



Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland

Frank Kaspar und Hermann Mächel

Inhaltsverzeichnis

- 3.1 Beobachtung des Klimawandels in Deutschland – 20**
 - 3.1.1 Geschichte der Wetterbeobachtung in Deutschland – 20
 - 3.1.2 Das aktuelle Stationsmessnetz in Deutschland – 21
 - 3.1.3 Die Beobachtung wichtiger Klimavariablen im Einzelnen – 22
 - 3.1.4 Die beobachteten Klimatrends in Deutschland und den Bundesländern – 23

- 3.2 Datensätze für Europa und Deutschland – 25**
 - 3.2.1 Europäische Stationsdaten – 25
 - 3.2.2 Gerasterte Datensätze – 26
 - 3.2.3 Modellbasierte Reanalysen – 27

- 3.3 Kurz gesagt – 28**
 - Literatur – 28**

Der weltweite Klimawandel wirkt sich regional unterschiedlich aus. Klimadaten mit größerer räumlicher Auflösung als bei globalen Betrachtungen (► Kap. 2) erlauben es, Klimaänderungen in Mitteleuropa und Deutschland genau zu beschreiben. Für Deutschland und die Nachbarländer gibt es viele regionale Beobachtungsdaten, sodass sich das hiesige Klima des vergangenen Jahrhunderts gut beschreiben lässt. Diese Datenbasis erlaubt auch eine Qualitätseinschätzung von Klimamodellen und Klimasimulationen auf der regionalen Skala (► Kap. 4), da sich die simulierten Ergebnisse mit den Beobachtungen vergleichen lassen. Zur Überprüfung von regionalen Klimamodellen werden häufig atmosphärische, bodennahe Variable herangezogen, insbesondere Temperatur und Niederschlag, da von diesen direkte Auswirkungen auf die Gesellschaft ausgehen.

Die Entwicklung der Wetterbeobachtung ist eng mit der Geschichte der Wetterdienste verknüpft. Heute beobachtet der Deutsche Wetterdienst (DWD) das Wetter systematisch und international abgestimmt. Neben den Beobachtungsdaten der Wetterstationen kommen zur Bewertung der Klimamodelle häufig aufbereitete Daten zum Einsatz, die, ausgehend von den Beobachtungen, auf ein regelmäßiges räumliches Gitter umgerechnet werden.

International strebt das *Global Climate Observing System* (Karl et al. 2010) ein langfristiges Beobachtungssystem an. Dafür wurde eine Liste „essenzieller Klimavariablen“ definiert (► <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/table>): Diese derzeit 54 Kenngrößen der Atmosphäre, des Ozeans und der Landoberfläche dienen einer ausführlichen Beschreibung des gesamten Klimasystems und machen eine systematische langfristige Beobachtung möglich. Auch deutsche Institutionen leisten dazu umfangreiche Beiträge (Deutscher Wetterdienst 2023).

Seit einigen Jahrzehnten stehen auch Satellitendaten zur Verfügung. Aus ihnen lassen sich Datensätze verschiedener Klimavariablen erstellen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die (frühen) Satelliteninstrumente nicht für diesen Zweck entwickelt wurden und daher zunächst die methodische Einheitlichkeit der Daten sichergestellt werden muss. Einige Projekte arbeiten an satellitenbasierten Datensätzen verschiedener essenzieller Klimavariablen. So bearbeitet beispielsweise die *Climate Change Initiative* der Europäischen Weltraumorganisation ESA Datensätze von inzwischen 21 Klimavariablen (Hollmann et al. 2013; Popp et al. 2020)¹. Der europäische Copernicus-Klimawandel-dienst (C3S) ermöglicht eine routinemäßige Fortsetzung und zentrale Bereitstellung solcher satellitenbasierten Klimadaten. Des Weiteren erstellt die

Europäische Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten EUMETSAT im Rahmen ihrer *Satellite Application Facility on Climate Monitoring* (CM SAF) satellitenbasierte klimatologische Datensätze zu Landoberflächentemperatur, Strahlung, Wasserdampf, Niederschlag und Bewölkung (s. z. B. Karlsson et al. 2017). Zusätzlich zu den traditionellen Beobachtungen und Satellitendaten liefern in letzter Zeit auch Wetterradare Aufzeichnungen.

Die gesamten zur Verfügung stehenden Daten erlauben Beschreibungen der Vorgänge in der Erdatmosphäre auf unterschiedlichen Zeitskalen, vom täglichen Wetter bis zur Klimaentwicklung über Jahrzehnte. Unter dem Begriff „Klima“ versteht die Wissenschaft die statistische Beschreibung der relevanten Klimatelemente. Dabei muss ein ausreichend langer Zeitraum zur Verfügung stehen, sodass sich die statistischen Eigenschaften der Erdatmosphäre hinreichend genau charakterisieren lassen. Gemäß den Empfehlungen der Weltorganisation für Meteorologie (WMO 1959) werden daher bei der Berechnung von Klimavariablen üblicherweise drei aufeinanderfolgende Jahrzehnte verwendet, in der Vergangenheit überwiegend der Zeitraum 1961 bis 1990. Aufgrund der Klimaerwärmung ist die Zeit von 1961 bis 1990 allerdings nicht mehr repräsentativ für das derzeitige Klima (Scherrer et al. 2006). Für Anwendungen, die eine statistische Beschreibung des aktuellen Klimas benötigen, wird daher die Verwendung des jeweils aktuellsten Zeitraums empfohlen, d. h. des jüngsten 30-Jahres-Zeitraums, der mit einem Jahr mit einer Null am Schluss endet (WMO 2017). Viele Wetterdienste erstellen daher derzeit Auswertungen für den Vergleichszeitraum 1991 bis 2020 (Kaspar et al. 2021). Für die Bewertung von Klimaänderungen ist aber weiterhin der ursprüngliche Referenzzeitraum (also 1961–1990) angemessen und wird durch die WMO für diesen Zweck nach wie vor empfohlen (WMO 2017).

3.1 Beobachtung des Klimawandels in Deutschland

3.1.1 Geschichte der Wetterbeobachtung in Deutschland

Seit jeher fasziniert das Wetter die Menschen und sie versuchten, ihre Beobachtungen in Bild und Wort festzuhalten – vor allem bei außergewöhnlichen Ereignissen. Doch erst mit der Erfindung von Messinstrumenten begann die objektive Wetteraufzeichnung (Schneider-Carius 1955; ► Tab. 3.1). Im Jahr 1781 gründete sich in Mannheim die Pfälzische Meteorologische Gesellschaft *Societas Meteorologica Palatina*. Sie baute in Europa 39 Messstationen auf, 12 davon in Deutschland (Wege 2002) –

1 ► <https://climatemonitoring.info/ecvinventory/>

■ **Tab. 3.1** Wichtige Schritte auf dem Weg zur systematischen Klimabeobachtung

Erfindung des Barometers und Alkoholthermometers	1643/1654
Erste Klimaaufzeichnungen in Deutschland: individuelle, zum Teil unregelmäßige Beobachtungen	1700
Erstes europaweites, meteorologisches Messnetz von der <i>Societas Meteorologica Palatina</i> in Mannheim	1781–1792
Gründung staatlicher Wetterdienste	ab 1848
Gründung der Internationalen Meteorologieorganisation IMO, dadurch zunehmend Vereinheitlichung der Beobachtungen	1873
Deutsche Seewarte veröffentlicht täglich Bodenwetterkarten von Zentraleuropa und dem Atlantik, telegrafische Verbreitung von Wettermeldungen	1876
Aufbau eines dichten Niederschlagsmessnetzes in Deutschland mit einheitlichen Messgeräten	1880
Deutschlandweiter Wetterdienst, der die Beobachtungen weiter vereinheitlicht	1934
Gründung der Weltorganisation für Meteorologie (<i>World Meteorological Organization</i> , WMO)	1950
Automatisierung des Messnetzes des Deutschen Wetterdienstes	ab 1995

alle mit den gleichen, geeichten Messinstrumenten, einer Anleitung sowie einheitlichen Formularen und Wettersymbolen. Die Messungen von Temperatur, Feuchte, Luftdruck, Sonnenschein und Niederschlag sowie die Schätzung von Bewölkung und Wind erfolgten dreimal täglich. Aus Geldmangel stellte diese Institution nach ein paar Jahren ihre Aktivitäten ein. Einige Messungen wurden aber eigenständig weitergeführt (Winkler 2006).

Es dauerte noch mehr als 50 Jahre, bis auf Initiative von Alexander von Humboldt 1848 der erste staatliche Wetterdienst in Preußen entstand (Hellmann 1887). Danach gründeten weitere Königreiche und Herzogtümer in Deutschland ihre eigenen Wetterdienste (Hellmann 1883). Allerdings formulierten die Wetterdienste erst im Laufe der Zeit auf Basis systematischer Untersuchungen die Anforderungen an die Beobachtungen und verbreiteten sie in den Beobachtungsanleitungen. Weitere Verbesserungen gingen mit der Schulung der Laienbeobachter und -beobachterinnen, einer repräsentativeren Auswahl der Beobachtungsstandorte und der technischen Entwicklung im Instrumentenbau einher.

Von Anfang an stützten sich die Wetterdienste auf Privatpersonen oder Institutionen, die schon vorher meteorologische Messungen durchgeführt hatten.

Bedingt durch den zunehmenden Flugverkehr entstanden nach dem ersten Weltkrieg Flugwetterwarten mit Berufsbeobachtern. Auch wurde es für die Wettervorhersagen immer wichtiger, das Wetter an vielen Standorten gleichzeitig zu beobachten. Daher wurden Wetterwarten eingerichtet, die rund um die Uhr mit professionellem Personal besetzt waren. Nebenbei schulten diese Profis die Laien ihres Kreises. Viele von ihnen hielten das tägliche Messen jedoch nicht lange durch, was häufig zu Stationsverlegungen und mehrmonatigen Lücken in den Messreihen führte. An fast allen Standorten gab es 1945 bei den Beobachtungen Unterbrechungen von Tagen bis zu mehreren Jahren (Mächel und Kapala 2013).

3.1.2 Das aktuelle Stationsmessnetz in Deutschland

Heute ist die Wetterbeobachtung durch einen gesetzlichen Auftrag geregelt: Der Deutsche Wetterdienst soll meteorologische Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre kurzfristig und langfristig erfassen, überwachen und bewerten. Dafür betreibt er ein Messnetz, archiviert die Beobachtungen, prüft deren Qualität und wertet sie aus (Deutscher Wetterdienst 2013). Zusammen mit den Beobachtungen der Vorgängerorganisationen ermöglichen diese Daten Aussagen darüber, wie sich das Klima in Deutschland entwickelt. Genug Daten für regionale Auswertungen liegen seit etwa 1881 vor (Kaspar et al. 2013). Der DWD ergänzt die elektronischen Datenkollektive ständig – auch durch die Digitalisierung historischer täglicher Klimaaufzeichnungen aus Papierarchiven (Kaspar et al. 2015; Mächel et al. 2009; Brienens et al. 2013).

Kernstück des DWD-Messnetzes sind 181 hauptamtlich betriebene Wetterwarten und -stationen (Stand 01.01.2021). Der Geoinformationsdienst der Bundeswehr betreibt 25 weitere in das Netz integrierte Bodenwetterstationen. Darüber hinaus betreuen ehrenamtliche Kräfte 1737 Mess- und Beobachtungsstationen. Wetterradare gibt es an 19 Standorten, mit denen eine flächendeckende Niederschlagserfassung über Deutschland möglich ist. Messungen mit Radiosonden werden an neun Stationen durchgeführt. Außerdem betreibt der DWD ein Netz mit 1098 phänologischen Beobachtungsstellen, an denen überwiegend Ehrenamtliche das Auftreten von Wachstumsphasen ausgewählter Pflanzenarten dokumentieren (Kaspar et al. 2014). Ein Großteil der Beobachtungsdaten wurde aufgrund neuer gesetzlicher Rahmenbedingungen während der letzten Jahre frei zugänglich gemacht und steht auf einem Open-Data-Server zur

Verfügung² sowie auszugsweise über ein interaktives Datenportal³ (Kaspar et al. 2019) und über Schnittstellen, die eine direkte technische Einbindung in andere Systeme ermöglichen⁴.

Neben dem DWD messen auch andere Institutionen und Privatpersonen verschiedene Klimavariablen. Diese Daten fließen aber nur zu einem geringen Teil in die Datenbank des DWD oder in andere internationale Datensätze ein, weil sie oft nicht repräsentativ sind, die Anforderungen an das Messprogramm und die Dauerhaftigkeit des Betriebs nicht erfüllen oder datenpolitische Aspekte im Wege stehen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Auswertung längerfristiger Trends ist die Homogenität der Messreihen. Veränderungen in den Messbedingungen können Messreihen inhomogen machen. Es treten dann Sprünge auf, die nicht auf tatsächliche Klimaveränderungen zurückzuführen sind. Abhängig vom Messprinzip können die Ursachen der Inhomogenitäten sehr unterschiedlich sein. An Klimareferenzstationen wurden Vergleichsmessungen von automatischen und manuellen Messungen durchgeführt, um die Auswirkungen der Automatisierung des Messnetzes zu analysieren (Kaspar et al. 2016; Hannak und Brinckmann 2020). Der folgende Abschnitt diskutiert Einzelheiten der wichtigsten Parameter.

3.1.3 Die Beobachtung wichtiger Klimavariablen im Einzelnen

■ Temperatur

Seit 60 Jahren wird an mehr als 500 Stationen die Temperatur gemessen, typischerweise in einer Messhöhe von zwei Metern. Zuvor war das Netz weniger dicht (Kaspar et al. 2015). Für die Zeit bis zum Zweiten Weltkrieg gibt es teilweise nur Monatswerte, viele Tageswerte gingen verloren. Weiter zurück (bis 1881) liegen Monatswerte von mehr als 130 Stationen digitalisiert vor. Noch ältere Messreihen gibt es nur wenige, die zudem aufgrund verschiedener Messverfahren und Beobachtungsprogramme meist inhomogen sind. Die längste dieser Reihen aus Berlin reicht bis 1719 zurück (Cubasch und Kadow 2011). Müller-Westermeier (2004) kommt bei der Untersuchung von Messreihen mit einer Dauer von mehr als 80 Jahren zu dem Ergebnis, dass die Mehrheit der Reihen eine oder mehrere Inhomogenität(en) aufweist. Diese betragen bis zu 1,7 °C, wobei am häufigsten Inhomogenitäten von 0,2 °C auftraten, in den meisten Fällen verursacht durch Stationsverlegungen. Ein weiterer wichtiger Faktor sind Veränderungen beim Strahlungsschutz der Messgeräte.

Zwischen 1995 und 2005 lösten elektrische Thermometer die visuell abzulesenden Quecksilberthermometer und Registriergeräte auf Bimetallbasis an den meisten Stationen ab. An ausgewählten Stationen konnten Parallelmessungen mit analogen Thermometern zeigen, dass die Automatisierung keine systematischen Brüche in den Zeitreihen verursacht (Kaspar et al. 2016). An allen Stationen mit Temperaturmessungen wird auch Luftfeuchte gemessen.

■ Niederschlag

Das DWD-Niederschlagsmessnetz besteht derzeit aus 1869 Messstellen. Seit etwa 70 Jahren liegen Tageswerte in hoher räumlicher Dichte vor, die in früheren Jahrzehnten teilweise aber noch deutlich höher war als heute. Von 1969 bis 2000 gab es mehr als 4000 Stationen. Monatswerte gibt es für die vergangenen 100 Jahre von mehr als 2000 Stationen und zurück bis 1881 liegt noch ein Netz von mehreren 100 Stationen vor. Noch ältere Messreihen basieren auf sehr verschiedenen Messverfahren. Die längste durchgehende Niederschlagsreihe in Deutschland besitzt die Station Aachen, die seit 1844 in Betrieb ist. Müller-Westermeier (2004) fand bei der Untersuchung von 505 Niederschlagsmessreihen mit einer Dauer von mindestens 80 Jahren weniger Inhomogenitäten als im Fall der Temperatur, was aber auch durch die schwierigere Identifikation der Inhomogenitäten aufgrund der hohen Variabilität des Niederschlags bedingt ist. Die Inhomogenitäten lagen im Bereich von –30 bis +40 % und sind in den meisten Fällen (61 %) durch Stationsverlagerungen verursacht.

Seit etwa 1995 wird die Niederschlagsmessung zunehmend auf digitale Messsysteme umgestellt. Für diese Stationen liegen die Messungen zeitnah und in hoher zeitlicher Auflösung bis hin zu Minuten vor. Zusätzlich können auch Wetterradare Niederschlag erfassen. Für Deutschland besteht seit ca. dem Jahr 2000 ein flächendeckendes Radarmessnetz mit derzeit 17 operationell betriebenen Radarsystemen (Winterath et al. 2017). Durch Aneicherung an Bodenniederschlagsstationen lassen sich flächendeckend, räumlich und zeitlich hoch aufgelöst Niederschlagsmengen ableiten. Die nachträgliche Reprozessierung der Daten mit verbesserten Verfahren der Qualitätsprüfung liefert Datensätze, die auch für klimatologische Anwendungen geeignet sind (Winterath et al. 2017; Lengfeld et al. 2019, 2020).

■ Schneehöhe

An den Niederschlagsstationen wird auch die Gesamtschneehöhe gemessen. In Bayern begannen diese Messungen bereits 1887, in den nördlichen Teilen Deutschlands erst gegen Ende der 1920er-Jahre. Ab etwa 1951 sind ausreichend digitale Schneehöhenangaben für ganz Deutschland vorhanden, obwohl diese an den

2 ► https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/

3 ► <https://cdc.dwd.de/portal>

4 ► <https://cdc.dwd.de/geo/server/>

Niederschlagsstationen in den alten Bundesländern erst ab 1979 vollständig digitalisiert vorliegen. Für die Zeit vor 1979 sind in den alten Bundesländern die Schneehöhen für die Klimastationen und einige nachträglich digitalisierte Niederschlagsstationen vorhanden. Mit der Automatisierung der Stationen ersetzen Schneehöhensensoren die manuellen Messungen.

■ Luftdruck

205 Messstellen erfassen derzeit den Luftdruck. Vor 1950 gab es weniger Stationen und vor etwa 1930 nur einzelne Messreihen, die oft aufgrund verschiedener Messverfahren und Beobachtungsprogramme inhomogen sind. Die Messreihe des Observatoriums am Hohenpeißenberg begann 1781. Zwischen 1995 und 2005 ersetzen digitale Geräte weitgehend die Quecksilber- und Dosenbarometer – ohne wesentliche Inhomogenitäten in den Zeitreihen.

■ Wind

300 Stationen, die auch schon über die letzten Jahrzehnte in Betrieb waren, messen derzeit Windgeschwindigkeit und -richtung. Dazu kommen Windschätzungen von den nebenamtlich betriebenen Stationen. Vor 1950 gab es nur einzelne Messreihen. Zeitreihen von Windschätzungen gehen teilweise bis ins 19. Jahrhundert zurück, sind aber wegen unterschiedlicher Mess- und Auswertemethoden nur bedingt für längerfristige Auswertungen nutzbar. Als Alternative in vielen Anwendungsfällen haben sich hier globale und regionale Reanalysen etabliert (Kaspar et al. 2020b), die auch Informationen oberhalb der typischen Stationsmesshöhe von 10 m liefern.

■ Sonnenscheindauer

Wie lange die Sonne scheint, erfassen seit ca. 70 Jahren rund 300 Stationen. Davor gab es nur einzelne, häufig inhomogene Messreihen. Ursprünglich wurden die Messungen auf der Basis des Brennglaseffekts durchgeführt, visuell ausgewertet und stündlich dokumentiert. Zwischen 1995 und 2005 stellte der Wetterdienst das Messnetz weitgehend auf automatische Messgeräte um, die mit hoher zeitlicher Auflösung arbeiten. Aufgrund des grundsätzlich anderen Messprinzips sind hier stärkere Inhomogenitäten durch die Automatisierung festgestellt worden als bei anderen Größen (Hannak et al. 2019). Sonnenscheindauer lässt sich auch unter Verwendung von Satellitendaten ableiten (z. B. Kothe et al. 2017).

■ Wolken

Traditionell wurden Wolkenart, Bedeckungsgrad und Wolkenuntergrenze visuell erfasst und dokumentiert. Die Zeitreihen reichen zurück bis in die 1940er-Jahre, an einigen Stationen sogar bis ins 19. oder 18. Jahrhundert. Seit den 1990er-Jahren dienen laserbasierte

Wolkenhöhenmesser (auch Ceilometer oder Ceilograf genannt) dazu, die Wolkenbedeckung und die Wolkenuntergrenze genau zu bestimmen.

Weiterhin gibt es inzwischen ausreichend lange Beobachtungen per Wettersatelliten, um daraus Datensätze etwa für Bedeckungsgrad, Wolkentyp, optische Dicke, Wolkenphase und Wolkenobergrenze abzuleiten, z. B. in der *Satellite Application Facility on Climate Monitoring* (Karlsson et al. 2017) oder der *Climate Change Initiative* der ESA.

■ Strahlung

116 Stationen messen Strahlung. Dabei kommen allerdings Messinstrumente unterschiedlicher Qualität zum Einsatz. Als höherwertig werden Pyranometer angesehen (Becker und Behrens 2012). Diese messen an 28 Stationen die kurzwellige Globalstrahlung. An 17 dieser Stationen erfassen auch Pyrgeometer die Wärmestrahlung der Atmosphäre. An den restlichen 88 Stationen ist zur Erfassung von Global- und Diffusstrahlung sowie der Sonnenscheindauer gegenwärtig noch das Scanning Pyrheliometer/Pyranometer im Einsatz, welches im Vergleich zum Pyranometer/Pyrgeometer eine deutlich höhere Unsicherheit aufweist. Bis zum Jahr 2025 wird die Anzahl der Bodenstationen reduziert und mit einheitlicher Sensorik (Pyranometer/Pyrgeometer) ausgerüstet. Die flächendeckende Erfassung der Strahlungsparameter erfolgt dann mit Satellitendaten in Kombination mit den Bodendaten. An neun Stationen liegen Messreihen der Globalstrahlung von mindestens 50 Jahren vor. Auch bereits vorhandene Satellitendaten können zur Ableitung vieljähriger flächendeckender Datensätze verwendet werden (z. B. Pfeifroth et al. 2018).

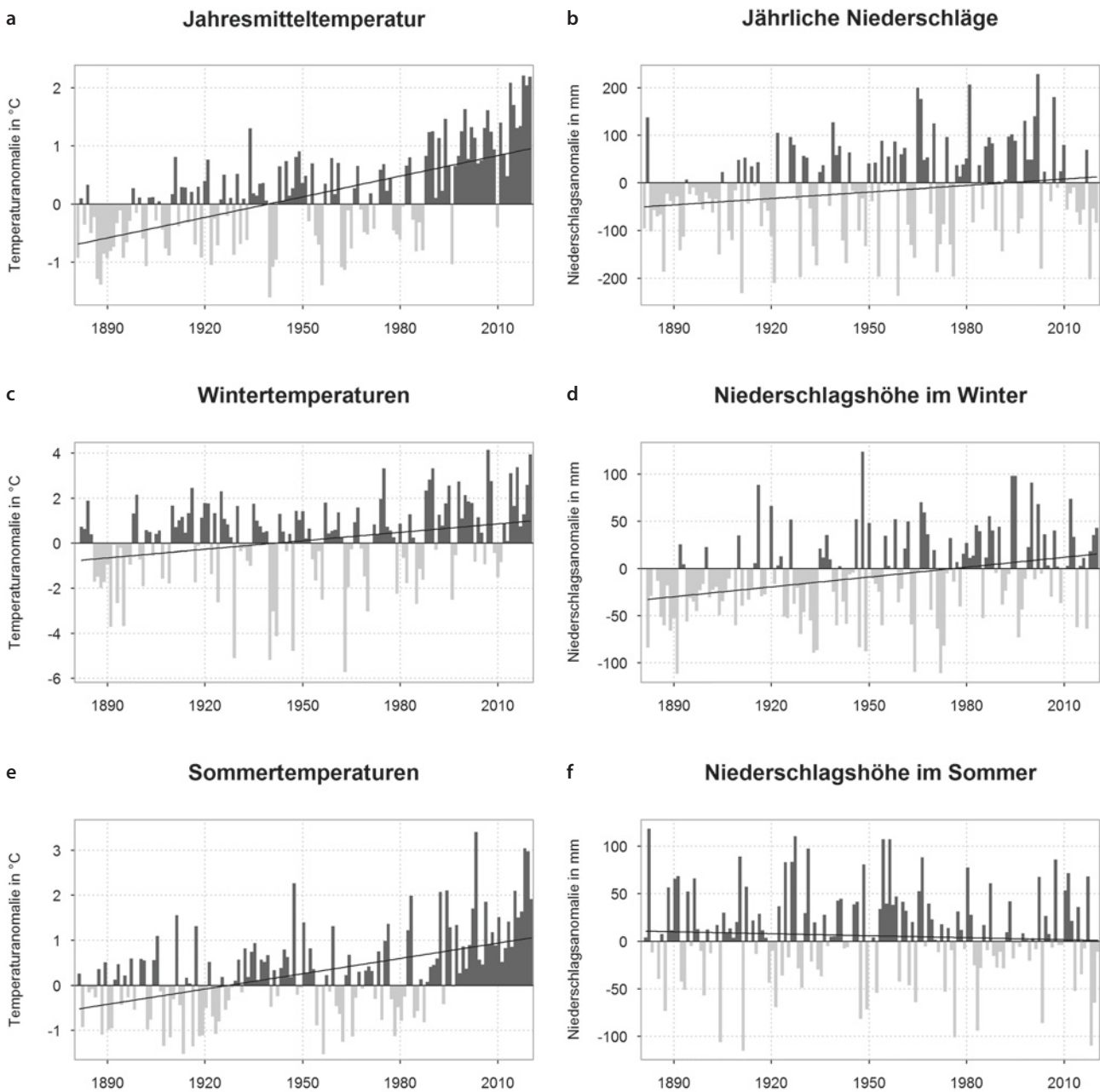
3.1.4 Die beobachteten Klimatrends in Deutschland und den Bundesländern

Aus den Beobachtungen der Messstationen lässt sich ableiten, wie sich das Klima in Deutschland in den vergangenen 140 Jahren verändert hat, auch speziell in einzelnen Regionen. Regelmäßig aktualisiert der Deutsche Wetterdienst ausgehend von diesen Daten seine Auswertungen, beispielsweise in Form von Karten im Deutschen Klimaatlas (s. Tab. 3.4). Aus den Karten lassen sich Mittelwerte und Trends für Gesamtdeutschland, die Bundesländer oder andere Regionen berechnen (Kaspar et al. 2013). Das Vorgehen im Einzelnen: Zunächst werden die beobachteten Werte zeitlich gemittelt. Dann wird unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit der Klimavariablen ein Gitter mit einer Auflösung von 1 km² erzeugt (Müller-Westermeier 1995; Maier et al. 2003). Dieses Rasterfeld dient

dann dazu, Mittelwerte für bestimmte Regionen zu berechnen. Im Vergleich zu einer reinen Mittelwertbildung aus den Stationsdaten reduziert diese Vorgehensweise die Auswirkungen, die Veränderungen im Messnetz auf die Ergebnisse haben. Auch der Effekt von Inhomogeni-

täten einzelner Stationsreihen, z. B. infolge von Verlegung, wird reduziert. Daten für dieses Verfahren liegen für Temperatur und Niederschlag für die Zeit seit 1881 und für Sonnenscheindauer seit 1951 ausreichend vor. ■ Abb. 3.1 zeigt Ergebnisse dieser Auswertungen.

3



■ **Abb. 3.1** Trends der Temperatur und Niederschlagshöhe in Deutschland von 1881–2020 jeweils als Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 1961–1990. **a** Jahresmitteltemperaturen: Der lineare Trend von insgesamt 1,6 °C innerhalb von 140 Jahren ist statistisch hoch signifikant (p-Wert < 0,001). **b** Jährliche Niederschläge: Der lineare Trend über die Gesamtzeit ist statistisch signifikant (Zunahme um 62 mm; p-Wert ~ 0,03). **c** Wintertemperaturen: Der lineare Trend von insgesamt 1,7 °C innerhalb von 139 Jahren ist statistisch signifikant (p-Wert ~ 0,0013). **d** Niederschlagshöhe im Winter: Der lineare Trend über die Gesamtzeit ist statistisch hoch signifikant (Zunahme um 48 mm; p-Wert < 0,001). **e** Sommertemperaturen in Deutschland: Der lineare Trend von insgesamt 1,6 °C innerhalb von 140 Jahren ist statistisch hoch signifikant (p-Wert < 0,001). **f** Niederschlagshöhe im Sommer: Es besteht kein statistisch signifikanter linearer Trend über die Gesamtzeit (Abnahme um 10 mm; p-Wert ~ 0,49). „Sommer“ bezieht sich jeweils auf Juni bis August. „Winter“ bezieht sich auf Dezember bis Februar und den Zeitraum von 1881/1882 bis 2019/2020.

■ **Tab. 3.2** Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland seit 1881 sowie seit 1971 (s. auch Deutscher Wetterdienst 2021)

Intervall	Frühling		Sommer		Herbst		Winter		Jahr	
Temperaturtrend in °C pro Dekade (links) sowie über den angegebenen Zeitraum (rechts)										
1881–2020	0,12	1,62	0,11	1,58	0,11	1,54	0,12	1,72	0,12	1,64
1971–2020	0,41	2,01	0,44	2,13	0,36	1,77	0,30	1,45	0,38	1,85
Niederschlagstrend in mm pro Dekade (links in jeder Spalte) sowie über den angegebenen Zeitraum (rechts in jeder Spalte)										
1881–2020	0,99	13,78	-0,7	-9,68	0,69	9,53	3,49	48,11	4,49	62,36
1971–2020	-3,54	-17,32	1,4	6,85	-1,68	-8,21	4,76	22,85	1,44	7,04
Mittelwert des Niederschlags für die Periode 1961–1990 in mm										
1961–1990	186		239		183		181		789	

Von 1881 bis 2020 stieg die Temperatur deutlich, sowohl im Jahresdurchschnitt (linearer Trend: +1,64 °C) als auch im Sommer (+1,58 °C) und Winter (+1,72 °C) (■ Tab. 3.2). Insbesondere seit ca. 1970 zeigen die Daten eine kontinuierliche Erwärmung, sodass seitdem in Deutschland jedes Jahrzehnt (Dekade) deutlich wärmer war als das jeweils vorhergehende (Kaspar et al. 2023). Das zurückliegende Jahrzehnt 2011 bis 2020 war 2 °C wärmer als die ersten 30 Jahre (1881–1910) des Auswertungszeitraums (Imbery et al. 2021). Der kontinuierliche Anstieg seit ca. 1970 ist konsistent zum Verlauf der globalen Temperatur (Kaspar et al. 2020c), allerdings erwärmte sich Deutschland mehr als die Erde im Durchschnitt (Kaspar et al. 2020a). Im Zeitraum 1971 bis 2020 stellt sich der Temperaturanstieg in Deutschland mit 0,38 °C pro Jahrzehnt deutlich stärker ausgeprägt dar als bei Betrachtung des gesamten Zeitraums 1881 bis 2020 (0,12 °C pro Jahrzehnt) (■ Tab. 3.2). Die wärmsten Jahre im Zeitraum von 1881 bis 2020 in Deutschland waren (in absteigender Reihenfolge): 2018, 2020, 2014 und 2019. Um einen Vergleich mit dem Zeitraum ab 1971 zu ermöglichen, sind die Änderungen in ■ Tab. 3.2 zusätzlich jeweils pro Jahrzehnt angegeben.

Im Westen Deutschlands stieg die Temperatur etwas stärker als im Osten. Darüber hinaus nahm seit 1951 die jährliche Sonnenscheindauer deutschlandweit um etwa 9 % zu (Deutscher Wetterdienst 2021). Weitere Details und Aktualisierungen finden sich in der jeweils aktuellen Fassung des Klimastatusberichts des Deutschen Wetterdienstes (2021).

Die Niederschläge haben von 1881 bis 2020 um 8 % zugenommen, verglichen mit dem langjährigen Mittel von 1961 bis 1990. Im Winter stieg die Niederschlagsmenge um 27 % – dabei mehr im Westen Deutschlands als im Osten. Im Sommer gab es dagegen 4 % weniger Niederschläge.

3.2 Datensätze für Europa und Deutschland

3.2.1 Europäische Stationsdaten

Der niederländische Wetterdienst KNMI sammelt und aktualisiert Daten europäischer Wetterstationen im Projekt *European Climate Assessment and Data (ECA&D)* (Klok und Klein Tank 2008). Der Datenbestand dieses Projekts basiert auf Zulieferungen von Wetterdiensten, Observatorien und Universitäten in Europa, im Mittelmeerraum und Vorderasien. Dabei handelt es sich um tägliche Daten von 13 meteorologischen Kenngrößen: Minimum-, Mittel- und Maximaltemperatur, Niederschlagsmenge, Sonnenscheindauer, Wolkenbedeckung, Schneehöhe, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windspitze, Windrichtung, Globalstrahlung und Luftdruck. Allerdings variiert die Menge der bereitgestellten Daten aus den einzelnen Ländern erheblich⁵ und die freie Zugriffsmöglichkeit hängt von der jeweiligen nationalen Datenpolitik ab. Derzeit liegen 74.118 Zeitreihen von 20.097 meteorologischen Stationen vor, darunter mehr als 5600 für Deutschland (Stand aller Angaben 23.01.2021, abgerufen unter ecad.knmi.nl).

Da bei Trendanalysen, insbesondere im Fall von Extremwerten, die Homogenität der Zeitreihe zu beachten ist, wurden Tests der Homogenität durchgeführt: In einer Untersuchung bewerteten Wijngaard et al. (2003) für den Zeitraum von 1901 bis 1999 die Homogenität von 94 % der zu diesem Zeitpunkt vor-

5 ► https://www.ecad.eu/countries/country_overview.php

liegenden Temperaturreihen und 25 % der Niederschlagsreihen als „suspekt“ oder „zweifelhaft“. Weitere Untersuchungen zur Homogenität führten ebenfalls zu dem Ergebnis, dass sich die Anzahl der als homogen eingestuft Reihen stark zwischen den Klimavariablen unterscheidet: Für den Zeitraum von 1960 bis 2004 wurden dabei zwischen 12 % (Minimumtemperatur) und 59 % (Niederschlag) der Reihen als homogen bewertet (Begert et al. 2008). Squintu et al. (2019) haben eine Homogenisierung der täglichen Maximum- und Minimumtemperatur durchgeführt und konnten dabei 2100 Zeitreihen anpassen, sodass die Messreihen von einer Länge von fünf Jahren und mehr von Brüchen bereinigt wurden.

3.2.2 Gerasterte Datensätze

Die oben beschriebenen Auswertungen zu den Klimatrends in Deutschland dienen vor allem dazu, langfristige Entwicklungen zu bestimmen und eine Einordnung der aktuellen Monate vorzunehmen. Darüber hinaus gibt es für andere Zwecke weitere Datensätze, die für unterschiedliche räumliche Skalen auf ein regelmäßiges Gitter interpoliert wurden, also „gerastert“ sind.

Rasterdaten für Deutschland basieren üblicherweise auf den oben beschriebenen Beobachtungen, können sich aber, etwa in Bezug auf die ausgewählten Messstationen, die zusätzlich genutzten Datenquellen oder die Methodik unterscheiden. Aufgrund unterschiedlicher Datenpolitiken basieren die Datensätze europäischer Nachbarländer oft auf einer deutlich geringeren Stationsdichte als vergleichbare nationale Datensätze aus Deutschland.

■ Daten für ganz Europa

Ein häufig genutzter gerasteter Datensatz für Europa ist der Datensatz E-OBS, der auf den Stationsdaten des ECA&D-Projekts basiert. Als Rasterprodukte stehen Temperatur und Niederschlag (Haylock et al. 2008) sowie Luftdruck (van den Besselaar et al. 2011) und Globalstrahlung zur Verfügung. Für die Bewertung regionaler Klimamodelle und der Analyse von Extremereignissen ist er allerdings nur eingeschränkt verwendbar (Hofstra et al. 2009). Bei geringer Stationsdichte sind die Rasterdaten stark geglättet (Hofstra et al. 2010), was insbesondere bei der Bewertung von Trends in Extremen berücksichtigt werden muss. Beispielsweise zeigen Maraun et al. (2012), dass sich im Vergleich zu einem höher aufgelösten nationalen Datensatz für Großbritannien vor allem extreme Niederschläge in bergigen und datenarmen Regionen mit dem E-OBS-Datensatz nicht gut untersuchen lassen. Neuere Versionen des Datensatzes profitieren von der inzwischen erhöhten Zahl verfügbarer Zeitreihen (Cornes et al. 2018).

Zur Abschätzung der Unsicherheiten, die sich bei der Interpolation der Stationsdaten ergeben, erstellte der niederländische Wetterdienst inzwischen auch eine Ensembleversion des Datensatzes (Cornes et al. 2018).

■ Tab. 3.3 gibt eine Übersicht über neuere Datensätze, die für die Überprüfung von Modellen in Deutschland und angrenzenden Regionen relevant sind.

■ Daten zu Deutschland und den Nachbarregionen

Die HYRAS-Datensätze decken die deutschen Flusseinzugsgebiete inklusive der zugehörigen Regionen der Nachbarländer ab. Die Parameter Niederschlag, Temperatur und relative Feuchte stehen in täglicher Auflösung zur Verfügung. Der HYRAS-Niederschlags-Rasterdatensatz basiert auf insgesamt 6200 Stationen (Rauthe et al. 2013). Durch seine räumliche Auflösung von 1 km verfügt er über eine deutlich andere Häufigkeitsverteilung für Niederschläge als der E-OBS-Datensatz mit einer Auflösung von 25 km, da auf diesem groben Gitter insbesondere Extremereignisse nicht realistisch wiedergegeben werden. Die Verteilung im HYRAS-Datensatz stimmt gut mit der Verteilung überein, die direkt aus Stationen abgeleitet wird (Rauthe et al. 2013; Hu und Franzke 2020). Mittlere, Minimum- und Maximumtemperatur sowie relative Luftfeuchtigkeit stehen in einer Auflösung von 5 km für den Zeitraum 1951 bis 2020 zur Verfügung und basieren auf insgesamt mehr als 1300 Stationen (Razafimaharo et al. 2020).

Für Hochgebirge realistische Rasterfelder des Niederschlags zu erzeugen ist aufgrund ihrer komplexen Oberflächenstruktur besonders schwierig. Daher behandelten mehrere Projekte diese Fragestellung für den gesamten Alpenraum (insbesondere HISTALP, APGD).

■ Spezielle Datensätze für Deutschland

Für die Anwendung im Bereich der technischen Klimatologie (beispielsweise zur Nutzung in der Dimensionierung von Heizungs- und Kühlanlagen) entwickelte der DWD einen Datensatz sogenannter Testreferenzjahre für Deutschland. Als Grundlage wurden zunächst Rasterfelder in stündlicher Auflösung von zwölf meteorologischen Parametern abgeleitet. Diese sog. „TRY-Basisdaten“ in 1 km-Auflösung stehen für den Zeitraum 1995 bis 2012 ebenfalls zur Nutzung direkt zur Verfügung (Krähenmann et al. 2018). Sie wurden aus Stationsdaten erzeugt, teilweise in Kombination mit Satelliten- und Modelldaten.

Die bisher beschriebenen Datensätze basieren vorrangig auf Stationsmessungen. Für Niederschlag stehen für die beiden letzten Jahrzehnte zusätzlich Datensätze auf Basis von Radarbeobachtungen zur Verfügung. Durch Anreicherung an Bodenniederschlagsstationen und nachträgliche Reprozessierung mit verbesserten Verfahren der Qualitätsprüfung ließ sich

■ **Tab. 3.3** Beispiele ausgewählter klimatologischer Rasterdaten für Deutschland und angrenzende Gebiete

Datensatz/ Projekt	Parameter	Gebiet	Räumliche Auflösung	Zeitraum und zeitliche Auflösung	Referenz
E-OBS	Temperatur, Niederschlag, Druck, Globalstrahlung	Europa	0,1°, 0,25°	Ab 1950; täglich; Globalstrahlung ab 1980	Haylock et al. (2008); van den Bes- selaar et al. (2011)
COSMO-REA6	Atmosphärische Reanalyse	Europa	6 km	01/1995–08/2019, stündlich	Bollmeyer et al. (2015); Kaspar et al. (2020b)
HYRAS	Niederschlag	Deutsche Flusseinzugs- gebiete mit Nachbarländern	1 km	1931 - heute, täglich	Rauthe et al. (2013)
HYRAS	mittlere, minimale, maximale Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit	Deutsche Flusseinzugs- gebiete mit Nachbarländern	5 km	1951–2020, täglich	Frick et al. (2014); Razafimaharo et al. (2020)
DWD-Klima- überwachung	Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer	Deutschland	1 km	1881 bis heute, Sonnenscheindauer ab 1951; monatlich	Kaspar et al. (2013)
RADKLIM	Niederschlag (radar- basiert)	Deutschland	1 km	2001 bis heute, stünd- lich; 5-minütig	Winterrath et al. (2017); Lengfeld et al. (2019, 2020)
TRY-Basisdaten	Temperatur, Taupunkt, Wolkenbedeckung, Wind- geschwindigkeit und -rich- tung, kurz- und lang- wellige Strahlung, Druck, relative Feuchte und Dampfdruck	Deutschland	1 km	1995–2012, stündlich	Krähenmann et al. (2018)
HISTALP	Temperatur, Niederschlag	Alpen	5 min	Temperatur (1780– 2009), Niederschlag (1801–2003), monat- lich	Chimani et al. (2013, 2011)
APGD	Niederschlag	Alpen	5 km	1971–2008, täglich	Isotta et al. (2014)

eine radargestützte, hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie für den Zeitraum 2001 bis heute in einer Auflösung von 1 km für Deutschland erzeugen, die in stündlicher und fünfminütiger Auflösung zur Verfügung steht (Winterrath et al. 2017; Lengfeld et al. 2019). Lengfeld et al. (2020) haben gezeigt, dass dieser Datensatz deutlich besser zur Erfassung von Extremereignissen geeignet ist als Stationsdaten: Die Stationen haben für den Zeitraum 2001 bis 2018 nur 17,3 % der stündlichen Starkregenereignisse erfasst, die durch den radargestützten Datensatz dokumentiert sind.

3.2.3 Modellbasierte Reanalysen

Eine weitere Möglichkeit zur Ableitung langjähriger meteorologischer Datensätze sind modellbasierte atmosphärische Reanalysen. Hier werden Modelle der

numerischen Wettervorhersage in Kombination mit ihren Datenassimilationsverfahren genutzt, um unter Verwendung der Beobachtungsdaten der zurückliegenden Jahrzehnte realitätsnahe Datensätze der Atmosphäre zu erzeugen. Die Nutzung einer gleichbleibenden Modellversion auf aktuellem Stand für die zurückliegenden Jahre ermöglicht es, konsistente dreidimensionale Felder einer Vielzahl meteorologischer Größen zu erzeugen. Es stehen damit nicht nur die bodennahen Parameter zur Verfügung, sondern auch die vertikale Struktur der Atmosphäre und insbesondere auch Parameter, die nicht aus Beobachtungen vorliegen, beispielsweise die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe moderner Windkraftanlagen.

Derartige Datensätze stehen als globale Reanalysen zur Verfügung (beispielsweise ERA5 in einer räumlichen Auflösung von 31 km; Hersbach et al.

■ **Tab. 3.4** Ausgewählte Portale mit klimatologischer Information für Deutschland.

Auch Klimaatlantenthalten klimatologische Informationen, die üblicherweise aus den Beobachtungsdaten der Wetterstationen abgeleitet sind. Die Atlanten stehen inzwischen typischerweise als interaktive Internetinformationsportale zur Verfügung und liefern teilweise auch Ergebnisse aus Simulationen von Klimaszenarien.

Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes	► www.deutscher-klimaatlas.de
Klimaatlas der regionalen Klimabüros der Helmholtz-Gemeinschaft	► www.regionaler-klimaatlas.de
Norddeutscher Klimaatlas des Norddeutschen Klimabüros	► www.norddeutscher-klimaatlas.de
Klimaatlas Nordrhein-Westfalen	► www.klimaatlas.nrw.de
Norddeutscher Klimamonitor	► www.norddeutscher-klimamonitor.de
Informationsportal „KlimafolgenOnline“	► www.klimafolgenonline.com/

2020) sowie in höherer räumlicher Auflösung als regionale Reanalysen unter Verwendung von regionalen Wettervorhersagemodellen. Ein Beispiel sind die regionalen Reanalysen COSMO-REA6 (für Europa in einer Auflösung von ca. 6 km; Bollmeyer et al. 2015) sowie COSMO-REA2 (für Mitteleuropa in einer Auflösung von ca. 2 km; Wahl et al. 2017). Verschiedene Studien bewerteten die Qualität der Datensätze positiv und insbesondere im Bereich der erneuerbaren Energien werden die Datensätze erfolgreich eingesetzt (Kaspar et al. 2020b).

3.3 Kurz gesagt

Mit der Gründung staatlicher Wetterdienste im 19. Jahrhundert begannen umfangreiche Wetteraufzeichnungen weltweit. Heute beobachten die Wetterdienste in Deutschland und den Nachbarländern, wie sich das Klima in Mitteleuropa verändert. Auf Basis der gesammelten Beobachtungen lassen sich Aussagen über die Klimaentwicklung in Deutschland treffen: Von 1881 bis 2020 stiegen die mittleren Temperaturen in Deutschland deutlich, sowohl im Jahresdurchschnitt (linearer Trend: etwa +1,6 °C) als auch im Sommer (~+1,6 °C) und Winter (~+1,7 °C). Das letzte Jahrzehnt war bereits 2 °C wärmer als die ersten dreißig Jahre der Auswertung. Im gleichen Zeitraum haben die jährlichen Niederschläge um 8 % zugenommen (im Vergleich zum langjährigen Mittelwert 1961–1990). Dies lässt sich überwiegend auf die Zunahme der Winterniederschläge um 27 % zurückführen. Aus den Beobachtungen lassen sich auch Datensätze zur Überprüfung regionaler Klimamodelle ableiten. Dabei sind allerdings die spezifischen Eigenschaften der Datensätze zu berücksichtigen, die sich etwa aus der unterschiedlichen Stationsdichte ergeben. Insbesondere bei der Betrachtung von Extremen und Trends sind regionale Datensätze mit hoher Stationsdichte vorteilhaft.

Literatur

- Becker R, Behrens K (2012) Quality assessment of heterogeneous surface radiation network data. *Adv Sci Res* 8:93–97. ► <https://doi.org/10.5194/asr-8-93-2012>
- Begert M, Zenkusen E, Haeberli C, Appenzeller C, Klok L (2008) An automated homogenization procedure; performance assessment and application to a large European climate dataset. *Meteor Z* 17(5):663–672
- van den Besselaar EJM, Haylock MR, van der Schrier G, Klein Tank AMG (2011) An European daily high-resolution observational gridded data set of sea level pressure. *J Geophys Res* 116:D11110. ► <https://doi.org/10.1029/2010JD015468>
- Bollmeyer C, Keller JD, Ohlwein C, Wahl S, Crewell S, Friederichs P, Hense A, Keune J, Kneifel S, Pscheidt I, Redl S, Steinke S (2015) Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. *Q J R Meteorol Soc* 141:1–15. ► <https://doi.org/10.1002/qj.2486>
- Brienen S, Kapala A, Mächel H, Simmer C (2013) Regional centennial precipitation variability over Germany from extended observation records. *Int J Climatol* 33. ► <https://doi.org/10.1002/joc.3581>
- Chimani B, Böhm R, Matulla C, Ganekind M (2011) Development of a longterm dataset of solid/liquid precipitation. *Adv Sci Res* 6:39–43
- Chimani B, Matulla C, Böhm R, Hofstätter M (2013) A new high resolution absolute temperature grid for the Greater Alpine Region back to 1780. *Int J Climatol* 33:2129–2141. ► <https://doi.org/10.1002/joc.3574>
- Cornes R, Schrier G van der, Besselaar EJM van den, Jones PD (2018) An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets. *J Geophys Res Atmos*, 123. ► <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Cubasch U, Kadow C (2011) Global climate change and aspects of regional climate change in the Berlin-Brandenburg region. *Erde* 142:3–20
- Deutscher Wetterdienst (2023) Die deutschen Klimabeobachtungssysteme. Inventarbericht zum Global Climate Observing System (GCOS). Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach (► <http://www.gcos.de/inventarbericht>)
- Deutscher Wetterdienst (2021) Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach, 29 Seiten. ► <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/klimastatusbericht.html>
- Frick C, Steiner H, Mazurkiewicz A, Riediger U, Rauthe M, Reich T, Gratzki A (2014) Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): mean temperature and relative humidity. *Met Z* 23(1):15–32

- Hannak L, Friedrich K, Imbery F, Kaspar F (2019) Comparison of manual and automatic daily sunshine duration measurements at German climate reference stations. *Adv Sci Res* 16:175–183. ► <https://doi.org/10.5194/asr-16-175-2019>
- Hannak L, Brinckmann S (2020) Parallelmessungen an deutschen Klimareferenzstationen: Schlussfolgerungen im Hinblick auf Homogenität und Messunsicherheiten. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Bd. 253. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main
- Haylock MR, Hofstra N, Klein Tank AMG, Klok EJ, Jones PD, New M (2008) A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J Geophys Res (Atmospheres)* 113:D20119. ► <https://doi.org/10.1029/2008JD10201>
- Hellmann G (1883) *Repertorium der deutschen Meteorologie: Leistungen der Deutschen in Schriften, Erfindungen und Beobachtungen auf dem Gebiet der Meteorologie und dem Erdmagnetismus von den ältesten Zeiten bis zum Schluss des Jahres 1881*. Engelmann-Verlag, Leipzig (XXIV: 996)
- Hellmann G (1887) *Geschichte des Königl. Preuß Meteorologischen Instituts von seiner Gründung im Jahre 1847 bis Reorganisation im Jahre 1885*. In: *Ergebnisse der Meteorologischen Beobachtungen im Jahre 1885*. Königlich Preussisches Meteorologisches Institut, Berlin, S XX–LXIX
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P et al (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* ► <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hofstra N, Haylock M, New M, Jones PD (2009) Testing E-OBS European high-resolution gridded data set of daily precipitation and surface temperature. *J Geophys Res* 114:D21101
- Hofstra N, New M, McSweeney C (2010) The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data. *Clim Dyn* 35(5):841–858
- Hollmann R, Merchant CJ, Saunders R et al (2013) The ESA Climate Change Initiative: Satellite data records for essential climate variables. *Bull Amer Meteor Soc* 94:1541–1552. ► <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00254.1>
- Hu G, Franzke CL (2020): Evaluation of daily precipitation extremes in reanalysis and gridded observation-based data sets over Germany. *Geophys Res Lett* 47(18):e2020GL089624 ► <https://doi.org/10.1029/2020GL089624>
- Imbery F, Kaspar F, Friedrich K, Plückerhahn B (2021): Klimatologischer Rückblick auf 2020: Eines der wärmsten Jahre in Deutschland und Ende des bisher wärmsten Jahrzehnts. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes*. ► https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20210106_rueckblick_jahr_2020.pdf
- Isotta FA, Frei C, Weigluni V et al (2014) The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *Int J Climatol* ► <https://doi.org/10.1002/joc.3794>
- Karl TR, Diamond HJ, Bojinski S, Butler JH, Dolman H, Haeberli W, Harrison DE, Nyong A, Rösner S, Seiz G, Trenberth K, Westermeyer W, Zillman J (2010) Observation needs for climate information, prediction and application: Capabilities of Existing and Future Observing Systems. *Procedia Environ Sci* 1:192–205. ► <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.013>
- Karlsson KG, Anttila K, Trentmann J et al (2017) CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data. *Atmos Chem Phys* 17:5809–5828 ► <https://doi.org/10.5194/acp-17-5809-2017>
- Kaspar F, Müller-Westermeier G, Penda E, Mächel H, Zimmermann K, Kaiser-Weiss A, Deutschländer T (2013) Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *Adv Sci Res* 10:99–106. ► <https://doi.org/10.5194/asr-10-99-2013>
- Kaspar F, Zimmermann K, Polte-Rudolf C (2014) An overview of the phenological observation network and the phenological data base of Germany's national meteorological service (Deutscher Wetterdienst). *Adv Sci Res* 11:93–99. ► <https://doi.org/10.5194/asr-11-93-2014>
- Kaspar F, Tinz B, Mächel H, Gates L (2015) Data rescue of national and international meteorological observations at Deutscher Wetterdienst. *Adv Sci Res* 12:57–61. ► <https://doi.org/10.5194/asr-12-57-2015>
- Kaspar F, Hannak L, Schreiber KJ (2016) Climate reference stations in Germany: Status, parallel measurements and homogeneity of temperature time series. *Adv Sci Res* 13:163–171. ► <https://doi.org/10.5194/asr-13-163-2016>
- Kaspar F, Kratzenstein F, Kaiser-Weiss AK (2019) Interactive open access to climate observations from Germany. *Adv Sci Res* 16:75–83. ► <https://doi.org/10.5194/asr-16-75-2019>
- Kaspar F, Friedrich K, Imbery F (2020a) Temperaturverlauf in Deutschland und global im Jahr 2019 und die langfristige Entwicklung. *Mitteilungen DMG*, 1, 41–44. Deutsche Meteorologische Gesellschaft
- Kaspar F, Niermann D, Borsche M, Fiedler S, Keller J, Potthast R, Rösch T, Spanghel T, Tinz B (2020b) Regional atmospheric reanalysis activities at Deutscher Wetterdienst: review of evaluation results and application examples with a focus on renewable energy. *Adv Sci Res* 17:115–128. ► <https://doi.org/10.5194/asr-17-115-2020>
- Kaspar F, Friedrich K, Imbery F (2020c) 2019 global zweitwärmstes Jahr: Temperaturentwicklung in Deutschland im globalen Kontext. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes*. ► https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf
- Kaspar F, Friedrich K, Imbery F (2021) Nutzung klimatologischer Referenzperioden ab 2021 – Empfehlungen der WMO und Umsetzung in der DWD-Klimaüberwachung. *Mitteilungen DMG*, 2, 9–10, Deutsche Meteorologische Gesellschaft
- Kaspar F, Friedrich K, Imbery F (2023) Observed temperature trends in Germany: Current status and communication tools. *Meteorologische Zeitschrift*, angenommen.
- Krähenmann S, Walter A, Brienens S, Imbery F, Matzarakis A (2018) High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany. *Theor Appl Climatol* 131:899–926. ► <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2003-7>
- Klok EJ, Klein Tank AMG (2008) Updated and extended European dataset of daily climate observations. *Int J Climatol* 29:1182. ► <https://doi.org/10.1002/joc.1779>
- Kothe S, Pfeifroth U, Cremer R, Trentmann J, Hollmann R (2017) A Satellite-Based Sunshine Duration Climate Data Record for Europe and Africa. *Remote Sens* 9:429. ► <https://doi.org/10.3390/rs9050429>
- Lengfeld K, Winterrath T, Junghänel T, Hafer M, Becker A (2019) Characteristic spatial extent of hourly and daily precipitation events in Germany derived from 16 years of radar data. *Meteorologische Zeitschrift*, 363–378. ► <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0964>
- Lengfeld K, Kirstetter PE, Fowler HJ, Yu J, Becker A, Flamig Z, Gourley JJ (2020) Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine scales and short durations. *Environ Res Lett*. ► <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab98b4>
- Mächel H, Kapala A (2013) Bedeutung langer historischer Klimareihen. In: *Goethes weiteres Erbe: 200 Jahre Klimastation Jena. Beiträge des Jubiläumskolloquiums „200 Jahre Klimastation Jena“*. Annalen d Meteorol, Bd. 46. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a M, S 172
- Mächel H, Kapala A, Behrendt J, Simmer C (2009) Rettung historischer Klimadaten in Deutschland: das Projekt KLIDADIGI des DWD. *Klimastatusbericht 2008*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach/Main
- Maier U, Kudlinski J, Müller-Westermeier G (2003) Klimatologische Auswertung von Zeitreihen des Monatsmittels der Luft-

- temperatur und der monatlichen Niederschlagshöhe im 20. Jahrhundert. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 223. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main
- Maraun D, Osborn TJ, Rust HW (2012) The influence of synoptic airflow on UK daily precipitation extremes. Part II: regional climate model and E-OBS data validation. *Climate Dynamics* 39(1–2):287–301
- Müller-Westermeier G (1995) Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 193. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main
- Müller-Westermeier G (2004) Statistical analysis of results of homogeneity testing and homogenization of long climatological time series in Germany. Fourth seminar for homogenization and quality control in climatological databases, Budapest, Hungary, 06–10 October 2003. World Climate Data and Monitoring Programme Series (WCDMP-No 56). WMO Technical Document, Bd. 1236. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland
- Pfeifroth U, Sanchez-Lorenzo A, Manara V, Trentmann J, Hollmann R (2018) Trends and variability of surface solar radiation in Europe based on surface- and satellite-based data records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(3):1735–1754. ► <https://doi.org/10.1002/2017JD027418>
- Popp T, Hegglin MI, Hollmann R et al (2020) Consistency of Satellite Climate Data Records for Earth System Monitoring. *Bull Am Meteor Soc* 101(11):E1948–E1971. ► <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0127.1>
- Posselt R, Mueller RW, Stöckli R, Trentmann J (2012) Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring – the CM-SAF retrieval in international comparison. *Remote Sens Environ* 118:186–198. ► <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.016>
- Razafimaharo C, Krähenmann S, Höpp S, Rauthe M, Deutschländer T (2020) New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). *Theoret Appl Climatol* 142(3):1531–1553. ► <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03388-w>
- Rapp J (2000) Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 212. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main
- Rauthe M, Steiner H, Riediger U, Mazurkiewicz A, Gratzki A (2013) A Central European precipitation climatology. Part I: Generation and validation of a high resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* 22(3):235–256. ► <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0436>
- Scherrer SC, Appenzeller C, Liniger MA (2006) Temperature trends in Switzerland and Europe: implications for climate normal. *Int J Climatol* 26(5):565–580. ► <https://doi.org/10.1002/joc.1270>
- Schneider-Carius K (1955) *Wetterkunde Wetterforschung: Geschichte ihrer Probleme und Erkenntnisse in Dokumenten aus drei Jahrtausenden*. Verlag Karl Alber, Freiburg/München
- Squintu AA, van der Schrier G, Brugnara Y, Klein-Tank AMG (2019) Homogenization of daily ECA&D temperature series. *Intern. J. Climatology* 39(3):1243–1261. ► <https://doi.org/10.1002/joc.5874>
- Wahl S, Bollmeyer C, Crewell S, Figura C, Friederichs P, Hense A, Keller JD, Ohlwein C (2017) A novel convective-scale regional reanalysis COSMO-REA2: Improving the representation of precipitation. *Meteorol Z* 26:345–361. ► <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0824>
- Wege K (2002) Die Entwicklung der meteorologischen Dienste in Deutschland. *Geschichte der Meteorologie in Deutschland*, Bd. 5. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main
- Wijngaard JB, Klein Tank AMG, Konnen GP (2003) Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int J Climatol* 23:679–692
- Winkler P (2006) Hohenpeißenberg 1781–2006: das älteste Bergobservatorium der Welt. *Geschichte der Meteorologie in Deutschland* 7:174
- Winterrath T, Brendel C, Hafer M, Junghänel T, Klameth A, Walawender E, Weigl E, Becker A (2017) Erstellung einer radar-gestützten Niederschlagsklimatologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bd. 251. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main
- WMO (1959) Technical regulations. Volume 1: General meteorological standards and recommended practices. WMO Technical Document, Bd. 49. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland
- WMO (2017) Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No. 1203. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

