsmenge 0,5 mm oder weniger. Der Untersuchungszeitraum umfasste das gesamte Jahr; Kennung `_Trk`. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.1.

2.2.2 Hochwasser

Als atmosphärisches Proxy für Hochwasser wurde die in der Hydrologie verbreitet genutzte Größe *Niederschlagssumme über 3 Tage* verwendet. Es fand, um die niederschlagsreichen Tage schärfer definieren zu können, eine Clusterung bezüglich der mittleren Niederschlagswerte (s. Abschnitt 2.4) statt, die vier Stationen mit relativ starkem mittlerem Niederschlag identifizierte. Der Untersuchungszeitraum bestand aus dem Winterhalbjahr (Oktober bis März); Kennung `_Ni3`. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.2.

2.2.3 Perioden mit hohem Niederschlag

Die Definition von Niederschlagsperioden legte fest, dass mindestens 3 Tage hintereinander diese Bedingung zutrif: Im Mittel über die 12 Klimastationen betrug die Tagesniederschlagsmenge 5 mm oder mehr. Der Untersuchungszeitraum bestand aus den Sommermonaten (Juni-Juli-August); Kennung `_RRx`. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.3.

2.2.4 Anzahl der heißen Tage

Als solche gelten Tage mit einem Maximum von mindestens 30 °C. Um Verzerrungen auf Grund der Stationshöhen und dem vergleichsweise seltenen Übertreffen dieser Schwelle an Bergstationen zu vermeiden, wurden mit einem Clusterverfahren (s. Abschnitt 2.4) diejenigen Stationen – insgesamt 9 – selektiert, die eine relativ große Häufigkeit dieser Schwellwertüberschreitung besitzen. Die untersuchte Größe wurde zudem transformiert: Es wurde errechnet, welche räumliche Wahrscheinlichkeit das Auftreten von $TX > 30$ °C an den Stationen hatte, es wurde also der Quotient aus aufgetretenen Schwellwertüberschreitungen (zwischen 0 und 9 Stationen) und der maximal möglichen Häufigkeit (9) gebildet. Untersucht wurde das Sommerhalbjahr (April bis September); Kennung `_Tma`. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.4.

2.2.5 Hitzewellen

Als Hitzewelle wurde definiert, wenn an fünf aufeinanderfolgenden Tagen das in Abschnitt 2.2.4 vorgestellte Identifikationskriterium für heiße Tage auftrat – inklusive der Selektion von Flachlandstationen, der Transformation in räumliche Wahrscheinlichkeiten und dem Untersuchungsmonatsbereich; Kennung _Hea. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.5.

2.2.6 Anzahl der Eistage

Als solche gelten Dauerfrostage mit einem Maximum < 0 °C. An Bergstationen tritt dies relativ häufig auf; der Fokus wurde aber auf die Selektion von Flachlandstationen (analog zu Abschnitt 2.2.4 und 2.2.5) gelegt. Der Untersuchungszeitraum umfasst das Winterhalbjahr (Oktober bis März); Kennung _Tmi. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.6.

2.2.7 Anzahl der Tage mit Spätfrost

Als Spätfrosttag gilt, wenn in der Vegetationsperiode I (April bis Juni) ein Minimum unter -4 °C auftritt. Dazu wurden 7 Stationen mit vergleichsweise hohen Minimumwerten, also im Flachland liegend, mit dem Clusterverfahren (s. Abschnitt 2.4) identifiziert; Kennung _-4T. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.7.

2.2.8 Starkwind

Als Starkwindtag gilt, wenn das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit 8 m/s oder mehr beträgt. Zur Analyse dieser Größe wurden alle Klimastationen zusammengefasst. Eine Clusterung erbrachte keine sinnvolle Aufteilbarkeit des Stationskollektivs, weil nur zwei Cluster gebildet wurden, wovon einer lediglich die Bergstation (Fichtelberg) und der zweite alle übrigen Stationen enthielt; Kennung _Win. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.8.

2.2.9 Tage mit Schwüle

Die Definition verwendet den Dampfdruck. Sobald eine Schwelle von 18 hPa überschritten wird, ist Schwüle gegeben. Das Clusterverfahren (s. Abschnitt 2.4) ermittelte eine Gruppe von 9 Tieflandstationen, mit der die Analyse stattfand. Sobald an einer der 9 selektierten Stationen Schwüle auftrat, wurde die Kennung gesetzt. Der Untersuchungszeitraum war das Sommerhalbjahr (April bis Oktober); Kennung _Dad. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.9.

2.2.10 Tropennächte

Eine Tropennacht tritt auf, wenn die Minimumtemperatur über 20 °C liegt. Für das Sommerhalbjahr (April bis Oktober) wurde an einer Untermenge der Stationen (Tiefland) die entsprechende Analyse durchgeführt; Kennung _20.0_Tmn. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.10.

2.2.11 Trockenwarme Tage

Für diesen Indikator werden zwei meteorologische Größen ausgewertet: Mitteltemperatur und Niederschlag. Ein Tag gilt als trockenwarm, wenn an ihm die Mitteltemperatur oberhalb des 75-Perzentils für diesen Tag und die Niederschlagsmenge unterhalb des 25-Perzentils für diesen Tag liegt. Perzentile auf Tagesbasis werden wie folgt berechnet: In einer 30-jährigen Referenzperiode wird für einen Tag am Datum X eine Datengruppe gebildet, die aus den Werten (i) der 30 Jahre am Datum X (ii) und vom Datum X-1, X-2, X+1 und X+2 stammen. Diese insgesamt 150 Werte werden größensortiert und zur Perzentilbestimmung verwendet. Zur Analyse kam eine Zeitreihe, die für jeden Tag den prozentuale Anteil der Stationen, die das Doppelkriterium erfüllen, enthält. Der Untersuchungszeitraum umfasste das gesamte Jahr. Kennung _twd. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.11.

2.2.12 Feuchtkalte Tage

Analog zur Größe in Abschnitt 2.2.11 wurden Tage gesucht, an denen die Mitteltemperatur unterhalb des 25-Perzentils und der Niederschlag oberhalb des 75-Perzentils lag; Kennung `_fkd`. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.12.

2.2.13 Tage mit hoher PM10-Belastung

Das Kriterium dieses Schadstoffindikators identifiziert Tage, an denen eine mittlere PM10-Konzentration von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert wurde. Analysiert wurde der prozentuale Anteil von – insgesamt 36 – Stationen, an denen das Kriterium eintrat. Der Untersuchungszeitraum umfasste das Winterhalbjahr (Oktober bis März). Schadstoffwerte liegen nur für einen Zeitraum ab 2000 vor; Kennung `_p10`. Analysen finden sich in Abschnitt 7.2.13.

2.3 Maße der Repräsentativität

Die Identifikation von Extremen an *einer Station* ist relativ einfach und durch die jeweiligen Kriterien gegeben. Komplexer stellt sich das Problem dar, wenn Daten eines Messnetzes vorliegen. Hier sind Einzelfallentscheidungen notwendig, um das Extrem räumlich repräsentativ einzuordnen. Zunächst ist zu fragen, ob es durch die im Untersuchungsgebiet vorhandenen unterschiedlichen Höhenlagen möglicherweise Verzerrungen gibt, wenn alle Stationen zur Analyse herangezogen werden. Ein optional einsetzbares Verfahren zur Unterteilung in Stationsgruppen wird in Abschnitt 2.4 vorgestellt. Als nächstes bieten sich weitere Strategien an, in der gegebenenfalls geschaffenen Untermenge von Stationen die Extreme meteorologischer Größen zu untersuchen. Zur Nomenklatur: Die Größe, z. B. die tägliche Maximumtemperatur, für die ein Zusammenhang zwischen dem großräumigen Zustand der Atmosphäre und dem lokalen Klima ermittelt werden soll, heißt auch *Prediktand*. Die zur Beschreibung des Prediktanden genutzten Größen der freien Atmosphäre, z. B. Geopotenzial oder relative Topografie, werden auch *Prediktoren* genannt.

Verwendung der Größe per se

Hier wird der Prediktand nicht bearbeitet, sondern in seinem Wertebereich für die Analyse genutzt. Analysen dieser Art finden sich z. B. in den Unterkapiteln von Abschnitt 6.

Binarisierung

Die Zeitreihe des Prediktanden wird so transformiert, dass einem Tag der Wert 1 zugeordnet wird, wenn das spezifische Extrem-Kriterium zutrifft und 0, wenn es nicht zutrifft. Im Fall eines Stationsnetzes ist zu untersuchen, ob das Kriterium als erfüllt betrachtet werden kann, wenn es an einer einzigen oder an mehreren Stationen erfüllt ist. Im letztgenannten Fall gibt es weitere Repräsentativitätskriterien (s. u.).

Flächenwahrscheinlichkeit

Es kann möglich sein, dass die Binarisierung eine zu starke Aufspaltung der Zeitreihe hervorruft. Alternativ kann für jeden Tag die so genannte Flächenwahrscheinlichkeit ermittelt werden. Das ist der Prozentsatz der Stationen, an denen das Kriterium zutrifft. Der Wertebereich des Prediktanden wird dabei in ein Intervall [0 ... 100] transformiert.

Prozentuale Repräsentativität

Eine solche Betrachtungsweise stellt eine zweistufige Kombination aus Flächenwahrscheinlichkeit und Binarisierung dar. Zunächst wird ermittelt, welche Flächenwahrscheinlichkeit das Eintreffen eines Extrem-Kriteriums besitzt. Im Folgeschritt werden dann diejenigen Tage markiert, an denen das Kriterium an einem gewissen Prozentsatz der Stationen erfüllt ist – im Vorhaben wurden für einige Teiluntersuchungen Schwellen von 30 % und 70 % verwendet.

2.4 Clusterung des Stationskollektivs

2.4.1 Prinzip des Verfahrens

Es kann sinnvoll sein, Untermengen des Stationskollektivs zu bilden. Beispielsweise ist durch die unterschiedliche Höhenlage die Anzahl von Schwellwertüber- oder -unterschreitungen verzerrt: An einer Bergstation werden Eistage oder Tage mit Niederschlag über 10 mm deutlich häufiger auftreten als an einer im Tiefland gelegenen Station. Die Separierung kann empirisch-subjektiv vor sich gehen; beispielsweise wäre denkbar, eine empirisch ermittelte Höhenlage oder die Zuordnung zu Naturräumen zur Separierung zu verwenden. Im Rahmen von KLIWETT wurde hingegen ein Verfahren entwickelt, das algorithmisch und reproduzierbar Stationsgruppen spezifisch für die meteorologischen Elemente bildet.

Die verwendete Methodik nutzt das Prinzip der k-means-Clusterung. Im Voraus ist zu definieren, wie viele Gruppen N das Verfahren bilden soll. Die notwendige Ausgangspartition wird so gebildet, dass die Stationen quasi-willkürlich nach ihrer Position in der Stationsliste sequenziell den N Gruppen zugeordnet werden. Durch eine Serie von Austauschschritten werden dann N Gruppen gebildet, die gleichzeitig (i) maximale Separierung zwischen den Gruppen und (ii) maximale Ähnlichkeit zwischen den Mitgliedern einer Gruppe gewährleisten. Die Optimierung erfolgt über ein Ähnlichkeitsmaß und die Austauschschritte werden so lange durchgeführt, bis ein stabiler Zustand erreicht ist, bei dem keine Station die Gruppe wechselt.

Drei Optimierungskriterien sind einzeln oder in gewichteter Kombination anwendbar, die spezifische Eigenschaften des Stationskollektivs betrachten.

- **Klassenmittelwert:** Für jede Station wird der Mittelwert des Betrachtungszeitraums (z. B. eine Jahreszeit oder ein Halbjahr, in der Regel aus einem 30-jährigen Zeitraum gewählt) berechnet. Mit Hilfe eines Ähnlichkeitsmaßes werden die N Gruppen gebildet.
- **Streuung:** Alternativ kann das Verfahren auch Klassen bilden, die sich bezüglich ihrer Streuung ähneln. Dazu wird für jede Station die Standardabweichung berechnet und mit dem Ähnlichkeitsmaß zur Bildung der N Gruppen ausgewertet.
- **Geografische Koordinaten:** Eine weitere einsetzbare Optimierungsgröße ist die Lage der Stationen. Mit Hilfe eines Kriteriums, das geografische Länge und Breite auswertet, werden N räumlich homogene Gruppen gebildet.

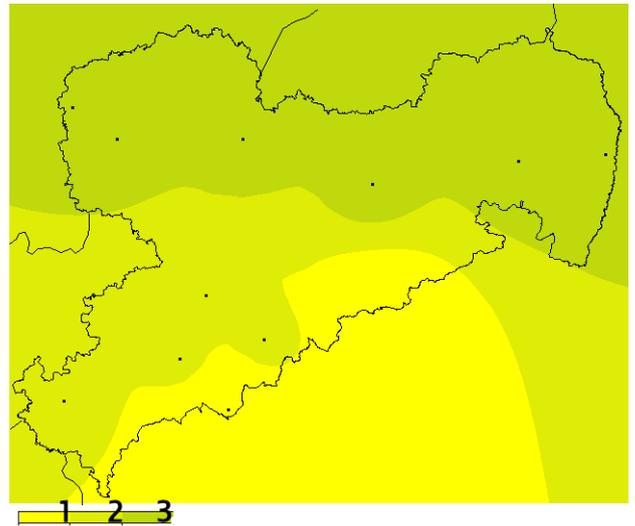
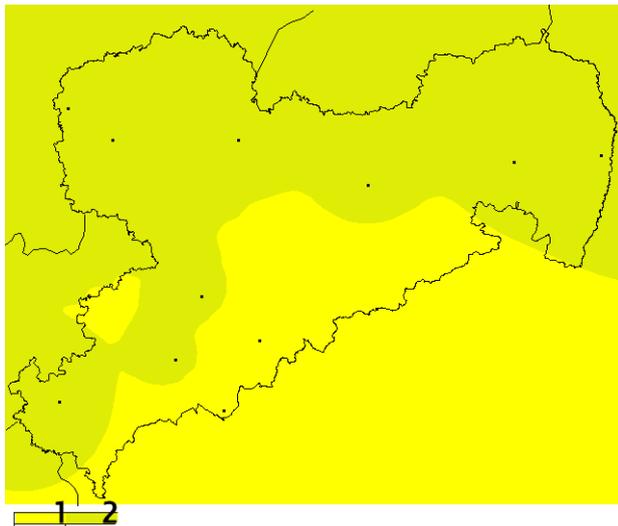


Abbildung 2: Bildung von 2 (links) bzw. 3 (rechts) Stationsclustern. Element: Jahresmitteltemperatur. Kriterium: Klassenmittelwert.

Über die Wahl, welcher der Stationscluster genutzt werden soll, ist steuerbar, ob sich die Analyse auf den oberen, den unteren oder (bei drei Clustern) mittleren Teil des Wertebereichs erstreckt.

2.4.2 Praktische Erfahrungen mit dem Stationsclusterverfahren

Die Mittelwert-Variante ist intuitiv relativ gut zu erfassen und führt zudem zu Flächenmitteln, die einen bestimmten Wertebereich beinhalten, d. h., es wird indirekt auch eine Klassierung der Zielgröße vorgenommen. Für das Stationskollektiv in Sachsen führt die Verwendung des streuungsbezogenen Optimierungskriteriums zu ähnlichen, oft identischen Clustern, weil an Stationen mit hohem Mittelwert eines meteorologischen Parameters oft auch eine große Streuung in dessen Zeitreihe auftritt.

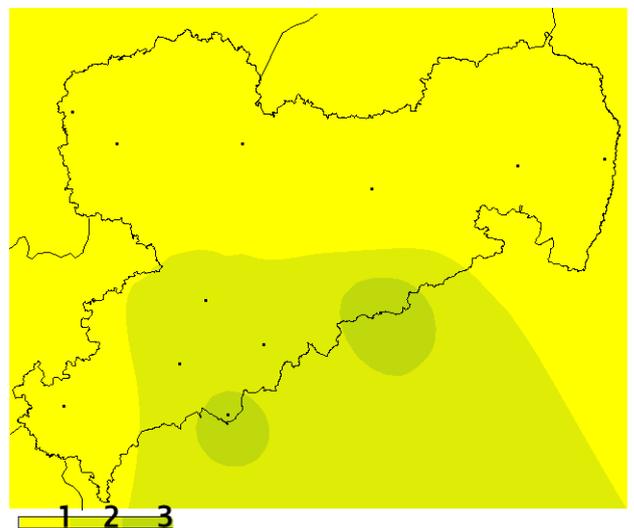
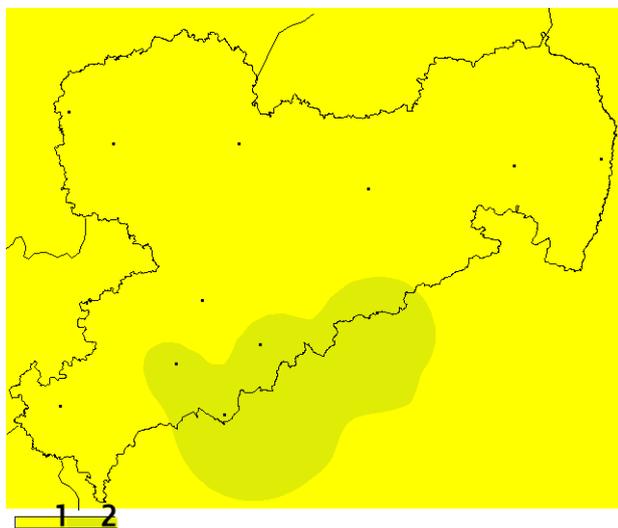


Abbildung 3: Bildung von 2 (links) bzw. 3 (rechts) Stationsclustern. Element: Jahresniederschlag. Kriterium: Klassenmittelwert.

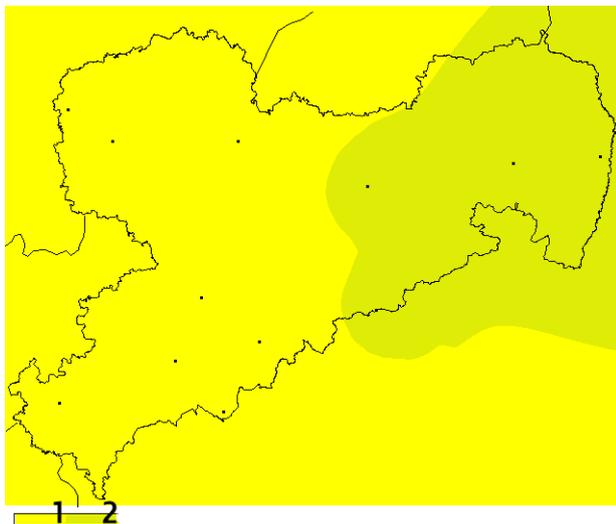


Abbildung 4: Bildung von 2 Stationsclustern. Kriterium: Geografische Koordinaten

Welche Auswirkungen die Eingangsgrößen des Stationsclusterverfahrens haben, ist aus Abbildung 2 bis Abbildung 4 ersichtlich.

Für die Temperatur und die Maßgabe, zwei Cluster zu bilden (Abbildung 2 links), finden sich drei Stationen (Fichtelberg, Marienberg und Zinnwald-Georgenfeld) im Cluster 1 und neun Stationen (Plauen, Aue, Chemnitz, Leipzig-Schkeuditz, Leipzig-Holzhausen, Oschatz, Dresden, Kubschütz und Görlitz) im Cluster 2. Die Temperaturbereiche für Flachland, Erzgebirgsvorland und Erzgebirge ermöglichen bei einer Forderung, *drei* Cluster zu bilden (Abbildung 2 rechts), eine ebenfalls anschauliche Separierung. Dabei befinden sich nur die beiden Bergstationen in Cluster 1, Plauen, Aue, Chemnitz und Marienberg bilden den „Vorlandcluster“ 2 und die übrigen sechs Stationen aus der Leipziger Tieflandsbucht, dem Bereich der Elbe und der Oberlausitz bilden den „Tieflandcluster“ 3.

Beim Jahresniederschlag zeigen sich geringe Unterschiede zur Temperaturreihen-Clusterung. Ist die Maßgabe, zwei Cluster zu bilden (Abbildung 3 links), so werden acht Stationen (die o. e. Stationen des Tieflandclusters sowie Plauen und Chemnitz) durch Cluster 1 zusammengefasst. Die übrigen vier Stationen bilden einen „Erzgebirgscluster“. Sollen drei Cluster gebildet werden, so trennt die Methodik die Station Chemnitz vom Tieflandcluster ab. Ein niederschlagsbezogener „Vorlandcluster“ entsteht aus den drei Stationen Aue, Chemnitz und Marienberg. Nicht überraschend bilden die Bergstationen Fichtelberg und Zinnwald-Georgenfeld den dritten Cluster, in dem die höchsten Niederschlagswerte zusammengefasst sind.

Ein Beispiel für geografisch bezogene Cluster ist in Abbildung 4 dargestellt. Dort wurde keine Information von meteorologischen Größen zur Clusterbildung herangezogen. Aus dem Stationskollektiv entstehen ein „westlicher Cluster“ aus acht Stationen und ein östlicher Cluster aus vier Stationen (inkl. Zinnwald-Georgenfeld). Weil in beiden Clustern sowohl im Flachland als auch im Bergland gelegene Stationen enthalten sind, ist zu erwarten, dass bezüglich der Extremindikatoren keine zielführende Unterteilung des Stationskollektivs entsteht.

Im Zusammenhang mit der Clusterung auf der Basis der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit zeigten sich Grenzen dieser Strategien: Dort wurden zwei Cluster gebildet, wobei der erste aus elf Stationen und der zweite einzig aus der Station Fichtelberg bestand. Eine solche Unterteilung ist nicht sinnvoll – auch ein aus zwei Stationen bestehender Cluster lässt Zweifel an der Repräsentativität und statistischen Stabilität der Ergebnis-

se aufkommen. Werden bei einem Kollektiv von 12 Stationen drei oder noch mehr Cluster gefordert, so häufen sich die Fälle mit schwach besetzten Einzelclustern. Die Untersuchungen werden folglich mit einer Unterteilung in zwei Cluster oder ggf. ohne Unterteilung durchgeführt.

3 Ergebnisse Arbeitspaket 1 – Ableitung objektiverter Großwetterlagen (aGWL)

3.1 Kontext

Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket (AP) fanden im ersten Teilmodul der zweiten Phase von KLIWETT statt.

Bei diesem AP handelte es sich um die Entwicklung und Dokumentation eines objektivierten Ansatzes, mit dem die Großwetterlagen (HESS & BREZOWSKY 1952) abgebildet werden sollten. Das Ziel bestand darin, diese recht ausgereifte Methodik auch auf Klimamodelle anwenden zu können. Die Großwetterlagen-Klassifikation nach HESS & BREZOWSKY ist bekanntlich eine manuelle Methode, die aber einen sehr langen Zeitraum – seit 1881 – beschreibt. Mit der Objektivierung entsteht ein sehr wichtiges diagnostisches Werkzeug, die so genannten automatisiert-algorithmischen Großwetterlagen (aGWL).

So wichtig das Fortführen dieser langen GWL-Zeitreihe ist, so deutlich muss bei der Arbeit mit Großwetterlagen sein, welche Nachteile ein subjektiv-manuelles Verfahren mit sich bringt:

- Mehrdeutigkeit – jeder Bearbeiter kann eine komplizierte Wettersituation anders beurteilen und damit eine andere Zuordnung vornehmen
- Übertragbarkeit – eine Zuordnung von Tagen, z. B. in GCM Klimaprojektions-Datensätzen, kann auf Grund des hohen personellen Aufwandes nicht erfolgen

Es besteht verständlicherweise der Wunsch vieler Anwender nach einer automatisiert-algorithmischen Version der Großwetterlagen-Zuordnung. Dabei soll kein neuer Katalog geschaffen werden. Vielmehr wird auf der Basis von subjektiven Entscheidungen bezüglich der notwendigen Schritte und Bedingungen eine algorithmische Verfahrenskette aufgebaut⁵. Diese Kette ermöglicht aber eine vollautomatische Zuordnung von atmosphärischen Situationen zu den durch den Großwetterlagenkatalog vorgegebenen Klassen. Es gibt einige Ansätze zu einer Objektivierung von HBGWL (z. B. SALVISBERG 1996; KRÜGER 2002; SCHNEIDER 2003; JAMES 2007), auf deren Basis das in KLIWETT eingesetzte automatisiert-algorithmische Verfahren (aGWL) weiterentwickelt wurde.

⁵ Das für KLIWETT entwickelte aGWL-Verfahren ist nicht vollständig objektiv, denn es werden z. B. Vorentscheidungen hinsichtlich Art und Zahl der einbezogenen Felder oder der Wichtigkeitsstufen getroffen.

3.2 Verfahren

Die Methodik der (subjektiv-empirischen) Großwetterlagen-Bestimmung von HESS & BREZOWSKY (in der Folge HBGWL genannt) umfasst das visuelle Vergleichen der Wettersituation eines bestimmten Tages mit rund 30 Zirkulations-Konfigurationen und die manuelle Zuordnung. Je nach Zeitraum basiert die HBGWL-Klassifikation auf unterschiedlicher Information. Weil bis in die 1950er-Jahre operationell keine Daten aus der freien Atmosphäre für den atlantisch-europäischen Sektor verfügbar waren, erfolgte die Zuordnung auf der Basis der bodennahen Beobachtungen. In einer Übergangsphase kamen dann immer mehr Radiosondendaten und in späteren Jahren auch Satellitendaten hinzu. Um diesen „Vermischungseffekt“ durch die unterschiedlichen Anteile der Informationsquellen möglichst gering zu halten, wurde für Bildung der Musterwetterlagen der Zeitraum 1981–2010 genutzt. Das Augenmerk bei der HBGWL-Klassifikation ist auf die Lage von Steuerungszentren, wie beispielsweise „Hoch über Skandinavien“ oder „Tief über den Britischen Inseln“, gerichtet. Es wird also bei der Ähnlichkeitssuche *morphologisch-synoptisch* vorgegangen.

Das aGWL-Verfahren nimmt als Ausgangspunkt die manuell mit dem HBGWL-Verfahren klassifizierten GWL von 1981–2010. Mit Hilfe einer Screening-Regressionsanalyse werden die Charakteristika jeder GWL nicht auf der Basis von Bodendruck und dem 500 hPa-Geopotenzial, sondern von 20 potenziellen Prediktorenfeldern bestimmt. Diese umfassen Geopotenzial, Temperatur, Feuchte, Vorticity und relative Topografien in verschiedenen Schichten der Atmosphäre. Aus diesen 20 potenziellen Prediktoren bestimmt das Screening-Verfahren bis zu vier, mit denen eine möglichst gute Reproduktion der HBGWL-Zuordnung möglich ist⁶. Exemplarisch sei dies an der Zuordnung für den Frühling (März-April-Mai) gezeigt:

- Die höchste Trefferrate mit einem einzelnen Feld wird erzielt, wenn die Vorticity in 850 hPa verwendet wird. Sie liegt bei 862 von 2.760 Tagen (31,2 %).
- Unter Beibehaltung der Vorticity als erstem Feld wird nun ein zweites Feld hinzugenommen. Dabei ermittelt das Screening-Verfahren die höchste Trefferrate für zwei Felder in der Kombination des in oben genannten mit den horizontalen Geopotenzialdifferenzen des 850 hPa-Felds in Nord-Süd-Richtung (einem der 20 potenziellen Prediktoren) in einer „Mixtur“ im Verhältnis 5 : 2 zwischen dem ersten und dem zweiten Feld. Die Trefferrate der Zweifelderkombination liegt bei 39,3 %.
- Die oben ermittelten zwei Felder und Gewichtungseigenschaften werden beibehalten und das Screening-Verfahren zur Suche der höchsten Trefferrate für drei Felder eingesetzt. Es stellt sich heraus, dass dies die Temperaturdifferenz zwischen 850 und 500 hPa ist. Zudem wird eine Gewichtung von 5 : 2 : 1 für die bisher identifizierten drei Felder als für die Trefferrate förderlich ermittelt. Diese liegt für die Dreifelderkombination bei 41,1 %.
- Unter Beibehaltung der bisher ermittelten Felder und Gewichtseigenschaften wird das Screening-Verfahren erneut durchlaufen, um eine Kombination von vier Feldern zu identifizieren, die die Trefferrate weiter erhöht. Dies ist bei der Hinzunahme der Vorticity in 500 hPa der Fall. Die erfolgreichsten Gewichtsanteile sind dabei 5 : 2 : 1 : 2 für die beteiligten vier Felder und die Trefferrate dieser Kombination liegt bei 42,1 %.

⁶ Ziel ist es, gestützt durch ein Ähnlichkeitsmaß, eine möglichst hohe Übereinstimmung der Zuordnung durch die HBGWL-Methode und dem durch Screening ermittelten Feld zu erzielen. Das Verfahren geht dabei so vor, dass für jedes der potenziellen Prediktorenfelder untersucht wird, wie hoch mit seiner Verwendung die Trefferrate (Reproduktion der HBGWL-Klassenzuordnung) ist. Danach wird iterativ nach bis zu drei weiteren Prediktorenfeldern gesucht, die in Kombination mit dem ersten Feld die Trefferrate weiter erhöhen.

Im Winter findet das Screening-Verfahren als optimale Kombination der Felder für die Reproduktion der HBGWL dies: Geopotenzial 700 hPa » Vorticity 1000 hPa » Horizontale Temperaturdifferenz 500 hPa in Nord-Süd-Richtung » Temperaturdifferenz 850 und 500 hPa mit den Gewichten 5 : 5 : 3 : 2 und einer Wiedererkennung von 45,9 %. In der Zusammenschau der Teilergebnisse des Screenings für die Jahreszeiten fällt die häufige Nutzung der Vorticity, des Geopotenzials, der horizontalen Geopotenzialdifferenzen und der Temperaturdifferenz zwischen den Niveaus 850 und 500 hPa auf. Dies erklärt sich wie folgt: Das Kriterium der subjektiven Auswahl der HBGWL (durch visuelle Inspektion der Synoptiker) ist durch die Struktur/Morphologie des ihnen zur Verfügung stehenden synoptischen Feldes gegeben. Und es ist eben diese Struktur, die durch das Geopotenzial, die Vorticity und die horizontalen Geopotenzialdifferenzen gut beschrieben wird.

Ein weiterer Verfahrensschritt besteht darin, einer Forderung von BAUR (BAUR, HESS & NAGEL 1943) nachzukommen, deren Einhaltung auch HESS & BREZOWSKY in den HBGWL anstrebten, was aber in der Praxis nicht konsequent beherzigt wurde: Um sicherzustellen, dass GWL semi-stabile Zustände beschreiben, sollen sie *mindestens eine Periodenlänge von 3 Tagen* besitzen. Für die HBGWL wurden umfangreiche Nachbearbeitungen, quasi eine „Reanalyse“, durchgeführt, um – manuell – die 3-Tage-Forderung durch Korrekturen der Zuordnung an einzelnen Tagen nachträglich zu gewährleisten. Die aGWL erzeugten zunächst Perioden von drei oder weniger Tagen. Es wurde ein iteratives, algorithmisches und automatisch ablaufendes Verfahren entwickelt, diese durch Zuordnungen von aGWL an angrenzenden Tagen und/oder Ersetzen durch aGWL mit einer hohen Ähnlichkeit zu ersetzen.

3.3 Resultate

3.3.1 Trefferquote

Die Trefferquote (Reproduktionsrate) der HBGWL durch die aGWL liegt bei rund 44 %. Auch wenn dieser Wert niedrig erscheint gegenüber anderen Untersuchungen von KRÜGER (2002) – Trefferquote 34,1 % – oder JAMES (2007) – Trefferquote 39,1 % –, wird ein Fortschritt erzielt. Ein wichtiger Grund der Steigerung der Wiedererkennungsqualität der aGWL dürfte in der Verwendung der optimiert selektierten Felder liegen. Je nach GWL liegen die Reproduktionsraten bei Verwendung der aGWL zwischen 20 und 70 %. So wird die sehr häufig auftretende Lage WZ von aGWL mit mehr als 50 % Häufigkeit wiedererkannt, während es bei der ähnlich verbreitet auftretenden BM nur rund 25 % sind und unter den selten auftretenden HBGWL finden sich solche mit geringer (SEZ 34 %) und hoher (HNFZ 70 %) Reproduktionsgüte durch die aGWL.

Weitere Analysen ergaben Änderungen der Häufigkeiten der Wetterlagen im Vergleich von aGWL und HBGWL. So hat sich die Häufigkeit der Wetterlage WZ deutlich reduziert (von 1.815 Tagen bei den HBGWL auf 1.373 Tage bei den aGWL). Sie bleibt zwar damit die häufigste Wetterlage, ist jedoch nicht so dominierend wie in den HBGWL. Bei anderen Wetterlagen (BM und TRW) trat eine Halbierung der Häufigkeit oder ein noch stärkerer Rückgang auf. Andererseits haben sich die Häufigkeiten etlicher Wetterlagen deutlich erhöht. Diese Entwicklungen wurden auch im Rahmen der Automatisierung der Bestimmungsmethode (JAMES 2007) beobachtet.

3.3.2 Zeitliche Entwicklungen im Klima der Gegenwart

Im Zusammenhang mit der Änderung der Häufigkeit bestimmter Lagen wurden einige interessante zeitliche Verläufe zutage gefördert, wie Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen.

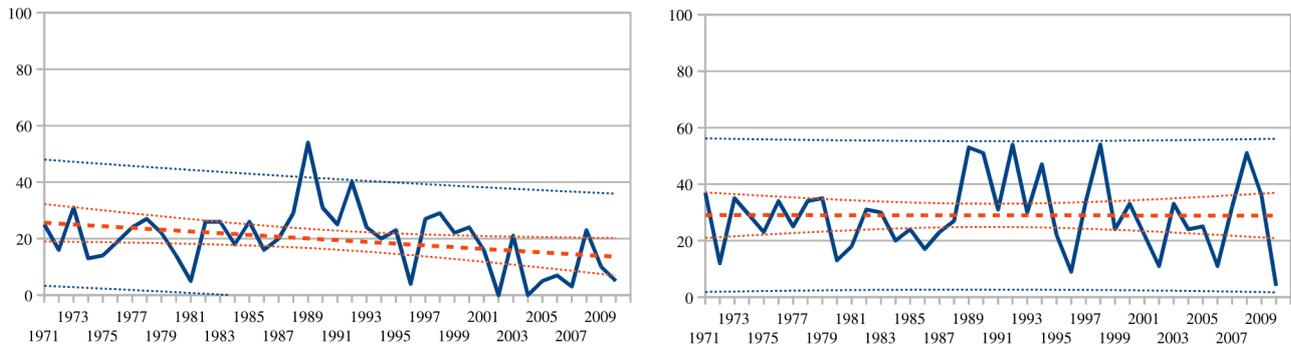


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der Häufigkeit der GWL 1 (WA). Links: Bestimmt nach dem manuellen Verfahren von HESS & BREZOWSKY. Rechts: Bestimmt mit der aGWL-Methodik (jeweils die durchgezogene blaue Linie). Die Trendgerade ist dick und rot gestrichelt eingezeichnet. Die obere und untere Schranke des Vertrauensbereichs ist dünn rot gestrichelt und die dünn blau gestrichelten Linien geben den Vertrauensbereich der GWL-Werte selbst wieder. Bestimmungszeitraum für den Trend: 1971-2010 (Jahreswerte).

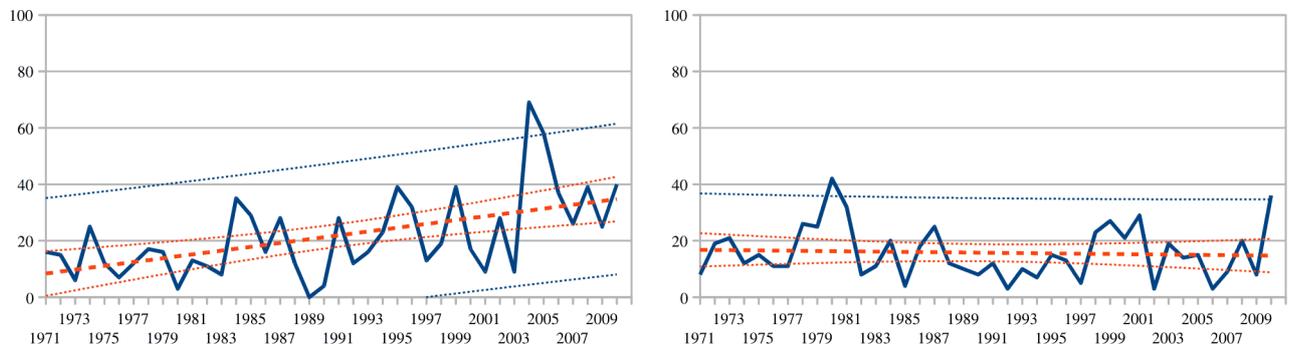


Abbildung 6: Wie Abbildung 5, jedoch für die GWL 17 (TRM).

Dabei wird ein Darstellungsprinzip angewandt, das der Tatsache Rechnung trägt, dass Angaben zu einem linearen Trend (Trendgerade) häufig in zeitliche Entwicklungen eingezeichnet und daraus Trendaussagen abgeleitet werden, diese Trends aber nicht notwendigerweise statistisch abgesichert sind. Die dicke rot gestrichelte Gerade und die beiden dünn rot gestrichelten Kurven in Abbildung 5 und Abbildung 6 illustrieren diesen Sachverhalt. Die dünnen Linien markieren den 95 %-Vertrauensbereich für die Trendgerade, d. h. sie geben den „Aufenthaltsraum“ an, in dem sich diese Gerade mit 95 % Wahrscheinlichkeit befindet. Die alternativen Lagen der Trendgerade können, wie das Beispiel zeigt, dabei sowohl nach oben oder unten versetzt sein; es kann aber auch eine stärkere oder schwächere Neigung der Geraden zu dieser Wahrscheinlichkeitsstufe nicht ausgeschlossen werden. Die Variabilität, die Anzahl der analysierten Werte und die Irrtumswahrscheinlichkeit sind die bestimmenden Faktoren für das Konfidenzintervall der Trendgeraden. Es ist erkennbar, dass im Beispiel durch die Werte sowohl eine steiler verlaufende Gerade als auch eine Gerade praktisch ohne Trendentwicklung verlaufen könnte.

Zudem ist in Abbildung 5 und Abbildung 6 auch mit gestrichelten dünnen blauen Linien der 95 %-Vertrauensbereich der dick blau gezeichneten Häufigkeiten der GWL markiert. Dieser kann als Indikator für mögliche Ausreißer interpretiert werden. In den Erläuterungen liegt der Fokus jedoch auf den Trendgeraden und den Hinweisen auf deren alternative Lage.

Darstellungen dieser Art setzen (i) einen linearen Trend voraus und (ii) die Vertrauensbereiche der Trendgeraden und der eingehenden Werte sind natürlich nur für Zählungen > 0 definiert und sinnvoll. Wenn also die Trendgerade oder ein Teil der Konfidenzintervalle unterhalb der x-Achse liegen würde, so sind sie nicht eingezeichnet; derlei Kurvenverläufe sind durch das rein mathematische Konzept begründet. Nichtsdestotrotz kann das Konfidenzintervall der Trendgerade wichtige Zusatzinformation liefern.

An den zeitlichen Entwicklungen lässt sich zudem ein interessanter Effekt ablesen: Während die manuelle HBGWL-Klassifikation für die GWL 1 (WA) einen relativ deutlichen Trend nahelegt⁷, ist bei der aGWL-Bestimmung weder ein zu- noch ein abnehmender Trend erkennbar. Abbildung 6 zeigt ein weiteres Beispiel für die GWL 17 (TRM). Es fällt auf, dass z. T. starke Trendentwicklungen in den manuellen HBGWL durch das algorithmisierte Verfahren nicht bestätigt werden. Eine systematische Betrachtung der Trendentwicklungen aller GWL ergab, dass in den HBGWL die Neigung zu relativ starken Trends ausgeprägter ist als in den aGWL.

3.3.3 Nutzung der aGWL in Klimaszenarios

Über die diagnostische und vergleichende Ebene, wie in Abschnitt 3.3.2 gezeigt, sind erste Ergebnisse bezüglich der Unterschiede und der Plausibilität von manueller und algorithmisierter GWL-Bestimmung erlangt worden. Der Hauptimpetus zur Erstellung der aGWL liegt jedoch darin, dass sie relativ einfach auf Klimamodellergebnisse angewandt werden können – eine Aufgabe, die weder vom Arbeitsaufwand auf empirisch-manuelle Weise gemeistert werden kann, noch in den Resultaten frei von Subjektivität und potenziellen künstlichen Trends wäre.

In AP 1 wurde der Versuch unternommen, die GWL „in die Klimamodelle hineinzutragen“. Dazu erfolgte eine Wiedererkennung von aGWL-Mustern in den täglichen Realisierungen des Klimamodells. Das Ergebnis einer solchen Projektion der GWL-Häufigkeiten ist in Abbildung 7 dargestellt.

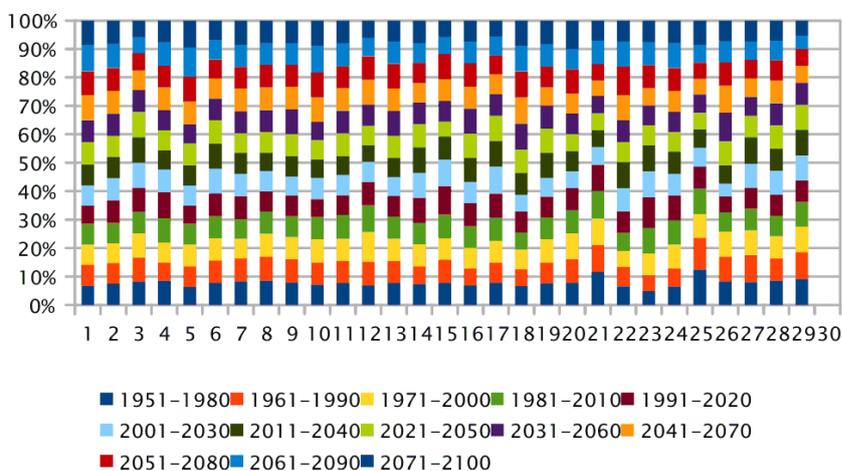


Abbildung 7: Häufigkeit der 29 aGWL in den Klimamodell-Ergebnissen von ECHAM5-MPI/OM Lauf 1 (bis 2000: 20C-Daten, danach: Szenario A1B). Ermittlung der Häufigkeiten auf der Basis von gleitenden 30-jährigen Mittelwerten.

⁷ Die vorsichtige Formulierung wurde gewählt, weil der 95 %-Vertrauensbereich auch einen Nichtanstieg der Trendgeraden möglich erscheinen lässt.

In dieser Abbildung erscheint eine Fülle von Informationen, weil Ergebnisse für alle 29 aGWL und alle 30-jährigen Zeiträume zwischen 1951-1980 und 2071-2100 dargestellt sind. Hervorzuheben sind einige Grundtatsachen:

- Wäre die Häufigkeit der einzelnen aGWL über die Zeit unveränderlich, dann bestünden die farbigen Säulen aus immer gleich langen Segmenten.
- Unterschiede in der Aufteilung der Säulen weisen darauf hin, dass bestimmte aGWL in ihrer Häufigkeit schwanken (Beispiel: aGWL 19–22).
- Ein systematisches Kürzerwerden der farbigen Abschnitte von unten nach oben innerhalb einer Säule deutet auf eine Abnahmetendenz dieser aGWL mit der Zeit hin. Analoges gilt für erkennbares Längerwerden.

Gibt es möglicherweise Trendentwicklungen bei den projizierten Häufigkeiten in den drei Läufen von ECHAM5 MPI-OM, Szenario A1B? Dazu wurden für jede aGWL und jeden der drei Modell-Läufe untersucht, welche Korrelation zwischen den Häufigkeiten und der Zeit besteht, ein Maß für Vorhandensein und Stärke eines Trends. Dies ist in Abbildung 8 dargestellt. Wie dort zu erkennen ist, bewegen sich die Korrelationen in einem Wertebereich von rund $\pm 0,2$.

Die ECHAM5-Läufe zeigen unterschiedlich starke Trendänderungen, die z. T. sogar je nach Lauf gegensinnig sind. Es sei allerdings hinzugefügt, dass eine Korrelation einen Wert von 0,48 aufweisen muss, um auf dem 95 %-Niveau signifikant zu sein. Das heißt, die Zusammenhänge sind zwar in Andeutungen erkennbar, aber ihre Belastbarkeit ist gering.

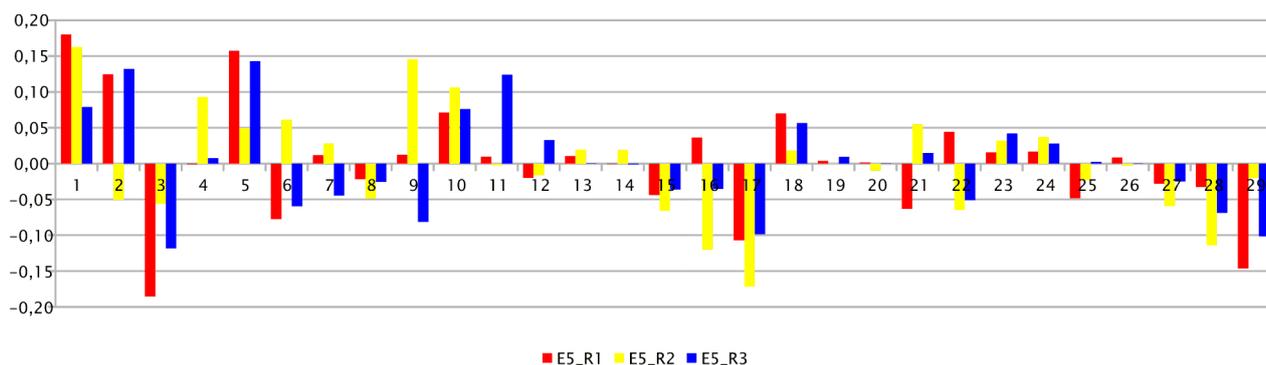


Abbildung 8: Korrelation zwischen den Häufigkeiten und der Zeit (Maß für die Trendneigung; positive Werte: Anstieg, negative Werte: Rückgang) für die aGWL in gleitenden 30-jährigen Perioden (1951-1980, 1961-1990, ..., 2061-2090, 2071-2100). Analysiert wurden die ECHAM5 Läufe 1 bis 3 auf der Basis des SRES-Szenarios A1B.

3.4 Fazit

Eine Wiedererkennungsrate von unter 50 % mag gering erscheinen, aber sie ist ein großer Schritt vorwärts im Vergleich zu anderen Versuchen, mit einem automatisierbaren Verfahren die HBGWL zu reproduzieren. Die aGWL reproduzieren das Verhalten der HBGWL bezüglich der Häufigkeit in der Gegenwart und der Trendentwicklung nicht immer befriedigend – es ist nicht abschließend zu klären, ob dies überwiegend am „Faktor Mensch“ in den HBGWL oder an anderen systemimmanenten Faktoren der Verfahren HBGWL und aGWL liegt. Es gibt aber auch Indikatoren, die darauf hinweisen, dass beide Verfahren durchaus in der Lage sind, die Vielfalt der Zirkulationsformen zu beschreiben, weil z. B. die Variabilität der HBGWL von den aGWL gut repro-

duziert werden konnte. Bei einem Test mit Daten eines GCM wurde festgestellt, dass die aGWL die Unterschiede zwischen den einzelnen Läufen gut herausarbeiten, aber mögliche Trendentwicklungen nur schwach aufscheinen.

Warum wird der Aufwand einer objektivierten Großwetterlagen-Klassifikation überhaupt betrieben? Automatisiertes Klassifizieren hat per se den Vorteil, dass große Mengen von Daten, z. B. von Klimamodell-Rechnungen, ökonomisch und einheitlich analysiert werden können. Die HBGWL beinhalten zudem, wie auch im Rahmen der COST733-Aktion, die zur Aufgabe hatte, Klassifikationsverfahren für Zirkulationsmuster zu vergleichen und zu evaluieren, wiederholt festgestellt, ein vergleichsweise hohes Maß an synoptischer Erkenntnis und sind damit als Zielgröße für das Aufstellen eines objektivierten Verfahrens, wie die aGWL, gut geeignet.

4 Ergebnisse Arbeitspaket 2 – Darstellbarkeit von Extremindikatoren durch die aGWL

4.1 Kontext

Nachdem in AP 1 eine objektivierte Methodik zur Identifikation von Großwetterlagen entwickelt und deren Sinnhaftigkeit bei der Anwendung auf Klimaszenario-Rechnungen unterstrichen wurde, wird in AP 2 der Frage nachgegangen, welche Zusammenhänge zwischen den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Extremindikatoren und den aGWL bestehen. Vorhergehende Untersuchungen mit HBGWL und WLK nach DITTMANN et al. (1995) hatten ergeben, dass die betrachteten Klassifikationen wenig geeignet sind, als Proxy (d. h. indirekt zu verwendende Alternativgröße) für die Indikatoren sind. Im Grunde besteht die Crux darin, dass in der Regel relativ viele Klassen gebildet werden (HBGWL: 30, WLK: 40) und sowohl die Repräsentativität als auch die statistische Stabilität vielfach gering sind. Zudem gibt es bei jeder Wetterlagenklasse, auch wenn die Zahl der Klassen wie bei WEREX vergleichsweise gering ist, eine Vielzahl von „Gegenbeispielen“, an denen zwar das betrachtete Extrem auftritt, aber eben im Zusammenhang mit ganz unterschiedlichen Wetterlagen. Die These wurde aufgestellt, dass die betrachteten Klassifikationen nicht die Extreme, sondern das mittlere Verhalten des Klimas im Fokus haben und daher nicht optimal für den Brückenschlag zu Extremindikatoren geeignet sind.

Die aGWL stellen eine Größe dar, über deren Zusammenhang mit Extremen zunächst nur spekuliert werden konnte, wiewohl es im Vorfeld Anlass zur Vermutung gab, sie haben wegen der (gewollten) relativ großen Ähnlichkeit mit den HBGWL ebenfalls ihre Stärken bei der Beschreibung von mittleren Zuständen und weniger bezüglich der Extremindikatoren.

Die Analyse der statistischen Zusammenhänge erfolgt mit zwei Ansätzen:

- Bestimmung der *Korrelationen* zwischen aGWL und Extremindikatoren, als Vergleich werden auch Korrelationen der Extremindikatoren mit den HBGWL vorgestellt. Die Ergebnisse finden sich in Abschnitt 4.2.
- Nutzung von *Verifikationsmaßen*, in Analogie zu den Untersuchungen in der ersten KLIWETT-Phase, für die 29 aGWL und einige der seinerzeit betrachteten Indikatoren. Die Ergebnisse finden sich in Abschnitt 4.3.

4.2 Korrelationsbetrachtungen

Generell werden die Analysen der Zusammenhänge zwischen den Indikatoren und den aGWL für den durch die aGWL vorgegebenen Zeitrahmen 1981–2010 durchgeführt. Eine Ausnahme bildet die Größe PM₁₀, für die erst seit 2000 Daten verfügbar sind. Die Extremindikatoren der zweiten KLIWETT-Phase (Abschnitt 2.2) sind anhand von verschiedenen Vergleichszeiträumen definiert: Bei einigen ist dies evident (die Diagnose von Eistagen im Sommer oder Tropennächten im Winter ist nicht sinnvoll). Bei anderen zeigt sich auf Grund einer deutlichen Saisonalität (z. B. PM₁₀), dass nur ein Teil des Jahres für Untersuchungen relevant ist. Wiederum andere (z. B. Trockenperioden oder Starkniederschlagsperioden) werden nur für das Gesamtjahr betrachtet. Außerdem gibt es Indikatoren (z. B. 3-Tage-Niederschlag, das Proxy für Hochwasser oder Starkwind), die für mehrere Zeiträume differenziert analysiert werden. Schließlich gibt es einen Indikator (Spätfröste), der einen eigenen Definitionszeitraum, die so genannte Vegetationsperiode I (April bis Juni), besitzt.

Tabelle 2: Korrelation von KLIWETT-Extremindikatoren mit Großwetterlagen der Typen aGWL und HBGWL

Indikator	Definitionszeitraum	Korrelation mit aGWL	Korrelation mit HBGWL
Trockenperioden	Jahr	0,10	0,11
3-Tage-Niederschlag	Jahr	-0,01	-0,02
	Sommerhalbjahr	0,05	0,05
	Winterhalbjahr	-0,13	-0,16
Niederschlagsperioden	Jahr	0,03	0,04
Heiße Tage	Sommerhalbjahr	0,05	0,04
Hitzewellen	Sommerhalbjahr	0,08	0,05
Eistage	Winterhalbjahr	0,24	0,23
Spätfröste	April-Mai-Juni	0,07	0,02
Starkwind	Sommerhalbjahr	-0,11	-0,09
	Winterhalbjahr	-0,28	-0,28
Schwüle	Sommerhalbjahr	0,07	0,03
Tropennächte	Sommerhalbjahr	0,03	0,02
Trockenwarme Tage	Jahr	0,01	0,00
Feuchtkalte Tage	Jahr	0,04	0,04
PM ₁₀ -Überschreitung	Winterhalbjahr	0,15	0,15

In Tabelle 2 sind die Korrelationen zusammengefasst. Bis auf wenige Ausnahmen (Starkwind im Winter, 3-Tage-Niederschlag im Winter und PM₁₀-Überschreitungen) sind die GWL praktisch nicht mit den Extremindikatoren korreliert. Zusätzlich ist erkennbar, dass die aGWL und die HBGWL bezüglich der Korrelationen vernachlässigbare Unterschiede aufweisen.

4.3 Verifikation von aGWL als Proxies für Klimaindikatoren

Es wurde der Ansatz der Vorhersageverifikation verwendet. Er folgt dem Prinzip: Die „Messung“ der Vorhersageleistung des *Prediktors Klassifikation* für den *Prediktanden Extremindikator* folgt der Annahme, dass die jeweilige Klassifikation gut in der Lage sei, das Eintreten oder Nichteintreten des Extremes zu prognostizieren, d. h. es wird geprüft, ob Zirkulationsmuster und Extrem konsistent miteinander verknüpft sind. In der unten stehenden Veranschaulichung wird die Zeitreihe der Klimamessungen zwischen 1981 und 2010 an der Station Dresden-Klotzsche und das Extrem *Sommertag* ($TX > 25^\circ\text{C}$) verwendet. An allen Tagen, an denen z. B. das aGWL-Muster 1 auftrat, wird hypothetisch eingesetzt, dass es dort auch einen Sommertag gab. Damit wird ein Zustand geschaffen, der sich in einer 2x2-Kontingenztafel (auch Vierfeldertafel genannt) analysieren lässt, denn es lassen sich vier Fälle unterscheiden:

- (a) Sommertag wurde vorhergesagt (d. h. für den Tag x, an dem aGWL 1 auftrat, eingesetzt) und ist auch eingetreten
- (b) Sommertag wurde vorhergesagt, ist aber nicht eingetreten
- (c) kein Sommertag wurde vorhergesagt, aber es gab dennoch einen Sommertag
- (d) kein Sommertag wurde vorhergesagt und es gab auch keinen Sommertag

Das Fachgebiet der Vorhersageverifikation beschäftigt sich u. a. damit, Beurteilungsmaße zu entwickeln, mit denen aus einer Vierfeldertafel (s. Tabelle 3), in die die Anzahl der Varianten (a) bis (d) einzutragen sind, Aussagen zur Qualität einer Vorhersage ermittelt werden können.

Tabelle 3: Beispiel für eine Vierfeldertafel. Nutzung der aGWL-Klasse 1 als Proxy für Sommertage ($TX > 25^\circ\text{C}$). Station: Dresden-Klotzsche, Sommermonate (Juni-Juli-August) der Jahre 1981-2010

	Sommertag aufgetreten		Zeilensumme
	ja	nein	
<i>Sommertag</i> vorhergesagt	80 (a)	188 (b)	268 (a+b)
<i>kein Sommertag</i> vorhergesagt	709 (c)	1.783 (d)	2.492 (c+d)
Spaltensumme	789 (a + c)	1.971 (b + d)	
Gesamtzahl			2.760

Das bedeutet, im Verlauf der untersuchten 30 Sommer (1981–2010, 2.760 Tage) treten 789 Tage (28,6 %) auf, an denen das Kriterium *Sommertag* erfüllt ist, davon 80 an Tagen mit der aGWL 1. Diese Lage tritt im Untersuchungszeitraum an insgesamt 268 Tagen (9,7 %) auf.

Ein abgeleitetes Maß ist die bedingte Wahrscheinlichkeit der vier Fälle

- (a) Sommertag trat auf und wurde vorhergesagt: $a/(a+b) = 0,30$,
- (b) Sommertag trat auf, wurde aber nicht vorhergesagt: $b/(a+b) = 0,70$,
- (c) Sommertag trat nicht auf, wurde aber vorhergesagt: $c/(c+d) = 0,28$,
- (d) Sommertag trat nicht auf und wurde auch nicht vorhergesagt: $d/(c+d) = 0,72$.

Die getestete Vielzahl von Verifikationsmaßen für die aGWL in Kombination mit Extremindikatoren erbrachte wie für die Klassifikationen WLK (nach Dittmann) und WEREX nur eine schlechte bis sehr schlechte Vorhersageleistung.

Für einige Verifikationsmaße, die die Spezifika besonders gut herausarbeiten, sind Ergebnisse mit den aGWL in Tabelle 4 aufgeführt. Die Maße werden nachfolgend vorgestellt:

TS (Threat Score)

Ein Maß für die Genauigkeit : Es wird gemessen, wie der Zusammenhang zwischen Vorhersagepaaren (Prognose des Eintretens und des Nichteintretens des Ereignisses) und dem Ereignis, das sie vorhersagen sollen, ist. Ist die Vorhersage perfekt, d. h. immer wenn das Auftreten eines Sommertages vorhergesagt wird (im Beispiel durch das Auftreten der aGWL 1) und außerdem bei Nichtauftreten eines Sommertages auch die Prognose dieses so wiedergibt, dann sind sowohl (b) als auch (c) = 0.

Zur Abschätzung dieser Eigenschaft existiert ein so genannter Threat Score (*TS*, also das „Bedrohungs-Maß“, auch Critical Success Index, CSI genannt). In ihm wird zum Beispiel das Auftreten von Fehlprognosen und von nicht vorhergesagten Ereignissen „bestraft“

$$TS = \frac{a}{(a + b + c)}$$

Der Wertebereich des *TS* liegt zwischen 1 für eine perfekte Vorhersage (nur zu erzielen, wenn sowohl b als auch c = 0 sind) und 0 für eine nicht vorhandene Vorhersageleistung.

FAR (False Alarm Rate)

Ein sehr einfaches und effizientes Maß für Zuverlässigkeit und Auflösung. Die vier bedingten Wahrscheinlichkeiten (auf S. 37 erwähnt), stellen für sich bereits Beurteilungsmaße dar. Das dort unter (b) erwähnte Maß ist insbesondere bedeutungsvoll und wird unter dem Namen False Alarm Ratio (*FAR*, Fehlalarmverhältnis) verbreitet zur Verifikation verwendet. Es handelt sich um den Anteil der Vorhersagen, die sich als Fehlprognosen herausstellen

$$FAR = \frac{b}{(a + b)}$$

Im günstigsten Fall ist die Zahl der Fehlvorhersagen $b = 0$ und damit $FAR = 0$. Das entgegengesetzte Extrem bedeutet, dass es *nur Fehlvorhersagen* gibt, damit ist die Zahl der zutreffenden Vorhersagen $a = 0$; folglich ist in diesem Fall $b = b$ und $FAR = 1$. Damit ist die *FAR* umgekehrt definiert wie alle anderen Verifikationsmaße, denn eine gute Leistung wird von *FAR* mit 0 und eine maximal schlechte mit 1 wiedergegeben. Um die Zahlenbereiche anzugleichen wird auch oft $1-FAR$ verwendet.

HSS (Heidke Skill Score)

Dieses Maß gehört zu den etwas komplexeren relativen Verifikationsmaßen, auch Skill Scores genannt. Der Heidke Skill Score (HSS) definiert ein Referenzmaß für die Genauigkeit von Vorhersagen auf der Basis des Vergleichs mit einer Zufallsvorhersage. Es wird also gemessen, ob gegenüber einer Zufallsvorhersage durch ein alternatives Verfahren ein Gewinn erzielt wird. Zur Herleitung ist anzumerken, dass sich die Wahrscheinlichkeit einer zutreffenden Vorhersage für das Eintreten eines Ereignisses wie folgt aufschreiben lässt

$$p(a) = \frac{(a + b)}{n} \frac{(a + c)}{n} = \frac{(a + b)(c + d)}{n^2}$$

mit n = Anzahl der Fälle. Die Wahrscheinlichkeit einer zutreffenden Vorhersage des Nichtauftretens eines Ereignisses ist

$$p(d) = \frac{(b + d)(c + d)}{n^2}$$

Werden beide Ansätze miteinander verbunden, so errechnet sich der Heidke Skill Score *HSS* nach einigen Umformungen zu

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(b + d) + (a + b)(b + d)}$$

Für eine perfekte Vorhersage ist $HSS = 1$. Wenn die Vorhersage identisch zu einer Zufallsvorhersage ist, dann ist $HSS = 0$. Negative Werte von *HSS* werden dann erreicht, wenn die Vorhersageleistung schlechter als bei der Referenz-(Zufalls-)Vorhersage ist.

Anmerkung 1: Bei Skill Scores sind negative Werte für die Vorhersagequalität möglich, wenn die Prognose durch die Methode „verschlimmbessert“ wird.

Anmerkung 2: Es ist sicher zu stellen, dass auch „faire Beurteilungen“ vorgenommen werden. So ist es unzulässig, etwa die Vorhersageleistung von Eistagen in den Sommermonaten zu testen.

Tabelle 4: Verifikationsmaße für einige Extremindikatoren bei Nutzung der aGWL-Klassifikation als Proxy. Station: Dresden-Klotzsche. Zeitraum 1981-2010. Angegeben sind die in den 29 aGWL angetroffenen höchsten (+) bzw. niedrigsten (-) Werte.

Extremindikator	Zeitbereich	TS +	TS -	1-FAR +	1-FAR -	HSS +	HSS -
Eistag	Winter (DJF)	0,10	0,00	0,80	0,00	0,22	0,01
Frosttag	Winter (DJF)	0,08	0,00	0,38	0,00	0,26	0,00
Heizgradtag GT15	Jahr	0,13	0,01	0,95	0,57	0,11	0,01
Sommertag	Sommer (JJA)	0,08	0,00	0,82	0,00	0,22	0,00
Heißer Tag	Sommer (JJA)	0,10	0,00	0,41	0,00	0,19	0,01
Trockener Tag	Sommer (JJA)	0,10	0,01	0,82	0,25	0,21	0,01
Feuchter Tag	Sommer (JJA)	0,07	0,00	0,36	0,03	0,22	0,02
Niederschlag>P90	Winter (DJF)	0,31	0,00	0,51	0,00	0,48	0,01
Niederschlag>P90	Sommer (JJA)	0,04	0,00	0,07	0,00	0,10	0,01

Die Spannweite von *TS*, *FAR* und *HSS* für die aGWL-Klassen ist in Tabelle 4 angegeben. Die benutzten Definitionen sind:

- Eistag: $TX < 0 \text{ °C}$
- Frosttag: $TN < 0 \text{ °C}$
- Heizgradtag GT15: Summe der Tagesmitteltemperatur (TM), sofern sie unter einer Schwelle x liegt, z. B. für $x = 15 \text{ °C}$: $\Sigma(15C - TM)$; $TM < 15 \text{ °C}$
- Sommertag: $TX > 25 \text{ °C}$
- Heißer Tag: $TX > 30 \text{ °C}$
- Trockener Tag: Anzahl der Tage, an denen die Tagesniederschlagssumme $\leq 1 \text{ mm}$ ist
- Feuchter Tag: Anzahl der Tage, an denen die Tagesniederschlagssumme $> 1 \text{ mm}$ ist
- Niederschlag>P90: Starkniederschlagstag. Bestimmt wird die Anzahl der Tage, an denen der Niederschlag größer als das stationsspezifische 90-Perzentil der Verteilung ist. Dazu wird eine Reihe erzeugt, die alle Ta-

ge mit Niederschlag (d. h. $RR > 0$ mm) enthält. Diese wird größensortiert und der Niederschlagswert an demjenigen Rangplatz, der 90 % der analysierten Tage entspricht, wird als 90-Perzentil verwendet.

Die Verifikationsmaße *TS* und *HSS* zeigen durchweg niedrige Werte an, d. h. mit ihnen gemessen liegt, auch für einzelne aGWL, keine nennenswerte Vorhersageleistung vor. Einige Ausnahmen seien hier hervorgehoben:

- Die Auffälligkeit bezüglich des *TS* und des Indikators „Niederschlag>P90“ im Winter rührt von einer aGWL-Klasse (der Klasse 2) her, die in der Tat eine gewisse Vorhersageleistung zu besitzen scheint. Rund die Hälfte aller Tage, an denen dieser Indikator auftritt, sind mit der aGWL-Klasse 2 assoziiert. Der relativ hohe Wert von *1-FAR* (0,51) stammt ebenfalls aus dieser Klasse und weist, wie der gleichfalls aus der aGWL-Klasse 2 stammende hohe *HSS*-Wert von 0,48, auf das Vorhersagepotenzial hin. Allerdings wird eine solche Vorhersageleistung bezüglich des Indikators „Niederschlag>P90“ von keiner anderen Klasse auch nur annähernd erreicht.
- Es kommen durchaus hohe Werte für *1-FAR* vor. Diese sind aber auf eine Problematik des ansonsten intuitiv gut erfassbaren *FAR*-Maßes zurückzuführen. Es werden von *FAR* nur die „Positiv-Fälle“ betrachtet. Anders als bei *TS* oder *HSS* wird ausgeblendet, dass es durchaus eine große Zahl von Fällen geben kann, an denen zwar der Indikator auftritt, dies aber in Zusammenhang mit einer ganz anderen Klasse⁸. Wenn eine Klasse selten vorkommt, also die Zeilensumme $a+b$ (vgl. Beispiel in Tabelle 3) klein ist, dann besteht zudem eine besondere Sensitivität, dass der Quotient $b/(a+b)$ eine Zahl nahe 0, d. h. infolge der Transformation zu *1-FAR* eine Zahl nahe 1 hervorbringt. Diese beiden Gründe führen zu den relativ hohen Werten von *1-FAR*, aber immer nur bei einzelnen Klassen. Ein besonders eklatantes Beispiel liefert aGWL-Klasse 12 in Zusammenhang mit den Heizgradtagen. Von den insgesamt rund 11.000 analysierten Tagen gehören nur 105 (weniger als 1 %) der Klasse 12 an. Bei 100 dieser 105 Tage ist tatsächlich eine Assoziation mit den Heizgradtagen vorhanden, was zu einem *FAR* von rund 0,05 und einem *1-FAR* von rund 0,95 führt. Allerdings scheint insgesamt bei den Heizgradtagen eine Neigung zu gut belegten Positiv-Fällen vorzuliegen. In der Zusammenschau mit *TS* und *HSS* stellt sich allerdings schnell heraus, dass dies bei einer Betrachtung, die die „Gegenbeispiele“ einbezieht, zu keiner haltbaren These führt.

4.4 Fazit

Die Assoziation von aGWL mit Extremindikatoren ist als gering bis sehr gering zu bezeichnen. Der Test erfolgte sowohl mit Hilfe von Korrelationen als auch mit dem Ansatz, dass die Klassen der aGWL-Klassifikation als Proxy für die Extremindikatoren dienen könnten. Letzteres setzt voraus, dass sowohl das Auftreten einer aGWL Klasse häufig gemeinsam mit dem Auftreten eines Indikators vorkommt als auch das Gegenteil der Fall ist, d. h. der Indikator nur in Zusammenhang mit sehr wenigen Klassen auftritt. Mit Verifikationsmaßen konnte dieser Sachverhalt nur für wenige, selten vorkommende Klassen nachgewiesen werden. Damit ist eine Vorhersageleistung durch das Gesamtsystem aller aGWL Klassen nur gering bis sehr gering. Die geringe Assoziation von aGWL mit Extremen ist im Wesentlichen begründet (i) durch die relativ hohe Klassenzahl und (ii) die Optimierung der Klassifikation auf mittlere Zustände der Zirkulation und nicht auf Extreme.

⁸ Hierin liegt auch ein Nachteil von Klassifikationen, die eine hohe Klassenzahl bilden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Indikator im Zusammenhang mit irgendeiner anderen als der gerade untersuchten Klasse auftritt, steigt natürlich mit der Klassenzahl.

5 Ergebnisse Arbeitspaket 3 – Methodenentwicklung KlaMuKo

5.1 Kontext

Die „klassische“ Art der Klassifikation von atmosphärischen Mustern ist auf dem Paradigma begründet, dass es semi-stabile Muster in den atmosphärischen Strukturen gibt und dass diese Muster in sich relativ homogen sind – es ist somit sinnvoll, diese Muster zu identifizieren und die durch sie gebildete „Unterteilung“ der Atmosphärenzustände als Basis für Muster-spezifische Studien zu nutzen.

Eine Ausprägung dieser „klassischen“ Identifikationen ist das Prinzip *Circulation to Environment* (YARNAL 1993), bei dem morphologische Ähnlichkeiten in Feldern atmosphärischer Größen genutzt werden, um diese Ähnlichkeiten zu quantifizieren. Die Bestimmung der einzelnen Muster kann dabei empirisch/visuell geschehen (Beispiel HBGWL) oder durch eine Vielfalt von mathematischen Konzepten (EOFs, Cluster, Neuronale Netze ...⁹). Es können Muster in einzelnen Feldern, wie z. B. Bodendruck, Geopotenziale verschiedener Niveaus oder Temperatur zur Identifikation eingesetzt werden oder auch eine Kombination mehrerer Felder. Eine wichtige Anwendung der Klassifikation ist, sie im statistischen Sinn als eine „Schichtung“ der atmosphärischen Zustände anzusehen und Untersuchungen innerhalb der als relativ homogen postulierten Klassen vorzunehmen. In der Tat ist eine Reduktion der Varianz durch eine solche Schichtung erzielbar, die Verfahren besitzen also ein statistisches Erklärungspotenzial (aufgezeigt, z. B. in Tab. 2 (Enke & Spekat, 1997)), wobei dieses Potenzial bei den einzelnen Wetterelementen unterschiedlich groß ist. Sie ermöglichen aber eine Zirkulationsmuster-spezifische Beschreibung des lokalen Klimas.

Eine alternative Ausprägung der „klassischen“ Identifikation ist das Prinzip *Environment to Circulation* (Yarnal, 1993), bei dem zunächst lokale Wetterelemente betrachtet werden. Diese werden zu Gruppen zusammengefasst. Danach wird die großräumige Zirkulation spezifisch für die einzelnen Wertebereiche der lokalen Wetterelemente durchgeführt. Entgegengesetzt zum *Circulation to Environment*-Prinzip wird also der Frage nachgegangen, welche Wertebereiche eines Wetterelements von welchen Zirkulationsmustern „verursacht“ werden. Wie in einer Publikation demonstriert (Spekat, Kreienkamp, & Enke, 2010), führt die *Environment to Circulation*-Strategie zu einer wesentlich schärferen Trennung der lokalen Auswirkungen von Zirkulationsmustern. Die Strategie ist das Herzstück des WETTREG- (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2010) und des WEREX- (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2011a) Verfahrens zur Erstellung von regionalisierten Datensätzen für das Studium des Klimawandels in hoher räumlicher Auflösung und als Basismaterial für Klimaimpaktstudien. Leistungsvergleiche der beiden Zirkulationsmuster-Bestimmungsstrategien zeigen, dass die Reduktion der Varianz der *Environment-to-Circulation*-Strategie diejenige der *Circulation to Environment*-Strategie noch übertrifft.

Die Anwender der regionalisierten Daten, erstellt mit WETTREG/WEREX, könnten zufrieden sein, verfügen sie doch über das Ergebnis der Anwendung eines statistischen Verfahrens, das (i) rechentechnisch sehr ökonomisch und (ii) von hohem Varianz-Erklärungspotenzial ist. Je detaillierter die Vorgehensweise in den Modellen, die mit den regionalisierten Daten arbeiten, ist und je ambitionierter die Zielstellungen werden, desto deut-

⁹ Die COST-Aktion 733 widmete sich dem Vergleich von Klassifikationsverfahren des Typs *Environment-to-Circulation*. Es gibt mehrere Publikationen dazu (HUTH et al. 2008; PHILIPP et al. 2010; BECK & PHILIPP 2010).

licher werden auch die Defizite in den Verfahren. Es mag für eine Vielzahl von Analysen wertvoll sein, die Mittelwerte zu beschreiben und auf dieser Basis auch Entscheidungen zu treffen. Im Laufe der Zeit sind, insbesondere im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel, auch Fragestellungen entstanden, die die Extremwerte tangieren. Ziel der Bemühungen um eine bessere Beschreibung von Extremwerten ist das in AP3 entwickelte, völlig neuartige Konzept von „Mustern“, das in der Folge dargestellt wird.

5.2 Methode

Wenn es problematisch ist, morphologisch ähnliche Zustände in Feldern von Atmosphärengrößen zu finden, die Extreme adäquat beschreiben, welche Eigenschaften der Atmosphäre sind dann mit lokalen und regionalen Extremen verbunden? Zu diesem Zweck wird das statistische Analyseverfahren multiple Korrelation/Regression eingesetzt. Dabei geht es darum, eine Größe indirekt aus anderen zu generieren. Dies ist ein probates Vorgehen, zum Beispiel bei der Rekonstruktion der Bodentemperatur aus der relativen Topografie 1.000/850 hPa. Die auf der o. a. Basis entwickelte Methodik heißt **KlaMuKo** (Klassifikation durch multiple Korrelation).

Eine wesentliche Entwicklung im Rahmen von KlaMuKo folgt diesen Leitgedanken: Die meisten „klassischen“ Verfahren nehmen eine Optimierung der Zirkulationsmuster vor, d. h. sie durchlaufen mehrere Stufen, in denen iterativ ein optimaler Zustand bezüglich der Zielgröße *Beschreibung der Mittelwerte* angestrebt wird. Das KlaMuKo-Verfahren führt ganz bewusst keine Iterationsschritte durch, weil in ihrer Folge der schon initial erreichte, extreme Zustand einer maximalen Separierung der Muster der Regressionskoeffizienten „verwischt“ würde. Das Ergebnis wäre nach dem Ausführen von Iterationsschritten wieder die Annäherung einer Beschreibung mittlerer Zustände und nicht der Extreme.

5.2.1 Räumliche Fokussierung von Extremen: Das Stations-Clusterverfahren

Wenn Extreme untersucht werden, ist eine räumliche Balance wichtig. Auf der einen Seite steht die Repräsentativität, gefördert durch die Mittelung von Daten über eine möglichst *große* Region und auf der anderen Seite steht die Trennschärfe, gefördert durch die Nutzung einer möglichst *fokussierten* Region.

Beim Niederschlag, insbesondere bei Extremen des Niederschlags, ist es z. B. nicht zielführend, zur Identifikation von Ereignissen eine Region von der Größe Deutschlands zu verwenden. Selbst die gesamte Fläche von Sachsen ist als Zielregion noch zu groß, denn es gibt wichtige Faktoren, die Einfluss auf die Extreme nehmen: (i) Höhenlage und (ii) geografische Länge. Für die Temperatur sind die repräsentativen Regionen bezüglich der Extreme größer; dennoch ist eine differenzierende Betrachtung der Region sinnvoll. Dazu wurde ein Stations-Clusterverfahren entwickelt, dessen Grundzüge in Abschnitt 2.4 erläutert sind.

5.2.2 Screening-Prozess

Als Ausgangspunkt des Verfahrens wird eine Zielgröße definiert, beispielsweise das Mittel des Niederschlags an einer Zahl von Stationen. Es wird angestrebt, diese durch Werte einer atmosphärischen Feldgröße oder eine Kombination aus mehreren Feldgrößen zu rekonstruieren. Dabei kommt ein Screening-Verfahren zum Einsatz, das nach ähnlichen Prinzipien aufgebaut ist wie das Screening bei der Ermittlung der aGWL.

Es werden im ersten Schritt Korrelationen zwischen der Zeitreihe der Zielgröße und der Zeitreihe an jedem Gitterpunkt¹⁰ von insgesamt 60 atmosphärischen Feldern¹¹. Als Beispiel könnte so ermittelt werden, dass der Sommerniederschlag der Stationsgruppe von der Vorticity in 850hPa an den x/y-Koordinaten 13/10 am besten reproduziert wird. Wohlgedenkt: Es handelt sich in dieser Phase des Prozesses um das Screening mit *einem* Feld, auf dem Weg zur Ermittlung der *ersten Regressionsgröße*.

Für den zweiten Schritt wird die im ersten Schritt ermittelte Regressionsgröße festgehalten und eine Kombination gesucht, die gemeinsam mit dieser eine möglichst hohe multiple Korrelation erreicht. Es folgt noch ein dritter Schritt, bei dem die ersten beiden Regressionsgrößen fixiert werden und die Ermittlung einer weiteren Regressionsgröße stattfindet – unter der Maßgabe, eine möglichst hohe multiple Korrelation zu erhalten. Nach einem vierten und letzten Schritt existieren dann vier Regressionsgrößen (Zeitreihen an Koordinaten in den als „förderlich“ ermittelten Feldern), mit denen weiter gearbeitet wird.

5.2.3 Tägliche Regressionen – Quelle der Muster

Die vier Regressionsgrößen mit der höchsten Relevanz für die Rekonstruktion der Zielgröße sind nun gefunden. Als nächstes wird für jeden Tag ermittelt, welchen Beitrag die einzelnen Regressionsgrößen liefern. Es entsteht also eine Matrix mit N (Zahl der Tage) Zeilen und R (Zahl der Regressionsgrößen) Spalten. Jeder Tag besitzt dabei ein „Muster“ der Regressionskoeffizienten, die *Konfiguration der Koeffizienten*.

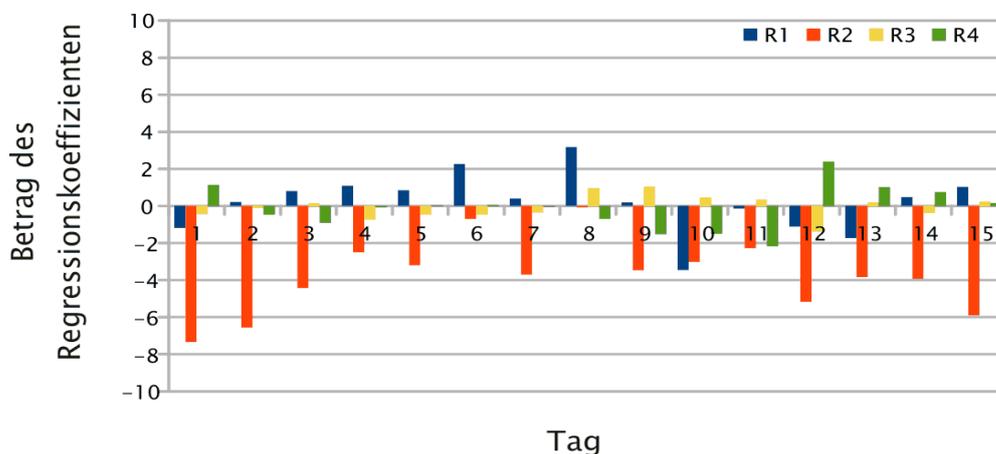


Abbildung 9: Illustration der täglichen Regressionsbestimmung für 15 Beispieltage

In Abbildung 9 ist die Datengrundlage für den KLaMuKo-Berechnungsprozess illustriert. Die Balken zeigen die Beträge der vier Regressionskoeffizienten $R1$ – $R4$. Im Beispiel wird sichtbar, wie sich die Koeffizienten und ihre Konfigurationen systematisch ändern.

5.2.4 Klassifikation der Muster

Die nächste Phase des neuen Klassifikationskonzepts setzt die Idee um, dass es Gemeinsamkeiten zwischen Tagen gibt, bei denen die Regressionskoeffizienten einander ähnlich sind. Das Konzept führt diese Idee weiter, indem postuliert wird, dass diese Gemeinsamkeiten noch deutlicher aufscheinen, wenn Muster von Ähnlichkeiten betrachtet werden (z. B. $R1$ hoch, $R2$ niedrig, $R3$ hoch, $R4$ Null).

¹⁰ Verwendet wird ein äquidistantes Gitter mit 21x21 Gitterpunkten in einem Abstand von 100 km, zentriert um die Koordinate 50°N 10°W, errechnet aus NCAR-Reanalysen.

¹¹ Geopotenzial, Temperatur, Feuchte, Advektion, Vorticity, Stabilität etc. in bis zu 4 verschiedenen Niveaus, s. Tabelle 82

Als nächstes folgt eine k-means-Clusteranalyse. Für diese ist zunächst die Bildung einer *Startpartition* notwendig. Diese besteht aus 10 möglichst unähnlichen Mustern der vier Regressionskoeffizienten. Diesen werden in der Folge die Muster der verbleibenden Tage nach einem Ähnlichkeitskriterium zugeordnet. Weil beim in KlaMuKo praktizierten Klassifikationsverfahren der *Konfigurationen von Regressionen*, anders als bei Standardanwendungen des k-means-Clusterverfahrens, keinerlei Austauschschritte vorgenommen werden (s. Erläuterung auf S. 42), ist es von besonderer Bedeutung, dass die Startpartition von vornherein möglichst gut getrennte Teilbereiche des Datenkollektivs bildet.

Als „Keimzelle“ dient ein zufällig ausgewählter Tag mit seiner Konfiguration an Regressionskoeffizienten (R_1 bis R_4). Zu diesem wird der unähnlichste Tag gesucht, d. h. ein Tag, an dem gilt

$$\sqrt{\sum_{i=1}^4 R_i(a) - R_i(test)} \rightarrow \max$$

mit R_i : Regressionskoeffizient; a : Referenztag; $test$: zu testender Tag.

Der so gefundene Tag ist der erste Zentroid **Z1**. Danach wird das oben beschriebene Verfahren weitere $n-1$ Mal angewandt, um die übrigen Zentroide zu finden.

Nachdem die Klassen feststehen, muss für jeden Tag getestet werden, zu welchem Muster (Konfiguration von R_1 bis R_4) seine Konfiguration am besten passt. Dafür wird das Verfahren zur Identifikation der Zentroide in umgekehrter Form angewandt, d. h. es wird für jeden Tag *test* gesucht, für welchen der n Zentroide Z_n diese Bedingung erfüllt ist:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^4 R_i(Z_n) - R_i(test)} \rightarrow \min$$

Am Ende des Zuordnungsschritts ist also für jeden Tag eine Klassifikation anhand der größtmöglichen Ähnlichkeit erfolgt. Sollte dabei eine Klasse weniger als 2 Fälle beinhalten, so wird diese aufgelöst.

5.2.5 Zwei Stufen von KlaMuKo

Die auf den Vorseiten zusammengefassten Verfahrensschritte nutzen die *Gesamtheit aller zu analysierenden Tage* und erzeugen daraus 10 (oder bei zu geringer Besetzung auch weniger) KlaMuKo-Klassen. Dieses wird auch als *Stufe 0* bezeichnet. Viele interessante und für das Studium von Extremen nützliche Erkenntnisse sind bereits aus den Resultaten dieser Stufe zu gewinnen (s. Abschnitte 6 und 7). Bei einzelnen KlaMuKo-Klassen der Stufe 0 entsteht jedoch der Eindruck, dass in ihnen ein relativ breiter Wertebereich zusammengefasst ist und eine weitere Analyse für das Herausarbeiten von Extremzuständen hilfreich sein könnte. Zu diesem Zweck wird, unter Beibehaltung der Stations-Cluster (vgl. Abschnitt 2.4 und Erläuterungen auf S. 37) das KlaMuKo-Verfahren ein weiteres Mal durchlaufen, mit dem Ziel, lediglich die Tage einer Klasse X durch das statistische Verfahren optimal zu beschreiben und nur für diese Untermenge die Verfahrensschritte (erneutes Screening auf der Suche nach möglichen weiteren Prediktoren, Suche nach einer Startpartition mit n Zentroiden, Zuordnung der verbleibenden Tage der Klasse X zu den Zentroiden) anzuwenden. Damit ein solcher KlaMuKo-Lauf auf der Stufe 1 erfolgen kann, müssen einige Voraussetzungen erfüllt werden

- Die Zahl der zur Klasse X zugeordneten Tage muss größer als 20 sein, sonst ist bei der weiteren Suche nach Prediktoren keine statistische Stabilität und Repräsentativität zu erwarten.

- Die Ausgangspartition sollte aus deutlich weniger als 10 Zentroiden bestehen – 2 bis 5 sind, je nach Zahl der in Stufe 1 zu analysierenden Tage der Klasse X, sinnvoll.
- Die Tage der mit Stufe 1 weiter zu optimierenden Untermenge müssen tatsächlich einen Wertebereich des Prediktanden bilden. Wird zum Beispiel die Wahrscheinlichkeit eine binarisierte Größe untersucht (vgl. Abschnitt 2.3) und in den N Fällen einer Klasse X befinden sich ausschließlich Tage, an denen der Prediktand den selben Wert (z. B. 1) besitzt, so ist mit einer Untersuchung der KlaMuKo-Stufe 1 keinerlei differenzierende Beschreibung dieser Klasse möglich.

5.3 Ergebnisse

Beispiel: Winterniederschlag

Veranschaulicht werden soll das Ergebnis für den. Die vier per Screening identifizierten Prediktoren sind:

- Betrag des Geopotenzialgradienten in 850 hPa
- Horizontale Ost-West-Geopotenzialdifferenzen in 850 hPa
- Temperaturadvektion in 850 hPa
- Summenprediktor¹²

Mit diesen Prediktoren wird die in Abbildung 10 dargestellte Konstellation der KlaMuKo-Klassen der Stufe 0 identifiziert. Gut zu erkennen ist die Unterschiedlichkeit der einzelnen Klassen, ein Indiz für hohe Trennschärfe zwischen den Klassen. Die für eine Niederschlagsgröße beachtliche multiple Korrelation von über 0,6 zwischen dem Winterniederschlag und den KlaMuKo-Klassen wurde erreicht. Eine weitergehende Analyse einzelner Klassen (KlaMuKo-Stufe 1) erbrachte eine Differenzierung innerhalb der in Stufe 0 ermittelten Klassen und Wertebereiche. So konnten weiteren Klassen herausgearbeitet werden, die durch besonders hohe Niederschlagsmengen charakterisiert sind. Auch zeigte sich wiederholt eine Gruppe von Regressionsgrößen, wie Feuchte oder Labilität, die in der Screening-Analyse der Stufe 0 von KlaMuKo nicht auftraten, aber in Stufe 1 ebenfalls als zielführend erkannt wurden.

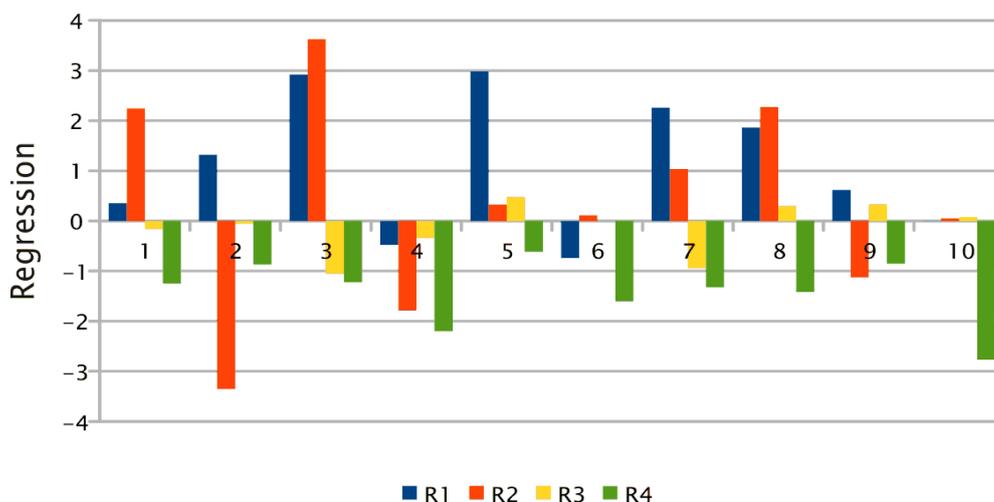


Abbildung 10: Klassifikation auf Basis multipler Regression für den Niederschlag. Eine Stationsgruppierung, wie in Abschnitt 2.4 geschildert, erfolgte anhand des Betrags des Niederschlags; zur Analyse kamen die Stationen in der Gruppe mit dem höchsten Niederschlag. Jahreszeit: Winter (DJF).

¹² Eine Übersichtsgröße, in die fast alle Prediktoren eingehen und die die kumulativen Eigenschaften dieser Größen beinhaltet.

Es zeigt sich eine je nach Zielgröße unterschiedliche Charakteristik der Beschreibungsqualität. Dabei sind multiple Korrelationen von über 0,5 beim Niederschlag als beachtlich einzuschätzen. Mittel-, Minimum- und Maximumtemperatur erreichen wegen ihres starken Zusammenhangs mit der relativen Topografie besonders hohe Korrelationswerte um 0,9. Die Hinzunahme weiterer Größen verbessert die Korrelation bei diesen meteorologischen Parametern nur marginal.

Dieser Abschnitt des Berichts behandelt die Entwicklung einer *Methodik*. Die hier gezeigten Ergebnisse sind als Veranschaulichung gedacht. In Abschnitt 6 werden weitere KlaMuKo-Klassifikationen für meteorologische Parameter vorgestellt. Ergebnisse zur Wiedergabe von Extrem-Indikatoren mit KlaMuKo-Klassen und eine Analyse zu deren zukünftiger Entwicklung finden sich in Abschnitt 7. Untersuchungen mit besonderer Relevanz für die Entwicklung der Luftqualität sind in Abschnitt 9 zusammengefasst.

6 Ergebnisse Arbeitspaket 4 – KlaMuKo Klimastatistik

6.1 Kontext

In diesem Arbeitspaket werden Ergebnisse von Analysen mit dem KlaMuKo-Verfahren vorgestellt. Die Bearbeitung und die Erstellung des Berichtstextes erfolgte im Zuge der Projektpartnerschaft mit dem IÖZ der Bergakademie Freiberg weitgehend durch Dipl.-Geoökol. Wiebke Miketta.

Zur Rekapitulation: Wie in Abschnitt 5 dargestellt, rekonstruiert das statistische Analyseverfahren KlaMuKo (*Klassifikation durch Multiple Korrelation*) verschiedene regionale und lokale meteorologische Parameter und Extremindikatoren auf indirekte Weise. Die Parameter und Indikatoren sind die Zielgröße oder *Prediktanden* für KlaMuKo. Sie werden durch Anwendung des Verfahrens indirekt durch eine Kombination mehrerer großräumiger Feldgrößen, den so genannten *Prediktoren* ausgedrückt. Es wird also eine Verbindung zwischen großräumigem und lokalem Klima gesucht. Dabei ist Folgendes zu beachten: Der Begriff „Muster“ wird bei KlaMuKo auf besondere Weise verwendet, weil er sich nicht auf eine Konstellation von spezifischen morphologischen Strukturen, beispielsweise in einem atmosphärischen Feld (Zirkulationsmuster) bezieht. Vielmehr wird im Zusammenhang mit KlaMuKo das Konzept eines Musters entwickelt und umgesetzt, das die o. a. Regressionsgrößen betrachtet. In einem Optimierungsschritt werden spezifisch für jede Zielgröße (Prediktand) diejenigen Einflussgrößen (Prediktoren) identifiziert, die eine möglichst gute Beschreibung der Zielgröße ermöglichen. Es ist nachvollziehbar, dass die Prediktoren an jedem Tag spezifische Ausprägungen annehmen (vgl. Abbildung 9). KlaMuKo identifiziert in ihnen durch Ähnlichkeits-/Unähnlichkeits-Vergleiche die Hauptstrukturen (vgl. Abbildung 10), wobei eine maximale Separierung der Muster (also der Konstellationen von Regressionsgrößen) angestrebt wird.

Bisherige Studien für den Freistaat Sachsen verwendeten Regionalisierungsmethoden wie WEREX, deren Stärken darin liegen, den Klimawandel in Form von Änderungen der *mittleren Zustände* zu beschreiben. Die Beschreibungsgüte bezüglich der *Extreme* ist bei ihnen nicht so gut entwickelt und soll durch das KlaMuKo-Verfahren verbessert werden.

Ein wesentliches Ziel des KLIWETT-Vorhabens ist es, einen besseren Blick auf das Extremverhalten in einem zukünftigen Klima zu bekommen. In diesem Abschnitt des Berichts wird ein erster Schritt in diese Richtung

vollzogen. Als Vorstufe erfolgt in diesem Abschnitt zunächst die Erstellung einer Klimastatistik für die Vergangenheit und die drei Klimaprojektionen (SRES-Szenarios A1B, A2 und B1) für die KlaMuKo-Klassifikation der meteorologischen Parameter Maximumtemperatur, Minimumtemperatur, Niederschlag (sowohl an Klimastationen als auch an Klima- und Niederschlagsstationen Sachsens), Dampfdruck und Windstärke. Dazu werden ausgewählte Ergebnisse in Form von Tabellen, die die vom Screening zur Beschreibung des jeweiligen meteorologischen Parameters identifizierten Prediktoren zeigen, und in Form von Boxplots, die die KlaMuKo-Klassen hinsichtlich Umfang und Wertebereich charakterisieren, vorgestellt. Außerdem finden sich in den Unterabschnitten Tabellen, die wiedergeben, welche Korrelation zwischen den meteorologischen Parametern und den KlaMuKo-Klassen existiert. Sie stellen ein Maß für die Stringenz einer Beschreibung der meteorologischen Parameter durch die Prediktoren und die KlaMuKo-Klassen dar. Ergänzendes Material sind Tabellen im Excel-Format, die umfangreiche Analysen und eine Vielzahl von weiteren Abbildungen enthalten. Es würde den Umfang dieses Berichtes sprengen, die Vielfalt der gewonnenen Resultate komplett darzustellen.

Im anschließenden Abschnitt 7 erfolgt die Analyse von Extremindikatoren. Ein Katalog von 13 abgeleiteten Größen (vgl. Abschnitt 2.2), wie beispielsweise Hitzewellen und Eistage in den Kapiteln 7.2.5 und 7.2.6, wird dazu mit KlaMuKo analysiert und hinsichtlich der sich abzeichnenden Änderungen betrachtet. Eine Modellvalidierung wird in Bezug auf den Referenzzeitraum 1971–2000 durchgeführt. Die Bewertung der Änderungssignale erfolgt durch den Vergleich von Klimastatistiken in den Zeiträumen 1971–2000, 2021–2050, 2041–2070 und 2071–2100.

6.2 Ergebnisse der KlaMuKo-Klassifikation der Größen TX, TN, RR, DD und FF

Den Untersuchungen der einzelnen meteorologischen Parameter (ab Kapitel 6.2.1) sei eine tabellarische Übersicht (Tabelle 5) vorangestellt. Sie gibt an, wie viele und welche der Klimastationen durch das Auswahl-Clusterfahren (beschrieben in Abschnitt 2.4) jeweils zur KlaMuKo-Analyse selektiert wurden. Eine Besonderheit stellt die Zielgröße Wind (zweite Spalte von Tabelle 5) dar. Zur Analyse dieser Größe wurden alle Klimastationen zusammengefasst. Der Grund dafür ist, dass eine Clusterung keine sinnvolle Aufteilbarkeit des Stationskollektivs erbrachte, weil nur zwei Cluster gebildet wurden, wovon einer lediglich die Bergstation (Fichtelberg) und der zweite alle übrigen Stationen enthielt.

Weil die Zielgrößen eine gut ausgeprägte Höhenabhängigkeit besitzen, ist es nicht verwunderlich, dass sich dieser Sachverhalt in den Stationsgruppen wiederfindet. Ein Beispiel: Die Stationen mit relativ hohen TN (Spalte „HiMin“ in Tabelle 5) sind relativ niedrig gelegen, während die Stationen des Erzgebirges und des Erzgebirgsvorlandes sich in der Gruppe mit relativ niedrigen TN (Spalte „LoMin“ in Tabelle 5) finden.

Tabelle 5: Liste der Zielgrößen-spezifisch genutzten Stationsgruppen. Zur Nomenklatur der Zielgrößen und der Jahreszeiten finden sich Hinweise auf S. 50

Zielgröße	HiWind	HiMax HiMin HiDD	LoMax LoMin LoDD	HiMin	LoMin	HiNied	HiNied
Jahreszeit	alle Jahreszeiten	alle Jahreszeiten*	alle Jahreszeiten*	Sommer, SHJ	Sommer, SHJ	Sommer, SHJ	Frühling, Herbst, Winter, Jahr, WHJ
Anzahl	12	9	3	7	5	5	4
Stationen	Aue Chemnitz Dresden Görlitz Bautzen Leipzig Schkeuditz Oschatz Plauen Fichtelberg Marienberg Zinnwald	Aue Chemnitz Dresden Görlitz Bautzen Leipzig Schkeuditz Oschatz Plauen	Fichtelberg Marienberg Zinnwald	Chemnitz Dresden Görlitz Bautzen Leipzig Schkeuditz Oschatz	Aue Plauen Fichtelberg Marienberg Zinnwald	Aue Chemnitz Fichtelberg Marienberg Zinnwald	Aue Fichtelberg Marienberg Zinnwald

* Ausnahmen: Bei HiMin und LoMin erfolgt im Sommer und im SHJ eine abweichende Unterteilung der Stationen, siehe Ergebnisspalten 4 und 5.

Hinweise zu Tabellen und Darstellungen

Begleitet werden die Kapitel 6.2.1 bis 6.2.6 sowie 7.2.1 bis 7.2.13 von Rangfolge-Tabellen, in denen zu finden ist, welche Regressionsgrößen besondere Relevanz für den jeweiligen meteorologischen Parameter bzw. den Extremindikator besitzen. Dazu werden die Screening-Ergebnisse mehrerer Jahreszeiten nach einem Punktesystem (5 für eine Erstplatzierung, 3 für eine Zweitplatzierung, 2 für eine Drittplatzierung und 1 für eine Viertplatzierung) ausgewertet und in der Spalte „Zähler“ der jeweiligen Tabelle aufgeführt und exemplarisch in den Tabellen der Kapitel 6.2.1 bis 6.2.6 wiedergegeben. Einen Eindruck von der Beschreibungsgüte durch die Regressionsgrößen vermitteln Korrelationstabellen – spezifisch für jedes meteorologische Element jeweils in den zugehörigen Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.6 bzw. zusammenfassend für die Extremindikatoren als Bestandteile in Tabelle 64. Herausgehoben ist jeweils die Korrelation mit der ersten Regressionsgröße (Prediktor P1), also die Einfachkorrelation (EK). Sie gibt an, wie gut bereits *ein* Parameter die Zielgröße beschreibt. Die Multiple Korrelation mit vier Regressionsgrößen (MK) beschreibt den zusätzlichen Informationsgewinn, wenn mehrere Parameter zur Beschreibung der Zielgröße hinzugezogen werden. Besonders hohe Werte von EK und MK sind durch farbliche Codierung hervorgehoben. In Tabelle 64 findet sich zusätzlich ein Maß für die durch KlaMuKo nicht erklärbare Variabilität: Die Reststreuung (RS).

Für einige mit KlaMuKo untersuchte Größen sind auch Boxplots eingefügt, die Information zu den Charakteristika wie Häufigkeit oder enthaltenen Wertebereich der mit KlaMuKo identifizierten Klassen liefern.

Hinweise zur Nomenklatur der Stationsgruppen

Durch die Verwendung von Kürzeln wurde angestrebt, Information zur Charakterisierung der Stationsgruppen (s. Abschnitt 2.4 zur Clusterung der sächsischen Klimastationen) zu liefern. So steht etwa *HiMax* für die Stationsgruppe, in der hohe Temperaturmaxima angetroffen werden – nicht etwa für die Maxima der hoch über NN gelegenen Stationen. Analog ist diese Bezeichnungsweise z. B. für Minima (*HiMin/LoMin*) oder Dampfdruck (*HiDD/LoDD*) verwendet worden.

Hinweise zur Analyse und Nomenklatur der Jahresabschnitte

KlaMuKo wurde gegebenenfalls für das gesamte Jahr oder unterschiedliche Bereiche des Jahres eingesetzt. Bei einigen Größen, wie dem Wind oder bestimmten Niederschlagsindikatoren ist z. B. gerechtfertigt, Sommerhalbjahr (Bezeichnung *SHJ*) und Winterhalbjahr (Bezeichnung *WHJ*) separat zu betrachten. Einige Extremindikatoren wie Eistage oder Heiße Tage treten nur in einer Jahreshälfte auf.

6.2.1 Maximumtemperatur (TX)

Die Untersuchung der Maximumtemperatur erfolgt für die Untermenge derjenigen Stationen mit hohen Temperaturen (*HiMax*) bzw. niedrigen Temperaturen (*LoMax*). Wie Tabelle 5 zeigt, erfolgte durch das Stations-Clusterverfahren der vorhandenen 12 Stationen eine Auswahl von 9 Flachlandstationen (*HiMax*) und 3 (Fichtelberg, Marienberg und Zinnwald; *LoMax*) Bergstationen. Das Verfahren bildet bei der Anwendung auf die Maximumtemperatur jeweils 10 Klassen mit Ausnahme von der Maximumtemperatur im Frühjahr: Weil eine Klasse nur sehr gering besetzt ist, wird sie aufgelöst und es ergeben sich nicht 10, sondern 9 Klassen. Bei der Rekonstruktion der Maximumtemperatur sind die relative Topografie 1.000/850 hPa und die Tageslänge die entscheidenden Feldgrößen (Tabelle 6).

Hinweis zum Punktesystem bei der Bestimmung der relevanten Prediktoren

Die Größe „Zähler“ wird dabei nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Anmerkungen zu den Tabellen auf S. 49 erläutert ist. Bei der Auswertung für die Maximumtemperatur wurde beispielsweise gefunden, dass sich die Relative Topografien zwischen 1000 und 850 hPa in allen untersuchten Zeitbereichen (Jahr, *SHJ*, *WHJ*, Frühling, Sommer, Herbst und Winter, jeweils für *HiMax* und *LoMax*), d.h. 14-mal unter den vier vom Screening identifizierten Prediktoren befand. Davon stand diese Größe 10-mal an erster Stelle (laut Punktesystem ergaben sich dafür 50 Punkte) und 4-mal an zweiter Stelle (dafür wurden weitere 12 Punkte vergeben), was einen Zähler von 62 für diese Größe in Tabelle 6 ergab.

Tabelle 6: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Analysiert wurde die Maximumtemperatur an den Teilmengen der Stationen mit hohen (*HiMax*) und niedrigen (*LoMax*) Temperaturwerten im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen auf Seite 50 erläutert ist.

Prediktor	Bezeichnung	Pred.-Nr.	Zähler
1	Relative Topografie 1.000/850 hPa	19	62
2	Tageslänge [Std]	59	42
3	Summenprediktor	58	9
4	Vorticity 1.000 hPa	15	7

Die in Tabelle 6 aufgelisteten Prediktorenfelder beschreiben das Verhalten der Maximumtemperatur mit einer durchschnittlichen Einfachkorrelation von 0,77 und einer multiplen Korrelation von 0,90 (Tabelle 7). Schon die erste Regressionsgröße (Relative Topografie zwischen 1.000 und 850 hPa) besitzt eine starke Verbindung zur

lokalen Maximumtemperatur, sodass der Zuwachs durch weitere Regressionsgrößen verhältnismäßig gering ist. Deutlich ist zu ersehen, dass eine stark positive Ausprägung der relativen Topografie zu den höchsten Temperaturen führt, negative Werte stehen mit eher kalten Klassen im Zusammenhang.

Tabelle 7: KLaMuKo-Resultate für die Maximumtemperatur. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen.

Jahreszeit	Zielgröße	Anzahl der Stationen	EK	MK
Jahr	HiMax	9 Flachland-Stat.	0,78	0,90
Jahr	LoMax	3 Berg-Stat.	0,75	0,90
SHJ	HiMax	9 Flachland-Stat.	0,73	0,87
SHJ	LoMax	3 Berg-Stat.	0,73	0,82
WHJ	HiMax	9 Flachland-Stat.	0,63	0,79
WHJ	LoMax	3 Berg-Stat.	0,68	0,79
Frühling	HiMax	9 Flachland-Stat.	0,69	0,97
Frühling	LoMax	3 Berg-Stat.	0,70	0,96
Sommer	HiMax	9 Flachland-Stat.	0,91	0,92
Sommer	LoMax	3 Berg-Stat.	0,91	0,92
Herbst	HiMax	9 Flachland-Stat.	0,77	0,96
Herbst	LoMax	3 Berg-Stat.	0,72	0,96
Winter	HiMax	9 Flachland-Stat.	0,87	0,91
Winter	LoMax	3 Berg-Stat.	0,90	0,92

Legende

0,71 - 0,78
0,78 - 0,84
0,84 - 0,90
0,90 - 0,95
≥ 0,95
0 bis 0,71

Betrachtungen der KLaMuKo-Screeningergebnisse in den einzelnen Jahreszeiten (nicht im Bericht wiedergegeben) zeigen zudem, dass der erstplatzierte Prediktor (P1) im Jahr und im Herbst nicht die relative Topografie, sondern die Tageslänge ist. Im Frühling, Herbst und gesamten Jahr ist hingegen die Kombination der Prediktoren relative Topografie 1.000/850 hPa und Tageslänge zur Rekonstruktion der Maximumtemperatur entscheidend und nicht allein die relative Topografie. Im Sommer und Winter wird die Maximumtemperatur durch nur einen Prediktor – die relative Topografie – (Einfachkorrelation 0,9) bereits sehr gut beschrieben. Hier ist durch weitere Prediktoren kaum noch eine Verbesserung der Beschreibungsgüte zu verzeichnen, wie der geringe Unterschied zwischen MK und EK zeigt. Anders stellt es sich für die Flachlandstationen im Jahr, SHJ und WHJ, sowie für die Bergstationen im Jahr dar: Hier ist der zusätzliche Informationsgewinn durch die Beschreibung mit den Prediktoren P1 bis P4 deutlich sichtbar. Den größten Zugewinn verzeichnen dabei die Jahreszeiten Frühling und Herbst, hier war allerdings die Beschreibung durch nur einen Prediktor auch am geringsten.

Die Charakteristika der Klassen sind in Boxplots zusammengefasst. Die grafische Information ist auf zwei Abbildungen verteilt: Analyseergebnisse für das Jahr und die Halbjahre (SHJ und WHJ) finden sich in Abbildung 11 und Abbildung 12 gibt die Boxplots der KLaMuKo-Klassen für die vier Jahreszeiten (Frühling, Sommer, Herbst und Winter) wieder.

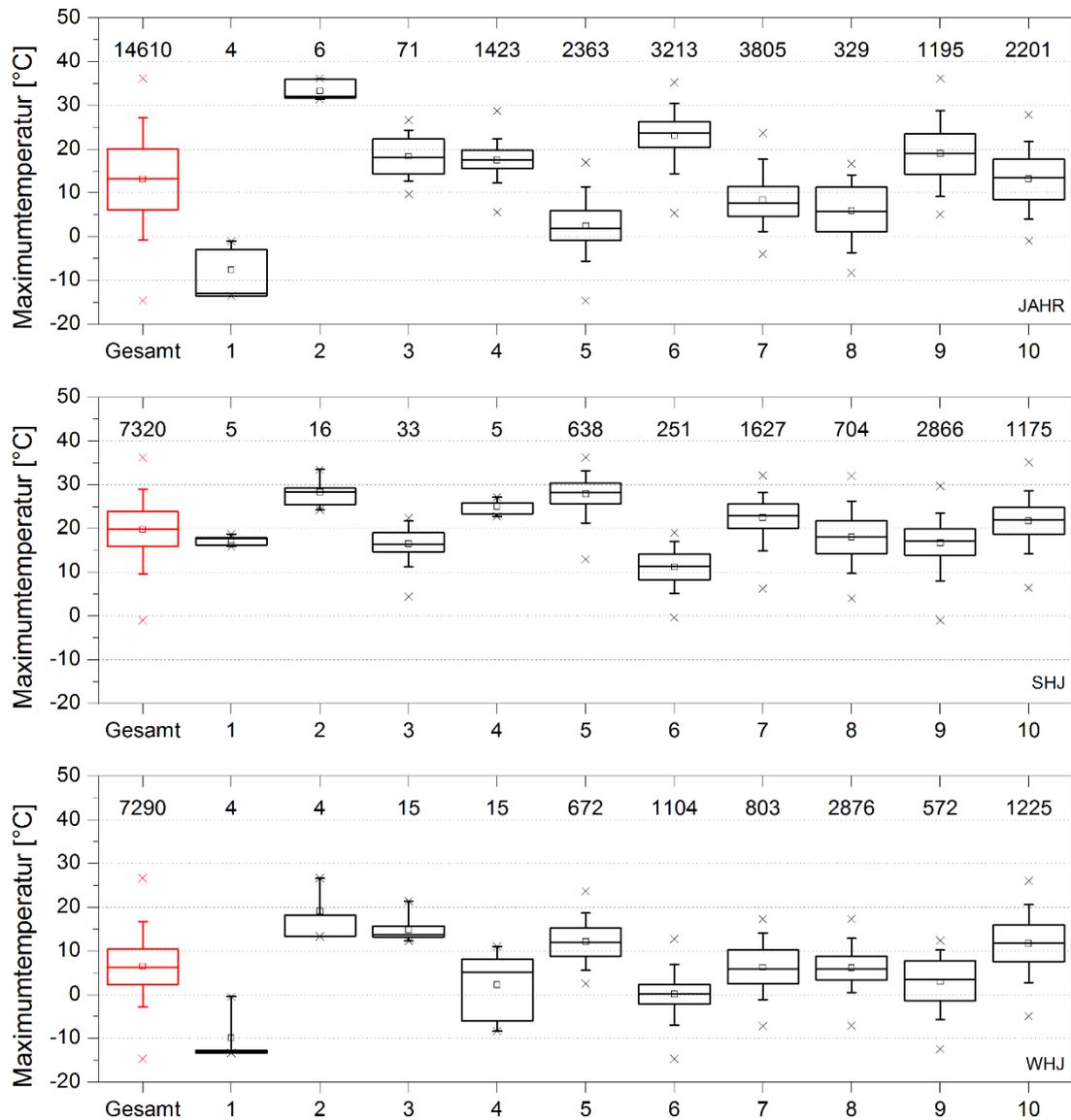


Abbildung 11: Charakteristika der Maximumtemperatur (HiMax) für das Jahr (oben), SHJ (Mitte) und WHJ (unten), dargestellt durch Box-Whisker-Plots. Die Antennen (Whisker) markieren das 5- und 95-Perzentil der Klassen-spezifischen Temperatur [°C]. Das Minimum (kleinster Datenwert) und Maximum (größter Datenwert) der jeweiligen Klasse werden mit einem X gekennzeichnet. Die obere Achse gibt für jede Klasse die Anzahl der in ihr befindlichen Tage an.

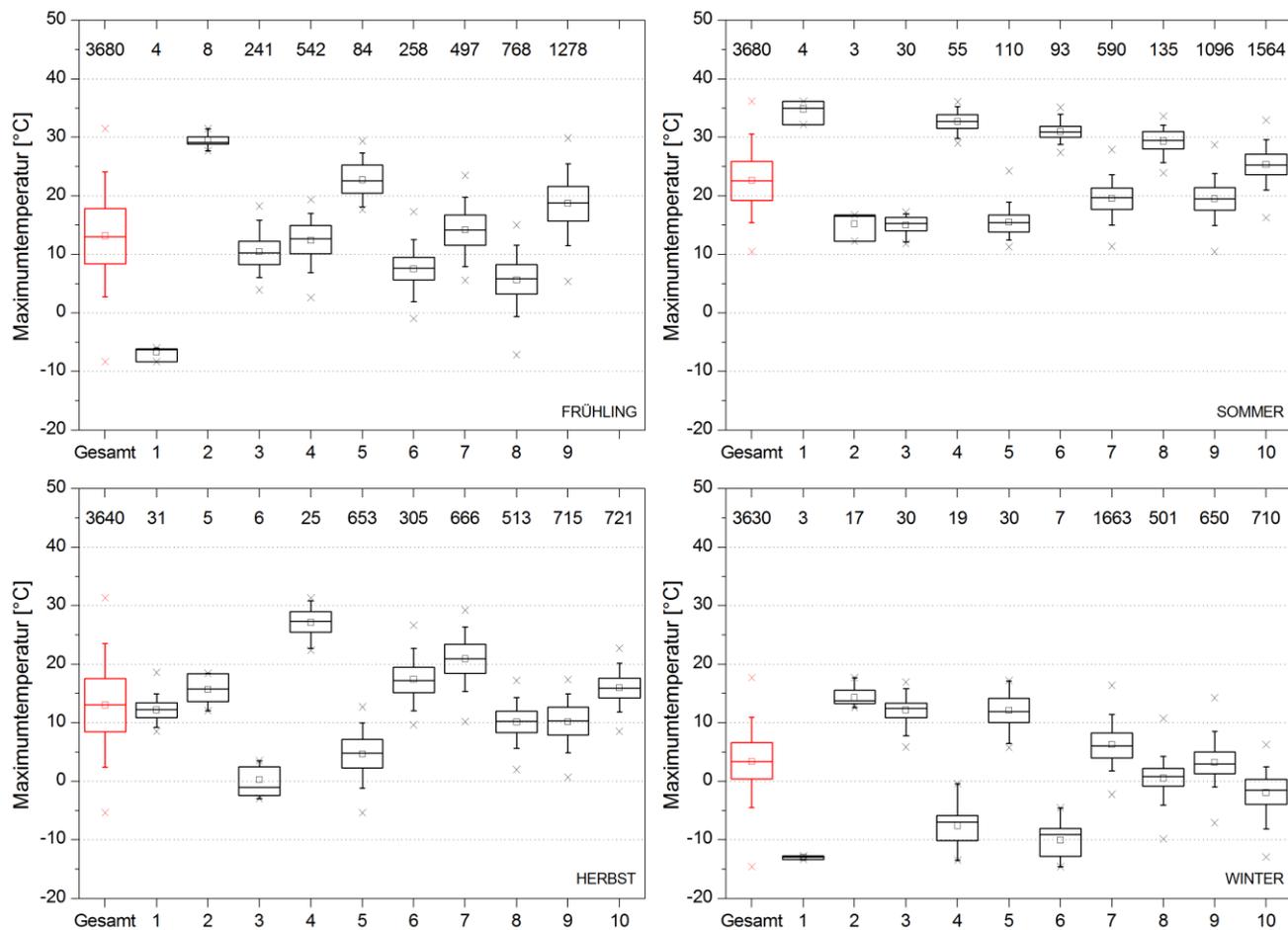


Abbildung 12: Charakteristika der Maximumtemperatur (HiMax) für die vier Jahreszeiten: Frühling (links oben), Sommer (rechts oben), Herbst (links unten) und Winter (rechts unten), dargestellt durch Box-Whisker-Plots. Die Antennen (Whisker) markieren das 5- und 95-Perzentil der Klassenspezifischen Temperatur [°C]. Das Minimum (kleinster Datenwert) und Maximum (größter Datenwert) der jeweiligen Klasse werden mit einem X gekennzeichnet. Die obere Achse gibt für jede Klasse die Anzahl der in ihr befindlichen Tage an.

Weil die Maximumtemperatur für Stationen mit hohen (HiMax) und niedrigen (LoMax) Temperaturen getrennt untersucht wird, ergeben sich vier Abbildungen. Exemplarisch werden an dieser Stelle die beiden Abbildungen für die HiMax-Untersuchung gezeigt (Abbildung 11 und Abbildung 12). Der erste Boxplot einer KLaMuKo-Klassifikation ist jeweils rot markiert und umfasst die Gesamtheit aller betrachteten Tage. Die obere Achse gibt für jede Klasse die Anzahl der in ihr befindlichen Tage an.

Des Weiteren zeigen alle Boxen durch ihre Position und ihre Höhe an, welcher Wertebereich in ihnen enthalten ist. Wie Abbildung 11 und Abbildung 12 zu ersehen ist, sind in der Regel die ersten 3 bis 5 KLaMuKo-Klassen durch besondere Eigenschaften charakterisiert:

- Geringe Zahl der Mitglieder
- Relativ gute Trennung der Wertebereiche
- extreme Ausprägungen

Die Klassen 5 bis 10 hingegen sind in der Regel relativ stark besetzt, unterscheiden sich bezüglich ihrer Lage wenig vom (rot gezeichneten) Mittel über alle Klassen und überdecken verbreitet auch ähnliche Wertebereiche, besitzen also eine nicht sehr gut ausgeprägte Trennschärfe.

6.2.2 Minimumtemperatur (TN)

Wie schon für die Maximumtemperatur wurde das KlaMuKo-Verfahren für den Parameter Minimumtemperatur für alle Jahreszeiten eingesetzt. Die Untersuchung erfolgt für zwei Stations-Untermengen. Die Stationen mit hohen Minimumtemperaturen (*HiMin*) bzw. niedrigen Temperaturen (*LoMin*) setzen sich für die verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich zusammen (vgl. Tabelle 5):

- Frühjahr, Herbst, Winter, WHJ und Jahr *HiMin* – 9 Flachlandstationen (Aue, Chemnitz, Dresden, Görlitz, Bautzen, Leipzig [2 Stat.], Oschatz und Plauen)
- Frühjahr, Herbst, Winter, WHJ und Jahr *LoMin* – 3 Bergstationen (Fichtelberg, Marienberg und Zinnwald)
- Sommer und SHJ *HiMin* – 7 Flachlandstationen (Chemnitz, Dresden, Görlitz, Bautzen, Leipzig [2 Stat.] und Oschatz)
- Sommer und SHJ *LoMin* – 5 Stationen im Erzgebirge und im Erzgebirgsvorland (Aue, Plauen, Fichtelberg, Marienberg und Zinnwald)

Das KlaMuKo-Verfahren identifiziert jeweils 10 Klassen für die Minimumtemperatur, Ausnahmen sind das Sommerhalbjahr (8 Klassen) und die Flachlandstationen im Frühling, hier ergeben sich nicht 10, sondern 9 Klassen. Die besonders relevanten Prediktoren zur Rekonstruktion der Minimumtemperatur sind, wie schon bei der Maximumtemperatur, die relative Topografie 1.000/850 hPa und die Tageslänge, ersichtlich aus Tabelle 8.

Tabelle 8: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Minimumtemperatur an den Teilmengen der Stationen mit hohen (*HiMin*) und niedrigen (*LoMin*) Temperaturwerten im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.	Zähler
1	Relative Topografie 1.000/850 hPa	19	56
2	Tageslänge [Std]	59	36
3	Relative Feuchte	7	15
4	Horizontale Differenzen Geopot. O-W 850 hPa / Summenprediktor	12 / 58	10

Die Relative Topografie 1.000/850 hPa wurde beispielsweise in 8 von 14 Zeitabschnitten (Jahr; SHJ, WHJ, vier Jahreszeiten, jeweils *HiMin* und *LoMin*) vom Screening 8-mal als Größe mit der höchsten Relevanz identifiziert (40 Punkte); 5-mal fand das Screening diese Größe an zweiter Stelle (15 Punkte) und 1-mal an vierter Stelle (1-Punkt), was zu insgesamt 56 Punkten führte.

Das KlaMuKo-Verfahren beschreibt das Verhalten der Minimumtemperatur, insgesamt betrachtet, mit einer Einfachkorrelation in einer Größenordnung von rund 0,7 und einer multiplen Korrelation in der Regel weit über 0,8 (Tabelle 9). Im Vergleich zur Maximumtemperatur ist die MK zwar etwas geringer, aber dennoch auf sehr hohem Wertenniveau.

Hinweis: Tabelle 8 zeigt die relevanten Prediktoren in einer Zusammenschau. In den einzelnen Jahreszeiten wurden Spezifika gefunden (s. a. Tabelle 9). Zunächst sei erwähnt, dass, wie schon bei der Maximumtemperatur (vgl. Tabelle 6) von allen Jahreszeiten der Frühling und der Herbst unter der Verwendung von vier Regressionsgrößen (MK deutlich über 0,9 - in Tabelle 9 mittel- bzw. dunkelgrün eingefärbt) am besten beschrieben wird. In diesen Jahreszeiten ist auch der Informationszugewinn von der einfachen zur multiplen Korrelation besonders groß. Im Frühling, Herbst, WHJ und gesamten Jahr ist die Kombination der Prediktoren relative Topografie 1.000/850 hPa und Tageslänge zur Rekonstruktion der Minimumtemperatur entscheidend. Im Sommer*halbjahr* wird die Minimumtemperatur aus einer Kombination von relativer Topografie, Summenprediktor und Sonneneinstrahlung klassifiziert. Im *Sommer* wird die absolute Feuchte (bei den Stationen von HiMin) und die Advektion der Temperatur zur Beschreibung der Minimumtemperatur herangezogen und im Winter ist neben der relativen Topografie die horizontale Differenz der Geopotenziale O-W 850 hPa dominierender Faktor. Geringste multiple Korrelation weist das Winterhalbjahr auf (0,75).

Tabelle 9: KlaMuKo-Resultate für die Minimumtemperatur. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen.

Jahreszeit	Zielgröße	Anzahl der Stationen	EK	MK	Legende
Jahr	HiMin	9 Flachland-Stat.	0,71	0,84	0,71 - 0,78
Jahr	LoMin	3 Berg-Stat.	0,71	0,86	0,78 - 0,84
SHJ	HiMin	7 Stationen	0,53	0,81	0,84 - 0,90
SHJ	LoMin	5 Stationen	0,57	0,82	0,90 - 0,95
WHJ	HiMin	9 Flachland-Stat.	0,63	0,75	≥ 0,95
WHJ	LoMin	3 Berg-Stat.	0,67	0,75	0 bis 0,71
Frühling	HiMin	9 Flachland-Stat.	0,67	0,93	
Frühling	LoMin	3 Berg-Stat.	0,67	0,96	
Sommer	HiMin	7 Stationen	0,78	0,83	
Sommer	LoMin	5 Stationen	0,82	0,86	
Herbst	HiMin	9 Flachland-Stat.	0,71	0,93	
Herbst	LoMin	3 Berg-Stat.	0,73	0,95	
Winter	HiMin	9 Flachland-Stat.	0,80	0,87	
Winter	LoMin	3 Berg-Stat.	0,87	0,91	

6.2.3 Niederschlag (Klima- und Niederschlagsstationen) (RR)

Die KlaMuKo-Analysen dieses Unterabschnitts stellen insofern eine Besonderheit dar, dass sie eine wesentlich größere Stationszahl einbeziehen. Niederschlag wird neben zahlreichen anderen meteorologischen Parametern an den Klimastationen gemessen – es existiert aber auch ein spezifisches (und relativ dichtes) Messnetz von Stationen, die einzig den Niederschlag registrieren. In diesem Unterabschnitt wird die Gesamtmenge an Klima- und Niederschlagsstationen analysiert. Dazu wird die Untermenge derjenigen Stationen mit hohen Niederschlagsmengen (HiNied) untersucht. Aus den vorhandenen 173 sächsischen Niederschlagsstationen und 12 Klimastationen wurden durch die Stationsclusterung (vgl. Abschnitt 2.4) zwischen 90 (WHJ) und 76 Stationen (Winter) ausgewählt. Das KlaMuKo-Verfahren bildet für den Niederschlag in Sachsen jeweils 10 Klassen; im Sommerhalbjahr und im Sommer sind es 9 Klassen. Bei der Rekonstruktion des Niederschlages sind folgende Prediktoren besonders relevant: die kurzweilige Einstrahlung, die horizontale Differenz des Geopotenzials in zentraler Richtung (Ost-West), die Vorticity und der Summenprediktor (Tabelle 10). Die maximal erreichbare und in der Spalte „Zähler“ gezeigte Punktezah ist für die Niederschlagsauswertung = 35, denn es werden 7 Zeitabschnitte (Jahr, Halbjahre, Jahreszeiten) für eine Zielgröße (HiNied) betrachtet. Der

beim Screening als relevanteste Größe gewählte Prediktor ist mit Ausnahme des Winters (in diesem Bericht nicht separat tabelliert) die kurzweilige Einstrahlung oder die Vorticity. Im Winter ist der Betrag des Gradienten 850 hPa erster Prediktor.

Tabelle 10: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Niederschlag an der Teilmenge der Klima- und Niederschlagsstationen mit hohen Niederschlagswerten (HiNied) im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.	Zähler
1	Approximierte kurzweilige Einstrahlung	60	23
2	Horizontale Differenz Geopot. O-W 850 hPa	12	13
3	Vorticity 850 hPa	16	10
4	Summenprediktor	58	6

Niederschlag ist eine Größe, die durch relativ viele kleinräumige und strukturell komplexe Prozesse bestimmt wird. Es kann nicht erwartet werden, dass KLaMuKo, was ja nach Verbindungen zwischen großräumigen atmosphärischen Verhältnisse und dem regionalen Klima sucht, eine ebenso gute Beschreibung wie bei der Temperatur erzielt. Keiner der Einträge in Tabelle 11 ist farbig unterlegt, anders als bei den analogen Tabellen für TX und TN. Die Einfachkorrelation liegt, insgesamt betrachtet in einer Größenordnung etwas über 0,4 und die multiple Korrelation besitzt eine Größenordnung von rund 0,55 (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: KLaMuKo-Resultate für den Niederschlag der Klima- und Niederschlagsstationen. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen

Jahreszeit	Zielgröße	Anzahl der Stationen	EK	MK
Jahr	HiNied	82 Stationen	0,40	0,52
SHJ	HiNied	82 Stationen	0,39	0,51
WHJ	HiNied	90 Stationen	0,45	0,61
Frühling	HiNied	85 Stationen	0,41	0,53
Sommer	HiNied	88 Stationen	0,41	0,54
Herbst	HiNied	78 Stationen	0,46	0,59
Winter	HiNied	76 Stationen	0,45	0,64

Legende

0,71 – 0,78
0,78 – 0,84
0,84 – 0,90
0,90 – 0,95
≥ 0,95
0 – 0,71

Für eine so komplexe Größe wie den Niederschlag ist eine multiple Korrelation von über 0,5 dennoch als beachtlich einzuschätzen. Anders als bei der Maximum- und Minimumtemperatur, wo oftmals der erste und der zweite Prediktor den Hauptanteil an der Beschreibung des Prediktanden beitragen, ist beim Niederschlag durchweg eine Beschreibung durch alle vier ausgewählten Feldgrößen zielführend.

Der Niederschlag wird im Winter und WHJ von KLaMuKo von allen Jahresteilern am besten beschrieben; zudem ist der Zugewinn durch die Beschreibung mehrerer Prediktoren am höchsten. Im Herbst ist die Beschreibung ähnlich gut. Die anderen Jahreszeiten liegen bezüglich der Korrelationen eng beieinander.

6.2.4 Niederschlag (nur Klimastationen) (RR)

Das KlaMuKo-Verfahren für den Niederschlag der *Klimastationen* wird für die Stations-Untermenge mit hohen Niederschlagssummen (HiNied) ausgewertet. Bei der Stationsclustering werden aus den 12 Klimastationen 5 (SHJ und Sommer) bzw. 4 Stationen (Jahr, WHJ, Frühling, Herbst und Winter) ausgewählt (s. Tabelle 5). Es handelt sich dabei um die drei Bergstationen und die Station Aue (4 Stationen). Im Sommer und SHJ wurden die Stationen Chemnitz, Aue, Fichtelberg, Marienberg und Zinnwald als Stationen mit den höchsten Niederschlägen charakterisiert. Das KlaMuKo-Verfahren identifiziert je 10 Klassen. Die ausgewählten Prediktoren entsprechen den Feldgrößen des Niederschlags für Klima- und Niederschlagsstationen (vgl. Tabelle 10 und Tabelle 12). Die maximal erreichbare und in der Spalte „Zähler“ von Tabelle 12 gezeigte Punktezahl ist für die Niederschlagsauswertung = 35, denn es werden 7 Zeitabschnitte (Jahr, Halbjahre, Jahreszeiten) für eine Zielgröße (HiNied) betrachtet.

Tabelle 12: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Niederschlag an den Teilmengen der Klimastationen mit hohen Niederschlägen (HiNied) im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.	Zähler
1	Approximierte kurzweilige Einstrahlung	60	21
2	Horizontale Differenz Geopot. O-W 850 hPa	12	18
3	Vorticity 1000 hPa	15	9
4	Summenprediktor	58	6

Der Niederschlag wird im Winter und WHJ am besten beschrieben, was sowohl die Einfachkorrelationen als auch die multiplen Korrelationen in Tabelle 13 zeigen. Im Sommer und im SHJ sind die Korrelationen am geringsten. Eine Farbgebung der Felder erfolgte in dieser Tabelle, anders als z. B. bei TX oder TN nicht, weil die Korrelationen immer unter 0,71 lagen.

Tabelle 13: KlaMuKo-Resultate für den Niederschlag der Klimastationen. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen

Jahreszeit	Zielgröße	Anzahl der Stationen	EK	MK	Legende
Jahr	HiNied	4 Stationen	0,38	0,50	0,71 – 0,78
SHJ	HiNied	5 Stationen	0,37	0,50	0,78 – 0,84
WHJ	HiNied	4 Stationen	0,44	0,60	0,84 – 0,90
Frühling	HiNied	4 Stationen	0,39	0,55	0,90 – 0,95
Sommer	HiNied	5 Stationen	0,38	0,50	≥ 0,95
Herbst	HiNied	4 Stationen	0,45	0,59	0 bis 0,71
Winter	HiNied	4 Stationen	0,46	0,64	

Die Prediktoren beschreiben das Verhalten des Niederschlags, ähnlich wie bei der Untersuchung des Stationskollektivs aus Klima- und Niederschlagsstationen (Kapitel 6.2.3), mit einer Einfachkorrelation in der Größenordnung von 0,4 und einer multiplen Korrelation in der Größenordnung von 0,55 (Tabelle 13). Eine positive (negative) Ausprägung der horizontalen Differenz des Geopotenzials Ost-West hängt meist mit hohen (niedri-

gen) Niederschlagsklassen zusammen. Für die jeweiligen Jahreszeiten werden unterschiedliche Prediktoren gefunden.

Niederschlag an allen Stationen oder nur den Klimastationen?

Wie die Ergebnisse der Untersuchungen in den Kapiteln 6.2.3 und 6.2.4 zeigen, sind die Unterschiede zwischen der Anwendung von KlaMuKo auf ein Stationskollektiv aus allen Klima- und Niederschlagsstationen bzw. den 12 Klimastationen relativ gering. Dies bezieht sich sowohl auf die gewählten Regressionsgrößen als auch die Beträge der Einfach- und Mehrfachkorrelationen. In den niederschlagsbezogenen Untersuchungen mit Extremindikatoren (Abschnitt 7) wird daher der Niederschlag an den *Klimastationen* verwendet.

6.2.5 Dampfdruck (DD)

Es gibt kaum Untersuchungen, die für den lokal gemessenen Dampfdruck anstreben, per Screening Beziehungen zwischen der großräumigen Zirkulation und der lokalen Größe zu finden.

Bezüglich der Datenvorbereitung sei erwähnt, dass im Fall des Dampfdrucks wiederum zwei Stations-Untermengen gebildet werden: Stationen mit hohem Dampfdruck (HiDD, 9 Flachlandstationen) und Stationen mit niedrigem Dampfdruck (LoDD, 3 Bergstationen). Das KlaMuKo-Verfahren bildet bei der Anwendung auf den Dampfdruck jeweils 10 Klassen - mit Ausnahme von den Flachlandstationen (HiDD) im SHJ, hier ergeben sich nicht 10, sondern 9 Klassen. Dampfdruck ist eine selten untersuchte Größe. Daher ist von besonderem Interesse, welche Prediktanden vom Screening als relevant identifiziert werden. Zur Rekonstruktion des Dampfdruckes sind dies die Tageslänge und die relative Topografie 1.000/850 hPa sowie die absolute und die relative Feuchte (Tabelle 14).

Tabelle 14: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Dampfdruck an den Teilmengen der Stationen mit hohem (HiDD) und niedrigem (LoDD) Dampfdruck im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.	Zähler
1/2	Tageslänge [Std]	59	38
	Relative Topografie 1000/850 hPa	19	
3	Absolute Feuchte 850 hPa	33	22
4	Relative Feuchte 850 hPa	7	14

Wie die Einträge in der Spalte „Zähler“ von Tabelle 14 zeigen ist die Situation beim Dampfdruck nicht so klar wie bei TX oder TN – dort war ja vom Screening mit der Relativen Topografie 1.000/850 hPa ein stark dominierender Prediktor identifiziert worden. Im Fall des Dampfdrucks kann der Zähler für einen Prediktor maximal einen Betrag von 70 annehmen, verteilt sich aber zu gleichen Teilen auf die beiden Größen Tageslänge und Relative Topografie 1.000/850 hPa. Letztgenannte Größe wird sowohl bei *HiDD* als auch bei *LoDD* als relevantester Prediktor im Winter und im Winterhalbjahr ermittelt, was zu $4 * 5 = 20$ Punkten führt. In drei weiteren Zeitabschnitten platziert das Screening diese Größe sowohl bei *HiDD* als auch bei *LoDD* auf dem zweiten Rang. Die Tageslänge „erwirbt“ das Gros ihres Zählers, 30 Punkte, indem sie in sechs Zeitabschnitten (Jahr, Frühjahr und Herbst) jeweils bei *HiDD* und *LoDD* als relevanteste Größe identifiziert wird.

Der lokal auftretende Dampfdruck ist eine Größe, die sich offenkundig recht gut mit der großräumigen Zirkulation in Verbindung bringen lässt. Die vom Screening ermittelten Prediktoren beschreiben das Verhalten des

Dampfdruckes, insgesamt betrachtet, mit einer Einfachkorrelation in der Größenordnung von 0,7 und einer multiplen Korrelation in der Größenordnung von 0,85 (Tabelle 15).

Tabelle 15: KlaMuKo-Resultate für den Dampfdruck. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen

Jahreszeit	Zielgröße	Anzahl der Stationen	EK	MK
Jahr	HiDD	9 Flachland-Stat.	0,70	0,82
Jahr	LoDD	3 Berg-Stat.	0,69	0,83
SHJ	HiDD	9 Flachland-Stat.	0,54	0,80
SHJ	LoDD	3 Berg-Stat.	0,56	0,79
WHJ	HiDD	9 Flachland-Stat.	0,58	0,71
WHJ	LoDD	3 Berg-Stat.	0,59	0,70
Frühling	HiDD	9 Flachland-Stat.	0,67	0,93
Frühling	LoDD	3 Berg-Stat.	0,66	0,92
Sommer	HiDD	9 Flachland-Stat.	0,76	0,84
Sommer	LoDD	3 Berg-Stat.	0,78	0,84
Herbst	HiDD	9 Flachland-Stat.	0,73	0,94
Herbst	LoDD	3 Berg-Stat.	0,71	0,94
Winter	HiDD	9 Flachland-Stat.	0,79	0,89
Winter	LoDD	3 Berg-Stat.	0,80	0,89

Legende

0,71 - 0,78
0,78 - 0,84
0,84 - 0,90
0,90 - 0,95
≥ 0,95
0 bis 0,71

Wie bei der Beschreibung der Maximum- und Minimumtemperatur führt eine stark positive Ausprägung der relativen Topografie zu hohen Dampfdruck-Klassen, negative Werte der relativen Topografie stehen mit eher niedrigen mittleren Dampfdrücken in Verbindung. Im SHJ (*HiDD* und *LoDD*) und Sommer (*HiDD*) ist die Temperatur bei 850 hPa der ausschlaggebende Faktor für hohe bzw. niedrige Dampfdruckklassen. Bei diesen drei KlaMuKo-Klassifikationen ist zudem nicht die relative Topografie oder die Tageslänge erste Regressionsgröße, sondern die Temperatur (Flachlandstationen im SHJ und Sommer) bzw. die absolute Feuchte (Bergstationen im SHJ). Die Dampfdruck-Charakteristika der KlaMuKo-Klassen sind in den dazugehörigen Boxplots zusammengefasst.

Am höchsten ist die Einfachkorrelation im Sommer und Winter (0.8), d. h. der Dampfdruck wird durch nur einen Prediktor (Temperatur bzw. relative Topografie) bereits relativ gut beschrieben. Ein zusätzlicher Informationsgewinn ergibt sich durch die Beschreibung mehrerer Prediktoren besonders im Sommerhalbjahr, Frühling und Herbst. Höchste multiple Korrelationen weisen die Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst auf (die Werte liegen deutlich über 0,9 und sind in Tabelle 15 grün hervorgehoben). Im SHJ und WHJ ist die Güte der KlaMuKo-Beschreibung des Dampfdrucks relativ gering.

6.2.6 Windgeschwindigkeit (FF)

Auch bezüglich des Windes gibt es kaum Untersuchungen, die über ein Screening den Zusammenhang zwischen großräumigen atmosphärischen Zuständen und lokalem Klima zu ermitteln versuchen. Bezüglich der Unterteilung des Stationskollektivs sei hier einschränkend erwähnt, dass bei der Analyse der Windgeschwindigkeit keine Untermenge derjenigen Stationen mit hohen bzw. niedrigen Windgeschwindigkeiten gebildet werden konnte (s. Erläuterungen auf S. 29). Die 12 sächsischen Klimastationen werden somit gemeinsam zur Klassifikation herangezogen.

Eine weitere Einschränkung besteht in der Eigenschaft der untersuchten Größe selbst: Bei den Windgeschwindigkeiten handelt es sich nicht um Spitzenwerte, sondern um Tagesmittelwerte.

Nicht verwunderlich ist, dass das Screening im Wesentlichen großräumige Geopotenzialgradienten als „Hauptverursacher“ für den lokalen und regionalen Wind identifiziert, wie Tabelle 16 zeigt. Beim Wind kann die in der Spalte „Zähler“ aufgeführte Punktezahl einen Maximalwert von 35 (bei sieben Erstplatzierungen in Jahr, Halbjahren und Jahreszeiten) erreichen. Für den Geopotenzialgradienten in 850 hPa findet das Screening eine Erstplatzierung in allen Zeitabschnitten bis auf den Herbst. Aber auch die Geopotenzialgradienten in den Niveaus 1.000 und 700 hPa sind bedeutenden Informationsquellen für die Regressionsanalysen mit KLaMuKo.

Tabelle 16: Rangfolge der durch das Screening ermittelten Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Windgeschwindigkeit für die 12 Klimastationen im Jahr, den Halbjahren und allen Jahreszeiten. Die Einträge in der Spalte „Zähler“ werden nach einem Punktesystem ermittelt, das in den Hinweisen zu den Tabellen auf Seite 49 erläutert ist.

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.	Zähler
1	Betrag des Gradienten 850 hPa	31	31
2	Betrag des Gradienten 1.000 hPa	30	17
3	Tageslänge [Std]	59	15
4	Betrag des Gradienten 700 hPa	32	6

Tabelle 17: KLaMuKo-Resultate für die Windgeschwindigkeit. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen

Jahreszeit	Zielgröße	Anzahl der Stationen	EK	MK
Jahr	HiWind	alle 12 Stationen	0,78	0,87
SHJ	HiWind	alle 12 Stationen	0,80	0,84
WHJ	HiWind	alle 12 Stationen	0,87	0,90
Frühling	HiWind	alle 12 Stationen	0,79	0,87
Sommer	HiWind	alle 12 Stationen	0,81	0,85
Herbst	HiWind	alle 12 Stationen	0,85	0,90
Winter	HiWind	alle 12 Stationen	0,89	0,91

Legende

0,71 - 0,78
0,78 - 0,84
0,84 - 0,90
0,90 - 0,95
≥ 0,95
0 bis 0,71

Das Verfahren bildet 9 KLaMuKo-Klassen und im Sommerhalbjahr sowie Frühling 10 Klassen. Die Korrelation mit der ersten Regressionsgröße (Betrag des Gradienten in 850 hPa) ist mit einer Größenordnung von rund 0,85 bereits sehr hoch und im Vergleich zu den anderen Zielgrößen (TX, TN, RR, DD) am höchsten (s. Tabelle 17). Neben dem Betrag des Gradienten ist noch die Tageslänge relevant und als jahreszeitliches Spezifikum im Sommer die Advektion der Temperatur.

Die mittlere multiple Korrelation hat eine Größenordnung von 0,9.

Die Windgeschwindigkeit wird im Winter und WHJ am besten beschrieben. Die anderen Jahreszeiten liegen bezüglich der Korrelationen eng beieinander. Ein zusätzlicher Informationsgewinn durch die Beschreibung aller Regressionsgrößen ist für die Klassifikation im Jahr und Frühling zu beobachten. Im Verhältnis dazu relativ geringe multiple Korrelation weisen der Sommer und das Sommerhalbjahr auf.

6.3 Validierung – Korrelation und Varianzreduktion im Vergleich von KlaMuKo/NCAR-Reanalysen

Wie gut geben die KlaMuKo-Ergebnisse das tatsächlich aufgetretene Klima wieder? Sind die KlaMuKo-Klassen als Proxy zur Beschreibung des Klimas möglicherweise besser geeignet als die Klassifikationen von Hess und Brezowsky oder Dittmann? Um diesen Fragen nachzugehen, wird folgende Validierungsstrategie angewandt, die am Beispiel der Maximumtemperatur veranschaulicht ist:

- Jeder Tag des Zeitraums 1971–2010 ist durch die Anwendung des KlaMuKo-Verfahrens einer Klasse der Stufe 0 und ggfs. der Stufe 1 zugeordnet worden.
- Für jeden Tag des Zeitraums 1971–2010 existieren die von KlaMuKo bestimmten Regressionskoeffizienten der vier mit dem Screening ermittelten Prediktoren (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10).

Damit sind vier unterschiedliche Untersuchungen möglich

1. Statt der tatsächlich aufgetretenen Maximumtemperatur am Tag X wird dort der *Mittelwert* der für den Tag X ermittelten KlaMuKo-Klasse einer auf die Reproduktion der Maximumtemperatur fokussierten Analyse in der Stufe 0 eingesetzt (Stichwort: Stufe 0, nur Clusterung, Kürzel 0C).
2. Die Ersetzung erfolgt nicht durch den Mittelwert der KlaMuKo-Klasse auf der Stufe 0, sondern durch die Anwendung der für diesen Tag ermittelten Regressionskoeffizienten; es wird also eine KlaMuKo-Klassen spezifische Rekonstruktion der Maximumtemperatur am Tag X errechnet (Stichwort: Stufe 0, Regression, Kürzel 0R).
3. Falls eine KlaMuKo-Klasse der Stufe 0 weiter aufgespalten werden kann (s. Erläuterungen in Abschnitt 5.2.5) wird am Tag X der Mittelwert der KlaMuKo Klasse der Stufe 1 für die Maximumtemperatur eingesetzt (Stichwort: Stufe 1, nur Clusterung, Kürzel 1C). Kann die Klasse nicht weiter aufgespalten werden, so erfolgt für einen solchen Tag X das Einsetzen des Wertes der Stufe 0.
4. Auch für die Stufe 1 wurde ja ein Screening und eine Regressionsanalyse durchgeführt. Am Tag X wird die Maximumtemperatur, rekonstruiert mit den Regressionskoeffizienten der Stufe 1 für diesen Tag eingesetzt (Stichwort: Stufe 1, Regression, Kürzel 1R)

Damit können im Vergleich von tatsächlich aufgetretenem (TX_{Messung}) und ersetzttem Wert verschiedene statistische Parameter bestimmt werden:

- Korrelationen zwischen TX_{Messung} und den ersetzten Werten nach Maßgabe 0C, 0R, 1C und 1R
- Reduktion der Varianz (auch erklärte Varianz genannt) gegenüber dem Klima (RV_{Klima}); dies ist eine Vergleichsmethode, der eine relativ schlichte statistische Vorhersage zu Grunde liegt: Für jeden Tag X wird sein Klimamittelwert eingesetzt und aus den Abweichungssummen RV_{Klima} bestimmt. Im Idealfall liegt RV_{Klima} bei 100.
- Reduktion der Varianz gegenüber der Persistenz (RV_{Pers}); dies ist eine Vergleichsmethode, der eine alternative statistische Vorhersage zu Grunde liegt: Für jeden Tag X wird der Wert des *Vortages* eingesetzt und aus den Abweichungssummen RV_{Pers} bestimmt. Im Idealfall liegt RV_{Pers} bei 100.

Diese Untersuchungen werden für die Zielgrößen/Prediktanden Maximumtemperatur (Abschnitt 6.3.1), Minimumtemperatur (Abschnitt 6.2.2), Niederschlag (Abschnitt 6.2.3 für die Analyse der Klima- und Niederschlagsstationen und Abschnitt 6.3.4 für den Niederschlag an den Klimastationen), Dampfdruck (Abschnitt 6.3.5) und Windgeschwindigkeit (Abschnitt 6.2.6) durchgeführt.

Anmerkung zu den negativen RV-Maßen bei der Persistenz

Negative Varianzreduktion? Was bedeutet das? Um die Varianzreduktion zu berechnen, wird zunächst der RMSE (Root Mean Square Error, Wurzel aus dem Fehlerquadrat) bestimmt.

Im Fall der Bestimmung von RV_{kli} wird zunächst $SUMQ_{kli}$ aus den gemessenen Werten der N Tage z. B. für die Maximumtemperatur

$$SUMQ_{kli} = \sum_N TX(x)^2$$

berechnet. Damit bestimmt sich der $RMSE_{kli}$ nach

$$RMSE_{kli} = \sqrt{SUMQ_{kli}/N}$$

Bei der RV-Bestimmung wird diese Größe in Beziehung gesetzt zu einem $RMSE_{KlaMuKo}$, der für TX aus den Differenzen zwischen den Klimamessungen TX_{kli} und der Reproduktion durch KlaMuKo $TX_{KlaMuKo}$ bestimmt wird, z. B. durch das Einsetzen des Klassenmittelwertes der Stufe 0 (Variante S0, s. Erläuterungen auf S. 61)

$$SUMQ_{KlaMuKo} = \sum [TX_{kli}(x) - TX_{KlaMuKo}(x)]^2$$

woraus der $RMSE_{KlaMuKo}$ folgt

$$RMSE_{KlaMuKo} = \sqrt{SUMQ_{KlaMuKo}/N}$$

mit N = Anzahl der Werte. Die Varianzreduktion wird dann mit dieser Beziehung bestimmt

$$RV_{kli} = 1 - \frac{RMSE_{KlaMuKo}^2}{RMSE_{kli}^2} * 100$$

Im Fall der Bestimmung von RV_{Pers} wird zunächst $SUMQ_{Pers}$ die Differenz zwischen dem Wert am Tag x und am Tag $x+1$ bestimmt, quadriert und für die N benutzten Tage aufaddiert, also für TX beispielsweise

$$SUMQ_{Pers} = \sum_N [TX(x) - TX(x+1)]^2$$

Der $RMSE_{Pers}$ bestimmt sich damit zu

$$RMSE_{Pers} = \sqrt{SUMQ_{Pers}/N}$$

Mit N = Anzahl der Werte. Die Varianzreduktion wird dann unter Verwendung der oben beschriebenen Größe $RMSE_{KlaMuKo}$ mit dieser Beziehung bestimmt

$$RV_{Pers} = 1 - \frac{RMSE_{KlaMuKo}^2}{RMSE_{Pers}^2} * 100$$

Zahlenbeispiel für TX unter Verwendung von KlaMuKo Stufe 0, Einsetzen der Klassenmittelwerte für das Jahr: Der $RMSE_{KlaMuKo}$ ist 5,04 $\rightarrow RMSE_{KlaMuKo}^2 = 25,40$. Der $RMSE_{Kli}$ beträgt 15,86 $\rightarrow RMSE_{Kli}^2 = 251,54$. Damit bestimmt sich $RV_{Kli} = 89,9$.

Der $RMSE_{Pers}$ beträgt 2,91 $\rightarrow RMSE_{Pers}^2 = 8,47$, ist also kleiner als $RMSE_{KlaMuKo}$. Mit diesen Werten bestimmt sich $RV_{Pers} = -199,9$ (durch Rundungsfehler weicht dieser Wert geringfügig von demjenigen in Tabelle 18 ab).

Eine Erklärung für diesen Sachverhalt liegt im verwendeten Klimaparameter und dem Jahresausschnitt, für den die Analyse stattfindet, begründet. Besitzt der Parameter einen ausgeprägten Jahresgang, so ist $SUMQ_{KlaMuKo}$ und damit auch $RMSE_{KlaMuKo}$ verhältnismäßig groß, während bei einem Parameter ohne ausgeprägtem Jahresgang $RMSE_{KlaMuKo}$ verhältnismäßig klein ist. Für TX, lediglich im Sommer (Juni-Juli-August) bestimmt, also ohne deutlichen Einfluss eines Jahresgangs, ist $RMSE_{KlaMuKo}$ mit rund 2,5 nur halb so groß wie beim Jahr. Der $RMSE_{Pers}$ hingegen ist bezüglich der angenommenen Werte in unterschiedlichen Jahreszeiten relativ stabil (die Temperaturveränderungen von Tag zu Tag haben wenig Saisonalität). Damit sind „Konstellationen“ wie beim Jahr mit $RMSE_{Pers} \ll RMSE_{KlaMuKo}$ in einzelnen Jahreszeiten weniger wahrscheinlich. Der Blick in weitere Tabellen dieses Kapitels zeigt, dass es beim Niederschlag und beim Wind sowohl beim Jahr als auch in den Halbjahren und Jahreszeiten keine negativen Werte von RV_{Pers} gibt.

Eingedenk dieser Sensitivität erscheint der RV_{Pers} ein nur bedingtes Mittel zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des KlaMuKo-Verfahrens zu sein. Außerdem ist eine KlaMuKo-Klassifikation, die beispielsweise Extreme in der Maximum-Temperatur *des gesamten Jahres* sucht, nicht wirklich sinnvoll – die (per se) warmen Tage des Sommers werden in einer Klasse versammelt und die kalten Tage des Winters in einer weiteren, so dass das Verfahren in erster Näherung hauptsächlich zeitliche Zuordnungen voneinander separiert und nur in geringem Maße spezifische Extrema herausarbeitet.

6.3.1 Maximumtemperatur (TX)

Wie in Tabelle 18 gezeigt, liegen die Korrelation zwischen der gemessenen und der mit KlaMuKo-Stufe 0 reproduzierten Maximumtemperatur in einer Größenordnung von rund 0,7 bis 0,8 und bei Stufe 1 in einer Größenordnung von 0,8 bis 0,9. Korrelationen von 0,9 und mehr werden in den Jahreszeiten Frühling, Sommer und Herbst erreicht. Relativ niedrige Korrelationen sind im SHJ und WHJ zu beobachten. Den stärksten Informationsgewinn von Stufe 0 zu Stufe 1 zeigt das KlaMuKo-Verfahren sowohl bei den Flachlandstationen (*HiMax*) als auch bei den höher gelegenen Stationen (*LoMax*) im SHJ, WHJ, Frühling und Winter.

Tabelle 18: Korrelationen (Korr) und RV-Maße (RV_{klim} und RV_{pers}) für die Reproduktion der Maximumtemperatur (1971-2010) mit den KLaMuKo-Klassen für Stationen mit hohen und niedrigen Maximumtemperaturwerten in den Jahreszeiten, den Halbjahren und im Jahr. S0: Stufe 0; 0C: Stufe 0 mit Clustering; 0R: Stufe 0 mit Regression; S1: Stufe 1; 1C: Stufe 1 mit Clustering; 1R: Stufe 1 mit Regression. Erläuterungen zum Verfahren und der Nomenklatur auf S. 61.

JZ	Zielgröße	0C/1C Korr	0C/1C RV_{klim}	0C/1C RV_{pers}	0R/1R Korr	0R/1R RV_{klim}	0R/1R RV_{pers}
Jahr	HiMaxS0	0,82	89,9	-200,4	0,90	93,2	-81,0
	HiMaxS1	0,88	92,8	-115,5	0,93	95,7	-27,5
Jahr	LoMaxS0	0,80	82,4	-173,6	0,88	88,9	-73,1
	LoMaxS1	0,86	87,2	-99,5	0,90	90,8	-43,6
SHJ	HiMaxS0	0,66	95,4	-84,5	0,79	97,0	-19,8
	HiMaxS1	0,76	96,6	-35,7	0,87	98,0	19,9
SHJ	LoMaxS0	0,66	92,1	-79,7	0,78	94,5	-25,9
	LoMaxS1	0,73	93,5	-47,3	0,84	95,8	4,3
WHJ	HiMaxS0	0,66	74,3	-192,6	0,79	82,9	-95,1
	HiMaxS1	0,76	81,1	-114,5	0,83	86,3	-56,4
WHJ	LoMaxS0	0,64	49,2	-139,7	0,78	67,1	-55,4
	LoMaxS1	0,75	62,1	-79,1	0,81	70,4	-39,8
Frühjahr	HiMaxS0	0,84	94,2	-2,7	0,95	98,2	67,9
	HiMaxS1	0,92	97,1	48,0	0,96	98,5	74,6
Frühjahr	LoMaxS0	0,83	87,3	-7,1	0,94	94,9	56,9
	LoMaxS1	0,92	93,6	46,0	0,96	96,9	73,7
Sommer	HiMaxS0	0,83	98,8	41,1	0,92	99,4	69,5
	HiMaxS1	0,90	99,3	63,8	0,93	99,5	74,7
Sommer	LoMaxS0	0,85	98,2	46,7	0,91	98,9	68,7
	LoMaxS1	0,90	98,8	64,0	0,93	99,1	73,3
Herbst	HiMaxS0	0,88	95,7	8,6	0,95	98,3	63,6
	HiMaxS1	0,94	97,7	51,7	0,97	98,7	72,4
Herbst	LoMaxS0	0,86	91,0	4,7	0,94	96,1	58,6
	LoMaxS1	0,92	95,0	46,6	0,96	97,2	70,6
Winter	HiMaxS0	0,78	73,9	-36,6	0,90	88,1	37,8
	HiMaxS1	0,88	84,7	20,3	0,92	89,9	47,4
Winter	LoMaxS0	0,80	64,3	5,3	0,91	83,0	54,8
	LoMaxS1	0,88	78,0	41,4	0,92	85,0	60,4

Wird die Korrelation zwischen Messungen und KlaMuKo-Reproduktion von TX betrachtet, so zeigt sich insgesamt Folgendes:

- Der Zugewinn durch das Nutzen der Regression ist gegenüber der Verwendung der Klassenmittelwerte mit einer Größenordnung von 0,05 bis 0,10 relativ gering, z. B. in Tabelle 18 im Zellenblock „Jahr“ in der Zeile HiMaxS0 eine Zunahme von 0,82 auf 0,90 bei Verwendung der Klassenmittelwerte resp. der durch die Regressionskoeffizienten reproduzierten Werte.
- Der Zugewinn durch das Nutzen der KlaMuKo-Stufe ist zwar erkennbar, aber ebenfalls relativ gering. Beispielsweise ist in Tabelle 18 im Zellenblock „Jahr“ für die Stationsauswahl „HiMax“ in der Spalte 0C/1C eine Zunahme der Korrelation von 0,82 auf 0,88 durch Verwendung der Stufe 1 erkennbar.
- Zum Teil recht große Zugewinne können erzielt werden, wenn sowohl Stufe 1 als auch die Rekonstruktion durch Regression zum Einsatz kommen.

Bezüglich der Varianzreduktion zeigt sich zunächst, dass KlaMuKo, mit TX als Zielgröße entwickelt, gegenüber einer Klimaprognose eine erhebliche Leistungsfähigkeit besitzt. Dabei werden im Sommerhalbjahr und in den Jahreszeiten RV-Werte zum Teil erheblich über 90 ermittelt, während sie im WHJ relativ niedrig sind. Auch sind die RV-Maße bei Nutzung des Klimamittels und der Persistenz (zu den auffälligen stark negativen RV_{Pers} -Wertes s. Anmerkung am Ende dieses Kapitels) in einigen Jahreszeiten sehr unterschiedlich, wie z. B. in den Wertzeilen für das Frühjahr von Tabelle 18 bei allen vier Varianten (0C, 0R, 1C und 1R) erkennbar ist. Generell zeigen die RV-Maße an, dass die Nutzung der Stufe 1 Zugewinne bei der Beschreibung der Maximumtemperatur bieten, wiewohl diese in einigen Jahreszeiten marginal sind.

6.3.2 Minimumtemperatur (TN)

Die Reproduzierbarkeit der KlaMuKo-Beziehung wird durch die Korrelation der Ausgangsreihen der Minimumtemperatur und der reproduzierten Zeitreihen der Stufe 0 und 1 eingeordnet (Tabelle 19). Die Korrelation liegt etwas niedriger als bei der Maximumtemperatur und besitzt eine Größenordnung von rund 0,7 bis 0,9. Die höchsten Korrelationen (>0,9) sind im Frühling und Herbst, die geringsten Korrelationen im SHJ (zum Teil unter 0,7 insbesondere bei alleiniger Verwendung der Klassenmittelwerte) zu beobachten.

Tabelle 19: Wie Tabelle 18, aber für die Reproduktion der Minimumtemperatur

JZ	Zielgröße	0C/1C Korr	0C/1C RV_{klim}	0C/1C RV_{pers}	0R/1R Korr	0R/1R RV_{klim}	0R/1R RV_{pers}
Jahr	HiMinS0	0,74	70,8	-234,4	0,83	79,6	-133,8
	HiMinS1	0,81	78,3	-149,3	0,87	84,9	-73,6
Jahr	LoMinS0	0,77	62,7	-244,6	0,84	73,7	-142,7
	LoMinS1	0,83	71,1	-167,2	0,87	77,8	-105,1
SHJ	HiMinS0	0,39	85,9	-205,3	0,62	89,7	-122,2
	HiMinS1	0,65	90,4	-108,3	0,76	93,1	-49,2
SHJ	LoMinS0	0,40	77,6	-216,2	0,67	85,2	-109,2
	LoMinS1	0,65	84,5	-118,9	0,76	88,9	-55,9
WHJ	HiMinS0	0,58	34,2	-158,7	0,72	52,4	-87,4
	HiMinS1	0,69	48,4	-102,7	0,77	58,8	-62,2
WHJ	LoMinS0	0,62	52,1	-156,9	0,73	64,2	-91,9
	LoMinS1	0,73	63,4	-95,9	0,78	70,0	-60,8

JZ	Zielgröße	0C/1C Korr	0C/1C RV _{klim}	0C/1C RV _{pers}	0R/1R Korr	0R/1R RV _{klim}	0R/1R RV _{pers}
Frühjahr	HiMinS0	0,76	75,9	-27,4	0,86	90,9	51,3
	HiMinS1	0,88	86,8	30,2	0,91	92,2	58,7
Frühjahr	LoMinS0	0,80	65,7	-27,0	0,94	88,7	57,9
	LoMinS1	0,91	83,5	38,7	0,95	90,5	64,9
Sommer	HiMinS0	0,69	97,4	13,1	0,82	97,4	46,8
	HiMinS1	0,79	98,2	38,6	0,84	98,6	51,7
Sommer	LoMinS0	0,75	96,4	22,6	0,84	97,6	48,0
	LoMinS1	0,83	97,4	43,8	0,87	98,0	56,9
Herbst	HiMinS0	0,79	84,6	-12,1	0,91	92,9	48,3
	HiMinS1	0,87	90,0	27,4	0,93	94,3	58,6
Herbst	LoMinS0	0,85	79,1	-2,7	0,94	91,7	59,2
	LoMinS1	0,92	88,7	44,6	0,95	93,2	66,4
Winter	HiMinS0	0,71	56,7	-60,2	0,86	77,6	17,1
	HiMinS1	0,81	70,2	-10,5	0,88	80,4	27,2
Winter	LoMinS0	0,77	82,1	-17,8	0,89	90,5	37,7
	LoMinS1	0,86	88,8	26,1	0,91	92,1	48,2

Den deutlichsten Informationsgewinn durch die Stufe 1 erzielt das KlaMuKo-Verfahren für das SHJ, bei dem in der Kombination *Stufe 0* und *Verwendung nur der Klassenmittelwerte* besonders niedrige Korrelationen ermittelt werden. Im SHJ ist auch ein ausgeprägter Informationsgewinn sichtbar, wenn statt der Klassenmittelwerte die Reproduktion durch Regression genutzt wird.

Die Varianzreduktion durch das KlaMuKo-Verfahren, gemessen im Vergleich zum Einsetzen der Klimamittelwerte bzw. der Vortageswerte (Persistenz) ist für die Minimumtemperatur, wie bei der Maximumtemperatur, bedeutend und erreicht Größenordnungen von 90 und darüber. Auch hier zeigt sich eine besonders gut ausgeprägte Leistungsfähigkeit der Methodik, wenn sowohl Stufe 1 als auch die Reproduktion durch die Regressionskoeffizienten verwendet werden. Lediglich im Winterhalbjahr und im Winter, wenn freie Atmosphäre und das bodennahe Klimaregime zeitweise entkoppelt sind, treten auch vergleichsweise geringe Varianzreduktionen auf.

6.3.3 Niederschlag (Klima- und Niederschlagsstationen) (RR)

Es wurden für diese Analyse zunächst diejenigen Klima- und Niederschlagsstationen mit einem Clusterverfahren ausgewählt (vgl. Abschnitt 2.4, s. a. Abschnitt 6.2.3), an denen relativ hohe Niederschlagssummen auftreten. Die Korrelation der gemessenen Niederschlagsmengen mit denen, die durch die Anwendung des KlaMuKo-Verfahrens auf Stufe 0 unter Verwendung der Klassenmittel reproduziert werden konnten, hat eine Größenordnung von rund 0,5 (Tabelle 20). Er kann durch Hinzunahme der KlaMuKo-Stufe 1 und der Rekonstruktion auf Grund von Regressionskoeffizienten auf eine Größenordnung von rund 0,7 gesteigert werden. Es besteht die Tendenz, dass die Korrelationen im Winter relativ hoch sind, während sich bei Halbjahren oder dem gesamten Jahr als Berechnungsbasis vergleichsweise niedrige Korrelationen zeigen. Die Analyse der Varianzreduktion zeigt insbesondere gegenüber der Persistenz eine hohe Leistungsfähigkeit der KlaMuKo-Klassifikation. Gegenüber der einer Vergleichsprognose mit Hilfe von Klimamittelwerten ist die Varianzreduktion deutlich geringer, kann aber durch die Verwendung von Stufe 1 und der Rekonstruktion durch Regressionskoeffizienten gesteigert werden.

Tabelle 20: Korrelationen (Korr) und RV-Maße (RV_{klim} und RV_{pers}) für die Reproduktion des Niederschlags (1971-2010) mit den KlaMuKo-Klassen für Klima- und Niederschlagsstationen mit hohen Niederschlagswerten in den Jahreszeiten, den Halbjahren und im Jahr. S0: Stufe 0; 0C: Stufe 0 mit Clustering; 0R: Stufe 0 mit Regression; S1: Stufe 1; 1C: Stufe 1 mit Clustering; 1R: Stufe 1 mit Regression. Erläuterungen zum Verfahren und der Nomenklatur auf Seite 61

JZ	Zielgröße	0C/1C Korr	0C/1C RV_{klim}	0C/1C RV_{pers}	0R/1R Korr	0R/1R RV_{klim}	0R/1R RV_{pers}
Jahr	S0	0,48	40,1	44,4	0,51	39,3	43,6
	S1	0,57	47,2	51,0	0,65	55,0	58,2
SHJ	S0	0,42	34,1	43,4	0,63	52,1	58,8
	S1	0,54	43,1	51,1	0,55	41,1	49,4
WHJ	S0	0,46	41,0	36,0	0,67	59,2	55,6
	S1	0,60	51,8	47,8	0,71	63,2	60,1
Frühjahr	S0	0,52	43,9	49,0	0,63	53,2	57,5
	S1	0,61	51,3	55,7	0,71	61,9	65,4
Sommer	S0	0,47	38,2	47,8	0,63	51,7	59,2
	S1	0,60	49,1	56,9	0,70	59,5	65,8
Herbst	S0	0,52	43,7	47,7	0,61	51,0	54,5
	S1	0,63	53,5	56,8	0,72	62,9	65,6
Winter	S0	0,55	49,0	40,2	0,69	61,9	55,4
	S1	0,67	59,1	52,1	0,77	70,3	65,2

6.3.4 Niederschlag (nur Klimastationen) (RR)

In diesem Kapitel werden Resultate einer Korrelations- und Varianzreduktionsanalyse vorgestellt, bei denen die Datenbasis aus den Klimastationen Sachsens besteht, von denen wiederum diejenigen mit hohem Niederschlag ausgewählt wurden (vgl. Abschnitt 6.2.4). Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 aufgeführt. Es fällt im Vergleich zu den Resultaten des vorhergehenden Abschnittes (Tabelle 20) auf, dass die Korrelations- und RV-Werte kaum Unterschiede aufweisen. Dies sollte als Zeichen für die Stabilität des KlaMuKo-Verfahrens gewertet werden, weil das Verfahren auch mit einem deutlich kleineren Stationskollektiv keine deutlichen anderen Ergebnisse ermittelt.

Tabelle 21: Wie Tabelle 20, aber für den Niederschlag, gemessen an den Klimastationen Sachsens

JZ	Zielgröße	0C/1C Korr	0C/1C RV_{klim}	0C/1C RV_{pers}	0R/1R Korr	0R/1R RV_{klim}	0R/1R RV_{pers}
Jahr	S0	0,47	38,4	45,1	0,50	37,8	44,6
	S1	0,57	46,8	48,5	0,64	52,8	53,9
SHJ	S0	0,46	36,2	47,0	0,61	49,3	57,8
	S1	0,57	45,2	54,5	0,68	56,8	64,1
WHJ	S0	0,47	41,5	37,9	0,67	59,1	56,6
	S1	0,60	51,8	48,9	0,71	63,2	61,0
Frühjahr	S0	0,48	40,7	48,3	0,60	49,8	56,3
	S1	0,63	53,1	59,1	0,71	60,7	65,8
Sommer	S0	0,46	36,4	47,8	0,64	52,4	60,9

JZ	Zielgröße	0C/1C Korr	0C/1C RV _{klim}	0C/1C RV _{pers}	0R/1R Korr	0R/1R RV _{klim}	0R/1R RV _{pers}
Herbst	S1	0,58	45,8	55,5	0,69	57,2	64,9
	S0	0,55	46,0	50,1	0,64	54,6	58,1
	S1	0,63	52,9	56,5	0,72	63,0	65,9
Winter	S0	0,58	50,8	45,0	0,71	63,2	58,9
	S1	0,65	57,5	52,5	0,76	68,2	64,5

6.3.5 Dampfdruck (DD)

Werden gemessene Werte mit denjenigen, die von KLaMuKo rekonstruiert wurden, für den Dampfdruck korreliert (Tabelle 22), so zeigt sich eine durchschnittliche Korrelation in der Größenordnung von 0,6 bis 0,8 (Stufe 0) bzw. 0,7 bis 0,9 (Stufe 1). Die höchsten Korrelationen werden für die Jahreszeiten Frühling und Herbst erzielt. Relativ niedrige Korrelationen finden sich im den Halbjahren und im Jahr. In jedem Fall ist ein Informationsgewinn zu verzeichnen, wenn der Vergleich sowohl mit dem Einsatz von Stufe 1 als auch der Regressions-basierten Rekonstruktion durchgeführt wird. Unterschiede zwischen den Stations-Clustern HiDD und LoDD (vgl. Abschnitt 6.2.5) sind beim Dampfdruck relativ gering.

Werden die KLaMuKo-Ergebnisse bezüglich der Varianzreduktion analysiert, so zeigen sich durchweg sehr hohe RV_{klim} Werte in der Größenordnung von 95 und darüber.

Tabelle 22: Wie Tabelle 18, aber für die Reproduktion des Dampfdrucks

JZ	Zielgröße	0C/1C Korr	0C/1C RV _{klim}	0C/1C RV _{pers}	0R/1R Korr	0R/1R RV _{klim}	0R/1R RV _{pers}
Jahr	HiDDS0	0,73	93,1	-229,9	0,82	95,0	-137,7
	HiDDS1	0,80	94,6	-158,5	0,85	95,8	-99,5
Jahr	LoDDS0	0,74	92,8	-205,2	0,83	94,9	-114,4
	LoDDS1	0,78	93,8	-161,8	0,85	95,6	-88,0
SHJ	HiDDS0	0,56	95,2	-143,3	0,72	96,7	-70,3
	HiDDS1	0,65	96,0	-103,8	0,75	97,0	-55,2
SHJ	LoDDS0	0,48	94,0	-180,0	0,73	96,4	-67,5
	LoDDS1	0,67	95,7	-100,6	0,77	96,9	-47,0
WHJ	HiDDS0	0,55	92,3	-158,8	0,69	94,2	-96,6
	HiDDS1	0,66	93,8	-110,2	0,74	95,1	-65,1
WHJ	LoDDS0	0,55	91,7	-129,5	0,56	91,9	-77,1
	LoDDS1	0,65	93,2	-90,1	0,67	93,4	-47,4
Frühjahr	HiDDS0	0,79	96,4	-20,0	0,93	98,7	56,4
	HiDDS1	0,90	98,3	20,1	0,94	98,9	45,6
Frühjahr	LoDDS0	0,79	96,2	-16,3	0,91	98,3	48,6
	LoDDS1	0,90	98,0	16,5	0,94	98,7	38,0
Sommer	HiDDS0	0,71	98,4	13,0	0,84	99,1	48,8
	HiDDS1	0,81	98,9	37,3	0,86	99,2	53,3
Sommer	LoDDS0	0,72	98,2	9,5	0,84	98,9	45,8
	LoDDS1	0,80	98,7	33,7	0,85	99,0	49,9

JZ	Zielgröße	0C/1C Korrr	0C/1C RV _{klim}	0C/1C RV _{pers}	0R/1R Korrr	0R/1R RV _{klim}	0R/1R RV _{pers}
Herbst	HiDDS0	0,84	97,4	2,5	0,93	98,8	53,9
	HiDDS1	0,91	98,5	41,7	0,95	99,1	65,8
Herbst	LoDDS0	0,83	96,9	-0,3	0,91	98,4	47,4
	LoDDS1	0,90	98,2	41,0	0,94	98,9	65,4
Winter	HiDDS0	0,68	95,4	-36,7	0,85	97,7	31,0
	HiDDS1	0,82	97,2	16,0	0,88	98,1	43,8
Winter	LoDDS0	0,70	95,4	-11,0	0,88	97,9	48,5
	LoDDS1	0,84	97,3	35,4	0,91	98,3	60,2

6.3.6 Windgeschwindigkeit (FF)

Bei den Analysen der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit ist zunächst zu erwähnen, dass eine sinnvolle Clusterung des Stationskollektivs nicht möglich war, denn es wurde nur eine Unterteilung gefunden, die eine Station der ersten Stationsgruppe und alle übrigen der zweiten Stationsgruppe zuordnete (vgl. Abschnitt 6.2.6).

Die Ergebnisse, dargestellt in Tabelle 23, zeigen hohe Korrelationen zwischen Messungen und Rekonstruktionen der Datenreihen mit dem KlaMuKo-Verfahren. Sie besitzen eine Größenordnung von rund 0,8. Zumeist kann ein deutlicher Informationsgewinn verzeichnet werden, wenn der Vergleich mit den Daten der KlaMuKo-Stufe 1 und der Rekonstruktion auf der Basis von Regressionskoeffizienten (0R bzw. 1R) geschieht.

Wie schon beim Dampfdruck sind die Rekonstruktionen des Tagesmittelwinds durch das KlaMuKo-Verfahren gegenüber einer Nutzung von Klimamittelwerten bzw. Persistenz durch erhebliche Varianzreduktionen charakterisiert, die immer über 90, verbreitet deutlich über 95 liegen.

Tabelle 23: Wie Tabelle 18, aber für die Reproduktion des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit

JZ	Zielgröße	0C/1C Korrr	0C/1C RV _{klim}	0C/1C RV _{pers}	0R/1R Korrr	0R/1R RV _{klim}	0R/1R RV _{pers}
Jahr	S0	0,68	90,0	29,4	0,86	95,3	66,9
	S1	0,84	94,7	62,3	0,89	96,2	73,3
SHJ	S0	0,73	93,2	52,4	0,84	95,7	70,3
	S1	0,82	95,1	66,0	0,82	96,2	73,7
WHJ	S0	0,78	93,3	52,8	0,90	96,7	76,9
	S1	0,86	95,6	68,9	0,91	97,0	79,2
Frühjahr	S0	0,69	91,5	45,5	0,86	95,7	72,7
	S1	0,83	94,9	67,8	0,89	96,7	78,6
Sommer	S0	0,68	92,5	44,3	0,85	96,1	71,4
	S1	0,81	95,2	64,4	0,87	96,7	75,7
Herbst	S0	0,76	92,5	49,6	0,89	96,4	76,0
	S1	0,86	95,4	69,5	0,91	97,0	79,8
Winter	S0	0,85	95,1	64,1	0,91	97,2	79,1
	S1	0,90	96,7	75,9	0,93	97,7	83,0

6.4 Validierung – Reproduktion der KlaMuKo-Klassenhäufigkeiten durch Reanalysen und 20C-Daten

Im vorigen Abschnitt wurde analysiert, wie stark die mit KlaMuKo erzeugten Zeitreihen einiger meteorologischer Parameter mit den gemessenen Parametern korreliert sind und in welcher Größenordnung durch KlaMuKo eine Varianzreduktion bezüglich der Referenzgrößen Klimamittel und Persistenz erreicht wird. In diesem Abschnitt erfolgt für einige meteorologische Parameter die Analyse, ob die Häufigkeitsverteilung der KlaMuKo-Klassen in den 20C-Daten eines GCM (in diesem Fall ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1) reproduziert wird. Dazu wird eine Wiedererkennung der KlaMuKo-Klassen mit den entsprechenden Reanalyse- bzw. GCM-Daten ausgeführt.

Tagesmaximumtemperatur

Wie die Ergebnisse in Tabelle 24 und Tabelle 25 zeigen, sind die Ähnlichkeiten zwischen den wiedererkannten KlaMuKo-Klassenhäufigkeitsverteilungen relativ groß, sodass von einer qualitativ hohen Ähnlichkeit der Klimamodell-Resimulationen des 20. Jahrhunderts (20C-Daten) mit den eingetretenen klimatischen Verhältnissen gesprochen werden kann. Dies gilt sowohl für den Sommer, den Winter als auch das Jahr (hier nicht tabelliert).

Tabelle 24: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für die Tagesmaximumtemperatur im Sommer (JJA) an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NCAR	0,1	0,1	0,8	1,4	3,0	2,4	15,9	3,6	29,8	42,9
EH5_20C	0,6	0,0	0,3	2,6	1,1	4,2	19,8	4,5	31,0	36,0

Tabelle 25: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für die Tagesmaximumtemperatur im Winter (DJF) an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NCAR	0,5	0,1	0,8	0,5	0,8	0,2	46,0	13,9	18,1	19,1
EH5_20C	0,1	0,5	0,3	1,0	0,4	1,9	47,7	13,1	15,8	19,4

Niederschlag

Für den Niederschlag zeigt sich im Grunde ein ähnliches Bild wie bei der Maximumtemperatur: Die Häufigkeitsverteilungen der KlaMuKo-Klassen des Gegenwartsklimas werden in erster Näherung von den 20C-Simulationen des GCM relativ ähnlich wiedergegeben (s. Tabelle 26 und Tabelle 27). Leichte Diskrepanzen zeigen sich im Sommer bei den Klassen 5 und 7 – dies ist darauf zurückzuführen, dass die zur Wiedererkennung (Ähnlichkeitssuche) benutzten Konfigurationen der Regressionskoeffizienten bei diesen beiden Klassen relativ geringe Unterschiede aufweisen und damit das Potenzial einer „Verwechslung“ bei der Wiedererkennung besteht. Damit kann davon ausgegangen werden, dass, mit geringen Abstrichen, auch für den Niederschlag eine qualitativ recht hohe Ähnlichkeit der Klimamodell-Resimulationen des 20. Jahrhunderts (20C-

Daten) zu den eingetretenen klimatischen Verhältnissen besteht. Dies gilt in relativ hohem Maße für sowohl für den Winter und das Jahr (hier nicht tabelliert) und etwas weniger stringent für den Sommer.

Tabelle 26: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KLaMuKo-Klassen für die Niederschlagsmenge im Sommer (JJA) an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KLaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NCAR	0,4	0,1	0,5	0,1	1,7	1,4	22,8	6,1	55,8	11,1
EH5_20C	0,2	0,7	0,1	0,1	13,0	1,2	7,6	6,8	60,5	9,9

Tabelle 27: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KLaMuKo-Klassen für die Niederschlagsmenge im Winter an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KLaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NCAR	1,7	0,3	0,2	0,3	2,3	3,3	68,3	4,6	5,2	13,9
EH520C	3,8	0,3	0,1	0,1	2,1	9,7	65,1	7,2	3,2	8,5

6.5 Fazit

Die Anwendung der KLaMuKo-Methodik umfasste in diesem AP mehrere meteorologische Parameter, d. h. es gab keine direkte Fokussierung auf die Extreme via Extremindikatoren, wie es im Arbeitspaket 5 (Abschnitt 7) der Fall ist. Dabei ergab sich, dass sehr wohl auch durch KLaMuKo bereits extreme Wertebereiche dieser Parameter in einzelnen, gering besetzten Klassen zusammengefasst werden.

Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse wurde herausgearbeitet, dass die Verwendung der 1. Stufe von KLaMuKo und der Nutzung der Regression je nach meteorologischem Parameter zum Teil starke Zusammenhänge mit den Klimamessungen ergibt – auch werden hohe Raten der durch die KLaMuKo-Klassifikation erklärten Varianz gefunden.

Eine weitere Validierung erfolgte durch die Analyse, inwieweit die 20C-Resimulationen eines GCM (hier: ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1) die Häufigkeitsverteilung der KLaMuKo-Klassen für den Zeitraum 1971-2010 wiederzugeben in der Lage sind. Dabei wurde ermittelt, dass hohe qualitative Ähnlichkeit beider Häufigkeitsverteilungen gegeben ist, d. h. das untersuchte GCM gibt die gegenwärtigen Klimaverhältnisse diesbezüglich adäquat wieder.

7 Arbeitspaket 5 – Diagnose und Projektionen von Extremindikatoren

7.1 Kontext

In diesem Arbeitspaket werden Ergebnisse von Analysen mit dem KlaMuKo-Verfahren bezüglich spezifischer Extremindikatoren vorgestellt. Die Bearbeitung und die Erstellung des Berichtstextes zu diesem AP erfolgte im Zuge der Projektpartnerschaft mit dem IÖZ der Bergakademie Freiberg weitgehend durch Dipl.-Geoökol. Wiebke Miketta.

Im der ersten Phase des KLIWETT-Vorhabens wurde bereits befunden, dass die „klassischen“ Zirkulationsmuster wie Hess-Brezowsky-Großwetterlagen, die WLK-Klassifikation nach Dittmann oder die WEREX-Klassifikation Extremindikatoren, z. B. Heiße Tage, Spätfrost oder Eistage, nicht befriedigend beschreiben. Auch die objektivierte Großwetterlagenklassifikation aGWL, die im ersten Teilmodul von KLIWETT Phase II erarbeitet und kurz in Abschnitt 3 und 4 dieses Berichts vorgestellt wurde, beschreibt Extremindikatoren nur unzureichend.

Ein Schritt vorwärts auf dem Weg zur Beschreibung von Extremen wurde durch die im Rahmen von KLIWETT II erarbeitete KlaMuKo-Methodik (s. Abschnitt 5 und 6) erreicht. In Arbeitspaket 5 geht es um die Anwendung von KlaMuKo auf mehrere Extremindikatoren sowie Betrachtungen der mit einem GCM projizierten zeitlichen Entwicklung von Extremindikatoren.

Dazu ist es wichtig, eine in Abschnitt 2.3 vorgestellte Strategie zur Betrachtung von regionalen Phänomenen, die unterschiedlich deutliche im Untersuchungsgebiet oder Teilen davon auftreten können, zu rekapitulieren. Anders als bei der direkten Analyse eines meteorologischen Parameters als Prediktand (z. B. die Maximumtemperatur, die ja täglich unterschiedliche Werte annimmt) sind Indikatoren in der Regel *binarisierte* Größen. Das heißt, an Tagen, an denen ein Indikator auftritt (z. B. $TX < 0$ also ein Eistag) wird der Prediktand auf 1 gesetzt und an allen Tagen bekommt er den Wert 0. An einer Einzelstation ist dies verhältnismäßig einfach; aber wenn es sich um ein Netz von Stationen handelt, dann kann auch die Flächenrepräsentativität von Bedeutung sein. Soll das Kriterium als „eingetroffen“ gesetzt werden, wenn das Extrem an einer der zwölf Stationen in Sachsen (oder einer per Stationsclusterung selektierten Untermenge der Stationen) auftritt? Oder soll es gesetzt werden, wenn es an allen Stationen erfüllt ist? Oder wenn es an einem repräsentativen Teil der Stationen (z. B. 30 % oder 70 % aller Stationen) eintritt? Es sind also Extremindikator-spezifische Fallentscheidungen zu treffen, wie stringent die Forderungen an das Zutreffen des Extremindikators sind. Ein Leitgedanke bei diesen Fallentscheidungen ist, dass das Extrem durch ihre Anwendung nicht zu selten wird, denn es ist voraussichtlich nicht erfolgversprechend, ein Extrem zu untersuchen, das einem 99-Perzentil oder noch stärkerer „Extremität“ (das also nur in 1 % aller Fälle oder noch seltener auftritt) entspricht.

All die eben genannten Fallunterscheidungen laufen auf eine Binarisierung hinaus, d. h. der Prediktand ist eine Zeitreihe, die nur zwei Werte (z. B. 1 und 0) enthält. Die Beschreibung von Extremindikatoren kann auch davon profitieren, wenn bei der Datenaufbereitung ein zusätzlicher Vorschrift erfolgt. Für ausgewählte Extremindikatoren wird zusätzlich für jeden Tag bestimmt, welcher *Anteil* der Stationen das Kriterium erfüllte. Die berechneten Zeitreihen beinhalten dann eine Zahl zwischen 0 % (keine Station) und 100 % (alle Stationen). In der Nomenklatur des KLIWETT-Vorhabens erhalten Dateien mit diese Zeitreihen den Namensbestandteil **prob** (probability). Dies unterscheidet sie von der ebenfalls benutzten (binarisierten) Variante, die an einem

Tag X den Prediktor auf 1 setzt, wenn 30 % (Namensbestandteil **prob_30pro**) bzw. 70 % (Namensbestandteil **prob_70pro**) der Klima- bzw. Luftgütestationen (Letztere sind in Abschnitt 9 beschrieben) das ausgewählte Kriterium erfüllen.

Tabelle 28: Liste der in KLIWETT II verwendeten Indikatoren für Extremwerte

Extremindikator	Jahreszeit	Kürzel	Grenze	Stationen
1) Extreme Trockenperioden	Jahr	Trk	RR < 0,5 mm; 10 Tage	Mittel der 12 Stationen
2a) Hochwasser*	Jahr			HiNied (4 Stationen)
2b) Hochwasser*	SHJ	Ni3	3 Tage Niederschlag	HiNied (5 Stationen)
2c) Hochwasser*	WHJ			HiNied (4 Stationen)
3) Perioden mit hohem Niederschlag	Jahr	RRx	RR > 5 mm; 3 Tage	Mittel der 12 Stationen
4) Heiße Tage	SHJ		TX > 30°C	HiMax (9 Stationen)
5) Hitzewellen	SHJ		TX > 30°C; 5 Tage	Mittel der Stationen
6) Eistage	WHJ		TX < 0°C	HiMax (9 Stationen)
7) Spätfröste	AMJ		TN < -4°C	HiMin (7 Stationen); prob
8a) Starkwinde	SHJ			
8b) Starkwinde	WHJ		FF > 8 m/s	alle Stationen; prob_30pro
9) Schwüle	SHJ		DD > 18 hPa	HiDD (9 Stationen)
10) Tropennächte	SHJ		TN > 20°C	HiMin (7 Stationen)
11) Niederschlagsreiche kalte Tage	Jahr	feukalt	RR > P75; TM < P25	Alle 12 Stationen
12) Niederschlagsarme warme Tage	Jahr	trowarm	RR < P25; TM > P75	alle 12 Stationen
13) PM ₁₀ -Überschreitungen	WHJ		PM ₁₀ > 50 µm/m ³	36 Luftgütestationen

* Als Näherungsgröße für Hochwasser wurde das in der Hydrologie gebräuchliche Maß des Dreitagesniederschlags verwendet.

Die 13 in Tabelle 28 aufgelisteten Extremindikatoren¹³ (durch weitere saisonale Unterteilungen sind es im Grunde 16 Indikatoren) werden im Folgenden zunächst hinsichtlich der zu ihrer Beschreibung relevanten Prediktoren und ihrer klimatischen Charakteristika der Gegenwart (Referenzzeitraum 1971–2000) untersucht. Für einige Indikatoren (Trockenperioden, Eistage, Schwüle) wird die Beschreibungsqualität mittels KLaMuKo-Klassifikation bestimmt (analog zu den Untersuchungen in Abschnitt 6.4). Abgeschlossen wird jeder der Unterabschnitte von Abschnitt 7.2 mit einer Analyse der zukünftigen Entwicklung der Häufigkeit dieser KLaMuKo-Klassen mit Bezug zum jeweiligen Extremindikator. Es werden drei Klimamodell-Projektionen von ECHAM5 MPI-OM Lauf 1 auf der Basis der SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 genutzt.

Anmerkung zur Tabellierung von Korrelationen

In Abschnitt 6.2 wurden neben die Tabellen der vom Screening ermittelten zielführenden Prediktoren auch solche mit Einfach-Korrelationen und multiplen Korrelationen für die unterschiedlichen Untersuchungszeitbereiche (Jahreszeiten, Halbjahre, Jahr) gestellt. In Abschnitt 7.2 erfolgt dies in Form einer zusammenfassenden Auflistung (Tabelle 64) für alle Extremindikatoren.

¹³ Zusätzlich ist in Tabelle 28 angegeben, für welche Jahreszeit(en) der Extremindikator untersucht wurde, mit welchen Konventionen die Bestimmung des Indikators erfolgte und welche Stationen oder Stationsgruppen dafür herangezogen wurden. Gegebenenfalls ist angegeben, ob es sich um ein Flächenmittel aller Klimastationen oder eine Vorbehandlung, die die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines Extrems beschreibt, handelt.

Anmerkung zur grafischen Darstellung zukünftiger Veränderung der Extremindikatoren

Die mit dem Klimawandel verbundenen zeitlichen Veränderungen der Extreme werden durch den Vergleich der Klimastatistiken von 30-jährigen Zeiträumen (2021–2051, 2041–2071 und 2071–2100; Klimaprojektionen) mit dem Referenzzeitraum 1971–2000 bewertet. Dazu erfolgen Darstellungen in Form von Stapelbalkendiagrammen (z. B. Abbildung 13), die anzeigen, welche Entwicklung die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Klasse im Verlauf der drei o.e. 30-jährigen Zeiträume durchlaufen. Dabei sind für jede Klasse die Entwicklungen in den ECHAM5-Projektionen mit den Szenarios A1B, A2 und B1 nebeneinander gestellt.

7.2 Extremindikatoren

7.2.1 Extreme Trockenperioden

Bei der Analyse der extremen Trockenperioden (Trk) werden Tage untersucht, an denen der Niederschlag an mindestens zehn aufeinander folgenden Tagen nicht größer 0,5 mm ist. Dafür wird für einen Untersuchungszeitraum, der das gesamte Jahr umfasst, das Mittel aller 12 Klimastationen zur Analyse herangezogen. Das Kriterium, einer Trockenperiode anzugehören, erfüllen im Zeitraum 1971–2000 11 % der Tage (1.214 Tage). Das entspricht einem durchschnittlichen Auftreten von Tagen in Trockenperioden an rund 40 Tagen in Jahr. Eine extreme Trockenperiode ist im Mittel 13 Tage lang und tritt tendenziell am häufigsten zwischen Oktober und April auf. Das Auftretensmaximum liegt im Oktober (205 Tage, d. h. 17 % der 1.214 identifizierten Tage in Trockenperioden) und Januar (162 Tage; 13 %). Das Andauerverhalten zeigt jedoch eine andere Saisonalität, denn im Schnitt sind die extremen Trockenperioden im Juli und August am längsten (17 bzw. 16 Tage), obwohl sie in diesen beiden Monaten am seltensten auftreten. Die längste mit dem Kriterium identifizierte Trockenperiode im Referenzzeitraum dauerte 27 Tage an.

Nach Anwendung des KlaMuKo-Verfahrens mit der Zielgröße „Tag gehört einer Trockenperioden an“ werden 10 Klassen identifiziert; die zugehörigen Regressionsgrößen finden sich in Tabelle 29. Bei der Rekonstruktion der Trockenperioden ist die geopotenzielle Höhe in 700 hPa die dominierende Regressionsgröße.

Tabelle 29: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Extreme Trockenperioden für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Geopotenzielle Höhe 700 hPa	3
2	Relative Feuchte 850 hPa	7
3	Summenprediktor	58
4	Advektion der Temperatur 850 hPa	35

Tabelle 30: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Extreme Trockenperioden für das Mittel der Klimastationen (Jahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	507	0,15	0,36	1,00	1,00	0,00
3	740	0,02	0,15	0,00	1,00	0,00
4	383	0,29	0,45	1,00	1,00	0,00
5	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1719	0,31	0,46	1,00	1,00	0,00
7	2301	0,03	0,18	0,00	1,00	0,00
8	1093	0,12	0,32	1,00	1,00	0,00
9	2434	0,01	0,11	0,00	1,00	0,00
10	5422	0,11	0,31	1,00	1,00	0,00

Das KlaMuKo-Verfahren beschreibt das Verhalten der extremen Trockenperioden mit einer Einfachkorrelation von 0,29 und einer multiplen Korrelation von 0,36 (s. Tabelle 64). In Tabelle 30 sind übersichtsartig die Eigenschaften der 10 Klassen der Stufe 0 aufgelistet. Es sei angemerkt, dass die analysierten Daten binarisiert sind, also für jeden Tag entweder den Wert 1 (Teil einer Trockenperiode) oder den Wert 0 (nicht Teil einer Trockenperiode) besitzen. Wie die Spalten Max und Min zeigen, wurde keine Klasse oder Unterklasse identifiziert, in der sich ausschließlich Tage einer Trockenperiode befinden (dort wären beide Werte = 1). Klasse 1 und 5 beinhalten nur Tage, an denen keine Trockenperiode festgestellt wurde (Klassenmittel, Min und Max = 0). Diese beiden Klassen sind jedoch sehr gering besetzt (4 bzw. 7 Tage). Viele Tage, die das Kriterium der extremen Trockenperiode erfüllen, sammeln sich in den Klassen 2, 4, 6, 8 und 10 (95-Perzentil 1,0), jedoch enthalten diese Klassen auch Tage, die keiner Trockenperiode angehören, denn ihre Mittelwerte betragen zwischen rund 0,1 und rund 0,3. Gemeinsam stellen diese fünf Klassen 63 % der Gesamtheit der Tage dar. Die Klassen 3, 7 und 9 haben niedrige Mittelwerte und das 95-Perzentil liegt bei 0,0 – sie sind also präferenziell den feuchteren Episoden zuzuordnen, wiewohl einige Tage aus Trockenperioden ebenfalls in ihnen auftreten (Max = 1); eingedenk der relativ niedrigen Streuung dieser drei Klassen ist dennoch festzustellen, dass Trockenperioden in ihnen relativ selten sind.

Validierung: Reproduktion der KlaMuKo-Klassen-Häufigkeitsverteilung bezüglich der Trockenperioden durch ein GCM

Wie in Abschnitt 7.1 erwähnt, erfolgt für einige Extremindikatoren eine Analyse, ob die Häufigkeitsverteilung, die KlaMuKo, mit diesem Extremindikator als Zielgröße von einem GCM in dessen 20C-Simulation reproduziert wird. Analoge Untersuchungen zu verschiedenen meteorologischen Parametern sind in Abschnitt 6.4 dokumentiert.

Tabelle 31: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für den Extremindikator „Trockenperioden“ an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971-2010

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NCAR	0,0	3,4	5,1	2,6	0,1	11,7	15,8	7,4	16,6	37,2
EH5_20C	0,0	2,5	5,6	1,8	0,0	12,2	23,1	6,0	12,2	36,6

In Tabelle 31 findet sich ein Vergleich, inwieweit die KLaMuKo-Klassen für den Trockenperioden-Indikator durch ECHAM5 MPI-OM Lauf 1 für den Zeitraum 1971–2010 wiedergegeben werden. Es zeigt sich, dass die Häufigkeitsverteilungen qualitative Ähnlichkeiten besitzen und nur in einzelnen Klassen geringe Abweichungen zwischen gemessenem und simuliertem Klima zu verzeichnen sind.

Zukunftsentwicklung

Eine zeitliche Veränderung der extremen Trockenperioden wird in Abbildung 13 sichtbar. Die Differenz des Zeitraumes 2071–2100 ist im Vergleich zum Referenzzeitraum allgemein am größten.

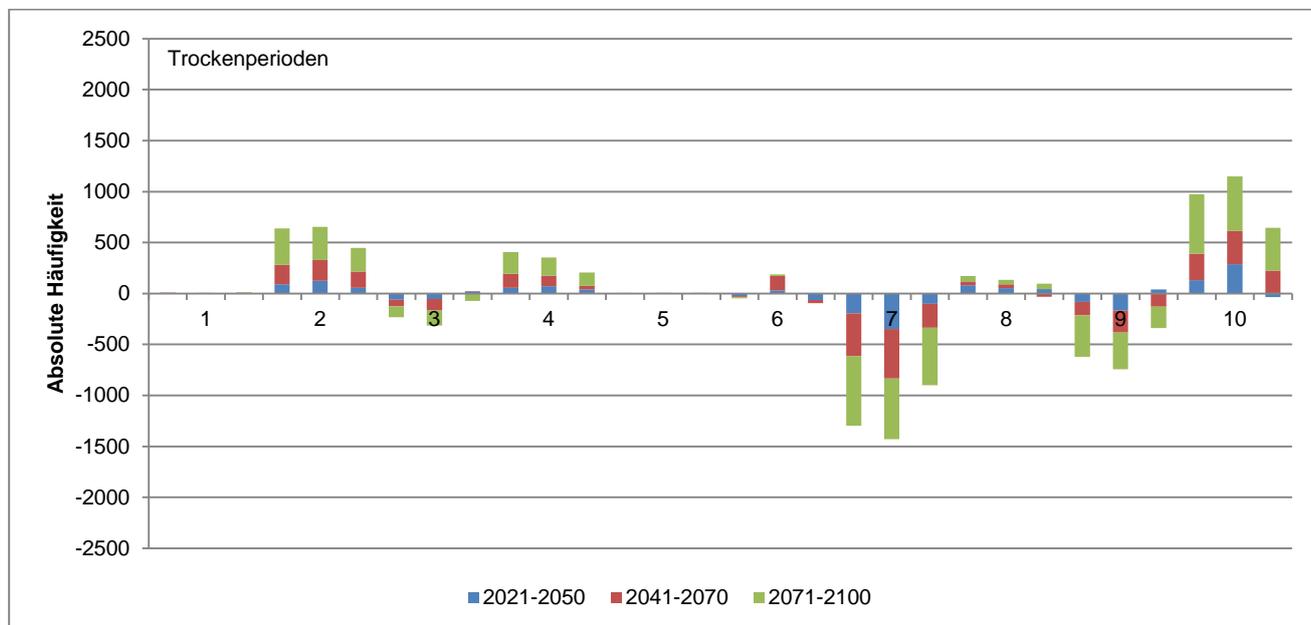


Abbildung 13: Zukunftsentwicklung der Trockenperioden. Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der extremen Trockenperioden für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Jahr

Die relativ trockenen Klassen 2 und 10 zeigen einen deutlichen positiven Anstieg der absoluten Häufigkeit. Ebenfalls erkennbar, wenn auch schwächer, ist diese Ausprägung für die Klassen 4 und 8. Negative Differenzen im Vergleich zum Referenzzeitraum zeigen die Klassen 3, 7 und 9. Für die Klasse 3 ist diese Tendenz nicht so deutlich. Für die Klasse 4, die verhältnismäßig viele Tage mit Trockenperioden beinhaltet, bedeutet das im Einzelnen für das Szenario A1B, dass die absolute Häufigkeit von 188 Tagen (1971–2000) auf 244 Tage (2021–2050; +56 Tage) und weiter auf 401 Tage im letzten Zeitabschnitt 2071–2100 (+213 Tage) ansteigt. Das entspricht mehr als einer Verdopplung der absoluten Häufigkeit vom Referenzzeitraum zu 2071–2100. Auf der anderen Seite werden die besonders prägnanten, aber seltenen Klassen 1 und 5 in den Szenarien kaum wiedererkannt, weshalb eine belastbare Aussage zu deren zeitlichen Veränderung nicht möglich ist. Die tendenziell Trockenheit anzeigende und relativ häufige Klasse 6 weist keine eindeutigen Tendenzen auf. Insgesamt stellt sich das Bild für die Zukunftsentwicklung der Trockenperioden wie folgt dar:

- Klassen, in denen sich nur wenig Tage sammeln, die die Kriterien für eine Trockenperiode erfüllen (Klasse 3, 7 und 9) zeigen für die Zukunft Abnahmetendenzen.
- Klassen mit vielen Tagen einer Trockenperiode (Klasse 2, 4, 8 und 10) weisen positive Differenzen zum Referenzzeitraum, mit Ausnahme der Klasse 6 (kein Trend), auf.

■ Folglich besteht eine leichte Neigung, dass das Auftreten extremer Trockenperioden zukünftig wahrscheinlicher wird.

7.2.2 Hochwasser

Um Hochwasser charakterisieren zu können, wurde ein Standardvorgehen aus der Hydrologie umgesetzt und der dreitägige Niederschlag (Ni3) bestimmt. Dabei handelt es sich um die Berechnung eines Dreitagemittels aus dem Niederschlag zu den Termin t, t+1 und t-1. Für die Analyse im Rahmen von KLIWETT wurden die Messungen an Klimastationen mit hohem Niederschlag verwendet (vgl. Beschreibung der Stationsclusteranalyse in Abschnitt 2.4). Die Unterteilung der Stationen in Sachsen ergibt für das Jahr und das Winterhalbjahr eine Untermenge aus 4 Stationen (Aue, Fichtelberg, Marienberg und Zinnwald; vgl. Tabelle 5) und für das Sommerhalbjahr aus 5 Stationen (Aue, Chemnitz, Fichtelberg, Marienberg und Zinnwald).

Der Screening-Prozess ermittelt die in Tabelle 32 (Jahr), Tabelle 33 (SHJ) und Tabelle 34 (WHJ) wiedergegebenen besonders relevanten Felder.

Tabelle 32: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Hochwasser (3 Tage Niederschlag) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Niederschlägen (HiNied). Bestimmungszeitraum: Jahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Geopotenzielle Höhe 1000 hPa	1
2	Horizontale Diff. Geopot. O-W 850 hPa	12
3	Advektion der Temperatur 850 hPa	35
4	Vorticity 1000 hPa	15

Tabelle 33: Wie Tabelle 32, aber für das Sommerhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Horizontale Stromfelddivergenz 700 hPa	24
2	Approximierte kurzweilige Einstrahlung	60
3	Betrag des Gradienten 1000 hPa	30
4	Vorticity 700 hPa	17

Tabelle 34: Wie Tabelle 32, aber für das Winterhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Horizontale Diff. Geopot. O-W 850 hPa	12
2	Betrag des Gradienten 850 hPa	31
3	Summenprediktor	58
4	Advektion der Temperatur 850 hPa	35

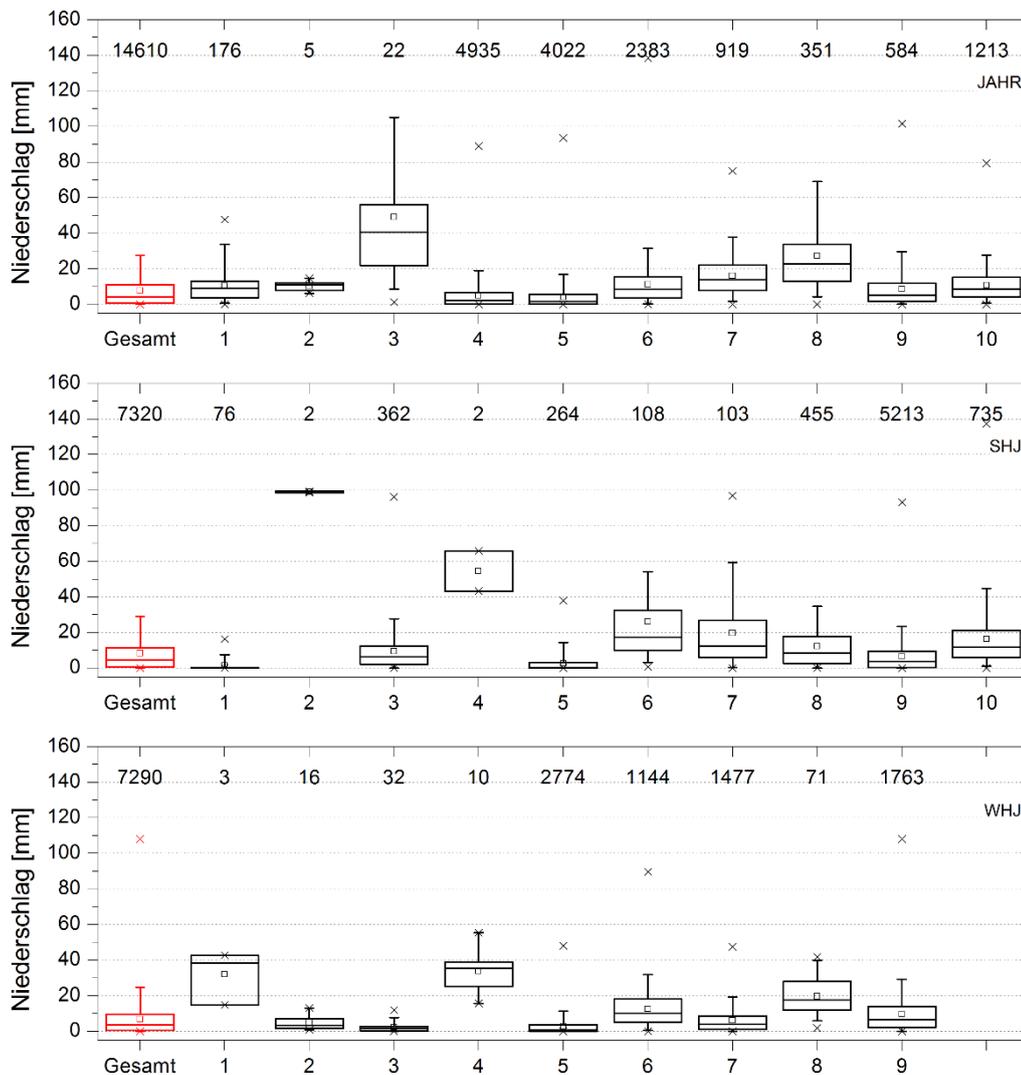


Abbildung 14: Charakteristika der Hochwasserklassen für das Jahr (oben), SHJ (Mitte) und WHJ (unten) dargestellt durch Box-Whisker-Plots. Die Antennen (Whisker) markieren das 5- und 95-Perzentil des Klassen-spezifischen Niederschlags [mm]. Das Minimum (kleinster Datenwert) und Maximum (größter Datenwert) der jeweiligen Klasse werden mit einem X gekennzeichnet. Die obere Achse gibt für jede Klasse die Anzahl der in ihr befindlichen Tage an.

Zur Veranschaulichung der Wertebereiche in den einzelnen KlaMuKo-Klassen sind in Abbildung 14 Boxplots dargestellt. Außerdem ist in den Boxplots die Zahl der in jeder Klasse enthaltenen Tage vermerkt; ergänzend geben Tabelle 35 bis Tabelle 37 die zugehörigen Werte wieder. Für die Analyse des Winterhalbjahres stehen dabei 9 Klassen und für das Jahr und SHJ 10 Klassen zur Verfügung. In den Klassen 3, 7 und 8 (gemeinsam rund 9 % der Tage) des Jahres (oberste Box in Abbildung 14 und Tabelle 35) finden sich Tage mit besonders großen Niederschlagsmengen. Das 95-Perzentil, dargestellt durch das Ende der oberen „Antenne“ (Whisker), ist dort größer 35 mm und das Mittel der Klassen ist gleichzeitig größer 15 mm. In den mit Abstand am häufigsten Klassen 4 und 5 (34 bzw. 28 % relative Häufigkeit) finden sich hingegen Tage mit relativ geringen Niederschlagsmengen (Mittel von rund 5 mm).

Tabelle 35: Tabellarische Darstellung der Charakteristika der KLaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Niederschlagsmenge an drei aufeinanderfolgenden Tagen für das Mittel der Klimastationen (Jahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	176	10,43	9,31	32,55	47,65	0,00
2	5	10,41	3,29	14,65	14,65	6,38
3	22	49,12	47,32	105,00	234,45	1,33
4	4935	4,96	7,06	18,93	88,95	0,00
5	4022	4,20	6,44	16,93	93,58	0,00
6	2383	11,29	11,37	31,35	138,50	0,00
7	919	16,16	11,58	37,73	75,08	0,00
8	351	27,32	23,95	69,00	228,43	0,00
9	584	8,66	10,55	29,60	101,60	0,00
10	1213	10,86	9,44	27,40	79,43	0,00

Für das SHJ (mittlere Box von Abbildung 14 und Tabelle 36) ermittelt KLaMuKo einige Klassen mit hohen Niederschlagsmengen (Nr. 2, 4, 6, 7, und 10). Das 95-Perzentil ist dort größer als 45 mm und das Mittel des Dreitagesniederschlags für diese Klassen ist größer als 15 mm. Gemeinsam beinhalten diese fünf Klassen 13 % aller Tage. Auffällig bei den Analysen der Sommerhalbjahre ist die Identifizierung einer sehr großen Klasse 9, die 71 % der Tage beinhaltet und die im Mittel durch relativ geringe Niederschlagsmittel charakterisiert ist. In Klassen 2 und 4 befinden sich nur sehr wenige Tage, allerdings mit extrem hohen Niederschlagsmengen. Die Repräsentativität dieser Klassen ist aber gering.

Tabelle 36: Wie Tabelle 35, jedoch für das Sommerhalbjahr

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	76	1,35	3,15	7,30	16,40	0,00
2	2	98,99	0,44	99,30	99,30	98,68
3	362	9,49	11,78	27,72	96,22	0,00
4	2	54,63	16,00	65,94	65,94	43,32
5	264	2,81	5,33	14,34	37,90	0,00
6	108	26,10	31,01	54,22	209,42	0,68
7	103	19,64	18,76	59,16	97,02	0,00
8	455	12,12	14,01	34,26	165,68	0,00
9	5213	6,64	8,56	23,22	93,12	0,00
10	735	16,36	16,05	44,84	137,22	0,02

Klassen mit besonders hohen Niederschlagsmengen sind im WHJ (untere Box von Abbildung 14 und Tabelle 37) definiert durch ein 95-Perzentil größer 30 mm und einem Mittel der Hochwasserklasse größer 15 mm. Dieses Kriterium erfüllen die Klassen 1, 4 und 8, die gemeinsam etwas über 1 % der Tage beinhalten. Wird Klasse 6 dazu gerechnet, die im Mittel leicht unter 15 mm Dreitagesniederschlag besitzt, so erhöht sich der Anteil auf rund 17 %. Wie schon bei der Betrachtung des Jahres und Sommerhalbjahres beinhaltet die größte Klasse (Im WHJ ist dies die Klasse 5) eine relativ geringe Niederschlagsmenge.

Tabelle 37: Wie Tabelle 35, jedoch für das Winterhalbjahr

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	3	31,95	15,08	42,78	42,78	14,73
2	16	4,89	4,11	12,35	13,15	0,85
3	32	2,34	2,73	6,03	11,95	0,03
4	10	33,85	11,58	55,43	55,43	15,70
5	2774	2,75	4,52	11,25	48,15	0,00
6	1144	12,63	10,43	31,80	89,58	0,00
7	1477	6,11	6,65	19,33	47,65	0,00
8	71	19,66	10,24	37,18	41,75	1,83
9	1763	9,66	9,99	29,35	108,05	0,00

Wie in Tabelle 64 erkennbar, beschreiben die Regressionsgrößen das Verhalten des Hochwassers (durch den Dreitagesniederschlag approximiert) der drei untersuchten Jahresabschnitte mit einer durchschnittlichen Einfachkorrelation von 0,43 und einer multiplen Korrelation von 0,55. Für eine so komplexe Größe wie den Niederschlag sind Korrelationen in dieser Höhe durchaus beachtlich. Im Winterhalbjahr sind die Korrelationen dabei am höchsten (MK 0,65) und im SHJ am geringsten (MK 0,48).

Zukunftsentwicklung

Bei der Analyse der absoluten Häufigkeit (Abbildung 15) sind keine belastbaren Aussagen zur zeitlichen Veränderung der Hochwasserklassen zu treffen. Die Größenordnung der Differenzen zum Referenzzeitraum (1971–2000) ist im Vergleich zu anderen Extremindikatoren sehr gering. Im Sommerhalbjahr ist eine minimale Zunahme von Klassen mit geringen Niederschlagsmengen (Klasse 1, 5 und 9), die keine Bedeutung für Hochwasser haben, abzuschätzen. Die hinsichtlich der Analyse zum Hochwasser relevanten Klassen mit hohen Niederschlagsmengen zeigen hingegen keinen eindeutigen Trend. Vielfach erfolgen die zeitlichen Entwicklungen für Teile des 21. Jahrhunderts in unterschiedliche Richtungen. Beispiel: Jahresauswertung in Abbildung 15 oben, Klasse 5, Szenario A2 zeigt eine Zunahme (bestimmt im Vergleich mit der 20C-Simulation für 1971–2000) in den Zeiträumen 2021–2050 und 2041–2070 und eine leichte Abnahme in 2071–2100.

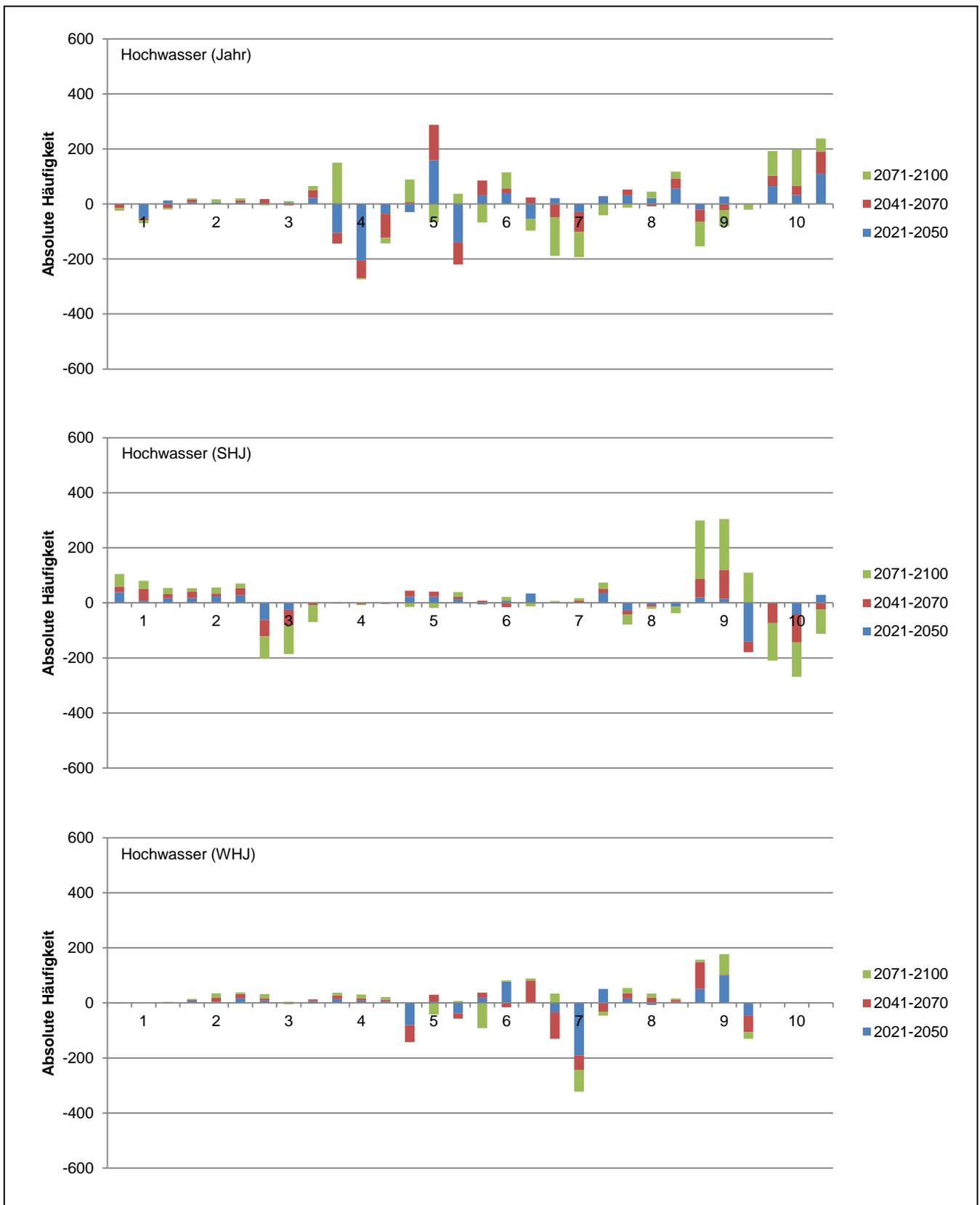


Abbildung 15: Differenzen der absoluten Häufigkeiten für die KLaMuKo-Klassen des Parameters Hochwasser (3 Tage Niederschlag) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 für das Jahr (oben), SHJ (Mitte) und WHJ (unten)

7.2.3 Perioden mit hohem Niederschlag

Als Perioden mit hohem Niederschlag (RRx) werden Episoden gekennzeichnet, in denen an mindestens 3 aufeinander folgenden Tagen 5 mm Niederschlag oder mehr fällt. Ähnlich wie bei der Trockenheit wird die Zeitreihe so transformiert, dass ein Tag die Kennung 1 erhält, wenn er Bestandteil einer Niederschlagsperiode ist, bzw. 0, wenn er kein solcher Bestandteil ist. Zur Analyse wird das Flächenmittel aller 12 Klimastationen herangezogen. Im Zeitraum 1971–2000 sind das 261 Tage (2 % aller Tage, vgl. Tabelle 64). Das entspricht einer Zahl von 9 Tagen im Jahr (Tabelle 64), die im Durchschnitt einer Niederschlagsperiode angehören. Außerdem wurde ermittelt, dass eine Periode mit hohem Niederschlag im Durchschnitt nur wenig länger als die Mindestdauer von 3 Tagen ist. Die maximale im Zeitraum 1971–2000 gefundene Dauer beträgt 5 Tage. Am häufigsten sind Perioden mit hohem Niederschlag im Dezember und in den Sommermonaten Juni, Juli sowie August (≥ 30 Tage, die einer Niederschlagsperiode angehören). Am relativ längsten sind diese Niederschlagsperioden im September (mittlere Länge: 4 Tage). Es sei hinzugefügt, dass unter Verwendung des o. a. Kriteriums und bei Betrachtung des Zeitraums 1971–2000 im Februar keine entsprechenden Perioden identifiziert werden.

Bei der Analyse der Perioden mit hohem Niederschlag im Jahr bildet das KlaMuKo-Verfahren 10 Klassen, die relevanten Regressionsgrößen finden sich in Tabelle 38. Bezüglich der Belastbarkeit von KlaMuKo-Analysen der Perioden mit hohem Niederschlag ist festzustellen, dass dieser Extremindikator nur unzureichend dargestellt werden kann. Tabelle 64 zeigt, dass die Einfach-Korrelation mit der ersten Regressionsgröße (Horizontale Stromfelddivergenz) mit 0,17 sehr gering ist und auch die multiple Korrelation lediglich 0,24 beträgt.

Tabelle 38: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Perioden mit hohem Niederschlag (RR > 5 mm; Mindestdauer 3 Tage) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Horizontale Stromfelddivergenz 700 hPa	24
2	Horizontale Diff. Geopot. O-W 850 hPa	12
3	Absolute Feuchte 700 hPa	34
4	Advektion der Temperatur 850 hPa	35

Tabelle 39: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Perioden mit hohem Niederschlag für das Mittel der Klimastationen (Jahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	3652	0,05	0,21	0,00	1,00	0,00
2	456	0,04	0,19	0,00	1,00	0,00
3	554	0,00	0,06	0,00	1,00	0,00
4	5	0,40	0,55	1,00	1,00	0,00
5	978	0,02	0,14	0,00	1,00	0,00
6	95	0,19	0,39	1,00	1,00	0,00
7	7386	0,01	0,07	0,00	1,00	0,00
8	361	0,07	0,26	1,00	1,00	0,00
9	924	0,01	0,08	0,00	1,00	0,00
10	199	0,23	0,42	1,00	1,00	0,00

Wie in Tabelle 39 ersichtlich, weisen die Klasse 4, 6 und 10 (gemeinsam rund 2 % der Tage) vergleichsweise hohe Mittelwerte auf und das 95- Perzentil liegt bei 1,0. Viele Tage, die das Kriterium der Niederschlagsperioden *nicht* erfüllen, sammeln sich in den Klassen 3, 5, 7, und 9 (Mittelwert der Klasse $\leq 0,02$). Die Klasse 7 (7.368 Tage) ist (i) die häufigste Klasse und (ii) relativ trocken. Sie enthält gut die Hälfte aller Tage (51 %).

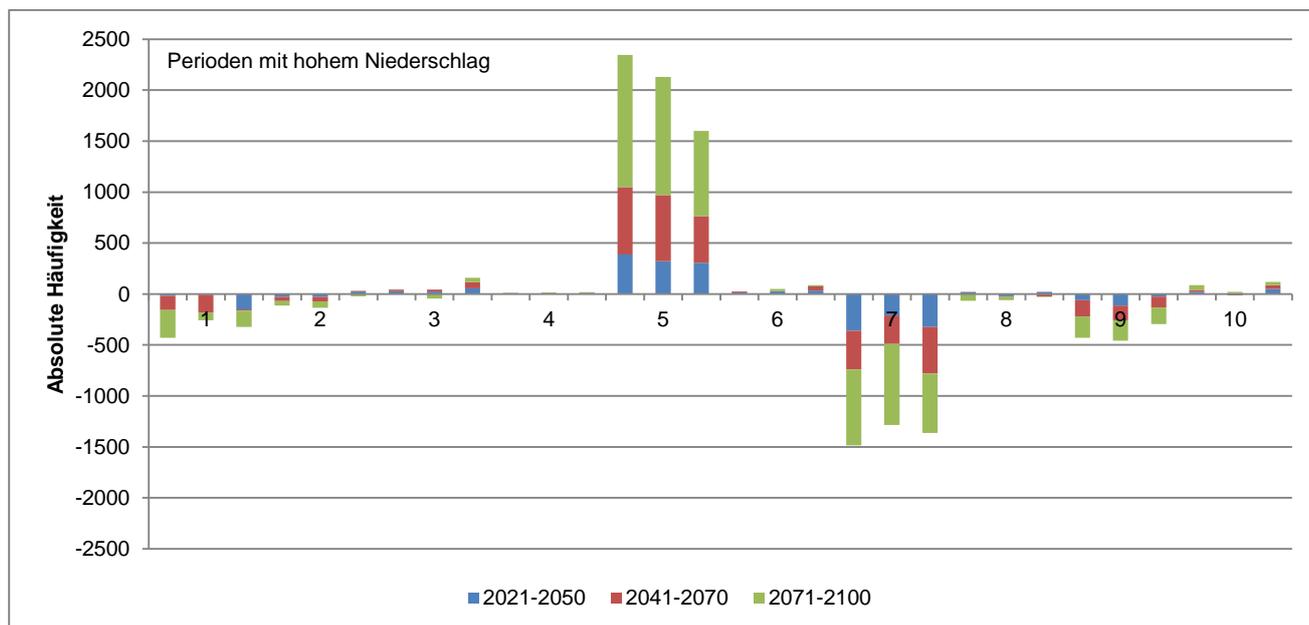


Abbildung 16: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen für Perioden mit hohem Niederschlag der drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Jahr

Zukunftsentwicklung

Die deutlichsten zeitlichen Veränderungen der absoluten Häufigkeiten der hohen Niederschlagsperioden (Abbildung 16) zeigen sich für die Klasse 5 (positive Differenzen) und 7 (negative Differenzen). Im Allgemeinen ist die Differenz des Zeitraumes 2071–2100 zum Referenzzeitraum am größten. Für die Klasse 9 wird die rückläufige Entwicklung bei der Betrachtung der relativen Häufigkeit deutlich, die gemittelt über alle drei Zeiträume und Szenarien -23 % beträgt. Für die Klasse 5, welche kaum Tage beinhaltet, die das Kriterium für hohe Niederschlagsperioden erfüllen, ergibt sich die durchschnittliche Differenz +77 %. Die drei Klassen 5, 7 und 9 beinhalten verhältnismäßig wenig Tage mit Niederschlagsperioden und Klasse 7 ist zudem die häufigste Klasse. Die drei Klassen, bei denen Anzeichen für eine Tendenz in der zeitlichen Entwicklung erkennbar sind, besitzen für die Bewertung des Extremindicators *Perioden mit hohem Niederschlag* keine maßgebliche Bedeutung und verhalten sich zudem gegenläufig. Eine Aussage zur zeitlichen Veränderung ist damit nicht möglich.

7.2.4 Heiße Tage

Die Untersuchung der Heißen Tage ($TX > 30\text{ °C}$) erfolgt für die Untermenge derjenigen Stationen mit hohen Temperaturen (HiMax). Dafür wurden mit der Stationsclustering (vgl. Abschnitt 2.4) neun Flachlandstationen (Tabelle 5) ausgewählt. Anschließend wurde für jeden Tag bestimmt, welcher Anteil der Stationen das Kriterium erfüllt (Identifikationsstrategie **prob**, erläutert in Abschnitt 7.1) und an welchen Tagen das Kriterium von 30 (**prob_30pro**) bzw. 70 Prozent (**prob_70pro**) der Klimastationen erfüllt wurde.

Wird zunächst danach gefragt, wie häufig Heiße Tage an *irgendeiner* der neun Stationen auftreten, so ergibt sich, dass dies an 336 Tagen im Zeitraum 1971–2000 der Fall ist. Das bedeutet, 6 % der 5.490 Tage der betrachtete 30 Sommerhalbjahre waren Heiße Tage – das entspricht im Schnitt rund 11 Heißen Tagen pro SHJ.

Bei Anwendung der schärferen Kriterien **prob_30pro** und **prob_70pro**, die auf hohe Flächenrepräsentativität abzielen, wurde das Kriterium für einen Heißen Tag im SHJ an 240 Tagen (4 %) bzw. 110 Tagen (2 %) erfüllt. In den Monaten Juli und August ist das häufigste Auftreten von Heißen Tagen zu beobachten (78 % der beobachteten Überschreitungen liegen in diesen beiden Monaten – wenn zugelassen wird, dass das Kriterium an irgendeiner der Stationen zutrifft). Die Fokussierung auf diese beiden Monate hängt damit zusammen, dass die Maximumtemperatur im Juli und August mindestens 2 Grad höher ist als in den anderen Monaten des Sommerhalbjahres.

Nach Anwendung des KlaMuKo-Verfahrens für die 9 Flachlandstationen (Strategie **prob**) ergibt sich die Klassifikation der Heißen Tage für das Sommerhalbjahr mit 10 Klassen. Die ermittelten Regressionsgrößen mit der größten Relevanz finden sich in Tabelle 40.

Tabelle 40: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Heiße Tage (TX > 30°C) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Maximumtemperaturen (HiMax). Jahreszeit: Sommerhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Relative Topografie 1000/850 hPa	19
2	Summenprediktor	58
3	Absolute Feuchte 700 hPa	34
4	Relative Feuchte 700 hPa	8

Die vier Regressionsgrößen beschreiben das Verhalten der Heißen Tage mit einer multiplen Korrelation von 0,50, die Einfachkorrelation beträgt 0,44 (Tabelle 64). Die relative Topografie 1.000/850 hPa (P1) ist wie bei den anderen aus der Temperatur abgeleiteten Größen der dominierende Faktor.

Tabelle 41: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Wahrscheinlichkeit (zwischen 0 und 100), dass an den analysierten Stationen ein Heißer Tage auftritt (Sommerhalbjahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	8	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00
3	97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	321	1,87	13,56	0,00	100,00	0,00
5	153	58,82	49,38	100,00	100,00	0,00
6	1015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1594	18,38	38,75	100,00	100,00	0,00
8	1107	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	2114	0,19	4,35	0,00	100,00	0,00
10	824	10,56	30,75	100,00	100,00	0,00

Wie Tabelle 41 zeigt, finden sich in Klasse 2, 5, 7 und 10 hauptsächlich die Heißen Tage (Mittelwert über 10, d. h. Auftreten des Kriteriums bei 10 % oder mehr der analysierten Stationen). Diese vier Klassen beinhalten

gemeinsam 35 % der Tage. Die Klassen 1, 3, 6 und 8 (gemeinsam 32 % relative Häufigkeit) hingegen verfügen über keine Heißen Tage (Mittel, Max und Min jeweils = 0). Es wurden eine Klasse (Nr. 2) und drei Unterklassen (52, 55 als Teile von Klasse 5 und 72 als Teil von Klasse 7 in den Tabellen nicht wiedergegeben) identifiziert, in denen sich *ausschließlich* Heiße Tage befinden. Allerdings sind diese zwar extrem, aber mit Klassenbesetzungen zwischen 4 und 8 Tagen sehr selten und daher begrenzt aussagekräftig. Die Klasse 5 ist neben der Klasse 2 besonders interessant, weil sie einen extremen Zustand mit immerhin 153 nachgewiesenen Fällen darstellt.

Zukunftsentwicklung

Bei den Heißen Tagen (Abbildung 17) zeichnet sich ein verhältnismäßig klarer Trend ab. Die Klassen mit relativ großer Anzahl Heißer Tage nehmen zu (Klasse 2, 5, 7 und 10), wohingegen ein negativer Trend bei denjenigen Klassen zu beobachten ist, die keine Heißen Tage beinhalten (Klasse 1, 3, 6 und 8). Dies wird durch den Vergleich der drei Zeiträume 2021–2051, 2041–2071 und 2071–2100 mit dem Referenzzeitraum 1971–2000 deutlich (Abbildung 17). Für die Klassen mit geringen absoluten Häufigkeiten (Klasse 1, 2 und 3) geht das nicht so deutlich aus der Abbildung 17 hervor. Vergleich man exemplarisch den Referenzzeitraum mit dem Zeitraum 2071–2100, so ist hier für die Klasse 1 eine Abnahme von 61 Tagen auf 6 Tage (-90 %), für die Klasse 2 eine Zunahme von 13 Tagen auf 53 Tage (+308 %) und für die Klasse 3 eine Abnahme von 17 Tagen auf einen Tag (-94 %) festzustellen.

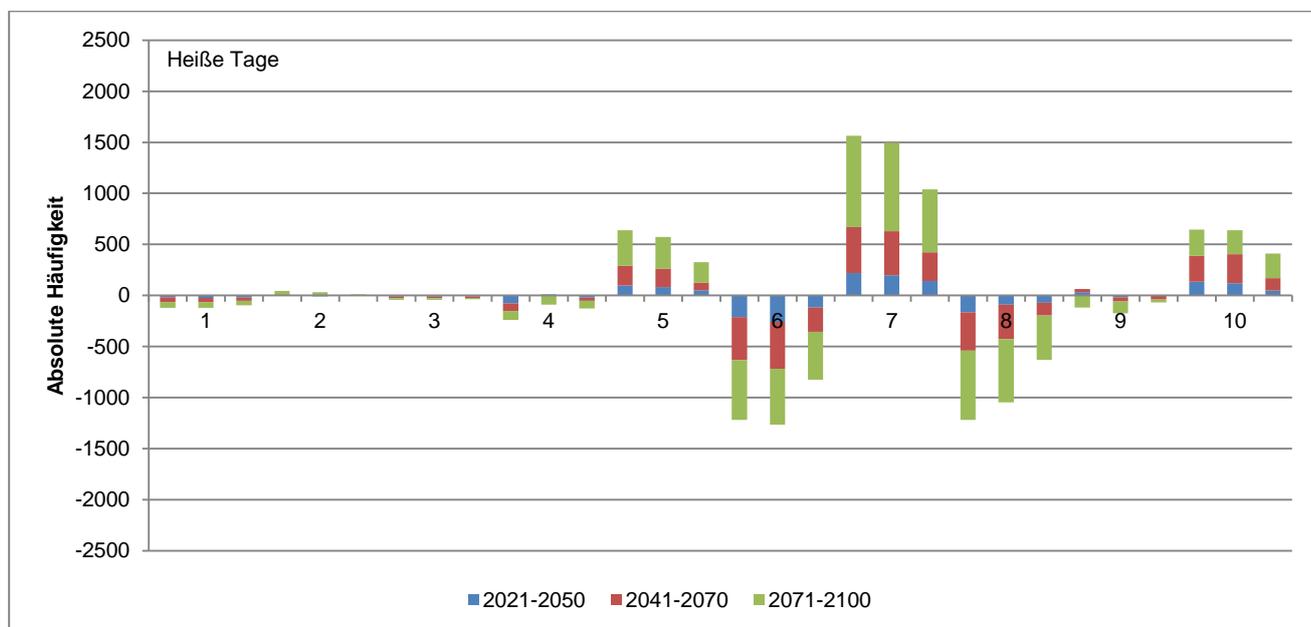


Abbildung 17: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Heißen Tage für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ

Die Häufigkeitsveränderungen sind zudem von den betrachteten SRES-Szenarios abhängig. Am geringsten sind sie in den ECHAM5-Projektionen mit Szenario B1 zu erkennen. Sie werden deutlicher, wenn Szenario A2 betrachtet wird und sind bei Szenario A1B am stärksten. Geht man noch etwas in die Tiefe und betrachtet drei Unterklassen, in denen sich ausschließlich Heiße Tage befinden (Unterkategorie 52, 55, und 72), so ist insbesondere für die Unterklassen 52 und 72 ein deutlicher Anstieg der absoluten Häufigkeit festzustellen. Daraus ist zu schließen, dass das Auftreten Heißer Tage zukünftig wahrscheinlicher wird. Zudem ist davon auszugehen, dass eine höhere Anzahl von Klimastationen in Sachsen gleichzeitig betroffen sein wird.

7.2.5 Hitzewellen

Hitzewellen sind charakterisiert als mindestens fünf aufeinanderfolgende Tage mit einer Maximumtemperatur größer 30 °C, d. h. einer Folge von mindestens 5 Heißen Tagen. Dafür wird das Mittel aller 12 Klimastationen zur Analyse herangezogen. Die Kennung wird für einen Tag auf 1 gesetzt, wenn dieser Teil einer Hitzewelle ist. Ist dies nicht der Fall, so erhält der Tag die Kennung 0. In den Sommerhalbjahren des Zeitraumes 1971–2000 gab es 88 Tage, die Teil einer Hitzewelle waren (2 % aller untersuchten Tage, vgl. Tabelle 64). Das entspricht einem Durchschnitt von 3 derartigen Tagen im SHJ. Eine Hitzewelle ist im Mittel 6 Tage lang und tritt am häufigsten im Juli (47 der 88 Tage, d. h. 53 %) auf. Die übrigen Tage sind zu etwa gleichen Anteilen auf die Monate Juni und August aufgeteilt. Im Schnitt haben Hitzewellen in den Monaten Juni bis August eine mittlere Andauer von 5,5 bis 7 Tagen mit einer leichten Tendenz, im August länger zu dauern (7 Tage). Die längste im Referenzzeitraum mit dem o. a. Kriterium gefundene Hitzewelle hatte eine Länge von 12 Tagen.

Das KLaMuKo-Verfahren identifiziert 10 Klassen für die Hitzewellen im SHJ. Die relevantesten Prediktoren sind in Tabelle 42 aufgelistet. Bei der Rekonstruktion der Hitzewellen ist wiederum die relative Topografie die dominierende Größe (s. a. Kapitel 7.2.4 – Heiße Tage). Positive Ausprägungen der relativen Topografie stehen im Zusammenhang mit Klassen, die Tage einer Hitzewelle beinhalten (Klasse 2, 6, 8 und 9 vgl. Tabelle 43).

Tabelle 42: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Hitzewellen (TX > 30°C; Mindestdauer 5 Tage) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Sommerhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Relative Topografie 1.000/850 hPa	19
2	Geopotentielle Höhe 850 hPa	2
3	Tageslänge [Std]	59
4	Vertikale Temperaturdiff. 850–700 hPa	22

Die Prediktoren beschreiben das Verhalten der Hitzewellen im Sommerhalbjahr mit einer Einfachkorrelation von 0,23 und einer multiplen Korrelation von 0,28 (Tabelle 64). Die geringen Korrelationen sind auf die geringe Anzahl der Hitzewellen zurückzuführen.

Tabelle 43: Charakteristika der KLaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Hitzewellen für das Mittel der Klimastationen (Sommerhalbjahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	26	0,35	0,49	1,00	1,00	0,00
3	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	234	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	956	0,09	0,29	1,00	1,00	0,00
7	2035	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1519	0,02	0,13	0,00	1,00	0,00
9	16	0,06	0,25	0,00	1,00	0,00
10	2417	0,00	0,03	0,00	1,00	0,00

Am interessantesten zur Beurteilung der Hitzewellen sind die Klassen 2 und 6 mit einem Mittel von rund 0,1 oder mehr und einem 95-Perzentil von 1,0. Gemeinsam machen diese zwei Klassen 13 % der Tage aus. Die Klassen 1, 3, 4, 5 und 7 hingegen enthalten nur Tage, an denen *keine* Hitzewelle festgestellt wurde (gemeinsam 33 % der Tage). Die Klassen 7 und 10 (28 bzw. 33 % Anteil) sind die beiden häufigsten Klassen. In ihnen finden sich nahezu keine Hitzewellentage – die Mittelwerteinträge dieser beiden Klassen in Tabelle 43 sind durch Rundung auf den Wert 0,00 gesetzt. Bei den Hitzewelle ist auch ein Blick in die Ergebnisse der KLaMuKo-Stufe 1 lohnend: Es wurden zwei Unterklassen identifiziert, in denen sich *ausschließlich* Tage einer Hitzewelle befinden (Unterklassen 22 und 82 von Klasse 2 bzw. Klasse 8). Diese treten allerdings sehr selten auf.

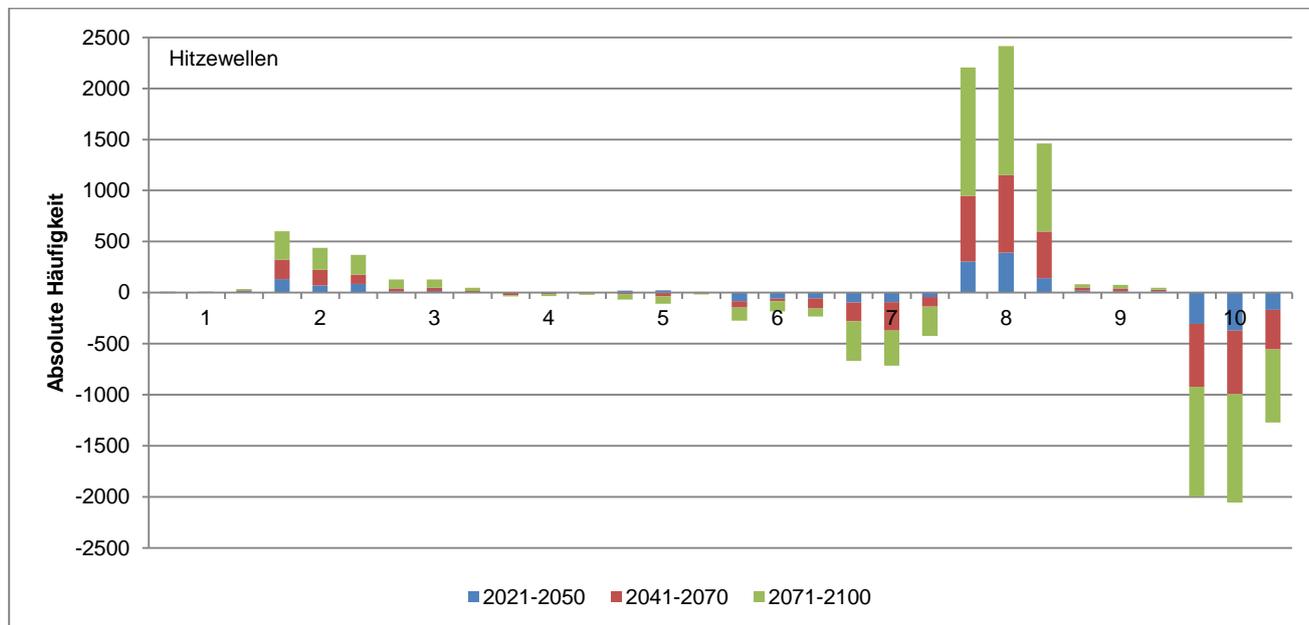


Abbildung 18: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Hitzewellen für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ

Zukunftsentwicklung

Die Abbildung 18 zeigt die Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Hitzewellen für die drei Szenarien A1B, A2 und B1 der drei Zeiträume 2021–2050 (erster Zeitraum), 2041–2070 (zweiter Zeitraum) und 2071–2100 (dritter Zeitraum) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 im SHJ. Positive Differenzen der absoluten Häufigkeit zum Referenzzeitraum zeigen Klasse 2, 3, 8 und 9. Die absolute Häufigkeit der Klassen 6, 7 und 10 nimmt hingegen ab. Hervorzuheben ist, dass Klasse 3 vom Referenzzeitraum auf durchschnittlich 12 Tage im ersten (2021–2050), 26 Tage im zweiten und 67 Tage im dritten Zeitabschnitt ansteigt – und dies als Durchschnittswert für alle drei Szenarios (!). Die Zunahme der absoluten Häufigkeit der Klasse 2 ist in der Abbildung 18 deutlich zu erkennen (Zunahme zwischen 600 Tagen im Szenario A1B und 369 Tagen im Szenario B1), obwohl die Klasse im Referenzzeitraum lediglich 58 Tage beinhaltet. Zusammenfassend ist die zeitliche Entwicklung nicht so eindeutig wie beispielsweise bei den Heißen Tagen. Die Klasse, welche die meisten Tage beinhaltet, die das Kriterium der Hitzewelle erfüllen, weist eine minimale Abnahme der absoluten Häufigkeit auf (Klasse 6). Die absolute Häufigkeit der Klassen 2, 8 und 9 nimmt hingegen zu und die Klassen 7 und 10, welche keine bzw. kaum Tage mit Hitzewellen beinhalten, nehmen bezüglich der Häufigkeit ab. Schlussfolgernd lässt sich demnach eher eine Zunahme der Hitzewellen annehmen, auch wenn diese Aussage mit Vorsicht zu bewerten ist.

7.2.6 Eistage

Bei der Analyse der Eistage ($TX < 0^{\circ}\text{C}$) im Winterhalbjahr erfüllen 21 % der Tage (1.119 Tage, vgl. Tabelle 64) dieses Kriterium im Referenzzeitraum 1971–2000, das entspricht im Durchschnitt 37 Tagen pro Jahr. Die Untersuchung der Eistage erfolgt für die Untermenge derjenigen Stationen mit hohen Temperaturwerten (HiMax; 9 Flachlandstationen; Tabelle 5) und der Untersuchungsstrategie **prob**, d. h. es wird für jeden Tag ermittelt, wieviel Prozent der Stationen das Kriterium *Eistag* erfüllen.

Eistage sind hauptsächlich in den Wintermonaten zu beobachten (Januar > Dezember > Februar). Wird der Analysezeitraum auf das Winterhalbjahr (Oktober bis März) ausgedehnt, so finden sich Eistage in allen Monaten bis auf den Oktober.

Tage mit sehr vielen Eistagen werden durch die positive Ausprägung der relativen Topografie gekennzeichnet. Die relative Topografie 1.000/850 hPa ist wie bei den anderen aus der Temperatur abgeleiteten Größen der dominierende Faktor und die Korrelationen sind im Vergleich zu den anderen Extremindikatoren mit am höchsten (s. Tabelle 44). Neben der relativen Topografie ist die Tageslänge zur Rekonstruktion der Eistage von großer Bedeutung.

Tabelle 44: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Eistage ($TX < 0^{\circ}\text{C}$) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Maximumtemperaturen (HiMax). Jahreszeit: Winterhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Relative Topografie 1.000/850 hPa	19
2	Tageslänge [Std]	59
3	Horizontale Diff. Geopot. N-S 850 hPa	9
4	Enke Labilitätsindex	28

Bei der KLaMuKo-Analyse der Eistage im WHJ ergeben sich 10 Klassen. Vier Klassen beinhalten keine Eistage (Klasse 2, 4, 5 und 7, s. Tabelle 45). Zwei Klassen werden identifiziert, in denen sich *ausschließlich* Eistage befinden (Klasse 1 und 3). Jedoch sind diese sehr selten. Relativ viele Eistage finden sich hingegen in den Klassen 6, 8, 9 und 10, die aber auch Tage ohne eingetroffenes Eistage-Kriterium enthalten. Ihnen ist gemeinsam, dass das 95-Perzentil 100 ist. Die Klasse 8 stellt einen interessanten Fall dar, denn in ihr ist, nach den Klassen 1 und 3, der Mittelwert am höchsten, bei gleichzeitig relativ häufigem Auftreten (rund 18 % der Tage in den analysierten Winterhalbjahren). Auch Klasse 7 ist interessant, denn in ihr tritt *kein* Eistag auf und sie ist dabei relativ häufig, mit einem Auftreten an 545 Tagen (rund 7,5 % aller Tage der analysierten Winterhalbjahre). Es wurde eine Klasse identifiziert, die im Verhältnis um einiges größer ist als die restlichen. Die Klasse 10 beinhaltet 57 % der Tage und ist durch eine relativ geringe Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Eistages charakterisiert.

Wie Tabelle 64 zeigt, ist die multiple Korrelation für die Eistage relativ hoch und beträgt 0,60. Die Einfachkorrelation mit der ersten Regressionsgröße (Relative Topografie 1.000/850 hPa) beträgt 0,48.

Tabelle 45: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums ein Eistag identifiziert wurde (Winterhalbjahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	6	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00
2	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	6	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00
4	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	93	24,73	43,38	100,00	100,00	0,00
7	545	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1300	62,69	48,38	100,00	100,00	0,00
9	1084	26,57	44,19	100,00	100,00	0,00
10	4144	9,48	29,30	100,00	100,00	0,00

Validierung: Reproduktion der KlaMuKo-Klassen-Häufigkeitsverteilung bezüglich der Eistage durch ein GCM

Wie in Abschnitt 7.1 erwähnt, erfolgt für einige Extremindikatoren eine Analyse, ob die Häufigkeitsverteilung, die KlaMuKo, mit diesem Extremindikator als Zielgröße, von einem GCM in dessen 20C-Simulation reproduziert wird. Analoge Untersuchungen zu verschiedenen meteorologischen Parametern sind in Abschnitt 6.4 dokumentiert.

Tabelle 46: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für den Extremindikator „Eistage“ an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971–2010.

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NCAR	0,1	0,1	0,1	0,7	0,8	1,3	7,4	17,7	14,9	57,2
EH5_20C	0,3	0,2	0,1	1,0	0,7	1,7	8,8	16,8	13,7	56,8

Es zeigt sich in Tabelle 46, dass die Häufigkeitsverteilung der KlaMuKo-Klassen für die Klassifikation mit Zielgröße „Eistage“ in den 20C-Simulationen des Klimamodells recht große Ähnlichkeit zu derjenigen im tatsächlich aufgetretenen Klima des Vergleichszeitraums besitzt.

Zukunftsentwicklung

Folgende Spezifika konnten für die Eistage beobachtet werden: Nach der Übertragung des KlaMuKo-Verfahrens auf Ergebnisse des globalen Klimamodells für die drei Szenarien A1B, A2 und B1 durch die zuvor identifizierten Konfigurationen der Regressionskoeffizienten werden die Klassen 1, 3, 4, 5 und 8 nicht wiedererkannt. Das heißt, dass diesen fünf Klassen keine Tage im Szenario zugeordnet wurden. Gerade für diese Klassen wurde im Referenzzeitraum gefunden, dass sie besonders starke Zusammenhänge mit Eistagen besitzen.

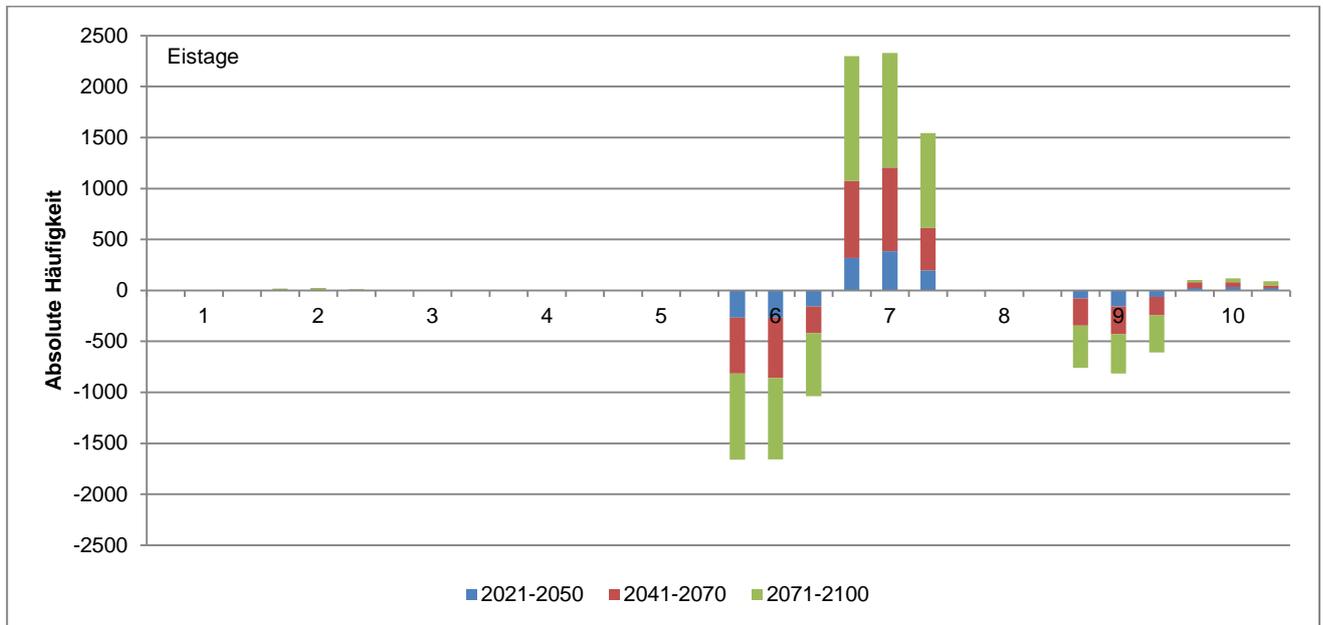


Abbildung 19: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KlaMuKo-Klassen der Eistage für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: WHJ

Die zwei verbleibenden Klassen 6 und 9 – mit einer relativ hohen Anzahl von Eistagen (Mittel ≥ 25 % Wahrscheinlichkeit und 95-Perzentil bei 100 %) – weisen eine Abnahme der absoluten Häufigkeit in den drei Szenarios auf mit einer stärkeren Ausprägung im letzten Zeitabschnitt (2071–2100). Eine positive zeitliche Veränderung der absoluten Häufigkeit ist für die Klasse 7 und im geringen Ausmaß auch für die Klassen 2 und 10 zu erkennen (Abbildung 19). Daher ist aus den KlaMuKo-Ergebnissen eine zukünftige deutliche Abnahme der Eistage zu konstatieren.

7.2.7 Spätfröste

Spätfröste werden charakterisiert als Tage, an denen in der Vegetationsperiode I von April bis Juni (AMJ) die Minimumtemperatur kleiner als -4 °C ist. Die Analyse erstreckte sich auf eine Stationsuntermenge, die durch relativ hohen Minimumtemperaturwerte charakterisiert ist (HiMin; 7 Flachlandstationen; vgl. Tabelle 5). Es wurde für die Analyse der Spätfröste für jeden Tag bestimmt, welcher prozentuale Anteil der Stationen das Kriterium erfüllt (Identifikationsstrategie **prob**). An 38 Tagen des Zeitraums 1971–2000 ist $TX < -4$ °C; d. h. an 1 % der Tage in der Vegetationsperiode I, welches durchschnittlich rund einem Spätfrostereignis pro Vegetationsperiode entspricht. Alle beobachteten Spätfrostereignisse treten am Anfang der Vegetationsperiode I, im April, auf. Hier liegt die durchschnittliche Minimumtemperatur bei 3 °C. Nur zweimal wurde Spätfrost an allen 7 Stationen gleichzeitig festgestellt.

Es ergeben sich 10 KlaMuKo-Klassen nach Anwendung des Verfahrens für die Spätfröste der Vegetationsperiode, die zugehörigen Regressionsgrößen finden sich in Tabelle 47. Die relative Topografie 1.000/850 hPa (P1) und die Tageslänge sind die relevanten Faktoren (vergleichbar mit den Analysen anderer temperaturbezogener Extremindikatoren).

Tabelle 47: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Spätfröste (TN < -4 °C) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Minimumtemperaturen (HiMin). Jahreszeit: Vegetationsperiode I (AMJ)

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Relative Topografie 1.000/850 hPa	19
2	Tageslänge [Std]	59
3	Advektion der Temperatur 850 hPa	35
4	Showalter Labilitätsindex	27

Die Einfachkorrelation beträgt 0,17 und die multiple Korrelation 0,24 (Tabelle 64). Die Beschreibung mittels Einfachkorrelation und multipler Korrelation ist in etwa so gering wie bereits für die Perioden mit hohem Niederschlag und Hitzewellen festgestellt.

Tabelle 48: Charakteristika der KLaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums ein Spätfrost identifiziert wurde (Vegetationsperiode I, d. h. April, Mai, Juni)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	140	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	20	1,43	6,39	0,00	28,57	0,00
5	837	0,85	6,83	0,00	100,00	0,00
6	174	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	856	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	1018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	464	1,57	8,59	0,00	85,71	0,00

Weil das gleichzeitige Auftreten von Spätfrost an einer Vielzahl von Stationen relativ unwahrscheinlich ist, sind die 10 KLaMuKo-Klassen (s. Tabelle 48) durch relativ niedrige Einträge in der Max-Spalte gekennzeichnet. Nur drei der Klassen (4, 5 und 10) besitzen dort überhaupt von 0 verschiedene Werte. Die ihnen zusammengefassten Atmosphärenzustände repräsentieren rund 36 % aller Tage. Der Anteil der Spätfrost-Tage in diesen Klassen ist dennoch gering, wie die Klassenmittelwerte zeigen. Alle übrigen Klassen enthalten überhaupt keine Spätfröste (!).

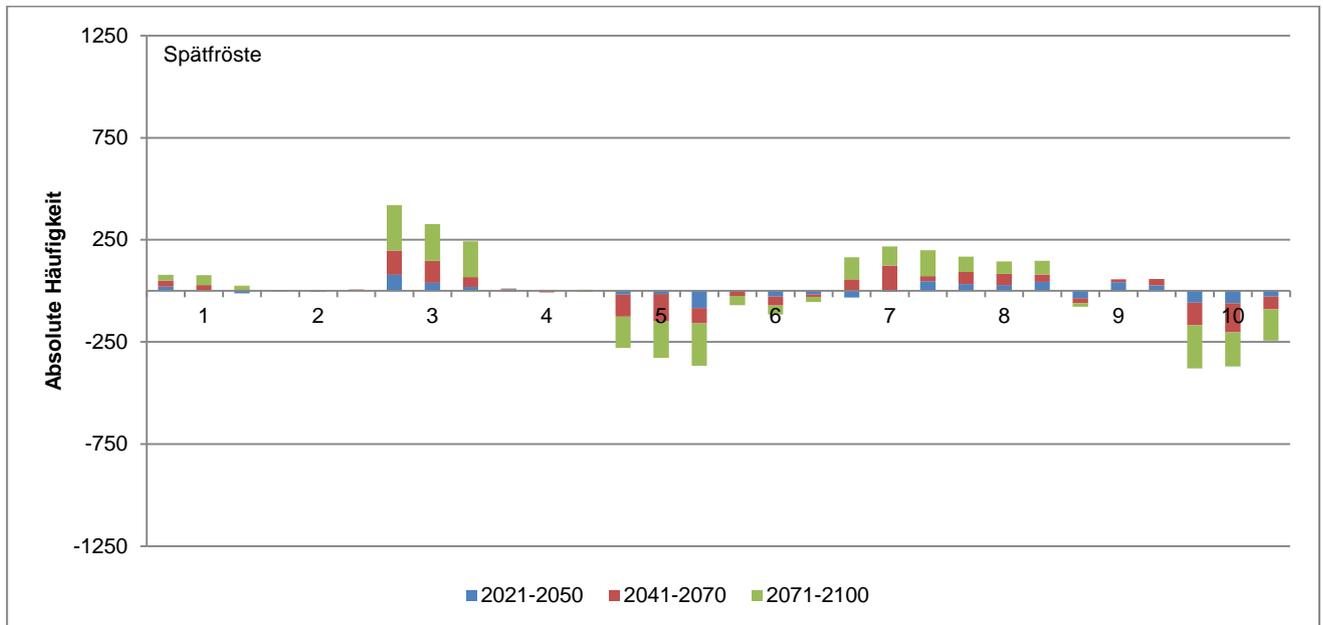


Abbildung 20: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen Anteile der Spätfröste für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Vegetationsperiode (AMJ).

Zukunftsentwicklung

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der absoluten Häufigkeit der Spätfrosttage der Vegetationsperiode I (Abbildung 20), so zeigen die beiden relativ großen Klassen mit Spätfrösten (Klassen 5 und 10) eine Abnahme über die Zeit (insbesondere im letzten Abschnitt 2071–2100). Dies lässt auf Grund der KLaMuKo-Resultate eine Abnahme der Spätfröste in den Monaten April bis Juni erwarten. Es sei aber auf das insgesamt relativ seltene Auftreten von Spätfrost im Vergleichszeitraum und deren Auftreten tendenziell in Teilregionen hingewiesen.

7.2.8 Starkwinde

Bei den Analysen der Windgeschwindigkeit ist zu bedenken, dass es sich um *Tagesmittelwerte* handelt. WindExtreme, die oft in Zusammenhang mit Windspitzen stehen, sind durch das Tagesmittel nur wenig fassbar. Es sei außerdem darauf verwiesen, dass für die Windgeschwindigkeit keine Untermenge derjenigen Stationen mit hohen bzw. niedrigen Windgeschwindigkeiten gebildet werden konnte (s. Abschnitt 2.2.8). Neben der einfachen Untersuchung der Überschreitung des Grenzwertes 8 m/s wurde für jeden Tag bestimmt, welcher Anteil der Stationen das Kriterium erfüllt (Identifikationsstrategie **prob**) und an welchen Tagen das Kriterium von 30 % (Strategie **prob_30pro**) bzw. 70 % (**prob_70pro**) der 12 Klimastationen erfüllt wurde. Die Starkwinde werden für das Sommer- und Winterhalbjahr getrennt betrachtet. Wegen der Flächenrepräsentativität wurde die Erfüllung des Starkwindkriteriums an 30 % der Klimastationen gefordert. Diese zusätzliche Anforderung ist sinnvoll, weil sonst allein durch die Bergstation Fichtelberg das Auftreten von Starkwindtagen dominiert würde.

Im Referenzzeitraum (1971–2000) werden im Sommerhalbjahr 110 Tage als Starkwindtage identifiziert (2 %) und im Winterhalbjahr 859 Tage (16 %). Das entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Überschreitung von 4 Tagen im Sommerhalbjahr und 30 Tagen im Winterhalbjahr. Das schärfere Kriterium (**prob_70pro**) wurde im SHJ nur 8-mal erfüllt, während es im WHJ an 118 Tagen (2 %) eintraf. Betrachtet man das Sommerhalb-

jahr, so sind Starkwinde am häufigsten im April (41 %; 45 Tage). Im Winterhalbjahr sind jeweils etwa 20 % der Starkwindtage im Januar und Dezember zu beobachten.

Die Klassifikation der Starkwinde (**prob_30pro**) unter Verwendung des KlaMuKo-Verfahrens ermittelt 10 Klassen im SHJ und 9 Klassen im WHJ. Die relevantesten Regressionsgrößen sind einander in groben Zügen ähnlich und in Tabelle 49 (SHJ) und Tabelle 50 (WHJ) aufgelistet. Die Korrelation mit der ersten Regressionsgröße (Betrag des Gradienten) beträgt 0,32 im SHJ und 0,64 in WHJ. Die Korrelation mit nur einer Regressionsgröße ist folglich im WHJ um einiges höher und im Vergleich zu den anderen Extremindikatoren mit am höchsten (Vergleich Tabelle 64). Durch die Verwendung mehrerer Regressionsgrößen ist zwar Informationszugewinn erreichbar, jedoch ist dieser relativ gering.

Tabelle 49: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Starkwinde (FF > 8 m/s) wenn 30% der 12 Klimastationen das Kriterium erfüllen. Jahreszeit: Sommerhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Betrag des Gradienten 850 hPa	31
2	Horizontale Diff. Geopot. O-W 850 hPa	12
3	Tageslänge [Std]	59
4	Betrag des Gradienten 1000 hPa	30

Tabelle 50: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Starkwinde (FF > 8 m/s) wenn 30% der 12 Klimastationen das Kriterium erfüllen. Jahreszeit: Winterhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Betrag des Gradienten 1.000 hPa	30
2	Horizontale Diff. Geopot. N-S 850 hPa	9
3	Tageslänge [Std]	59
4	Advektion der Temperatur 850 hPa	35

Tabelle 51: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Wahrscheinlichkeit, dass an einem Tag des Untersuchungszeitraums an 30 % der Stationen ein Mittelwind über 8 m/s auftrat (Sommerhalbjahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	108	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	22	0,14	0,35	1,00	1,00	0,00
3	2	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00
4	563	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	516	0,00	0,04	0,00	1,00	0,00
6	19	0,53	0,51	1,00	1,00	0,00
7	118	0,40	0,49	1,00	1,00	0,00
8	4962	0,00	0,05	0,00	1,00	0,00
9	447	0,00	0,07	0,00	1,00	0,00
10	563	0,11	0,31	1,00	1,00	0,00

Tabelle 52: Wie Tabelle 51 jedoch für das Winterhalbjahr

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	2	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00
2	72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	13	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00
5	492	0,89	0,31	1,00	1,00	0,00
6	1535	0,01	0,09	0,00	1,00	0,00
7	231	0,69	0,46	1,00	1,00	0,00
8	900	0,05	0,22	0,00	1,00	0,00
9	3984	0,12	0,33	1,00	1,00	0,00

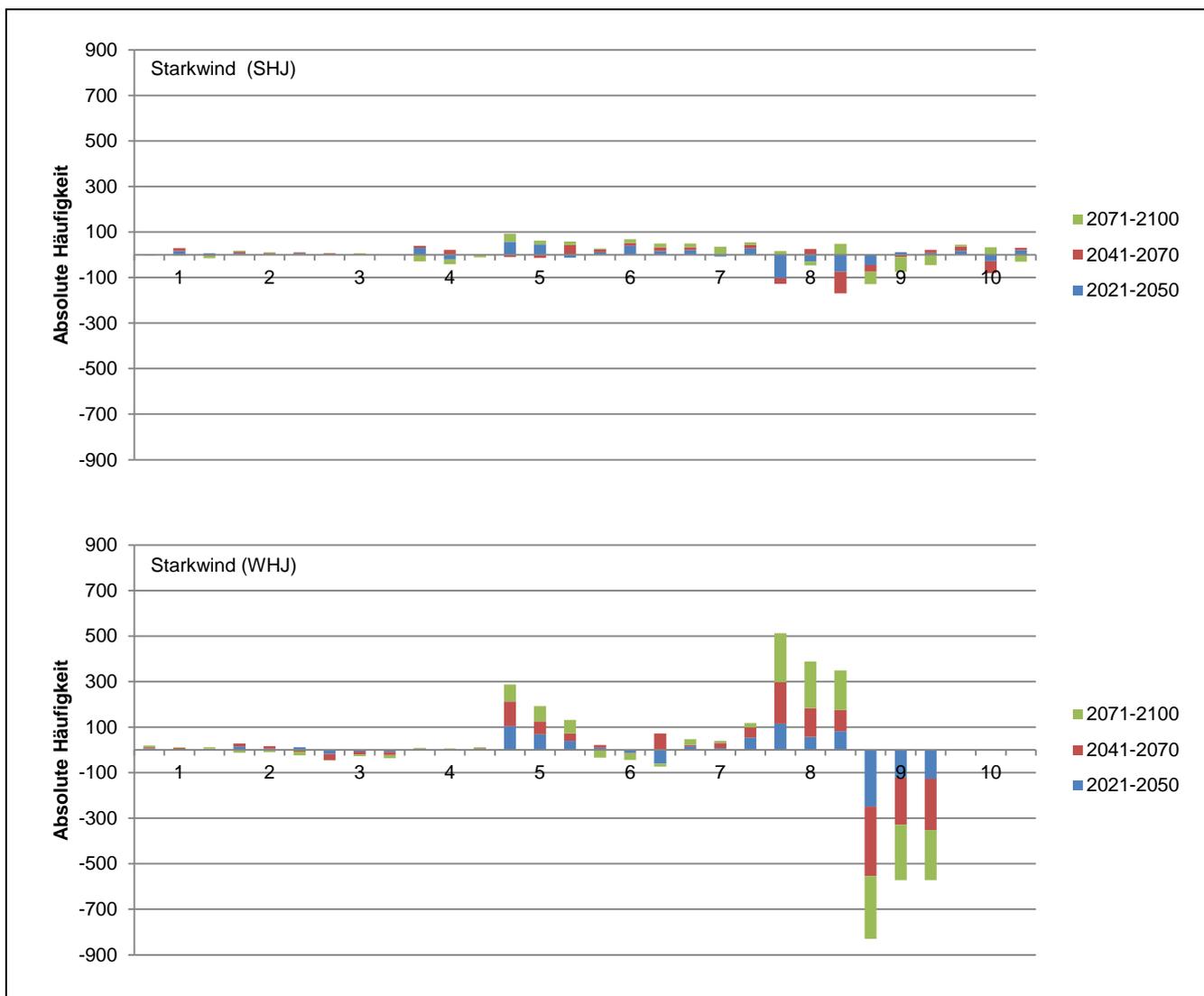


Abbildung 21: Differenzen der absoluten Häufigkeiten für die KLaMuKo-Klassen des Parameters Starkwind (prob_30pro) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) für die Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 für das SHJ (oben) und WHJ (unten)

Eine Klasse, die viele Starkwindtage beinhaltet, ist durch die positive Ausprägung des ersten Prediktors (P1), einem Geopotenzialgradienten, gekennzeichnet.

Im SHJ (Tabelle 51) wird eine Klasse, die ausschließlich Starkwindtage gruppiert (Klasse 3, Mittel, Min und Max sind = 1) gefunden, die allerdings nur 2-mal auftritt. Nennenswerte Wahrscheinlichkeitsmittel werden in den Klassen 6 und 7 gefunden, in denen sich rund 2 % aller Tage finden. Auch werden zwei Klassen identifiziert, die gar keine Starkwindtage beinhalten (Klasse 1 und 4), jedoch ebenfalls selten sind (Anteil dieser beiden Klassen: 0,2 %). In den übrigen Klassen, auch der mit rund 68 % Anteil dominierenden Klasse 8, ist das Auftreten des Starkwindkriteriums relativ selten.

Im WHJ (Tabelle 52), das insgesamt durch eine höhere mittlere Windgeschwindigkeit charakterisiert ist, werden zwei Klassen identifiziert, in denen sich ausschließlich Starkwindtage befinden (Klasse 1 und 4). Verhältnismäßig viele Starkwindtage sind in den Klassen 5 und 7 zu finden (Mittel > 0,7 und 95-Perzentil bei 1,0 – diese Klassen repräsentieren rund 10 % des Untersuchungszeitraums). Zudem gibt es im WHJ zwei Klassen ohne einen einzigen Starkwindtag (Klassen 2 und 3). Wie schon im Sommerhalbjahr wird eine sehr große Klasse identifiziert. Die WHJ-Klasse 9 beinhaltet 55 % der Tage, wobei der Anteil der Starkwindtage in ihr relativ gering ist.

Zukunftsentwicklung

Bei der Analyse der absoluten Häufigkeit der Tage, an denen die mittlere Windgeschwindigkeit > 8 m/s an mindestens 30 % der Stationen ist (Abbildung 21), sind die Größenordnungen der zeitlichen Veränderung verhältnismäßig gering – ein Verhalten, das z. B. auch bei den KLaMuKo-Klassen des Parameters Hochwasser beobachtet wurde. Im SHJ sind keine belastbaren Aussagen zur zeitlichen Veränderung der Starkwindtage zu treffen. Die für das Winterhalbjahr interessanten Klassen 1, 4, 5 und 7 – mit ausschließlich bzw. vielen Starkwindtagen – weisen eine minimale Zunahme der absoluten Häufigkeit auf. Mit gebotener Vorsicht wegen der relativ geringen Belastbarkeit der Ergebnisse und der Spezifika der betrachteten Größe (Tagesmittelwind) ist daraus abzuleiten, dass Starkwindtage im WHJ zukünftig häufiger auftreten könnten.

7.2.9 Schwüle

Schwületage sind Tage, an denen im Sommerhalbjahr an mindestens einer Station ein Dampfdruck größer 18 hPa gemessen wurde. Die untersuchte Stationsuntermenge beinhaltet 9 Flachlandstationen mit hohen Dampfdrücken (*HiDD*; vgl. Tabelle 5). An 434 Tagen (8 %) ist der Dampfdruck im Zeitraum 1971–2000 größer 18 hPa; was einer durchschnittlichen absoluten Häufigkeit von 16 Tagen im Jahr entspricht. Am häufigsten und zu etwa gleichen Anteilen treten Schwületage im Juli und August auf (36 %). Hier liegt der *mittlere Dampfdruck* bereits über 13 hPa.

Tabelle 53: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Schwüle (DD > 18 hPa) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Dampfdrücken (HiDD). Jahreszeit: Sommerhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Temperatur 850 hPa	5
2	Summenprediktor	58
3	Absolute Feuchte 850 hPa	33
4	Isalobarischer Wind 1.000 hPa	54

Tabelle 54: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums Schwüle auftrat (Sommerhalbjahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	219	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	228	16,67	37,35	100,00	100,00	0,00
3	332	10,24	30,36	100,00	100,00	0,00
4	405	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1200	29,50	45,62	100,00	100,00	0,00
6	1251	0,24	4,89	0,00	100,00	0,00
7	367	29,97	45,88	100,00	100,00	0,00
8	2400	0,88	9,32	0,00	100,00	0,00
9	918	5,01	21,83	0,00	100,00	0,00

Es ergeben sich 9 KlaMuKo-Klassen nach Anwendung des Verfahrens für die Schwüle im Sommerhalbjahr, die relevantesten Regressionsgrößen finden sich in Tabelle 53. Die Temperatur 850 hPa ist der dominierende Faktor. Eine positive Ausprägung steht im Zusammenhang mit Klassen, die viele Schwületage beinhalten (Klasse 2, 3, 5 und 7; 58 % der Tage, vgl. Tabelle 54). Wenig bis keine Überschreitungen der 18 hPa-Grenze gruppieren sich in den Klassen 1, 4, 6 und 8. Insgesamt fällt auf, dass im Fall der Schwüle keine sehr kleinen Klassen gebildet werden – anders als bei den übrigen Extremindikatoren.

Die Regressionsgrößen beschreiben das Verhalten der Schwülen Tage mit einer Einfachkorrelation von 0,38 und einer multiplen Korrelation von 0,44 (Tabelle 64).

Validierung: Reproduktion der KlaMuKo-Klassen-Häufigkeitsverteilung bezüglich der Schwüle durch ein GCM

Wie in Abschnitt 7.1 erwähnt, erfolgt für einige Extremindikatoren eine Analyse, ob die Häufigkeitsverteilung, die KlaMuKo, mit diesem Extremindikator als Zielgröße, von einem GCM in dessen 20C-Simulation reproduziert wird. Analoge Untersuchungen zu verschiedenen meteorologischen Parametern sind in Abschnitt 6.4 dokumentiert.

Tabelle 55: Reproduktion der relativen Häufigkeit von KlaMuKo-Klassen für den Extremindikator „Schwüle“ an den sächsischen Klimastationen. Zum Vergleich wurden KlaMuKo-Klassen in NCAR-Reanalysen und 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1 wiedererkannt. Bestimmungszeitraum: 1971–2010

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NCAR	0,0	3,2	16,0	3,7	5,0	7,4	4,4	18,2	12,6	29,6
EH5_20C	0,0	2,3	12,8	7,6	2,5	15,6	5,0	11,2	19,3	23,7

Es zeigt sich in Tabelle 55, dass die Häufigkeitsverteilung der KlaMuKo-Klassen für die Klassifikation mit Zielgröße „Schwüle“ in den 20C-Simulationen des Klimamodells Ähnlichkeit zu derjenigen im tatsächlich aufgetretenen Klima des Vergleichszeitraums besitzt. In einigen Klassen treten Unterschiede zwischen den ermittelten Größen aus NCAR und der GCM-Rekonstruktion des Gegenwartsklimas mit 20C-Simulationen in der Größenordnung von 10 % auf.

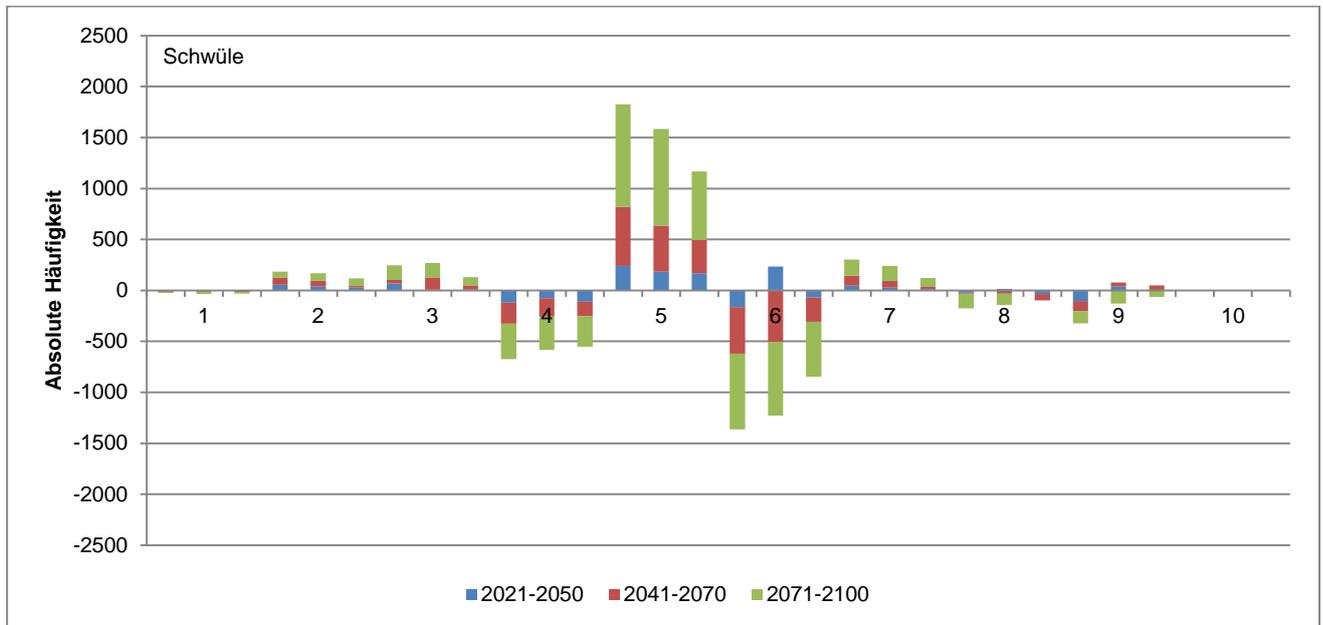


Abbildung 22: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KlaMuKo-Klassen des Parameters Schwüle für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ

Zukunftsentwicklung

Beim Vergleich der Differenzen der absoluten Häufigkeiten der drei Zeiträume zum Referenzzeitraum (Abbildung 22) ist eine einheitliche Zunahme der Klassen mit Schwületagen (Klasse 2, 3, 5, und 7) und eine Abnahme der Klassen mit wenig oder keinen Schwületagen (Klasse 1, 4, 6, 8) festzustellen. Diese Tendenzen sind im Szenario A1B am deutlichsten. Die Differenzen der absoluten Häufigkeiten zum Referenzzeitraum sind in der letzten Periode (2071–2100) am größten.

7.2.10 Tropennächte

Die Untersuchung der Tropennächte des Sommerhalbjahres ergibt für den Referenzzeitraum (1971–2000) 67 Tage mit Tropennächten ($TN > 20^{\circ}\text{C}$), was 1 % der Tage im SHJ entspricht. Durchschnittlich gibt es im Jahr drei Tropennächte (Tabelle 64). An nur 20 bzw. 2 Tagen dieses 30-jährigen Zeitraumes treten Tropennächte gleichzeitig an mindestens 30 bzw. 70 % der Stationen in Sachsen auf. Fast alle Überschreitungen wurden im Juli und August beobachtet (87 %). Die durchschnittliche Minimumtemperatur ist mit 13°C im Juli und August mindestens 2 Grad höher als in den anderen Monaten des Sommerhalbjahrs.

Das KlaMuKo-Verfahren wird für die Untermenge derjenigen Stationen mit hohen Minimumtemperaturen (HiMin) für das Sommerhalbjahr angewandt, dafür wurden 7 Stationen (Chemnitz, Dresden, Görlitz, Bautzen, Leipzig [2 Stat.] und Oschatz; HiMin; vgl. Tabelle 5) ausgewählt. Bei der Rekonstruktion der Tropennächte werden 9 KlaMuKo-Klassen gebildet, die relevantesten Regressionsgrößen finden sich in Tabelle 56.

Tabelle 56: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Tropennächte (TN > 20°C) an der Teilmenge der Stationen mit hohen Minimumtemperaturen (HiMin). Jahreszeit: Sommerhalbjahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Relative Topografie 1.000/850 hPa	19
2	Summenprediktor	58
3	Vertikale Temperaturdiff. 850–700 hPa	22
4	Horizontale Diff. Geopot. N-S 850 hPa	9

Fünf Klassen der KLaMuKo-Klassifikation für die Tropennächte im SHJ beinhalten keine Tage, an denen das Kriterium (TN > 20°C) erfüllt wird. Das sind 60 % der Tage (Klasse 1, 3, 5, 7, und 9). Ausschließlich Tropennächte gruppieren sich in den sehr seltenen Klassen 2 und 4 sowie in der Stufe 1-Unterklasse 82.

Tabelle 57: Charakteristika der KLaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums eine Tropennacht auftrat (Sommerhalbjahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	6	83,33	40,83	100,00	100,00	0,00
3	11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	5	60,00	54,77	100,00	100,00	0,00
5	1474	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	990	0,61	7,77	0,00	100,00	0,00
7	1379	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1898	4,27	20,22	0,00	100,00	0,00
9	1543	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Die Einfachkorrelation beträgt 0,23 und die multiple Korrelation 0,27 (Tabelle 64). Die Beschreibung mittels multipler Korrelation bewirkt zwar einen Informationszugewinn, dieser ist jedoch im Vergleich zu anderen Extremindikatoren vergleichsweise gering.

Zukunftsentwicklung

In Abbildung 23 sind die absoluten Häufigkeiten des Auftretens von Tropennächten dargestellt. Hier ist es bei der Auswertung lohnend, auch die relativen Häufigkeiten (nicht abgebildet) der KLaMuKo-Klassen hinzuzuziehen. Es ergibt sich, dass für zwei der vier Klassen mit Tropennächten eine deutliche Zunahme festzustellen (Klasse 2 und Klasse 8). Bei der Klasse 2 wird das auf Grund ihrer Seltenheit in Abbildung 23 nicht ganz deutlich. Hier steigt die absolute Häufigkeit beispielsweise im Szenario A1B von 12 Tagen im Referenzzeitraum auf 52 Tage im letzten Zeitabschnitt (2071–2100) an. Auch die Stufe 1-Unterklasse 82 zeigt einen positiven Trend – für das Szenario A1B ist das ein Anstieg von nahe 0 auf 111 Tage (!) beim Vergleich der beiden 30-jährigen Zeitabschnitte. Die zukünftige Entwicklung sollte jedoch immer mit Blick auf die relativ geringe Belastbarkeit und die derzeitige Seltenheit des Ereignisses bewertet werden. Mit aller gebotenen Vorsicht kann aber konstatiert werden, dass das Risiko von Tropennächten in Zukunft zunimmt.

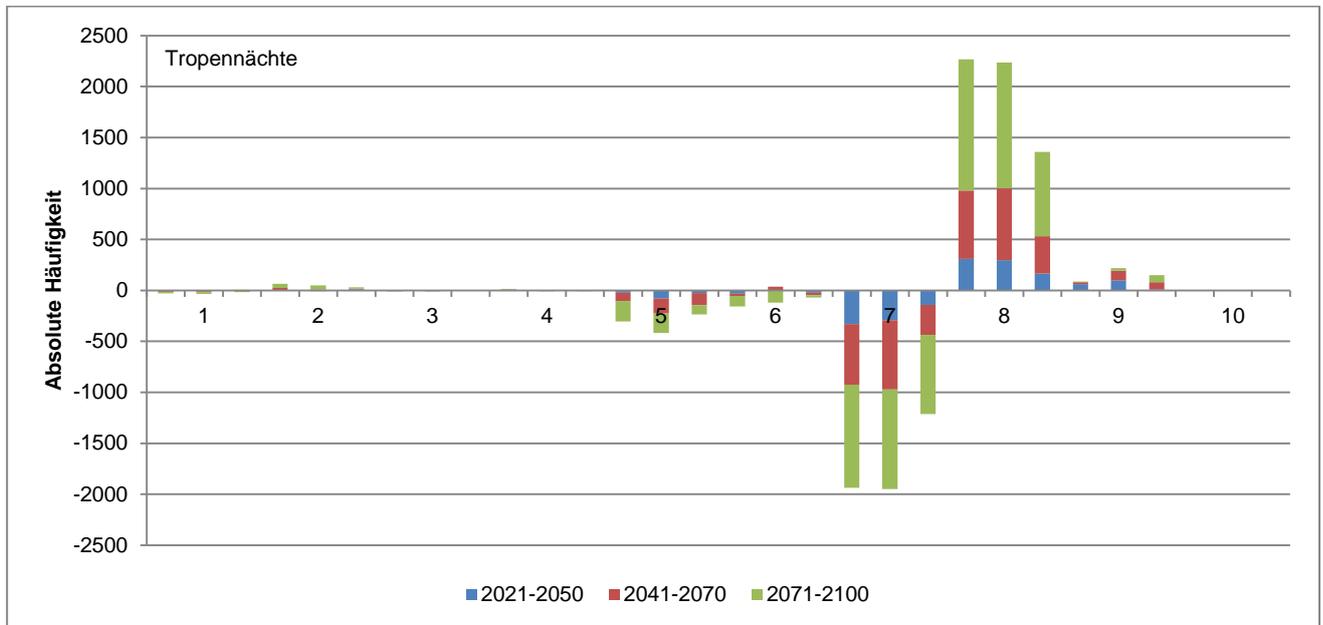


Abbildung 23: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der Tropennächte für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: SHJ

7.2.11 Niederschlagsarme warme Tage

Für einen niederschlagsarmen warmen Tag müssen zwei Kriterien zutreffen. Es werden trocken-warme (tro-warm) Tage untersucht, die zum einen das 25-Perzentil des Niederschlages (RR) des entsprechenden Tages unterschreiten und zum anderen das 75-Perzentil der Mitteltemperatur (TM) – nicht der Minimum- oder Maximumtemperatur – für diesen Tag überschreiten. Die Bezugsgrößen für die Perzentile werden stationsweise ermittelt. Die Besonderheiten einer tagesbezogenen Bestimmung von Perzentilen sind in Kapitel 2.2.11 beschrieben. Für jeden Tag wird untersucht, an welchem Anteil der Stationen diese beiden Kriterien gleichzeitig erfüllt sind (Identifikationsstrategie **prob**).

Im Zeitraum 1971–2000 sind das 3.590 Tage, also etwa dreimal (33 %) soviel Tage im Vergleich zu niederschlagsreichen kalten Tagen (vgl. Abschnitt 7.2.12). Im Durchschnitt werden 120 Tage im Jahr als gleichzeitig niederschlagsarm und warm eingestuft (Tabelle 64). Am häufigsten sind niederschlagsarme warme Tage im August und Oktober. Die Verteilung über das Jahr ist sehr ähnlich mit einer Spanne der relativen Häufigkeit zwischen 28 % im März und 36 % im Oktober.

Das Kriterium tritt relativ großräumig auf. Gleichzeitig an 70 % der Stationen (**prob_70pro**) wurden trocken-warme Tage an 12 % der Tage beobachtet. Gleichzeitig an *allen* Stationen zur gleichen Zeit waren es immerhin noch 8,5 % (927 Tage).

Nach der Anwendung des KLaMuKo-Verfahrens werden 10 Klassen identifiziert. Die Regressionsgrößen für den Anteil der niederschlagsarmen warmen Tage sind in Tabelle 58 verzeichnet. Die Einfachkorrelation beträgt 0,64 und die multiple Korrelation 0,69 (Tabelle 64). Die multiple Korrelation ist im Vergleich zu allen anderen Extremindikatoren am höchsten. Die relative Topografie 1.000/850 hPa (P1) steht im Zusammenhang mit der Zusammenfassung vieler trocken warmer Tage in einer Klasse (Klasse 2, 3, 6, 7 und 9, s. Tabelle 59). Dies wurde schon bei anderen aus der Temperatur abgeleiteten Extremindikatoren beobachtet (Heiße Tage, Hitzewellen, Eistage, Spätfröste und Tropennächte). Zwei Klassen sind relativ groß, Klasse 9 umfasst 40 %

der Tage und Klasse 10 43 % der Tage, welches gemeinsam bereits über 80 % der Tage einschließt. Die Klassen 1, 4 und 5 beinhalten keine niederschlagsarmen warmen Tage.

Tabelle 58: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Anteil der niederschlagsarmen warmen Tage (RR < P25; TM > P75) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Relative Topografie 1.000/850 hPa	19
2	Summenprediktor	58
3	Enke Labilitätsindex	28
4	Geopotentielle Höhe 700 hPa	3

Tabelle 59: Charakteristika der KlaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums die Kriterien für trocken-warme Bedingungen zutrafen (Jahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	5	91,67	14,43	100,00	100,00	66,67
3	11	90,91	30,15	100,00	100,00	0,00
4	320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	585	57,62	40,35	100,00	100,00	0,00
7	963	68,40	36,66	100,00	100,00	0,00
8	506	0,02	0,37	0,00	8,33	0,00
9	5859	26,74	33,79	100,00	100,00	0,00
10	6297	0,73	5,40	0,00	100,00	0,00

Zukunftsentwicklung

Abbildung 24 zeigt die Differenzen der absoluten Häufigkeit der Anteile der trocken-warmen Tage. Dominant ist die zeitliche Änderung der beiden großen Klassen 9 und 10. Dies ist eine Folge der Tendenz, dass Klassen mit einer hohen Anzahl an trocken-warmen Tagen vorzugsweise positive Differenzen bezüglich ihrer Häufigkeit aufweisen. Neben der Klasse 9 zeigen die Klassen 2, 3, und 6 eine Zunahme der absoluten Häufigkeiten im Vergleich zum Referenzzeitraum in allen drei Zeiträumen und Szenarien, besonders prägnant ist dies im letzten Zeitabschnitt (2071–2100) und den Szenarien A1B und A2. Auch bei den Untersuchungen der Tage, die an 70 % der Stationen beide Kriterien erfüllen, ist ein positiver Trend der Häufigkeiten in den Klassen mit hohen Klassenmitteln zu beobachten. Es wurden in einer Zusatzuntersuchung zwei Klassen identifiziert, die nur Tage beinhalten, die an mindestens 70 % der Stationen als gleichzeitig trocken und warm charakterisiert wurden. Auch diese beiden Klassen nehmen deutlich in ihrer absoluten Häufigkeit von 1951 bis 2100 zu. In der Zusammenschau ist zu konstatieren, dass nach Maßgabe der KlaMuKo-Ergebnisse von einer Zunahme der niederschlagsarmen warmen Tage in Zukunft ausgegangen werden kann.

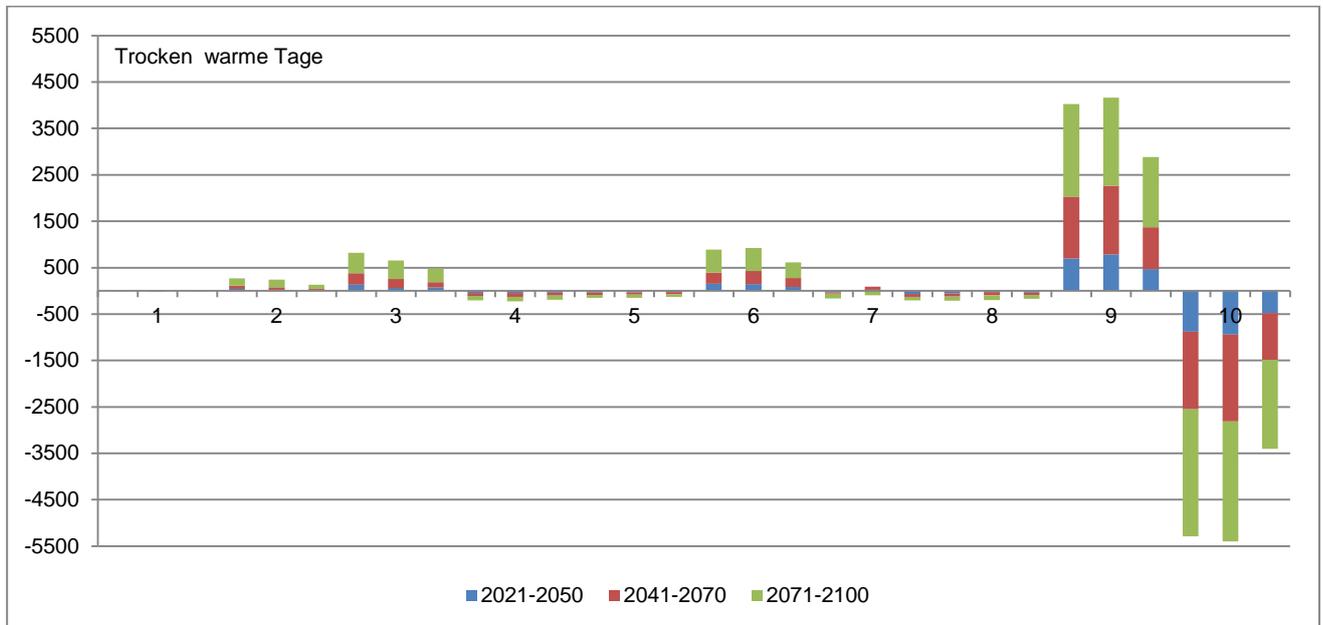


Abbildung 24: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der niederschlagsarmen warmen Tage (prob) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Jahr

7.2.12 Niederschlagsreiche kalte Tage

Bei niederschlagsreichen kalten Tagen oder auch feucht-kalten Tagen werden Tage untersucht, die gleichzeitig wenig oder keinen Niederschlag aufweisen und dabei dem unteren Temperaturbereich zuzuordnen sind. Die Bezugsgrößen für die Perzentile werden stationsweise ermittelt. Die Besonderheiten einer Tagesbezogenen Bestimmung von Perzentilen sind in Kapitel 2.2.11 beschrieben. Wie bei den trocken-warmen Tagen (Abschnitt 7.2.11) werden zur Bestimmung die Mitteltemperatur (TM) und der Niederschlag (RR) herangezogen. Für einen feucht-kalten Tag müssen zwei Kriterien zutreffen: Zum einen muss der Niederschlag das 75-Perzentil des entsprechenden Tages überschreiten und zum anderen muss das 25-Perzentil der Mitteltemperatur für diesen Tag unterschritten werden. Für jeden Tag wird untersucht, an wie vielen Stationen diese beiden Kriterien gleichzeitig erfüllt sind (Identifikationsstrategie **prob**) und an welchen Tagen das Kriterium von 70 % (Strategie **prob_70pro**) der Klimastationen erfüllt wurde.

Tabelle 60: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KLaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Anteil der feucht-kalten Tage (RR > P75; TM < P25) für das Mittel der Klimastationen. Jahreszeit: Jahr

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Geopotenzielle Höhe 500 hPa	4
2	Horizontale Diff. Geopot. O-W 850 hPa	12
3	Relative Feuchte 700 hPa	8
4	Enke Labilitätsindex	28

Im Zeitraum 1971–2000 sind 1.070 Tage (10 %) feucht-kalt. Das entspricht einer durchschnittlichen Überschreitung von 36 Tagen im Jahr (Tabelle 64), wobei das Maximum ihres Auftretens im Juni liegt. Dieser Indikator besitzt eine eher lokale Ausprägung: Gleichzeitig an 70 % der Stationen wurden feucht-kalte Tage nur an einem Prozent der Tage beobachtet.

Bei der Analyse der feucht-kalten Tage identifiziert das KLaMuKo-Verfahren 10 Klassen. Die relevantesten Regressionsgrößen sind in Tabelle 60 aufgelistet.

Tabelle 61: Charakteristika der KLaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums die Kriterien für feucht-kalte Bedingungen zutrafen (Jahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	75	32,67	34,87	100,00	100,00	0,00
2	320	0,60	6,07	0,00	91,67	0,00
3	42	46,23	39,87	100,00	100,00	0,00
4	149	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1992	2,22	9,62	16,67	100,00	0,00
6	4442	0,44	4,01	0,00	83,33	0,00
7	682	9,74	20,31	58,33	100,00	0,00
8	3071	0,17	2,79	0,00	83,33	0,00
9	2468	9,71	20,49	58,33	100,00	0,00
10	1369	1,13	7,42	0,00	100,00	0,00

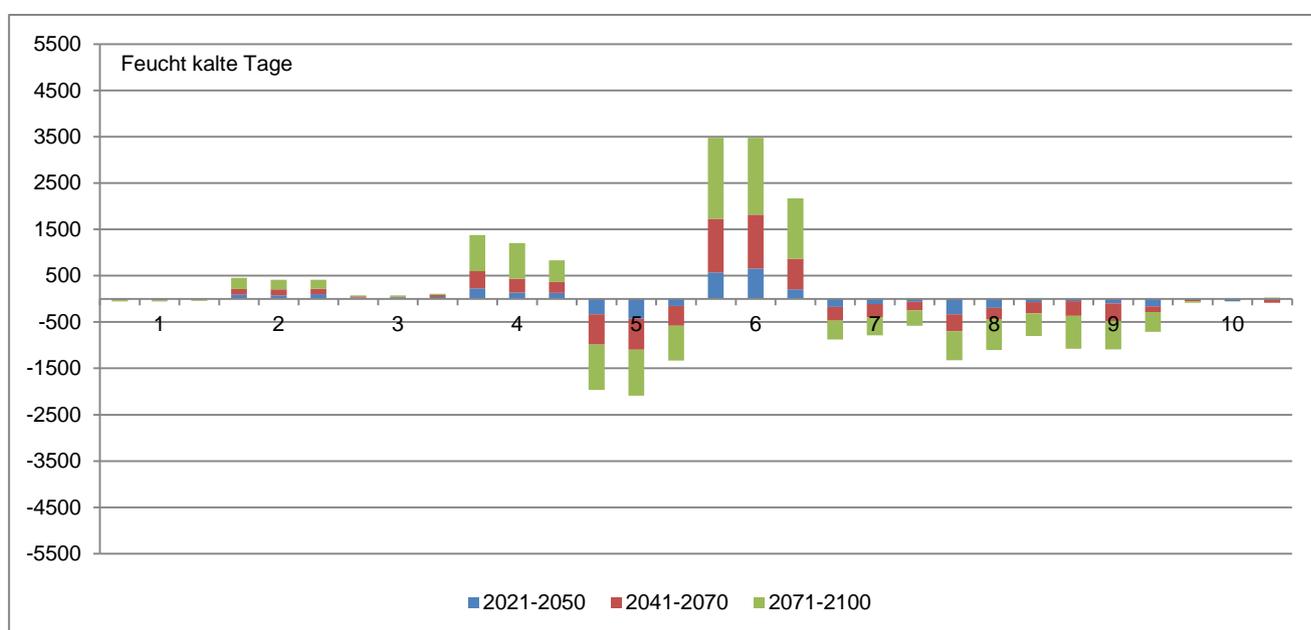


Abbildung 25: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KLaMuKo-Klassen der feucht-kalten Tage (prob) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: Jahr

Es wurde eine Klasse identifiziert (s. Tabelle 61), die keine feucht-kalten Tage beinhaltet (Klasse 4). Die Klassen 1, 3, 7 und 9 gruppieren überdurchschnittlich viele Tage, die beide Kriterien an vielen Stationen gleichzeitig erfüllen – insbesondere Klasse 3 stellt eine extreme Ausprägung dieses Indikators dar. Das höchste Klassenmittel wurde für die Stufe 1-Unterkategorie 81 beobachtet (hier nicht dargestellt) und liegt bei 83,3.

Die Korrelation mit der ersten Regressionsgröße (Geopotenzielle Höhe) ist 0,32 und die multiple Korrelation beträgt 0,42 (Tabelle 64).

Zukunftsentwicklung

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der absoluten Häufigkeit der feucht-kalten Tage des Jahres (Abbildung 25), so zeigen die drei Klassen mit vielen Extremwerttagen (Klasse 1, 7 und 9) eine Abnahme über die Zeit (insbesondere im letzten Abschnitt 2071–2100). Die drei KlaMuKo-Klassen mit deutlichen positiven Tendenzen (Klasse 2, 4 und 6) gruppieren eher Tage, die die Kriterien nicht erfüllen. Aus diesen Resultaten lässt sich, auch gestützt durch die recht hohe Belastbarkeit der KlaMuKo-Ergebnisse, eine Abnahme der feucht-kalten Tage in Zukunft abschätzen.

7.2.13 PM₁₀-Überschreitungen

Für die Untersuchung der Überschreitungen des Tagesgrenzwertes 50 µm/m³ für den Parameter Feinstaub (PM₁₀) stehen nur Daten des Zeitraumes Januar 2004 bis Dezember 2010 zur Verfügung. Bei PM₁₀ werden Tagesmittel des Winterhalbjahres ausgewertet, wenn diese mittlere Konzentration an einer Station der 36 Luftgütemessstationen einen Wert von 50 µg/m³ übersteigt. Für jeden Tag wird ermittelt, an wie vielen Stationen dieses Kriterium gleichzeitig erfüllt ist (Identifikationsstrategie **prob**). Im Winterhalbjahr überschreiten 560 Tage in diesen 11 Jahren den Grenzwert 50 µm/m³ (28 % der Tage). Das maximale Klassenmittel beträgt 52,8 (Stufe 1-Unterklasse 62) und das Maximum innerhalb einer einzelnen Klasse liegt bei 69,4 % aller Tage. Es konnte demnach kein Tag beobachtet werden, an welchem an *allen* Stationen eine erhöhte Schadstoffbelastung mit Feinstaub herrschte. Die Überschreitungen sind am zahlreichsten im Monat Januar.

Tabelle 62: Durch das Screening ermittelte Prediktoren. Stufe 0 des KlaMuKo-Verfahrens. Zielgröße: Anteil der Überschreitungen des Feinstaubgrenzwertes (PM₁₀ > 50 µm/m³) der 36 Luftgütemessstationen. Jahreszeit: WHJ

Prediktor-Rang	Bezeichnung	Pred.-Nr.
1	Horizontale Diff. Geopot. N-S 850 hPa	9
2	Enke Labilitätsindex	28
3	Absolute Feuchte 850 hPa	33
4	Betrag des Gradienten 1000 hPa	30

Das KlaMuKo-Verfahren wird für die Überschreitungen des PM₁₀-Grenzwertes erstmals für einen Datensatz einer Luftgütegröße angewandt. Bei der Rekonstruktion der PM₁₀-Überschreitungen werden 10 KlaMuKo-Klassen gebildet, die zugehörigen Regressionsgrößen finden sich in Tabelle 62. Eine Kombination von Prediktoren, die sowohl die Einflüsse der Atmosphärendynamik (horizontale Differenzen und Gradienten) als auch der Feuchte sowie der Stabilität/Labilität der vertikalen Schichtung angeben, ist kompatibel mit den Ergebnissen anderer Studien (Schneider, 2003).

Die Einfachkorrelation beträgt 0,28 und die multiple Korrelation 0,37. Damit gehört die multiple Korrelation zu den relativ geringen (vgl. Tabelle 64). Eine positive Ausprägung der ersten Regressionsgröße steht im Zusammenhang mit Klassen, die viele Tage mit einer Feinstaubbelastung beinhalten (Klasse 2, 4, 6 und 10; 42 % der Tage). Wenig bis keine Überschreitungen gruppieren sich in den Klassen 1, 5 und 7.

Tabelle 63: Charakteristika der KLaMuKo-Klassen Stufe 0. Zielgröße: Anteil der Stationen, an denen an einem Tag des Untersuchungszeitraums eine PM₁₀-Grenzwertüberschreitung auftrat (Winterhalbjahr)

Klasse	Anzahl	Mittel	Streuung	95-Perz.	Max	Min
1	435	0,70	3,56	2,78	58,33	0,00
2	20	15,84	23,62	63,89	63,89	0,00
3	37	1,28	3,62	5,56	16,67	0,00
4	30	7,13	16,47	55,56	69,44	0,00
5	26	0,43	1,29	2,78	5,56	0,00
6	235	9,08	16,04	47,22	69,44	0,00
7	123	0,34	1,90	2,78	19,44	0,00
8	262	3,23	8,81	22,22	61,11	0,00
9	289	2,04	7,15	11,11	58,33	0,00
10	548	7,91	14,33	44,44	69,44	0,00

Zukunftsentwicklung

Werden Auswertungen von atmosphärischen Faktoren mit Einfluss auf die Luftqualität durchgeführt, so ist zu beachten, dass diese nur einen Teil der Variabilität einer Größe wie PM₁₀ beschreiben (Enke, Kreienkamp, & Spekat, 2008). Es gibt einen relativ hohen stochastischen (nicht deterministisch zu fassenden, zufälligen) Anteil in den Zeitreihen von PM₁₀ – aber auch anderer Schadstoffe. Zudem ist bei Abschätzungen zukünftiger Entwicklungen ein weiterer bedeutender Einflussfaktor zu beachten: Die Entwicklung von Wirtschaft, Verkehr sowie von Luftreinhaltemaßnahmen und den Folgen bezüglich der Luftqualität. Dieser Wirkkomplex ist faktisch nicht abzuschätzen, sodass Zukunftsentwicklungen nur das *Potenzial* für das Auftreten von Situationen mit Schadstoffbelastungen umfassen können.

Bei der Analyse der absoluten Häufigkeit (Abbildung 25) zeigt sich zudem, dass belastbaren Aussagen zur zeitlichen Veränderung der PM₁₀-Überschreitungen nur für einige Klassen zu treffen sind; wie auch bei anderen Extremindikatoren kommt es bisweilen vor, dass unterschiedlich gruppierten Zustände keine gleichsinnigen zeitliche Veränderungen aufweisen. Außerdem kompensieren sich bei einzelnen KLaMuKo-Klassen teilweise, wie auch bei einigen anderen Extrem-Indikatoren zu konstatieren ist, Zunahme- und Abnahme-Entwicklungen, analysiert in den Zirkulationsänderungen der Klimasimulationen.

Weitere Studien zur Luftqualität sind in Abschnitt 9 dokumentiert.

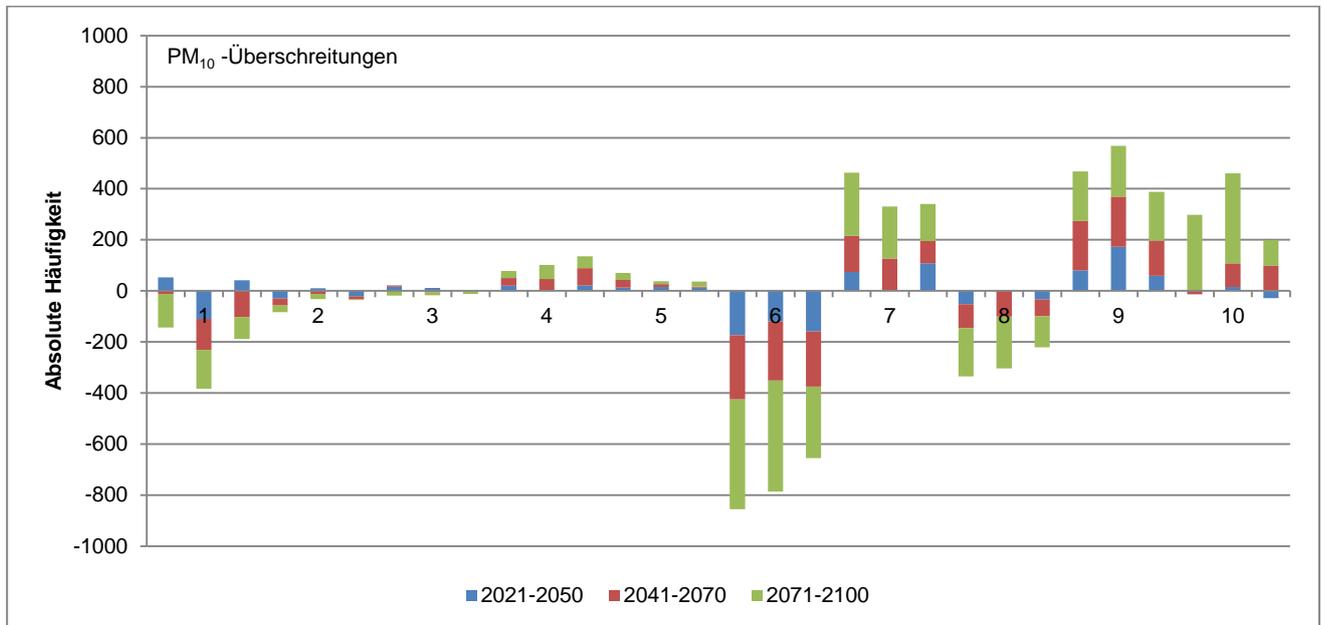


Abbildung 26: Differenzen der absoluten Häufigkeiten der KlaMuKo-Klassen der Überschreitungen des Feinstaubgrenzwertes (prob) für die drei Szenarien A1B (erste Säule), A2 (zweite Säule) und B1 (dritte Säule) der Zeiträume 2021–2050 (blau), 2041–2070 (rot) und 2071–2100 (grün) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000. Jahreszeit: WHJ

7.3 Übersicht der KlaMuKo-Ergebnisse (Extremindikatoren)

In diesem Abschnitt werden in Übersichtsform einige statistische Kennzahlen der KlaMuKo-Läufe sowie die Änderungssignale für die Extremindikatoren zusammengestellt.

Zum Verständnis der Darstellung in Tabelle 64: Aus der Einfachkorrelation (EK) ist zu ersehen, wie gut bereits eine durch ein Screening identifizierte Regressionsgröße die Zielgröße beschreibt. Die multiple Korrelation mit bis zu vier Regressionsgrößen (MK) dient der Einschätzung sowohl der mit KlaMuKo erreichbaren Beschreibungsgüte sowie des zusätzlichen Informationsgewinns, wenn mehr als eine Regressionsgröße zur Beschreibung der Zielgröße herangezogen wird. Die hier ergänzend tabellierte Reststreuung (RS) ist ein Maß für die durch das KlaMuKo-Verfahren nicht erklärbare Streuung. Tabelle 64 zeigt neben den Korrelationen (EK und MK) die Charakteristika der Überschreitungen der Extremindikatoren im Zeitraum 1971–2000 (bzw. 2000–2010 für den Parameter PM₁₀). Zusätzlich zur Häufigkeit ist der prozentuale Anteil der jeweiligen Überschreitung für den 30-jährigen Zeitraum und die durchschnittliche Überschreitung pro Jahr (bezogen auf die untersuchte Jahreszeit) angegeben.

Es ist zu erkennen, dass je nach Zielgröße unterschiedliche Charakteristika der Beschreibungsqualität erzielt werden. Dabei sind multiple Korrelationen von über 0,5 als beachtlich einzuschätzen, was für die Extremindikatoren Hochwasser, Heiße Tage, Eistage, Starkwindtage im WHJ und niederschlagsarme warme Tage der Fall ist. Die höchste Beschreibbarkeit durch bereits *einen* Parameter zeigen Starkwindtage im WHJ und niederschlagsarme warme Tage. Verhältnismäßig geringe Belastbarkeit der Aussagen ist für Perioden mit hohem Niederschlag, Hitzewellen, Spätfrösten und Tropennächten zu verzeichnen. Dies ist durch die Seltenheit dieser Extremindikatoren zu begründen (z. T. weniger als 3 % der Tage). Bei den in Abschnitt 7.2 betrachteten Extremindikatoren ist außerdem festzuhalten, dass die Korrelationen zwischen dem Prediktanden und der Rekonstruktion durch eine Regression von geringerer Größenordnung sind als diejenigen bei den einfachen

Zielgrößen (Maximumtemperatur, Minimumtemperatur, Niederschlag, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit – vorgestellt in Abschnitt 6.2).

Tabelle 64: Übersichtsdarstellung der Überschreitungen (Anzahl, prozentualer Anteil und durchschnittliche Anzahl pro Jahr bezogen auf die jeweilige Jahreszeit) der Extremindikatoren im Zeitraum 1971–2000 und die dazugehörigen KLaMuKo-Resultate. Bei Indikatoren, die *Perioden* analysieren (Nr. 1, 3 und 4) bezieht sich die Anzahl auf die Tage, die sich in einer solchen Periode befinden. EK: Einfachkorrelation unter Verwendung einer Regressionsgröße. MK: Multiple Korrelation unter Verwendung von vier Regressionsgrößen. RS: Reststreuung

Extremindikatoren	Anzahl	Prozentanteil	Überschreitungen pro Jahr	EK	MK	RS
1) Extreme Trockenperioden	1214	11,1	41,9	0,29	0,36	0,29
2a) Hochwasser (Jahr)				0,40	0,52	9,04
2b) Hochwasser (SHJ)				0,39	0,48	10,20
2c) Hochwasser (WHJ)				0,49	0,65	6,53
3) Perioden mit hohem Niederschlag	261	2,4	9,3	0,17	0,24	0,15
4) Heiße Tage	336	6,1	11,2	0,44	0,50	21,67
5) Hitzewellen	88	1,6	2,9	0,23	0,28	0,12
6) Eistage	1119	20,5	37,3	0,48	0,60	32,41
7) Spätfröste	38	1,4	1,3	0,17	0,24	4,40
8a) Starkwinde (SHJ)	110	2,0	3,8	0,32	0,36	0,13
8b) Starkwinde (WHJ)	895	16,4	29,8	0,64	0,67	0,27
9) Schwüle	434	7,9	15,7	0,38	0,44	24,76
10) Tropennächte	67	1,2	2,7	0,23	0,27	10,87
11) Niederschlagsreiche kalte Tage	1070	9,8	35,7	0,32	0,42	11,06
12) Niederschlagsarme warme Tage	3590	32,9	119,7	0,64	0,69	23,39
13) PM ₁₀ -Überschreitungen	560	27,9		0,28	0,37	10,51

Zusammenfassend können folgende Aussagen getroffen werden, wobei deren Belastbarkeit unterschiedlich groß ist. Folgende Extremindikatoren treten in Zukunft wahrscheinlicher auf – bei reduzierter Belastbarkeit der Aussagen sind die Indikatoren in Klammern geschrieben:

- (Extreme Trockenperioden)
- Heiße Tage
- Schwüle
- Niederschlagsarme warme Tage
- (Hitzewellen)
- Starkwind im Winterhalbjahr
- (Tropennächte)

Eine Abnahme der Häufigkeit wird für nachstehende Extremindikatoren abgeschätzt:

- (Spätfröste)
- Feucht-kalte Tage
- Eistage

Bei den übrigen Indikatoren sind die sich abzeichnenden Änderungen auf Grund der Analysen nicht deutlich zu erkennen.

7.4 Fazit

Das KlaMuKo-Verfahren kann auf die Ergebnisse eines globalen Klimamodells übertragen werden. Dazu wurden die Konfigurationen der Regressionskoeffizienten, wie sie zuvor anhand der Reanalysedaten für das gegenwärtige Klima für verschiedene Klimaparameter und Extremindikatoren identifiziert wurden, verwendet. Die Validierung zeigt, dass das Modell in der Lage ist, die Beobachtungsdaten im Mittel abzubilden. Dies war Voraussetzung, um das Modell für Szenariorechnungen einzusetzen und mit dem Klimawandel verbundene Veränderungen der Extreme erfassen zu können.

Durch das KlaMuKo-Verfahren – speziell für die ausgewählten Extremindikatoren – ist eine Beschreibung von Extremen möglich. KlaMuKo identifiziert gut separierte Muster der Regressionskoeffizienten und damit unterschiedlich gruppierte Klimazustände. Klassen, für die extreme Ausprägungen festgestellt wurden, können somit in weiteren Untersuchungen genauer betrachtet werden.

Es ist festzustellen, dass die Veränderungen der Temperatur in Zukunft ausschlaggebend für die meisten Extremindikatoren sein dürften.

8 Arbeitspaket 6 – Neuer NAO-Index

8.1 Kontext

Mit der systematischen Analyse von globalen Klimadaten entstanden im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts erste Hypothesen und Deutungsversuche für großräumige Wechselwirkungen und deren Periodizitäten im Klimasystem der Erde [(Walker, 1924), (Walker & Bliss, 1932)]. Im Rahmen von Korrelations-Studien der freien Atmosphäre wurde das Konzept der Telekonnektionen entwickelt (Wallace & Gutzler, 1981), demzufolge Fernwirkungen mit Bezug zu atmosphärischen Steuerungszentren zwischen weit auseinanderliegenden Regionen existieren. Mit ihnen verbundene Schwingungen im Klimasystem sorgen für periodisch wiederkehrende großräumige Zirkulationsverhältnisse.

Am deutlichsten sind die Fernwirkungen mit dem tropischen Pazifik (ENSO – El Niño/Southern Oscillation) oder dem Nordatlantik (NAO – North Atlantic Oscillation) nachzuweisen (Barnston & Livezey, 1987). Die NAO ist im Grunde ein atmosphärischer Dipol mit einem Zentrum über Grönland und einem entgegengesetzten Zentrum im Nordatlantik zwischen 35 und 40°N. Anfangs wurden sie stationsbasiert dargestellt, d. h. in Form von Druckdifferenzen zwischen einzelnen Stationsmessungen. Beim so genannten NAO-Index erfolgte dies

mit Hilfe des Bodendrucks des Stationspaars Ponta Delgada/Azoren und Stykkisholmur/Island. Je nach NAO-Phase ist die Zirkulation entweder, vereinfacht dargestellt, durch starke Westwindströmung (positive Phase) oder starkes kontinentaleuropäisches Blocking (negative Phase) charakterisiert (Hurrell & van Loon, 1997).

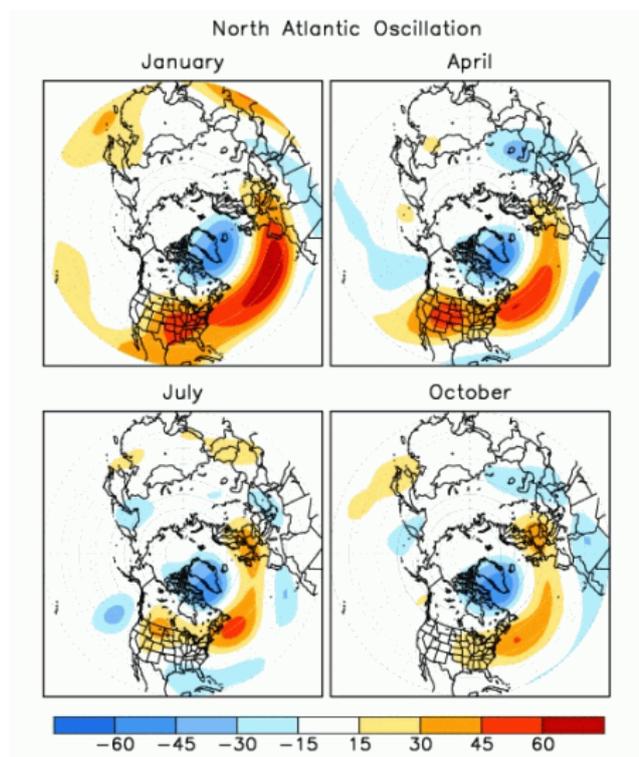


Abbildung 27: Nordhemisphärische Korrelationskarten der NAO in Jahreszeiten-repräsentativer Form. Quelle: www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.loading.shtml

Wie Abbildung 27 zeigt, ist das NAO-Muster komplex und im Grunde nur unzureichend mit Hilfe von Bodendruckmessungen eines Stationspaars wiederzugeben, auch wenn ein stationsbasierter Index den Vorteil besitzt, eine Langzeitrepräsentierung der NAO darzustellen: Die Stationsmessungen gehen bis weit in das 19. Jahrhundert zurück, während hemisphärisch repräsentative Darstellungen der freien Atmosphäre erst seit den 1960er-Jahren möglich sind.

Um Defiziten und Inkonsistenzen der stationsbasierten Indexbestimmung entgegenzuwirken, erfolgte in den 1980er-Jahren ein Übergang zu einer neuen Art der NAO-Indexbestimmung. Die dazu verwendete Methodik ist die rotierte Hauptkomponentenanalyse (Rotated Principal Component Analysis, RPCA), ein Verfahren, das die zweidimensionalen Hauptmuster der Telekonnektionen isoliert und die Konstruktion von Zeitreihen der Musterstärke incl. deren Vorzeichen ermöglicht (Barnston & Livezey, 1987). Der NAO-Index ist also seit den 1980er-Jahren ein Maß, wie stark und mit welchem Vorzeichen die erste Hauptkomponente der zweidimensionalen RPCA-Analyse des Geopotenzials ist.

8.1.1 Phänomenologie des Blockings

Die negative Phase der NAO ist in den mittleren Breiten mit einer relativ gering ausgeprägten Westwindzirkulation und Blocking assoziiert. In der mäandrierenden Strömung der großräumigen Zirkulation entstehen dann „Hindernisse“, die z. T. für Tage und Wochen bewirken, dass die Strömung blockiert wird, ausweicht und in Teilbereichen sogar in der entgegengesetzten Richtung verläuft. Es gibt zwei atmosphärische Strukturen, die Blocking auslösen und aufrechterhalten:

- Typ 1: So genannte Omega-Lagen, bei denen eine starke ortsfeste Antizyklone die Strömung steuert, so dass sie die Form des griechischen Buchstabens Omega (Ω) annimmt (Beispiel in Abbildung 28).

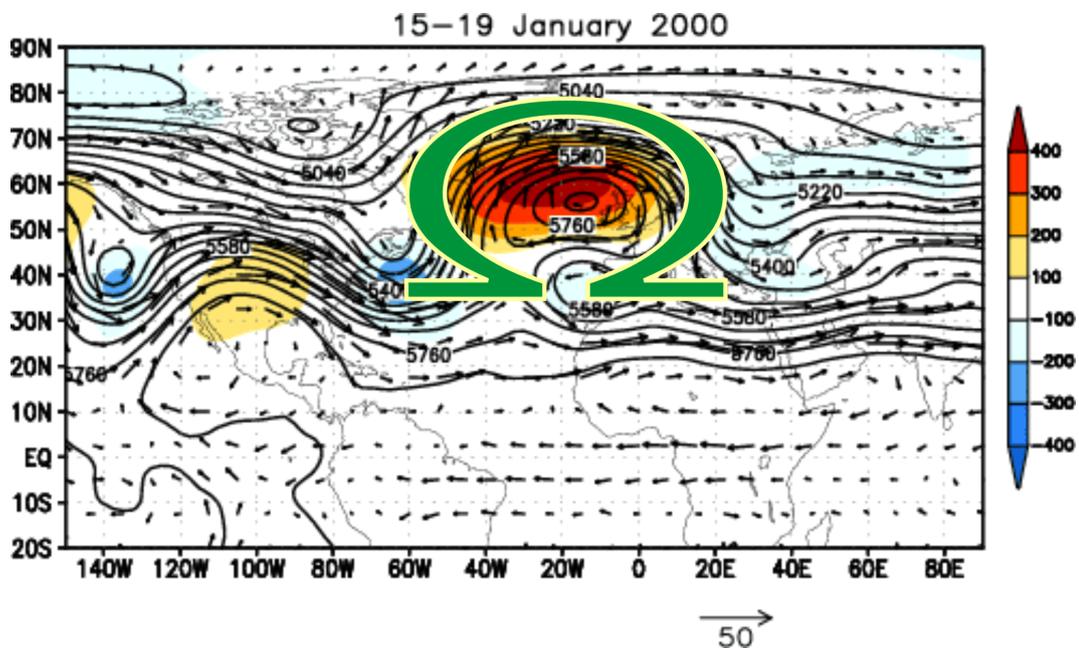


Abbildung 28: Beispiel für eine Blocking-Situation im Januar 2000. Dargestellt sind die Höhenlinien der 500 hPa-Fläche als Kurvenschar, die Geopotenzialanomalie (Abweichung vom Mittelwert der Karte) als farbige Bereiche und Windpfeile (unterhalb der Karte ist angegeben, wie eine Windgeschwindigkeit von 50 m/s gezeichnet wird). Auffällig ist die sehr starke Antizyklone mit Kern bei 60 N und 10 W, durch die eine Omega-förmige Deformation der Strömung erfolgt. In ihrem Bereich treten zwar ebenfalls hohe Windgeschwindigkeitswerte auf, aber die zonale (breitenkreisparallele) Komponente ist dort zugunsten der meridionalen Komponente besonders gering. Quelle: BLOCKWETT-Bericht (Enke, Spekat, & Kreienkamp, 2007), modifiziert nach einer globalen Karte des Climate Prediction Center des US-Wetterdienstes www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/blocking/background/atlantic_case.shtml

- Typ 2: Ein Paar von großräumiger Zyklone und Antizyklone in direkter Nachbarschaft und genähert auf dem selben Meridian. Ein Beispiel ist in Abbildung 29 wiedergegeben.

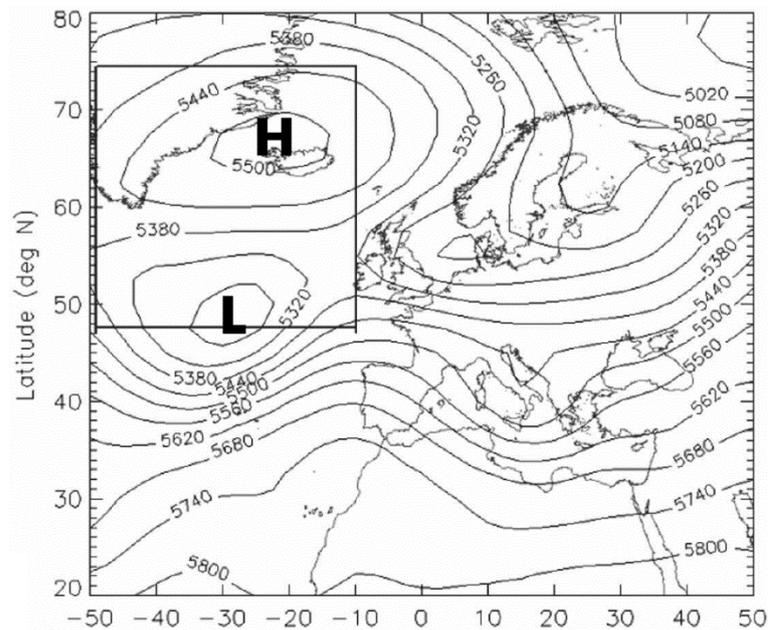


Abbildung 29: Beispiel für eine Blocking-Situation im Februar 1986, bei der die Strömung aufgespalten ist. Dargestellt sind die Höhenlinien der 500 hPa-Fläche. Der eingesetzte Rahmen im nördlichen Teil des atlantisch-europäischen Sektors zeigt die Position der Strömungsaufspaltung und des Wirbel-paars. Quelle: BLOCKWETT-Bericht (Enke, Spekat, & Kreienkamp, 2007).

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde ein theoretischer Ansatz entwickelt, der davon ausgeht, dass in der Atmosphäre wellenförmige Schwingungen angeregt werden und das Strömungsregime aus einer Überlagerung von Wellen verschiedener Länge besteht (Rossby, 1939). Die so genannten Rossby-Wellen besitzen eine Ausbreitungsgeschwindigkeit, die je nach Wellenlänge unterschiedlich ist (Dispersion), d. h. kurze Wellen wandern schnell und lange wandern langsam. Zusätzlich lässt sich mit diesem Ansatz eine „kritische Wellenlänge“ bestimmen, bei der die Verlagerungsgeschwindigkeit 0 ist, die also stationär werden – bei noch größerer Wellenlänge entstehen auch retrograde Bewegungen, also der zonalen Grundströmung entgegengesetzt.

Eine Synthese aus dem Blocking-Konzept und dem NAO-Index wurde Anfang des 21. Jahrhunderts postuliert und publiziert (Quadrelli, Pavan, & Molteni, 2001). Des Weiteren gab es Ansätze, Blocking zu systematisieren (BARRIOPEDRO et al. 2006). Diese nutzen Methoden, die in der Klimadiagnose zur vereinfachten Zirkulationsbeschreibung in Form eines so genannten Zonalindex eingeführt wurden (Lejenäs & Økland, 1983). Sie wurden weiterentwickelt und in eine Form gebracht, die operationell einsetzbar und auch auf Klimamodell-Ergebnisse anwendbar ist (Tibaldi & Molteni, 1990). Der Molteni-Tibaldi-Blockingindex (MTBI) identifiziert mit Hilfe von Maßzahlen, die aus Geopotenzialfeldern abgeleitet werden, Regionen, in denen eine Strömung „geblockt“ ist, d. h. sie ist dort tendenziell meridional oder sogar gegenläufig. In der Praxis wurden die Empfehlungen des MTBI in mehreren Aspekten modifiziert, um räumlichen und zeitlichen Eigenschaften des Blockings besser gerecht zu werden und eine adäquate Identifikation zu ermöglichen. Wie in der BLOCKWETT-Studie konstatiert, ist eine vollständige Objektivierung der Identifikation von Blocking nicht erreichbar. Das liegt daran, dass dieses Phänomen zwar eine gewisse Stabilität und Langlebigkeit in der Zirkulation besitzt, jedoch eine Balance zwischen rigorosem und flexiblem Identifikationsverfahren erreicht werden muss. Selbst der MTBI wird von seinen „Erfindern“ nicht stringent angewandt. Zudem existiert ein weiterer „Freiheitsgrad“ bei

der Definition von Zirkulationsindizes durch verschiedene Auffassungen, wie lang eine Episode mit degenerierter Strömung sein muss, um als Blocking eingestuft zu werden. In der Literatur finden sich Schwellwerte zwischen 3 und 10 Tagen. Auch die räumliche Ausdehnung der Blockinglage ist eine nicht standardisierte Größe und wird von verschiedenen Autoren auch unterschiedlich angesetzt.

8.1.2 Regionale Konsequenzen von Blocking für Sachsen – Ergebnisse der BLOCKWETT-Studie

In der BLOCKWETT-Studie (Enke, Spekat, & Kreienkamp, 2007) wurde der Hypothese nachgegangen, dass für Extreme der jüngeren Vergangenheit, insbesondere solche, die länger anhielten, Zusammenhänge mit Veränderungen im Blockingverhalten der Atmosphäre bestehen. Dazu wurde zunächst Blocking als Kausalität für Extreme betrachtet. Es erfolgten des Weiteren Analysen, die die hemisphärischen Spezifika von Blocking und deren Reproduzierbarkeit durch Zirkulationsmodelle umfassten. Mit Blick auf (i) die Lage der Betrachtungsregion (Sachsen) und (ii) die unterschiedliche Güte der Beschreibung des Strömungsregimes der mittleren und der polaren Breiten in globalen Zirkulationsmodellen wurde für die BLOCKWETT-Studie der MTBI zum BLOCKWETT-Index modifiziert (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2010). Einige Erkenntnisse aus dieser Studie seien hier zusammengefasst:

- Es wurde gefunden, dass Mitteleuropa, neben dem Pazifik in der Umgebung der Datumsgrenze, das Hauptgebiet für Blocking auf der Nordhemisphäre ist, wobei innerhalb eines Jahres die Anzahl der Tage mit blockierter Strömung stark variiert, mit einem Maximum im Winter und Frühjahr und einem Minimum im Sommer und Herbst.
- Betrachtet man die Jahresmittel der Blockingtage, so findet sich ein 2- bis 3-jähriger Zyklus von stärkeren und schwächeren Blockingjahren, aber kaum Trendverhalten – eine sehr schwache Abnahmetendenz ist zwischen 1951 und 2007 zu verzeichnen, allerdings sind die letzten Jahre wiederum durch besonders starkes Blocking gekennzeichnet. Andere systematische Eigenschaften, etwa eine mögliche starke Blockinghäufung in bestimmten Dekaden, konnten nicht gefunden werden.
- Bezüglich der Konsequenzen von Blocking wurde gefunden, dass in Mitteleuropa und insbesondere im Bereich des Freistaats Sachsen während Blocking-Episoden eine Anströmung aus nördlichen bis östlichen Richtungen sehr häufig ist – oder die Strömung ist wegen der gradientschwachen Nähe eines großen blockierenden Hochs nur gering.
- Bezüglich der Zukunftsentwicklung, analysiert mit Hilfe von Klimaprojektionen des GCM ECHAM5, angetrieben mit den Treibhausgas-Szenarios A1B, A2 und B1, wurde gefunden dass sich die Grundeigenschaften des Blockings (Saisonalität, Lage der Maxima, Wiederkehrphasen) fortsetzen.
- Die Unterschiede zwischen den Szenarios A1B und B1 sind nur gering. B1 zeigt dabei gegenüber A1B eine etwas erhöhte Blockinghäufigkeit und eine höhere Variabilität in den Jahresmitteln.
- Langzeittrends sind bezüglich ihres Betrags gering und bezüglich ihres Vorzeichens uneinheitlich. Für Mitteleuropa konnte ein schwacher Abnahmetrend gefunden werden.

Die BLOCKWETT-Untersuchungen zeigten aber auch Defizite in der Detektionsmethodik auf. So werden zwar bestimmte Breitenkreisgürtel im Blocking-Index analysiert, aber mögliche Nord-Süd-Verlagerungen dieser Gürtel bleiben weitgehend unberücksichtigt. Es wurde daher der Frage nachgegangen, ob es möglich ist, ein noch genaueres Bild von den Zusammenhängen zwischen der unterschiedlichen Zonalität der Zirkulation und dem regionalen Klima sowie dessen Extremen zu erhalten. In den Folgeabschnitten werden diesbezüglich entwickelte Ansätze vorgestellt.

8.2 Breitenkreis-flexibler Blockingindex

8.2.1 Klassische Methodik mit festen Bezugsbreitenkreisen

In Anlehnung an den Molteni-Tibaldi-Blockingindex (MTBI) werden die täglichen Geopotenzialfelder an der Umgebung der Koordinaten 60°N und 40°N mit folgender Beziehung analysiert:

$$GHGS = \frac{Z(\Phi_{60N+\Delta}) - Z(\Phi_{40N+\Delta})}{\Phi_{60N+\Delta} - \Phi_{40N+\Delta}}$$

mit Z : Geopotenzial in 500 hPa; Φ : geografische Breite; Δ : -5, -2,5, 0, +2,5 oder +5. Es werden also für jeden Berechnungsschritt an einer Längengradkoordinate 25 GHGS-Werte aus den Geopotenzialdifferenzen der Umgebung einer Bezugsbreite erzeugt. Ist für mindestens ein Δ dieser Wert über 0 gpm/Breitenkreisgrad, was einer Meridionalisierung bis zu einer Strömungsumkehr entspricht, so ist das Blocking-Kriterium erfüllt. Das Berechnungsfenster wird dabei von West nach Ost verschoben, um einen räumlichen Verlauf des Blocking-Index zu erhalten. In der Ursprungsform existiert die Berechnungsvorschrift für einen weiteren, auf die polaren Breiten fokussierenden Teilindex GHGN, der die Umgebung der Koordinaten 80°N und 60°N nutzt, dort lediglich einen Rückgang auf -10 gpm/Breitengrad fordert und gemeinsam mit GHGS zur Beurteilung des Blockings Eingang finden sollte. Doch bereits Molteni und Tibaldi erkannten die Problematik der Repräsentierung der polnahen Atmosphäre in operationellen Daten und Klimaprojektionen und empfahlen, nur den südlichen Index zu verwenden. In der KLIWETT-Studie wird dieser Blockingindex mit **KWBI_φ** bezeichnet.

Die Ansätze von Molteni und Tibaldi sowie der in BLOCKWETT realisierte Ansatz verwenden ausschließlich Geopotenzialfelder. Es gibt aber auch einen alternativen Ansatz (Alessandro, 2008), in dem – für eine Studie auf der Südhalbkugel – ausschließlich Windinformation verwendet wird. Der Alessandro-Index I bestimmt sich nach

$$I = U_{30S} + U_{60S} - 2U_{45S}$$

mit U als zonaler Windkomponente in 500 hPa, in 30°S, 45°S und 60°S berechnet. Positive Werte von I zeigen eine schwach ausgeprägte Westwindkomponente oder eine Strömungsumkehr an. Wird dieser Index in unterschiedlichen geografischen Längen berechnet, so kann ebenfalls ein in der Fläche auftretendes Blocking identifiziert werden. In der KLIWETT-Studie wird dieser Blockingindex mit **KWBI_U** bezeichnet.

8.2.2 Im Rahmen von KLIWETT entwickelte Blockingindex-Methodik für verschiedene Breitenkreise

Für die KLIWETT-Studie wurde eine Erweiterung des Index zum KLIWETT-Blockingindex (KWBI) realisiert. Dabei wurde der These nachgegangen, dass ein Index, der die Umgebung von zwei festen Breitenkreislagen (beim MTBI und beim BLOCKWETT-Index 60°N und 40°N) möglicherweise zu starr ist und in einem zukünftigen gewandelten Klima Ortsverschiebungen von Zonen häufigen Blockings stattfinden. Dazu erfolgten die Bestimmung des GHGS¹⁴ in meridionalen 2,5-Grad-Schritten von 72,5°N bis 20°N – unter Beachtung des Abstands von 20 Breitengraden für die Bezugspunkte. Beispielsweise werden für die Bezugskoordinaten 72,5°N und 52,5°N alle Geopotenzial-Differenzpaare der Koordinaten [67,5°N, 70°N, 72,5°N, 75°N, 77,5°N] und [47,5°N, 50°N, 52,5°N, 55°N, 57,5°N] gebildet und auf Blocking untersucht. Die analoge Konfiguration von Wertepaaren wird danach für 70°N und 50°N als Bezugskoordinaten gebildet und der Bestimmungsprozess

¹⁴ entlang eines Längengrades im Abstand von 2,5° von Ost nach West fortschreitend

setzt sich sukzessive südwärts fort. Es entsteht statt einer auf die Koordinaten 60°N und 40°N bezogenen Blockingaussage für jeden der 144 Längengreispunkte ein „Nordsüdprofil“ des Blockings.

Dabei werden zwei Varianten des Breitenkreis-flexiblen KLIWETT-Blockingindex berechnet: $KWBI_U$ mit Winddaten (in einigen Abbildungslegenden auch mit *ALES* gekennzeichnet), analog zum Alessandro-Index und $KWBI_\phi$ mit Geopotenzialwerten (in einigen Abbildungslegenden auch mit *KREI* gekennzeichnet), analog zur GHGS-Formel.

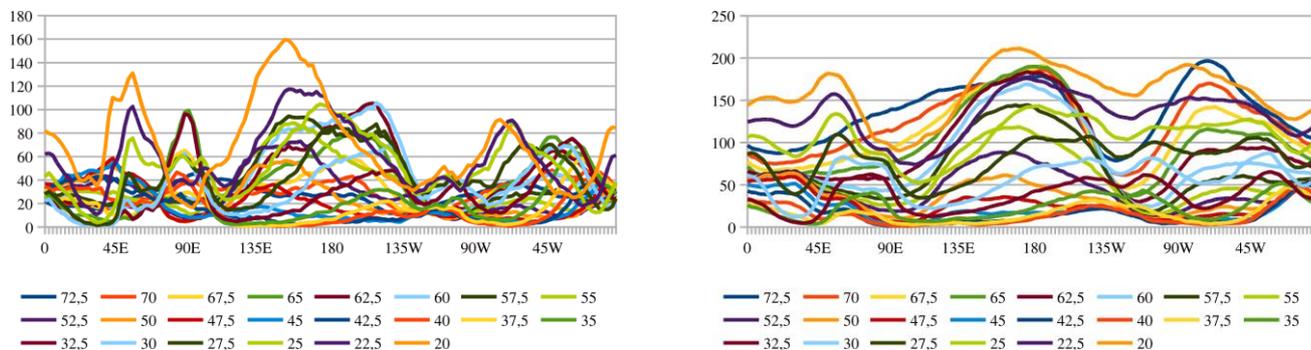


Abbildung 30: Zonale Profile (0°W ... 180°... 0°W) des $KWBI_U$ -Index (links) und des $KWBI_\phi$ -Index (rechts) für die Breitenkreise 72,5°N ... 20°N als Bestimmungsrahmen ($KWBI_U$) bzw. als nördlichem Bezugspunkt ($KWBI_\phi$). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum 1971–2000, gesamtes Jahr

In Abbildung 30 sind die Werte von $KWBI_U$ und $KWBI_\phi$ für alle 144 analysierten Breitenkreise und alle 22 analysierten Längengreise dargestellt. Die Strukturen sind komplex und in ihrer Vielfalt recht wenig übersichtlich. In Abbildung 33 sind aus den Kurvenscharen die zonalen Profile für den Bezugsbreitenkreis 60°N separat dargestellt. Es zeigen sich gewisse Ähnlichkeiten (Maxima über dem Pazifik und dem atlantisch-europäischen Sektor, Minima bei 90°E und 90°W, aber auch Unterschiede, die hauptsächlich in den unterschiedlichen betrachteten Größen (Wind bzw. Geopotenzial) begründet sind.

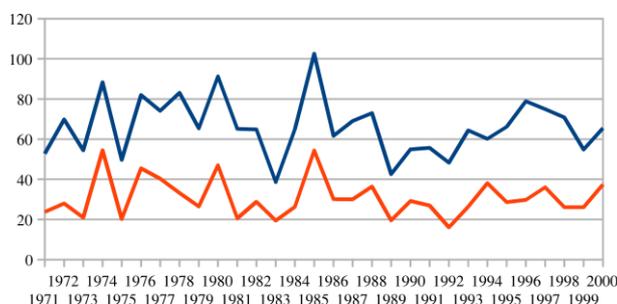


Abbildung 31: Jahresmittelwerte von $KWBI_U$ (blaue Kurve) und $KWBI_\phi$ (rote Kurve) im Zeitraum 1971-2000. Datenquelle: NCAR-Reanalysen.

Auch wenn die beiden Indizes auf anderen Basisgrößen beruhen, so messen sie doch das Zirkulationsverhalten der Atmosphäre in ähnlicher Weise, wie Abbildung 31 zeigt. Die Korrelation zwischen beiden Kurven ist nicht nur dem Augenschein nach hoch, wenn sie berechnet wird, ergibt sich ein Wert von 0,85. Es lassen sich Jahre mit hohem „globalen Blocking“ (es wurden ja alle 144 Stützstellen entlang des Längengreises ausgewertet), wie etwa 1974, 1980 oder 1985 identifizieren. Auch Jahre, in denen es, mit den beiden Indizes ermittelt, *global* relativ wenig Blocking gab, zum Beispiel 1983 oder 1992, werden gefunden.

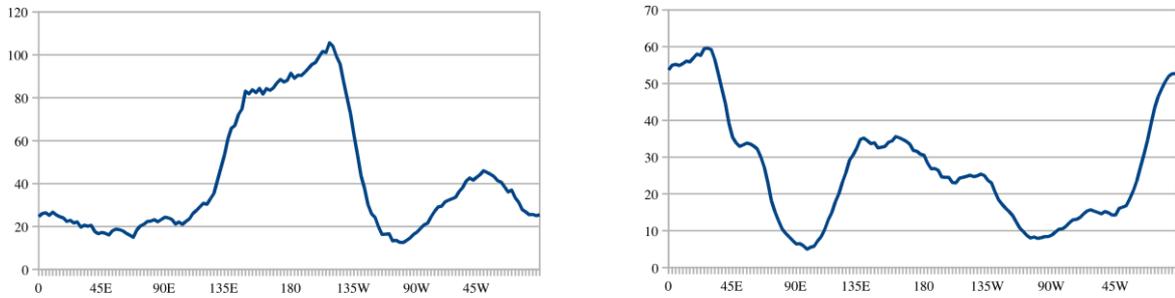


Abbildung 33: Zonale Profile (0°W ... 180° ... 0°W) des KWBI_U-Index (links) und des KWBI_φ-Index (rechts) für den Breitenkreis 60°N als Bestimmungrahmen (KWBI_U) bzw. als nördlichem Bezugspunkt (KWBI_φ). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum 1971–2000, gesamtes Jahr

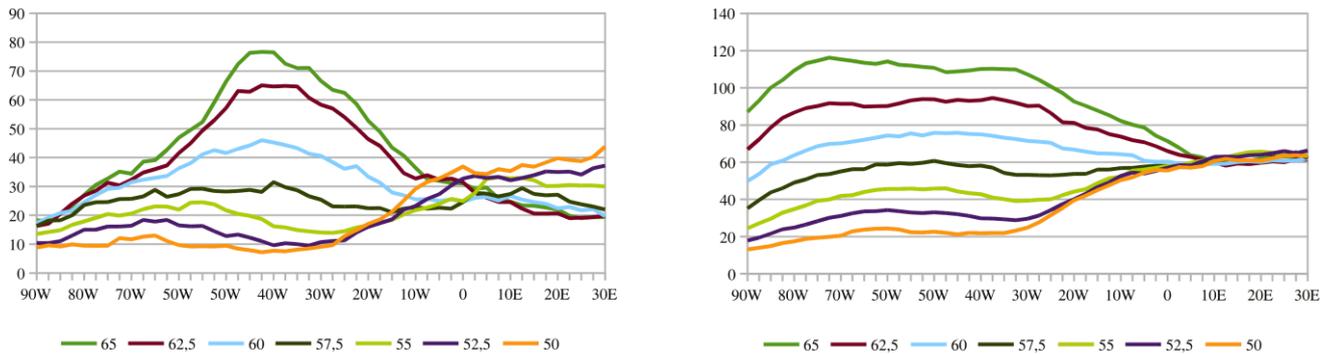


Abbildung 32: Blockingindizes KWBI_U (links) und KWBI_φ (rechts) für den atlantisch-europäischen Sektor (90°W ... 30°E) im Zeitraum 1971–2000. Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Ausgewählt wurden die Indizes für den Breitenkreisbereich von 65°N bis 50°N

Die Breitenkreisabhängigkeit der Indizes wird durch Betrachtung von Abbildung 30 erkennbar. Aus der umfangreichen Schar der dort dargestellten Kurven lässt sich ersehen, dass sowohl in hohen Breiten (Nähe zur Region der polaren Ostwinde) als auch in den subtropischen Breiten (Nähe zur Hadley-Zelle) die Kriterien der Blocking-Indikatoren häufig erfüllt sind. Abbildung 32 fokussiert (i) auf den atlantisch-europäischen Sektor und (ii) auf einen Bereich der Westwindzirkulation der mittleren Breiten. Es zeichnet sich Folgendes ab

- Wind- und Geopotenzial-Indikatoren identifizieren eine stringent nach Norden zunehmende Blockinghäufigkeit.
- Dieser Effekt ist aber nicht im ganzen atlantisch-europäischen Sektor ausgeprägt; vielmehr ist eine solche Breitenkreisabhängigkeit auf dem Atlantik (bei KWBI_U mit zusätzlichem Schwerpunkt in der Region um 50–30°W) klar sichtbar – über dem Kontinent sind die Unterschiede der Blockinghäufigkeit in den einzelnen Breitenkreiszonen deutlich geringer

Wie die Betrachtungen für den atlantisch-europäischen Sektor andeuten (vgl. Abbildung 32), besteht Grund zur Annahme, dass der maritime und der kontinentale Teil des Sektors auch unterschiedliche Nord-Süd-Verläufe der Blockinghäufigkeit aufweisen. Dies zeigt Abbildung 34 in Form von meridionalen Profilen für den Breitenkreisgürtel 40–70°N. Der gesamte Sektor (linke Teilfigur) und der maritime Teil (mittlere Teilfigur) weisen sehr ähnliche Nord-Süd-Verläufe für KWBI_U und KWBI_φ auf (Anmerkung: Diese Ähnlichkeit ist auch bei den Teilsektoren 90°W–0°W und 50°W–30°E – hier nicht dargestellt – sichtbar). Anders sieht es für den kontinentalen Teil des Sektors (rechte Teilfigur) aus, was auch aus Abbildung 32 hervorgeht: Die Blockinghäufigkeit ist deutlich weniger vom Breitenkreis abhängig und die beiden Indikatoren geben auch Verläufe an, die sich in ihrer Form von denjenigen des maritimen Teils des Sektors unterscheiden.

Anmerkung zu den Abbildungen auf den Folgeseiten

Es besteht eine Konkordanz zwischen dem Index $KWBI_U$ und der Bezeichnung *ALES* in den Abbildungslegenden. Eine weitere Konkordanz besteht zwischen $KWBI_\phi$ und der Bezeichnung *KREI* in den Abbildungslegenden.

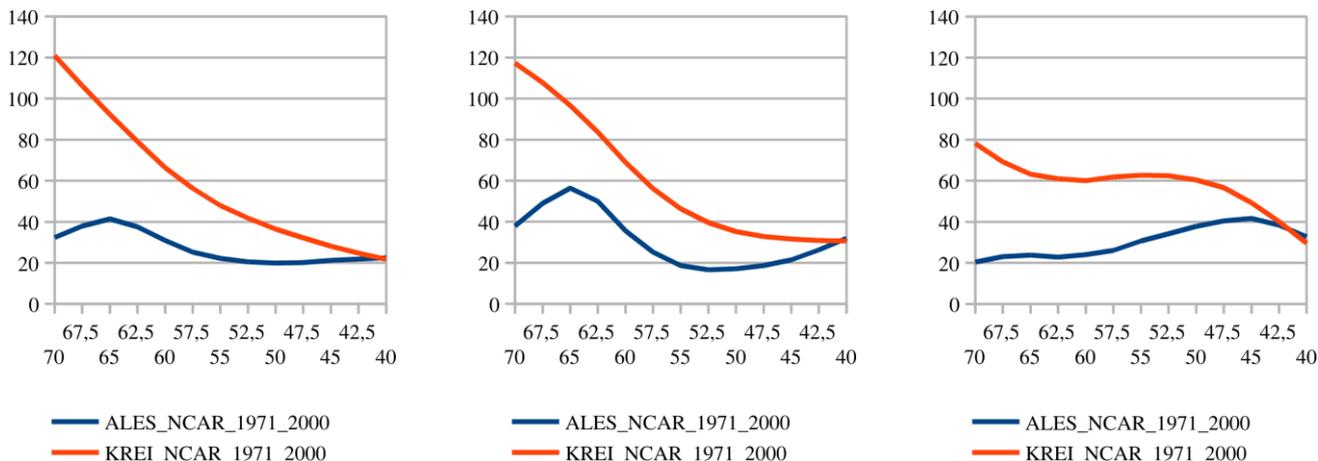


Abbildung 34: Nord-Südprofile der Blockinghäufigkeit, ermittelt mit den Blockingindizes $KWBI_U$ (blaue Kurven) und $KWBI_\phi$ (rote Kurven) für den Breitenkreisbereich 70°N ... 40°N. Links: Gesamter atlantisch-europäischer Sektor (90°W-30°E); mitte: europäner maritimer Teil des Sektors (50°W-0°W); rechts: kontinentaler Teil des Sektors (0°W-30°E). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum: 1971–2000, gesamtes Jahr

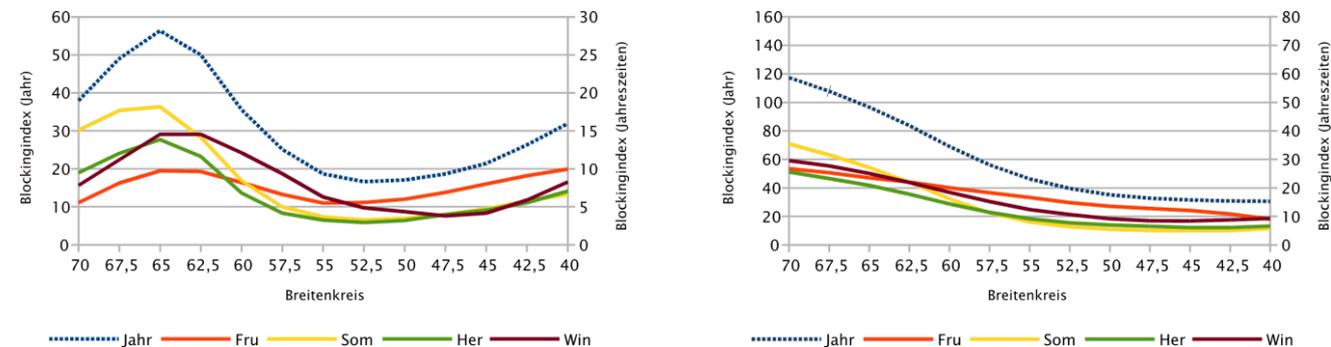


Abbildung 35: Nord-Südprofile der Blockinghäufigkeit im Jahr und den Jahreszeiten, ermittelt mit den Blockingindizes $KWBI_U$ (links) und $KWBI_\phi$ (rechts) für den Breitenkreisbereich 70°N ... 40°N. Auswahlregion: Europäner maritimer Teil des atlantisch-europäischen Sektors (50°W-0°W). Datenquelle: NCAR-Reanalysen. Bezugszeitraum: 1971–2000

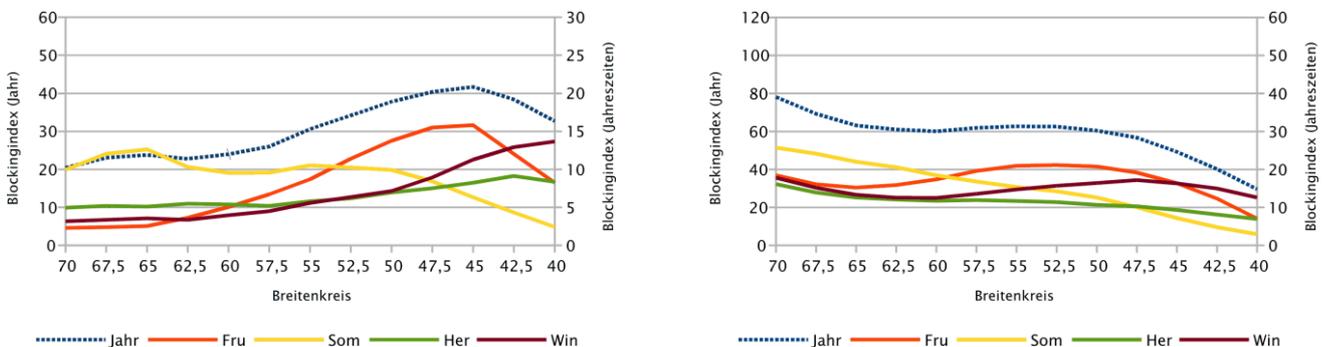


Abbildung 36: Wie Abbildung 35, jedoch für den kontinentalen Teil des Sektors (0°W-30°E)

Bezüglich des Jahresgangs der Indizes ist festzustellen (vgl. Abbildung 35 und Abbildung 36), dass in den hohen Breiten über dem *Atlantik* (Abbildung 35) relativ hohe Werte von $KWBI_U$ und $KWBI_\phi$ im Sommer (gelbe Kurven und Winter (schwarze Kurven) auftreten. In den mittleren Breiten besteht die Tendenz, dass im Winter (schwarze Kurven) und im Frühjahr (rote Kurven) etwas höhere Indizes identifiziert werden. Wie Abbildung 36 zeigt, ist das Nord-Süd-Profil von $KWBI_U$ und $KWBI_\phi$ über dem *kontinentalen Teil* des atlantisch-europäischen Sektors durchaus von anderer Gestalt: Tendenziell ist zwar auch Blocking im Sommer in den hohen Breiten und im Frühjahr in den mittleren Breiten besonders häufig, aber die Form des Profils ist durch einen nach Süden hin zunehmenden Anstieg ($KWBI_U$) bzw. relativ geringe Variabilität in Nord-Süd-Richtung ($KWBI_\phi$) charakterisiert. Dies weist darauf hin, dass es ein Blocking-bezogenes unterschiedliches maritimes und kontinentales Strömungsregime gibt.

8.2.3 Blocking-Trends im rezenten Klima?

Es gibt Hinweise, dass im Laufe des späten 20. Jahrhunderts die Häufigkeit von Blocking zugenommen haben könnte. Im Rahmen von KLIWETT erfolgte dazu eine Trenduntersuchung. Als Basismaterial wurden dazu die Blocking-Indizes des Breitenkreises 60°N (s. a. Abbildung 31) im Zeitraum 1971–2010 für den europahanen maritimen Teil (50°W-0°W) und den kontinentalen Teil (0°W-30°E) des atlantisch-europäischen Sektors analysiert.

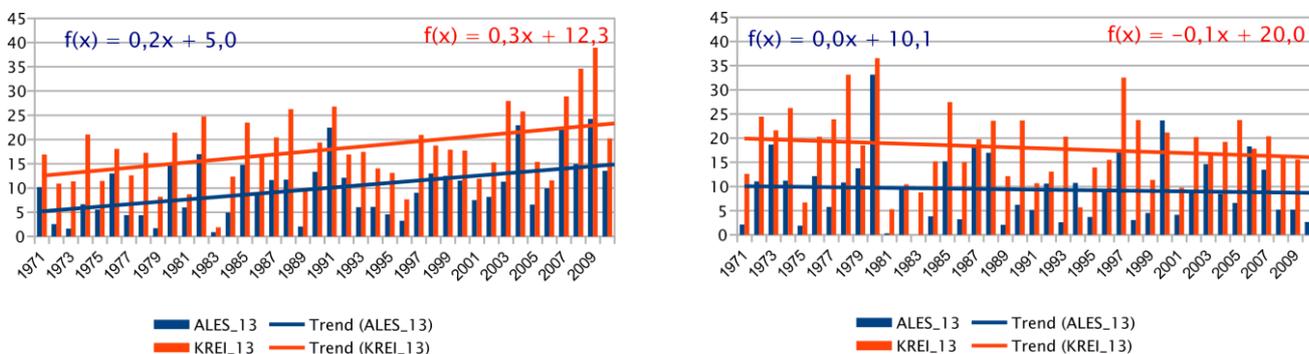


Abbildung 37: Entwicklung des Blockings im europahanen Teil (50°W-0°W, links) und im kontinentalen Teil (0°W-30°E, rechts) des atlantisch-europäischen Sektors in den Sommermonaten (JJA) der Jahre 1971-2010. Blau: Blockingindex $KWBI_U$. Rot: Blockingindex $KWBI_\phi$. Zusätzlich ist im oberen Teil jeder Grafik die Gleichung für den linearen Trend angegeben. Datenquelle: NCAR-Reanalysen

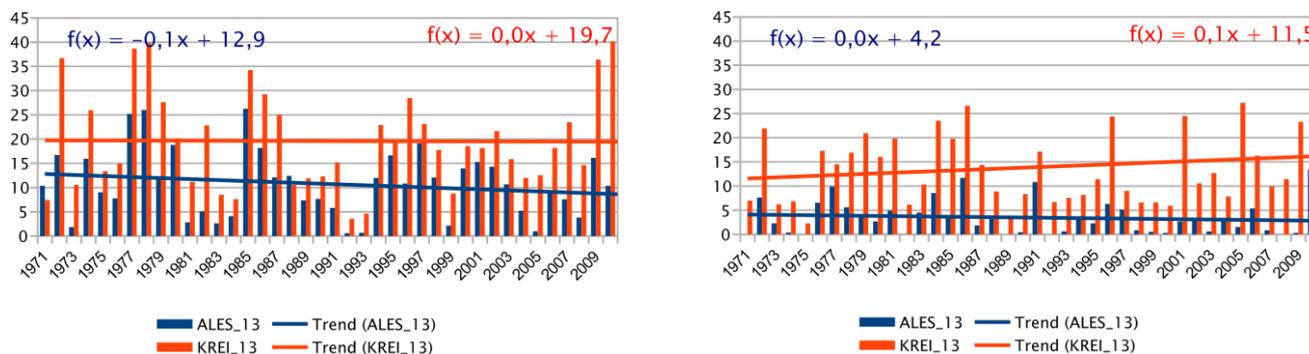


Abbildung 38: Wie Abbildung 37, jedoch für den Winter (DJF)

In der Tat zeigen sich schwach ausgeprägte Trendverhalten, die von den beiden Indizes $KWBI_U$ und $KWBI_\phi$ in der Regel ähnlich dargestellt werden (Abbildung 37 und Abbildung 38). Es finden sich zudem sowohl saisonale als auch geografische Unterschiede:

- Sommer: Relativ gut sichtbarer, durch beide Indizes belegter Trend im maritimen Teil und schwacher bis nicht nachweisbarer Trend über dem Kontinent
- Winter: Nur schwach ausgeprägter Abnahmetrend ($KWBI_U$), resp. nicht nachweisbarer Trend ($KWBI_\phi$) über dem maritimen Teil und faktisch nicht nachweisbarer Trend ($KWBI_U$) bzw. sehr schwacher Zunahmetrend ($KWBI_\phi$) über dem Kontinent

Anmerkung 1: Die Trendentwicklung ist abhängig von der gewählten Zahl der Jahre. Wenn – hier nicht dargestellt – die Untersuchung lediglich für die Jahre 1971–2000 durchgeführt wird, dann ergibt sich über dem maritimen Teil tendenziell ein Gleichbleiben und über dem Kontinent eine leichte Abnahme.

Anmerkung 2: Die Trendentwicklung ist abhängig vom gewählten Breitenkreis – die Untersuchung in diesem Abschnitt umfasste die Entwicklung in 60°N (mit 40°N als zweiten, in die Berechnung eingehenden Breitenkreis). Wird dies für 67,5°N durchgeführt, so ergeben sich keine Anstiegs- oder Abstiegsfaktoren der Trendgleichung von mehr als 0,1. Mögliche Trendentwicklungen im rezenten Klima werden also in diesem Breitenkreisbereich praktisch nicht gefunden.

Anmerkung 3: Die Untersuchungen dieses Abschnitts erfassen den Zeitraum bis 2010. Eine Vergleichsuntersuchung von Indizes für die NAO und Blocking (Abschnitt 8.2.6) zeigt, dass nach dem Jahr 2010 wieder relativ Blocking-schwache Jahre auftraten.

Anmerkung 4: Der $KWBI_U$ -Index zeigt im Winter über dem Kontinent für relativ viele Jahre so gut wie gar kein Blocking an.

8.2.4 Blocking in den 20C Klimamodell-Ergebnissen von ECHAM5

Die auf den Vorseiten dargestellten Resultate basieren auf Reanalysen, d. h. einer Repräsentierung des Klimas der letzten Dekaden. Um einen Eindruck von der Wiedergabe des Blockings durch ein *Klimamodell* zu bekommen, ist es zunächst erforderlich, die Identifikation mit den KLIWETT-Indizes in den so genannten 20C-Daten, also der Resimulation des Gegenwartsklimas durch das Modell durchzuführen. Die Erwartung ist, dass in den modellierten Daten wichtige Eigenschaften des tatsächlich aufgetretenen Klimas wiederzufinden sind.

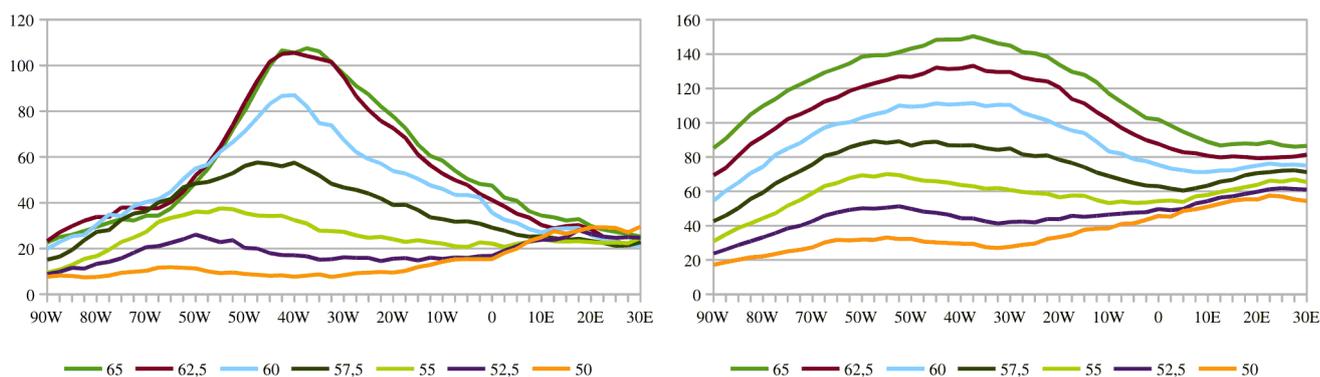


Abbildung 39: Blockingindizes $KWBI_U$ (links) und $KWBI_\phi$ (rechts) für den atlantisch-europäischen Sektor (90°W ... 30°E) im Zeitraum 1971–2000. Datenquelle: 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM Lauf 1. Ausgewählt wurden die Indizes für den Breitenkreisbereich 65°N bis 50°N

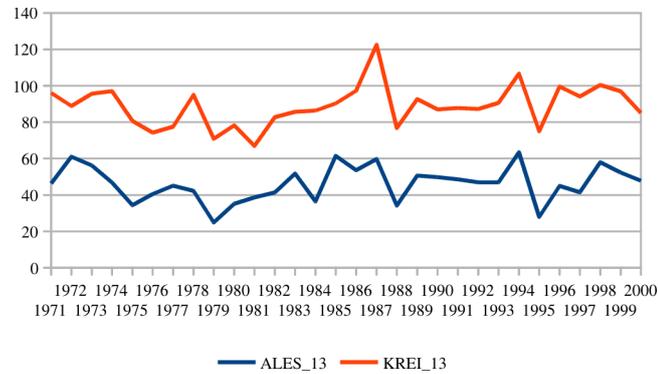


Abbildung 40: Jahresmittelwerte von KWBI_U (blaue Kurve) und KWBI_φ (rote Kurve) im Zeitraum 1971–2000. Datenquelle: 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM Lauf 1

Nach dem in Abschnitt 8.2.2 beschriebenen Verfahren wurden die Blockingindizes in den Wind- bzw. Geopotenzialfeldern der 20C-Daten von ECHAM5 MPI-OM Lauf 1 bestimmt. Die Ergebnisse für den atlantisch-europäischen Sektor finden sich in Abbildung 39. Der Vergleich mit den aus NCAR-Daten ermittelten Indizes (Abbildung 32) zeigt eine hohe Ähnlichkeit der Breitenkreis-spezifischen Verläufe der Blockingindizes. Sowohl die Spezifika der beiden Indizes als auch die Auffächerung über dem Atlantik und die relativ geringe Änderung in Nord-Süd-Richtung über dem Kontinent (östlich vom Greenwich-Meridian) sind Zeichen dafür, dass das GCM in der Lage ist, das Blockingverhalten der Atmosphäre im Gegenwarts-klima realistisch darzustellen. Lediglich die Wertenniveaus der Blockingindizes liegen in den 20C-Ergebnissen des Klimamodells etwas höher als es bei den NCAR-Reanalysen des Gegenwarts-klimas der Fall ist. Auch ist bei KWBI_φ eine leichte Auffächerung über dem Kontinent in den 20C-Ergebnissen zu erkennen, während bei den NCAR-Reanalysen nur minimale Änderungen gefunden wurden. Auch weisen, wie Abbildung 40 zeigt, beide Indizes über die Jahre eine hohe Ähnlichkeit auf.

Achtung: Die in Abbildung 40 in der x-Achse vermerkten Jahreszahlen beziehen sich nicht auf die *realen* Jahre 1971–2000, sondern geben wieder, welche Werte das ECHAM-Modell für die *Modelljahre* am Ende des 20. Jahrhunderts ermittelt. Eine Verifikation von Klimamodell-Ergebnissen auf der Ebene der Einzeljahre ist wegen der modell-internen dekadischen Variabilität nicht möglich.

Erst bei Aggregation auf mehrere Dekaden können wertebegozene Vergleiche zwischen Reanalysen und Resimulationen unternommen werden. Was aber aus Abbildung 40 deutlich wird, ist das sehr gute simultane Identifizieren von Blocking durch beide Indizes auch im Klimamodell. Die Korrelation beträgt zwischen den beiden in Abbildung 40 dargestellten Indizes beträgt über den 30-jährigen Zeitraum 0,72 und ist damit nur wenig geringer als bei den Reanalysedaten.

Der Frage, ob die klimatischen Verhältnisse bezüglich der Blockingindizes mit einem GCM adäquat wiedergegeben werden, kann mit der Information aus Abbildung 41 und Abbildung 42 nachgegangen werden.

Dort finden sich Darstellungen der jeweils über 30 Jahreszeiten für verschiedene Breitenkreiszonen gemittelten Unterschiede zwischen den Blockingindizes, die aus NCAR-Reanalysen bzw. 20C-Daten von ECHAM5 bestimmt wurden. Für den europahanen maritimen Teil des Sektors (Abbildung 41) zeigt sich bei beiden Blockingindizes KWBI_U und KWBI_φ in den hohen Breiten eine Abweichung von rund 6-12 Zähl-einheiten, wobei die mit 20C ermittelten Werte in diesem Breitkreisbereich größer als diejenigen des durch Reanalysen ermittelten Klimazustands sind. In den mittleren Breiten kehren sich diese Proportionen um und das Blockingver-

halten des GCMs unterschätzt dasjenige des Klimazustands. Allerdings sind die Unterschiede südlich von 55°N mit einer Größenordnung von rund ± 5 Zählheiten nur gering.

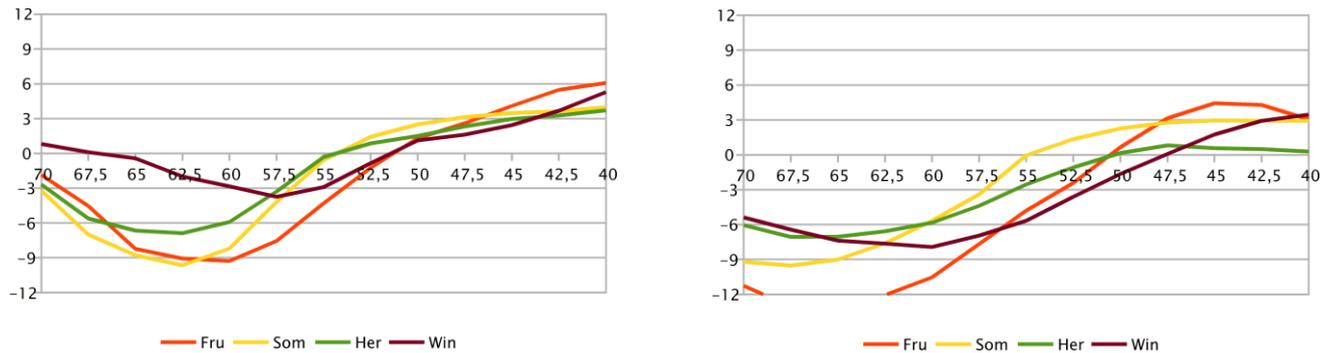


Abbildung 41: Nord-Süd-Profile der Differenz zwischen den klimatischen Verhältnissen (Reanalysen) und der Re-Simulation des 20. Jahrhunderts (20C-Daten von ECHAM5-MPI OM, Lauf 1) für verschiedene Jahreszeiten. Dargestellt sind die Verhältnisse im europahanen maritimen Teil (50°W-0°W) des atlantisch-europäischen Sektors. Links: $KWBI_U$ rechts: $KWBI_\phi$. Vergleichszeitraum: 1971-2000. Die Werte für die $KWBI_\phi$ -Differenzen in den Zonen bei 67,5°N und 65°N betragen jeweils rund 13.

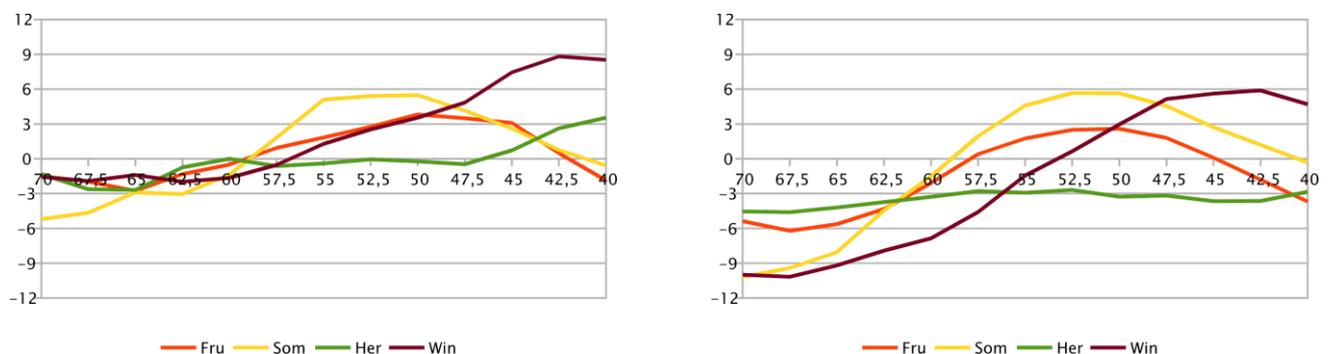


Abbildung 42: Wie Abbildung 41, jedoch für den kontinentalen Teil des Sektors (0°W-30°E)

Wie Abbildung 42 für den kontinentalen Teil des atlantisch-europäischen Sektors zeigt, unterscheidet sich dort bezüglich der Differenzen NCAR minus 20C das Nord-Süd-Profil vom maritimen Teil des Sektors: Abweichungen von z. T. 3-5 Zählheiten der GCM-Ergebnisse von den Reanalyse-Ergebnissen finden sich hier bei beiden Blockingindizes ($KWBI_U$ und $KWBI_\phi$) in einem Breitenkreisbereich zwischen 55°N und 45°N. Zudem ist $KWBI_\phi$ in den höheren Breiten bei 20C größer als bei den entsprechenden Reanalysen. Eine weitere Auffälligkeit zeigen die Strömungsverhältnisse im Herbst (grüne Kurven); zu dieser Jahreszeit ist die Blockinghäufigkeit insgesamt relativ gering (vgl. Abbildung 35 und Abbildung 36) und über dem kontinentalen Teil des Sektors (Abbildung 42) besteht zudem nahezu keine Variabilität in Nord-Süd-Richtung. Über dem maritimen Teil des Sektors (vgl. Abbildung 41) ist ein solches Verhalten nicht erkennbar.

8.2.5 Blocking in den Projektionsrechnungen von ECHAM5

Analog zu den Untersuchungen in Abschnitt 8.2.4 wurden die Blockingindizes in den Projektionsrechnungen von ECHAM5 MPI-OM Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario A1B bestimmt. Damit besteht die Möglichkeit, Änderungen der Blockinghäufigkeit zu verschiedenen Zeithorizonten (2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100) im Vergleich mit den Resimulationen (20C-Daten) für 1971–2000 zu bestimmen.

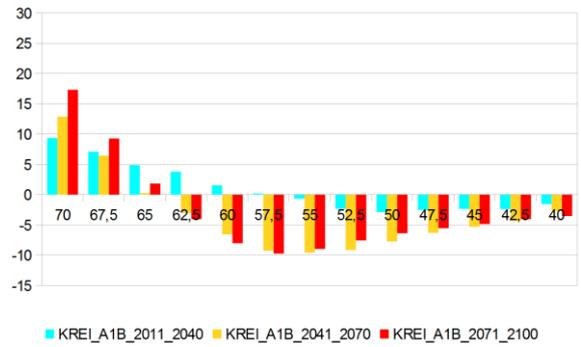
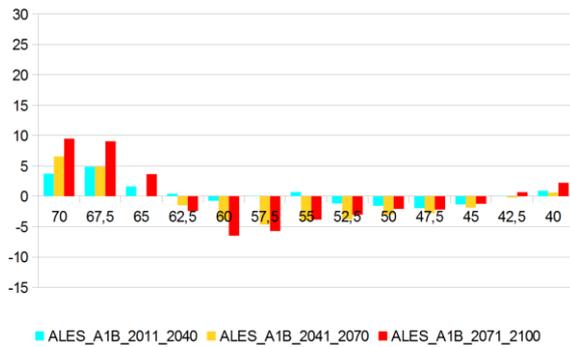


Abbildung 43: Änderungssignale der Blockinghäufigkeit im atlantisch-europäischen Sektor (90°W-30°E) im Vergleich zu den 20C-Resultaten der Periode 1971–2000 zu den Zeithorizonten 2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100 in verschiedenen Breitenkreislagen (70°N bis 40°N), identifiziert mit dem Blockingindex $KWBI_U$ (links) und dem Blockingindex $KWBI_\Phi$ (rechts). Benutztes GCM: ECHAM5 MPI-OM Lauf 1, angetrieben mit Szenario A1B.

Wie Abbildung 43 zeigt, ergibt sich aus den GCM-Projektionen mit ECHAM5 eine Nordverlagerung des Blockings im gesamten atlantisch-europäischen Sektor, erkennbar in einer Zunahme in den Breiten nördlich von 65°N und auch einer Abnahme in den Breiten etwa südlich von 60°N. Dies zeigt sich zudem sowohl beim windgebundenen Indikator $KWBI_U$ als auch beim geopotenzial-gebundenen Indikator $KWBI_\Phi$.

Bei den Untersuchungen der Reanalysen deutete sich an, dass das Blocking-Verhalten nicht im gesamten atlantisch-europäischen Sektor einheitlich ist (s. Abbildung 34). Die Änderungssignale des Blockings sind für den kontinentalen Teil des Sektors zwischen dem Greenwich-Meridian und 30°E in Abbildung 44 dargestellt.

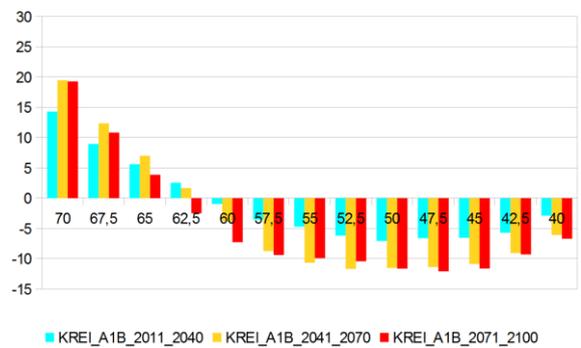
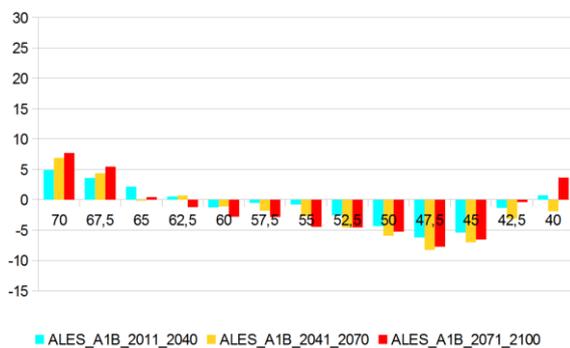


Abbildung 44: Wie Abbildung 43, jedoch für den kontinentalen Teil des atlantisch-europäischen Sektors (0°W-30°E).

Es zeigt sich, dass relativ starke Änderungen des Blocking-Verhaltens sowohl bezüglich der Zunahme im Norden als auch der Abnahme in den mittleren Breiten für den kontinentalen Teil des Sektors simuliert werden. Im windgebundenen Indikator $KWBI_U$ ist dies nicht ganz so deutlich zu erkennen wie beim geopotenzial-gebundenen Indikator $KWBI_\Phi$.

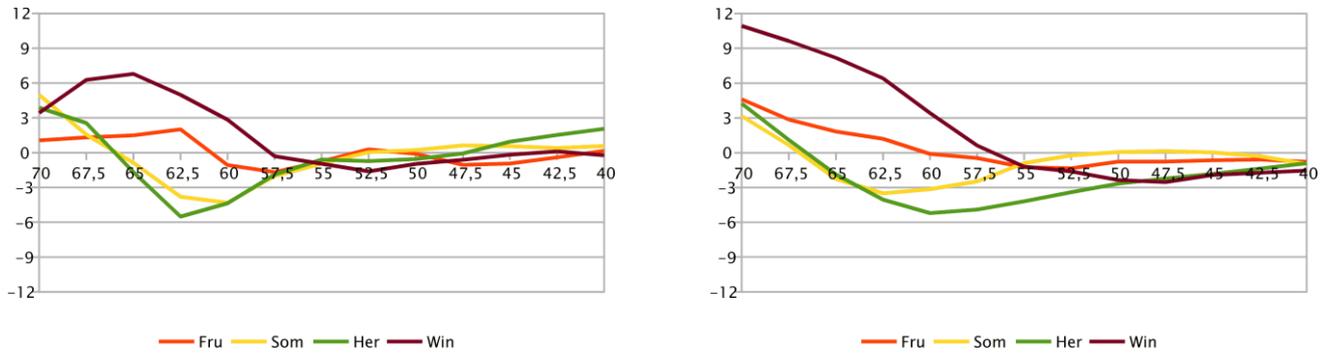


Abbildung 45: Nord-Süd-Profil der Blocking-Änderung von 1971–2000 (20C-Daten von ECHAM5) zum Zeithorizont 2071–2100 (ECHAM5, Szenario A1B) in den Jahreszeiten. Die Kurven geben die Verhältnisse im europahanen maritimen Teil (50°W-0°W) des atlantisch-europäischen Sektors wieder. Links: KWBI_U; rechts KWBI_φ

Das „Klimasignal des Blockings“ der Jahreszeiten bei Analyse von Projektionen mit ECHAM5 MPI-OM, Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario A1B ist in Abbildung 45 und Abbildung 46 für verschiedene Breitenkreiszonen dargestellt. Wie schon für das gesamte Jahr (Abbildung 43 und Abbildung 44) zeigt sich auch über dem maritimen Teil des atlantisch-europäischen Sektors (Abbildung 45) in den Jahreszeiten eine Neigung zu verstärktem Blockingänderungen in den höheren Breiten (insbesondere im Winter, schwarze Kurven), während in den mittleren Breiten z. T. relativ geringe Änderungen projiziert werden.

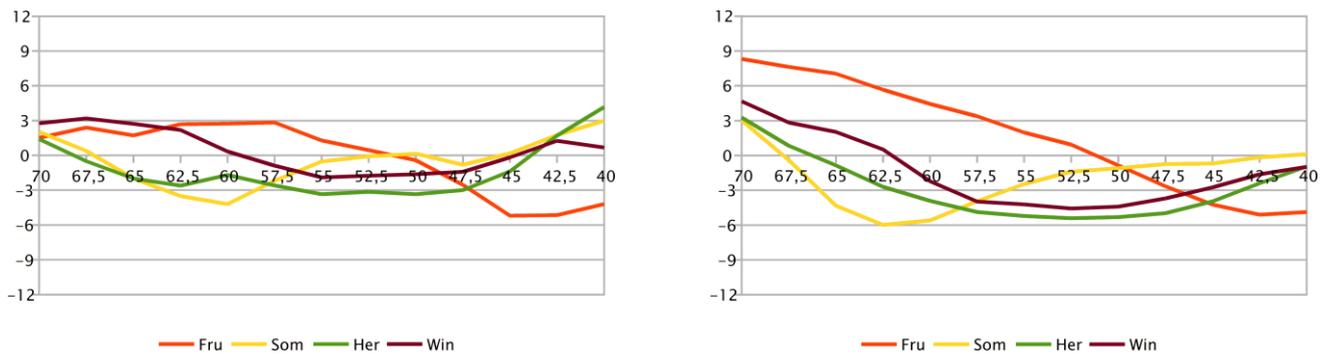
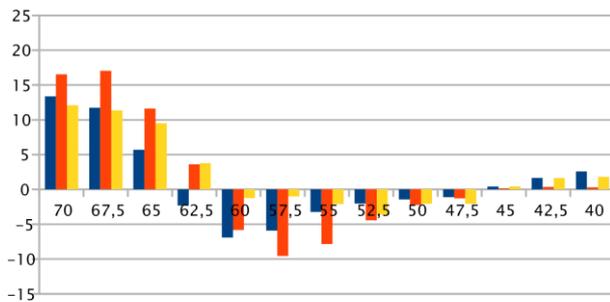


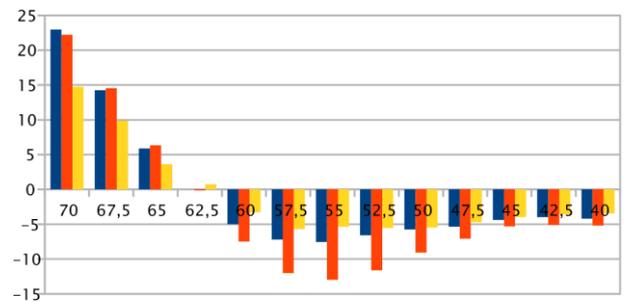
Abbildung 46: Wie Abbildung 45, jedoch für den kontinentalen Teil (0°W-30°E) des Sektors

Für den kontinentalen Teil des atlantisch-europäischen Sektors (Abbildung 46) ist festzustellen, dass mit KWBI_U relativ geringe Änderungen von rund ±3 Zählheiten für das gesamte Nord-Süd-Profil ermittelt werden. Bei KWBI_φ hingegen finden sich relativ starke, saisonal durchaus differenzierte Änderungen (insbesondere im Frühjahr, rote Kurve in der rechten Teilfigur von Abbildung 46) in den hohen Breiten und Änderungen im Bereich von (je nach Jahreszeit) 0 bis -5 Zählheiten in den mittleren Breiten.

Alle bisher gezeigten Projektionsergebnisse nutzten das Szenario A1B. Im Rahmen der Untersuchungen wurden aber auch die beiden Blockingindizes KWBI_U und KWBI_φ für Szenarioläufe von ECHAM5, angetrieben mit A2 und B1 ermittelt.

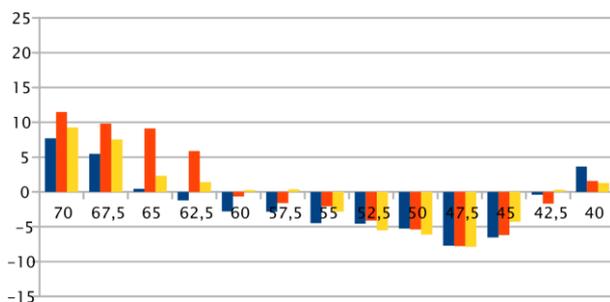


■ ALES_A1B_2071_2100 ■ ALES_A2_2071_2100 ■ ALES_B1_2071_2100

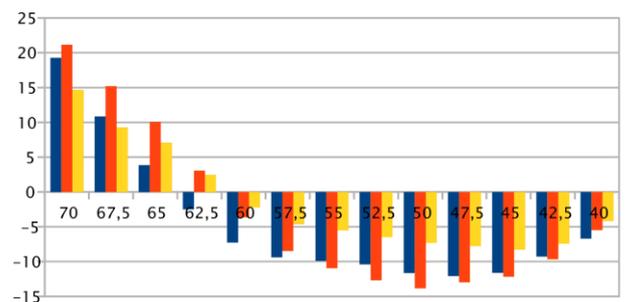


■ KREI_A1B_2071_2100 ■ KREI_A2_2071_2100 ■ KREI_B1_2071_2100

Abbildung 47: Nord-Süd-Profil der Blockingänderung von 1971–2000 (20C-Daten von ECHAM5) zum Zeithorizont 2071–2100 (ECHAM5) bei Betrachtung der Szenarios A1B (blaue Balken), A2 (rote Balken) und B1 (gelbe Balken) für das gesamte Jahr. Wiedergegeben sind die Verhältnisse im europahanen maritimen Teil (50°W-0°W) des atlantisch-europäischen Sektors. Links: KWBI_U; rechts KWBI_φ



■ ALES_A1B_2071_2100 ■ ALES_A2_2071_2100 ■ ALES_B1_2071_2100



■ KREI_A1B_2071_2100 ■ KREI_A2_2071_2100 ■ KREI_B1_2071_2100

Abbildung 48: Wie Abbildung 47, jedoch für den kontinentalen Teil (0°W-30°E) des Sektors

Aus den Darstellungen in Abbildung 47 und Abbildung 48, die die Verhältnisse für das Jahr wiedergeben, ist zu schließen, dass von den A2-Projektionen verbreitet stärkere Änderungen zum Zeithorizont 2071–2100 – sowohl Abnahmen als auch Zunahmen – als bei den A1B-Projektionen identifiziert werden. Deutlich geringere Tendenzen finden sich verbreitet in den B1-Projektionen, wiewohl es Breitenkreisebereiche gibt, in denen die Unterschiede zwischen den Szenario-Ergebnissen insgesamt relativ gering sind. Die beiden Blockingindizes KWBI_U und KWBI_φ zeichnen ein qualitativ ähnliches Bild von den zukünftigen Blockingverhältnissen mit Zunahme in den hohen Breiten und Abnahme bis geringer Veränderung in den mittleren Breiten.

8.2.6 Vergleich NAO-Index und KLIWETT-Blockingindizes

Wie in Abschnitt 8.1 beschrieben, haben sich im Laufe der Zeit zwei Bestimmungsmethoden für den NAO-Index durchgesetzt: (i) aus dem Luftdruck des Stationspaars Stykkisholmur und Ponta Delgada¹⁵ und (ii) aus dem Anteil der ersten Hauptkomponente einer Rotated Principal Component Analysis (RPCA) des nordhemisphärischen Bodendruck-Anomaliefelds. Von der Webseite www.cdg.ucar.edu/cas/hjurrell/indices.html können Zeitreihen beider Varianten des NAO-Index heruntergeladen werden. Einschätzungen und Analysen des Zusammenhangs zwischen NAO und dem Klima der Nordhemisphäre finden sich in (Hurrell J. W., 1995) und (Hurrell & Deser, 2009).

¹⁵ Ein Erläuterungstext findet sich z. B. unter www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/download.php?file=NAO.pdf.

Diese Reihen wurden mit denjenigen der Blocking-Indizes $KWBI_U$ und $KWBI_\phi$ gemeinsam in Abbildung 49 dargestellt. Dazu wurden die Daten wie folgt aufbereitet:

- NAO-Indizes: Es erfolgte eine Normierung auf dem Wege der Division jedes Jahreswerts durch die Standardabweichung der jährlichen Werte des Zeitraums 1971–2012.
- Blocking-Indizes: (i) Untersucht wurden die Werte des Breitenkreisbereichs mit 60°N als nördlicher Begrenzung (vgl. Abschnitt 8.2.3). (ii) Es erfolgte die Bestimmung der Anomalie, d. h. für jedes Jahr wurde der Mittelwert des betreffenden Index aus den Jahren 1971–2012 abgezogen. (iii) Wie bei den NAO-Indizes erfolgte eine Normierung auf dem Wege der Division jedes Jahreswerts durch die Standardabweichung der jährlichen Werte des Zeitraums 1971–2012. (iv) Weil Blocking-Indizes den inversen Sachverhalt zu den NAO-Indizes darstellen, wurde in Abbildung 49 eine zweite y-Achse eingerichtet, deren Werte in umgekehrter Richtung verlaufen.

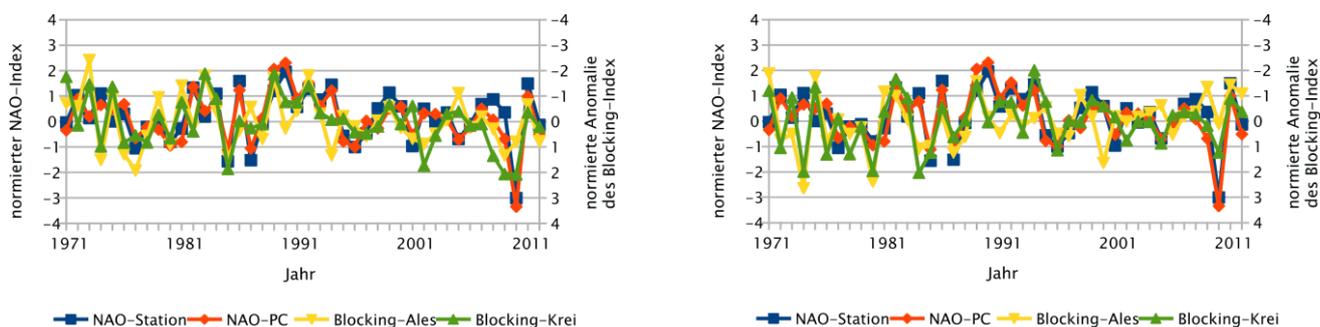


Abbildung 49: NAO-Indizes auf der Basis des Stationspaares Stykkishomur/Ponta Delgada (NAO-Station) und der Hauptkomponente einer RPCA-Analyse (NAO-PC), jeweils bezogen auf die linke y-Achse sowie Blocking-Indizes $KWBI_U$ (Blocking-Ales) und $KWBI_\phi$ (Blocking-Krei), jeweils bezogen auf die rechte y-Achse – mit einem zum NAO entgegengesetzten Werteverlauf. Linke Teilfigur: europäischer Teil des atlantisch-europäischen Sektors (50°W - 0°W). Rechte Teilfigur: kontinentaler Teil des Sektors (0°W - 30°E). Dargestellt sind die mit der jeweiligen Standardabweichung normierten Zeitreihen der Jahre 1971–2012

Den Kurvenverläufen der Abbildung 49 ist zunächst zu ersehen, dass Maxima und Minima der NAO-Indizes häufig auch von den Blocking-Indizes angezeigt werden (auf die Umkehrung der Werteachsen beim Blocking achten!). Exemplarische Fälle sind etwa die Jahre 1985 bis 1987 mit ihrem alternierenden (von schwacher zu starker NAO und zurückgehender Zirkulationsverlauf) oder die Jahre 2009 bis 2011 mit besonders niedrigen NAO-Indizes (und relativ hohen Blocking-Indizes) im Jahr 2010. Die Korrelationen zwischen den Zeitreihen der Indizes finden sich in Tabelle 65.

Tabelle 65: Korrelationsmatrix für die Zeitreihen des NAO-Index (Varianten auf Stationsbasis und auf Basis der Hauptkomponentenanalyse) und der Blockingindizes KWBI_U und KWBI_Φ für die Ausschnitte 50°W-0°W, 0°W-30°E und 50°W-30°E des atlantisch-europäischen Sektors

Zonaler Ausschnitt	Vergleich	NAO-PC	KWBI _U	KWBI _Φ
50°W-0°W	NAO-Station	0,92	-0,20	-0,36
	NAO-PC		-0,25	-0,48
	KWBI _U			0,78
0°W-30°E	NAO-Station	0,92	-0,17	-0,36
	NAO-PC		-0,11	-0,40
	KWBI _U			0,65
50°W-30°E	NAO-Station	0,92	-0,23	-0,41
	NAO-PC		-0,24	-0,51
	KWBI _U			0,77

Es wird deutlich, dass sowohl NAO-Station mit NAO-PC als auch KWBI_U mit KWBI_Φ recht hoch korreliert sind. Die negativen Korrelationen von NAO und Blocking (beide beschreiben zumindest im Ansatz komplementäre Zirkulationszustände) sind nicht ganz so stark, aber insbesondere der geopotenzialbezogene KWBI_Φ-Blockingindex zeigt relativ hohe Beträge der Korrelation zwischen -0,35 und -0,5.

Eine weitere Auffälligkeit findet sich gegen Ende der Zeitreihe. Wie auch in Abschnitt 8.2.3 beschrieben, ist nach 2001, insbesondere im Jahr 2010 mit seinem sehr geringen NAO-Index und hohen Werten der Blocking-Indizes (wegen der gleichsinnigen Darstellung der Indizes in Abbildung 49 umgekehrt wiedergegeben), eine gegenüber den Vorjahren etwas abgeschwächte Zonalzirkulation erkennbar. Darüber hinaus ist aber auch ein starker Anstieg von 2010 zu den NAO-Indizes des Jahres 2011 erkennbar. Es wäre verfrüht, hier eine sich abzeichnende Änderung der Zirkulation herauslesen zu wollen, aber zumindest ist eine starke, kurzperiodische Variabilität der Strömung in den mittleren Breiten sichtbar, wie sie im Analysezeitraum vergleichbar nur zur Mitte der 1980er-Jahre auftrat.

Außerdem ist auffällig, dass die Indizes in dieser Betrachtungsform nicht so deutliche Unterschiede zwischen den Strömungsregimes über dem Ozean und den Kontinenten anzeigen. Das liegt zum Teil auch daran, dass jährliche und nicht saisonale Daten verwendet wurden. Wie die Abschnitte 8.2.3 bis 8.2.5 zeigen, sind, insbesondere bei saisonaler Betrachtungsweise, relativ deutliche Unterschiede zwischen den Regimes in der Gegenwart zu sehen. Auch bei der zukünftigen Entwicklung von Blocking in einem gewandelten Klima zeichnen sich weitere Unterschiede in den einzelnen Regimes ab.

8.3 URO-Strings: Identifikation von zonalen Starkgradientbändern

8.3.1 Kontext

Während im Abschnitt 8.2 die Strömungskonfiguration „Blocking“ im Mittelpunkt stand, wird mit dem zweiten im Rahmen des Arbeitspunktes 6 von KLIWETT II entwickelten Ansatz das Phänomen aus einem anderem Blickwinkel untersucht: Es handelt sich um Fernwirkungen, manifestiert durch starke Gradienten in Mitteleuropa, wie sie zum Beispiel dann auftreten, wenn die Polarfront über dem atlantisch-europäischen Sektor liegt. Es wird aber auch der Zustand zu beschreiben angestrebt, dass die Polarfront in großer Entfernung zu Mitteleuropa liegt und damit in Folge der *Polarfront-Ferne* ein Potenzial für Blocking in Mitteleuropa existiert. Das Verfahren erzeugt Ost-West-Verläufe (die auch mäandrieren können) von Bändern, in denen diese Drängung besonders groß ist. Es hat den Namen EURO-Strings.

Bereits in einer früheren Studie, die Teil des BLOCKWETT-Vorhabens war (Spekat, Enke, & Kreienkamp, 2008), erfolgte die Analyse von *Zugbahnen barometrischer Minima*. Dort wurden u. a. charakteristische regionale Witterungsabläufe in Sachsen in der Nähe von bandförmigen Zirkulationsstrukturen betrachtet. Mit dem Konzept der EURO-Strings wird dieser Ansatz aufgegriffen und durch eine konzeptionelle Neuentwicklung vertieft.

Zum Ersten wird mit den EURO-Strings eine objektivierte phänomenologische Klassifikation von bandförmigen Zirkulationsstrukturen unter Beachtung der Relevanz für das Klima in Sachsen durchgeführt. Zum Zweiten kann über das zeitliche Verhalten von regionalen meteorologischen Elementen (Temperatur und Niederschlag) der Frage nachgegangen werden, ob in den Strings ein „Langzeitgedächtnis“ der Atmosphäre zu finden ist.

8.3.2 Verfahren

Die Methodik von EURO-Strings umfasst mehrere Schritte:

- Auswahl einer Stationsuntermenge im Freistaat Sachsen durch Anwendung einer Strategie, die auch bei KlaMuKo verwendet wurde und die auf objektive Weise Untermengen des Stationskollektivs bildet, in denen sich beispielsweise besonders hohe Temperaturwerte befinden – s. a. Abschnitt 2.4.
- Im zweiten Schritt werden atmosphärische Felder und keine Bodendaten zur Berechnung benutzt. Bestimmung der Nord-Süd-Differenzen für benachbarte Punkte auf einem Längengrad, es wird also z. B. am Gitterpunkt 50°W 60°N die Temperaturdifferenz in 850 hPa zwischen 50°W 60°N und 50°W 57,5°N berechnet. Diese Berechnung erfolgt fortschreitend von 70°N bis 20°N und sukzessive für alle Längengrade des atlantisch-europäischen Sektors. Es entsteht folglich für jeden Längengrad ein Nord-Süd-Profil der Differenzen zwischen benachbarten Gitterpunkten.
- Bestimmung sowohl von Lage als auch Betrag der höchsten im vorigen Schritt ermittelten Differenzen – für jeden Längengrad. Es kann also beispielsweise sein, dass auf dem Längengrad 50°W die Temperaturdifferenz in 850 hPa an der Koordinate 40°N am stärksten ist. Es kann auch sein, dass auf dem Längengrad 20°E die Geopotenzialdifferenz an der Koordinate 70°N am stärksten ist.

- Für jeden Tag existiert somit ein mehr oder weniger mäandrierendes Band (String), das alle Punkte, an denen beispielsweise die Temperaturdifferenz in 850 hPa besonders groß war, miteinander verbindet¹⁶. Für alle Tage erfolgt eine Clusterung der Strings mit dem k-means-Verfahren:
 - Sie werden hinsichtlich ihrer Konfiguration/Form in eine Ausgangspartition aus N möglichst unähnlichen Fällen aufgeteilt.
 - Die verbleibenden Fälle werden anschließend den möglichst ähnlichen Mitgliedern der Ausgangspartition zugeordnet.
 - Durch Austausch einiger Werte zwischen den sich formenden N Klassen wird eine weiter optimierte Klasseneinteilung geschaffen.
 - Im Ergebnis existieren N so genannte EURO-Strings, die die Formenvielfalt der täglichen Strings klassifizieren.
- Mit den Folgeschritten wird ein Bezug der aus den großräumigen Feldern von Geopotenzial, Temperatur, etc. gefundenen EURO-Strings zu den in Sachsen gemessenen Klimadaten hergestellt. Es geht darum herauszuarbeiten, welche der EURO-Strings mit wenig/viel Niederschlag oder hoher/niedriger Mitteltemperatur in Verbindung stehen. Dazu werden die Mittelwerte der Zielgröße (also z. B. Temperatur oder Niederschlag an den im ersten Verfahrensschritt identifizierten Stationen) für jeden EURO-String gebildet.
- Das Clusterverfahren für die Strings wird mit verschiedenen Feldern (Geopotenzial, Temperatur, Feuchte, Advektion etc.) durchgeführt, mit der Aufgabe, eine möglichst große Aufspreizung des Wertebereichs der Zielgröße zwischen den N Klassen zu erreichen. So kann es z. B. sein, dass die Klassenmittel des Niederschlags zwischen den N EURO-String-Klassen besonders unterschiedlich sind, wenn das Vorticityfeld in 700 hPa für die Bestimmung der EURO-Strings verwendet wird¹⁷.
- Bei der Bestimmung desjenigen Feldes, das die bestmögliche Aufspreizung ermöglicht, wird außerdem eine Gewichtung eingeführt. Diese stammt aus der Information, *wo* die Drängung besonders stark ist (*Lage*) und auch der Informationen, *welchen Betrag* die Drängung an dieser Position hatte (*Stärke*). Der Faktor Gewicht bestimmt sich aus $Gewicht = Stärke - Lage$ und der Zusatzbedingung $Stärke + Lage = 1$. Es kann also sein, dass bei der Suche nach der zur Aufspreizung der lokalen Klimagröße optimalen großräumigen Größe dieser Fall eintritt: Die extrahierte Feldinformation ist hauptsächlich bezüglich ihrer Stärke und weniger bezüglich ihrer Lage zu verwenden.
- Das EURO-Strings-Verfahren wird zusätzlich mit der Vorgabe, dass N = 2 ... 10 Klassen zu bilden sind, durchgeführt.
- Außerdem erfolgen Berechnungen der EURO-Strings für das Jahr und die einzelnen Jahreszeiten.

¹⁶ Dies ist nur in erster Näherung korrekt, denn es kann sein, dass entlang eines Meridians mehrere Drängungsbereiche existieren – das Verfahren identifiziert immer den stärksten Wert, d. h. es können Sprünge im Ost-West-Verlauf auftreten, wenn von Ost nach West fortschreitend die Drängung in einem anderen Bereich stärker wird.

¹⁷ Es ist zu beachten, dass dieses Vorgehen eine Abwandlung der Screenings-Strategie, die in anderen APs von KLIWETT verwendet wird, bedeutet. Dort wird in der Regel ein mehrstufiges Screening eingesetzt, bei dem in der ersten Stufe die Haupteinflussgröße (erster Prediktand) identifiziert wird; in der zweiten Stufe ist das Ziel, einen weiteren Prediktanden zu finden, der in Kombination mit dem ersten eine Verbesserung der Beschreibungsgüte erbringt. Dieses Vorgehen wird bis zur vierten Stufe praktiziert – eine Festlegung auf die maximale Zahl von vier Prediktanden erfolgt aus Gründen der statistischen Stabilität. Für das Screening bei den EURO-Strings wird hingegen nur die **erste Stufe** verwendet, also **ein** Prediktand gesucht.

- Des Weiteren kann optional eine zweite Stufe des Verfahrens betrieben werden. Bei dieser wird für jede der EURO-Strings-Klassen eine weitere Aufspaltung in mehrere Klassen durchgeführt, was bisweilen zum Herausarbeiten von besonders markanten Zuständen führt.

In den folgenden Abschnitten werden Teilaspekte von EURO-Strings beschrieben, die zum Verständnis des Hintergrunds dieses Konzepts beitragen.

Multiple Drängungszonen

Die Bestimmung der EURO-Strings sucht, von West nach Ost schreitend, entlang eines jeweiligen Meridians nach dem stärksten Gradienten (der stärksten meridionalen Änderung) einer Feldgröße. In der Realität treten bisweilen zwei oder mehr Drängungszonen entlang eines Meridians auf. Weil es vorkommt, dass im Laufe des West-Ost-Fortschreitens eine sekundäre Drängungszone sukzessive zur stärksten wird, sind die Strings nicht immer durch ein ununterbrochenes, von West nach Ost verlaufendes Band repräsentiert. In einem solchen Übergangsfall kann ein String an einem Meridian unterbrochen sein und ab dieser Position meridional versetzt weiter verlaufen.

Andauerverhalten

Ein weiterer Aspekt, dem im Zuge der Untersuchung nachgegangen wird, ist das Andauerverhalten. Insbesondere im Kontext von Blocking sind Konstellationen relevant, die eine relativ hohe Persistenz besitzen. Bei den EURO-Strings gibt es daher die Option, als eine Art Tiefpassfilterung die Bestimmung der Gradienten aus einem Mittel über x Tage durchzuführen, beispielsweise aus einem 5-tägigen Intervall (Tag $M \pm 2$ Tage). Damit soll eine Fokussierung auf relativ dauerhafte Konstellationen erfolgen. In einem Diagnoseprozess, der zeitliche Abläufe untersucht, wird dann das String-spezifische Verhalten der bodennahen atmosphärischen Größe (z. B. der regionalen Mitteltemperatur in Sachsen) für die nach einem Tag M folgenden 2 Monate untersucht. Prinzipiell ist dabei zu erwarten, dass die bodennahe Größe asymptotisch gegen einen Mittelwert konvergiert – diese Konvergenz kann jedoch String-spezifisch unterschiedlich schnell vor sich gehen und es besteht zudem die Vermutung, dass für einige Strings im langzeitlichen Verhalten erhöhte Wertenniveaus erreicht werden.

Wahl der potenziellen Prediktoren

Ebenfalls nicht trivial ist die Wahl der Zusammensetzung des Pools von potenziellen Prediktoren. Wie in Fußnote 17 geschildert, wird das Screening der EURO-Strings Stufe 1 auf *einen* Prediktor beschränkt, der aus einem Pool mit einer Vielzahl von potenziellen Prediktoren selektiert wird. Umso wichtiger ist, dass die analysierten Prediktoren (i) das Potenzial zur Gradientenbildung mit einer möglichst kleinen Zahl von Drängungszonen besitzen; (ii) eine hohe Relevanz für die regionale Klimagröße (z. B. Mitteltemperatur oder Niederschlag in Sachsen) besitzen; (iii) physikalisch und synoptisch nachvollziehbare Zusammenhänge zwischen dem großräumigen Verhalten der Atmosphäre und dem regionalen Klima darstellen.

Wahl eines Stationskollektivs

Die Zielgröße für die Optimierung der EURO-Strings ist das Gebietsmittel einer meteorologischen Größe, z. B. der Temperatur im Freistaat Sachsen. Nun stehen, wie schon in Abschnitt 2.1.1 erwähnt, Messungen an 12 Klimastationen und über 200 Niederschlagsstationen zur Verfügung. Im Zusammenhang mit den Analysen der Extremindikatoren in Abschnitt 6.2 wurde ein Verfahren (beschrieben in Abschnitt 2.4) eingesetzt, das, objektiven Kriterien folgend, Untermengen des Stationskollektivs bildet, in dem sich beispielsweise die Stationen mit relativ hohen oder relativ niedrigen Mittelwerten befinden – wegen der Höhenabhängigkeit von Temperatur und Niederschlag ist dies in erster Näherung zudem eine objektive Selektion von Stationen, die die Charakteristika bestimmter Höhenlagen besitzen. Es hat sich für die Analyse mit EURO-Strings als dienlich erwiesen, für die Bestimmung der regionalen Zielgröße analog vorzugehen und aus den Klimastationen zwei

Gruppen bzw. aus den Niederschlagsstationen drei Gruppen zu bilden und davon jeweils die oberste bzw. unterste Gruppe als Zielgröße zu nutzen.

Art der Zielgröße

Für Untersuchungen bezüglich der klimatischen mittleren Verhältnisse ist es sinnvoll, als Zielgröße das (ggf. durch die im vorigen Abschnitt beschriebene Stationsselektion modifizierte) Mittel, beispielsweise der Temperatur oder des Niederschlags in Sachsen zu analysieren. So können Strings gefunden werden, die im Zusammenhang mit trockenen/feuchten oder warmen/kalten Witterungsabschnitten in Sachsen stehen. Einblicke in die Verbindung zwischen großräumigem Verfahren und Extremen können durch eine schwellwertbasierte Binarisierung der Zielgröße gewonnen werden. Zum Beispiel besteht die Möglichkeit, das Auftreten von Tagen mit relativ hohen Niederschlagssummen (Überschreiten einer Schwelle von 10 mm) zu analysieren und Strings zu finden, die mit diesen Extremwerten in Zusammenhang stehen.

8.3.3 Ergebnisse

Wie sehen die EURO-Strings für verschiedene meteorologische Elemente aus? Zunächst seien diese anhand der Maximumtemperatur der Sommermonate (JJA) in Sachsen illustriert (s. Abbildung 50).

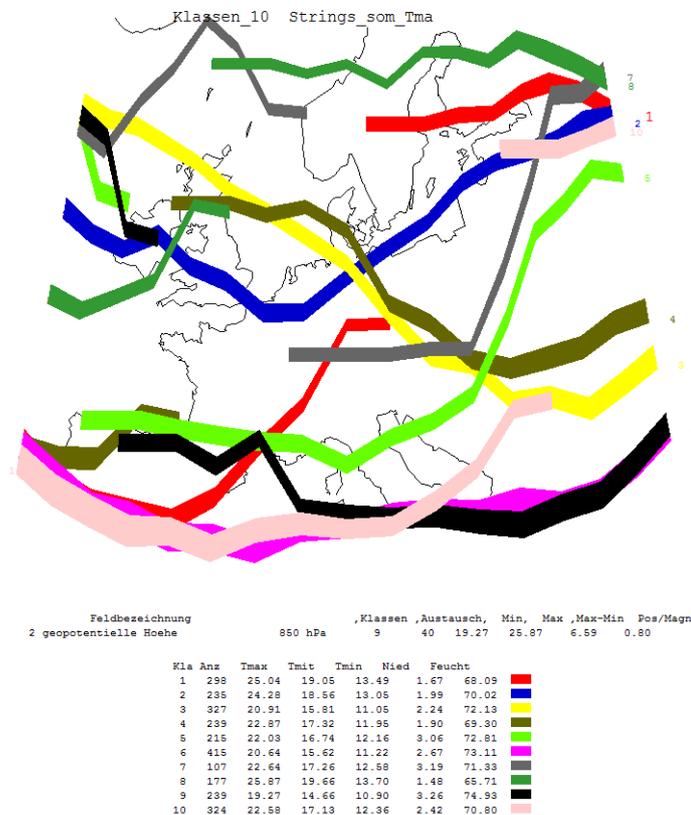


Abbildung 50: EURO-Strings für die Maximumtemperatur der Sommermonate (JJA) in Sachsen. Datenbasis: NCAR-Reanalysen der Jahre 1971–2000. Die Wertetabelle unter der Karte zeigt die Charakteristika der 10 Klassen.

Folgende Randbedingungen und Resultate gehören zur Abbildung 50:

- Es wird gefordert, dass 10 EURO-Strings gebildet werden.
- Das Screening erstreckt sich über 22 potenzielle Prediktoren (NCAR-Reanalysefelder).

- Geopotenzial 1.000, 850, 700 und 500 hPa
 - Temperatur in 850 und 700 hPa
 - Relative Feuchte in 850 und 700 hPa
 - Horizontale Differenzen in Nord-Süd-Richtung in 850, 700 und 500 hPa
 - Vorticity in 1.000, 850, 700 und 500 hPa
 - Relative Topografien 1.000/850, 1.000/700 und 1.000/500 hPa
 - Advektion der Temperatur in 850 und 700 hPa
 - Advektion der Feuchte in 850 und 700 hPa
- Die regionale Bezugsgröße ist die Mitteltemperatur an einer Selektion aus den Klimastationen in Sachsen – die Selektion erfolgte mit dem objektiven, in Abschnitt 2.4 beschriebenen Verfahren und es wurden 9 Stationen des Tieflands und des Erzgebirgsvorlands ausgewählt, die für relativ hohe Maximumtemperaturwerte stehen.
- Die regionale Bezugsgröße wird im Sommer mit dem Prediktor *Geopotenzial in 850 hPa* (GP_{850}) am besten beschrieben. Kriterium für diese Einschätzung ist, welche Unterschiede in den Klassenmittelwerten (s. Wertetabelle im unteren Teil von Abbildung 50) durch die Verwendung eines Prediktors entstehen – bei GP_{850} ist dies der Unterschied zwischen dem Mittel der kältesten Klasse 9 (rund 19,3 °C) und der wärmsten Klasse 8 (rund 25,9 °C). Die Aufspreizung beträgt also rund 6,6 °C. Andere Prediktoren führen zu ähnlichen (z. B. 6,3 °C bei $ReTop_{1000/700}$) oder auch deutlich niedrigeren (z. B. 2,2 °C bei $Advekt_{850}$) Aufspreizungen.
- Die erfolgreichste Beschreibung der regionalen Bezugsgröße durch die EURO-Strings erfolgt zudem, wenn die Gewichtung von Position und Stärke des gefundenen Maximums in jedem der 17 Längengrade sich wie 0,8 : 0,2 verhält, also überwiegend die Position verwendet wird – in anderen Jahreszeiten ist dies durchaus unterschiedlich.

Zu sehen sind in Abbildung 50 zehn von West nach Ost verlaufende, unterschiedlich breite Bänder. Die Position an jeder der 17 zonalen Stützstellen gibt an, wo (in Nord-Süd-Richtung) die stärkste Drängung der Isolinien (der höchste Gradient) im Prediktorenfeld – im Beispiel das Feld der relativen Feuchte in 700 hPa – angetroffen wird. Die jeweilige Breite des Bandes gibt an, wie stark der Gradient dort ist (schmales Band: geringer Betrag, breites Band: hoher Betrag). Wenn ein Band unterbrochen ist wie z. B. das schwarze Band der Klasse 9, das über Irland zu enden scheint und sich über Nordspanien fortsetzt, so ist dies, wie auf S. 127 beschrieben, ein Hinweis darauf, dass es mehr als eine Drängungszone gibt, und östlich einer Koordinate die stärkere Drängung in einer anderen Region anzutreffen ist. Das Bild ist auch synoptisch interpretierbar, wenn vorausgesetzt wird, dass die Drängung des Geopotenzials ein Indikator für die Lage der Polarfront ist. In Sachsen werden z. B. relativ hohe Temperaturwerte angetroffen, wenn die Drängung in der Mitte oder im Norden Europas verläuft, die Region also auf der „warmen Seite“ der Polarfront liegt – Beispiele: EURO-Strings der Klassen 1, 2 oder 8. Verläuft diese Drängung tendenziell im Süden Europas, so befindet sich Mitteleuropa auf der „kalten Seite“ der Polarfront, wie z. B. die EURO-Strings der Klassen 5, 9 oder 10 anzeigen. Auch ein von Nordwest nach Südost verlaufender EURO-String, wie im Fall der Klasse 3 kann mit relativ niedriger Temperatur assoziiert werden, denn er steht für einen Witterungsablauf mit einem von den Britischen Inseln ostwärts wandernden Tief, in Verbindung mit Wolken, relativ hoher Feuchte und relativ hohem Niederschlag.

Ein weiteres illustratives Beispiel findet sich in Abbildung 51 für den Niederschlag im Winter (DJF). Hier wurde wie im Beispiel der sommerlichen Maximumtemperatur (vgl. Abbildung 50) die Erzeugung von zehn Strings

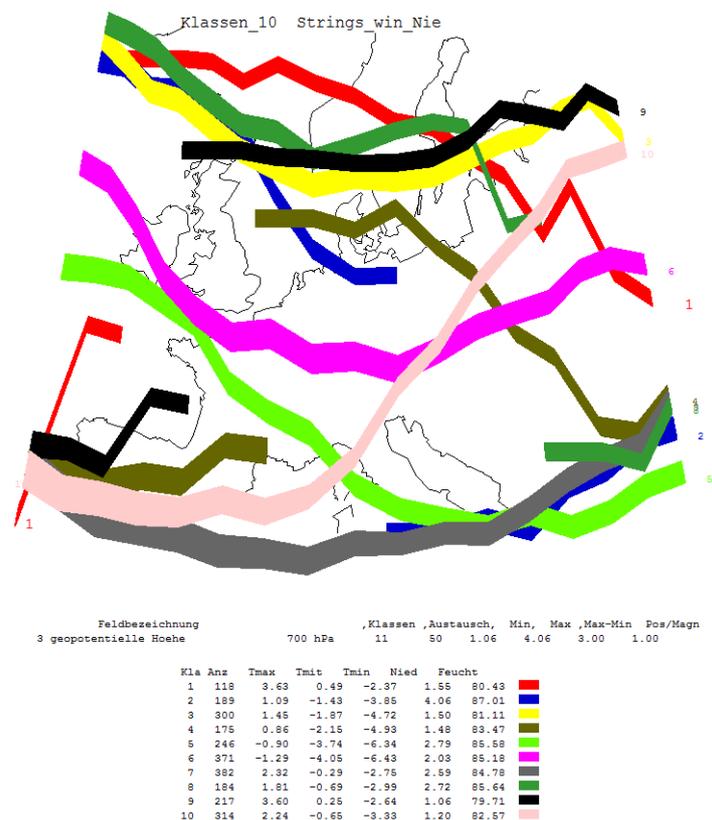


Abbildung 51: EURO-Strings für den Niederschlag im Winter

gefordert und das Screening erfolgte über dieselben 23 NCAR-Feldgrößen wie bei TX. Weitere Resultate der Niederschlagsuntersuchung:

- Selektion der Stationen: Das Kollektiv der rund 200 Stationen wurde bezüglich des Niederschlags mit dem objektiven Verfahren (beschrieben in Abschnitt 2.4) in drei Größenklassen aufgeteilt und die Analyse erfolgte mit den rund 60 Stationen, die vom Clusterverfahren dem „obersten Wertedrittel“ zugeordnet wurden.
- Der Winterniederschlag des oben vorgestellten Teilkollektivs der Stationen wird durch den Prediktor *Geopotenzial in 700 hPa* (GP_{700}) mit den Unterschieden in den Klassenmitteln von rund 3 mm erzielt werden. Andere Prediktoren führen zu ähnlichen (z. B. 2,7 mm bei $Vorticity_{850}$) oder auch deutlich niedrigeren (z. B. 1,5 mm bei $ReTop_{1000/500}$) Aufspreizungen.
- Die erfolgreichste Beschreibung der regionalen Bezugsgröße durch die EURO-Strings erfolgt zudem, wenn die Gewichtung von Position und Stärke des gefundenen Maximums in jedem der 17 Längengrade sich wie 1 : 0 verhält, also ausschließlich die Position verwendet wird – in anderen Jahreszeiten ist dies durchaus unterschiedlich.

Wenn eine Drängung des Geopotenzials – wie bei der Interpretation der temperaturbezogenen EURO-Strings – als Indikator für die Nähe der Polarfront interpretiert wird, so lässt sich synoptisch aus den EURO-Strings analog ein Zusammenhang mit den Niederschlagsverhältnissen schließen. Strings, die entweder quer über Mitteleuropa verlaufen (Nr. 6) oder auf eine Anströmung mit West- oder Nordkomponente hinweisen (Nr. 2 oder 5), stehen mit relativ hohem Niederschlag in Sachsen in Verbindung. Verlaufen die Strings hingegen in weiter Entfernung von Mitteleuropa oder legen eine Anströmung von Südwest nahe (Nr. 1, 3, 9 oder 10), dann stehen sie mit einem trockenen Witterungscharakter in der Untersuchungsregion in Verbindung.

In Übersichtsform wird in Tabelle 66 dargestellt, welche Prediktoren besonders förderlich für die Aufspreizung der Klassenmittelwerte verschiedener meteorologischer Elemente in den einzelnen Jahreszeiten in der Region Sachsen sind. Dort ist erkennbar, dass von verwendeten 22 potenziellen Prediktoren (s. Auflistung auf S. 128) für den Niederschlag das Geopotenzial in 1.000 bzw. 700 hPa relevant ist – zudem werden in der Zusammenschau Relationen von Lage und Betrag des Gradienten bevorzugt, die zugunsten des Betrages wirken.

Tabelle 66: Übersicht der Prediktoren, die für die Beschreibung der in Sachsen bestimmten meteorologischen Elemente in den einzelnen Jahreszeiten die größte Relevanz besitzen. Die Spalte „Position/Magnitude“ gibt an, in welchem Verhältnis die Lage und die Stärke zur Beschreibung beitragen und die Spalte „Max-Min“ enthält die Differenz zwischen den jeweils höchsten und den niedrigsten Klassenmitteln der meteorologischen Elemente.

Meteorologisches Element	Jahreszeit	Prediktor	Position/Magnitude	Max-Min
Niederschlag/HiNied	Frühjahr	Geopotenzial 1000 hPa	0,3:0,7	2,2 mm
	Sommer	Geopotenzial 1000 hPa	0,1:0,9	2,8 mm
	Herbst	Geopotenzial 700 hPa	0,6:0,4	2,8 mm
	Winter	Geopotenzial 700 hPa	0,0:1,0	3,0 mm
Maximumtemperatur/HiMax	Frühjahr	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	15,4°C
	Sommer	Geopotenzial 850 hPa	0,2:0,8	6,6°C
	Herbst	Relative Topografie 1000/850 hPa	0,7:0,3	16,1°C
	Winter	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	10,2°C
Maximumtemperatur/LoMax	Frühjahr	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	14,4°C
	Sommer	Geopotenzial 850 hPa	0,2:0,8	6,6°C
	Herbst	Relative Topografie 1000/850 hPa	0,8:0,2	15,0°C
	Winter	Relative Topografie 1000/700 hPa	0,5:0,5	9,7°C
Mitteltemperatur/HiTemp	Frühjahr	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	13,5°C
	Sommer	Relative Feuchte 850 hPa	0,0:1,0	5,1°C
	Herbst	Relative Topografie 1000/850 hPa	0,7:0,3	13,9°C
	Winter	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	10,5°C
Minimumtemperatur/HiMin	Frühjahr	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	11,8°C
	Sommer	Temperatur 700 hPa	1,0:0,0	3,4°C
	Herbst	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	12,4°C
	Winter	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	11,0°C
Minimumtemperatur/LoMin	Frühjahr	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	12,1°C
	Sommer	Relative Feuchte 850 hPa	0,7:0,3	3,7°C
	Herbst	Relative Topografie 1000/850 hPa	1,0:0,0	12,5°C
	Winter	Relative Topografie 1000/700 hPa	0,9:0,1	10,2°C

Bezüglich der Temperatur wurden verschiedene Instanzen untersucht (Maximum, Mittel, Minimum, zumeist sowohl für die hoch als auch die tief gelegenen Stationen in Sachsen). Auffällig ist, dass, wie auch schon von anderen Untersuchungen bekannt, überwiegend die relative Topografie als Prediktor mit hoher Relevanz ermittelt wird. Auffällig ist zudem, dass im Sommer (i) dieser Prediktor durchweg *nicht* die größte Relevanz be-

sitzt und (ii) die Aufspreizung zwischen den einzelnen Klassen in dieser Jahreszeit deutlich geringer ist als in den anderen Jahreszeiten. Offenkundig ist im relativ hohen Temperaturbereich des Sommers mit EURO-Strings keine so hohe Kopplung zwischen der großräumigen und der regionalen Skala ermittelbar. Zudem ist festzustellen, dass oftmals Relationen von Lage und Betrag bevorzugt werden, die zugunsten der Lage des Gradienten wirken.

Beziehungen zu Blocking bestehen in den EURO-Strings indirekt: Einige Strings verlaufen relativ fern von Mitteleuropa – in Verbindung mit dem Postulat, dass die von den Strings identifizierten Drängungszonen im Zusammenhang mit Frontalzonen stehen, ist der Umkehrschluss zulässig, dass bei solchen Verläufen der Strings in Mitteleuropa vorzugsweise antizyklonisch geprägte Witterungsabläufe die Folge sind.

Weitere Verbindungen zwischen Blocking und regionalem Klima können mit den EURO-Strings analysiert werden, indem Betrachtungen des **Andauerverhaltens** erfolgen. Zunächst sei erneut darauf hingewiesen, dass die Datenaufbereitung für die EURO-Strings eine 5-Tage-Mittelung beinhaltet¹⁸. Damit werden kurzperiodische Fluktuationen reduziert. Darüber hinaus wurde eine weitere Analyse entwickelt, in der für die Tage eines EURO-Strings das Temperatur- oder Niederschlagsverhalten der darauf folgenden 60 Tage betrachtet wurde, gegebenenfalls über das Ende einer Saison hinweg. Es steht zu erwarten, dass nach einer gewissen Zeit, bei Niederschlag eher und bei der höher persistenten Temperatur später, alle Tage gegen einen Mittelwert konvergieren und danach nur noch zufällige Fluktuationen auftreten.

Wie in Abbildung 53 gezeigt, beginnen die Temperaturverläufe auf unterschiedlichen, für die EURO-Strings ermittelten Wertenniveaus. Im Frühjahr ist dies z. B. für die besonders warme Klasse 6 ein Niveau von knapp 20 °C und für die besonders kalte Klasse 7 ein Niveau von knapp 4 °C. Diese beiden extremen Klassen enthalten auch relativ wenige Tage. Zur Erläuterung sei hier angefügt, dass eine Kurve das zeitliche Temperaturverhalten für alle Tage darstellt, die am Ausgangstag der Klasse N zugeordnet wurden – dass im weiteren zeitlichen Verlauf Wertebereiche anderer EURO-Strings erreicht werden, ist nicht relevant. Es geht also um die „zeitliche Fortschreibung“ der meteorologischen Größe.

Wie oben erläutert, sind nur die zeitlichen Fortentwicklungen, die an Tagen des ersten Monats einer Jahreszeit beginnen, vollständig in dieser Jahreszeit enthalten. Liegt der Anfangstag im Frühjahr z. B. im April, so reichen die letzten 30 Tage bereits in den Sommer hinein. Als Folge entsteht eine Mischung von Perioden, die komplett innerhalb der Bezugsjahreszeit liegen und solchen, die nur zum Teil in dieser Jahreszeit liegen. Die Konsequenz zeigt sich beispielsweise in den Verläufen im Frühjahr (linke Teilfigur von Abbildung 52): Es ist eine Zunahme zu erkennen, in der sich zum Teil die Temperaturverhältnisse der nachfolgenden Jahreszeit Sommer abbilden. Das inverse Phänomen, ebenso gut ausgeprägt, zeigt der Herbst (linke Teilfigur von Abbildung 53).

¹⁸ In einer Teilstudie wurden die Eingangsdaten für die Bestimmung der EURO-Strings nicht über 5 Tage gemittelt, sondern auf Tagesbasis und als 11-Tage-Mittel analysiert. Wichtigstes Ergebnis war, dass bei längerem Mittelungszeitraum die Aufspreizung zwischen höchstem und niedrigstem Klassenmittelwert zunahm, ein Hinweis auf die Relevanz längerer Zeitskalen.

Im Sommer und im Winter (rechte Teilfiguren von Abbildung 52 bzw. Abbildung 53) ist die zeitliche Veränderung zur Nachfolgejahreszeit hin nicht so deutlich erkennbar wie in den Übergangsjahreszeiten. Es sei angemerkt, dass das „Einschwenken“ in eine ähnliche zeitliche Entwicklung in den Jahreszeiten unterschiedlich ausgeprägt ist. Im Sommer (Abbildung 52 rechts) ist dies noch am deutlichsten – dort ist nach 9 bis 12 Tagen keine Besonderheit der einzelnen Klassen mehr zu erkennen. In anderen Jahreszeiten findet sich der interessante Sachverhalt, dass eine Klasse, die auf einem Extremniveau (wärmste oder kälteste Klasse) startet, dieses Niveau qualitativ auch beibehält. Besonders deutlich wird dies im Frühjahr, aber auch in Herbst und Winter sind Ansätze dieses Verhaltens zu erkennen, obwohl im Winter auch eine Tendenz zu einer Konvergenz mit fortschreitender Zeit sichtbar wird.

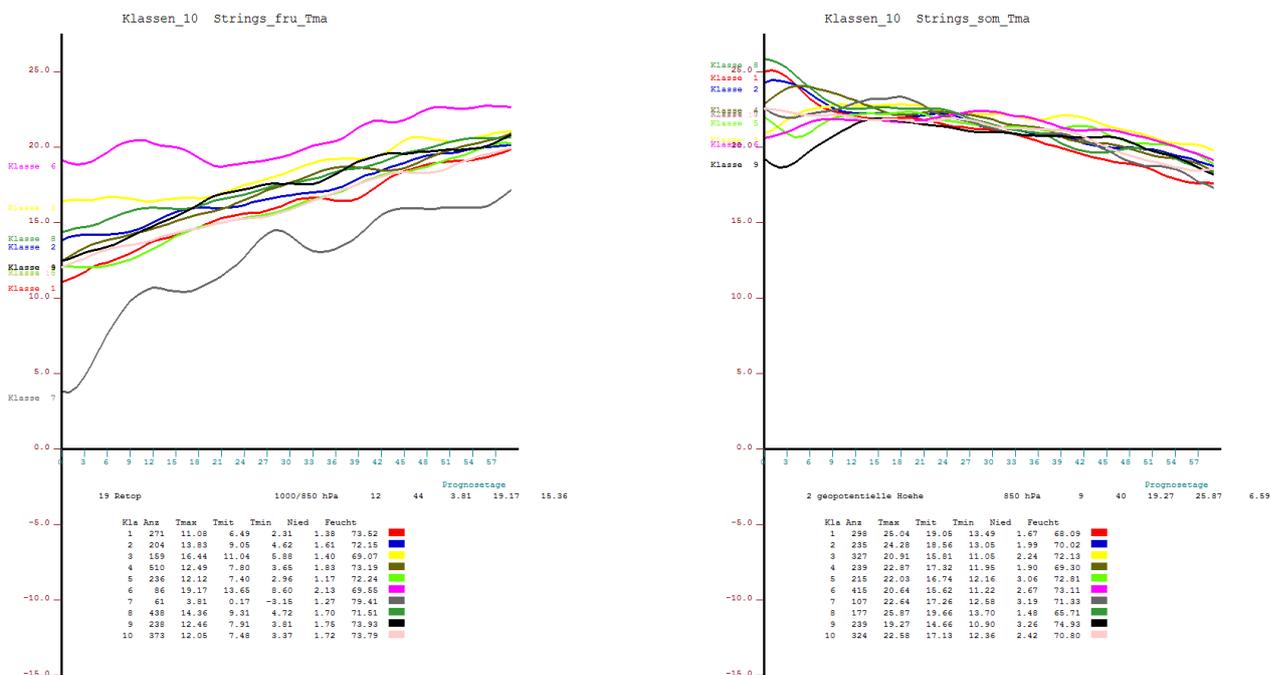


Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der regionalen, über 5 Tage gemittelten Maximumtemperaturwerte (Stationsauswahl: Tieflandstationen) in Sachsen bis 60 Tage nach einem Bezugstag der Jahreszeiten Frühjahr (links) und Sommer (rechts). Jede der farbigen Kurven steht für den in einen bestimmten EURO-String (Klasse) beginnenden zeitlichen Verlauf. Die Informationszeile unter der x-Achse gibt den vom Screening bestimmten Prediktor sowie die höchsten und niedrigsten Klassenmittelwerte und die Aufspreizung (Frühjahr: 15,4 °C und Sommer (6,6 °C) an. Die Wertetabellen geben die String-Charakteristika (TX, TN, TM, RR, RF) an

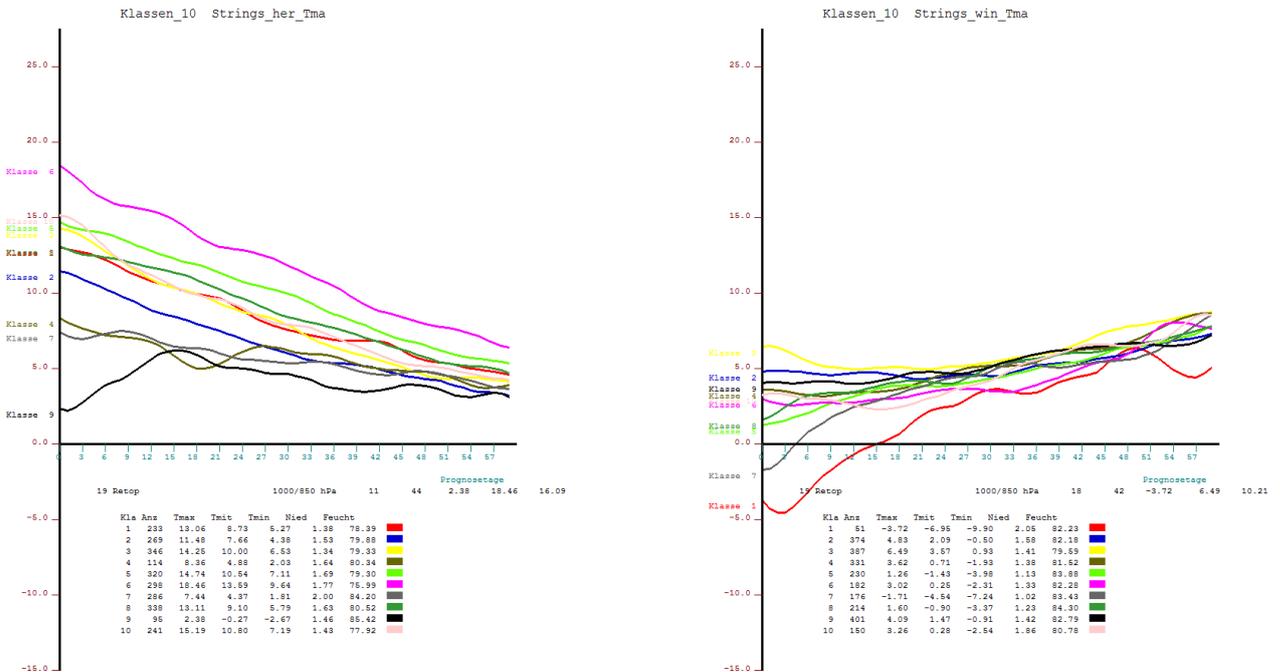


Abbildung 53: Wie Abbildung 52: Zeitlicher Verlauf der regionalen, über 5 Tage gemittelten Maximumtemperaturwerte (Stationsauswahl: Tieflandstationen) in Sachsen bis 60 Tage nach einem Bezugstag der Jahreszeiten Frühjahr (links) und Sommer (rechts). Jede der farbigen Kurven steht für den in einen bestimmten EURO-String (Klasse) beginnenden zeitlichen Verlauf. Die Informationszeile unter der x-Achse gibt den vom Screening bestimmten Prediktor sowie die höchsten und niedrigsten Klassenmittelwerte und die Aufspreizung (Frühjahr: 15,4 °C und Sommer (6,6 °C) an. Die Wertetabellen geben die String-Charakteristika (TX, TN, TM, RR, RF) an, jedoch für die Jahreszeiten Herbst (links) und Winter (rechts)

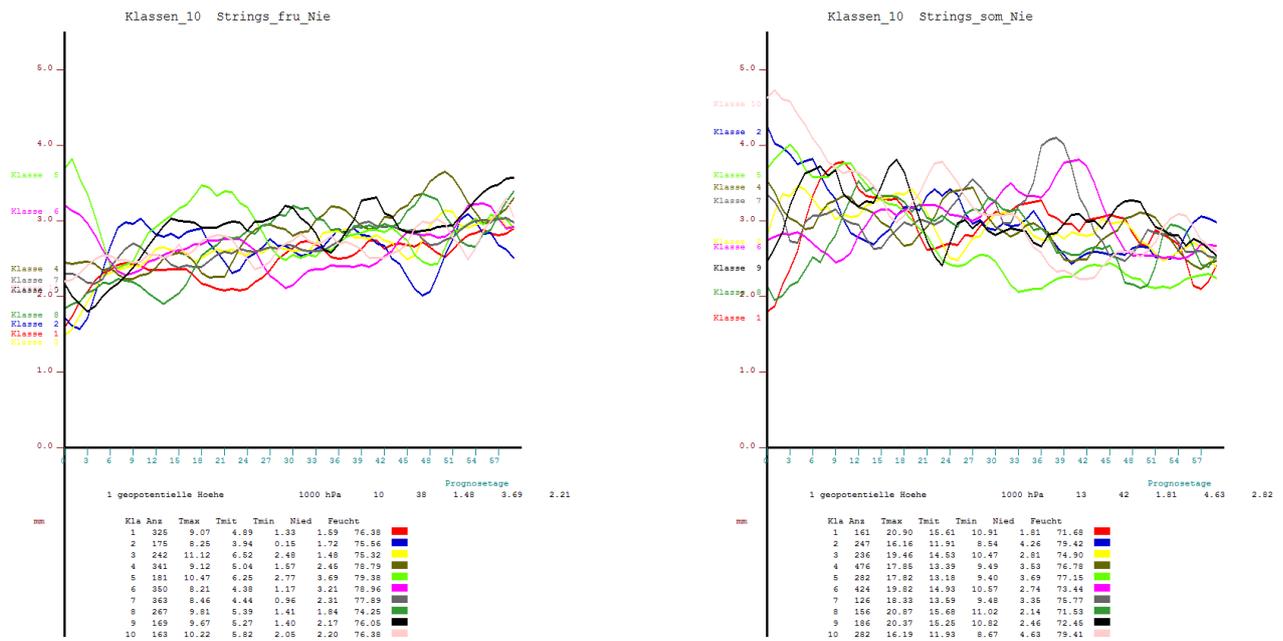


Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der regionalen, über 5 Tage gemittelten Niederschlagswerte (Stationsauswahlkriterium: Hohe Niederschlagssummen) in Sachsen bis 60 Tage nach einem Bezugstag der Jahreszeiten Frühjahr (links) und Sommer (rechts). Jede der farbigen Kurven steht für den in einen bestimmten EURO-String (Klasse) beginnenden zeitlichen Verlauf. Die Informationszeile unter der x-Achse gibt den vom Screening bestimmten Prediktor sowie die höchsten und niedrigsten Klassenmittelwerte und die Aufspreizung (Frühjahr: 2,2 mm und Sommer 2,0 mm) an. Die Wertetabellen geben die String-Charakteristika (TX, TN, TM, RR, RF) an.

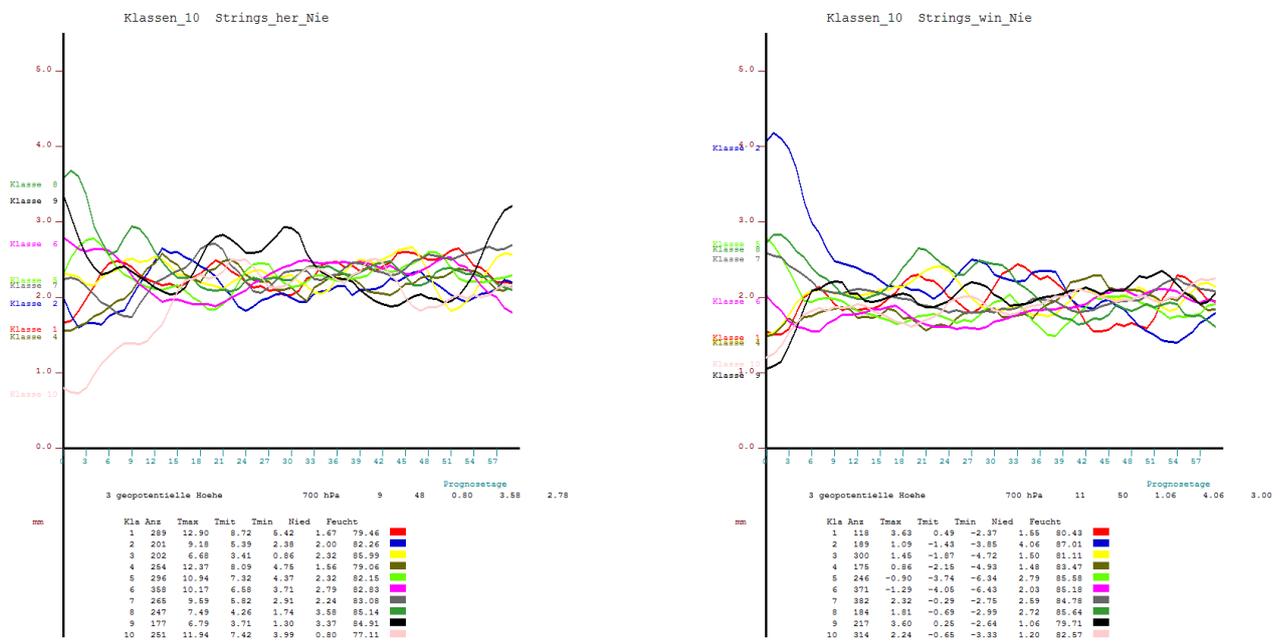


Abbildung 55: Wie Abbildung 54, jedoch für Herbst (links) und Winter (rechts)

Beim Niederschlag (Abbildung 54 und Abbildung 55) ist das Verhalten etwas anders. So sind Fluktuationen deutlicher ausgeprägt und eine Konvergenz auf einen „Korridor“ hin ist nicht so klar wie bei der Temperatur erkennbar. Auch die Tendenz, dass eine extreme Klasse im Lauf der Zeit eine obere bzw. untere Berandung des Wertintervalls darstellt, findet sich beim Niederschlag nicht. Wegen des gering ausgeprägten Jahresgangs des Niederschlags sind zudem kaum Effekte des „Hereinragens in die Nachbar-Jahreszeit“ erkennbar. Es besteht die Neigung, dass das Langzeitverhalten einer durch die EURO-Strings definierten Klasse seinen Informationsgehalt nach rund 10 Tagen verliert.

Fazit: EURO-Strings

Mit dieser Neuentwicklung im Rahmen von KLIWETT wurde ein Werkzeug geschaffen, das, von der regionalen Konsequenz (Klimamittelwerte in Sachsen) ausgehend, eine Klassifikation von großräumigen bänderartigen Strukturen in der Nordhemisphärischen Westwindzirkulation ermöglicht. Diese Strukturen sind durch meridionale Drängungen/starke Gradienten in großräumigen Feldern, beispielsweise des Geopotenzials oder der Temperatur, definiert und müssen nicht streng breitenkreisparallel verlaufen, sondern können auch in mäandrierender Form vom Atlantik ostwärts reichen. Weil die stärkste Drängung Untersuchungsgegenstand ist, kann im Fall der Existenz von mehreren Drängungszonen ein diskontinuierlicher Teil eines Strings existieren.

Bezüglich des Niederschlags ist bei den EURO-Strings eine Erhaltungsneigung über mehr als 10 Tage hinaus nicht sonderlich deutlich ausgeprägt. Sie weisen bezüglich der Temperatur jedoch relativ deutlich Hinweise zu Erhaltungsneigungen auf.

9 Arbeitspaket 7 – Immissionssituation

9.1 Kontext

In diesem Arbeitspaket werden Ergebnisse der Analysen von Immissionsmessungen der Luftschadstoffe Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub (PM₁₀) und Ozon (O₃) vorgestellt. Die Bearbeitung und die Erstellung des Berichtstextes zu diesem AP erfolgte im Zuge der Projektpartnerschaft mit dem IÖZ der Bergakademie Freiberg weitgehend durch Dipl.-Geoökol. Wiebke Miketta.

Ziel ist die bessere Beschreibung der Extreme für NO₂, PM₁₀ und O₃. Der Ansatz besteht darin, die Luftqualität durch die Analyse der Zusammenhänge kritischer Immissionssituationen und verschiedener meteorologischer Parameter zu erfassen. Aussagen zu Häufigkeiten und Trendentwicklungen von Schadstoff-Schwellwertüberschreitungen im Klima der Gegenwart werden in Kapitel 9.2 vorgestellt. Kapitel 9.3 beleuchtet den Zusammenhang zwischen klassifizierten atmosphärischen Mustern (Großwettertypen, KlaMuKo-Klassen, EURO-Strings) und Luftschadstoff-Immissionen. Es wird mit besonderem Fokus auf PM₁₀ umfangreich untersucht, ob es bestimmte Zirkulationsmuster mit besonderer Relevanz für die Luftqualität gibt. In Kapitel 9.4 wird der Frage nachgegangen, wie sich das Potenzial für Situationen mit erhöhten Schadstoffkonzentrationen in der Zukunft entwickelt. Die Basis liefern Klimaprojektionen mit den Maßgaben der Szenarios A1B, A2 und B1.

9.2 Analyse des Immissionsverhaltens von NO₂, PM₁₀, und O₃ im gegenwärtigen Klima

Für den Zeitraum Januar 2000 bis Dezember 2012 werden Zusammenhänge zwischen dem Auftreten kritischer Immissionssituationen für NO₂, PM₁₀ sowie O₃ und verschiedenen meteorologischen Parametern untersucht. Der Datensatz für die Messungen stammt aus dem sächsischen Luftgütemessnetz. Bei PM₁₀ handelt es sich um Tagesmittel, bei allen anderen Schadstoffen um das innerhalb des Tages aufgetretene Maximum (Stundenmittelwert).

Luftgütedaten liegen in einem verhältnismäßig kurzen Zeitrahmen vor. Folgende Kriterien wurden ausgewertet:

- Die Stickstoffdioxidkonzentration übersteigt an einer Station einen Wert von 200 µg/m³.
- Die Stickstoffdioxidkonzentration übersteigt an einer Station einen Wert von 100 µg/m³ (weniger strenges Kriterium).
- Der PM₁₀-Tagesmittelwert an einer Station übersteigt einen Wert von 50 µg/m³.
- Die Ozonkonzentration an einer der Stationen übersteigt an einem Tag einen Wert von 180 µg/m³.

Extreme sind in diesem Zusammenhang Tage, an denen mindestens an einer dieser Stationen ein Schwellwert für einen Schadstoff überschritten wurde.

Bei Episoden mit hoher Luftverschmutzung sprechen die Indikatoren nicht alle gemeinsam an. Dieses war nicht zu erwarten, weil beispielsweise Ozonepisoden fast ausschließlich in den Sommermonaten auftreten (an sehr warmen Tagen). Im Zeitraum 2000 bis 2010 werden einmalig alle Grenzwerte überschritten (24. August 2001). Die Zeitreihen der sehr viel häufigeren Überschreitungen von NO₂ > 100 µg/m³ und PM₁₀ > 50 µg/m³ (Tabelle 67) sind zwar miteinander korreliert und weisen die größte Korrelation der untersuchten Reihenpaare auf, diese hat jedoch nur einen Betrag von 0,3. Die Überschreitung des NO₂-Grenzwertes von 200 µg/m³ ist sehr selten. Auf der Grundlage von nur 24 Überschreitungen in 12 Jahren ist eine Analyse hinsichtlich Charakteristika und Trendverhalten schwierig.

Tabelle 67: Anzahl der Grenzwertüberschreitungen für NO₂, PM₁₀ und O₃ für den Zeitraum 2000 bis 2010

2000–2010	NO ₂ (>200 µg/m ³)	NO ₂ (>100 µg/m ³)	PM ₁₀ (>50 µg/m ³)	O ₃ (>180 µg/m ³)
Überschreitungen	24	1872	1094	64
Überschreitungen SHJ	7	880	367	63
Überschreitungen WHJ	17	992	727	1

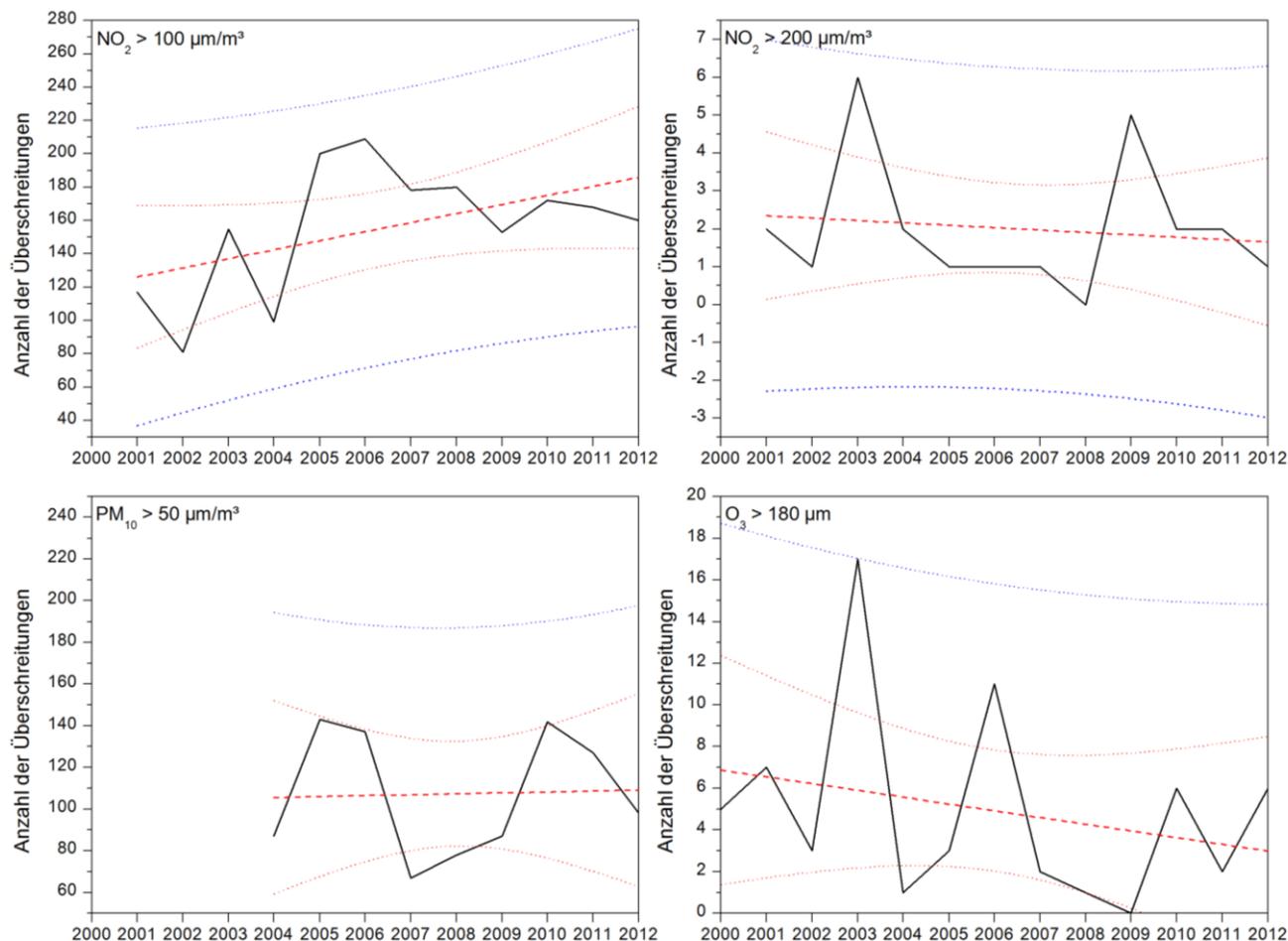


Abbildung 56: Häufigkeit des Auftretens von Überschreitungen des NO_2 -, PM_{10} - und O_3 -Grenzwertes an mindestens einer Station in Sachsen zwischen 2000 und 2012 (schwarze durchgezogene Linie). Die dicke gestrichelte rote Linie stellt die Schätzung der Regressionsgeraden dar. Die obere und untere Schranke des Vertrauensbereiches für die Regressionsgerade findet sich in Form von fein gepunkteten roten Linien, fein gepunktete blaue Linien geben den Vertrauensbereich für die Überschreitungsanzahl wieder. Irrtumswahrscheinlichkeit der Vertrauensbereiche: 5 %

Das saisonale Verhalten der Immissionssituationen von NO_2 und PM_{10} ist relativ ähnlich, wie Abbildung 58 zeigt. Die meisten Grenzwertüberschreitungen von PM_{10} und von $\text{NO}_2 (> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ liegen im Winter. Der Verlauf der O_3 -Überschreitungen ist ganz klar entgegengesetzt mit nur einer Überschreitung im Winterhalbjahr und einem Maximum im Sommer. $\text{NO}_2 > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verzeichnet die meisten Überschreitungen im Jahr 2003 und 2009, die häufigsten Ozon-Überschreitungen wurden 2003 und 2006 beobachtet und die PM_{10} -Konzentration wurde 2005 und 2010 am häufigsten überschritten (vgl. Abbildung 56 und Abbildung 58). Die Überschreitungsanzahl liegt in einem Vertrauensbereich von 95 %. Abbildung 56 zeigt die zeitliche Änderung der Häufigkeit der Überschreitung der zuvor definierten Schwellen in Sachsen von 2000 bis 2012. Mögliche Trends können durch eine lineare Regression veranschaulicht und abgeschätzt werden. In Abbildung 58 sind in Übersichtsform die absoluten Häufigkeiten Überschreitungen für das Sommer- und Winterhalbjahr dargestellt.

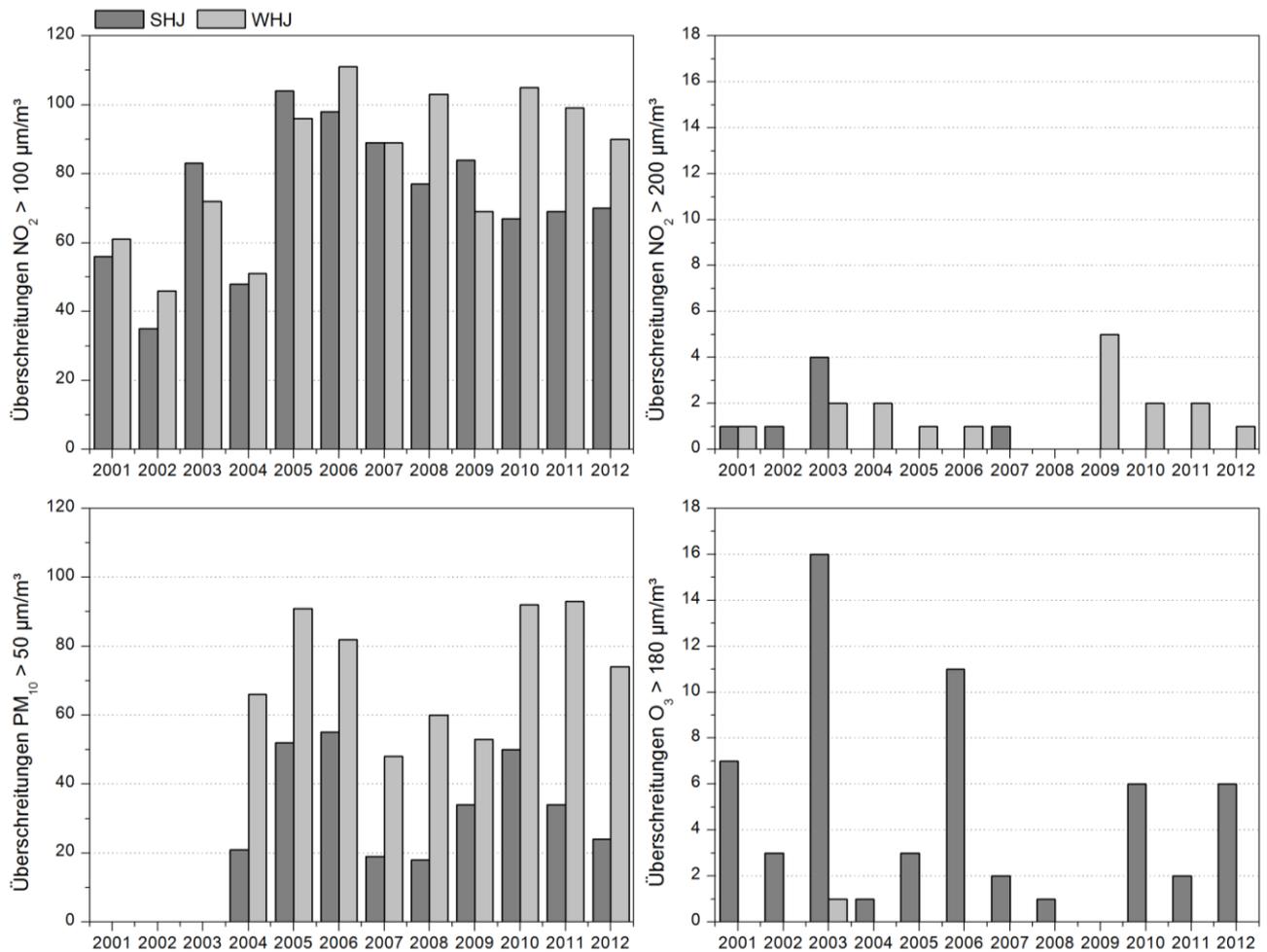


Abbildung 57: Übersicht der Überschreitungen der Schwellen für NO₂, PM₁₀ und O₃ im Zeitraum 2000 bis 2012 für das Sommer- und Winterhalb (SHJ, WHJ)

Allerdings ist es für diesen kurzen Zeitraum problematisch, eine belastbare Aussage zu linearen Trends zu treffen. Für NO₂ > 200 µg/m³ (Abbildung 56 oben rechts) ist auf der Basis von insgesamt nur 24 Überschreitungen keine fundierte Trendaussage möglich, für NO₂ > 100 µg/m³ (Abbildung 56 oben links) ist ein positiver Trend von etwa fünf Überschreitungen pro Jahr zu erkennen – diese Aussage ist aber im Lichte des ebenfalls eingezeichneten Vertrauensbereichs für die Trendgerade (dünne rot gestrichelte Linien) zu sehen. Dieser zeigt an, dass die Gerade durchaus auch waagrecht oder abwärts geneigt verlaufen könnte.

Bei den Tagesmittelwerten über 50 µg/m³ für PM₁₀ (gesetzliche Überschreitung) ist eine Trendentwicklung nicht aus den Daten abzuschätzen (Abbildung 56 unten links). Die Überschreitungen treten, das sei hier am Rande erwähnt, fast ausschließlich an verkehrsnahen Messstationen und nur vereinzelt an städtischen Stationen auf; ein Trend ist nicht zu erkennen.

Visuell beurteilt, ergibt sich beim Ozon (Abbildung 56 unten rechts) eine Abnahme-Entwicklung im Untersuchungszeitraum. Allerdings ist diese, wie der Vertrauensbereich zeigt, aus den analysierten Daten nicht mit hoher Belastbarkeit zu ermitteln.

Tabelle 68: Stationsliste der 36 Luftgütemessstationen Sachsens und ihre Klassifizierung nach Umgebung der Station, Emissionsquelle (Verkehr und Hintergrund) und Emissionsquellentyp (verkehrsnahe, städtisch und ländlich)

Stationsname	Code	Stationsumgebung	V/H	V/S/L
Annaberg-Buchholz	DESN001	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Bautzen	DESN004	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Borna	DESN006	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Chemnitz-Mitte	DESN011	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Delitzsch	DESN012	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Dresden-Mitte	DESN014	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Freiberg	DESN017	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Glauchau	DESN019	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Görlitz	DESN020	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Klingenthal	DESN024	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Leipzig-Mitte	DESN025	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Zittau-Ost	DESN045	vorstädtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Zwickau	DESN047	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Carlsfeld	DESN049	ländlich abgelegen	Hintergrund	Ländliche Station
Hoyerswerda	DESN050	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Radebeul-Wahnsdorf	DESN051	ländlich stadtnah	Hintergrund	Ländliche Station
Zinnwald	DESN052	ländlich regional	Hintergrund	Ländliche Station
Fichtelberg	DESN053	ländlich abgelegen	Hintergrund	Ländliche Station
Leipzig-West	DESN059	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Chemnitz-Nord	DESN060	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Dresden-Nord	DESN061	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Schwarzenberg	DESN074	ländlich regional	Hintergrund	Ländliche Station
Plauen-Süd	DESN075	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Collnberg	DESN076	ländlich abgelegen	Hintergrund	Ländliche Station
Leipzig Lützner Str.	DESN077	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Deutscheinsiedel	DESN078	ländlich regional	Hintergrund	Ländliche Station
Niesky	DESN079	ländlich regional	Hintergrund	Ländliche Station
Schkeuditz	DESN080	ländlich stadtnah	Hintergrund	Ländliche Station
Plauen-DWD	DESN081	vorstädtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Leipzig Thekla	DESN082	vorstädtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Chemnitz-Leipziger Str.	DESN083	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Dresden-Bergstraße	DESN084	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Dresden-HerzoginGarten	DESN085	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Zwickau-Werdauer Str.	DESN091	städtisches Gebiet	Verkehr	Verkehrsstation
Dresden-Winckelmannstr.	DESN092	städtisches Gebiet	Hintergrund	Städtische Station
Brockau	DESN093	ländlich regional	Hintergrund	Ländliche Station

Unterteilt man die Messstationen in Sachsen nach ihrem Emissionsquelltyp, ergeben sich drei Gruppen: städtisch verkehrsnah (V), städtisch (S) und ländlich (L). In die Untersuchungen gehen 11 Verkehrsstationen, 15 städtische und 10 ländliche Stationen, ein (Tabelle 68).

Die städtisch verkehrsnahen Maximumkonzentrationen von NO_2 und PM_{10} (Abbildung 59 oben und Mitte) sind jeweils höher als die Stationen städtischen und ländlichen Hintergrunds. Ein umgekehrtes Bild ergibt sich für die Maximumkonzentration von Ozon (Abbildung 59 unten) – hier sind die ländlichen Konzentrationen am höchsten. Betrachtet man die Stickstoffdioxidüberschreitungen, so treten diese meist an Verkehrsstationen auf. Vier ländliche Stationen zeigen keinerlei Überschreitungen in den beobachteten 12 Jahren.

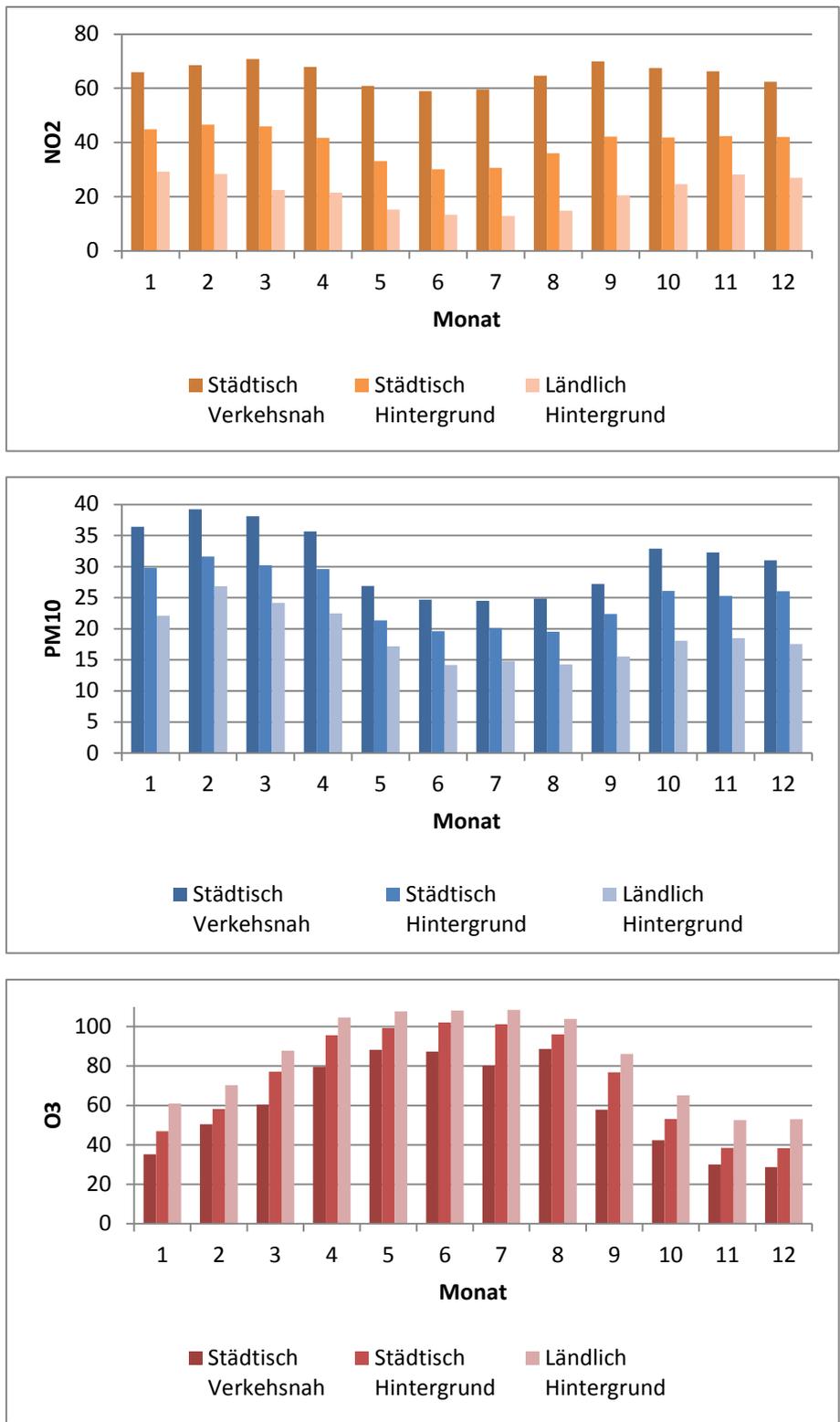


Abbildung 58: Mittlere maximale Konzentrationen von NO₂, PM₁₀ und O₃ in den einzelnen Monaten des Jahres und für die verschiedenen Stationstypen. Bestimmungszeitraum: 2001-2010

9.3 Beschreibung von kritischen Immissionsituationen mit Zirkulationsmustern?

9.3.1 Subjektive und objektive Bestimmung von Großwetterlagen

In diesem einleitenden Abschnitt zum Themenschwerpunkt *Immission und Zirkulationsmuster* sollen einige Grundlagen zur Identifikationsmethodik in Erinnerung gerufen werden.

Die Pioniere der Klassifikation von atmosphärischen Strukturen – Baur und Hess/Brezowsky – hatten sich zum Ziel gesetzt, mit Hilfe synoptischer Methoden wiederkehrende atmosphärische Muster, repräsentiert durch Anordnungen von Steuerungszentren in Druckfeldern, zu finden. Diese bildeten die Basis ihrer Klassifikationsmethodik. Mit Hilfe von Ähnlichkeits-Einschätzungen wurde danach angestrebt, jeden Tag einer der definierten Klassen zuzuordnen. (James, 2007) befindet, dass es sich bei der Klassifikation nach Hess/Brezowsky, allen Inkonsistenzen (s. u.) zum Trotz, um das beste verfügbare konzeptionelle System auf diesem Gebiet handelt.

Eine wichtige Prämisse war für die Entwickler dieser Klassifikation, dass der großräumige Zustand der Atmosphäre (Großwetterlage) möglichst für ganz Europa beschrieben werden kann. Dies findet sich auch in einigen der gewählten Namen für die Großwetterlagen (GWL) wieder, z. B. *Hoch Nordmeer-Island*, *Hoch Fennoskandien* oder *Tief Britische Inseln*. Eine Folge der Herangehensweise ist, dass recht unterschiedlich großräumige „Konstellationen“ im Druckfeld zu ähnlichen *regionalen* Strömungsverhältnissen führen können. Mit anderen Worten, durch die unterschiedlichen räumlichen Skalen existiert das Potenzial für Unschärfen und Mehrdeutigkeiten (s. a. Abschnitt 9.3.5).

Des Weiteren ist eine auf Einschätzungen basierende Klassifikation per se unscharf, weil sie auf dem „Faktor Mensch“ beruht. Die klassifizierenden Experten sind mit Sicherheit bestmöglich geschult und mit der Materie vertraut. Dennoch besitzt die Aufgabe, die in permanenter Umlagerung befindliche Atmosphäre verbindlich mit definierten Klassen abzugleichen, eine Eigendynamik. Anhand eines Beispiels soll dies verdeutlicht werden. Abbildung 59 zeigt die Strömungskonfigurationen für zwei Hess/Brezowsky-GWL (Nr. 1 WA und Nr. 10 BM). Sie haben große Ähnlichkeit, denn Mitteleuropa befindet sich bei beiden im Einflussbereich einer Kombination aus einem Tiefkomplex über dem Nordostatlantik und eines großen Hochs über der Biskaya und dem zentralen Europa. Ein ausgeprägtes weiteres Tief befindet sich im zentralen Mittelmeer. Auch für geübte Synoptiker sind diese Konfigurationen nur sehr schwer auseinanderzuhalten und es ist, vorsichtig formuliert, „Geschmackssache“, welcher der beiden Klassen ein konkreter Tag zugeordnet wird. Zudem ist in (James, 2007) beschrieben, dass einige Klassen, darunter BM, in der Zuordnungspraxis bevorzugt genutzt werden, wenn die Konstellation ein großes Hoch über Westeuropa umfasst und die konkrete Zuweisung für einen Einzeltag schwierig ist.

Auch wenn eine manuelle, subjektive Klassifikation, wie die nach Hess/Brezowsky, ihre Meriten hat, so liegt das Potenzial für einen Zugewinn an Konsistenz und Kontinuität darin, ein objektives, zu jedem Zeitpunkt identisches Klassifikations-Regelwerk zu schaffen. Die Zielgröße der Objektivierung ist die Reproduktion der Hess/Brezowsky GWL. Verschiedene Ansätze dafür existieren seit den 1990er-Jahren. Sie sind in Abschnitt 3.1 und 3.2 übersichtsartig beschrieben.

Dennoch: Auch mit hoch optimierten Verfahren ist es schwierig, eine Trefferquote von mehr als 40 % zu erreichen – d. h. eine Hess/Brezowsky-GWL XX wird vom objektivierten Verfahren in weniger als der Hälfte aller

Fälle exakt wiedererkannt. Die mittlere Trefferquote des in KLIWETT eingesetzten aGWL-Verfahrens (s. Folgeabschnitte dieses Berichts) liegt bei vergleichsweise hohen 44 %.

Anmerkung: Das in diesem Vorhaben angewandte aGWL-Klassifikationsverfahren objektiviert zwar den „Klassifikationsprozess à la Hess/Brezowsky“ und führt zur Herstellung von GWL-Derivaten, aber es bleibt der Nachteil, dass die klassifizierte großräumigen Strömungsverhältnisse nicht immer aussagefähig für eine Teilregion sind (vgl. Abschnitt 9.3.5) und somit von den objektivierten Klassen diesbezüglich keine grundlegende Verbesserung zu erwarten ist. Hier liegt weiteres Entwicklungspotenzial bei einer neuen Klassifikation, die auf die Region fokussiert und mithin nicht mehr kompatibel zu den GWL wäre. Ein großer Vorteil jedweder automatisierbarer Klassifikation besteht aber darin, dass diese auch für Klimaprojektionen und andere Datenarten eingesetzt werden, wo sich schon wegen des unvermeidbaren Arbeitsaufwands eine manuelle Klassifikation nicht durchführen lässt.

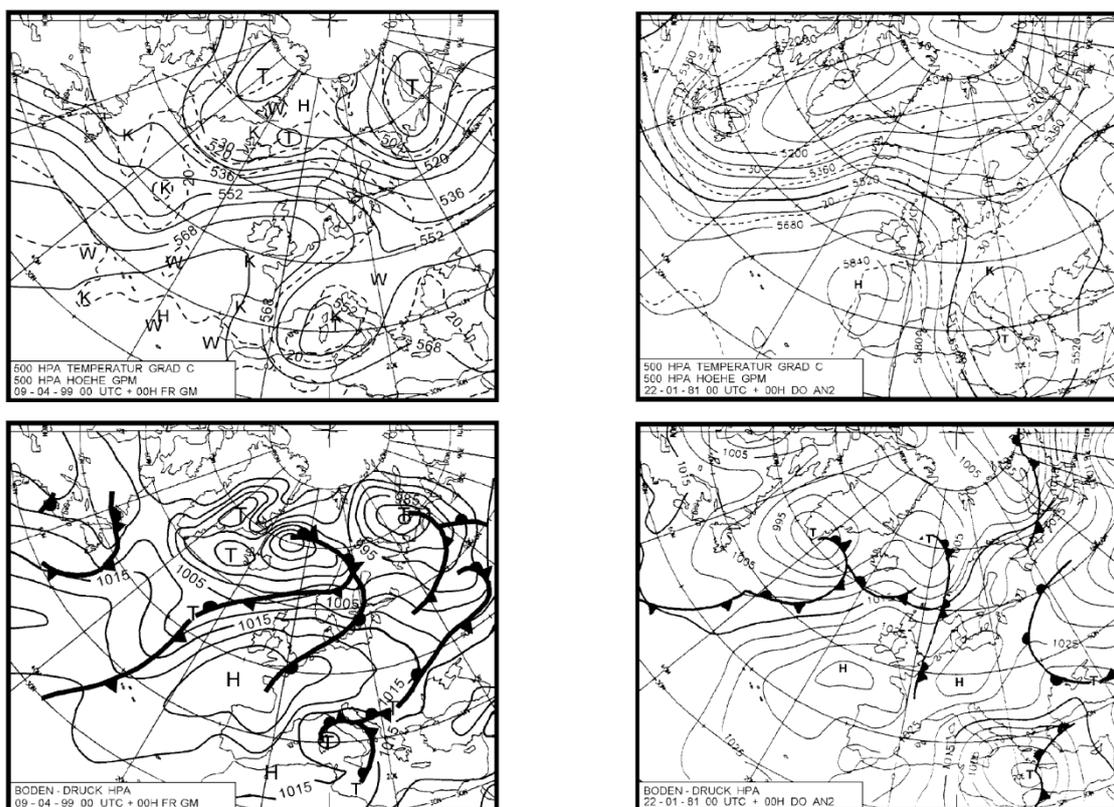


Abbildung 59: Typische Strömungskonfigurationen im 500 hPa-Geopotenzial (jeweils oben) und in der Bodenwetterkarte (jeweils unten) für die Hess-Brezowsky Großwetterlagen WA (Westlage antizyklonal, links) und BM (Hochdruckbrücke Mitteleuropa), aus (GERSTENGARBE & WERNER, 2005).

Weil sich wegen der relativ großen Zahl von rund 30 GWL Konsistenz- und Repräsentativitätsprobleme ergeben, erarbeiteten die Entwickler der Großwetterlagenklassifikation eine Zusammenfassungsstufe, die so genannten Großwettertypen (GWT). In ihnen werden „benachbarte“, d. h. in der Hess/Brezowsky’schen GWL-Liste hintereinander stehende Einträge kombiniert. Einige GWT bilden sich aus bis zu 6 GWL, meist sind es jedoch zwei GWL, die zusammengefasst werden.

Die Wiedererkennungsrates des objektivierten aGWL-Verfahrens ist zwar zu steigern, wenn nicht GWL, sondern GWT zu Grunde gelegt werden, aber der in Abbildung 59 gezeigte Sachverhalt weist schon auf eine weitere Problematik hin: Visuell ähnliche GWL können in deutlich unterschiedliche GWT eingeordnet werden.

WA gehört beispielsweise zum GWT 1 und BM zum GWT 4. Es gibt einige weitere solcher Unschärfen bei den GWL, die jeweils zum Einordnen in recht unterschiedliche GWT führen können.

Die Konkordanz bzw. deren teilweise vorhandenem Mangel zwischen den Großwettertypen aus Hess/Brezowsky-GWT und aGWT ist Tabelle 69 zu entnehmen. So werden beispielsweise 215 der 482 Tage (das sind rund 45 %) mit HBGWT 6 auch nach der aGWT-Klassifikation als GWT 6 identifiziert, aber immerhin 85 der HBGWT-Tage des Typs 6 (das sind nahezu 20 %) befinden sich im aGWT 1. Auf der Diagonale stehen in jeder Klasse die größten Besetzungszahlen, d. h. eine relativ gute Wiedererkennungsrate kann konstatiert werden. Insbesondere ist dies bei den GWT 5, 7 (diese beiden treten nur selten auf) und 8 der Fall, jedoch besitzt beispielsweise der (häufig auftretenden) GWT 4 nur eine Wiedererkennung von 33 % - das objektivierte Verfahren ordnet HBGWT 4-Tage mit jeweils über 10 % Häufigkeit drei verschiedenen anderen Klassen zu. Bei den Klassen 2, 3 und 10 werden sekundäre Maxima, jeweils hin zum aGWT 1, mit deutlich über 20 % gefunden.

Zum HBGWT 1 gehören 526 Tage – die aGWT-Klassifikation ordnet die GWL so zu, dass zu diesem GWT 744 (über 40 % mehr) gehören. Beim HBGWT 4 handelt es sich um einen Großwettertyp, bei dem die Verringerung besonders auffällig ist: Gehören laut Hess/Brezowsky-Klassifikation 510 Tage zu diesem GWT, so sind es bei aGWT 256, eine Abnahme um mehr als 50 %.

Tabelle 69: Häufigkeiten von Großwettertypen in den Jahren 2004–2010 als Aggregation von Hess/Brezowsky-GWL bzw. aGWL. Die obere Teiltabelle gibt die absoluten Zählungen und die untere Teiltabelle die prozentuale Verteilung, jeweils bezogen auf die Spaltensumme, wieder. Rot eingefärbte Zellen weisen Wiedererkennungsraten von 50 % und weniger aus. Gelb eingefärbte Zellen zeigen „Nebenmaxima“ von mehr als 10 % in einzelnen Klassen.

aGWT	Hess-Brezowsky-Großwettertyp (HBGWT)											Summe
	1 W	2 SW	3 NW	4 HM	5 TM	6 N	7 NE	8 E	9 SE	10 S	11 U	
1 W	380	70	46	85	0	85	0	5	7	59	7	744
2 SW	49	145	0	59	0	7	0	0	3	29	3	295
3 NW	18	3	118	28	0	57	0	0	0	2	3	229
4 HM	14	7	7	169	0	17	5	7	6	24	0	256
5 TM	2	1	1	0	36	23	0	7	0	7	1	78
6 N	31	3	26	83	0	215	4	2	6	19	7	396
7 NE	2	0	2	29	1	32	27	5	1	0	1	100
8 E	12	1	0	29	0	25	1	106	22	1	0	197
9 SE	0	0	0	6	0	8	0	13	34	8	1	70
10 S	18	26	1	22	0	13	1	1	12	96	1	191
Summe	526	256	201	510	37	482	38	146	91	245	24	
1 W	72,2	27,3	22,9	16,7	0,0	17,6	0,0	3,4	7,7	24,1	29,2	
2 SW	9,3	56,6	0,0	11,6	0,0	1,5	0,0	0,0	3,3	11,8	12,5	
3 NW	3,4	1,2	58,7	5,5	0,0	11,8	0,0	0,0	0,0	0,8	12,5	
4 HM	2,7	2,7	3,5	33,1	0,0	3,5	13,2	4,8	6,6	9,8	0,0	
5 TM	0,4	0,4	0,5	0,0	97,3	4,8	0,0	4,8	0,0	2,9	4,2	

6 N	5,9	1,2	12,9	16,3	0,0	44,6	10,5	1,4	6,6	7,8	29,2
7 NE	0,4	0,0	1,0	5,7	2,7	6,6	71,1	3,4	1,1	0,0	4,2
8 E	2,3	0,4	0,0	5,7	0,0	5,2	2,7	72,6	24,2	0,4	0,0
9 SE	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,7	0,0	8,9	37,4	3,3	4,2
10 S	3,4	10,2	0,5	4,3	0,0	2,7	2,6	0,7	13,2	39,2	4,2

9.3.2 Untersuchungen der Häufigkeit von Schwellwert-Überschreitungen der Immissionen und deren Zusammenhang mit Großwettertypen

Für eine weitere Analyse mit Bezug zu Umwelteinflüssen wird untersucht, ob Verfahren zur Klassifikation von Zirkulationsmustern eine statistische Beschreibungsgrundlage bezüglich Immissionsdaten für Luftschadstoffe liefern. Zunächst soll der Frage nachgegangen werden, wie häufig Schwellwertüberschreitungen von NO₂, PM₁₀ und O₃ gemeinsam mit Großwetterlagen auftreten¹⁹. Dazu werden die 29 algorithmischen Großwetterlagen (aGWL, s. Abschnitt 3), aggregiert zu 10 Großwettertypen (aGWT) eingesetzt – eine bereits in Abschnitt 9.3.1 erläuterte Zusammenfassung, die analog zur „klassischen“ Herangehensweise (HESS & BREZOWSKY, 1952) ist. Die GWT werden mit einer Orientierungsnomenklatur versehen. In der Regel handelt es sich um den Quadranten Europas, in dem jeweils das Hauptsteuerungszentrum zu finden ist – dies ist nicht notwendigerweise gleichbedeutend mit der Windrichtung, die sich daraufhin in Sachsen einstellt (vgl. Abbildung 63)! Dazu kommen in der Nomenklatur die Großwettertypen HM (Hoch in Mitteleuropa) und TM (Tief in Mitteleuropa). In Tabelle 70 befinden die zugehörigen Angaben zu Auszählungen und prozentualen Häufigkeiten.

Tabelle 70: Häufigkeit der aGWT und der Überschreitungen von Schwellwerten bei NO₂, O₃ und PM₁₀ an sächsischen Luftgütemesstellen, ausgedrückt in absoluten Zahlen, prozentualem Anteil für den jeweiligen aGWT und prozentualem Anteil aller Tage. Untersuchungszeitraum: Jahre 2000–2010 (bei PM₁₀ 2004–2010). Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.

aGWT	Häuf _{GWT}	NO _{2/100}			NO _{2/200}			O _{3/180}			PM _{10/50}		
		Häuf	Proz _{aGWT}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{aGWT}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{aGWT}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{aGWT}	Proz _{alle}
1 W	1085	417	38,5	10,4	6	0,6	0,2	5	0,5	0,1	179	16,5	4,5
2 SW	453	232	51,2	5,8	8	1,8	0,2	14	3,1	0,4	110	24,3	2,7
3 NW	363	88	24,2	2,2	2	0,5	0,1	3	0,8	0,1	26	7,2	0,7
4 HM	396	205	51,8	5,1	1	0,3	0,0	15	3,8	0,4	124	31,3	3,1
5 TM	99	40	40,4	1,0	0	-	-	0	-	-	22	22,2	0,6
6 N	646	209	32,4	5,2	1	0,2	0,0	7	1,1	0,2	142	22,0	3,5
7 NE	143	35	24,5	0,9	0	-	-	1	0,7	0,0	29	20,3	0,7
8 E	342	125	36,6	3,1	1	0,3	0,0	4	1,2	0,1	99	29,0	2,4
9 SE	116	49	42,2	1,2	0	-	-	1	0,9	0,0	52	44,8	1,3
10 S	375	144	38,4	3,6	2	0,5	0,1	6	1,6	0,2	86	22,9	2,1
Σ	4018	1544			21			56			869		

Die ersten beiden Spalten von Tabelle 70 geben die Zuordnungsvariable (algorithmischer Großwettertyp aGWT in Anlehnung an die GWL/GWT-Klassifikation von HESS & BREZOWSKY, s. Abschnitt 9.3.1) und deren Häufigkeit an den 4.018 Tagen der Jahre 2000–2010 an. Neben diesem befinden sich vier Spalten-Triplette für NO₂ (Überschreitungen von 100 bzw. 200 µg/m³), O₃ und PM₁₀. Die erste Spalte jedes Triplets mit dem Kolummentitel „Häuf“ gibt die absolute, mit dem aGWT verbundene Anzahl der Schwellwertüberschreitungen an. So wurden bei Westlagen (Wertezeile 1 W), die an insgesamt 1.085 Tagen des Untersuchungszeitraums –

¹⁹ Die Grundhäufigkeit des Auftretens der einzelnen Großwettertypen ist in Tabelle 69 aufgelistet

das sind rund 25 % aller Tage (vgl. erster Block der weiter unten stehenden Tabelle 81) – auftraten, NO₂-Überschreitungen eines Schwellwerts von 100 µg/m³ an 417 Tagen registriert. Die nächsten beiden Spalten mit den Kolumnentiteln ProZ_{aGWT} bzw. ProZ_{alle} geben prozentuale Anteile an. So entsprechen die 417 Tage einem Anteil von 38,5 % an den 1.085 Tagen mit Westlagen und einem Anteil von 10,4 % an allen 4.018 Tagen.

Es lässt sich also aus den Einträgen der Spalte ProZ_{aGWT} die Stärke der Assoziation von aGWT und Schwellwertüberschreitungszahl ablesen. Diese Assoziation ist bezüglich der NO₂-Überschreitungen eines Schwellwerts von 100 µg/m³ bei den aGWT 1, 2, 4, 5, 9 und 10 relativ groß und bei den aGWT 3, 6, 7 und 8 relativ gering.

Werden NO₂-Überschreitungen eines Schwellwerts von 200 µg/m³ betrachtet, so müssen die Aussagen auf der Basis einer deutlich geringeren Anzahl von Fällen erfolgen (insgesamt wurde dieser Schwellwert nur 21-mal im Analysezeitraum übertroffen) – es ist aber eine schwach erkennbare Assoziation mit den aGWT 1, 2, 3 und 10 festzustellen.

Bezüglich O₃ müssen diese Betrachtungen ebenfalls eingedenk einer relativ geringen Anzahl der Fälle erfolgen. Ein Schwellwert von 180 µg/m³ wurde im Analysezeitraum nur 56-mal überschritten; zudem findet sich bei den 180 µg/m³-Überschreitungszahlen das O₃ im Untersuchungszeitraum ein schwach belegter Abnahmetrend, wie Abbildung 56 zeigt. Eine gering ausgeprägte Assoziation ist bei den aGWT 2, 4, 5, 8 und 10 vorhanden.

Bei PM₁₀ ist die Ausgangssituation für die Analyse wieder etwas günstiger, denn es gab im Untersuchungszeitraum 869 Überschreitungen (an mindestens einer Station), das sind mehr als 20 % der Tage. Am stärksten sind Episoden von Tagen, die den Immissionsschwellwert von 50 µg/m³ übertreffen mit dem aGWT 9 (Südostlagen) verknüpft. Allerdings ist dieser aGWT mit 116 von 4.018 Fällen (vgl. Tabelle 70) relativ selten. Außerdem zeigen die – etwas häufigeren – aGWT 4 (HM) und 8 (Ostlagen) in geringem Maße erkennbare Assoziationen mit PM₁₀-Überschreitungen von 50 µg/m³. Relativ geringe Assoziationen sind hingegen mit den aGWL 1 und 3 zu verzeichnen.

Zusätzlich ist in Abbildung 60 und Abbildung 62 dargestellt, wie die Anteile der aGWL bei den einzelnen Schadstoffen sind. Sie ergänzen die Auflistungen in Abschnitt 9.3.8

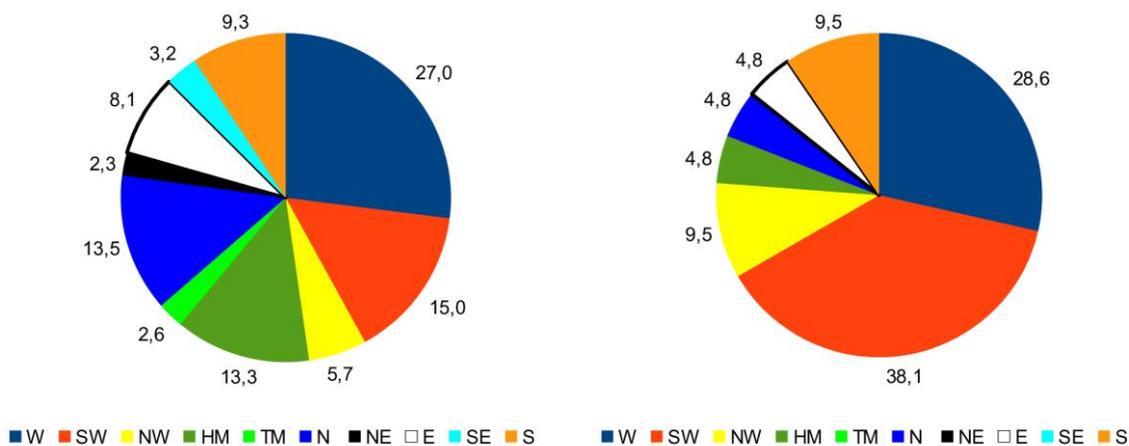


Abbildung 60: Anteile der aGWT (in %) bei den Tagen mit NO₂-Schwellwertüberschreitungen von 100 (links) bzw. 200 µg/m³ (rechts). Untersuchungszeitraum: Jahre 2000–2010.

Dazu wurde im Fall von NO₂-Überschreitungen eines Schwellwerts von 100 µg/m³ (linke Teilfigur von Abbildung 61) bestimmt, welcher Anteil der 1.544 Tage (vgl. Tabelle 70) auf die einzelnen aGWT entfielen. So finden sich z. B. 27 % der Tage (417, wie die Tabelle zeigt) in Zusammenhang mit Westlagen, 15 % (232) in Zusammenhang mit Südwestlagen. Die relativ ausgeprägte Dominanz dieser beiden aGWT ist auch in den Analysen der NO₂-Überschreitungen eines Schwellwerts von 200 µg/m³ (rechte Teilfigur von Abbildung 61) sichtbar, wiewohl zu bedenken ist, dass der höhere Schwellwert nur sehr selten überschritten wird.

Im Fall von O₃ (linke Teilfigur von Abbildung 62) ist erkennbar, dass im Untersuchungszeitraum am häufigsten (mit jeweils rund 25 %) die Tage mit Südwestlagen (14 der insgesamt 56 Fälle) bzw. HM (15 der insgesamt 56 Fälle) mit Schwellwertüberschreitungen zusammentrafen. Bei PM₁₀ (rechte Teilfigur von Abbildung 62) zeigt sich eine Präferenz der aGWT 1 (Westlagen, über 20 %, das sind 179 der insgesamt 869 Fälle), aber auch die Nordlagen (über 15 %, das sind 142 der 869 Fälle) habe einen etwas erhöhten Anteil aufzuweisen.

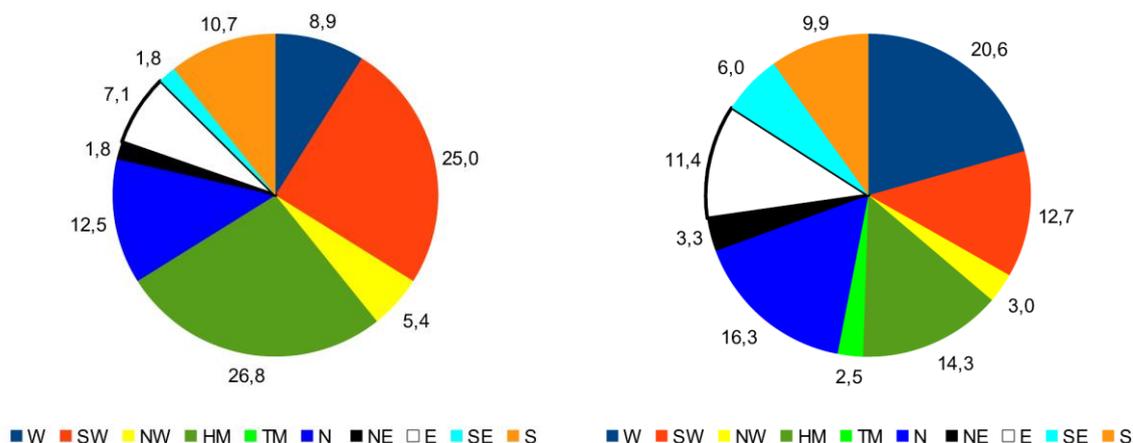


Abbildung 61: Wie Abbildung 60 jedoch für O₃ (links) und PM₁₀ (rechts). Untersuchungszeitraum: Jahre 2000–2010 (O₃) bzw. 2004–2010 (PM₁₀)

9.3.3 Untersuchungen von Großwettertyp-spezifischen Mittelwerten von PM₁₀-Immissionsdaten

In den vorstehenden Analysen wurde betrachtet, wie oft im Untersuchungszeitraum Überschreitungen von Immissionsgrenzwerten auftreten. Aber gibt es möglicherweise auch Unterschiede bei den *Klassenspezifischen Mittelwerten* der gemessenen Schadstoff-Immissionen? Der Fokus bei einer entsprechenden Untersuchung lag auf PM₁₀-Immissionen.

Wegen der nur zum Teil ausgeprägten Konkordanz von aGWT und Hess/Brezowsky-GWT (vgl. Abschnitt 9.3.1) ist zu erwarten, dass in Assoziation mit bestimmten GWT je nach Klassifikationsmethode unterschiedliche klassenspezifische Mittelwerte von mittleren Schadstoff-Immissionen bestimmt werden. Im Rahmen einer speziellen Untersuchung wurden für den Zeitraum 2005–2010 für die Monate Jan, Feb, Mrz, Apr, Okt, Nov und Dez an einer Gruppe von Stationen²⁰ die mittleren, GWT-spezifischen PM₁₀-Immissionen berechnet und in Tabelle 71 aufgelistet. Außerdem stellte das LfULG für die Jahre dieses Zeitraums diejenigen Tage zu-

²⁰ In Analogie zu Untersuchungen im LfULG (WOLF, MELLENTIN, & LAUDEL, 2013) wurden die Stationen Chemnitz Leipziger Straße (Nr. 083), Dresden Bergstraße (084), Dresden Nord (061), Görlitz (020), Leipzig Lützner Straße (077), Leipzig Mitte (025), Plauen Süd (075), Zittau (045) und Zwickau (091) ausgewählt.

sammen, an denen in der Umgebung dieser Stationen Baustellenaktivitäten registriert wurden. Die Tabelle weist zudem die GWT-spezifische PM₁₀-Immissionen ohne und mit Berücksichtigung dieser lokalen Sachverhalte aus.

Es zeigt sich zunächst, dass beispielsweise GWT 9 (Südostlagen), 8 (Ostlagen) und 4 (Lagen mit Hoch über Mitteleuropa) gut erkennbar höhere PM₁₀-Immissionswerte in sich vereinigen. Relativ deutliche Unterschiede zwischen den GWT-spezifischen PM₁₀-Immissionen bei Nutzung der HBGWT und der aGWT zeigen sich bei GWT 1 (Westlagen), 7 (Nordwestlagen) und 9 (Südostlagen) – dies sind weitere Hinweise auf die bereits in Abschnitt 9.3.1 konstatierten Unschärfen/Zuordnungsverlagerungen zwischen den beiden Klassifikationen.

Im Rahmen einer Teilauswertung wurden auch (stationspezifisch) Tage bei der Mittelwertbestimmung ausgeblendet, an denen es nachweislich Baustellenaktivitäten in der Umgebung gab. Wie Tabelle 71 zeigt, führt dies in der Tat zu etwas niedrigeren Immissionswerten, jedoch sind die so bestimmten Unterschiede in der Regel relativ gering.

Tabelle 71: Klassenmittelwerte der PM10-Immissionen (in µg/m³) an 9 ausgewählten Messstationen Sachsens für die Monate Jan–Apr und Okt–Dez in den Jahren 2005–2010 für die Großwettertypen nach Hess/Brezowsky (HBGWT) und deren mit einer objektivierten Methode bestimmten Fassung (aGWT). Das Subscript oBI steht für die Mittelwertbestimmung an allen analysierten Tagen, d. h. ohne Eliminierung von Tagen, die laut LfULG durch Baustellenaktivitäten in der Stationsumgebung charakterisiert waren. Das Subscript mBI steht für die Mittelwertberechnung unter stationspezifischer Ausblendung von Baustellentagen.

Bezeichnung	HBGWT _{oBI}	HBGWT _{mBI}	aGWT _{oBI}	aGWT _{mBI}
1 W	26,09	25,72	29,75	29,40
2 SW	33,77	33,43	34,86	34,12
3 NW	23,23	22,87	22,51	22,03
4 HM	42,64	42,09	42,01	40,74
5 TM	--	--	39,92	39,69
6 N	32,75	32,51	35,08	34,71
7 NE	24,35	23,07	27,58	26,97
8 E	43,72	42,75	44,44	43,82
9 SE	47,28	44,57	49,02	47,12
10 S	36,46	35,84	39,50	39,62
11 U	41,07	40,27		

9.3.4 Relevanz der Identifikations-Kriterien für die Analyse von PM₁₀-Schwellwertüberschreitungen

Bei dieser Untersuchung wurde der Frage nachgegangen, ob das Kriterium, mit dem festgelegt wird, ob ein Tag als *Schwellwert-Überschreitungstag* gewertet wird, möglicherweise nicht adäquat ist. Zur Erinnerung: Bei der Identifikation von Überschreitungen, erwähnt in den Abschnitten 9.2, 9.3.1, 9.3.2 und 9.3.3 sowie bei der Binarisierung zur Erstellung der Zeitreihe zur Analyse mit KlaMuKo wird die Kennung „1“ gesetzt, wenn an mindestens einer der Stationen eine Schwellwertüberschreitung verzeichnet wurde. Dies könnte beispielsweise bei PM₁₀ zu sensibel sein. In einem Experiment wurden für die PM₁₀-Immissionen wie folgt vorgegangen: Im Zeitraum 2004–2010 wurden die Monate Oktober–Dezember sowie Januar–April ausgewählt. Die Betrachtung erstreckte sich auf die 9 bereits in der Datengrundlage für Tabelle 71 verwendeten Stationen Chemnitz Leipziger Straße (Nr. 083), Dresden Bergstraße (084), Dresden Nord (061), Görlitz (020), Leipzig Lützner

Straße (077), Leipzig Mitte (025), Plauen Süd (075), Zittau (045) und Zwickau (091), ebenfalls verwendet in (WOLF, MELLENTIN, & LAUDEL, 2013). An mehr als 95 % der Tage dieses Zeitraums existieren Messdaten für 7 oder mehr dieser Stationen. An jedem Tag wurde die Rangfolge der PM₁₀-Immissionen bestimmt. Es wurden die Immissionen der Ränge 1, 2, 3, 4 und 5 betrachtet. Zudem erfolgt eine tägliche Bestimmung der Perzentile P90 und P95 aus den ausgewählten Stationen und die Berechnung des Mittelwerts der maximal 9 Stationen.

Die analysierten Varianten sind:

- Mindestens 1, 2, 3, 4 oder 5 Stationen zeigen an einem Tag eine Schwellwertüberschreitung. Das führt zu einem Rückgang der mit „1“ markierten Tage auf 75 % des durch die Schwellwertüberschreitung an mindestens einer Station ermittelten Anfangswerts (im Fall des Zwei-Stationskriterium), 60 % (3 Stationen), 50 % (4 Stationen) und 42 % (5 Stationen). Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 72. Dort steht Rg1 ... Rg5 für Rang 1...Rang 5.
- Für jeden Tag werden die Perzentile P90 und P95 der Immissionen aus den an diesem Tag verfügbaren Stationsmessungen bestimmt, die Kennung „1“ wird zugeordnet, wenn P90 resp. P95 über der Schwelle von 50 µg/m³ liegt. Die Zahl der markierten Tage reduziert sich auf 72 % der mit dem oben beschriebenen Standardkriterium identifizierten Tage, wenn die P90-Schranke verwendet wird – bei der P95-Schranke ist es ein Rückgang auf 85 %. Die Ergebnisse finden sich in den Spalten 2-5 von Tabelle 73. Der Zusatz P90>50 im Spaltenkopf weist auf das am 90-Perzentil orientierten Überschreitungskriterium hin; die Daten in den Spalten mit dem Zusatz P95>50 zeigen an, dass das am 95-Perzentil orientierte Kriterium zum Einsatz kam.
- Die Kennung „1“ wird zugeordnet, wenn der Mittelwert aller verfügbaren Stationsmessungen an einem Tag über 50 µg/m³ liegt. Dieses Kriterium ist relativ streng und kennzeichnet nur 36 % der mit dem Standardkriterium zugeordneten Tage. Die Ergebnisse finden sich in den Spalten 6 und 7 von Tabelle 73.

Wird z. B. das KlaMuKo-Verfahren verwendet, um die wie oben angegeben binarisierten Daten zu beschreiben, so ist als grundlegendes Ergebnis eine leichte Zunahme der multiplen Korrelation, also einem Maß für die Güte der Beschreibung, wenn die Schwellwert-Überschreitung an mehr als einer Station gefordert wird, zu verzeichnen. Das an der Schwellwertüberschreitung des *Mittelwerts* aus den Stationsmessungen orientierte Kriterium (Spalten 6 und 7 von Tabelle 73) erscheint hingegen zu streng und reduziert die Effizienz, mit der die Analysen stattfinden.

Tabelle 72 und Tabelle 73 zeigen Ähnlichkeiten und Unterschiede, wenn HBGWT bzw. aGWT-spezifische Mittelwerte der PM₁₀-Immissionen berechnet werden. Es ist evident (s. Tabelle 72), dass das PM₁₀-Werteniveau in den einzelnen GWT zunimmt, wenn gefordert wird, dass nicht nur an einer, sondern an 2 bis 5 Stationen ein Schwellwert von 50 µg/m³ überschritten sein soll.

Tabelle 72: Klassenspezifische PM₁₀-Immissionen für die Großwettertypen HBGWT und aGWT, ermittelt an 9 ausgewählten Stationen in Sachsen in den Monaten Oktober bis April der Jahre 2004–2010 nach verschiedenen Rangfolge-abhängigen Eintreffenskriterien (s. Text). Die höchsten in jeder Spalte auftretenden Werte sind orange markiert, die zweithöchsten gelb und die dritthöchsten hellgrau.

GWT	HBGWT Rg1>50	aGWT Rg1>50	HBGWT Rg2>50	aGWT Rg2>50	HBGWT Rg3>50	aGWT Rg3>50	HBGWT Rg4>50	aGWT Rg4>50	HBGWT Rg5>50	aGWT Rg5>50
1 W	39,0	42,0	45,3	47,6	51,8	51,9	54,7	54,6	54,9	56,9
2 SW	46,2	45,5	53,1	49,2	57,1	52,3	62,7	55,5	62,9	57,6
3 NW	45,7	43,1	49,1	46,3	53,1	53,0	55,9	54,9	55,9	57,2
4 HM	51,6	49,6	53,6	52,3	56,4	55,0	58,5	56,7	61,4	58,2
5 TM	--	56,4	--	56,4	--	65,8	--	69,9	--	69,9
6 N	48,7	54,4	55,3	61,7	61,4	67,1	65,8	71,7	70,1	73,1
7 NE	--	50,9	--	51,7	--	55,1	--	57,2	--	59,2
8 E	60,0	56,3	65,2	59,6	66,7	62,4	69,2	62,7	70,1	65,8
9 SE	50,4	52,5	52,4	55,1	54,1	55,9	54,7	58,0	56,2	60,9
10 S	45,9	48,3	48,0	50,3	50,1	52,7	52,7	56,2	55,1	57,4
11 U	71,4	--	76,4	--	80,9	--	80,9	--	85,5	--

Des Weiteren wird deutlich, dass von den unterschiedlichen Klassifikationen (HBGWT bzw. aGWT) auch unterschiedliche Rangfolgen in den GWT-spezifischen Mittelwerten der PM₁₀-Immissionen bestimmt werden. Auch ist die Rangfolge davon abhängig, an wie vielen Stationen das Überschreitungskriterium erfüllt ist. Laut HBGWT werden die Ostlagen dabei durchweg als diejenigen mit den höchsten Klassenmittelwerten eingestuft. Die zweithöchsten Klassenmittelwerte finden sich entweder bei HM (Fall: Überschreitungskriterium muss nur an mindestens einer Station zutreffen) oder bei den Nordlagen (Fall: Überschreitungskriterium muss an zwei oder mehr Stationen auftreten).

Laut aGWT sind die TM-Lagen (Fall: Überschreitungskriterium muss nur an mindestens einer Station zutreffen) bzw. die Nordlagen (Fall: Überschreitungskriterium muss an zwei oder mehr Stationen auftreten) diejenigen mit den höchsten mittleren PM₁₀-Immissionen.

Es ist festzustellen, dass die Folgen der Ränge 1 bis 3 ab einer geforderten Erfüllung des Überschreitungskriteriums an mindestens drei Stationen stabil sind, wenn auch die o. g. Spezifika der beiden Klassifikationen existieren. Dazu sind folgende Anmerkungen zu treffen:

- In der HB-Klassifikation treten im Zeitraum 2004–2010 keine TM-Lagen auf; diese sind aber bei der a-Klassifikation stets unter den ersten drei Rängen zu finden.
- Die NE-Lagen sind in der HB-Klassifikation in diesem Zeitraum zwar vorhanden, wenn auch mit weniger als 10-maligem Auftreten sehr selten, jedoch nicht mit Überschreitungsfällen der PM₁₀-Immissionen assoziiert. Daher haben die entsprechenden Tabellenzellen keinen numerischen Eintrag.
- Bei der Analyse wurden die Fälle in der HBGWT 11 (unbestimmte Wetterlagen) nicht beachtet, denn sie sind (i) ebenfalls sehr selten und (ii) ohne ein Pendant in der aGWL/aGWT-Klassifikation.

Die in

■ Tabelle 72 und Tabelle 73 zeigten Klassenmittelwerte entstanden durch eine „Filterung“, denn es wurden a priori Tage ausgewählt, an denen bestimmte Repräsentativitätskriterien der Überschreitung zutrafen. Im Gegensatz dazu sind in Tabelle 71 die Klassenmittelwerte für *alle* Tage, an denen ein spezifischer GWT klassifiziert wurde, aufgeführt, ganz gleich, ob damit auch eine Schwellwertüberschreitung verbunden war. Zudem wurde in Tabelle 71 auch ein etwas anderer Zeitraum verwendet, was mit der Verfügbarkeit von Baustelleninformation zusammenhängt.

Für die Berechnung der in Tabelle 73 aufgeführten Werte wurden weitere, deutliche strengere Kriterien angewandt, um Tage als „PM₁₀-Fälle“ zu charakterisieren, weil dort gefordert ist, dass an einem Tag das 90-Perzentil bzw. das 95-Perzentil bzw. der Mittelwert der einbezogenen Messungen über 50 µg/m³ liegt.

Tabelle 73: Wie Tabelle 72, jedoch für verschiedene Perzentil- bzw. Mittelwert-abhängige Eintreffens-kriterien (s. Text). Die Farbgebung der Zellen erfolgte analog zu Tabelle 72.

GWT	HBGWT P90>50	aGWT P90>50	HBGWT P95>50	aGWT P95>50	HBGWT MW>50	aGWT MW>50
1 N	68,3	69,3	65,1	66,1	79,8	82,9
2 SW	80,5	74,7	74,0	70,7	92,2	88,5
3 NW	73,0	79,8	69,7	74,1	90,2	99,8
4 HM	75,5	70,5	73,5	69,5	89,6	81,2
5 TM	--	83,3	--	80,5	--	102,4
6 N	80,1	92,9	75,3	86,6	97,5	111,4
7 NE	--	72,8	--	72,8	--	79,9
8 E	92,1	86,0	88,1	84,4	105,4	98,6
9 SE	76,4	77,3	73,5	73,0	83,7	87,4
10 S	74,4	73,2	72,5	70,4	94,7	86,4
11 U	118,8	--	118,8	--	149,7	--

Auch in dieser Tabelle sind Gemeinsamkeiten, Spezifika und Unterschiede der beiden GWT-Klassifikationen erkennbar. Unter den drei GWT mit den höchsten mittleren PM₁₀-Immissionen finden sich die Ostlagen, die Nordlagen, die TM-Lagen sowie vereinzelt auch Südwest-, Nordwest- und Südlagen. Auch sind einige bereits aus Tabelle 72 ermittelte Präferenzen erkennbar: (i) bei den HBGWT sind Ostlagen mit den höchsten PM₁₀-Immissionen assoziiert und (ii) bei den aGWT ist dies bei den Nordlagen der Fall, wiewohl die Ostlagen ebenfalls zu hohen PM₁₀-Immissionen führen. Im Detail sind die Rangfolgen durchaus unterschiedlich.

9.3.5 Zusammenhang von Großwettertypen und dem regionalen Windregime

Wie weiter oben angedeutet, ist es nicht selbstverständlich, dass beispielsweise bei einem Großwettertyp „Nordlage“ auch regional vorwiegend Nordwind herrscht. Zu diesem Zweck wurden Stationsdaten vom DWD analysiert. Zum Einsatz kamen die öffentlich verfügbaren Messwerte der Station Flughafen Leipzig-Schkeuditz (WMO-Kennung 10469) des Typs „Klimadaten“ (3 Termine: 07,14,21 MOZ, ab 01.01.1987 07:30,14:30,21:30 MEZ). Sie wurden ausgewählt, weil dort Windgeschwindigkeits- und -richtungsinformation in täglicher Auflösung enthalten sind und der Datentyp KL relativ gut qualitätskontrolliert ist. Allerdings sind die Geschwindigkeitsangaben nur in Beaufort (also durch ganzzahlige Werte repräsentiert) und die Richtungsangaben auf einer relativ groben 8-teiligen Windrose archiviert. Dennoch können diese Werte zu einer Plausibilitätsbeurteilung herangezogen werden.

Abbildung 63 zeigt die tatsächlich bei den HBGWT 1 bis 11 an der Station Leipzig-Schkeuditz auftretende Verteilung der Windrichtungen.

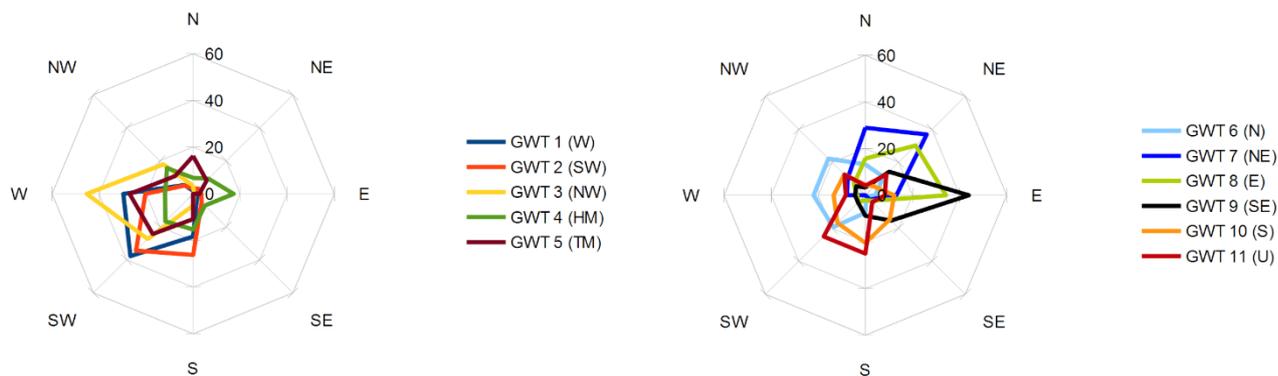


Abbildung 62: Windrosen für die Tage der HBGWT 1 bis 11. Zeitraum 2004–2010. Termin: 14:30 UTC. Station: Leipzig-Schkeuditz. Quelle: DWD

Nur bei wenigen GWT ist eine relativ hoch fokussierte Windrichtung zu erkennen: Bei den NW-Lagen sowie den SE-Lagen ist eine der gemessenen Windrichtungen mit mehr als 50 % realisiert. Allerdings stimmt das Maximum der Richtungsverteilung oftmals nicht mit der laut GWT-Nomenklatur postulierten Hauptwindrichtung überein. Besonders breite, viele Richtungen umfassende Verteilungen finden sich beispielsweise bei den aGWT 4 (HM) oder 10 (S). Die Nordlagen (GWT 6) besitzen ihr Richtungsmaximum relativ stark verschoben im Sektor SW-W-NW. Immerhin sind Windrichtungen entgegengesetzt zu denjenigen, die durch die GWT postulierten werden, vergleichsweise selten.

Wie ein Vergleich der Werte in den jeweiligen Spalten von Tabelle 74 zeigt, wird die Korrelation zwischen GWT und Windrichtung vergrößert, wenn statt der HBGWT die aGWT verwendet werden. Hinsichtlich der Windrichtung sind die Unterschiede marginal. Außerdem finden sich in den Daten des Typs KL Werte, die zu unterschiedlichen Klima-Terminen registriert wurden. Es stellt sich am Beispiel der betrachteten Station heraus, dass zum 14.30 Uhr-Termin, also unter Beachtung des am Tage auflebenden Windes, die Richtung etwas besser mit den GWT assoziiert ist als zu den beiden anderen Klima-Messterminen. Für die Windgeschwindigkeit sind die Messtermin-spezifischen Unterschiede relativ gering.

Tabelle 74: Korrelationen zwischen den GWT-Nummern und den Windrichtungen bzw. Windgeschwindigkeiten zu den Klimaterminen 0730, 1430 und 2130 UTC. Station: Leipzig-Schkeuditz (10469). Untersuchungszeitraum: 2004-2010.

GWT-Typ	Richtung 0730	Richtung 1430	Richtung 2130	Geschw. 0730	Geschw. 1430	Geschw. 2130
HBGWT	0,23	0,25	0,19	-0,21	-0,23	-0,26
aGWT	0,26	0,31	0,24	-0,21	-0,22	-0,24

Wie Abbildung 64 zeigt, besitzen die GWT auch spezifische Windgeschwindigkeitseigenschaften. So sind in den HBGWT 1, 2, 3 und 9 die Windstärken ≥ 4 Bft relativ häufig vertreten, während z. B. die HBGWT 4 und 7 durch relativ geringe Windgeschwindigkeit charakterisiert sind.

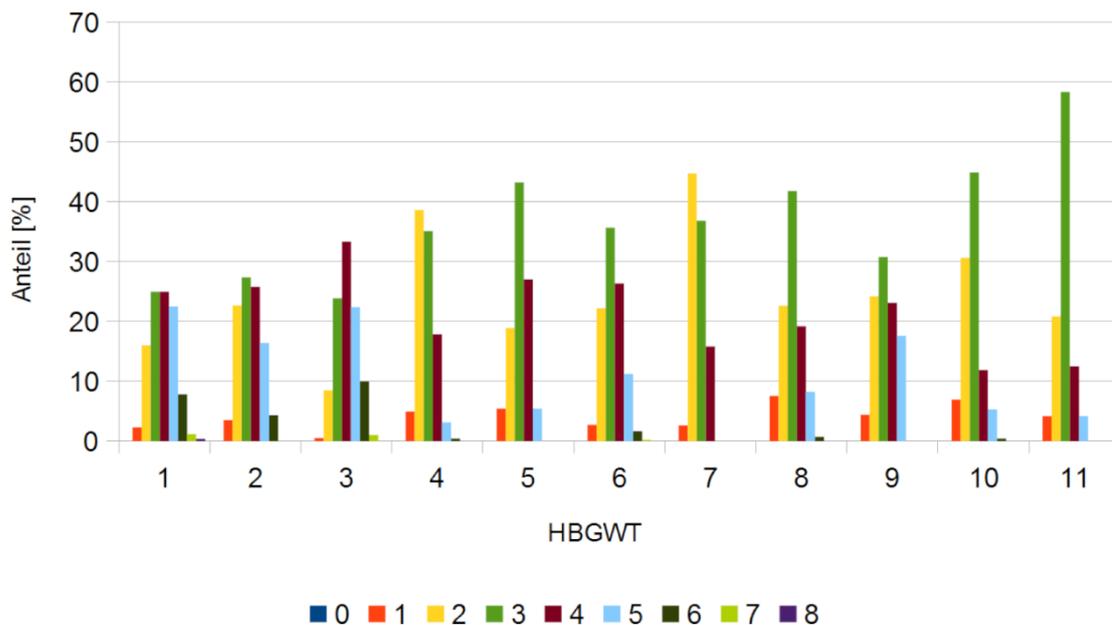


Abbildung 63: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit [in Bft] für die HBGWT 1 bis 11 an der Station Leipzig-Schkeuditz. Untersuchungszeitraum: 2004–2010

Es wurden zudem geschwindigkeitsspezifische Verhältnisse bezüglich der PM_{10} -Immissionen ermittelt. Sie sollen nur der Illustration dienen, denn es wurden die PM_{10} -Mittel der ausgewählten 9 Stationen (s. S. 149) mit den Windverhältnissen an einer Flachlandstation (hier Leipzig-Schkeuditz) in Beziehung gesetzt. Dennoch kann für einige GWT, insbesondere die Westlagen (1), die Südwestlagen (2), die Nordlagen (6) sowie die Südlagen (10) eine stringente Abnahme der Immissionen mit zunehmender Windgeschwindigkeit ermittelt werden.

Andere GWT, wie z. B. die Nordostlagen (7), die Ostlagen (8) oder die Südostlagen (9) zeigen nur einen geringen Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die PM_{10} -Immissionen. Einzelne Geschwindigkeitsklassen in Abbildung 64 weisen mittlere PM_{10} -Werte auf, die nicht in das erwartete Schema passen, z. B. die gelb eingefärbte Beaufort 2-Klasse vom HBGWT 3 oder die hellblau eingefärbte Beaufort 5 Klasse von HBGWT 5. In solchen Fällen ist auf Grund einer geringen Anzahl von Fällen, die diese Kriterien erfüllen, die Repräsentativität nur eingeschränkt gegeben.

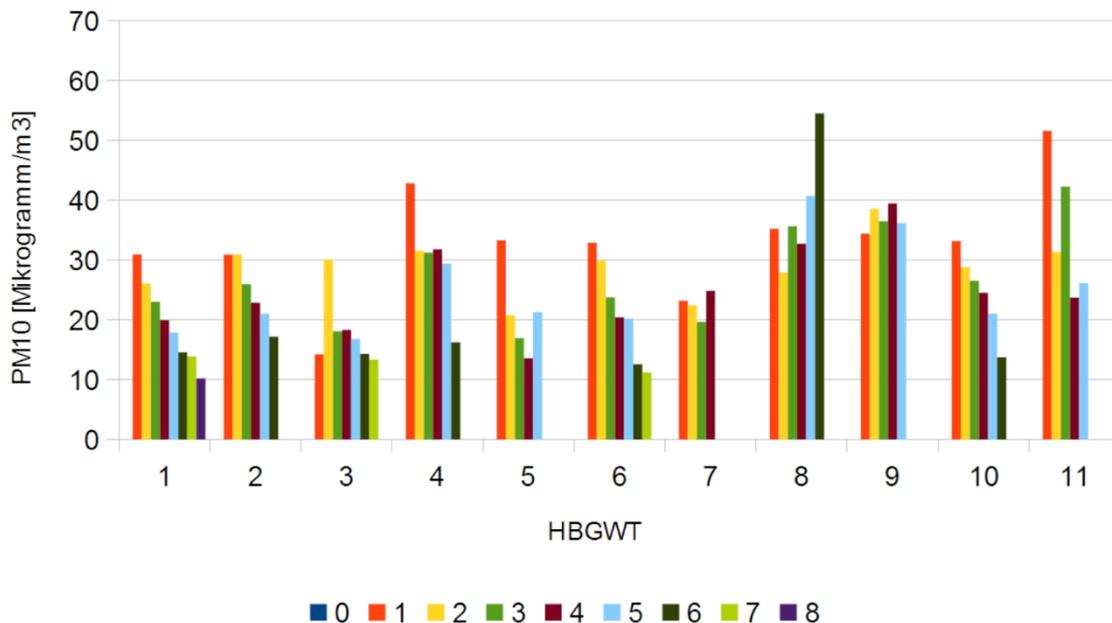


Abbildung 64: HBGWT-spezifische Abhängigkeit der PM₁₀-Konzentration (Mittel über die ausgewählten 9 Stationen in Sachsen) von der Windgeschwindigkeit (Farbcodierung: 0 ... 8 Bft). Verwendet wurden Klimamessungen zum 1430-UTC-Termin an der Klimastation Leipzig-Schkeuditz. Untersuchungszeitraum: 2004–2010

Werden statt der HBGWT die aGWT zur Grundlage der Untersuchung der Windgeschwindigkeits-Abhängigkeit von PM₁₀-Immissionen, so ergibt sich ein qualitativ ähnliches Bild – mit etwas anderen GWT-spezifischen Immissionswerten.

9.3.6 Beschreibung von PM₁₀-Immissionen mit dem EURO-Strings-Verfahren

Im Rahmen der Weiterentwicklung von Zirkulationsindizes (s. Abschnitt 8) wurde mit den EURO-Strings ein klassifizierendes Analyseverfahren mit Blick auf bandförmige, mäandrierende, zonal orientierte Strukturen in atmosphärischen Feldern vorgestellt. Die Anwendungsbeispiele in Abschnitt 8.3 konzentrieren sich auf regional gemessene Wetterparameter wie Temperatur oder Niederschlag (s. Tabelle 66).

Es soll an dieser Stelle eine kurze Betrachtung der Relevanz von EURO-Strings für die Klassifikation von PM₁₀-Immissionen erfolgen. Die Eckwerte der Analyse sind:

- Es werden PM₁₀-Daten von 9 sächsischen Stationen (vgl. S. 148) verwendet.
- Der Untersuchungszeitraum ist der für PM₁₀-Schwellwertüberschreitungen relevante Zeitbereich (Okt-Apr) in den Jahren 2004–2010.
- Das Verfahren bildet 10 EURO-Strings.
- Es werden tiefpassgefilterte (d. h. gemittelt über ±2 Tage) Differenzen in Nord-Südrichtung im Geopotenzialfeld 1000 hPa berechnet.
- Die Mitte eines Strings markiert die Position, an der entlang eines Meridians die größte Nord-Süd-Differenz bestimmt wurde.

Eine Wiedergabe der EURO-Strings findet sich in Abbildung 65. *Achtung! Die Strings haben nichts mit den HBGWT oder den aGWT zu tun. Sie stellen eine eigenständige Klassifikation, optimiert auf die Darstellung möglichst gut separierter Wertebereiche, dar.*

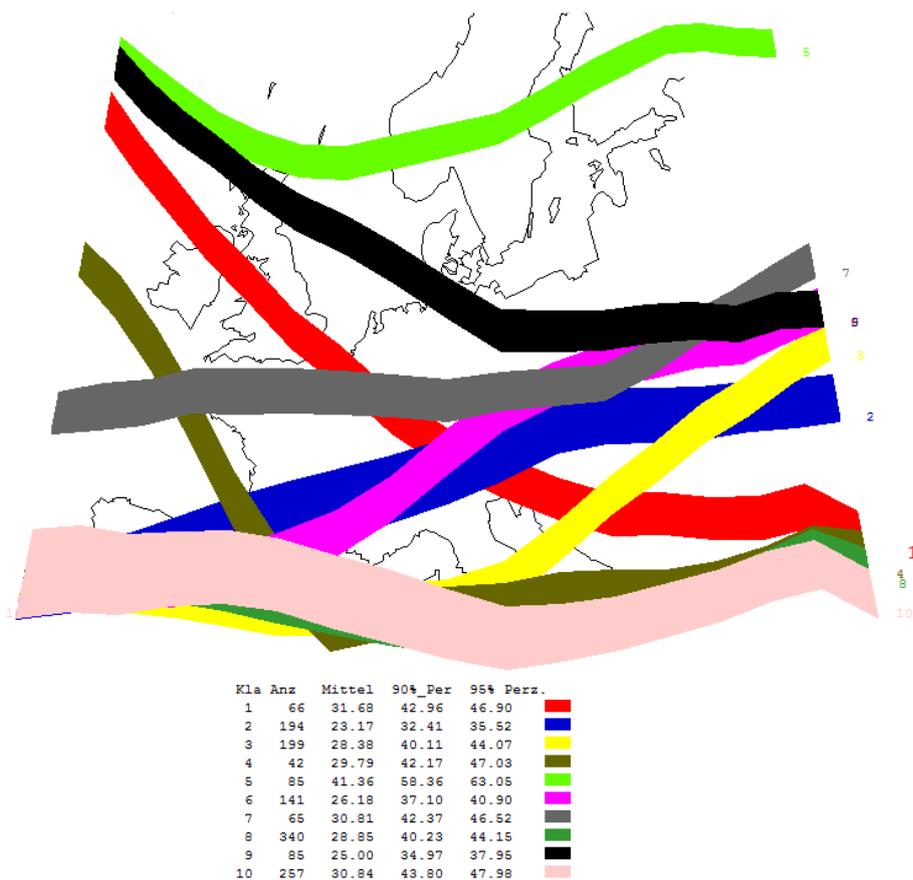


Abbildung 65: EURO-Strings-Analyse der Mittelwerte der PM₁₀-Immissionen (von 9 ausgewählten Stationen in Sachsen, vgl. S. 150) in den Monaten Oktober-April der Jahre 2004–2010 unter Verwendung von Gradienten im 1.000 hPa-Geopotenzialfeld (tiefpassgefiltert durch eine Mittelung über ±2 Tage). Die Wertetabelle unter der Karte gibt, EURO-String-spezifisch, die mittleren PM₁₀-Immissionen sowie die Perzentile P90 und P95 der Immissionen an.

Abbildung 65 zeigt unterschiedlich breite Bänder; zur Erinnerung: Die Breite eines Strings ist ein Maß für die Stärke des Gradienten. Auffällig sind hier insbesondere die Strings 2 und 10. Relativ geringe mittlere PM₁₀-Immissionen finden sich in den Strings 2, 6 und 9. Diese zeigen gerade im Bereich von Sachsen hohe Geopotenzialgradienten und folglich hohe Windgeschwindigkeit, was verbreitet mit relativ geringen PM₁₀-Immissionen verbunden ist (vgl. Abbildung 63 und Abbildung 64). EURO-String 8 zeigt einen Verlauf des Bands des stärksten Geopotenzialgradienten weit im Westen von den Britischen Inseln über die Pyrenäen zum Mittelmeer. Es ist plausibel, dass sich bei diesem Verlauf der Drängungszone in Mitteleuropa eine östliche bis südöstliche Anströmung einstellt, die wiederum mit relativ hohen PM₁₀-Immissionen assoziiert ist.

Der Unterschied der PM₁₀-Immissionen zwischen der EURO-String Klasse mit dem größten (String 5) und derjenigen mit dem kleinsten PM₁₀-Mittelwert (String 2) beträgt rund 18 µg/m³, wenn die Datenbasis die Monate Oktober bis April umfasst. Zum Vergleich: Werden HBGWT für denselben Monats- und Jahresbereich analysiert, so finden sich zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Klassenmittel Unterschiede von rund 22 µg/m³. Im Rahmen der hier dargestellten Beispieluntersuchung wurde lediglich das 1.000 hPa Geopotenzialfeld zur Bestimmung der Starkgradient-Bänder verwendet. Es ist ein weiteres methodisches Verbesserungspotenzial zu erwarten, wenn weitere Parameter des Verfahrens variiert werden

- Nutzung eines größeren Pools an Feldgrößen (Prediktoren); Voruntersuchungen zeigen, dass bei gleichbleibender übriger Herangehensweise (Tiefpassfilterung des Felds, Monatsauswahl, Jahresauswahl, Stationsauswahl) mit anderen Feldern aus einem Pool von 60 Prediktoren (vgl. Tabelle 82) ein Unterschied von rund $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zwischen der EURO-String-Klasse mit dem größten und dem kleinsten PM_{10} -Mittelwert erreicht werden kann. Zusätzliches Verbesserungspotenzial dürfte darin liegen, den Pool der potenziellen Prediktoren weiter zu vergrößern und beispielsweise die Möglichkeit zu schaffen, vertikale Stabilität/Labilität einzubeziehen.
- Fokussierung auf die Wintermonate; hier zeigen Voruntersuchungen, dass bei Nutzung der Monate Dezember, Januar und Februar ein Unterschied von rund $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (!) zwischen der EURO-String-Klasse mit dem größten und dem kleinsten PM_{10} -Mittelwert erreicht werden kann. Dies ist ein Indiz dafür, dass es zwar für die Selektion eines Zeitbereichs, in dem die meisten Schwellwertüberschreitungen von PM_{10} -Immissionen auftreten, praktikabel ist, die Monate von Oktober bis April auszuwählen. Andererseits sind aber die atmosphärischen Verhältnisse für dieses 7-Monats-Intervall keineswegs homogen; es beinhaltet das Zirkulationsregime des Winters sowie Teile der Regimes von Herbst und Frühjahr.
- Erweiterung des Verfahrens auf mehrere Prediktoren – in der vorliegenden Form wird nur *ein* Prediktor zur Identifikation der EURO-Strings eingesetzt. Denkbar wäre hier, analog zu KlaMuKo auch mehrere Prediktoren zu nutzen, die beispielsweise per Screening ermittelt werden könnten.

9.3.7 Verifikation von Klassifikationsansätzen

Ein weiterer Aspekt des Zusammenhangs von Extremen und Luftschadstoffen wurde in Untersuchungen betrachtet, die in den Abschnitten 6.2 und 7.2 dokumentiert sind. Die KlaMuKo-Klassifikation der Maximumtemperatur (TX), Minimumtemperatur (TN), des Niederschlages (RR), des Dampfdrucks (DD) und der Windgeschwindigkeit (FF) wurde dabei als Proxy für Extremtage oder -indikatoren verwendet. Mittels Verifikationsverfahren wurde die Vorhersageleistung getestet. Neben der KlaMuKo-Klassifikation wurden auch die automatisierten Großwetterlagen (aGWL) auf ihre Vorhersagefähigkeiten des Auftretens im Klima der Gegenwart getestet.

Der Verifikationsansatz sei an dieser Stelle noch einmal kurz erläutert: Um die Vorhersageleistung der KlaMuKo-Klassifikation bzw. der Zirkulationsmuster der automatisierten Großwetterlagen zu analysieren, wird zunächst angenommen, dass das Eintreten oder Nichteintreten des Extrems (in diesem Fall das Überschreiten eines Immissionsgrenzwertes an mindestens einer Station in Sachsen) durch die jeweilige Klassifikation optimal beschrieben („prognostiziert“) wird. Die Verifikation dieser Beschreibung erfolgt mittels Beurteilungsmaßen, welche aus einer Vierfeldertafel (vgl. Tabelle 3 auf Seite 38) errechnet werden. Für zentrale Aspekte der Verifikation finden sich Beschreibungen in Kapitel 4.3. Die Einträge der Vierfeldertafel stellen gegenüber, wie oft eine Grenzwertüberschreitung des Luftschadstoffes aufgetreten ist und a) vorhergesagt wurde bzw. b) nicht vorhergesagt wurde. Des Weiteren wird die Anzahl der Tage ermittelt, an denen eine Grenzwertüberschreitung nicht auftritt, jedoch c) vorhergesagt wurde bzw. d) auch nicht vorhergesagt wurde. Aus diesem Grundmaterial werden verschiedene Beurteilungsmaße abgeleitet. Auf zwei dieser Maße soll hier eingegangen werden (s. a. S. 38ff):

- Das Prüfmaß FAR (False Alarm Ratio) beschreibt den Anteil der Eintrittsvorhersagen, die sich als falsch herausstellen. **Im günstigsten Fall ist die Zahl der Fehlvorhersagen 0 und somit auch FAR; gibt es nur Fehlvorhersagen, ist FAR = 1. FAR, ist insofern ein besonderes Maß als bei ihm, umgekehrt zu den anderen Verifikationsmaßen, eine gute Vorhersageleistung durch eine Zahl möglichst nahe bei 0 und eine schlechte Vorhersageleistung bei FAR→1 gegeben ist.**

■ Bei der Trefferquote (Hit Rate H) wird das Ergebnis in den Fokus gestellt. Es wird bestimmt, wie häufig das Auftreten und das Nichtauftreten korrekt vorhergesagt wird. Vorhersagen, die gut geeignet sind, zwischen Eintreten und Nichteintreten zu differenzieren, haben eine Trefferquote nahe 1, während ein Wert von 0 auf keinerlei Vorhersageleistung des Verfahrens hinweist.

Aus der Verifikation ist zu ersehen, dass es keine Klassifikation gibt, welche eine insgesamt hohe Vorhersageleistung erbringt. Ein Problem bei der Analyse des Zusammenhangs von Immission und Großwettertyp ist zudem, dass es eine relativ hohe Zahl von „Fehlvorhersagen“ gibt, angezeigt durch FAR-Werte, die z. B. bei $\text{NO}_2 > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $\text{O}_3 > 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verbreitet nahe 1 liegen; deutlich höhere Leistungsfähigkeit, zumindest bei einzelnen GWT, zeigt sich bei $\text{NO}_2 > 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $\text{PM}_{10} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bezüglich der Trefferquote H sind die Werteneiveaus für viele GWT relativ niedrig (unter 0,2), aber es gibt auch Kombinationen aus GWT und Immissions-Indikator, die Hit Rates über 0,2 aufweisen. Dies ist beispielsweise bei $\text{NO}_2 > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und den GWT 1 und 2 der Fall; auch die Kombination $\text{PM}_{10} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und Westlagen oder die Kombination $\text{O}_3 > 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit den Südwestlagen bzw. dem Hoch-Mitteuropa-GWT stellen erkennbare Assoziationen dar. Für die aGWL-Klassifikation (in der Aggregation zu aGWT) als Prediktor für NO_2 -, PM_{10} - und O_3 -Überschreitung sind exemplarisch die jeweiligen FAR- und H-Werte in Tabelle 75 aufgelistet.

Tabelle 75: aGWT-Klassifikation als Prediktor für NO_2 -, PM_{10} - und O_3 -Überschreitung. False Rate Ratio (FAR) und Hit Rate (H) für den Zeitraum 2000–2010

aGWT	$\text{NO}_2 (>200 \mu\text{g}/\text{m}^3)$		$\text{NO}_2 (>100 \mu\text{g}/\text{m}^3)$		$\text{PM}_{10} (>50 \mu\text{g}/\text{m}^3)$		$\text{O}_3 (>180 \mu\text{g}/\text{m}^3)$	
	FAR	H	FAR	H	FAR	H	FAR	H
1 W	0.99	0.29	0.62	0.27	0.83	0.21	1.00	0.09
2 SW	0.98	0.38	0.49	0.15	0.76	0.13	0.97	0.25
3 NW	0.99	0.10	0.76	0.06	0.93	0.03	0.99	0.05
4 HM	1.00	0.05	0.48	0.13	0.69	0.14	0.96	0.27
5 TM	1.00	0.00	0.60	0.03	0.78	0.03	1.00	0.00
6 N	1.00	0.05	0.68	0.14	0.78	0.16	0.99	0.13
7 NE	1.00	0.00	0.76	0.02	0.80	0.03	0.99	0.02
8 E	1.00	0.05	0.63	0.08	0.71	0.11	0.99	0.07
8 SE	1.00	0.00	0.58	0.03	0.55	0.06	0.99	0.02
10 S	0.99	0.10	0.62	0.09	0.77	0.10	0.98	0.11

9.3.8 Vorhersageleistung der aGWL/aGWT-Klassifikation

Die aGWL-Klassifikation und die daraus abgeleitete aGWT-Aggregation eignen sich nur bedingt als „Proxy“ bei der Detektierung von Extremen, seien es solche aus dem Klima- oder dem Luftqualitäts-Bereich (dort quantifiziert in Form der Zahl der Tage mit Schwellwert-Überschreitungen). Andere Klassifikationen (Dittmann, WEREX) zeigen bei der Beschreibung derartiger Extreme auch keine durchweg hohe Vorhersageleistung (s. Abschnitt 4). Betrachtet man den Zeitraum 2000 bis 2010 (11 Jahre), so sind die relativ höchsten Trefferquoten für die aGWT (vgl. gelbe Markierungen in Tabelle 70):

$\text{NO}_2 > 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ W (27 %; 417 von 1544), SW (15 %; 232 von 1544) und HM (13 %; 205 von 1544)
 $\text{NO}_2 > 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ W (29 %; 6 von 21) und SW (38 %; 8 von 21)
 O_3 SW (25 %; 14 von 56) und HM (27 %; 15 von 56)

Grenzwerte werden nur selten an Tagen der Großwettertypen Nordost (NE) und TM (Tief Mitteleuropa) überschritten. Verhältnismäßig häufig treten Überschreitungen bei W-, SW-, HM- und N-Wetterlagen auf. Hier ist zu beachten, dass für einige Lagen schon wegen der relativ hohen Grundhäufigkeit eine größere Zahl von Überschreitungen auftritt.

9.3.9 Vorhersageleistung der KlaMuKo-Klassifikation

Die Schadstoffsituation scheint durch die KlaMuKo-Klassifikation relativ gut beschrieben werden zu können, jedoch ist die Präferenz für bestimmte Klassen auch durch die Vorsortierung (Optimierung auf Stationsgruppen beispielsweise mit hohen/niedrigen Temperatur- oder Niederschlags- oder Dampfdruckwerten) zu begründen. Das KlaMuKo-Verfahren identifiziert maximal separierte Muster der Regressionskoeffizienten und damit unterschiedlich gruppierte Klimazustände. Hierin unterscheidet es sich, wie schon an anderer Stelle ausgeführt, von Klassifikationen, die anstreben, den *mittleren* Zustand zu beschreiben, wie z. B. Großwetterlagen. Ein zusätzlicher Aspekt ist, dass die KlaMuKo-Klassen sehr unterschiedliche relative Häufigkeiten aufweisen. So sind beispielsweise drei Klassen der Maximumtemperatur im Jahr kleiner 1 %. Die Trefferquoten sind dadurch meist höher und die Fälle mit hohen Immissionen sind auf weniger Klassen verteilt als es beispielsweise bei der aGWL-Klassifikation der Fall ist. Trefferquoten größer 20 % sind auf ein bis drei Klassen verteilt – mindestens vier Klassen sind zudem nicht relevant für die Beschreibung. Zum Vergleich der aGWT- und KlaMuKo-Klassifikation eignet sich die Tatsache, dass man jeweils zehn Klassen betrachtet. Ausnahme ist die Windgeschwindigkeit. Bei der Windgeschwindigkeit wurden durch das KlaMuKo-Verfahren für das gesamte Jahr nur neun Klassen gebildet.

Während in Tabelle 70 das gleichzeitige Auftreten von aGWT und Tagen mit Grenz- bzw. Zielwertüberschreitungen von Luftschadstoffen analysiert wurde, ist in den Tabelle 76 bis Tabelle 80 das gemeinsame Auftreten von Tagen der KlaMuKo-Klassifikation bezüglich der Maximum-Temperatur (Stations-Selektion HiMax, vgl. Tabelle 5), resp. Minimumtemperatur (Stations-Selektion HiMin, vgl. Tabelle 5), Niederschlag an den Klima- und Niederschlagsstationen (Stations-Selektion HiNied, vgl. Tabelle 5), Dampfdruck (Stations-Selektion HiDD, vgl. Tabelle 5) und Tagesmittel der Windgeschwindigkeit (Stations-Selektion HiWind, vgl. Tabelle 5) jeweils mit Grenz- bzw. Zielwertüberschreitungen von Luftschadstoffen wiedergegeben. Sie liefern die Informationsbasis für die Luftschadstoff-bezogenen Spalten in der zweiten bis sechsten Teiltabelle von Tabelle 81.

Es kommt vor, dass für die KlaMuKo-Klassen bei den Häufigkeitsangaben in den zweiten Spalten von Tabelle 76 bis Tabelle 80 Einträge von 1 oder 0 erscheinen. Das liegt daran, dass die Erstellungsgrundlage für diese Klassen der Zeitraum 1971–2000 war, aber in den Tabellen wegen der Verfügbarkeit der Luftqualitätsdaten die Häufigkeit im Zeitraum 2000–2010 ausgewertet wurde und einige Klassen in diesem Zeitraum nur einen Fall enthielten oder unbesetzt blieben.

Tabelle 76: Wie Tabelle 70, aber mit der KLaMuKo TX-Klassifikation für die Stationsselektion HiMax. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.

TX Klasse	Häuf _{TX}	NO _{2/100}			NO _{2/200}			O _{3/180}			PM _{10/50}		
		Häuf	Proz _{TX}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{TX}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{TX}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{TX}	Proz _{alle}
1	1	0	-	-	0	-	-	0	-	-	1	100,0	0,0
2	5	3	60,0	0,1	0	-	-	2	40,0	0,1	1	20,0	0,0
3	19	13	68,4	0,3	0	-	-	0	-	-	9	47,4	0,2
4	353	47	13,3	1,2	0	-	-	0	-	-	19	5,4	0,5
5	629	236	37,5	5,9	6	1,0	0,2	0	-	-	175	27,8	4,4
6	952	411	43,2	10,2	2	0,2	0,1	42	4,4	1,1	166	17,4	4,1
7	1059	420	39,7	10,5	7	0,7	0,2	1	0,1	0,0	284	26,8	7,1
8	97	36	37,1	0,9	0	-	-	0	-	-	22	22,7	0,6
9	334	206	61,7	5,1	6	1,8	0,2	11	3,3	0,3	122	36,5	3,0
10	568	172	30,3	4,3	0	-	-	0	-	-	70	12,3	1,7
Σ	4018	1544			21			56			869		

Tabelle 77: Wie Tabelle 70, aber mit der KLaMuKo TN-Klassifikation für die Stationsselektion HiMin. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.

TN Klasse	Häuf _{TN}	NO _{2/100}			NO _{2/200}			O _{3/180}			PM _{10/50}		
		Häuf	Proz _{TN}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{TN}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{TN}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{TN}	Proz _{alle}
1	1	0	-	-	0	-	-	0	-	-	1	100,0	0,0
2	12	8	66,7	0,2	0	-	-	3	25,0	0,1	1	8,3	0,0
3	580	205	35,3	3,4	5	0,9	0,1	0	-	-	137	23,6	3,4
4	9	2	22,2	0,1	0	-	-	0	-	-	1	11,1	0,0
5	91	64	70,3	1,6	3	3,3	0,1	6	6,6	0,2	40	44,0	1,0
6	46	24	52,2	0,6	0	-	-	0	-	-	21	45,7	0,5
7	1049	460	43,9	11,5	2	0,2	0,1	46	4,4	1,1	209	19,9	5,2
8	924	345	37,3	8,6	6	0,7	0,2	0	-	-	236	25,5	5,9
9	857	204	23,8	5,1	1	0,1	0,0	0	-	-	80	9,3	2,0
10	449	232	51,7	5,8	4	0,9	0,1	1	0,2	0,0	143	31,9	3,6
Σ	4018	1544			21			56			869		

Tabelle 78: Wie Tabelle 70, aber mit der KLaMuKo RR-Klassifikation für die Stationsselektion HiNied (Klima- und Niederschlagsstationen). Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.

RR Klasse	Häuf _{RR}	NO _{2/100}			NO _{2/200}			O _{3/180}			PM _{10/50}		
		Häuf	Proz _{RR}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{RR}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{RR}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{RR}	Proz _{alle}
1	895	301	33,6	7,5	3	0,3	0,1	1	0,1	0,0	153	17,1	3,8
2	4	2	50,0	0,1	0	-	-	0	-	-	0	-	-
3	123	50	40,7	1,2	2	1,6	0,1	0	-	-	35	28,5	0,9
4	2	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-
5	603	313	51,9	7,8	8	1,3	0,2	33	5,5	0,8	198	32,8	4,9
6	262	74	28,2	1,8	0	-	-	0	-	-	38	14,5	1,0
7	1155	495	42,9	12,3	6	0,5	0,2	11	1,0	0,3	261	22,6	6,5
8	401	74	18,5	1,8	1	0,3	0,0	0	-	-	39	9,7	1,0
9	426	199	46,7	4,9	1	0,3	0,0	10	2,4	0,3	125	29,3	3,1
10	147	36	24,5	0,9	0	-	-	1	0,7	0,0	20	13,6	0,5
Σ	4018	1544			21			56			869		

Tabelle 79: Wie Tabelle 70, aber mit der KLaMuKo DD-Klassifikation für die Stationsselektion HiDD. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.

DD Klasse	Häuf _{DD}	NO _{2/100}			NO _{2/200}			O _{3/180}			PM _{10/50}		
		Häuf	Proz _{DD}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{DD}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{DD}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{DD}	Proz _{alle}
1	5	0	-	-	0	-	-	0	-	-	4	80,0	0,1
2	140	77	55,0	1,9	1	0,7	0,0	16	11,4	0,4	36	25,7	0,9
3	88	17	19,3	0,4	0	-	-	0	-	-	10	11,4	0,3
4	44	12	27,3	0,3	0	-	-	0	-	-	5	11,4	0,1
5	467	178	38,1	4,4	0	-	-	11	2,4	0,3	83	17,8	2,1
6	932	364	39,1	9,1	5	0,5	0,1	0	-	-	255	27,4	6,4
7	516	267	51,7	6,7	5	1,0	0,1	27	5,2	0,7	126	24,4	3,1
8	369	132	35,8	3,3	0	-	-	0	-	-	77	20,9	1,9
9	848	206	24,3	5,1	1	0,1	0,0	0	-	-	81	9,6	2,0
10	609	291	47,8	7,2	9	1,5	0,2	2	0,3	0,1	192	31,5	4,8
Σ	4018	1544			21			56			869		

Tabelle 80: Wie Tabelle 70, aber mit der KLaMuKo FF-Klassifikation für die Stationsselektion HiWind. Relativ hohe Trefferquoten einzelner Klassen sind gelb gekennzeichnet.

FF Klasse	Häuf _{FF}	NO _{2/100}			NO _{2/200}			O _{3/180}			PM _{10/50}		
		Häuf	Proz _{FF}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{FF}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{FF}	Proz _{alle}	Häuf	Proz _{FF}	Proz _{alle}
1	25	12	48,0	0,3	0	-	-	3	12,0	0,1	3	12,0	0,1
2	0	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-
3	374	188	50,3	4,6	7	1,9	0,2	0	-	-	169	45,2	4,2
4	1	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-
5	46	12	26,1	0,3	0	-	-	0	-	-	5	10,9	0,1
6	197	43	21,8	1,1	1	0,5	0,0	2	1,0	0,1	15	7,6	0,4
7	722	310	42,9	7,7	5	0,7	0,1	0	-	-	236	32,7	5,9
8	360	65	18,1	1,6	0	-	-	0	-	-	29	8,1	0,7
9	2293	914	39,9	22,8	8	0,4	0,2	51	2,2	1,3	412	18,0	10,3
Σ	4018	1544			21			56			869		

Zusammenfassend sind besonders hohe Trefferquoten für die KLaMuKo-Klassifikationen aufgelistet und in den entsprechenden Tabellen gelb gekennzeichnet:

NO₂ > 100 µg/m³ HiMax Kl. 6 (27 %; 411 von 1544), HiMax Kl. 7 (27 %; 420 von 1544), HiMin Kl. 7 (30 %; 460 von 1544), HiNied Kl. 7 (32 %; 495 von 1544) und HiWind Kl. 9 (59 %; 914 von 1544)

NO₂ > 200 µg/m³ HiMax Kl. 5 (29 %; 6 von 21), HiMax Kl. 7 (33 %; 7 von 21), Hi Max Kl. 9 (29 %; 6 von 21); LoMax Kl. 8 (29 %; 6 von 21), HiNied Kl. 5 (38 %; 8 von 21), HiNied Kl. 7 (29 %; 6 von 21), HiDD Kl. 10 (43 %; 9 von 21) und HiWind Kl. 9 (38 % 8 von 21)

O₃ HiMax Kl. 6 (75 %; 42 von 56), HiMin Kl. 7 (82 %; 46 von 56), HiNied Kl. 5 (59 %; 33 von 56), HiDD Kl. 2 (29 %; 16 von 56), HiDD Kl. 7 (48 %; 27 von 56), HiWind Kl. 9 (91 %; 51 von 56)

PM₁₀ HiMax Kl. 7 (33 %; 284 von 869), HiMin Kl. 8 (27 %; 236 von 869), HiNied Kl. 7 (30 %; 261 von 869), HiDD Kl. 6 (29 %; 255 von 869), HiWind Kl. 7 (27 %; 236 von 869) und HiWind Kl. 9 (47 %; 412 von 869)

Auffallend ist der Zusammenhang zwischen Ozonüberschreitungen und warmen Klassen der Minimum- und Maximumtemperatur sowie mit niederschlagsarmen Klassen (Tabelle 81; dort gekennzeichnet durch ein Plus). Dazu kommt es zu einem erhöhten Auftreten kritischer Ozonkonzentrationen während Heißer Tage und Tagen mit hohem Dampfdruck. Die gleiche Beziehung zwischen KLaMuKo-Klassen und den Überschreitungen von Immissionswerten zeigt sich für die Niederschlagsklassen. Zwei Klassen mit geringen Niederschlägen

werden bevorzugt bestimmt, der Eintrag von Schadstoffen durch Niederschlag ist dadurch minimiert. Der Zusammenhang von Luftschadstoffen und der Klasse 9 der KlaMuKo-Klassifikation für die Windgeschwindigkeit ist durch die überdurchschnittlich hohen relative Häufigkeit der Klasse von 57 % gegeben. Ein erwarteter Zusammenhang mit Klassen, die geringe Windgeschwindigkeiten enthalten, lässt sich hingegen nicht ablesen.

Um auf regionale Unterschiede einzugehen, wurden die KlaMuKo-Klassen der Maximum- und Minimumtemperaturen sowie der Dampfdrücke nicht nur für die hohen (Hi) Untermengen der Parameter, sondern auch die niedrigen (Lo, im Bericht nicht tabelliert) untersucht. Diese zwei Stationsgruppen lassen sich im Grunde aus den Höhenverhältnissen ableiten (Flachland- und Bergstationen, vgl. Tabelle 5). Für die beiden Untermengen ergaben sich jedoch gleiche Tendenzen und Zusammenhänge.

9.4 Zukunftstendenzen der Auftrittswahrscheinlichkeit von Grenz- bzw. Zielwertüberschreitungen

Die zukünftige Entwicklung der Luftschadstoffe ist nur schwer zu projizieren. Randbedingungen wie die wirtschaftliche Entwicklung haben großen Einfluss auf die Luftqualität der Zukunft. Neben diesem Wirkkomplex sind atmosphärische Faktoren, eingebracht durch Szenarios und Projektionen, zwar durchaus bedeutsam, jedoch mit Unsicherheit behaftet. Es ist dennoch möglich, Aussagen zum *Potenzial*, dass Schadstoffimmissions-relevante Situationen auftreten, zu treffen.

Neben den o. a. Randbedingungen haben unterschiedliche meteorologische Bedingungen einen Einfluss auf die zwischenjährlichen Schwankungen der Luftbelastung. Eingedenk dieser Zusammenhänge ist es lohnend, Untersuchungen zu den relevanten Entwicklungen vorzunehmen. Aussagen zu Luftqualitätsentwicklungen im zukünftigen Klima sind zum einen aus der Klimaentwicklung von Zirkulationsmustern, Temperatur und dem Niederschlag indirekt abzuleiten. Dafür wurden für die aGWL-Klassifikation Langzeittrends bestimmt, um unter der Voraussetzung unveränderter Emissionen und Vorläufersubstanzen die Potenziale für die Zukunft abzuschätzen (vgl. Abbildung 8). Des Weiteren wurde die Differenz der absoluten Häufigkeit der Zeiträume 2021–2050, 2041–2071 und 2071–2100 zum Referenzzeitraum 1971–2000 berechnet und in die Bewertung der Entwicklung eingeschlossen.

Wie sind die Einträge in Tabelle 81 zu interpretieren? Am Beispiel der Einträge im ersten Teil (bezüglich der aGWT-Klassifikation) seien diese erläutert: Es befindet sich immer dann ein Pluszeichen in den Spalten der Luftschadstoffe, wenn die Diagramme in Abbildung 60 bzw. Abbildung 61 auf relativ hohe Häufigkeiten in der Gegenwart (!) hinweisen. Das Plus- oder Minuszeichen steht in Klammern, wenn diese Assoziation relativ gering ist. Basis der Information in der Spalte „Klimaentwicklung“ von Tabelle 81 ist die in Abbildung 8 vorgestellte Analyse von drei GCM-Läufen. Sie zeigt an, ob die aGWL sich in Klimaprojektionen mit zunehmender/abnehmender Tendenz wiederfinden. Ob sich die Zielgröße (Grenz- bzw. Zielwertüberschreitung bei einem Luftschadstoff) *potenziell* in der Zukunft ändert oder nicht, hängt von einem Zusammentreffen (i) der Assoziation der jeweiligen aGWL/aGWT mit der Zielgröße und (ii) einer erkennbaren zukünftigen Entwicklung der Häufigkeit dieser aGWL/aGWT in einem GCM ab. Dieses Zusammentreffen ist bei den Luftschadstoffen in Einzelfällen zu erkennen.

Bezüglich der Häufigkeitsveränderungen der Großwettertypen kann ein zunehmender Trend für den aGWT „West“ und ein abnehmender Trend für die Nord- und Süd-Zirkulation konstatiert werden. Die Information findet sich in Spalte „Klimaentwicklung“ von Tabelle 81, dort gekennzeichnet durch ein Plus oder Minus. Eine

positive Tendenz von geringerem Ausmaß, gekennzeichnet durch die eingeklammerten Symbole, konnte für den Typen Südwest (+) und Tief Mitteleuropa (+) ausgemacht werden. Dies könnte ein erhöhtes Potenzial für NO₂- und O₃-Überschreitungen bedeuten, die beiden Schadstoffe weisen einen positiven Zusammenhang + mit der Zirkulationsform West bzw. Südwest auf. Der Zusammenhang ist über die Hit Rate (H) definiert. Eine nicht vorhandene Vorhersageleistung wird durch ein Minus gekennzeichnet, ein geringer Zusammenhang (+) besteht bei einer Hit Rate zwischen 0,20 und 0,24 und ein sehr starker Zusammenhang ++ bei einer Trefferquote größer 0,5.

Teil 2 bis 6 der Tabelle 81 beziehen sich auf Änderungen der Häufigkeit der entsprechenden Temperatur-, Dampfdruck und Windextreme. Der beobachtete relativ deutliche Zusammenhang zwischen Ozonüberschreitungen und warmen Klassen der Minimum- und Maximumtemperatur sowie mit niederschlagsarmen Klassen und Klassen mit hohem Dampfdruck ist in Tabelle 81 durch orange unterlegte Zellen gekennzeichnet. Besagte Klassen weisen zudem einen Anstieg der absoluten Häufigkeit (nicht im Bericht dargestellt) in den drei Klimaszenarien A1B, A2 und B1 auf. Unter der Prämisse gleichbleibender Bedingungen (z. B. bezüglich Ökonomie und Technologie) ist demnach das *Potenzial* für Ozon-Konzentrationen zukünftig höher einzuschätzen. Für andere Schadstoffe und Klassifikationen sind die Zusammenhänge nicht annähernd so gut erkennbar.

Zusätzlich wurde die zukünftige Entwicklung der Häufigkeit der Überschreitungen von PM₁₀-Grenzwerten mit Hilfe des KlaMuKo-Verfahrens in den drei Klimamodell-Szenarien A1B, A2 und B1 analysiert (im Bericht nicht dargestellt). Dazu wurden Zeitreihen der täglichen Auftrittswahrscheinlichkeit hoher PM₁₀-Konzentrationen berechnet und für die drei Klimaprojektionen bis 2100 untersucht, welche Tendenzen zu erwarten sind. Die mit dem Klimawandel verbundenen zeitlichen Veränderungen der Extreme werden, wie im Abschnitt 7, durch den Vergleich der Klimastatistiken von 30-jährigen Zeiträumen (2021–2051, 2041–2071 und 2071–2100; Klimaprojektionen) mit dem Referenzzeitraum 1971–2000 bewertet. Die Analyse der absoluten Häufigkeit ergab, dass zeitlichen Veränderungen der PM₁₀-Überschreitungen oft relativ gering sind und unterschiedlich gruppierte Zustände teils entgegengesetzte zeitliche Veränderungen zeigten (vgl. Teilabschnitt 7.2.13).

Tabelle 81: Zusammenhang (4 Spalten rechts) und zukünftige Entwicklung der Großwettertypen der GWL-Klassifikation und der KlaMuKo-Klassifikation der Maximumtemperatur (Stationsselektion HiMax), Minimumtemperatur (Stationsselektion HiMin), des Niederschlages (Stationsselektion HiNied), Dampfdruckes (Stationsselektion HiDD) und der Windgeschwindigkeit (Stationsselektion HiWind) in Bezug auf die Grenzwertüberschreitungen von NO₂, PM₁₀ und O₃. Gemeinsames Auftreten von deutlichen Zukunftsveränderungen und gut ausgeprägter Assoziation einer Klasse mit einem Luftschadstoff-Überschreitungskriterium sind orange unterlegt.

aGWL (Typen)	Charakteristik		relative Häufigkeit (1971-2000 / 2000-2010)	Klima-Entwicklung	NO ₂ (200)	NO ₂ (100)	PM ₁₀	O ₃
1	W	West	25,9 / 27,0	+	+	+	(+)	
2	SW	Südwest	11,1 / 11,3	(+)	+			+
3	NW	Nordwest	8,5 / 9,0				-	-
4	HM	Hoch Mitteleuropa	10,5 / 9,9		-			+
5	TM	Tief Mitteleuropa	3,3 / 2,5	(+)	-	-	-	-
6	N	Nord	16,0 / 16,1	-	-			
7	NE	Nordost	3,6 / 3,6		-	-	-	-
8	E	Ost	7,4 / 8,5		-			
9	SE	Südost	3,1 / 2,9		-	-		-
10	S	Süd	10,5 / 9,3	-				

HiMax	Charakteristik		relative Häufigkeit (1971-2000 / 2000-2010)	Klima- entwicklung	NO ₂ (200)	NO ₂ (100)	PM ₁₀	O ₃
1	kalt	--	0,0 / 0,0		-	-	-	-
2	warm	++	0,0 / 0,1	+	-	-	-	-
3	∅	(+)	0,5 / 0,5	+	-	-	-	-
4	∅	(+)	10,1 / 8,8	--	-	-	-	-
5	kalt	-	16,2 / 15,7	--	+		(+)	-
6	warm	+	21,4 / 23,7	++		+		++
7	∅	(-)	26,1 / 26,3	++	+	+	+	-
8	kalt	-	2,2 / 2,4	-	-	-	-	-
9	warm	(+)	8,1 / 8,3	++	+			(+)
10	∅	0	15,3 / 14,2	--	-		-	-
HiMin	Charakteristik		relative Häufigkeit (1971-2000 / 2000-2010)	Klima- entwicklung	NO ₂ (200)	NO ₂ (100)	PM ₁₀	O ₃
1	kalt	--	0,1 / 0,0		-	-	-	-
2	warm	++	0,1 / 0,3	+	-	-	-	-
3	kalt	(0)	13,9 / 14,4	++	(+)	-	-	-
4	kalt	-	0,2 / 0,2		-	-	-	-
5	warm	+	1,8 / 2,3	+	-	-	-	-
6	kalt	-	0,6 / 1,1	(-)	-	-	-	-
7	warm	++	22,2 / 26,1	++	-	+	(+)	++
8	kalt	-	24,4 / 23,0	--	+	(+)	+	-
9	∅	0	25,9 / 21,3	--	-	-	-	-
10	∅	0	10,7 / 11,2	++	-	-	-	-
HiNied	Charakteristik		relative Häufigkeit (1971-2000 / 2000-2010)	Klima- entwicklung	NO ₂ (200)	NO ₂ (100)	PM ₁₀	O ₃
1	∅	0	33,5 / 22,3	(-)	-	-	-	-
2	∅	0	0,0 / 0,1		-	-	-	-
3	wenig RR	--	2,7 / 3,1	(+)	-	-	-	-
4	viel RR	++	0,1 / 0,1		-	-	-	-
5	wenig RR	-	8,3 / 15,0	+	+	(+)	(+)	++
6	viel RR	+	6,2 / 6,5	□ (-)	-	-	-	-
7	wenig RR	-	29,1 / 28,8	(+)	+	+	+	(+)
8	viel RR	+	9,8 / 10,0	(-)	-	-	-	-
9	∅	0	8,3 / 10,6	(+)	-	-	-	(+)
10	viel RR	+	2,0 / 3,7		-	-	-	-
HiDD	Charakteristik		relative Häufigkeit (1971-2000 / 2000-2010)	Klima- entwicklung	NO ₂ (200)	NO ₂ (100)	PM ₁₀	O ₃
1	niedriger DD	--	0,2 / 0,1		-	-	-	-
2	hoher DD	+	2,4 / 3,5	+	-	-	-	+
3	∅	0	2,6 / 2,2	+	-	-	-	-
4	niedriger DD	-	1,2 / 1,1	-	-	-	-	-
5	hoher DD	+	11,2 / 11,6	++	-	-	-	(+)
6	niedriger DD	-	23,4 / 23,2	--	(+)	+	+	-
7	hoher DD	+	10,2 / 12,8		(+)	(+)	-	+
8	∅	0	8,9 / 9,2	++	-	-	-	-
9	∅	0	25,2 / 21,1	--	-	-	-	-
10	niedriger DD	-	14,8 / 15,2	+	+	(+)	(+)	-

HiWind	Charakteristik		relative Häufigkeit (1971-2000 / 2000-2010)	Klima- entwicklung	NO ₂ (200)	NO ₂ (100)	PM ₁₀	O ₃
1	wenig FF	--	0,6 / 0,6		-	-	-	-
2	starke FF	+	0,0 / 0,0	(+)	-	-	-	-
3	wenig FF	-	9,1 / 9,3	-	+	-	-	-
4	starke FF	+	0,0 / 0,0	(+)	-	-	-	-
5	wenig FF	(-)	1,4 / 1,1		-	-	-	-
6	starke FF	+	4,8 / 4,9	+	-	-	-	-
7	∅	0	18,0 / 18,0	-	(+)	(+)	+	-
8	starke FF	+	9,3 / 9,0	+	-	-	-	-
9	∅	0	56,9 / 57,1		+	++	++	++

9.5 Fazit

Diagnostisch, d. h. mit Bezug zum Klima der Gegenwart, haben die in KLIWETT erarbeiteten Klassifikationsmethoden KlaMuKo und, als Test für PM₁₀ durchgeführt, die EURO-Strings das Potenzial, die mittleren Immissionen der analysierten Luftschadstoffe gut und nachvollziehbar zu beschreiben. Dies gilt insbesondere für NO₂ und PM₁₀.

Es darf dabei nicht übersehen werden, dass die Länge der Immissionszeitreihen unter den für klimatologische Untersuchungen üblichen 30 Jahren liegt. Zudem gab es in diesem Zeitraum Veränderungen in Umfang und Zusammensetzung des Messnetzes. Ein weiterer zu beachtender Faktor ist, dass es auf Grund einer Kombination von technologischen, wirtschaftlichen und umweltpolitischen Entwicklungen im Zeitraum der Messungen Trendentwicklungen bei den Immissionen gab. Diese genau und belastbar zu bestimmen, ist aber wegen der starken Variabilität der Immissionen und der relativ geringen Länge der Zeitreihen schwierig.

Bezüglich der Extreme wurde als Indikator die Zahl von schadstoffspezifischen Grenz- bzw. Zielwert-Überschreitungen analysiert. Eine der Untersuchungen nutzte die objektivierte Rekonstruktion (aGWT) der Hess/Brezowsky-Großwetterlagen und Großwettertypen (HBGWT) in Kombination mit den Überschreitungen. Dabei zeigen sich für einige Klassen gute Trefferquoten.

Es darf dabei nicht übersehen werden, dass, bei aller angestrebten Genauigkeit, manuelle Klassifikationsverfahren, wie sie bezüglich der Großwetterlagen und Großwettertypen nach Hess/Brezowsky zum Einsatz kommen, Inkonsistenzen und Inkonsequenzen besitzen. Des Weiteren ist das Ziel einer solchen Klassifikation die Beschreibung der Zirkulation für Gesamt-Europa – anhand der Position der jeweils wirksamen atmosphärischen Steuerungszentren. Für eine Teilregion ist diese Klassifikation nicht immer adäquat. Eine Objektivierung der Hess/Brezowsky-Klassifikation beseitigt dabei einige, aber eben nicht alle Problemquellen. Dennoch ist ein objektives, automatisierbares Klassifikationsverfahren unabdingbar für die Analyse von Zukunftsentwicklungen wie sie von dynamischen Klimamodellen simuliert werden.

Bezüglich der zukünftigen Entwicklung von Luftschadstoff-Immissionen, abgeleitet aus der simulierten Entwicklung der Häufigkeit von Zirkulationsmustern, ist ein Zusammentreffen von zwei Faktoren notwendig: Das betrachtete Muster oder die betrachtete Unterteilung infolge einer Klassifikation muss einerseits in den Simulationen einen gut erkennbaren Trend über die Zeit besitzen und andererseits muss, aus der Diagnostik der Gegenwartsverhältnisse bestimmt, eine gute Assoziation des betrachteten Musters mit den Immissionen be-

stehen. Dies ist für mehrere, aber nicht alle Klassen der im Rahmen von KLIWETT angewandten oder entwickelten Methoden aGWT, KlaMuKo oder EURO-Strings der Fall.

Es darf dabei nicht übersehen werden, dass Luftschadstoff-Immissionen und deren zukünftige Entwicklungen von einem komplexen Wirkgeflecht abhängig sind. Der Einfluss des Klimas ist dabei gleichrangig mit Entwicklungen technischer, ökonomischer oder umweltpolitischer Natur. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass Betrachtungen zukünftiger Immissionsverhältnisse konzeptionell als Potenziale erfolgen. Der Leitgedanke ist: *Welche Immissionen stellen sich bei als gleich bleibend angenommenen Emissionen in Folge der zukünftigen Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation ein.*

KLIWETT hat bezüglich der Schnittstelle von atmosphärischer Zirkulation, Klimadiagnostik, Klimaprojektionen und regionalen Extremen der Immissionen von Luftschadstoffen Folgendes erarbeitet: Auf der einen Seite wurden das Potenzial und die Erfolgsaussicht statistischer Methodiken beleuchtet und auf der anderen Seite wurden einige Herausforderungen aufgezeigt, denen möglicherweise durch eine Kombination aus Einbeziehung von Wirtschafts-Entwicklungsszenarios, Technikfolgen-Abschätzungen sowie der Weiterentwicklungen der klimatologischen Methodiken, z. B. KlaMuKo, EURO-Strings oder eine stärker regional fokussierte Zirkulations-Klassifikation, begegnet werden kann.

10 Zusammenfassung

10.1 Übersicht

Das Vorhaben KLIWETT nähert sich dem Problemfeld Klimaentwicklung und Extreme auf verschiedenen Wegen und für verschiedene lokale, Klimafolgen-relevante Indikatoren. Leitgedanke ist, dass bisher eingesetzte Analyseverfahren tendenziell eher dazu geeignet sind, den *mittleren Klimazustand* und seine zukünftigen Veränderungen zu beschreiben, während die Beschreibung von *Extremen* neue Strategien erfordert.

In den einzelnen Phasen wurde der folgende systematische Weg beschritten:

- Identifikation von relevanten Extrem-Indikatoren durch Befragung spezifischer Nutzer in Landesbehörden
- Literaturstudie zu international genutzten und standardisierten Extrem-Indikatoren
- Analyse der Reproduzierbarkeit von Extrem-Indikatoren durch Klassifikationsverfahren für Zirkulationsmuster (Hess-Brezowsky-Großwetterlagen [HBGWL], Dittmann-WLK und WEREX)
- Erstellung eines Katalogs von Episoden, in denen im Zeitraum 1971–2010 für verschiedene atmosphärische Parameter in Sachsen Extreme auftraten
- Entwicklung einer algorithmisch-objektivierte Fassung (aGWL) der von Hess und Brezowsky entwickelten subjektiv-empirischen Großwetterlagenklassifikation mit dem Ziel, eine HBGWL-kompatible Betrachtungsweise für Klimamodell-Projektionen zu schaffen
- Analyse der Reproduzierbarkeit von Extrem-Indikatoren durch die neu geschaffenen aGWL
- Entwicklung eines völlig neuartigen Klassifikationssystems (KlaMuKo), das in der Lage ist, Muster herauszuarbeiten, die mit Extremen in Verbindung stehen; im Zuge dessen erfolgte eine Neukonzeptionierung des Musterbegriffs mit der Ausweitung auf Konfigurationen von Korrelationsgrößen

- Dokumentation der Reproduzierbarkeit von Extrem-Indikatoren durch die KlaMuKo-Klassifikation, inklusive einer validierenden Betrachtung der Methodenanwendung auf Reanalyse-Daten und GCM-Resimulationen des Gegenwartsklimas sowie einer Betrachtung der von einem GCM projizierten zukünftigen Änderungen von Extrem-Indikatoren
- Weiterführung und Neukonzeptionierung von Ansätzen zur Beschreibung von Zirkulationseigenschaften der mittleren Breiten mit Bezug zu Blocking und Achsen von starken Gradienten verschiedener großräumiger Atmosphärengrößen (Stichwort: Neue NAO-Indizes)
- Spezifische extrembezogene Analysen mit Fokus auf die Luftqualität

10.2 Grundlagen und diagnostisch gewonnenes Material

Im Zuge des Vorhabens wurde ein **umfangreicher Bestand an Grundlagen zu Extremen** geschaffen. Dazu gehört ein Apparat **Extrem-Indikatoren mit Blick auf Kompatibilität zu internationalen Standards** nebst Vorschlägen zu einer problemstellungsrelevanten Selektion von Indikatoren; dazu gehört auch ein **diagnostisch gewonnener Katalog von Extremepisoden** bezüglich atmosphärischer Eigenschaften (z. B. Hitze, Frost, Trockenheit, Starkniederschlag) sowie bezüglich Hochwasser und Luftqualität. Die Selektion der dokumentierten Extremepisoden erfolgte mit Blick auf deren **Relevanz für eine Vielzahl von Nutzern**.

10.3 Zirkulationsmuster-Klassifikationen und regionale Extreme

Über dieses Basismaterial hinaus wurden umfangreiche Studien der **Beziehungen zwischen großräumigen atmosphärischen Eigenschaften und lokalen/regionalen Extremen** von meteorologischen Parametern durchgeführt. Dazu gehörten Analysen und Einschätzung, inwieweit verbreitet genutzte Klassifikationsmethoden von Zirkulationsmustern geeignet sind, die gesuchte Verbindung zwischen großräumiger Skala und regionalen Extremen adäquat abzubilden. Kernaussagen:

- Es wurde konstatiert, dass verbreitet genutzte Klassifikationen herkömmlichen Typs (subjektiv-empirische Großwetterlagen, objektive Dittmann-Klassifikation, objektive WEREX-Klassifikation) zwar ihre Meriten bei der Beschreibung von mittleren Atmosphärenzuständen besitzen, diese als Proxy für Extremindikatoren jedoch nur eine geringe Leistungsfähigkeit aufweisen
- Auch eine eigens weiterentwickelte Objektivierung der Großwetterlagen-Klassifikation erbrachte keine klare Verbesserung der Beschreibung von regionalen Extremen, wiewohl sie den Nutzer in die Lage versetzt, ein Derivat der Hess-Brezowsky-Klassifikation im Kontext von Klimaprojektionen einzusetzen

10.4 Neuentwicklung einer extrembezogenen Klassifikation: KlaMuKo

Hierfür war zunächst erforderlich, den Begriff des „Musters“ in erweiterter Form zu definieren – traditionell wird ein Muster mit einer morphologisch gefassten Betrachtungsweise assoziiert. Bei der Art von Muster, die mit **KlaMuKo** (Klassifikation durch multiple Korrelation) konzipiert wurde, geht es vielmehr um großräumige Eigenschaften von atmosphärischen Feldern und ihre Relevanz für die Beschreibung regionaler atmosphäri-

scher Parameter. Die Regressionsanalyse liefert dazu einen Apparat an Werkzeugen, mit denen eine regionale Größe X durch „Stellvertretergrößen“ Re_y beschrieben wird. So kann z. B. die regionale Temperatur oft mit sehr hoher Güte durch die relative Topografie (atmosphärische Schichtdicke) umschrieben werden. Mit Hilfe der schrittweisen multiplen Regression konnte die Beschreibung optimiert werden – mehrere großräumige atmosphärische Größen beschreiben einen regionalen meteorologischen Parameter. Die Beträge dieser Beschreibungsgrößen ändern sich von Tag zu Tag und der Begriff des „Musters“ wird so definiert, dass mit einem objektiven Klassifikationsverfahren charakteristische, wiederkehrende Konfigurationen der Re_y gesucht werden. Im Grunde ist KlaMuKo eine Abfolge von **Regressions- und Clusteranalyse**.

Die KlaMuKo-Methodik wurde in einem ersten Schritt zur Klassifikation der lokalen meteorologischen Parameter Maximumtemperatur, Mitteltemperatur, Minimumtemperatur, Niederschlag, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit eingesetzt. Des Weiteren erfolgten KlaMuKo-Klassifikationen von Extremindikatoren aus den Bereichen Trockenheit, Hochwasser, Starkniederschlag, Hitze, Frost, Starkwind, Schwüle und Luftqualität sowie kombinierten Indikatoren für trocken-warme und niederschlagsreich-kalte Ereignisse.

Für die Analyse zukünftiger Entwicklungen wurden Projektionen des GCMs **ECHAM5 MPI-OM**, Lauf 1, angetrieben mit dem SRES **Szenario A1B**, verwendet. Kernaussagen:

- Mit KlaMuKo wurde ein Verfahren entwickelt, das anhand von Konfigurationen von Regressionsgrößen wiederkehrende Muster bildet.
- Diese Muster isolieren und beschreiben sowohl seltene, extreme großräumige Zustände als auch mittlere Zustände – dies ist ein großer Schritt vorwärts, denn herkömmliche Verfahren sind nur mit geringer Leistungsfähigkeit in der Lage, Extreme in einzelnen Klassen zu isolieren.
- Sowohl bezüglich der Beschreibung regionaler meteorologischer Parameter als auch der Beschreibung des Auftretens von Extremen (z. B. durch eine auf Extrem-Schwellwerte bezogene Binarisierung der zu beschreibenden regionalen Größe) ist mit KlaMuKo eine gute bis sehr gute Erklärung der Varianz erreichbar.
- Untersuchungen der mit einem GCM projizierten Zukunftsentwicklungen von Extremen erbrachten für einige Indikatoren **Zunahmen**, zum Teil mit reduzierter Belastbarkeit:
 - Trockenperioden
 - Heiße Tage
 - Schwüle
 - Trocken-warme Tage
 - Hitzewellen (nur reduziert belastbar)
 - Tropennächte (nur reduziert belastbar)
 - Starkwind im Winterhalbjahr (nur reduziert belastbar)
- Für einige Extrem-Indikatoren wurden aus den KlaMuKo-Analysen von Klimaprojektionen **Abnahmen** abgeschätzt:
 - Spätfröste
 - Niederschlagsreich-kalte Tage
 - Eistage

- Für weitere analysierte Extrem-Indikatoren konnten keine deutlichen zukünftigen Änderungen in den Projektionen identifiziert werden.
- Die Beschreibungsgüte kann davon profitieren, wenn KLaMuKo in einer zweiten Stufe nach weiteren Strukturen innerhalb der anfangs gefundenen Klassen sucht – es werden ggfs. weitere Einflussgrößen identifiziert und einzelne Klassen gefunden, die starke regionale Extreme spezifizieren.

10.5 Modifikation und Novellierung von Zirkulationsindizes

Im Vorhaben KLIWETT wurde die Thematik der Indexierung der Zirkulation der mittleren Breiten erneut aufgegriffen, nachdem im Rahmen von BLOCKWETT (KREIENKAMP, SPEKAT, & ENKE, 2010) sowohl die Identifikation als auch die zukünftige Entwicklung von Blocking-Situationen mit Hilfe eines an die Vorgaben von Tibaldi und Molteni angelehnten Index (TIBALDI & MOLTENI, 1990) analysiert wurde. Die Weiterentwicklung dieses aus BLOCKWETT stammenden, Geopotenzial-Differenzen nutzenden Index $KWBI_{\phi}$ bestand darin, dass nicht mehr ein festgelegter Breitenkreislänge (zwischen 60 und 40°N) betrachtet, sondern ein Nord-Süd-Profil des Blockings erzeugt wurde. Zudem kam ein alternativer, in der Südhemisphäre entwickelter und Windfeld-Information nutzender Index (ALESSANDRO, 2008) $KWBI_U$ im Rahmen von KLIWETT zum Einsatz.

Beide Indizes besitzen Ähnlichkeiten, weil sie beispielsweise – bei unterschiedlichem Betrag des Index – bezüglich der reproduzierten zeitlichen Entwicklung in der Gegenwart hochkorreliert sind ($R > 0,8$). Sie zeigen bezüglich des räumlichen Musters der Maxima und Minima leichte Unterschiede, arbeiten aber im Wesentlichen die Hauptblockingzonen über dem Pazifik und dem Atlantik (mit leichten Defiziten bei $KWBI_U$ im atlantisch-europäischen Sektor) heraus. Mit $KWBI_U$ und $KWBI_{\phi}$ wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt. Kernaussagen:

- Beide Indizes identifizieren über dem maritimen Teil des atlantisch-europäischen Sektors (westlich des Greenwich-Meridians) relativ große Unterschiede in der Blockinghäufigkeit, wenn diese von Nord nach Süd schreitend berechnet wird; gleichzeitig wird über dem kontinentalen Teil des Sektors (östlich des Greenwich-Meridians) in allen Breitenkreislängen etwa eine gleich starke Blockinghäufigkeit identifiziert. Dies weist auf eine Zweiteilung des Strömungsregimes (maritim-kontinental) auch bezüglich des Blockings hin.
- Bezüglich der **Saisonalität** ist das Verhalten der Indizes nur zum Teil einheitlich. Die wichtigste Gemeinsamkeit ist, dass Blocking in den hohen Breiten (nördlich von 60 °N) im Sommer am häufigsten auftritt. Tendenziell besteht die Neigung, dass Blocking südlich von 55 °N am häufigsten im Frühjahr ist, während dort im Sommer und Herbst Blocking relativ selten auftritt. Die Sommer-Dominanz des Blockings in hohen Breiten charakterisiert sowohl das maritime als auch das kontinentale Regime. Jedoch ist das Nord-Süd-Profil selbst durchaus über beiden Regimes von unterschiedlicher Form: Über dem *Ozean* nimmt die Blockinghäufigkeit kontinuierlich bis etwa 50 °N ab. Bei $KWBI_{\phi}$ setzt sich diese Abnahme bis in die Subtropen fort, bei $KWBI_U$ gibt es eine sekundäre Zunahme südlich von 50 °N. Über dem *Kontinent* weist $KWBI_U$ einen leichten, aber kontinuierlichen Anstieg von 70 °N südwärts bis zu einem Maximum in 45 °N auf. Für $KWBI_{\phi}$ ist die Veränderung entlang des Nord-Süd-Profils relativ gering mit einer Tendenz zur kontinuierlichen Abnahme von Nord nach Süd, was insbesondere im Sommer sichtbar ist.
- Im **Klima der Jahre 1971–2010** konnte bezüglich der Änderungen im Blockingverhalten mit den beiden Indizes $KWBI_U$ und $KWBI_{\phi}$ nur für den Sommer im maritimen Teil des atlantisch-europäischen Sektors ein schwacher Zunahmetrend identifiziert werden. Diese Trendentwicklung ist fokussiert auf die Breitenkreislänge 60 ... 40 °N, weiter nördlich ist zwar die Blockinghäufigkeit insgesamt etwas höher, aber entsprechende Trends sind dort viel geringer. Der gefundene sommerliche Zunahmetrend über dem Ozean ist ein Effekt

der letzten 10 Jahre (2001–2010), denn er ist nicht nachweisbar, wenn lediglich die Jahre 1971–2000 analysiert werden.

- Bezüglich der **Reproduzierbarkeit des Blockingverhaltens durch ein Klimamodell** wurde untersucht, welche Nord-Süd-Profile der Blockinghäufigkeiten in den Re-Simulationen des 20. Jahrhunderts (20C-Daten) im ECHAM5-Modell bestimmt werden. Hier zeigte sich eine bereits in der BLOCKWETT-Studie gefundene systematische Unterrepräsentierung des Blockings in den hohen Breiten – was in BLOCKWETT dazu führte, dass dort ein so genannter „Nord-Index“ (GHGN) zur Blocking-Bestimmung nicht eingesetzt wurde. Ein Vorgehen, das auch schon von Tibaldi und Molteni empfohlen wurde, um den Defiziten der Modellierung der polnahen Atmosphäre in GCMs Rechnung zu tragen. Über dem maritimen Teil des atlantisch-europäischen Sektors gibt das Modell in etwa südlich von 60 °N das aufgetretene Blockingverhalten relativ gut wieder. Über dem kontinentalen Teil des Sektors werden in diesem Breitenkreisbereich etwas mehr Blockings simuliert als in der Realität auftraten.
- Bezüglich der **Projektion des Blockingverhaltens** in einem zukünftigen Klima mit verschiedenen SRES-Szenario-angetriebenen ECHAM5-Simulationen ist mit der Information sowohl von $KWBI_U$ als auch von $KWBI_\phi$ auf eine zukünftige **Zunahme des Blockings in den hohen Breiten** und eine **Abnahmen in den mittleren Breiten** zu schließen. Die Stärke dieser Änderung besitzt saisonale und regionale Spezifika; so ist sie in den Wintermonaten über dem maritimen Teil des atlantisch-europäischen Sektors relativ hoch und über dem kontinentalen Teil gilt dies für die Sommermonate.
- Bezüglich der **Ähnlichkeit der Zirkulationsbeschreibungen durch NAO- und Blockingindizes** (um dies zu ermöglichen, muss der Blocking-Index invertiert werden, in Anerkennung der Tatsache, dass beide Indizes-Typen entgegengesetzte Charakteristika der Strömung in den mittleren Breiten beschreiben) wurde gefunden, dass sie vielfach Peaks in denselben Jahren anzeigen. Die Korrelationen zwischen beiden sind von einer Größenordnung zwischen -0,4 und -0,5 und hängen auch davon ab, ob das maritime oder das kontinentale Strömungsregime des atlantisch-europäischen Sektors betrachtet wird.

Ein weiterer Aspekt des Zusammenhangs zwischen großräumiger Zirkulation und regionalen Klima-Extremen wurde im Rahmen von KLIWETT mit dem völlig neu entwickelten **EURO-Strings**-Ansatz untersucht: Lässt sich über die Lage von Starkgradient-Zonen der mittleren Breiten (z. B. die Polarfrontzone) eine klimatisch differenzierte Beschreibung des Klimas in Sachsen herbeiführen? Im Rahmen von BLOCKWETT erfolgten dazu 2008 Vorstudien, in denen regionale Spezifika des Niederschlags in Sachsen mit den Charakteristika von Zyklonenzugbahnen in Verbindung gebracht wurden. Sie zeigten eine gewisse Sensitivität im lokalen Klima, insbesondere bei Annäherung eines Tiefs vom Atlantik her an. Die EURO-Strings setzen eine damit verbundene Betrachtungsweise fort. Unter der Annahme von mäandrierenden, im Grundsatz von West nach Ost verlaufenden Drängungszonen stellen sie eine Klassifizierung dar, die verschiedene Atmosphärenzustände voneinander trennt. Die Zielstellung besteht darin, eine großräumige atmosphärische Größe (z. B. das Geopotenzial, die relative Topografie oder die Temperatur) zu finden, deren Drängungsstruktur zu möglichst weit auseinander liegenden Mitteln einer regionalen Größe (z. B. der Temperatur oder des Niederschlags) in Sachsen liegen. In der Tat konnten für die regionale Temperatur die Felder der relativen Topografie – eine auch aus anderen Untersuchungen bekannte effiziente Regressionsgröße – und für den regionalen Niederschlag die Felder des Geopotenzials als Informationsquellen identifiziert werden. Das untersuchte Andauerverhalten von Temperatur und Niederschlag in Folge dieser Klassifikation gibt allerdings nur wenige spezifische Erkenntnisse. Jedoch besitzen die EURO-Strings das Potenzial für tieferegehende Studien mit verstärkter Einbeziehung der Atmosphärendynamik.

10.6 Luftqualität

Mehrere Aspekte des Themenbereichs Luftqualität wurden in den verschiedenen Phasen von KLIWETT betrachtet. In der ersten Phase lag der Fokus auf einer Dokumentation von Episoden mit hohen Schadstoffkonzentrationen mit Hilfe von Kartendarstellungen atmosphärischer Größen. In der zweiten Phase erfolgte die Analyse von luftqualitätsrelevanten Themen in zwei Arbeitspaketen:

- In Arbeitspaket 5 erfolgte die **Anwendung der KlaMuKo-Klassifikation auf Extreme der PM₁₀-Konzentration**. Dort wurde zunächst ermittelt, dass sehr verschiedenartige Prediktoren zur Beschreibung von PM₁₀ beitragen: Dynamische Eigenschaften, Labilität und Feuchte. Dabei sind die ermittelten Korrelationen im Vergleich zu anderen Extremindikatoren relativ gering, weil dieser Luftschadstoff in ein vielfältiges und komplexes System von Rückkopplungen z. B. mit chemischen Prozessen eingebunden ist, was die Effizienz der Beschreibung einzig durch großräumige Atmosphäreigenschaften reduziert. Bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Luftqualität ist neben der vielfältigen physikalisch-chemischen Prozesse und ihrer Unsicherheiten ein weiterer Faktor zu beachten: Die wirtschaftlich-technologische Entwicklung. Sowohl die emittierte Menge an Luftschadstoffen selbst als auch technische Maßnahmen zur Reduktion des Schadstoffgehalts haben, wie die Entwicklung in den letzten Jahren bereits andeutet, Einfluss auf die imitierten Schadstoffmengen. Dieser Aspekt hat einen Bezug zu Technikfolgenabschätzungen, was weit außerhalb des Fokus der KLIWETT-Studie mit ihrem Schwerpunkt bei den Verbindungen zwischen großräumigen atmosphärischen Eigenschaften und regionalen Extremen liegt. Daher sind alle zukunftsbezogenen Analysen so zu verstehen, dass die „atmosphärische Komponente“, quasi das atmosphärenspezifische Potenzial des wirtschaftlich-physikalisch-chemischen Gefüge-Komplexes beschrieben wird. Auch in diesem Lichte ist als Fazit der Untersuchungen in Arbeitspaket 5 festzustellen, dass mit der verwendeten Methodik die Erstellung einheitlicher, belastbarer Aussagen zur zukünftigen Entwicklung dieses Potenzials schwierig ist.
- In Arbeitspaket 7 erfolgte im ersten Teil eine **diagnostische Studie der Entwicklung von Grenz- bzw. Zielwertüberschreitungen der Immissionen** von NO₂, PM₁₀ und O₃ für den Zeitraum 2001–2010. Wegen der hohen Jahr-zu-Jahr-Variabilität wurde konstatiert, dass zwar leichte Trends identifizierbar sind, diese allerdings nur als begrenzt gesichert und belastbar bezeichnet werden können. Eine weitere Komponente der Untersuchung bestand darin, das Nutzungspotenzial von Zirkulationsklassifikationen bezüglich ihrer Verbindung zu Überschreitungen von Grenz- bzw. Zielwerten von Luftschadstoff-Immissionen zu testen. Entsprechende Verbindungen wurden dabei für einige, aber nicht alle Zirkulationsklassen gefunden. Es stellte sich heraus, dass dies zum Teil an Eigenheiten der Klassifikationskonzepte liegt, zu deren Überwindung im Rahmen des Vorhabens Ideen entwickelt wurden. Bezüglich der **Abschätzungen zu zukünftigen Schadstoffbelastungen** ist festzustellen, dass für einige, aber nicht alle Zirkulationsmuster nachvollziehbare Entwicklungstendenzen und -potenziale gefunden werden. Es sei betont, dass für Zukunftsaussagen immer nur das *Potenzial einer Entwicklung* betrachtet werden kann. Das liegt daran, dass, wie auch in Arbeitspaket 5 gefunden, die Atmosphärenzustände nur einen Teil des Erklärungsmusters für Luftschadstoff-Immissionen liefern. Ökonomische, technologische und umweltpolitische Entwicklungen besitzen ebenfalls Einfluss. Die KLIWETT-Untersuchungen bezüglich der Luftschadstoff-Immissionen haben sowohl zur Beantwortung einiger Problemstellungen beigetragen als auch Bereiche aufgezeigt, in denen Weiterentwicklungen wichtig sind.

Literaturverzeichnis

- Alessandro, A. (2008). Temperature and precipitation conditions in Argentina associated with strong westerly mid-latitude. *Revista Brasileira de Meteorologia*, pp. 126-142.
- Barnston, R., & Livezey, R. (1987). Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Mon. Wea. Rev.*, pp. 1083-1126.
- Barriopedro, D., Garcia-Herrera, R., Lupo, A., & Hernandez, A. (2006). A Climatology of Northern Hemispheric Blocking. *J. Climate*, pp. 1042-1063.
- Baur, F., Hess, F., & Nagel, P. (1943). *Kalender der Großwetterlagen Europas 1881-1939*. Bad Homburg: Forschungsinstitut für langfristige Witterungsvorhersage.
- Beck, C., & Philipp, A. (2010). Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain. *Phys. Chem. Earth*, pp. 374-387.
- Beniston, M., & Stephenson, D. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Glob. Plan. Change*, pp. 1-9.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Heidelberg: Springer.
- Deuschländer, T., & Enke, W. (2004). *Ableitung von Wetterlagen aus großräumigen Zirkulationsmustern zur Identifikation von extremen Witterungsperioden mit Schwerpunkt lang anhaltender Trockenheit und deren Projektion in Klimaszenarien (WEREX III)*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Dittmann, E., Barth, S., Lang, J., & Müller-Westermeier, G. (1995). *Objektive Wetterlagenklassifikation*. Offenbach/Main: Deutscher Wetterdienst.
- Enke, W., & Spekat, A. (1997). Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression. *Clim. Res.*, pp. 195-207.
- Enke, W., Kreienkamp, F., & Spekat, A. (2008). STAT-IMM, a statistical approach to determine local and background contributions to PM10 levels. *Adv. Sci. Res.*, pp. 119-126.
- Enke, W., Spekat, A., & Kreienkamp, F. (2007). *Stationarität globaler atmosphärischer Wellen - BLOCKWETT - Untersuchung der Auswirkung der Stationarität globaler atmosphärischer Wellen und Interpretation von Transwetterlagen für Dürre- und Hochwasserereignisse in Sachsen*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Field, C., Barros, V., Stocker, T., Qin, D., Dokken, D., Ebi, K., et al. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report (SREX) of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Gerstengarbe, F.-W., & Werner, P. C. (2005). *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, 6., verbesserte und ergänzte Auflage*. Potsdam: PIK-Report 100.
- Hess, P., & Brezowsky, H. (1952). *Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone Band 33*. Bad Kissingen: Deutscher Wetterdienst.
- Hesselbjerg Christensen, J. (2005). *Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects (PRUDENCE). Final Report*. Kopenhagen: DMI.
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, pp. 676-679.
- Hurrell, J. W., & Deser, C. (2009). North Atlantic climate variability: The role of the North Atlantic Oscillation. *J. Mar. Syst.*, pp. 28-41.
- Hurrell, J., & van Loon, H. (1997). Decadal Variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation: Climatic change at high-elevation sites. *Climatic Change*, pp. 301-326.
- Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynova, M., et al. (2008). Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, pp. 105-152.
- IPCC. (2007a). *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Herausgegeben von S. Solomon et al. Cambridge, UK und New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. (2007b). *Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Herausgegeben von M. Parry et al. Cambridge, UK und New York, NY, USA: Cambridge University Press.

- IPCC. (2007c). *Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jacob, D., & Podzun, R. (1997). Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol. Atmos. Phys.*, pp. 119-129.
- James, P. (2007). An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, pp. 17-42.
- Jonas, M., Staenger, T., & Schönwiese, C.-D. (2005). *Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland. UBA Forschungsvorhaben 201 41 254*. Dessau: Umweltbundesamt.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Met. Soc.*, pp. 437-471.
- Klein Tank, A., Zwiers, F., & Zhang, X. (2009). *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. WMO-TD No. 1500- Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72*. Genf: WMO.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2010). *Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010*. Dessau: Umweltbundesamt.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2010). Stationarity of atmospheric waves and blocking over Europe - based on a reanalysis dataset and two climate scenarios. *Theor. Appl. Climatol. Online First*, pp. 1-8.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2011a). *WEREX V - Bereitstellung eines Ensembles regionaler Klimaprojektionen. Abschlussbericht*. Dresden: Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2011b). *KLIWETT Klimawandel und Wetterlagen Bericht Phase I*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2012). *KLIWETT Klimawandel und Wetterlagen Zwischenbericht Phase II*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Krüger, A. (2002). *Statistische Regionalisierung des Niederschlags für Nordrhein-Westfalen auf Grundlage von Beobachtungsdaten und Klimaszenarien*. Köln: Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Heft 149.
- Lejenäs, H., & Økland, H. (1983). Characteristics of Northern Hemisphere Blocking as Determined from a Long Time Series of Observational Data. *Tellus*, pp. 350-362.
- Liepert, B. G. (2010). The physical concept of climate forcing. *WIREs Climate Change*, pp. 786-802.
- Malone, E. L., & Engle, N. L. (2011). Evaluating regional vulnerability to climate change: purposes and methods. *WIREs Climate Change*, pp. 462-474.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkam, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., et al. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. 19--21 September 2007, Noordwijkerhout, The Netherlands*. Genf, Schweiz: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., et al. (2000). *Emissions Scenarios; A Special Reports of IPCC Working Group III*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W., & Werner, P. (2008). A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor. Appl. Climatol.*, pp. 209-223.
- Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erpicum, M., Esteban, P., Huth, R., et al. (2010). COST733CAT - a database of weather and circulation type classifications. *Phys. Chem. Earth*, pp. 360-373.
- Quadrelli, R., Pavan, V., & Molteni, F. (2001). Wintertime Variability of Mediterranean Precipitation and its Links with Large-Scale Circulation Anomalies. *Clim. Dyn.*, pp. 457-466.
- Rockel, B., Will, A., & Hense, A. (2008). Special Issue: COSMO-CLM. *Meteorol. Z.*, pp. 1-450.
- Roeckner, E., Baeuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., et al. (2003). *The atmospheric general circulation model ECHAM5 - Part 1: Model Description. MPI Report 349*. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Rossby, C. (1939). Relation Between Variations in the Intensity of the Zonal Circulation of the Atmosphere and the Displacements of the Semi-Permanent Centers in Action. *J. Mar. Res.*, pp. 38-55.

- Salvisberg, E. (1996). *Wetterlagenklimatologie - Möglichkeiten und Grenzen ihres Beitrags zur Klimawirkungsforschung im Alpenraum*. Bern: Geografisches Institut der Universität.
- Schneider, F. (2003). *Entwicklung und Anwendung statistischer Methoden zur Kurzfristvorhersage von Ozon-Konzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland*. Berlin: Freie Universität, Fachbereich Geowissenschaften.
- Sillman, J., & Roeckner, E. (2008). Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Clim. Change*, pp. 83-104.
- Spekat, A., Enke, W., & Kreienkamp, F. (2007). *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG*. Dessau: Umweltbundesamt.
- Spekat, A., Enke, W., & Kreienkamp, F. (2008). *BLOCKWETT Teilprojekt 2: Untersuchung der Zugbahnen barometrischer Minima*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Spekat, A., Enke, W., & Kreienkamp, F. (2008). *Untersuchung der Auswirkung der Stationarität globaler atmosphärischer Wellen (BLOCKWETT). Teilprojekt 2: Untersuchung der Zugbahnen barometrischer Minima*. Potsdam: CEC Potsdam, im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.
- Spekat, A., Kreienkamp, F., & Enke, W. (2010). An impact-oriented classification method for atmospheric patterns. *Phys. Chem. Earth*, pp. 352-350.
- STARDEX. (2009). *Downscaling Climate Extremes. Final Report*. Exeter, UK: Met. Office.
- Tibaldi, S., & Molteni, F. (1990). On the Operational Predictability of Blocking. *Tellus*, pp. 343-365.
- Walker, G. (1924). Correlation of Seasonal Variations in Weather IX: A Further Study of World Weather. *Mem. Indian Meteor. Dep.*, pp. 275-332.
- Walker, G., & Bliss, E. (1932). World Weather Vol. V. *Mem. Roy. Met. Soc.*, pp. 53-84.
- Wallace, J., & Gutzler, D. (1981). Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, pp. 784-812.
- Wilks, D. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Second Edition. International Geophysics Series Vol. 91*. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London: Elsevier.
- Wilson, R., Zinyowera, M., & Moss, H. (1998). *The Regional Impacts of Climate Change - An Assessment of Vulnerability. A Special Report of the IPCC Working Group II*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Wolf, U., Mellentin, U., & Laudel, M. (2013). *Klassifikation der Überschreitungstage*. Dresden: LfULG Sachsen, Abt. Luft, Lärm und Klima.
- Yarnal, B. (1993). *Synoptic climatology in environmental analysis*. London: Belhaven Press.
- Zebisch, M., Grundmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Frisch, U., & Cramer, W. (2005). *Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme*. Dessau: Umweltbundesamt.

Anhang: Potenzielle Prediktoren

Tabelle 82: Liste der 60 Potenziellen Prediktoren, die dem Screening in KLaMuKo zur Auswahl der Prediktoren zur Verfügung stehen

Nr.	Bezeichnung	Fläche(n)
1		1000 hPa
2	Geopotenzielle Höhe	850 hPa
3		700 hPa
4		500 hPa
5	Temperatur	850 hPa
6		500 hPa
7	Relative Feuchte	850 hPa
8		500 hPa
9	Horizontale Differenzen in N-S-Richtung	850 hPa
10		700 hPa
11		500 hPa
12	Horizontale Differenzen in O-W-Richtung	850 hPa
13		700 hPa
14		500 hPa
15	Vorticity	1000 hPa
16		850 hPa
17		700 hPa
18		500 hPa
19	Schichtdicke/relative Topografie	1000/850 hPa
20		1000/700 hPa
21		1000/500 hPa
22	Vertikale Temperaturdifferenz	850-700 hPa
23	Horizontale Stromfelddivergenz	1000 hPa
24		850 hPa
25		700 hPa
26	Frontenneigungswinkel nach Margules und Stüve	
27	Labilitätsindex nach Showalter	
28	Labilitätsindex nach Enke ohne Feuchte	
29	Labilitätsindex nach Enke mit Feuchte	
30	Betrag des Gradienten	1000 hPa
31		850 hPa
32		700 hPa
33	Absolute Feuchte	850 hPa
34		700 hPa

Nr.	Bezeichnung	Fläche(n)
35	Advektion der Temperatur	850 hPa
36		700 hPa
37	Advektion der Feuchte	850 hPa
38		700 hPa
39	u-Komponente des thermischen Windes	1000/850 hPa
40	v-Komponente des thermischen Windes	
41	Advektionsindikator (positiv: warm; negativ: kalt)	
42	u-Komponente des thermischen Windes	850/700 hPa
43	v-Komponente des thermischen Windes	
44	Advektionsindikator (positiv: warm; negativ: kalt)	
45	u-Komponente des thermischen Windes	700/500 hPa
46	v-Komponente des thermischen Windes	
47	Advektionsindikator (positiv: warm; negativ: kalt)	
48	Pseudopotenzielle Temperatur	1000 hPa
49		850 hPa
50	Geopotenzialänderung in 24 Stunden	1000 hPa
51		850 hPa
52		700 hPa
53		500 hPa
54	Isallobarischer Wind	1000 hPa
55		850 hPa
56		700 hPa
57		500 hPa
58	Summenprediktor	
59	Tageslänge in Stunden	
60	Approximierte kurzweilige Einstrahlung	

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Arne Spekat, Frank Kreienkamp, Wolfgang Enke
Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
David-Gilly-Straße 1, 14469 Potsdam
Telefon: +49 331 7452301
E-Mail: cec@cec-potsdam.de
Wiebke Miketta
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum
Brennhausgasse 14, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 39 3399
E-Mail: joerg.matschullat@ioez.tu-freiberg.de

Redaktion:

Dr. Andrea Hausmann
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5100
E-Mail: andrea.hausmann@smul.sachsen.de

Titelfoto:

A. Spekat

Redaktionsschluss:

17.01.2014

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.