



Optimierungsmöglichkeiten für WEREX

Schriftenreihe, Heft 24/2016



Erarbeitung von Optimierungsmöglichkeiten im Regionalisierungsverfahren WEREX

Arne Spekat, Wolfgang Enke

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Kontext	6
1.2	Statistische Klimamodellierung und Extreme	7
1.3	Das Verfahren KlaMuKo – Kurzdarstellung	7
1.4	Zu diesem Bericht	12
2	WEREX und KlaMuKo	12
2.1	Zur KLIWETT-Studie	12
2.2	Der Regressions-Aspekt von KlaMuKo und das Konzept der Muster	13
2.3	KlaMuko in der Anwendung auf Klimaprojektionen	14
2.4	Anknüpfung von KlaMuKo an WEREX	16
2.5	Besondere Beachtung von Trends	19
2.6	Anwendungsbeispiel 1 für WMSax2.0: Temperatur	20
2.7	Anwendungsbeispiel 2 WMSax2.0: Niederschlag	22
2.8	Fazit	23
3	Sensitivitätsuntersuchungen	24
3.1	Verkürzung des Datenpools	24
3.2	Nutzung des Niederschlags als Leitgröße	26
3.3	Nutzung der Klimatischen Wasserbilanz als Leitgröße	28
3.4	Bedeutung der Anzahl der KlaMuKo-Klassen	29
3.5	Untersuchung der Stabilität von KlaMuKo	31
4	Zusammenfassung und Ausblick auf weiterführende Projekte	34
	Literaturverzeichnis	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Skizze der Aufgabenstellung von KlaMuKo – Suche nach einer indirekten Beschreibung des regionalen Klimas am Boden durch Zustandsgrößen aus Feldern der freien Atmosphäre	8
Abbildung 2:	Skizze der Auswahl – verwendet wird eine Screening-Analyse mit dem Ziel, die Prediktorenkombination zu finden, die den Prediktanden optimal beschreibt	9
Abbildung 3:	Schematisches Beispiel für die Konstellationen der Prediktoren (Regressionskoeffizienten) R1 ... R4 an den ersten 15 Tagen eines Zeitraums	9
Abbildung 4:	Darstellung der Klassenmittel (rote Balken, linke y-Achse) und der relativen Häufigkeit in % (blaue Balken, rechte y-Achse) für 10 KlaMuKo-Klassen; analysiert wurde die Maximum-temperatur im Winter für das Mittel aus den Tieflandstationen Sachsens	14
Abbildung 5:	Relative Häufigkeit der 850 hPa-Werte für Geopotenzial (oben links), Temperatur (oben rechts) und relative Feuchte (unten links) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume; Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979-2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979-2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071-2100	15
Abbildung 6:	Relative Häufigkeit der Werte für die relative Feuchte 850 hPa (oben links), 700 hPa (oben rechts) und 500 hPa (unten links) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume; Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979-2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979-2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071-2100	16
Abbildung 7:	Auswirkung der Verkürzung des Vorrats an nutzbaren Klimadaten auf das Signal der Tagesmaximumtemperatur im Sommer in WETTREG-Regionalisierungen, angetrieben mit MPI-ESM Szenario RCP8.5	24
Abbildung 8:	Wie Abbildung 7, jedoch für die Tagesmaximumtemperatur im Winter.....	25
Abbildung 9:	Auswirkung der Verkürzung des Vorrats an nutzbaren Klimadaten auf das Signal des Niederschlags im Sommer in WETTREG-Regionalisierungen, angetrieben mit MPI-ESM Szenario RCP8.5	25
Abbildung 10:	Wie Abbildung 9, jedoch für den Niederschlag im Winter	26
Abbildung 11:	Auswirkung der Verwendung des Niederschlags als Leitgröße bei der Bestimmung der Klimasignale von Maximumtemperatur (links) und Niederschlag (rechts) im Sommer	27
Abbildung 12:	Wie Abbildung 11, jedoch für die Verhältnisse im Winter	28
Abbildung 13:	Auswirkung der Verwendung der Klimatischen Wasserbilanz als Leitgröße bei der Bestimmung der Klimasignale von Maximumtemperatur (links) und Niederschlag (rechts) im Sommer	29
Abbildung 14:	Multiple Korrelation (links) und Restfehler (rechts) bei sukzessiver Wegnahme von Prediktoren mit der jeweils höchsten Korrelation. Prediktand: Maximumtemperatur im Sommer. Stationen in Sachsen unterhalb eines Höhengniveaus von 500 m ü. NN	32
Abbildung 15:	Wie Abbildung 14, jedoch für die Maximumtemperatur im Winter.....	32
Abbildung 16:	Multiple Korrelation (links) und Restfehler (rechts) bei sukzessiver Wegnahme von Prediktoren mit der jeweils höchsten Korrelation. Prediktand: Niederschlag im Sommer. Stationen in Sachsen oberhalb eines Höhengniveaus von 500 m ü. NN	33
Abbildung 17:	Wie Abbildung 16, jedoch für den Niederschlag im Winter an Bergstationen.	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Häufigkeit (in Prozent) der 10 KLaMuKo-Klassen für die Dekaden 1971-80 bis 2091-2100. Prediktand: Maximumtemperatur im Winter für sächsische Klimastationen in einer Höhe bis 500 m ü. NN; weitere Erläuterungen zum Tabelleninhalt im Text.....	20
Tabelle 2:	Wie Tabelle 1 jedoch für die Maximumtemperatur im Sommer	21
Tabelle 3:	Wie Tabelle 1 jedoch für den Niederschlag im Sommer	22
Tabelle 4:	Statistische Maßzahlen für KLaMuKo-Klassifikationen mit 10, 15 und 20 Klassen für Niederschlag und Starkniederschlag	30

1 Einleitung

1.1 Kontext

Der Klimawandel umfasst Änderungen im Zustand und Verhalten des Atmosphärensystems. Er hat globale und regionale Ausprägungen. Um diese abzuschätzen, werden in einer Kette verschiedene Modelle eingesetzt. Plausible Annahmen zu zukünftigen Veränderungen von Bevölkerung, Wirtschaft, Technologie und anderen fundamentalen Steuerfaktoren werden in Form von Szenarios entwickelt. Die Steuerfaktoren nehmen Einfluss auf den Ausstoß und den atmosphärischen Bestand von Treibhausgasen. Diese wiederum dienen als Antrieb für globale Klimamodelle, die großräumige Klimaentwicklungen auf Grund des sich ändernden Anteils an Treibhausgasen simulieren. Dem Nutzer stehen in der Folge Projektionen eines Klimas, wie es sich aus Veränderungen bei den Treibhausgasen entwickelt, zur Verfügung.

Nutzer können dabei Betreiber von Modellen oder Modellketten sein, deren Ziel es ist, Auswirkungen der Klimaänderungen auf verschiedene Sektoren zu beschreiben. Dazu gehören beispielsweise Wasserwirtschaft, Zivilschutz, Infrastruktur, Ökologie oder Tourismus. Eine weitere Nutzergruppe sind Entscheidungsträger und Berater, die an Entscheidungsprozessen mitwirken. Unter anderem gehören zu diesen Prozessen die Abmilderung (Mitigation) des Klimawandels und die Anpassung (Adaption) an Klimafolgen mit Entscheidungen bezüglich effektiver Maßnahmen. Eine weitere Nutzergruppe bildet die Öffentlichkeit – in diesem Zusammenhang ist die Kommunikation der Ergebnisse von Klimaprojektionen von besonderer Bedeutung.

Für viele Fragestellungen ist ein *globales* Klimamodell zur Beantwortung das adäquate Werkzeug, insbesondere wenn es um den Überblick des Klimasystems geht. Liegt der Fokus hingegen auf der *regionalen Skala*, so sind regionale Klimamodelle und Verfahren einzusetzen. Hierfür gibt es zwei verschiedene Strategien:

■ Dynamisch

In einem räumlich begrenzten Fenster wird eine höher aufgelöste Version des globalen Klimamodells gerechnet; die Modellierung des Bereichs außerhalb des Fensters wird von diesem globalen Modell übernommen. Beispiele für dynamische regionale Klimamodelle sind REMO (Jacob & Podzun, 1997) und CLM (Rockel, 2008).

■ Statistisch

Diese Verfahren sind unter dem Namen Empirical Statistical Downscaling (ESD) bekannt. Es werden statistische Beziehungen zwischen großräumigem und lokalem Klima ermittelt und diese auf einen zukünftigen Klimazustand und dessen Entwicklung angewandt. Beispiele für ESDs sind WETTREG/WEREX (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2010) und STARS (Orlowsky, Gerstengarbe, & Werner, 2008).

Für Studien des Klimawandels werden im Freistaat Sachsen verbreitet die so genannten WEREX-Simulationen eingesetzt (Enke, 2001) sowie (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2011). Beim WEREX-Verfahren handelt es sich um eine auf Sachsen fokussierte Variante des WETTREG-Modells.

1.2 Statistische Klimamodellierung und Extreme

Wie andere Ansätze zur Darstellung des Klimawandels auf regionalen und lokalen Skalen hat das Modell WETTREG seine Stärken bei der Beschreibung des mittleren Klimazustands. Die volle Variabilität und die Extreme des Klimas abzubilden ist eine Herausforderung, der sich WETTREG und die auf Sachsen fokussierte Variante WEREX stellen – jedoch sind die bisher verwendeten Ansätze nicht für den Gesamtumfang der Extreme der atmosphärischen Parameter erfolgreich. Dieser Sachverhalt wurde erkannt und in der Folge wurde WETTREG/WEREX weiter entwickelt. Leitgedanke war, die Fähigkeit der Methodik zu verbessern, ein gewandeltes, extremer werdendes Klima darzustellen. Es waren auch Fortschritte zu verzeichnen, besonders durch die Einführung von Zirkulationsmustern, die in der Gegenwart noch selten sind, aber zukünftig das Klimageschehen dominieren.

Auf der anderen Seite wurden die Fragestellungen der Klimafolgen-Modellierung immer ambitionierter. Sowohl die räumliche Auflösung sollte hoch sein als auch der Umfang und die Darstellungsqualität der statistisch simulierten Klimazustände – im Idealfall sollten regionale Spezifika in der zukünftigen Entwicklung von Extremen verfügbar werden. Beispielweise sollten Antworten auf Fragen wie diese gefunden werden: *Wie häufig werden Heiße Tage (Maximum über 30 °C) am Ende des 21. Jahrhunderts im Raum Dresden sein?* Oder: *Wie häufig tritt zukünftig Starkniederschlag im östlichen Erzgebirge auf?* Es zeigte sich immer deutlicher, (i) dass die Strategie und die Nutzung des statistischen Verfahren WETTREG/WEREX passgenauer zur Beschreibung mittlerer bis leicht extremer Zustände geeignet ist und (ii) dass selten auftretende, starke Extreme eine Neukonzeptionierung erfordern. Die Neukonzeptionierung brachte ein weiteres Verfahren mit Namen KlaMuKo hervor, das im nächsten Kapitel kurz beschrieben wird.

1.3 Das Verfahren KlaMuKo – Kurzdarstellung

Im Rahmen des Vorhabens KLIWETT (Spekat, Miketta, Kreienkamp, & Enke, 2015) wurde unter anderem ein statistischer Ansatz entwickelt, der eine verbesserte Darstellung von Extremen ermöglicht. Das dort eingesetzte Verfahren fußt auf multipler Korrelation und Klassenbildung. Der Name ist KlaMuKo (Klassifikation durch multiple Korrelation). Im Grunde wird durch das Verfahren angestrebt, eine Zielgröße am Boden indirekt durch eine Kombination von Eigenschaften aus Atmosphärenfelder zu beschreiben, also quasi ein Proxy für die Zielgröße zu erzeugen.

Die Felder der freien Atmosphäre stammen aus NCAR-Reanalysen; für die Nutzung in KlaMuKo werden sie in ein äquidistantes Gitter umgerechnet.

An dieser Stelle sei der Weg, auf dem KlaMuKo-Beziehungen zwischen regionalen Klimagrößen am Boden und großräumigen Feldern der freien Atmosphäre ermittelt werden, in Grundzügen vorgestellt:

- **Vorbemerkung:** Die Nutzung von Zeitreihen einzelner Stationen als regionale Klimagrößen ist zwar im Prinzip möglich, aber es hat sich als vorteilhaft für die Stabilität und Repräsentativität der Analysen erwiesen, eine Zeitreihe durch Zusammenfassen mehrerer Stationen zu bilden. Zum Beispiel ist es sinnvoll, hoch gelegene Stationen und Flachland wegen ihrer Spezifika, insbesondere bei den Extremen, getrennt zu betrachten. Dieser Bericht fasst Optimierungsmöglichkeiten für ein Nachfolgevorhaben zusammen und es werden an verschiedenen Stellen Empfehlungen oder Hinweise für ein weiteres Vorgehen vorgestellt. So könnte es sinnvoll sein, Klimaverhältnisse und -änderungen in Teilregionen wie dem Osterzgebirge oder

dem Leipziger Becken durch die Kombination von Stationen zu beschreiben. Erfahrungsgemäß sollte eine solche Teilregion durch drei oder mehr Stationen repräsentiert sein.

- Am Anfang steht die Identifikation von Beziehungen zwischen einer Zielgröße (in der Nomenklatur der Statistik heißt eine solche Größe *Prediktand*) und großräumig vorhandenen Atmosphärenfeldern (in der Nomenklatur der Statistik heißen solche, zur Beschreibung von Prediktanden verwendeten Größen *Prediktoren*). Die Zielgröße (Prediktand) kann z. B. die Temperatur oder der Niederschlag sein, aber das Verfahren kann auch für komplexe und auf Extreme weisende Größen eingesetzt werden wie die Zahl der Tage mit Überschreitungen von Schwellwerten. Bei den atmosphärischen Feldern kann es sich beispielsweise um Geopotenzial, Temperatur, Feuchte, aber auch abgeleitete dynamische (Advektion, Konvergenz, Vorticity etc.) oder thermodynamische (Pseudopotenziellen Temperatur, Labilitätsmaße etc.) Größen handeln. Im Grunde wird nach einer Kombination aus (großräumig verfügbarer) atmosphärischer Information (Prediktoren) gesucht, die eine regionale Größe mit Extremcharakter bestmöglich beschreibt. Die Prediktoren werden dabei nicht a priori festgelegt; vielmehr steht ein Satz von potenziellen Prediktoren zur Verfügung. Dieser Teil der KLaMuKo-Strategie ist in Abbildung 1 dargestellt.

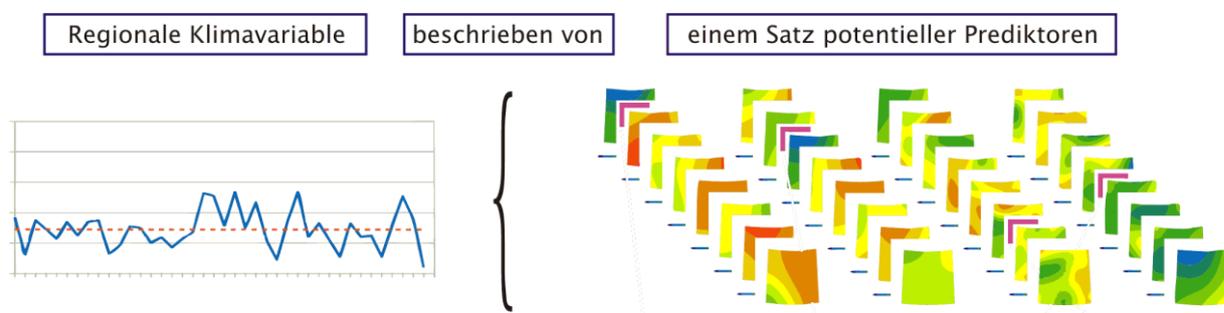


Abbildung 1: Skizze der Aufgabenstellung von KLaMuKo – Suche nach einer indirekten Beschreibung des regionalen Klimas am Boden durch Zustandsgrößen aus Feldern der freien Atmosphäre

- Danach wird mit Hilfe eines Screening-Verfahrens auf objektive Weise die Kombination von Feldern (Prediktoren) bestimmt, die in optimaler Weise den Prediktanden bestimmen. Dazu wird für jede Koordinate jedes Atmosphärenfelds zunächst die einfache Korrelation mit dem Prediktanden errechnet. Dasjenige Feld, was an einer Koordinate den höchsten Wert der Korrelation aufweist, wird als Prediktor P1 ausgewählt. Nun wird unter Beibehaltung von P1 für jede Koordinate der *verbleibenden* Atmosphärenfelder errechnet, wie groß deren Multiple Korrelation gemeinsam mit P1 ist. Dies identifiziert die Kombination P1_P2, die den Prediktanden beschreibt. Unter Nutzung der Kombination P1_P2 erfolgt nun die Suche nach der Kombination P1_P2_P3 etc. Dieser Teil des Verfahrens ist in Abbildung 2 gezeigt. So kann beispielsweise eine Kombination aus den Prediktoren relativer Topografie 1.000/850 hPa, Vorticity 850 hPa, absoluter Feuchte 850 hPa und geopotenzieller Höhe 700 hPa den Prediktanden sommerliche Tagesmaximumtemperatur im Tiefland in Sachsen bestmöglich beschreiben. Erfahrungsgemäß entsteht durch eine zu große Anzahl von Prediktoren numerische Instabilität. Dieses Risiko ist jedoch relativ gering, wenn eine Größenordnung von vier Prediktoren selektiert wird. Falls durch die Hinzunahme von Prediktoren keine Verbesserung der multiplen Korrelation erreichbar ist, kann die Suche auch schon bei weniger als vier Prediktoren abgebrochen werden. Dies ist allerdings bei den untersuchten Beziehungen zwischen Prediktand und Prediktoren nicht aufgetreten.

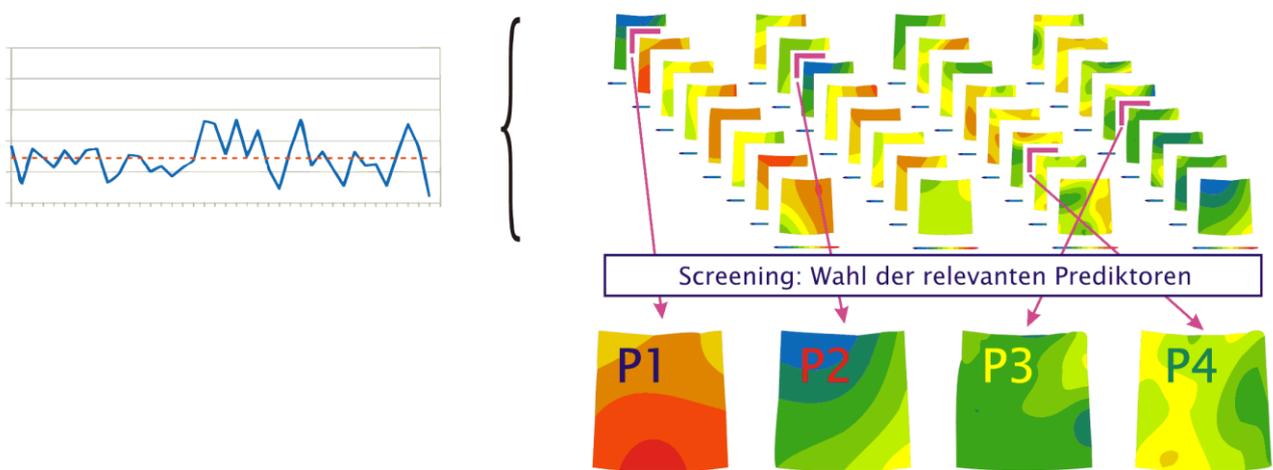


Abbildung 2: Skizze der Auswahl – verwendet wird eine Screening-Analyse mit dem Ziel, die Prediktor-kombination zu finden, die den Prediktanden optimal beschreibt

Die Screening-Regressionsanalyse findet nicht nur die Felder, mit denen eine bestmögliche Beschreibung des Prediktanden erreicht werden kann. Sie ermittelt auch die Regressionskoeffizienten, das sind Faktoren, mit denen die Feldwerte an den identifizierten Koordinaten multipliziert werden müssen, um in einer Regressionsgleichung auf den Wert des Prediktanden zu kommen. Hinzu kommt, dass an jedem Tag durch Einsetzen der konkreten Feldwerte aus P1 ... P4 eine andere Konstellation der Prediktoren vorliegt. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 3.

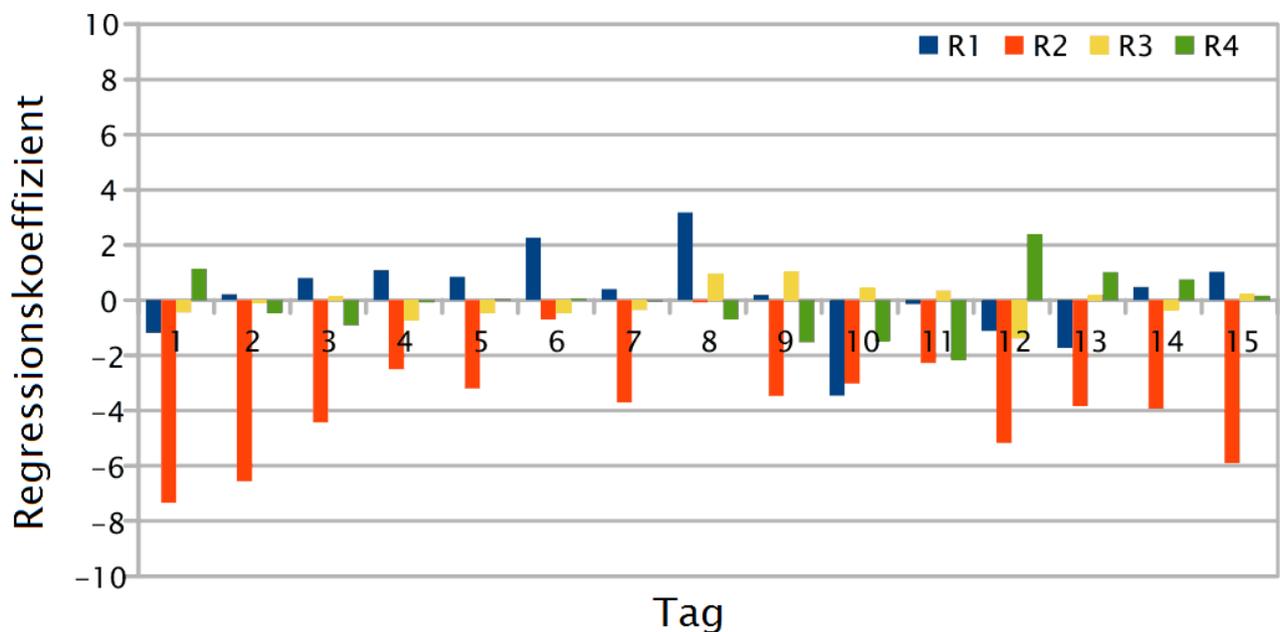


Abbildung 3: Schematisches Beispiel für die Konstellationen der Prediktoren (Regressionskoeffizienten) R1 ... R4 an den ersten 15 Tagen eines Zeitraums

- Diese Konstellationen stellen eine spezielle Art von Muster dar, wobei der Begriff „Muster“ nicht mit dem verbreiteten Konzept von Zirkulationsmustern, also der Anordnung von Steuerungszentren in der Zirkulation der mittleren Breiten verwechselt werden darf. Vielmehr besteht ein „Prediktorenmuster“ aus der Anordnung der Regressionskoeffizienten. Das Beispiel in Abbildung 3 vermittelt den Eindruck, dass bereits innerhalb eines kurzen Zeitraums deutlich unterschiedliche Konstellationen der Prediktoren auftreten. **Es werden zwei Postulate aufgestellt: (i) Es gibt charakteristische Prediktorenmuster und (ii) extreme Ereignisse, die sich in Stationszeitreihen finden lassen, sind nachvollziehbar mit bestimmten Prediktorenmustern verbunden.**
- Als nächstes folgt eine Klassifikation, die möglichst extreme Prediktorenmuster herausarbeitet. Dabei kommt eine Cluster-Strategie zum Einsatz (k-means), die eine so genannte Startpartition möglichst unähnlicher Fälle ermittelt, die die Basis für die Klassen darstellen. Das Clusterverfahren hat selbst eine Reihe von „methodischen Freiheitsgraden“. Dazu zählt beispielsweise die Zahl der zu bildenden Klassen. Hier besteht eine Rückkopplung mit der Fragestellung des Nutzers. Liegt der Fokus auf besonders starken Extremen – mit dem Risiko, dass diese nicht repräsentativ erfasst sein könnten – so sind 20 Klassen ratsam; liegt das Augenmerk auf der Beschreibung nicht ganz so seltener, aber immer noch extremer Ereignisse, so sind 10 oder 15 Klassen ratsam.
- Nun existieren Klassen, die möglichst *unähnliche* Zustände (Prediktorenmuster) herausarbeiten. Sie sind der Ausgangspunkt für den letzten Schritt des KlaMuKo-Verfahrens. In diesem werden die täglichen Prediktorenmuster klassifiziert, d. h. der ihnen *ähnlichsten* Klasse zugeordnet. Auch bei der Zuordnung gibt es „methodische Freiheitsgrade“ wie die optionale Forderung, die Klassen mögen eine Mindestzahl von Werten beinhalten. Dieser Aspekt hat ebenfalls eine Verbindung zur Fragestellung des Nutzers. Sind sehr starke Extreme wichtig, so könnten Klassen zugelassen werden, die nur einen Einzelfall enthalten – auch wenn dann einige Größen zur Charakterisierung einer solchen Klasse, wie die Streuung der Klassenmitglieder, nicht bestimmbar sind. Ist die Repräsentativität der Klassen von Bedeutung, so könnte die Forderung beispielsweise darin bestehen, Klassen mit fünf oder weniger Mitgliedern aufzulösen und ihre Mitglieder auf die übrigen Klassen zu verteilen.
- Das Ergebnis einer KlaMuKo-Analyse ist eine Zeitreihe, in der für jeden Tag die Zugehörigkeit zu einer der KlaMuKo-Klassen aufgeführt ist.

Damit KlaMuKo erfolgreich Extreme klassifiziert, wurde zudem folgende Überlegung einbezogen: In einem „regulären“ k-means-Clustering gibt es einen Austauschschritt, bei dem iterativ angestrebt wird, nach dem Zuordnungsschritt eine optimale Separierung der einzelnen Klassen zu erhalten. So sinnvoll dies für die Beschreibung des mittleren Klimazustands sein mag, es ist für die Bildung von *extremen Klassen* nicht zielführend, denn die Austauschschritte nehmen dem klassifizierten Kollektiv auch Trennschärfe im Bereich der Extreme, weil diese im Zuge der Austauschschritte mit großer Sicherheit den übrigen Klassen zugeordnet werden und ihr Extremcharakter somit nicht mehr sichtbar ist. Die Konsequenz ist, dass nicht alle Klassen gleich bedeutend für die weiter gehenden Analysen sind. Dies ist aber im Sinne der Extremanalysen eine valide Strategie, denn für Untersuchungen von Extremen sind Klassen, die mittlere Zustände beschreiben, gar nicht relevant.

Anmerkung: Auch die optionale Forderung, dass die Klassen eine bestimmte Mindestbesetzung aufweisen sollen, nimmt dem Verfahren einen Teil der möglichen Trennschärfe – zu Gunsten der verbesserten Repräsentativität der Klassen.

Außerdem ist KlaMuKo primär nicht als Regionalisierungsverfahren konzipiert. Die Beziehungen zwischen der Region und dem großräumigen Klima werden auf der Basis von eher flächenhafter Information gewonnen.

Realisiert ist das, wie in den Vorbemerkungen zur Beschreibung der Methodik von KLaMuKo erwähnt, durch einen Vorbereitungsschritt, der Stationsreihen objektiv in Gruppen zusammenfasst, die zum Beispiel geografisch oder nach Höhenlage differenziert sein können, sich aber alternativ auch am Wertebereich oder der Variabilität der Zielgröße orientieren. Für diese „Klimaregionen“ werden dann die Beziehungen mit dem großräumigen Atmosphärenfeldern gesucht. Es gibt darüber hinaus sinnvolle Aufbereitungen des Kollektivs der Stationszeitreihen – so ist es in einigen Fällen hilfreich, die Zielgröße zu transformieren und als Prediktanden etwa die Wahrscheinlichkeit, dass an einem Tag eine Schwelle überschritten wird, zu nutzen.

Ein Beispiel für einen solchen Prediktanden wäre eine Zeitreihe, in der für jeden Tag vermerkt ist, mit welcher Wahrscheinlichkeit (zwischen 0 und 1) an einer Station der gewählten Klimaregion ein Tagesmaximum von 30 °C überschritten wird. Ein weiteres Beispiel wäre die Fortführung dieses Konzepts: Es könnte ermittelt werden, ob ein Extrem an einem wählbaren Prozentsatz der Stationen auftritt. Für jeden Tag würde dann z. B. 0 oder 1 stehen, wenn 25 % der Stationen in der gewählten Klimaregion ein Tagesmaximum von 30 °C oder mehr aufweisen. Sowohl der Parameter selbst (z. B. Niederschlag oder Temperatur), die Schwelle des Parameters (z. B. mehr als 20 mm Niederschlag pro Tag oder ein Tagesminimum unter 0 °C) als auch der Prozentsatz der Stationen (z. B. 25 oder 75 %) an denen das Kriterium erfüllt ist, stellen Wahlmöglichkeiten dar, die vom Nutzer spezifiziert werden können.

Wie in der KLIWETT-Studie (Spekat, Miketta, Kreienkamp, & Enke, 2015) gefunden, besteht die Gelegenheit, Prediktanden (s. o.) zu identifizieren, die z. T. höhere Beschreibungsgüten durch die Felder der Atmosphäre erzielen als es bei der Nutzung des Klimaparameters selbst (z. B. Temperatur oder Niederschlag) als Prediktanden möglich wäre. Allerdings müssen die Stationsdichte und die Anzahl der verfügbaren Stationsreihen für einige der oben beschriebenen Prediktanden hinreichend groß sein.

Alle bisherigen Darstellungen und Erläuterungen sind auf die Gegenwart bezogen. Es handelt sich sozusagen um die *Lernphase* eines Verfahrens, deren Ziel es ist, Beziehungen zwischen Klimaverhältnissen am Boden und in der freien Atmosphäre zu identifizieren. In der Gegenwart ist dies durch die Analyse von Zeitreihen aus Messungen an Klimastationen und Reanalysen als „Klimatologie der freien Atmosphäre“ sehr gut möglich. Die übergeordnete Fragestellung bezieht sich aber auf das *zukünftige Verhalten der Extreme*. Genau dafür werden die in der Lernphase gefundenen Beziehungen angewandt, denn es gibt für die Zukunft keine Messreihen von Bodenstationen, aber sehr wohl Simulationen des Verhaltens der freien Atmosphäre durch numerische Klimamodelle. Der Kern der vorgestellten Strategie besteht darin, aus den Projektionen eines zukünftigen Klimas Informationen zu gewinnen, die auf die zeitliche Entwicklung von Zuständen in der freien Atmosphäre hinweisen, die im Klima der Gegenwart zu bestimmten Extremen geführt haben.

Ohne zu stark den in Kapitel 2 und 3 vorgestellten Erkenntnissen vorgreifen zu wollen, sei an dieser Stelle kurz erwähnt, dass eine Kombination aus Ergebnissen der statistischen Regionalisierungsmethode WEREX und dem anschließend eingesetzten KLaMuKo-Verfahren – die Kombination aus beiden trägt den Namen WMSax2.0 – einen verbesserten Blick auf die zukünftigen regionalen Extreme zulässt.

1.4 Zu diesem Bericht

Es wird der Abschlussbericht des Vorhabens „*Erarbeitung von Optimierungsmöglichkeiten im Regionalisierungsverfahren WEREX*“ vorgelegt, der sowohl konzeptionelle Arbeiten darstellt als auch die Ergebnisse einiger Sensitivitätsuntersuchungen zeigt. Dabei findet sich in Kapitel 1 eine Darstellung des Kontext und einer Vorstellung der Grundlagen des KlaMuKo-Verfahrens. Kapitel 2 basiert auf einem Vortrag bei einem Projektseminar im November 2015, der Weiterentwicklungen hin zu einer Synthese von KlaMuKo und WEREX sowie einige Ergebnisse vorstellt. Im Kapitel 3 finden sich Ergebnisse mehrerer Sensitivitätsuntersuchungen. Ergänzt wird der Bericht durch Empfehlungen und einen Ausblick auf das Folgeprojekt, das sich an dieses Projekt anschließen könnte.

2 WEREX und KlaMuKo

Bei einem Projektseminar im LfULG am 12.11.2015 wurde das Konzept bisher entwickelter statistischer Regionalisierungsverfahren (WEREX und KlaMuKo) kritisch betrachtet. Die Vor- und Nachteile der Verfahren wurden dargestellt und ein Ausblick auf eine Neuentwicklung gegeben. In diesem Kapitel wird das dort vorgestellte Material in Auszügen gezeigt, erläutert und ergänzt. Es sei vorausgeschickt, dass WEREX ein in mehreren Stufen seit den späten 1990er-Jahren entwickeltes Verfahren zur Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen ist und dass KlaMuKo als eine der Komponenten der KLIWETT-Studie entwickelt wurde.

2.1 Zur KLIWETT-Studie

KLIWETT (Spekat, Miketta, Kreienkamp, & Enke, 2015) war ein umfassendes, mehrjähriges Vorhaben mit einer Vielzahl von Arbeitspaketen. In der ersten KLIWETT-Phase lag der Fokus auf der Erarbeitung eines Katalogs von Indikatoren zur Diagnose von Klimaveränderungen. Diese wurden zum Teil durch Nutzerbeteiligung und Nutzerbefragung ermittelt – es gab darüber hinaus eine bewertende Sichtung der Indikatoren, die international eingesetzt werden. Des Weiteren erfolgten in dieser Phase Analysen der Klimastationarität, der Zusammenhänge von Zirkulationsmustern und Extremen sowie die Erstellung eines Katalogs von Episode mit Extremereignissen in Sachsen. Eine wichtige Erkenntnis der ersten KLIWETT-Phase war, dass statistische Verfahren, die Verbindungen zwischen großräumigen Mustern und dem regionalen Klima identifizieren, das mittlere Klima sehr wohl adäquat beschreiben. Bezüglich der Beschreibung von Extremen stoßen sie hingegen auf Schwierigkeiten. Dabei wurden mehrere Zirkulationsklassifikationen untersucht (darunter auch die in WEREX verwendete) und bei allen konnten entsprechende Defizite konstatiert werden.

Aufbauend auf den Erkenntnissen und Hinweisen der ersten Phase wurde in einer zweiten KLIWETT-Phase zunächst ein Objektivierungsansatz für die manuelle Klassifikation nach HESS & BREZOWSKY (Großwetterlagen) vorgestellt. Des Weiteren erfolgte die Entwicklung und Dokumentation des Klassifikationsverfahrens KlaMuKo, das auf Extreme fokussiert. Aus Erkenntnissen des Entwicklungsprozesses und der ersten praktischen Erfahrungen mit KlaMuKo entstand eine Erfahrungsbasis. Das KlaMuKo-Verfahren wurde im Rahmen von KLIWETT sowohl zur Diagnose des gegenwärtigen Klimas als auch in Form einer Anwendung auf Klimaprojektionen eingesetzt. Im Vortrag vom 12.11.2015 wurden am Anfang zentrale Erkenntnisse von KLIWETT II aufgegriffen, um zu verdeutlichen, dass es Weiterentwicklungsbedarf bei KlaMuKo gibt. Fest steht, dass mit diesem Verfahren sehr viel besser auf Extreme eingegangen werden kann. Der sich anbietende Nachfolge-

schritt besteht darin, auch das Extremverhalten des Klimas auf Grund von *Klimaprojektionen* zu beschreiben. Dabei gab es bei einigen, mit der Temperatur verbundenen Entwicklungen relativ gute Resultate, jedoch zeigten die KLIWETT-Untersuchungen auch, dass die Beschreibung vieler Extreme durch KlaMuKo verbesserungsbedürftig ist.

2.2 Der Regressions-Aspekt von KlaMuKo und das Konzept der Muster

Wie in Kapitel 1.3 zusammengefasst, benutzt KlaMuKo zur Klassifikation Ähnlichkeiten zwischen Mustern, aber nicht so, wie es verbreitet praktiziert wird. Standardmäßig wird unter „Muster“ oft eine räumliche Struktur verstanden, zum Beispiel in Druckfeldern, in denen die Anordnung von Steuerungszentren die Muster darstellen. Hinter den Mustern von KlaMuKo steht aber ein anderes Konzept. Es betrachtet Regressionsgrößen und ermittelt „Konstellationen“ der Regressionskoeffizienten.

Es wird ein Clusterverfahren (Typ k-means) eingesetzt – dieses bestimmt zunächst die N (in den Beispielen 10) maximal unähnlichsten „Konstellationen“ der Regressionskoeffizienten. Als Gedankenmodell: Damit wurden „Schlösser“ für „Schlüssel“ konstruiert. Jeder Tag besitzt eine bestimmte Anordnung der Regressionskoeffizienten, im Gedankenmodell sind das die „Bärte“ von „Schlüsseln“. Nun wird für jeden Tag getestet, in welches „Schloss“ (Klasse) der diesem Tag zugehörige „Schlüssel“ am besten passt. Das ist der Zuordnungsschritt, mit dem die Tage klassifiziert werden.

In Abbildung 4 sind Eigenschaften der dabei entstandenen Klassen dargestellt. Die Zielgröße (Prediktand) war in diesem Fall die Maximumtemperatur im Winter für Tieflandstationen (bis 500 m ü. NN) in Sachsen. Zwei verschiedene Balken und zwei verschiedene y-Achsen wurden verwendet. Die roten Balken, mit Bezug zur linken y-Achse, stellen Folgendes dar: Mit Hilfe der Regressionsgleichungen wird klassenweise für jeden der in die Klassen einsortierten Tage die Zielgröße rekonstruiert, also im Beispiel die Maximumtemperatur errechnet. Damit lassen sich klar voneinander abgegrenzte Temperaturmittelwerte der Klassen bestimmen. Die blauen Balken, mit Bezug zur rechten y-Achse, geben wieder, wie viele Tage in jeder Klasse enthalten sind. Aus ihnen ist ersichtlich, dass die extremen Klassen am linken und rechten Rand der Verteilung gering besetzt sind und die meisten Tage in Klassen in der Mitte der Verteilung zu finden sind. Besonders wichtig ist, sich gewahr zu sein, dass KlaMuKo primär darauf abzielt, Extremzustände zu beschreiben. Folglich sollte das Augenmerk weiterer Analysen nicht auf den stark belegten Klassen liegen, weil diese den mittleren Klimazustand abbilden und nicht die Extreme.

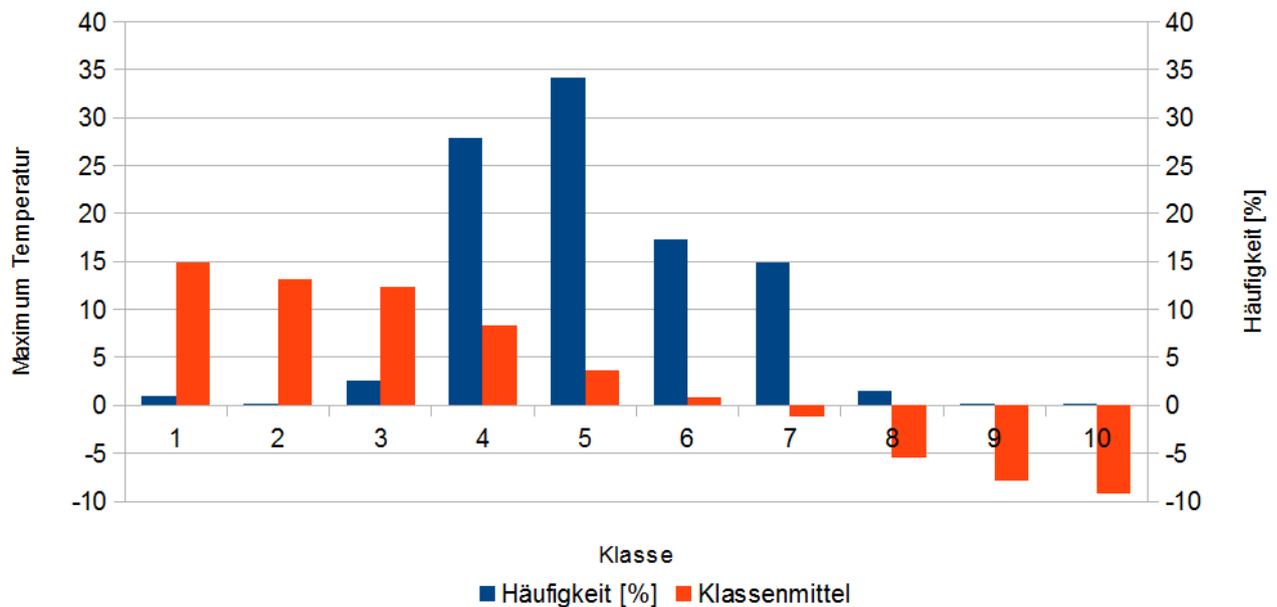


Abbildung 4: Darstellung der Klassenmittel (rote Balken, linke y-Achse) und der relativen Häufigkeit in % (blaue Balken, rechte y-Achse) für 10 KlaMuKo-Klassen; analysiert wurde die Maximumtemperatur im Winter für das Mittel aus den Tieflandstationen Sachsens

2.3 KlaMuko in der Anwendung auf Klimaprojektionen

Eine Klassifikation, die Extremklassen bildet, stellt einen hohen Wert an sich dar, denn gerade hier haben herkömmliche Klassifikationsverfahren große Schwierigkeiten. Mit einer Extreme isolierenden Klassifikation kann auch systemanalytisch ermittelt werden, welche großräumig verfügbaren atmosphärischen Parameter zur Bestimmung einer regionalen Zielgröße (Prediktand) dienlich sind. Voraussetzung ist natürlich, dass es überhaupt Beziehungen zwischen dem Prediktanden und großräumigen Zuständen in der Atmosphäre gibt.

Für einige Problemstellungen ist es außerdem zielführend, den ursprünglich vorhandenen Bestand von 60 potenziellen Prediktoren zu erweitern. Beispielsweise sind die bestehenden Prediktoren nicht optimal für die Beschreibung von Starkniederschlags- oder Gewitterereignissen. Aber es sollte nicht übersehen werden, dass alle bisher beschriebenen Verfahren und Zusammenhänge sich auf der Ebene der *Diagnostik* befinden, d. h. es werden Beziehungen hergeleitet, die zwischen *gemessenen regionalen Klimaparametern und gemessenen Atmosphärenfeldern* – aus Reanalysedaten – bestehen. Die Übertragung der Erkenntnisse auf Klimamodell-Projektionen war hingegen nur bei einigen Bodenparametern wie der Temperatur und mit ihren verbundenen Klimaindikatoren erfolgreich. Bei der Konzeption der Methodik bestand die Erwartungshaltung, dass in einer Art Systemidentifikation die KlaMuKo-Beziehungen inklusive der optimalen Prediktorenkombination im Gegenwarts-klima identifiziert werden und anschließend eine Übertragung dieser Erkenntnisse auf das Klimamodell erfolgen kann. Die dort simulierten Entwicklungen sollten Trendaussagen im Bereich der Extreme liefern.

In der Praxis stellte sich jedoch heraus, dass für einige Zielgrößen (Prediktanden) in den Projektionen keine adäquate Beschreibung durch die KlaMuKo-Klassen möglich war (Spekat, Enke, & Kreienkamp, Statistische

Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse, 2014). Zur Veranschaulichung der Problematik sei auf Abbildung 5 verwiesen.

In dieser Darstellung ist in jeder der drei Teilfiguren die Häufigkeitsverteilung der Werte des Geopotenzials, der Temperatur bzw. der relativen Feuchte in 850 hPa an der Koordinate 50°Nord und 10°Ost dargestellt. Der klimatologische Mittelwert wird dabei aus den Daten der NCAR2-Reanalysen ermittelt und ist jeweils mit blauen Linien dargestellt. Die roten und gelben Linien zeigen jeweils die Häufigkeitsverteilungen aus dem MPI-ESM Modell. 20C Daten (Resimulationen des Gegenwartsclimas) sind rot dabei und Ergebnisse der Klimaprojektion unter Antrieb des Szenarios RCP8.5 (Simulation des Zukunftsklimas 2071–2100) sind dabei gelb eingezeichnet. Häufig wird im Zuge der Screening-Analyse festgestellt, dass Temperatur, Geopotenzial oder abgeleitete Größen, die sich nur aus diesen beiden Parametern herleiten, zur Beschreibung des Prediktanden benötigt werden. Problematischer wird es bei Prediktanden, die zur Beschreibung an prominenter Stelle Feuchtinformation benötigen. Weitere Analysen legen Schwachstellen in den Modelldaten an den Tag. So werden verbreitet Häufigkeitsverteilungen der Feuchte simuliert, die deutlich von den gemessenen abweichen. Dies ist sowohl für die Resimulation der Gegenwart (20C-Daten) als auch für die Zukunftsprojektionen, angetrieben mit Treibhausgas-Szenarios, der Fall. Im Bereich der hohen Feuchtwerte sind in den Simulationen große Überschätzungen zu verzeichnen.

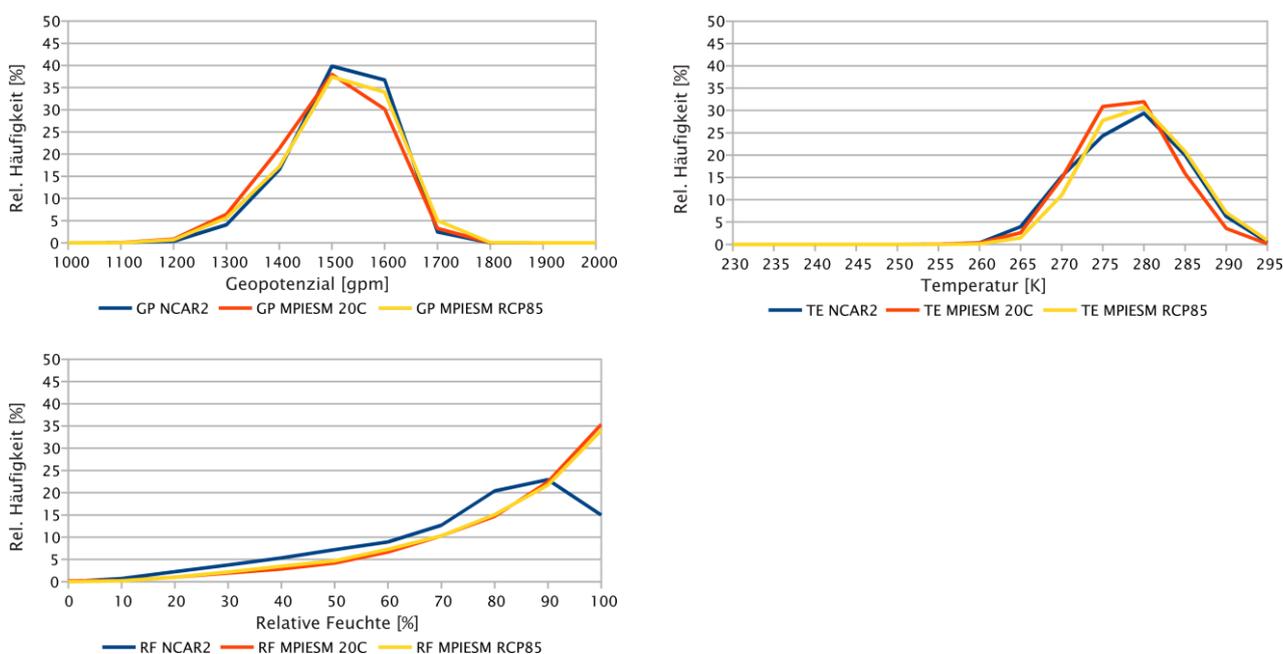


Abbildung 5: Relative Häufigkeit der 850 hPa-Werte für Geopotenzial (oben links), Temperatur (oben rechts) und relative Feuchte (unten links) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume; Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979-2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979-2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071-2100

Ergänzend ist in Abbildung 6 die Häufigkeitsverteilung für die relative Feuchte in den Niveaus 850 hPa, 700 hPa und 500 hPa dargestellt. Es ist erkennbar, dass in allen Niveaus deutliche Abweichungen zwischen den NCAR-Daten und den Klimamodelldaten existieren. Dabei treten in höheren Niveaus diese Abweichungen bei mittleren, niedrigen und hohen relativen Feuchten auf. Die Überschätzung der hohen Feuchten ist das wichtigste Phänomen.

Feuchtegrößen sind, wie die Praxis zeigt, in zahlreichen Prediktorenkombinationen enthalten und es müssen für solche Fälle Auswege gesucht werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Feuchtegrößen generell aus dem Bestand der potenziellen Prediktoren zu entfernen. Das ist bei vielen Temperaturgrößen auch ohne große Qualitätseinbußen möglich, aber in anderen Fällen ist die Feuchteinformation schwer verzichtbar.

In der Folge soll ein alternativer Weg vorgestellt werden, von dem Verbesserungen zu erwarten sind.

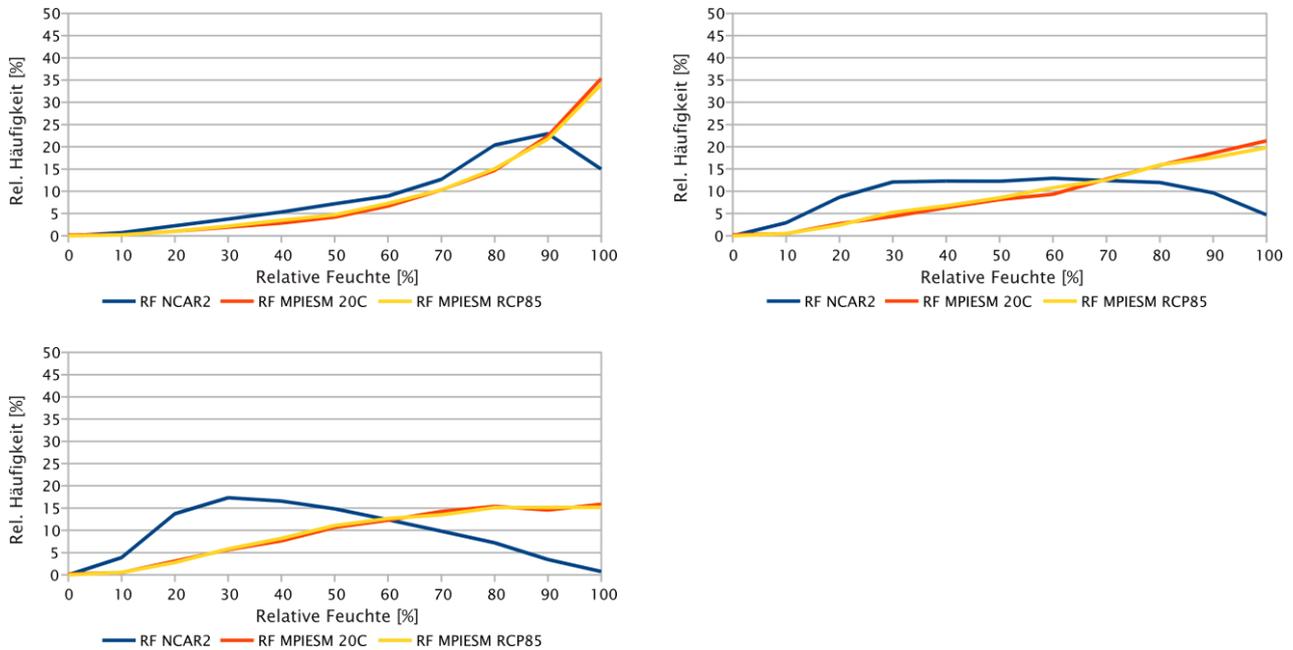


Abbildung 6: Relative Häufigkeit der Werte für die relative Feuchte 850 hPa (oben links), 700 hPa (oben rechts) und 500 hPa (unten links) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume; Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979-2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979-2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071-2100

2.4 Anknüpfung von KlaMuKo an WEREX

Im bisherigen Verlauf der Argumentationskette wurde KlaMuKo beschrieben. Es hat seine ausgewiesene Leistungsfähigkeit bei der Diagnose von Zusammenhängen zwischen regionalen Extremen und dem großräumigen Atmosphärenzustand. Es zeigen sich aber auch Defizite bei der Analyse von Klimaentwicklungen bei den projizierten Extremen.

Auf der anderen Seite gibt es ein Werkzeug, WEREX, das gut geeignet ist, *mittlere Klimazustände* und ihre Zukunftsentwicklung darzustellen. In der Folge wird ein Weg vorgestellt, die Vorteile beider Verfahren zusammenzuführen, was zur Neuentwicklung von WMSax2.0 führt.

Es wird angeregt, eine neue Regionalisierung WEREX VI durchzuführen. Diese baut methodisch auf der Kette der bisherigen WEREX-Entwicklungen auf. Dabei sollte WEREX VI hauptsächlich in diesen Aspekten über die vorherige Version WEREX V hinausgehen:

- Nutzung eines hochwertig qualitätskontrollierten Datensatzes der Klimastationen im Raum Sachsen – dies sollte Teil des Outputs eines anderen, parallel anzustoßenden Vorhabens in Sachsen sein.
- Erweiterung des Zeitraums der Nutzung von Klimadaten um die Jahre 2010-2015 für die WEREX-Regionalisierungen; dies würde die Vielfalt der Episoden steigern und z. B. einer verbesserten Abbildung der Variabilität des antreibenden Klimamodells dienen.
- Nutzung der neuesten Generation von Globalmodellen als Antrieb; in den vorherigen Versionen von WEREX waren dies die Modelle der „Generation IPCC TAR“ bzw. „Generation IPCC FAR“. Inzwischen liegen im Rahmen des Forschungsprogramms CMIP5 Simulationen von zahlreichen weiter entwickelten Modellen vor – zum Teil sind dies so genannte Erdsystem-Modelle (ESM).
- Nutzung der neuesten Generation von Szenarios. Die vorherigen WEREX-Versionen verwendeten Szenarios, die sich in ihrem Kern an den Emissionen von Treibhausgasen orientieren. Diese so genannten SRES-Szenarios (in der ihnen eigenen Nomenklatur z. B. mit A1B, A2 oder B1 bezeichnet) sind inzwischen durch RCP-Szenarios abgelöst werden, in deren Fokus die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre steht. Die seitdem verwendete Nomenklatur ist RCP2.6, RCP4.5 oder RCP8.5 (Abkürzung für *Representative Concentration Pathways*).

Es sollte zudem der Ensemble-Gedanke aus WEREX V weitergeführt werden, sodass für das neue Vorhaben ebenfalls mehrere Modelle und Szenarios als Antrieb für WEREX zum Einsatz kommen sollten. Für einige Nutzer entstehen dabei bereits Projektionen, die weiter verwendbar sind – sofern der Fokus stärker auf den mittleren Klimabedingungen und weniger auf den Extremen liegt. Sollte das Interesse stärker bei den Extremen liegen, ist die Hinzunahme von KlaMuKo angezeigt.

Die Einbeziehung von WEREX-Ergebnissen als Datenquelle für KlaMuKo ist für die Ermittlung der zukünftigen Extreme förderlich, wie sich bei Analysen im Rahmen dieses Projektes herausstellte. Von zentraler Bedeutung dabei ist die Rückbesinnung auf einen Kernbestandteil von WEREX: der Wettergenerator (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2013). Er synthetisiert Zeitreihen von meteorologischen Parametern an Stationsorten. Die synthetisierten Reihen werden aus Segmenten von *gemessenen Zeitreihen* gebildet. Ein Regelwerk von Steuerungsbedingungen wird vom Wettergenerator zur Auswahl, resp. dem Verwerfen von Segmenten verwendet. Die wichtigsten Steuerbedingungen sind: (i) Reproduktion der sich ändernden Häufigkeitsverteilung der WEREX-Zirkulationsmuster¹ (ii) Vermeidung von starken Brüchen zwischen den Segmenten und (iii) Verwendung von Episoden, die sich innerhalb eines begrenzten Zeitfensters um den Zeitpunkt im Jahr, an dem sie eingesetzt werden sollen und innerhalb eines Zeitfensters der Modelljahre (n Jahre zuvor n Jahre danach), befinden.

Im Folgevorhaben ist es nicht erforderlich, das WEREX-Verfahren selbst umfangreich methodisch weiterzuentwickeln. Die Strategie einer Kombination aus Zirkulationsmustern und den vom Wettergenerator synthetisierten Zeitreihen ist relativ ausgereift. Die Innovation liegt auf anderem Gebiet, was im weiteren Verlauf ausgeführt werden soll.

¹ ACHTUNG! Diese sind nicht mit den KlaMuKo-Klassen zu verwechseln. WEREX-Klassen liegt eine ganz andere Philosophie zu Grunde. Zwar beschreiben WEREX-Klassen auch die atmosphärischen Verhältnisse, jedoch verbunden mit bestimmten Temperatur-Wertebereichen bzw. Niederschlags-Wertebereichen. Das Augenmerk liegt aber auf einer guten Repräsentation mittlerer Klimaverhältnisse. KlaMuKo-Klassen stehen für „Wirkstoffkombinationen“ von mehreren atmosphärischen Größen, mit denen sich regionale Extreme effizient herausarbeiten lassen.

Die Ergebnisse der Klimamodelle sind *unverzichtbares Basismaterial* für die Regionalisierung des zukünftigen Klimas. In der bisher praktizierten Form wurden die vom Klimamodell simulierten Felder benutzt, um aus ihnen einen wesentlichen Indikator für die simulierten Klimaänderungen zu gewinnen: Die geänderten Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationsmuster, die definitionsgemäß an Temperatur-Wertebereiche (und für eine zweite Kategorie von Zirkulationsmustern an Niederschlags-Wertebereiche) gekoppelt sind. Ein Erwärmungssignal findet sich folglich im „Aussterben“ einer kalten und im Anwachsen einer warmen Klasse wieder. Nachdem nun aus dem Archiv der Episoden des Gegenwartsklimas vom Wettergenerator diejenigen selektiert und zu Zeitreihen synthetisiert wurden, mit denen ein sich wandelndes Klima bestmöglich reproduziert werden kann, entsteht aber eine gewisse „Schieflage“. Die Verbindung zwischen dem aus Messungen bestehenden Klima am Boden (in den Segmenten der synthetisierten Zeitreihen) und dem modellierten Klima ist nicht optimal.

Zur Veranschaulichung: Das spezifische „Wetter“ eines zukünftigen Zeitraums, also die dorthin platzierte Episode aus dem Gegenwartsklima, ist relativ locker mit dem vom Klimamodell simulierten atmosphärischen Geschehen dieses Zeitraums verbunden. Die Verbindung entsteht, weil eine Art „Makrosignal“ der Simulationen ausgewertet wird: Die in der Gegenwartsepisode enthaltenen Zirkulationsmuster sind dienlich, die geforderte, vorgegebene Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster in der Simulation für einen Zeitbereich gut anzunähern. Die vorgegebene Häufigkeitsverteilung ist auch die wichtige, in dieser Phase dringend benötigte Quelle der Information zum zukünftigen Klima. Für die Beschreibung mittlerer Klimaverhältnisse, wie sie in WEREX erfolgt, ist dies zumeist auch ausreichend. Wenn es um Extreme geht, besteht Bedarf, das Verfahren zu erweitern. Das wurde anhand der Defizite gezeigt, die ein dynamisches Klimamodell insbesondere bei Feuchtegrößen besitzt und die bei der Beschreibung von Extremzuständen durch ein daran gekoppeltes statistisches Verfahren Probleme bereitet.

Es stellt sich die Frage: Wenn es besser definierte Beziehungen zwischen dem gemessenen Klima am Boden und dem damit zusammenhängenden Zustand der Atmosphäre gibt, besteht vielleicht die Möglichkeit, sich dies in einer WEREX-KlaMuKo-Kombination zu Nutze zu machen?

Dazu wird die Einführung einer wichtigen neuen Maßnahme vorgeschlagen: **Ersetzung der vom dynamischen Modell simulierten Zeitreihe durch Reanalysedaten**. Dafür ist in Erinnerung zu rufen, dass der WEREX-Wettergenerator im Grunde eine Zeitreihe von Datumszuordnungen erstellt. Die Anweisungskette zur Synthese einer Zeitreihe würde zum Beispiel lauten: „Verwende ein Segment, das aus dem Zeitraum 19.–22.4.1977 stammt – danach verwende ein Segment aus dem Zeitraum 6.–23.5.1985 – danach verwende ein Segment aus dem Zeitraum 23.5.–31.5.2001 etc.“. Die im Zuge dieses Projektes entwickelte und getestete Strategie bedient sich der Annahme, dass diese Datumszuordnungen auch verwendet werden können, um *Segmente aus den Reanalysedaten* zum Zusammenbau einer Zeitreihe von Atmosphärenfeldern zu verwenden. Diese stammen jeweils aus dem Zeitraum eines vom Wettergenerator gefundenen Segments mit Boden- und atmosphärischen Daten, das in die synthetische Zeitreihe eingebaut wird. Stück für Stück wird so die vom dynamischen Modell simulierte Reihe der Atmosphärenfelder durch Reanalysedaten ersetzt, die mit den Segmenten am Boden synchronisiert sind. Es ist zu erwarten, dass die Defizite der dynamischen Modelle durch diesen Austausch entfallen, denn (i) werden zueinander stimmige Zustände am Boden und in der freien Atmosphäre in Verbindung gebracht und (ii) enthalten Reanalysedaten nicht die problematischen Häufigkeitsverteilungen im Bereich der hohen und mittleren Feuchten, wie sie in Abbildung 5 vorgestellt wurden. Das ist der Ausgangspunkt für das Verfahren WMSax2.0, das in diesem Projekt zur Prototyp-Reife gebracht werden soll.

2.5 Besondere Beachtung von Trends

Einiges Nachdenken wurde darauf verwendet, welche Auswirkungen das neue Vorgehen auf Trends hat. Es müssen zunächst Trends in den Feldern der Atmosphäre (die in den multiplen Regressionen Verwendung finden) beachtet werden. Dabei ist eine begriffliche Trennung von zwei Trendquellen notwendig: (i) Der Trend, der durch die Vorgabe einer sich wandelnden Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster entsteht (Stichwort: Verlagerung der Häufigkeit von den kalten zu den warmen WEREX-Klassen) und (ii) der Trend, der in den Feldern selber steckt und vom Klimamodell simuliert wird. Beide sind nach dem oben geschilderten Ersetzen von simulierten Feldern durch Reanalysefelder vermischt.

Des Weiteren ist die Auswirkung auf Trendentwicklung der Zielgröße zu beachten, also z. B. der Häufigkeit von heißen Tagen oder der Wahrscheinlichkeit, dass Starkregen an einem gewissen Teil der Stationen auftritt. Die Trendentwicklung derjenigen Felder, die zur Beschreibung der Zielgröße dient, ist zu berücksichtigen. Dazu wird diese Trendentwicklung auf die Zielgröße aufgeprägt.

Stichpunktartig kann zur Behandlung der Felder der freien Atmosphäre wie folgt vorgegangen werden:

- Das Klimamodell liefert tägliche Felder des Geopotenzials, der Temperatur und der Feuchte auf den Flächen 1.000 hPa, 700 hPa und 500 hPa zwischen den Jahren 1951 und 2100. Daraus wird der jahreszeiten-spezifische lineare Trend für jeden Gitterpunkt bestimmt.
- Die über die Datumsangaben zugeordneten NCAR-Felder enthalten aber schon einen Trend, der sich aus der Änderung der Wetterlagenhäufigkeit ergibt.
- Der resultierende Trend ist der Trend des Klimamodells verringert um den Trend, der sich über die Änderung der Wetterlagen ergibt.

Die Zielgröße (Prediktand) kann aus sehr unterschiedlichen Bereichen stammen. Sie kann ein Klimaparameter am Boden sein, beispielsweise die Temperatur oder der Niederschlags an den Stationen. Sie kann aber auch ein Klimaindikator, beispielsweise das Überschreiten einer Schwelle sein. Sie kann auch eine komplexe Größe wie das Auftreten von Gewittern oder eine aus mehreren Parametern kombinierte Größe sein. Zur Erinnerung: Der Prediktand wird durch eine Kombination von Prediktoren beschrieben. Die Prediktoren entstammen atmosphärischen Feldern. Wird diesen Feldern ein Trend aufgeprägt, wie oben beschrieben, dann hat dies natürlich einen Einfluss auf das zeitliche Verhalten des Prediktanden. Nachfolgend ist kurz aufgeführt, wie der Prediktand zu behandeln ist:

- Über eine multiple Regressionsanalyse werden diejenigen Felder selektiert, die für die Zielgröße relevant sind.
- Die Änderung der Felder ergibt eine Änderung der Zielgröße, die wiederum auf die Zielgröße aufgeprägt wird.

2.6 Anwendungsbeispiel 1 für WMSax2.0: Temperatur

Ziel dieser Anwendung ist, das Potenzial für Zukunftsaussagen bezüglich der Extreme zu veranschaulichen. Zielgröße ist in diesem Beispiel die Tages-Maximumtemperatur (an Stationen in Sachsen unterhalb 400 m ü. NN). Den Zukunftsaussagen zu Grunde liegt in diesem Beispiel eine WETTREG²-Regionalisierung einer Klimaprojektion mit MPI-ESM (Nachfolger von ECHAM 5) Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5 für das 21. Jahrhundert sowie 20C-Daten für das 20. Jahrhundert. Wie zuvor dargelegt, wurden in der Regionalisierung für den Zustand der oberen Atmosphäre statt der MPI-ESM-Daten die Reanalysedaten stimmig zu den von WETTREG-Wettergenerator verbauten Episoden (aus Bodendaten) eingebracht. Zu Grunde liegt außerdem eine KlaMuKo-Analyse, mit deren Hilfe im Klima der Gegenwart die Beziehungen zwischen der Zielgröße und (relevanten) atmosphärischen Feldern ermittelt werden. Danach wird in den Zeitreihen der oberen Atmosphäre aus den modifizierten WETTREG-Daten die Zugehörigkeit zu den KlaMuKo-Klassen bestimmt. Die Ergebnisse für die Maximum-Temperatur im Winter sind in Tabelle 1 und für den Sommer in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Häufigkeit (in Prozent) der 10 KlaMuKo-Klassen für die Dekaden 1971-80 bis 2091-2100. Prediktand: Maximumtemperatur im Winter für sächsische Klimastationen in einer Höhe bis 500 m ü. NN; weitere Erläuterungen zum Tabelleninhalt im Text

Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1971-80	0,8	0,2	5,4	24,4	36,0	16,2	12,1	4,8	0,0	0,1
1981-90	1,0	0,4	7,3	24,3	33,0	16,7	14,0	3,2	0,1	0,0
1991-00	0,7	0,1	6,2	25,6	33,1	15,7	12,6	5,1	0,3	0,4
2001-10	1,8	0,2	8,9	27,6	32,7	14,4	9,6	4,2	0,3	0,3
2011-20	0,8	1,1	10,8	28,6	35,6	11,1	9,6	1,9	0,6	0,6
2021-30	1,7	1,8	8,3	26,1	37,7	10,0	11,5	1,9	0,6	0,6
2031-40	1,0	1,3	13,0	36,3	31,8	9,3	5,5	1,4	0,1	0,2
2041-50	2,7	5,4	17,6	29,6	29,8	6,8	6,0	2,1	0,0	0,1
2051-60	3,8	6,3	14,4	33,9	27,1	7,9	4,9	1,3	0,0	0,4
2061-70	3,5	7,1	19,8	35,2	24,6	5,8	3,7	0,3	0,0	0,0
2071-80	2,8	12,4	20,9	36,1	20,6	3,0	3,4	0,7	0,0	0,1
2081-90	2,3	19,0	22,3	34,4	15,3	4,5	1,7	0,4	0,0	0,0
2091-00	1,3	19,4	23,6	33,7	16,3	4,2	1,2	0,2	0,0	0,0
Trend (%)	2,6	19,4	22,7	18,1	-19,7	-18,8	-16,5	-6,9	-0,4	-0,4
A1971	8,5	2,0	23,5	252,2	308,0	156,2	135,0	13,5	1,7	1,5
A2100	32,4	180,4	231,8	418,7	126,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KMW	14,9	13,2	12,4	8,5	3,6	0,9	-1,3	-5,5	-7,5	-9,3

² Eine auf Sachsen fokussierte WEREX-Regionalisierung, angetrieben mit der aktuellen Version eines Globalmodells und angetrieben mit der neuen (RCP) Generation der Treibhausgas-Szenarios lag zur Bearbeitung dieses Projektes noch nicht vor.

Tabelle 2: Wie Tabelle 1 jedoch für die Maximumtemperatur im Sommer

Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1971-80	0,7	2,3	10,8	24,8	34,2	22,1	2,9	1,5	0,8	0,0
1981-90	0,4	2,4	10,5	21,2	35,8	25,0	3,2	1,2	0,2	0,1
1991-00	1,2	4,7	13,6	23,5	31,0	20,4	3,5	1,4	0,7	0,0
2001-10	1,2	4,6	11,6	24,5	33,6	21,4	2,4	0,8	0,0	0,0
2011-20	1,2	5,1	15,2	29,2	32,5	14,6	1,6	0,2	0,3	0,0
2021-30	1,8	7,9	18,3	26,1	29,6	13,9	1,5	0,9	0,0	0,0
2031-40	5,2	11,5	22,8	27,3	26,6	6,4	0,1	0,0	0,0	0,0
2041-50	8,5	16,3	20,3	24,6	23,6	6,0	0,4	0,3	0,0	0,0
2051-60	7,6	20,2	19,8	28,9	17,5	4,8	0,7	0,5	0,1	0,0
2061-70	13,6	24,1	20,8	25,2	12,8	2,8	0,5	0,1	0,0	0,0
2071-80	16,0	22,1	19,9	25,3	11,3	4,2	0,8	0,4	0,0	0,0
2081-90	21,2	23,2	17,6	20,1	11,8	5,0	0,7	0,3	0,1	0,0
2091-00	27,6	24,1	14,9	17,7	10,1	4,1	1,0	0,5	0,0	0,0
Trend (%)	26,0	28,8	12,1	0,5	-30,3	-30,1	-5,0	-1,6	-0,8	-0,0
A1971	3,5	28,5	74,5	227,0	315,7	311,2	6,5	1,5	3,5	0,2
A2100	242,7	293,4	188,5	231,6	36,9	34,2	0,0	0,0	0,0	0,0
MW	35,7	32,8	29,9	26,2	21,7	16,8	12,6	11,5	10,3	5,6

Erläuterung zu Tabelle 1 bis Tabelle 3:

Die Tabellen zeigen Angaben zu 10 KlaMuKo-Klassen. Die ersten 13 Datenzeilen beinhalten die prozentualen Häufigkeiten der Klassen für die Dekaden 1971-1980, ..., 2091-2100. Darunter folgt eine Angabe zum Trend. Dieser wurde aus den darüber stehenden 13 *Prozentangaben* der jeweiligen Klasse bestimmt. Er ist also in prozentualen Einheiten aufgeführt. Für die Zeilen A1971 und A2100 wurde mit Hilfe der Trendgeradengleichung der Wert für das erste und das letzte Jahrzehnt bestimmt. Zusätzlich erfolgte eine Umrechnung: Die Prozente wurden mit Hilfe der Zahl der zwischen 1971 und 2100 insgesamt identifizierten Gesamtzahl in *Absolutzahlen* umgewandelt. Im Fall der Maximumtemperatur im Winter (Tabelle 1) steigt die Gesamtzahl der Fälle der Klasse 1 beispielsweise von 8,5 in der Dekade 1971-80 auf 32,4 in der Dekade 2091-2100 an. Ermittelt die Geradengleichung einen negativen Wert für eine Dekade, so wird die Anzahl auf 0 gesetzt. Zu beachten sind zudem die Angaben zum Klassenmittelwert (KMW) in der letzten Tabellenzeile. Ihnen ist zu entnehmen, ob es sich z. B. um „kalte“ oder „warme“ Klassen handelt.

Ein weiteres Beispiel aus Tabelle 1 sei hier angefügt. Die Klasse 2 ist ein interessantes Anzeichen dafür, dass ein fast bedeutungsloser Atmosphärenzustand in der Gegenwart zu einer großen Häufigkeit in der Zukunft anschwillt. Für Klasse 2 (mit einem Mittelwert von rund +13 °C [im Winter!] als sehr warm einzustufen) werden am Anfang des Zeitraums nahe 0 % und am Ende um 19 % Anteil gefunden. In prozentualen Einheiten ergibt sich damit ein linearer Trend mit einer Steigung von 19,4 Einheiten. Die beiden nachfolgenden Zeilen unterstreichen die Stärke des Anstiegs weiter. Dort ist, in absolute Zahlen umgerechnet (als Mittelwert über eine Dekade), angegeben, wie viele Fälle am Anfang (A1971) und wie viele am Ende (A2100) des Zeitraums auftreten – ausgerechnet über den Verlauf der Trendgeraden. Für die Klasse 2 der Winter-Maximumtemperatur bedeutet das beispielsweise eine Zunahme von 2 auf 180 Fälle! Auch für Klasse 3 erhöht sich das Auftreten in beachtlichem Maße.

Die Verhältnisse bei der sommerlichen Tages-Maximumtemperatur zeigen eine ähnliche Form: Seltene, extrem warme Klassen (hier die Klassen 1 bis 3) werden häufiger – die Ausnahme wird quasi zur Regel. Kalte Klassen (hier die Klassen 7-10) verschwinden.

Im Zuge der Interpretation der Ergebnisse sei auf einen wichtigen Aspekt bei der Betrachtung der Klassen hingewiesen. Es geht um *Extreme* und daher sind die „mittleren Klassen“ nicht im Vordergrund. Trendaussagen dieser Klassen dürfen nicht überinterpretiert werden, zumal sie mit der Beschreibung des Extremverhaltens wenig zu tun haben.

2.7 Anwendungsbeispiel 2 WMSax2.0: Niederschlag

Das Beispiel verwendet Niederschlagsmessungen an vier hoch gelegenen Stationen. Die Atmosphärenfelder, mit denen der Niederschlag für diese Stationen am besten beschrieben werden kann, sind mit der Feuchte und der Atmosphärendynamik verknüpft. Auch wenn die Korrelationen geringer sind als bei der Beschreibung der Temperatur, sind sie doch für die komplexe Zielgröße Niederschlag beachtlich hoch. In Tabelle 3 sind die Analysen des Niederschlags im Sommer dargestellt.

Die Klassen 1 und 2 stellen ganz besonders seltene Starkregenereignisse dar. Es ist dabei hervorzuheben, dass zur Entstehung dieser Klassen auch sehr unterschiedliche Konstellationen an atmosphärischen Bedingungen beteiligt gewesen sein müssen, weil das KlaMuKo-Verfahren ansonsten nicht zur Bildung von zwei unterschiedlichen Klassen geführt hätte. Des Weiteren zeigt sich, dass beim Niederschlag nur die ersten zwei bis vier Klassen Relevanz für Extrembetrachtungen besitzen – die übrigen Klassen sind zwar ihrem Klassenmittelwert zufolge geordnet, aber sie sind relativ unscharf und die konkrete Zuordnung ist eher zufällig – auch die Tatsache, dass eine Klasse (hier Klasse 8) stark besetzt ist, hat zufällige Ursachen. Im Einzelnen ist hervorzuheben, dass die ersten beiden Klassen zwar in der Gegenwart sehr selten sind, aber doch eine deutlich zunehmende Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens in einem zukünftigen Klima zu erkennen ist. So nimmt in den KlaMuKo-Ergebnissen die Klasse 1 von einem Auftreten „weniger als ein Mal pro Dekade“ im Jahrzehnt 1971-80 auf „fünf Mal pro Dekade“ im Jahrzehnt 2091-2100 zu. Bei Klasse 2 ist die Auftrittshäufigkeit im Jahrzehnt 1971-80 ähnlich wie bei der Klasse 1. Sie nimmt auf „2,5-mal pro Dekade“ im Jahrzehnt 2091-2100 zu. Die Trendentwicklungen der übrigen Klassen sind als uneinheitlich zu bezeichnen.

Tabelle 3: Wie Tabelle 1 jedoch für den Niederschlag im Sommer

Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1971-80	0,1	0,3	3,5	4,1	11,2	17,0	1,1	45,9	15,4	1,4
1981-90	0,0	0,1	2,8	3,9	10,1	14,0	2,2	48,8	15,8	2,3
1991-00	0,2	0,3	2,5	3,0	9,2	16,6	2,0	46,2	18,2	1,6
2001-10	0,2	0,0	2,5	2,8	7,4	18,3	2,0	48,5	16,0	2,4
2011-20	0,4	0,0	4,0	4,6	10,8	21,1	1,5	45,4	11,0	1,2
2021-30	0,3	0,3	2,7	7,0	9,0	19,8	1,0	48,6	9,3	2,0
2031-40	0,7	0,4	4,5	7,0	7,9	21,5	2,7	44,6	8,4	2,4
2041-50	0,4	0,1	2,9	5,8	6,6	25,8	2,1	44,6	7,9	2,9
2051-60	0,3	0,2	1,2	8,4	4,7	28,2	2,0	45,3	7,2	2,6
2061-70	1,0	0,1	2,8	10,7	5,3	29,3	1,8	41,7	4,7	2,5

Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2071-80	1,0	0,4	2,4	12,3	4,8	31,2	1,5	40,0	3,7	2,7
2081-90	1,7	0,2	1,8	16,5	4,7	34,7	0,8	36,1	1,5	2,0
2091-00	0,9	0,2	2,5	19,1	5,9	30,9	2,4	32,7	3,0	2,4
Trend (%)	1,3	0,2	-0,8	15,1	-7,4	20,2	-0,5	-9,8	-19,4	1,0
A1971	0,5	0,3	7,7	43,5	50,0	102,7	3,2	567,7	129,0	6,2
A2100	5,1	2,5	0,3	181,5	0,0	287,8	0,0	476,8	16,6	15,4
MW	100,6	66,8	18,0	11,0	6,8	6,7	5,2	2,0	1,6	1,4

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist folgender wichtiger Hinweis zu beachten: Es ist nicht notwendigerweise gegeben, dass zum Ende des 21. Jahrhunderts fünf 100 mm-Starkniederschlagsereignisse pro Dekade auftreten, wie es die Entwicklung der Klasse 1 in Tabelle 3 vielleicht nahe legen könnte. Vielmehr zeigen diese Ergebnisse, dass atmosphärische Bedingungen, die im Klima der Gegenwart zu Extremereignissen dieser Größenordnung geführt haben, sich in ihrer Häufigkeit verändern.

2.8 Fazit

Es gibt im Grunde drei Modellierungsvarianten, die im weiterführenden Projekt zum Einsatz kommen und für nutzerdefinierte Untersuchungen verwendet werden sollten:

- WEREX VI in Standardform – hier wird die Regionalisierung ohne Zusatzmaßnahmen durchgeführt, angelehnt an das Vorgehen in vorherigen WEREX-Studien. Das heißt, es werden umfangreichere, besser qualitätskontrollierte Stationsdaten und neuere Versionen von Globalmodellen und Treibhausgas-Szenarios eingesetzt. Ziel ist eine Beschreibung des mittleren Klimazustands. Außerdem sind Vergleiche mit den früher eingesetzten WEREX-Versionen möglich. Diese Variante erzeugt, wie auch die früher benutzten WEREX-Versionen, zehn gleichwertige Realisierungen des Zukunftsklimas.
- KlaMuKo in Standardform – hierbei können aus dem Klima der Jetztzeit relevante Kombinationen von großräumigen atmosphärischen Parametern zur Beschreibung regionaler Extreme ermittelt werden. Diese Variante ermittelt auf diagnostischem Wege Beziehungen zwischen großräumiger und regionaler Skala, die für viele Nutzer sinnvolle Weiterbearbeitung zulassen. KlaMuKo nutzt in der Standardform jeweils einen Lauf eines dynamischen Klimamodells als Antrieb und erzeugt einen Satz an Klassen. Sollte neben der Diagnose der skalenübergreifenden Beziehungen auch das Zukunftsverhalten von Extremen von Interesse sein, so können viele Temperaturgrößen relativ gut dargestellt werden; bei anderen, insbesondere mit Niederschlag verbundenen Extremen wird ein weiterer, nachstehend geschilderter, Schritt empfohlen.
- WMSax2.0 als Kombination eines erweiterten WEREX VI und KlaMuKo – hierbei wird das WEREX-Verfahren selbst modifiziert (Ersetzen von Klimamodell-Daten durch Segmente aus den Reanalysen, die stimmig mit den vom WEREX-Wettergenerator synthetisierten Reihensegmenten sind). Auf dieser Basis werden die Häufigkeiten der KlaMuKo-Klassen in den modifizierten Daten der freien Atmosphäre ermittelt. Dabei entstehen, wie in WEREX, zehn gleichwertige Realisierungen des Zukunftsklimas.

3 Sensitivitätsuntersuchungen

Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt. Einige untersuchen Aspekte von WETTREG/WEREX und andere betrachten Details von KlMuKo.

3.1 Verkürzung des Datenpools

Diese Sensitivitätsuntersuchung beleuchtet einen Aspekt von WETTREG/WEREX. Die Fragestellung ist: Angenommen, es gibt einen sehr gut qualitätskontrollierten Datensatz der Klimastationen, aber dieser umfasst einen deutlich kürzeren Zeitraum. Hierfür wurde eine Studie mit WETTREG vorgenommen, bei der dem Wettergenerator für die Selektion der Episoden nur der Zeitraum 1991-2010 zur Verfügung stand (Variante A). Zum Vergleich wurde das „reguläre“ WETTREG benutzt, das den Zeitraum 1971-2010 verwendet (Variante B). In der Abbildung 7 ist das Signal der Maximumtemperatur für Sachsen im Sommer dargestellt, Abbildung 8 zeigt die Verhältnisse im Winter. Dafür wurde die Differenz der Zeitabschnitte 2071-2100 und 1971-2000 gebildet. Der Antrieb erfolgte mit dem Klimamodell MPI-ESM und dem Treibhausgasszenario RCP8.5.

Es zeigt sich, dass insbesondere im Sommer durch die Verkürzung des Zeitraums nutzbarer Episoden größere Unterschiede zwischen den Temperatursignalen auftreten. Das Temperatursignal unter Verwendung des Zeitraums 1991-2010 beträgt im Flächenmittel 4,3 °C während es für den Regelfall (Verwendung von 1971-2010) 5,0 °C beträgt. Im Winter sind die Unterschiede mit 0,3 °C deutlich geringer; die Verkürzung spielt hier eine untergeordnete Rolle.

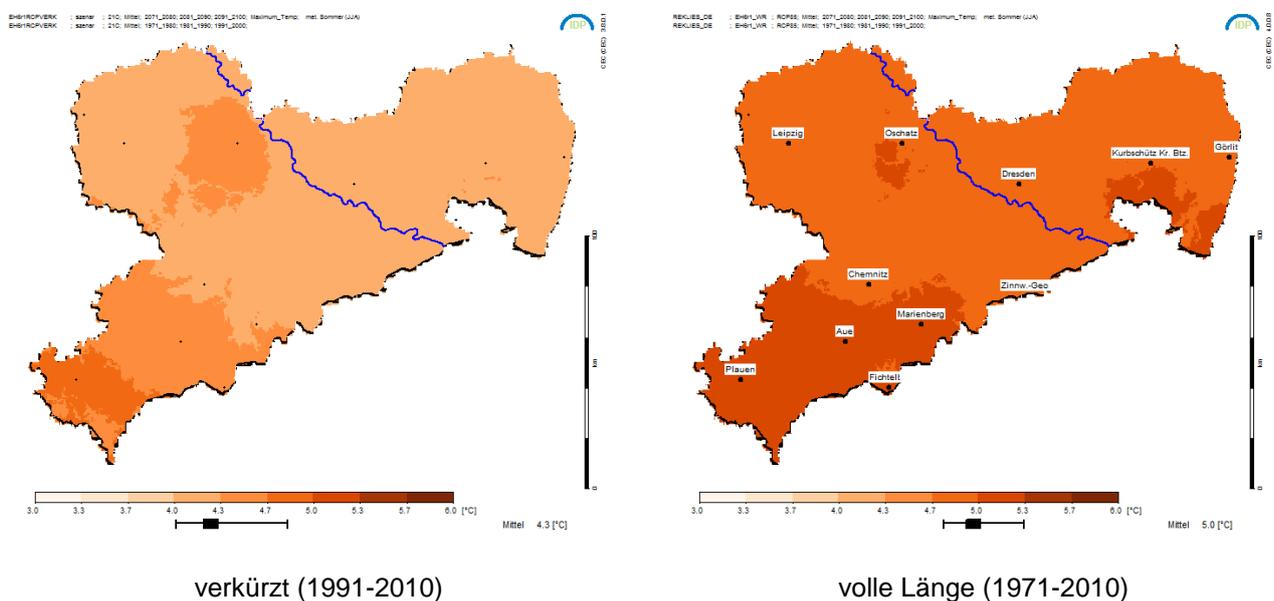
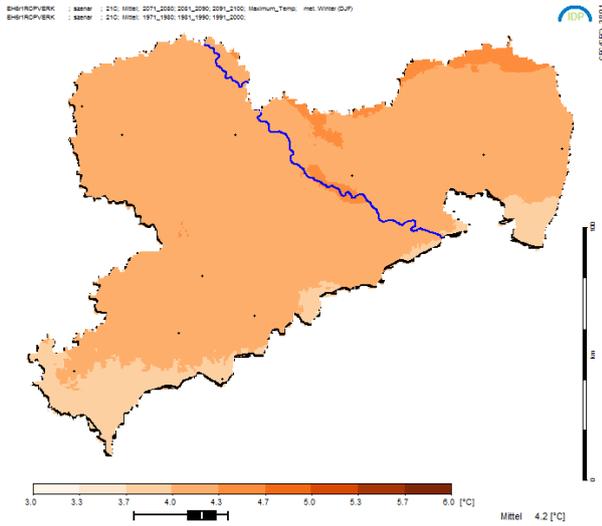
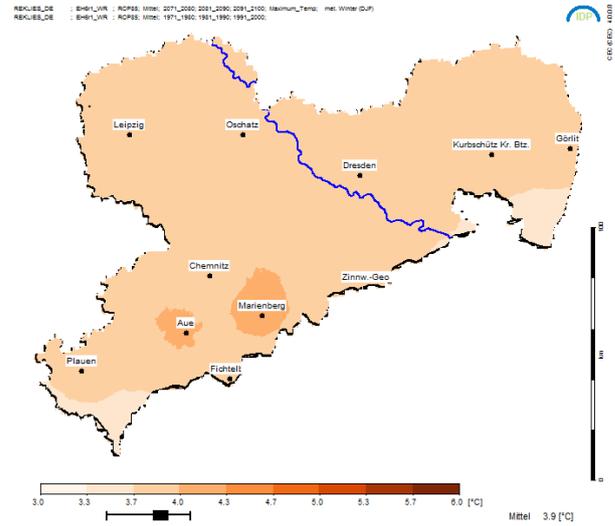


Abbildung 7: Auswirkung der Verkürzung des Vorrats an nutzbaren Klimadaten auf das Signal der Tagesmaximumtemperatur im Sommer in WETTREG-Regionalisierungen, angetrieben mit MPI-ESM Szenario RCP8.5



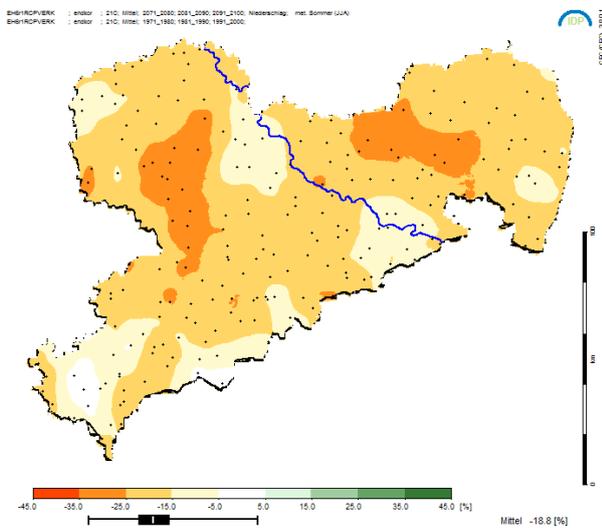
verkürzt (1991-2010)



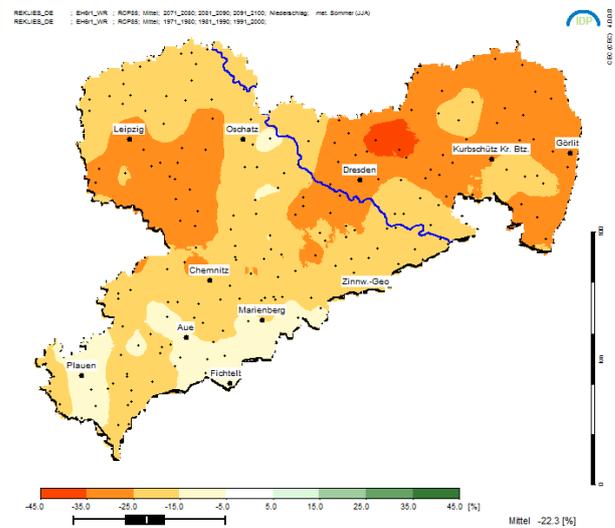
volle Länge (1971-2010)

Abbildung 8: Wie Abbildung 7, jedoch für die Tagesmaximumtemperatur im Winter

Bei den Signalen des Niederschlags, dargestellt für den Sommer in Abbildung 9 und für den Winter in Abbildung 10, sind die Unterschiede geringer. Der sommerliche Rückgang wird mit dem verkürzten Episodenvorrat für die Fläche Sachsens im Mittel mit -19 % simuliert, während die Nutzung des vollen Zeitraums zu einem Signal von -23 % führt. Im Winter sind die Unterschiede zwischen beiden Varianten ebenfalls gering: Die Zunahme ist im Fall des verkürzten Episodenvorrats 14 % und im Fall der Nutzung des vollen Zeitraums 9 %.



verkürzt (1991-2010)



volle Länge (1971-2010)

Abbildung 9: Auswirkung der Verkürzung des Vorrats an nutzbaren Klimadaten auf das Signal des Niederschlags im Sommer in WETTREG-Regionalisierungen, angetrieben mit MPI-ESM Szenario RCP8.5

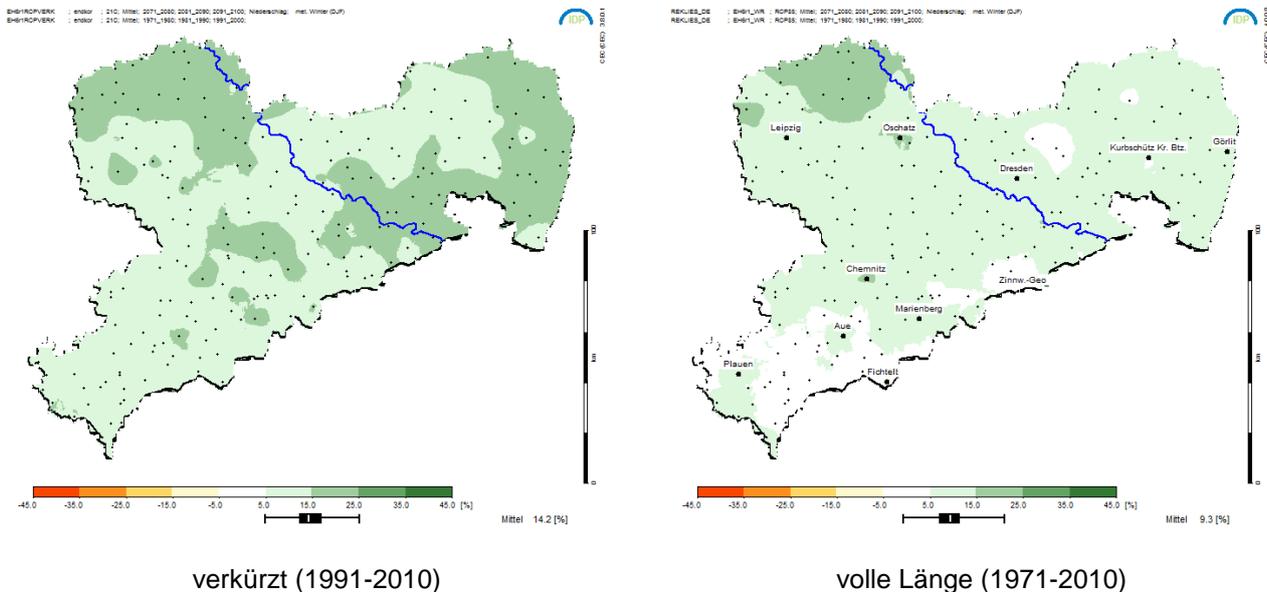


Abbildung 10: Wie Abbildung 9, jedoch für den Niederschlag im Winter

3.2 Nutzung des Niederschlags als Leitgröße

Diese Sensitivitätsuntersuchung untersucht einen anderen Aspekt von WETTREG/WEREX, die so genannte Leitgröße. Zur Erinnerung: Auch WETTREG ist ein Klassifikationsverfahren. Dort werden, anders als bei Klamuko, Größen einer Klimavariablen am Boden, beispielsweise der Temperatur, in Intervalle eingeteilt. Dahinter steht die Grundannahme, dass es Gemeinsamkeiten zwischen den Tagen, an denen ein bestimmter Temperaturbereich auftrat und dem großräumigen Atmosphärenzustand gibt. Die Temperatur ist in diesem Fall die Leitgröße. Die den Temperaturintervallen zugehörigen Tage bilden eine sich über die Zeit ändernde Häufigkeitsverteilung. Sie ist die wichtigste Steuerungsgröße für den Wettergenerator von WETTREG. Im Fall des Niederschlags ist die Leitgröße der Niederschlag – analog zur Strategie bei der Temperatur werden Klassen gebildet, die bestimmten Intervallen der Tagesniederschlagsmenge entsprechen. Anders als bei der Temperatur wird beim Wettergenerator im Fall der Synthetisierung von Niederschlagszeitreihen eine Kombination von Häufigkeitsverteilungen der Niederschlags- und der Temperaturklassen verwendet. Dies ist das Standardvorgehen.

Für die Sensitivitätsuntersuchung wird nun das Verfahren modifiziert und sowohl für Temperatur als auch für Niederschlag werden die Intervalle der Leitgröße Niederschlag sowohl für die Temperatur als auch für den Niederschlag eingesetzt – im Regelfall wird, wie oben beschrieben, beim Niederschlag ja eine Kombination aus den Leitgrößen Niederschlag und Temperatur benutzt.

In Abbildung 11 ist das Klimasignal für den Sommer die Tagesmaximumtemperatur und den Niederschlag dargestellt. Es berechnet sich aus den WETTREG-Regionalisierungen, angetrieben mit dem Globalmodell MPI-ESM und dem Szenario RCP8.5. Verwendet wurden die Mittel der Zeitabschnitte 1971-2000 (20C-Daten) und 2071-2100 (Szenario). Auffällig ist, dass bei Benutzung des Niederschlags als Leitgröße ein deutlich zu niedriges Temperatursignal ermittelt wird. Im Standardfall, das heißt bei Nutzung der Temperatur als Leitgröße für Temperaturentscheidungen (vgl. die rechte Seite von Abbildung 7) ist ein Temperatursignal von 5,0 °C zu erwarten, während die inadäquate Wahl der Leitgröße zu einem Temperatursignal von 2,8 °C führt. Der Niederschlag wird bei Verwendung des Niederschlags als Führungsgröße in der gleichen Größenordnung wie im

Standardfall dargestellt. Es wird, über die Fläche Sachsens gemittelt, ein Rückgang von 28 % errechnet, während im Standardfall (vgl. rechte Seite von Abbildung 9) ein Rückgang von 23 % bestimmt wurde. Zur Erinnerung: Der WETTREG-Standard nutzt für den Niederschlag eine Kombination aus den Leitgrößen Niederschlag und Temperatur, während in dieser Sensitivitätsuntersuchung einzig der Niederschlag als Leitgröße eingesetzt wird.

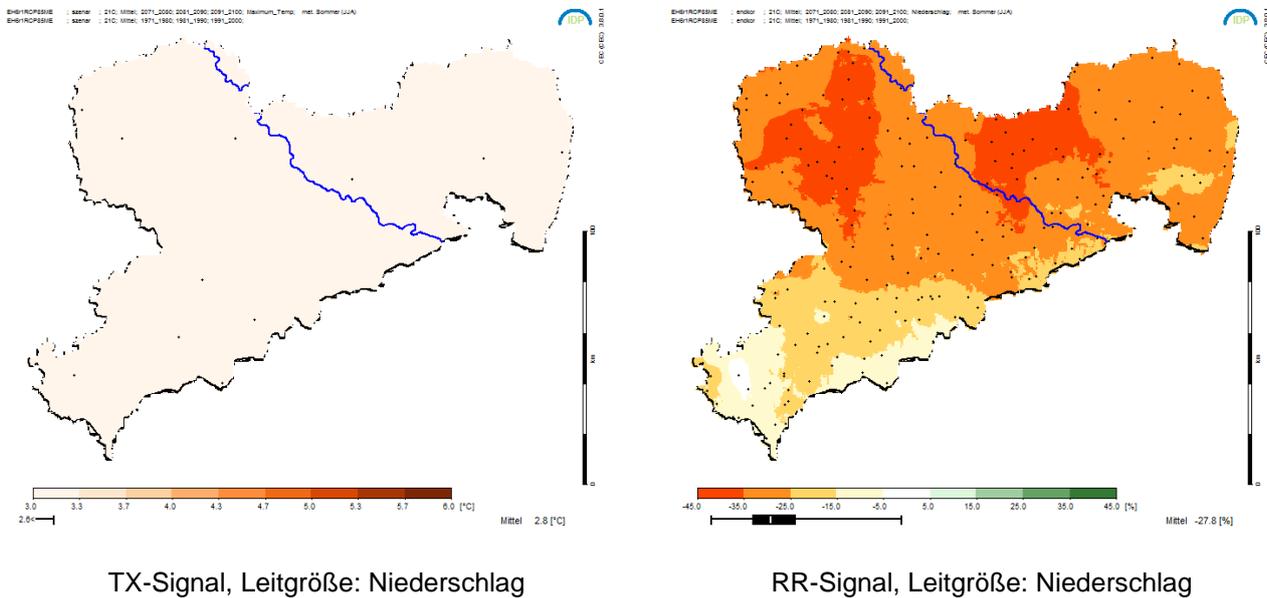
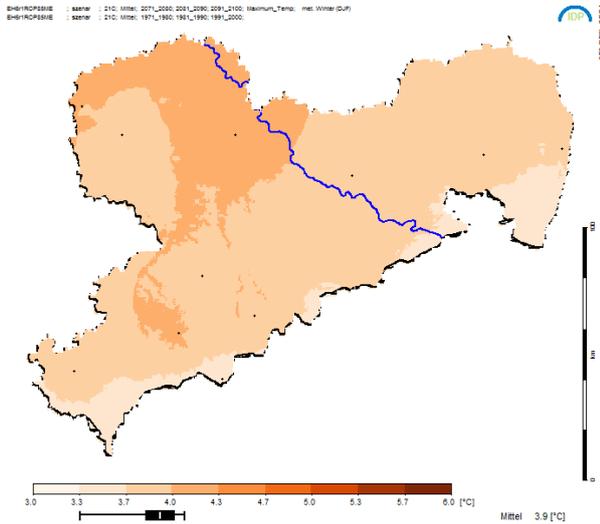
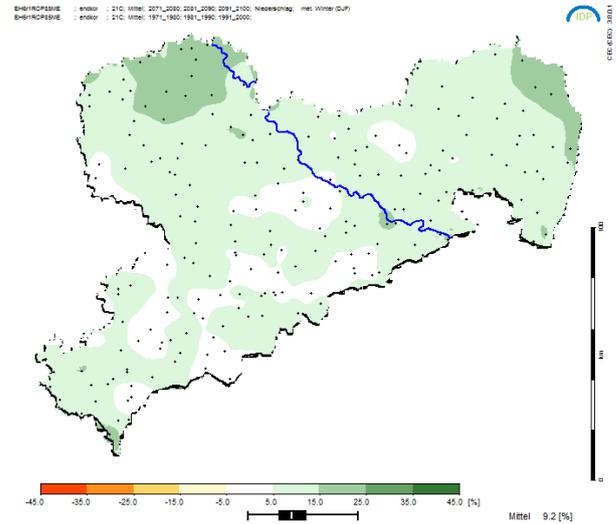


Abbildung 11: Auswirkung der Verwendung des Niederschlags als Leitgröße bei der Bestimmung der Klimasignale von Maximumtemperatur (links) und Niederschlag (rechts) im Sommer

Die Auswirkung der Verwendung des Niederschlags als Leitgröße im Winter ist in Abbildung 12 dargestellt. Es ist erkennbar, dass das Temperatursignal auch bei Verwendung einer nicht-adäquaten Leitgröße im Winter relativ gut abgebildet wird. Im Standardfall von WETTREG, also der Nutzung der Temperatur als Leitgröße für Temperaturentscheidungen, wurde ein Anstiegssignal der Maximumtemperatur von 3,9 °C (vgl. rechte Seite von Abbildung 10) ermittelt, das auch demjenigen bei Nutzung des Niederschlags als Leitgröße in Abbildung 12 entspricht. Auch beim Niederschlag ist der Unterschied nur sehr gering, denn sowohl in der Standardform von WETTREG als auch in dieser Sensitivitätsuntersuchung wurde ein Anstieg von rund 9 % ermittelt.



TX-Signal, Leitgröße: Niederschlag



RR-Signal, Leitgröße: Niederschlag

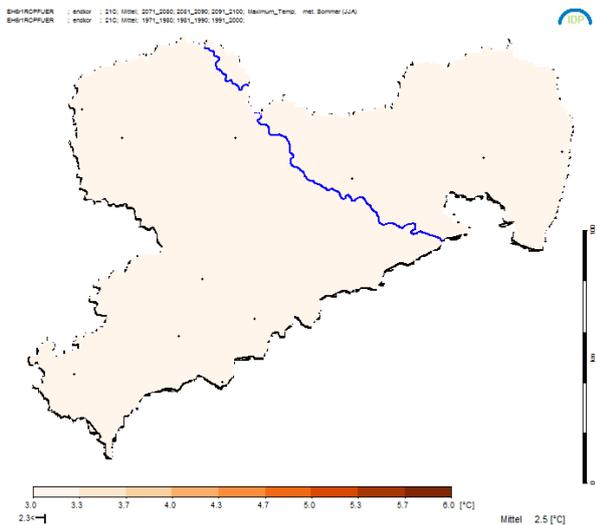
Abbildung 12: Wie Abbildung 11, jedoch für die Verhältnisse im Winter

3.3 Nutzung der Klimatischen Wasserbilanz als Leitgröße

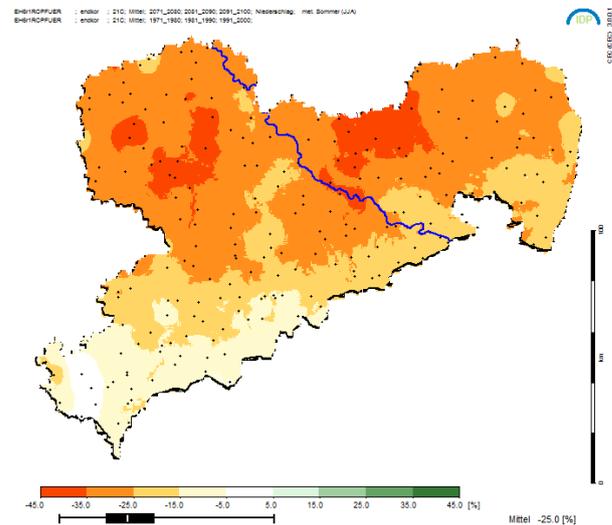
Dieser Sensitivitätsuntersuchung lag eine Abwandlung der Fragestellung von Kapitel 3.2 zu Grunde. Nicht der Niederschlag, sondern die Klimatische Wasserbilanz wurde als WETTREG-Leitgröße eingesetzt. Die Ergebnisse für den Sommer sind in Abbildung 13 dargestellt.

Ähnlich wie bei der Analyse mit dem Niederschlag als Leitgröße wird in diesem Fall das Anstiegssignal der sommerlichen Tagesmaximumtemperatur gegenüber dem Standardvorgehen von WETTREG klar verfehlt. Ein Signal mit der Klimatischen Wasserbilanz als Leitgröße von 2,5 °C steht dem Standardsignal von 5,0 °C gegenüber. Beim Niederschlag mit einer Abnahme von 25 % im Sommer wird eine gute Näherung an das Signal der Standardfassung von WETTREG (Rückgang um 23 %) gegeben.

Die Ergebnisse für den Winter sind bei dieser Sensitivitätsuntersuchung ebenfalls denjenigen unter Verwendung des Niederschlags als Leitgröße ähnlich: Sowohl das Temperatur- als auch das Niederschlagssignal werden im Vergleich mit dem Standardvorgehen gut reproduziert.



TX-Signal, Leitgröße: klimatische Wasserbilanz



RR-Signal, Leitgröße: klimatische Wasserbilanz

Abbildung 13: Auswirkung der Verwendung der Klimatischen Wasserbilanz als Leitgröße bei der Bestimmung der Klimasignale von Maximumtemperatur (links) und Niederschlag (rechts) im Sommer

Fazit der drei Sensitivitätsuntersuchungen mit WETTREG

- Im Sommer treten die größeren Unterschiede bei Abweichungen vom Standardvorgehen auf als im Winter.
- Niederschlagssignale sind relativ wenig sensitiv gegenüber der Wahl der Leitgröße.
- Die Temperatursignale im Sommer sind besonders stark davon abhängig, dass auch die Temperatur als Leitgröße verwendet wird – Niederschlag und KWB sind hier als völlig inadäquate Leitgrößen zu bezeichnen.
- Sowohl Niederschlag als auch KWB als Leitgrößen liefern ähnliche Klimasignale bei Temperatur und Niederschlag.
- **Es ist empfehlenswert, die Temperatur als Leitgröße beizubehalten – sie ist der „Generalist“ und führt konsistent zu nachvollziehbaren Klimasignalen.**

3.4 Bedeutung der Anzahl der KlaMuKo-Klassen

Dieser Teil der Sensitivitätsuntersuchungen untersucht den Aspekt der Klassenzahl bei KlaMuKo. Beispiele in anderen Abschnitten dieses Projektes wurden einer KlaMuKo-Version durchgeführt, die zehn Klassen bilden sollte. Hier wurden Alternativen getestet, indem das Verfahren auch in Versionen betrieben wurde, die 15 bzw. 20 Klassen bilden. Der Prediktand basierte auf dem Niederschlag im Sommer für die Gruppe der Klimastationen Sachsens, die höher als 500 m ü. NN gelegen sind, wurde aber ebenfalls variiert:

- Niederschlag an allen Tagen des Sommers, ganz gleich, ob an ihnen Niederschlag fiel oder nicht
- Tage, an denen 5 mm oder mehr Niederschlag fiel (Peak-over-Threshold, Variante A)
- Tage, an denen 10 mm oder mehr Niederschlag fiel (Peak-over-Threshold, Variante B)

Die Beurteilung erfolgte anhand folgender Maße:

- Multiple Korrelation (des Prediktanden mit seinen Prediktoren). Je nach Prediktand wurden auch verschiedene Sätze von Prediktoren als relevant identifiziert. Mit der multiplen Korrelation kann gemessen werden, wie stringent die Beschreibung des jeweiligen Prediktanden durch die Prediktoren ist. Im Idealfall liegt sie bei 1,0.
- Restfehler. Diese Größe misst den von den Prediktoren nicht beschriebenen Anteil der Prediktanden-Zeitreihe. Sie ist sensitiv gegenüber der Anzahl der untersuchten Werte.
- Streuung der 10 bzw. 15 bzw. 20 Klassenmittelwerte. Nach der KlaMuKo-Analyse können für jede Klasse die Mittelwerte aller ihr gruppierten Tage bestimmt werden. Diese haben eine Streuung, die Ausdruck der Stringenz der Klassifikation ist.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsuntersuchung sind in Tabelle 4 dargestellt. Sie ist in drei Blöcke eingeteilt, in denen sich die Maßzahlen für die jeweils verwendete Klassenzahl befinden. Multipler Korrelationskoeffizient und Restfehler wurden bestimmt, bevor die einzelnen Tage den KlaMuKo-Klassen zugeordnet wurden. Sie sind folglich von der Klassenzahl unabhängig. Für jede Variante des Prediktanden (Zeilen in einem Block der Tabelle) wurden zudem unterschiedliche Prediktoren identifiziert. Die Anwendung des Verfahrens zur Bildung von 10, 15 oder 20 Klassen verwendet für jede Prediktanden-Variante jedoch dieselben Prediktoren.

Es muss festgehalten werden, dass die Zahl der untersuchten Tage infolge der Verwendung von Schranken stark abnimmt. Eine Art „Unschärferelation“ ist zu konstatieren:

- Die Fokussierung auf Extreme verbessert die multiple Korrelation. Das bedeutet, die Beschreibung des Prediktanden durch die Regressionsgrößen erfolgt *dichter am Phänomen* als im Fall der Untersuchung aller Tage. Letztere umfasst auch niederschlagsfreie Tage und diese „behindern“ die Identifikation stringenter Zusammenhänge zwischen regionalem Klimaparameter und dem großräumigen Zustand der Atmosphäre.
- Je stärker das Extrem, desto größer ist auch der Restfehler. Daraus folgt, dass Ergebnisse von Extrembeobachtungen eine *geringere Belastbarkeit* besitzen als solche, die eher den mittleren Zustand beschreiben.

Eine Einteilung in mehr als zehn Klassen hat Vorteile, die sich in einer geringeren Streuung über die Klassenmittelwerte zeigen. Je mehr Klassen KlaMuKo bilden kann, desto mehr Klassen mit sehr wenigen Fällen entstehen, die Spezifika besonderer Einzelfälle beinhalten.

Tabelle 4: Statistische Maßzahlen für KlaMuKo-Klassifikationen mit 10, 15 und 20 Klassen für Niederschlag und Starkniederschlag

Schranke	Tage	Multipler Korrelationskoeffizient	Restfehler	Klassenzahl	Streuung der KM
–	3680	0,53	5,93	10	57,29
5 mm	784	0,54	8,97	10	61,98
10 mm	358	0,62	10,07	10	58,93
–	3680	0,53	5,93	15	48,74
5 mm	784	0,54	8,97	15	51,81
10 mm	358	0,62	10,07	15	48,61
–	3680	0,53	5,93	20	42,45
5 mm	784	0,54	8,97	20	47,38
10 mm	358	0,62	10,07	20	44,09

3.5 Untersuchung der Stabilität von KlaMuKo

Das KlaMuKo-Verfahren nutzt, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, einen Bestand an potenziellen Prediktoren, aus denen es eine Kombination derjenigen Prediktoren auswählt, die den Prediktanden mit möglichst hoher Güte beschreiben. In dieser Sensitivitätsuntersuchung wurde getestet, wie sich KlaMuKo verhält, wenn sukzessive potenzielle Prediktoren von der Analyse ausgeschlossen werden. Das Schema dieses Vorgangs ist wie folgt:

1. Durchführung einer Analyse mit KlaMuKo, Bestimmung des Satzes von Prediktoren mit der höchsten Beschreibungsgüte
2. Entfernung des „besten“ Prediktors (höchste Korrelation mit dem Prediktanden) aus dem Bestand der potenziellen Prediktoren
3. erneuter Lauf von KlaMuKo mit dem reduzierten Bestand an potenziellen Prediktoren
4. Test, wie sich die Beschreibungsgüte unter Verzicht auf den besten Prediktor verändert
5. iterative Wiederholung der Schritte 2., 3. und 4. bis kein Prediktor übrig ist

Ein Beispiel für die wegfallenden Prediktoren sei hier angeführt. Aufgelistet sind die Prediktoren für die ersten 12 Durchgänge. Der Prediktand ist die Tagesmaximumtemperatur im Sommer an tief gelegenen Stationen in Sachsen. Es werden in jedem Durchgang jeweils fünf Prediktoren identifiziert und der an erster Stelle stehende Prediktor wird für die weitere Verwendung gesperrt.

Stufe 1 – Relative Topografie 1.000/850 hPa

Stufe 2 – Relative Topografie 1.000/700 hPa

Stufe 3 – Temperatur 850 hPa

Stufe 4 – Relative Topografie 1.000/500 hPa

Stufe 5 – Geopotenzial 500 hPa

Stufe 6 – Geopotenzial 700 hPa

Stufe 7 – u Komponente des thermischen Winds 1.000/850 hPa

Stufe 8 – Pseudopotenzielle Temperatur 1.000 hPa

Stufe 9 – Temperatur 700 hPa

Stufe 10 – Relative Feuchte 850 hPa

Stufe 11 – Geopotenzial 850 hPa

Stufe 12 – Horizontale Differenzen in Ost-West-Richtung 700 hPa

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der multiplen Korrelation und des Restfehlers für die Maximumtemperatur in Sachsen (Stationen, die unter 500 m ü NN gelegen sind) im Sommer. Es fällt auf, dass das sehr hohe Niveau der Korrelation von 0,9 und mehr sich im Zuge der ersten rund 30 Wegnahmen kaum ändert. Das heißt, KlaMuKo ist auch in der Lage, eine ähnliche Darstellungsgüte zu erreichen, wenn Prediktoren identifiziert werden, die weniger effizient zur Beschreibung des Prediktanden dienen. Der Restfehler nimmt dabei von etwas unter 2 auf knapp 5 zu. Dieser Unterschied weist auf den generellen Informationsgewinn durch den Einsatz der Regression hin. Der am Ende, bei Wegfall aller Prediktoren, erreichte Wert ist gleichzeitig der Fehler, der ohne den Einsatz von KlaMuKo entstünde.

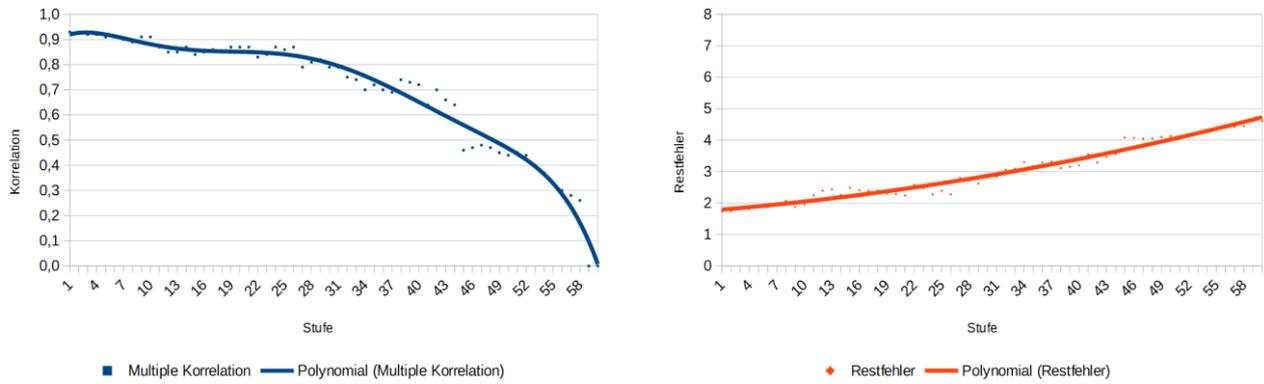


Abbildung 14: Multiple Korrelation (links) und Restfehler (rechts) bei sukzessiver Wegnahme von Prediktoren mit der jeweils höchsten Korrelation. Predikand: Maximumtemperatur im Sommer. Stationen in Sachsen unterhalb eines Höhengniveaus von 500 m ü. NN

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse dieser Sensitivitätsuntersuchung für die Maximumtemperatur im Winter. Im Vergleich zum Sommer startet die Korrelation auf ähnlich hohem Niveau; der Rückgang, also der Informationsverlust bei Verzicht auf mehr und mehr Prediktoren, ist jedoch etwas stärker als im Sommer. Der Restfehler besitzt im Winter eine ähnliche Größenordnung wie im Sommer.

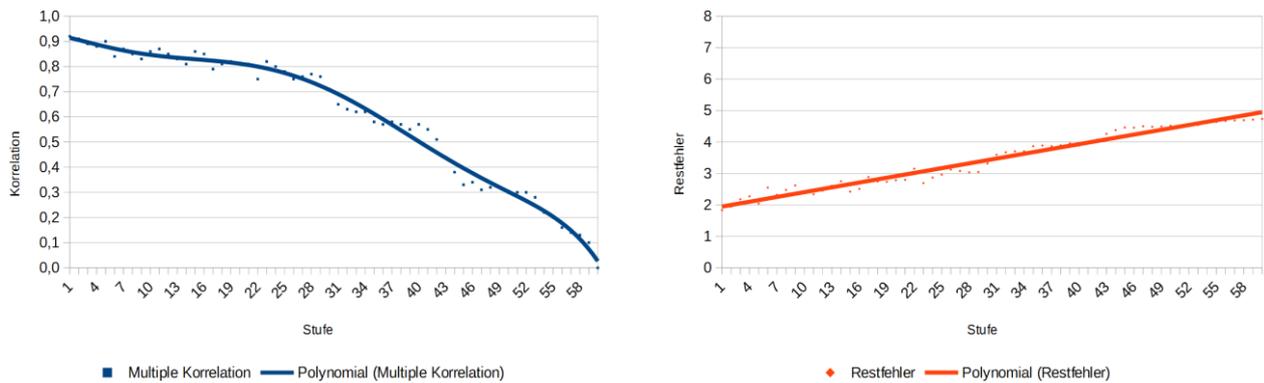


Abbildung 15: Wie Abbildung 14, jedoch für die Maximumtemperatur im Winter

Als nächstes werden die Ergebnisse für eine analoge Untersuchung beim Niederschlag im Sommer vorgestellt (Abbildung 16). Hier fällt zunächst auf, dass das Korrelationsniveau mit rund 0,5 deutlich niedriger als bei der Temperatur ist. Außerdem ist beim Niederschlag der sukzessive Rückgang der Korrelation durch den Wegfall von mehr und mehr Prediktoren gering – die Kurve verläuft anfangs sehr flach. Der Restfehler ist im Vergleich zur Temperatur auch schon bei Nutzung des vollständigen Satzes der potenziellen Prediktoren deutlich größer und liegt bei etwas über 6. Allerdings verläuft auch diese Kurve relativ flach, das heißt, der gesamte Informationsgewinn durch die Nutzung der Regression ist beim Niederschlag geringer.

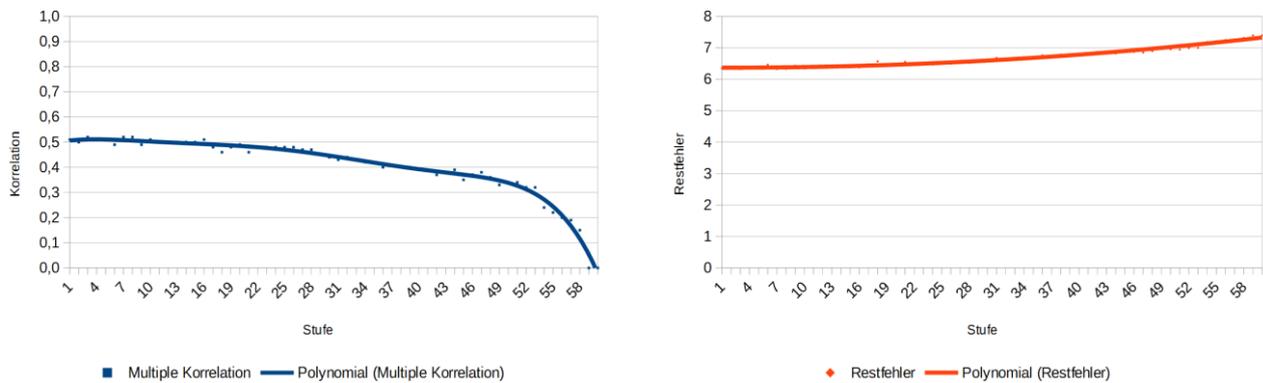


Abbildung 16: Multiple Korrelation (links) und Restfehler (rechts) bei sukzessiver Wegnahme von Prediktoren mit der jeweils höchsten Korrelation. Predikand: Niederschlag im Sommer. Stationen in Sachsen oberhalb eines Höhenniveaus von 500 m ü. NN

Die Ergebnisse für den Niederschlag im Winter sind in Abbildung 17 dargestellt. Auch beim Niederschlag im Winter ist ein etwas deutlicherer Rückgang der Korrelation zu verzeichnen, wenn sukzessive Prediktoren zur Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen. Der Restfehler ist insgesamt geringer, aber eine Betrachtung des Anfangs- und des Endwertes zeigt, dass seine Änderung durch den Einsatz von KLaMuKo nicht sehr groß ist.

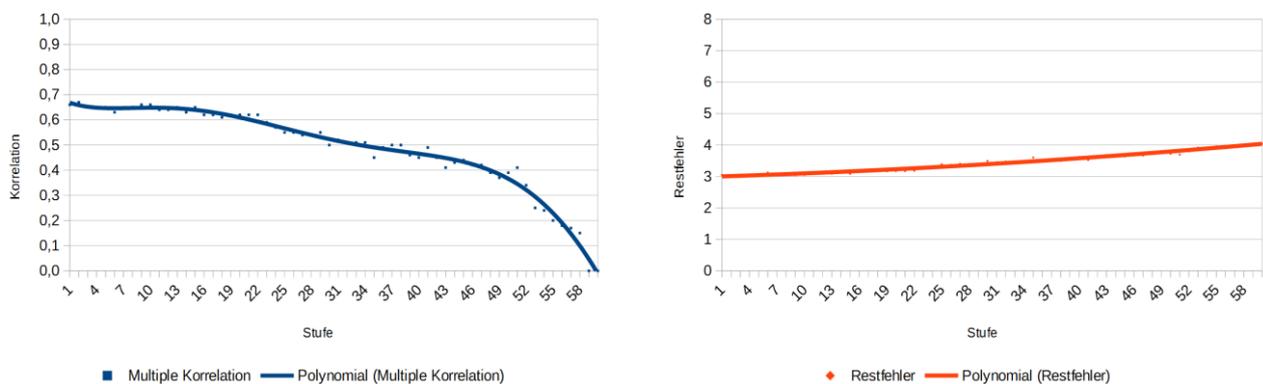


Abbildung 17: Wie Abbildung 16, jedoch für den Niederschlag im Winter an Bergstationen

Es fand eine weitere Untersuchung statt, in der dem System nicht 60, sondern 130 potenzielle Prediktoren zur Verfügung standen. In einer anderen Studie (Spekat, Enke, & Kreienkamp, Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse, 2014) erfolgte eine solche Erweiterung des Pools von potenziellen Prediktoren. Insbesondere wurden zahlreiche atmosphärische Labilitätsmaße und Informationen aus den Feldern im 250 hPa-Niveau hinzugefügt. Diese erfolgte mit Blick auf die bessere Darstellung von Niederschlagsextremen und war beispielsweise bei Gewittern und Starkwindereignissen erfolgreich. Im Rahmen dieser Sensitivitätsuntersuchung wurden geringe Verbesserungen bei der Korrelation und dem Restfehler von Temperatur und Niederschlag verzeichnet, wenn der erweiterte Bestand an potenziellen Prediktoren eingesetzt wurde. Es ist zu empfehlen, für zukünftige Studien in Sachsen ebenfalls diesen Bestand einzusetzen.

4 Zusammenfassung und Ausblick auf weiterführende Projekte

In der ersten Phase dieses Projektes wurde ein Weg zu einer verbesserten Beschreibung zukünftiger Entwicklungen von Extremen vorgestellt. Er verbindet wichtige Aspekte von WEREX und KlaMuKo zur neuen Methode WMSax2.0. Die wichtigste Aufgabe in der zweiten Phase des Projektes bestand darin, einen lauffähigen Prototyp von WMSax2.0 zu entwickeln und diesen mit verschiedenen Zielgrößen zu testen.

Auch wenn die Neuentwicklung des auf KlaMuKo und WEREX beruhenden Verfahrens WMSax2.0 im Vordergrund des Projektes steht: Einige Aspekte von WETTREG/WEREX wurden in der zweiten Phase genauer betrachtet. Dazu gehört die Sensitivität bezüglich eines sich ändernden Vorrats an Episoden aus der Gegenwart, die dem Wettergenerator zur Verfügung gestellt werden. Es wurde getestet, welche Auswirkungen ein Wegfall früher Jahre (beispielsweise vor 1991) hat.

Ein weiterer Bereich, in dem Test erfolgten, ist die Einsetzbarkeit einer alternativen Leitgröße. Im Standard-Vorgehen von WETTREG ist die Temperatur die zentrale Größe – sie dient zur Definition von Episoden und der Klasseneinteilung für die Zirkulationsmuster. Bei den Zirkulationsmustern sei angefügt, dass zusätzlich niederschlagsbezogene Muster gebildet werden, die im Wettergenerator für eine Verbesserung der Beschreibung des Niederschlagsregimes führen. Denkbar wäre aber auch, die Klassifikation für ganz andere Größen (Wind, Feuchte, Klimatische Wasserbilanz etc.) auszuführen. Dafür wären aber umfangreiche Änderungen in der Programmstruktur notwendig. Es ist absehbar, dass dann die Stringenz der gefundenen statistischen Beziehungen für einige meteorologische Parameter zurückgeht, aber es wurden in zwei Tests die Auswirkungen geänderter Führungsgröße analysiert: Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz. Es stellte sich heraus, dass insbesondere bei der Temperatur im Sommer deutliche und nicht plausible Unterschiede zum Standard-Vorgehen zu verzeichnen sind. Deshalb sollte die Standard-Vorgehensweise von WETTREG bezüglich der Leitgrößen beibehalten werden.

In einem weiterführenden Projekt, das auf Kontinuität mit vorherigen WEREX-Studien eingeht und einen besonderen Fokus auf die Zukunftsentwicklung von Extremen besitzt, können die Ergebnisse dieses Projektes eingebracht werden.

Ausgangspunkt wäre eine neue Version der Regionalisierungsmethode WEREX, die Version WEREX VI. Diese wäre, anders als WETTREG, auf die Region Sachsen fokussiert und würde die regionalen Klimaspezifika besser darstellen. WEREX VI würde auf einen verbesserten Satz an Klimadaten zugreifen, der ebenfalls im Rahmen eines zukünftigen Projektes zeitnah entstünde. Außerdem würde WEREX VI großräumige Klimainformation als Antrieb aus der neuesten Generation der Globalmodelle und Regionalmodelle beziehen. Diese verfügen ihrerseits über den Antrieb mit Treibhausgas-Szenario der neuesten Generation (RCP-Szenarios). Mit WEREX-VI stünde eine Regionalisierung zur Beschreibung des mittleren Klimazustands auf der Basis von State-of-the-Art Modellen zur Verfügung.

Ein weiteres Modul wäre das KlaMuKo-Verfahren. Mit ihm werden Beziehungen zwischen regionalen Extremen und speziellen Atmosphärenzuständen ermittelt. Für einige Zielgrößen, insbesondere solche, die mit dem Parameter Temperatur verbunden sind, können mit KlaMuKo auch Zukunftsaussagen zur Entwicklung von Extremen erfolgen.

Umfassende Betrachtungen, auch bezüglich der Extreme von Niederschlag oder anderen intensiven Ereignissen, erfordern eine erweiterte Vorgehensweise, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde. Dieses sogenannte WMSax2.0-Verfahren kombiniert WEREX VI und KlaMuKo. Ein wesentlicher Schritt ist die Verbesserung der Konkordanz von Bodeninformation und Atmosphäreninformation durch nachgeschaltete Nutzung von Reanalysedaten im Rahmen von Klimaprojektionen. Die Anwendung von WMSax2.0 sollte sich dabei auf Stationsgruppen ausgewählter Regionen und weniger auf Einzelstationen erstrecken.

WMSax2.0, inklusive der notwendigen Vorschritte, wurde im Rahmen dieses Projektes zur Prototypreife gebracht und könnte im Nachfolgeprojekt eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- ENKE, W. (2001): Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen. Abschlussbericht. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- JACOB, D. & PODZUN, R. (1997): Sensitivity studies with the regional climate model REMO. Meteorol. Atmos. Phys., S. 119-129.
- 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. (2011): KLIWETT Klimawandel und Wetterlagen Bericht Phase I. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A. & ENKE, W. (2011): WEREX V: Regionale Klimaprojektionen für Sachsen. Dresden. LfULG (Hrsg.). <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/25601>
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A. & ENKE, W. (2013): The Weather Generator used in the Empirical Statistical Downscaling Method WETTREG. Atmosphere, S. 169-197.
- 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., S. 209-223.
- ROCKEL, B. (2008): Special Issue: COSMO-CLM. Meteorologische Zeitschrift, S. 347-528.
- SPEKAT, A., ENKE, W. & KREIENKAMP, F. (2014): Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse. Wiesbaden: Im Auftrag des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie.
- SPEKAT, A., MIKETTA, W., KREIENKAMP, F. & ENKE, W. (2015): Klimawandel und Wetterlagen. Dresden: Schriftenreihe des LfULG, Heft 9/2015. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/24401>

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, Wolfgang Enke
Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
David-Gilly-Straße 1, 14469 Potsdam
Telefon: +49 331 7452301
E-Mail: arne.spekat@cec-potsdam.de

Redaktion:

Dr. Johannes Franke
LfULG; Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5116
Telefax: +49 351 2612-5199
E-Mail: johannes.franke@smul.sachsen.de

Foto:

Arne Spekat (CEC Potsdam GmbH)

Redaktionsschluss:

27.05.2016

ISSN:

1867-2868

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 zugunsten 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.