
Intensivierung der Temperaturentwicklung in Deutschland als Folge des Klimawandels

Warum der Deutsche Wetterdienst seine Kommunikation erweitert

Kurz zusammengefasst:

- ◆ Mit der beschleunigten Erwärmung der Temperaturen in Deutschland und global seit Beginn der 1970er Jahre ist die bisherige lineare Trendanalyse zunehmend nicht mehr fähig, die Temperaturentwicklung adäquat zu dokumentieren. Dies trifft insbesondere für die vergangenen zehn Jahre zu.
- ◆ Die Unterschätzung der Erwärmung Deutschlands seit frühindustrieller Zeit durch das lineare Trendverfahren war lange Zeit akzeptabel, beträgt aber inzwischen nicht mehr tolerierbare $0,6\text{ °C}$, Tendenz steigend. Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf bei der adäquaten Beschreibung der Folgen des Klimawandels nicht nur für den Deutschen Wetterdienst, sondern für alle Wetterdienste, deren Überwachungsgebiete von einer ähnlichen oder sogar stärkeren Dynamik in der Erwärmung betroffen sind.
- ◆ Das sogenannte LOESS-Verfahren (Locally estimated/weighted Scatterplot Smoothing, lokales lineares Regressionsmodell) wird aktuell in der Fachwelt als das am besten geeignete Berechnungsverfahren für die Klima-Trendlinie angesehen und auch bei anderen Wetterdiensten weltweit in den Routinebetrieb aufgenommen.
- ◆ Die neue Klima-Trendlinie bildet sowohl die Klimaerwärmung als auch Perioden der Abkühlung realitätsnah ab und ist auch für die Parameter Niederschlag und Sonnenscheindauer anwendbar.
- ◆ Das für die neue Klima-Trendlinie verwendete LOESS-Verfahren ist eine etablierte statistische Methodik. Verschiedene Bundesbehörden arbeiten bereits damit, z.B. das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bei der Beschreibung des Meeresspiegelanstiegs. Weitere Behörden, wie z.B. das Umweltbundesamt (UBA) warten auf die Einführung dieses Verfahrens durch den DWD, um ihre Anschlussanalysen auf aktuelle Zahlen aufzubauen.
- ◆ Während mit der linearen Trendanalyse die Temperaturerwärmung in Deutschland von 1881 bis 2024 $1,9 \pm 0,2\text{ °C}$ beträgt, liegt die Erwärmung bei Anwendung der neuen LOESS-Trendlinie bei $2,5 \pm 0,4\text{ °C}$.

Warum wir ein neues Verfahren zur Trendberechnung brauchen

Die Überwachung des Klimas von Deutschland sowie die Analyse des Klimawandels gehören zu den zentralen gesetzlichen Aufgaben des Deutschen Wetterdienstes und haben aufgrund der globalen Erwärmung in seiner gesellschaftlichen Bedeutung in den vergangenen Jahrzehnten ständig zugenommen. Mit den Jahren 2022 bis 2024 waren in Deutschland drei Jahre in Folge die jeweils wärmsten Jahre seit Beginn der systematischen Messungen in Deutschland. Zusätzlich waren seit den 1970er-Jahren alle Dekaden deutlich wärmer als die vorherigen, wobei die jüngste Dekade bis Ende 2024 bereits $2,3\text{ °C}$ über dem langjährigen Mittel 1881-1910 liegt.

Ebenfalls ist seit 1971 eine deutliche Beschleunigung des Temperaturanstiegs zu verzeichnen. So hat sich der Änderungstrend der deutschen Jahresmitteltemperaturen für den Zeitraum 1971-2024 mit $+0,41\text{ °C}$ pro Dekade gegenüber dem Gesamtzeitraum 1881-2024 bereits mehr als verdreifacht. Die Folge ist, dass insbesondere die aktuelle Temperaturentwicklung mit den sehr warmen Jahren seit ungefähr 2014, im Gegensatz zu dem Zeitraum zuvor, durch das auf den gesamten Zeitraum angewendete lineare Trendverfahren nicht mehr angemessen abgebildet wird (wie auch die beigefügte Abbildung 1 klar zeigt).

Diese Verhaltensänderung in der Erwärmung - sowohl in Deutschland wie auch global - kann die bisher vom DWD genutzte Berechnungsmethode zur Temperaturentwicklung (linearer Trend) nicht mehr realistisch abbilden. Aus diesem Grund wird die Methodik auf ein anderes statistisches Verfahren umgestellt, das die Entwicklungen substantiell besser abbilden kann.

Evaluierung alternativer Methoden zum linearen Trendverfahren

Die nicht-lineare, d.h. beschleunigte, Entwicklung der gemessenen Temperatur findet sowohl global als auch in Deutschland statt. Um die Methode des linearen Trends mit nur einer Methode, die ebenso auf möglichst alle Klimaparameter einheitlich anwendbar ist, geeignet zu ersetzen, hat der DWD mehrere etablierte statistische Verfahren und Trendschätzer, auch im Austausch mit Expertinnen und Experten benachbarter Wetterdienste, auf ihre Eignung untersucht und miteinander verglichen. Dazu zählten neben dem bisher genutzten linearen Trend, Gauß-Filter, dem Vergleich vieljähriger Mittelwerte auch eine Trendbestimmung mit dem sogenannten LOESS-Filter. Im Resultat hat sich das LOESS-Verfahren der lokalen linearen Regression als am geeignetsten erwiesen. Mit dem LOESS-Verfahren wird die Klimaentwicklung im Vergleich zum linearen Trend genauer nachgezeichnet: Zu jeder Zeit über den gesamten Zeitraum seit 1881 weicht die Klima-Trendlinie des LOESS-Verfahrens deutlich weniger von den Jahresmitteln ab. Schließlich bildet das neue Verfahren die aktuelle Beschleunigung der Klimaerwärmung realistischer ab, und kommt zu einer Gesamterwärmung Deutschlands seit der frühindustriellen Zeit von $2,5 \pm 0,4\text{ °C}$.

Vorteile des LOESS-Verfahrens

Das LOESS-Verfahren ist ein statistisches Modell, das auf einer lokalen d.h. auf einem begrenzten zeitlichen Abschnitt bezogenen linearen Regression basiert. Bei diesem Verfahren wird nicht für den gesamten Zeitraum ein Trend bestimmt, sondern für jeden Zeitpunkt ein lokales Modell erstellt, indem ein Teil der Nachbardaten (definiert durch ein sogenanntes Glättungsfenster) verwendet wird. Innerhalb dieses Fensters wird ein einfaches Polynom zweiten Grades an die Daten angepasst. Dies erlaubt, dass sich das Modell flexibel an unterschiedliche lokale Verhaltensmuster anpasst. Nicht alle Zeitpunkte in diesem Glättungsfenster werden gleich stark gewichtet. Punkte, die näher am Zielpunkt liegen, erhalten höhere Gewichte, während weiter entfernte Punkte weniger Einfluss haben. Der DWD nutzt ein gewichtetes 42-jähriges Glättungsfenster mit einer trikubischen Funktion, durch die der Einfluss mit zunehmender Entfernung stetig abnimmt.

Die LOESS-Trendlinie kann sowohl starke Trendbeschleunigungen als auch die Klimavariabilität gut abbilden. In Abbildung 1 ist die zwischenzeitliche Abkühlung der mittleren Temperaturen in Deutschland in den 1960er Jahren zu erkennen, die durch die Klima-Trendlinie des LOESS-Filters im Gegensatz zur linearen Trendgerade gut nachgezeichnet wird. Führen Klimaschutzmaßnahmen in Zukunft zu einer Reduzierung der mittleren Temperatur, ist die LOESS-basierte Klima-Trendlinie ebenfalls in der Lage, auch einen Rückgang der Erwärmung in Deutschland zeitnah festzustellen.

Abbildung 1 zeigt sowohl die neue Klima-Trendlinie basierend auf dem LOESS-Verfahren als auch die Gerade des bisher beim DWD eingesetzten Verfahrens (linearer Trend) für den gesamten Zeitraum ab 1881. Zusätzlich ist zur Beschreibung der rezenten beschleunigten Erwärmung der lineare Trend im Zeitraum 1971-2024 eingezeichnet. Diese beschleunigte Erwärmung in Deutschland wird durch die LOESS-basierte Klima-Trendlinie bedeutend besser wiedergegeben, ohne dass hierfür der Analysezeitraum eingeschränkt werden muss.

Der Temperaturanstieg in Deutschland seit 1881 wird für den am 1. April 2025 veröffentlichten DWD Klimastatusbericht 2024 mithilfe der neuen LOESS-Trendlinie folgendermaßen bestimmt: Er ergibt sich aus der Differenz des aktuellen Werts der LOESS-Trendlinie (d.h. Lage der Trendlinie im jeweils aktuellen Jahr) und dem Mittelwert der ersten 30 Jahre der Zeitreihe (Gebietsmittel der Temperatur 1881-1910). Für die Parameter Sonnenscheindauer sowie weitere Kenntage bezieht sich der Mittelwert der ersten 30 Jahre auf den Zeitraum 1951-1980. Zusätzlich wird eine Unsicherheitsabschätzung (95 %-Konfidenzintervall) mit angegeben, die auf der zugrunde liegenden statistischen Trendmethodik beruht (de Valk, 2020). Die beschriebene Änderung des klimatologischen Trends beruht lediglich auf der geänderten statistischen Berechnung, die zugrunde liegende Datenbasis bleibt jedoch jeweils die gleiche.

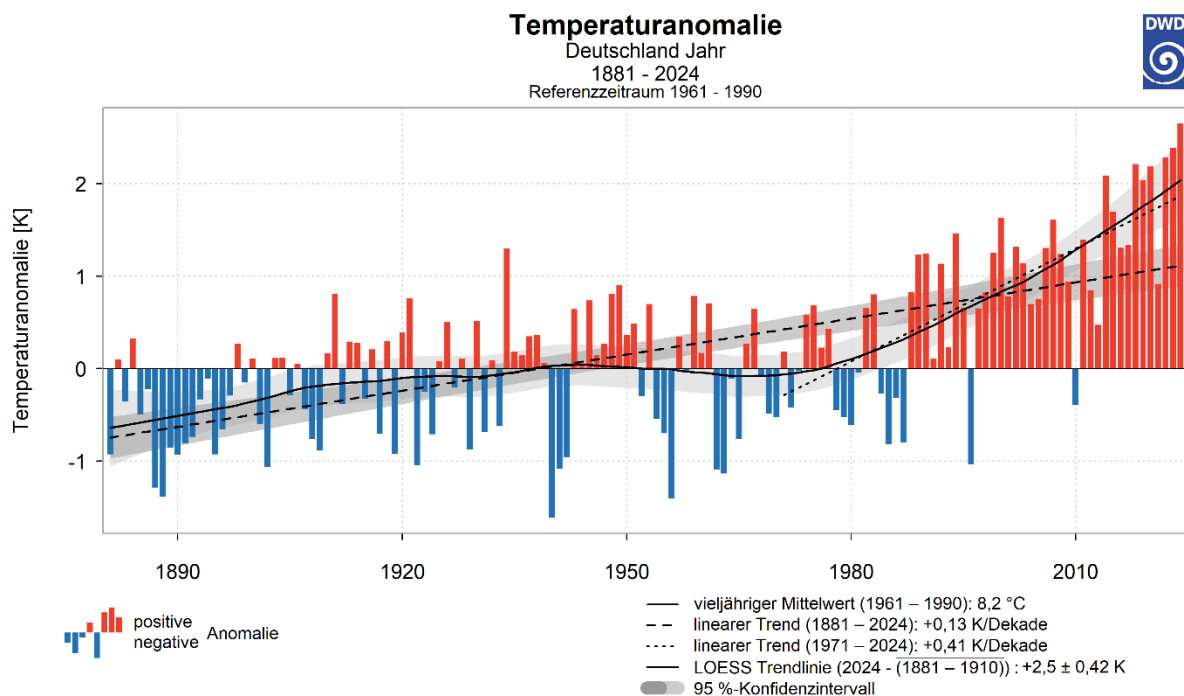


Abbildung 1: Abweichungen der Gebietsmittel der Temperatur für Deutschland von den vieljährigen Mitteln 1961-1990 (rote und blaue Säulen), der lineare Trend der Temperaturentwicklung 1881-2024 (gestrichelte Linie), der lineare Trend für den Zeitraum 1971-2024 (gepunktete Linie) sowie die LOESS-Trendlinie für den Zeitraum 1881-2024 (durchgezogene Linie).

Temperaturanstieg in Deutschland seit 1881 bei 2,5 °C

Das künftig vom DWD eingesetzte LOESS-Verfahren ist eine den physikalischen Veränderungen angemessene Methodik, um die Temperaturänderung für Deutschland zu bestimmen. Mit dem bisherigen Berechnungsverfahren des DWD beträgt der Temperaturanstieg in Deutschland seit 1881 $+1,9 \pm 0,2$ °C. Die neue LOESS-Trendlinie bildet den Verlauf auf Basis derselben Eingangsdaten seit 1881 inklusive der sehr warmen rezenten Jahrzehnte seit den 1970ern realistischer ab, mit dem Ergebnis eines gesamten Temperaturanstieges von $+2,5 \pm 0,4$ °C seit frühindustrieller Zeit. Zusätzlich wird der DWD die Änderungssignale zukünftig mit einer Unsicherheit angegeben, die sich aus dem 95% Konfidenzintervall ergibt. Dieses ist in den Abbildungen als grauer Bereich eingezeichnet und zeichnet den Bereich, in dem der wahre Wert der Schätzung mit einer gewählten Sicherheit liegt. Informationen zur Berechnung werden in de Valk, 2020 beschrieben.

Neues Verfahren zur Trendberechnung auch bei anderen Variablen sinnvoll

Das vorgestellte neue Verfahren zur Trendberechnung eignet sich auch für eine Vielzahl anderer Variablen im meteorologischen Kontext. Der Niederschlag beispielsweise zeichnet sich in Deutschland durch eine große interannuelle Variabilität aus. Dadurch kann sich der abgeleitete LOESS-Trend durch sein sensitiveres Verhalten aufgrund einzelner Jahre, wie die sehr feuchten Jahre 2023 und 2024, deutlich von den Vorjahren unterscheiden. Der lineare Trend hingegen eliminiert durch sein robustes Verhalten diese eher kurzfristigen Signale, wie zyklische und periodische Schwankungen und gibt langfristige Änderungen wieder. Der LOESS-Filter eignet sich hingegen auch zur Identifizierung kurzfristiger Zustände und Änderungen, wie der Häufung von trockenen Jahren ab 2010. Die beiden Methoden unterscheiden sich für den Niederschlag nicht signifikant, sodass deren abgeleitete Trendlinien in Zukunft als optische Hilfslinien immer gemeinsam in den Abbildungen des DWD gezeigt werden (Abbildung 2).

LOESS-Verfahren ist international zur Berechnung von Klima-Trendlinien verbreitet

Das LOESS-Verfahren wurde bereits vor einigen Jahren vom niederländischen Wetterdienst [KNMI](#)¹ für die Klima-Trendlinie adaptiert und Anfang letzten Jahres auch vom [Schweizer Wetterdienst](#)² in der Klimaüberwachung eingeführt. Auch mit dem österreichischen Wetterdienst (Geosphere Austria) herrscht Einvernehmen, diese Praxis zu übernehmen. Schließlich bietet auch die amerikanische Atmosphären- und Ozeanbehörde [NOAA](#)³ den LOESS-Filter als eines von drei Glättungsverfahren zusätzlich zum linearen Trend auf seiner interaktiven Seite zur Analyse globaler Zeitreihen an. Darüber hinaus hat der Weltklimarat (IPCC) im jüngsten Sachstandsbericht bereits darauf verwiesen, dass der bisher eingesetzte lineare Trend die tatsächliche Temperaturentwicklung zunehmend unzutreffend beschreibt. Auch die WMO hat auf der Weltklimakonferenz 2024 in Baku (COP29) das LOESS-Verfahren zur Abschätzung der globalen Erwärmung seit frühindustrieller Zeit erstmals in ihre Kommunikation mit aufgenommen (UNFCCC, 2024).

¹ https://cdn.knmi.nl/system/ckeditor_assets/attachments/161/TR389.pdf

² <https://www.meteoschweiz.admin.ch/ueber-uns/meteoschweiz-blog/de/2024/01/neuerungen-klima-ueberwachung.html>

³ <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>

Nationale Abstimmung mit Bundes- und Landesbehörden zur neuen Klima-Trendlinie

Die Einführung des neuen LOESS-Verfahrens erfolgt in enger Abstimmung mit anderen Bundes- und Landesbehörden (z.B. über das Bund-Länder-Fachgespräch), weiteren nationalen Wetterdiensten sowie internationalen Organisationen.

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) beschreibt den Meeresspiegelanstieg an der deutschen Küste ebenfalls mit einer auf dem LOESS-Verfahren basierenden Trendlinie. Schließlich ist das Umweltbundesamt (UBA) mit der Abteilung Klimaüberwachung des DWD ebenfalls zu diesem Verfahren im Austausch und bereit, die neue Klima-Trendlinie und die dazu vom DWD vorgeschlagene Kommunikation zu übernehmen.

Fazit

Der DWD wird mit der Einführung der neuen Klima-Trendlinie basierend auf dem LOESS-Verfahren bei der Analyse des beobachteten Klimawandels in enger Abstimmung mit seinen Nachbarwetterdiensten seinem Informationsauftrag zur Daseinsvorsorge zukunftsicher nachkommen. Er erfüllt damit den gesetzlichen Auftrag zum Betrieb wissenschaftlicher Forschung im Bereich der Klimatologie und der Mitwirkung an der Entwicklung entsprechender Standards und Normen.

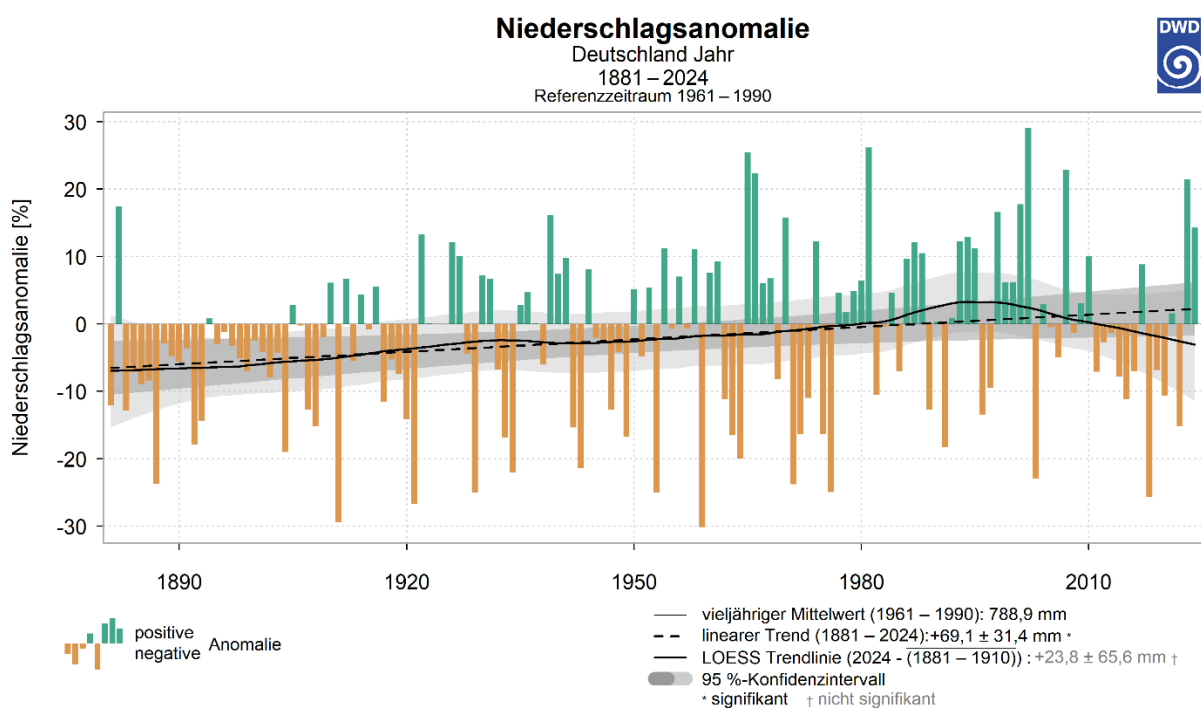


Abbildung 2: Abweichungen der Gebietsmittel der Niederschlagssummen für Deutschland von den vieljährigen Mitteln 1961-1990 (braune und grüne Säulen), der lineare Trend der Niederschlagsentwicklung 1881-2024 (gestrichelte Linie) sowie die neue LOESS-Trendlinie für den Zeitraum 1881-2024 (durchgezogene Linie).

Anhang

Für die Sonnenscheindauer zeigt sich, wie auch bei der Temperatur, der Vorteil der LOESS-Methode in der Darstellung nicht-linearer Prozesse deutlich. Die LOESS basierte Klima-Trendlinie zeichnet die Abnahme der Sonnenscheindauer in Deutschland bis in die 1980er Jahre ('global dimming') gut nach und auch die anschließende Zunahme bis zur Gegenwart ('global brightning') ist erkennbar. Der lineare Trend reproduziert diese bekannten Prozesse nicht.

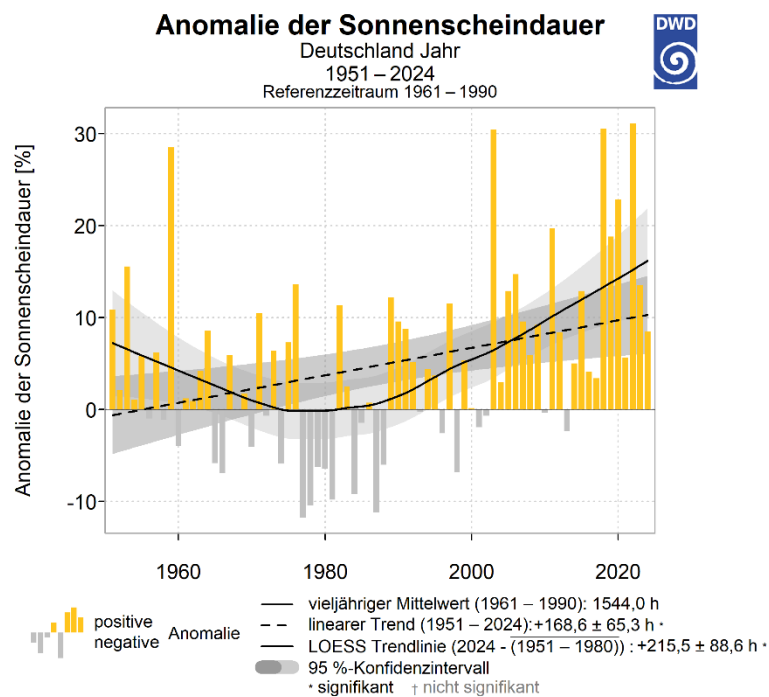


Abbildung 3: Abweichungen der Gebietsmittel der Sonnenstunden für Deutschland von den vieljährigen Mitteln 1961-1990 (graue und gelbe Säulen), der lineare Trend der Entwicklung der Sonnenstunden 1951-2024 (gestrichelte Linie) sowie die neue LOESS-Trendlinie für den Zeitraum 1951-2024 (durchgezogene Linie).

Bei der Analyse der Änderungen von Extremen (hier dargestellt durch verschiedene klimatologische Kenn-tage) ergeben sich im Vergleich zwischen Linearem Trend und LOESS-Verfahren keine signifikanten Unterschiede.

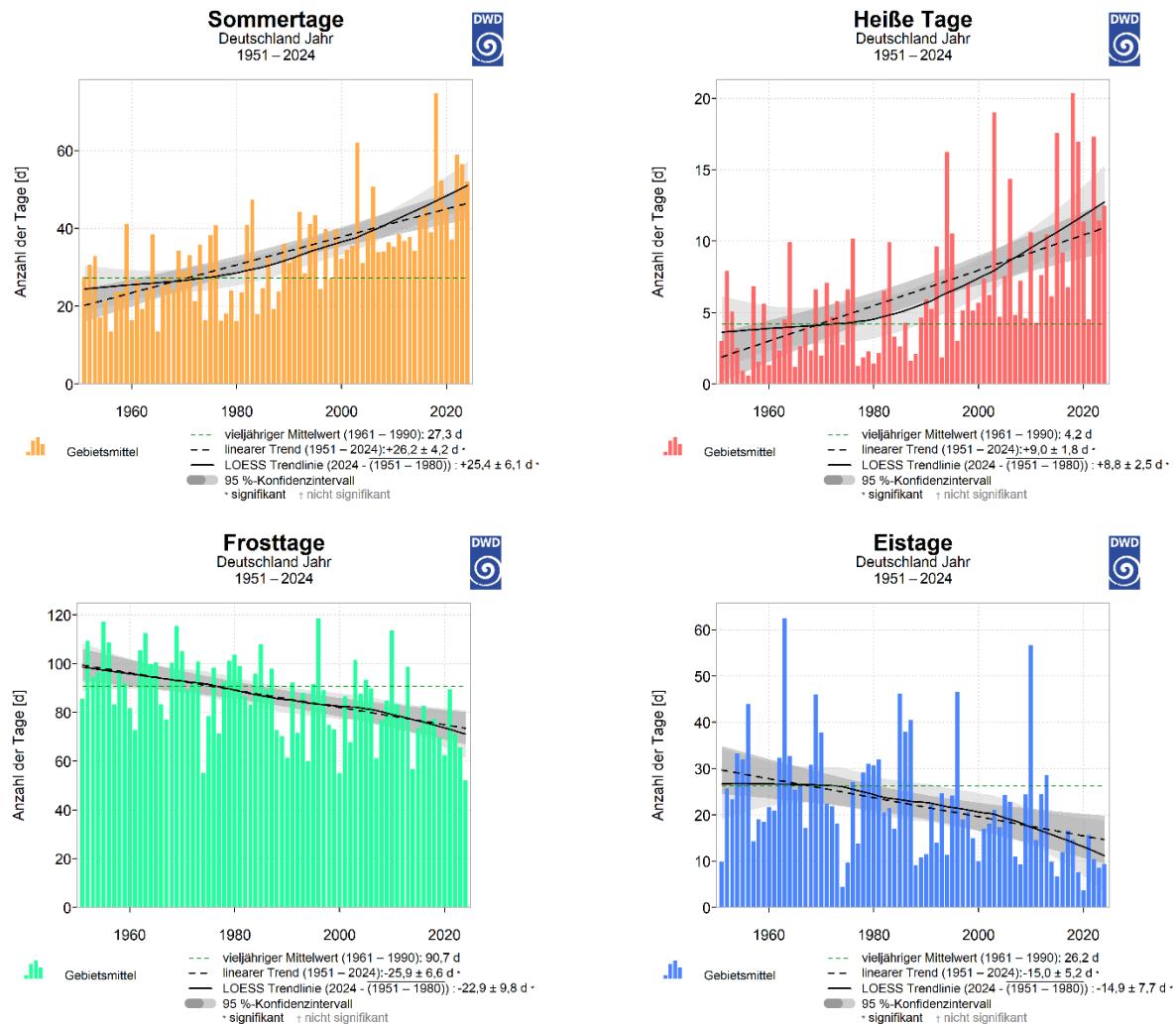


Abbildung 4: Temperaturbezogene Kenntage 1951-2024: Sommertage (links oben) und Heiße Tage (rechts oben), Frosttage (links unten) und Eistage (rechts unten), jeweils mit linearem Trend (gestrichelte Linie) sowie der neuen LOESS-Trendlinie.

Literatur

de Valk, C.F. 2020: Standard method for determining a climatological trend, KNMI Technical Report, TR-389, <https://www.knmi.nl/research/publications/standard-method-for-determining-a-climatological-trend>

Gulev, S.K. et al. 2021: Changing State of the Climate System. – In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. DOI: [10.1017/9781009157896.004](https://doi.org/10.1017/9781009157896.004)

Kaspar, F., Friedrich, K., Imbery, F. 2023: Observed temperature trends in Germany: Current status and communication tools. Met. Zeit. Vol. 32 No. 4. DOI: [10.1127/metz/2023/1150](https://doi.org/10.1127/metz/2023/1150)

Scherrer, S., de Valk, C.F., Begert, M., Gubler, S., Kotlarski, S., and M. Croci-Maspoli, 2024: Estimating trends and the current climate mean in a changing climate, Climate Services 33, doi: [10.1016/j.cliser.2023.100428](https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100428)

UNFCCC, 2024: EID 2024 WMO State of the climate update, <https://unfccc.int/documents/643141>