



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

MeteoSchweiz

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 285

Eine neue Beschreibung des Klimaverlaufs und Bestimmung des aktuellen Klimazustands

Simon Scherrer, Michael Begert und Mischa Croci-Maspoli



ISSN: 2296-0058

doi: [10.18751/PMCH/TR/285.KlimaVerlauf/1.0](https://doi.org/10.18751/PMCH/TR/285.KlimaVerlauf/1.0)

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 285

Eine neue Beschreibung des Klimaverlaufs und Bestimmung des aktuellen Klimazustands

Simon Scherrer, Michael Begert und Mischa Croci-Maspoli

Empfohlene Zitierung:

Scherrer S., Begert M., und M. Croci-Maspoli, 2023: Eine neue Beschreibung des Klimaverlaufs und Bestimmung des aktuellen Klimazustands, *Fachbericht MeteoSchweiz*, **285**, 24 pp, doi: [10.18751/PMCH/TR/285.KlimaVerlauf/1.0](https://doi.org/10.18751/PMCH/TR/285.KlimaVerlauf/1.0)

Herausgeber:

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2023

MeteoSchweiz

Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

Zusammenfassung

Das Monitoring des aktuellen Klimazustands und die Überwachung der Wirksamkeit von Klimaschutzmassnahmen sind eine zentrale Aufgabe von MeteoSchweiz und von grosser gesellschaftlicher Bedeutung. Durch den sich verstärkenden Klimawandel eignen sich dafür klassische Normwerte und lineare Trendschätzer für Temperatur und weitere sich stark verändernde Grössen immer weniger. Obwohl mehrere Alternativen verfügbar und in Gebrauch sind, gibt es kaum quantitative Bewertungen derselben. Wir prüfen bereits angewendete Ansätze, die vergangene Klimadaten zur Schätzung des aktuellen Klimamittels verwenden. Diese wenden wir auf Beobachtungen und Klimaszenarien der Schweizer Mitteltemperatur im Zeitraum 1864-2099 an. Es zeigt sich, dass mehrere Ansätze für den gesamten Zeitraum gut funktionieren. Um eine breite Anwendbarkeit zu gewährleisten, wurden zusätzliche Kriterien wie die Flexibilität der Methode, die breite Anwendbarkeit auf eine grosse Anzahl von Klimavariablen und die Einfachheit bezüglich Berechnung und Kommunikation berücksichtigt. In der Gesamtbeurteilung erweist sich eine Klima-Trendlinie basierend auf lokaler linearer Regression zur Beschreibung der Klimaentwicklung und zur Bestimmung des aktuellen Klimamittels als besonders vielversprechend. Die Resultate führen zu Anpassungen im Klimamonitoring von MeteoSchweiz.

Abstract

Monitoring the current state of the climate and the effectiveness of climate protection measures are a central task of MeteoSwiss and of great importance to society. Due to the intensifying climate change, classic standard values and linear trend estimators for temperature and other strongly changing variables are becoming less and less suitable for this purpose. Although several alternatives are available and in use, there are hardly any quantitative assessments of them. We review existing approaches that use past climate data to estimate the current mean climate. We apply these to the Swiss mean temperature over the period 1864-2099, which is composed of observations and climate scenarios. It turns out that several approaches work well for the entire period. In order to ensure broad applicability, additional criteria such as the flexibility of the method, broad applicability to a large number of climate variables and simplicity in terms of calculation and communication were taken into account. In the overall assessment, a climate trend line based on local linear regression for describing the climate evolution and determining the current climate mean proved to be particularly promising. The results lead to adjustments in the climate monitoring of MeteoSwiss.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	V
Abstract	VI
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Methoden, Kriterien und Daten	3
2.1 Ansätze	3
2.2 Evaluationskriterien	4
2.3 Daten	5
2.4 Validierungsansatz für das «Performance» Kriterium	5
3 Resultate	7
3.1 Fehleranalyse Schweizer Temperaturmittel	7
3.2 Auswertung Kriterien und Methodenwahl	9
4 Anwendung bei MeteoSchweiz	11
4.1 Klima-Trendlinie	11
4.2 Aktuelles Klimamittel	15
4.2.1 Definition	15
4.2.2 Anwendungsbereich	15
4.3 Klimaänderungssignale	15
4.3.1 Neue Definition	15
4.3.2 Auswirkungen auf die Klimaänderungssignale	16
4.3.3 Formulierungsbeispiele	17
4.3.4 Begriffe in verschiedenen Sprachen	17
5 Ausblick	19
5.1 Wie extrem war die Temperatur 2022?	19
Danksagung	20
Literaturverzeichnis	21
A Technische Implementierung	23

1 Einleitung und Problemstellung

Die Bestimmung des mittleren Klimazustands ist eine Kernaufgabe des Klimamonitorings und eine wichtige Klimadienleistung, beispielsweise zur Beschreibung des Klimawandels oder zur Einordnung von Anomalien. Dazu werden in der Klimatologie seit langem die gut etablierten Normwerte verwendet. Sie beschreiben den mittleren Klimazustand von 30-Jahresperioden (WMO, 1989; WMO, 2017). Der Einsatzbereich von Normwerten ist gross und geht weit über die Verwendung als Mass für die Beschreibung des mittleren Klimazustands hinaus (vgl. Scherrer et al., 2006; Arguez and Vose 2011).

Das Konzept von Normwerten beruht auf der Annahme eines stationären, also über längere Zeit «trendlosen», Klimas. Diese Stationarität ist durch den Klimawandel für viele Grössen wie z.B. Temperatur und absolute Feuchte nicht mehr gegeben. Als Folge hinken Normwerte der fortschreitenden Klimaentwicklung hinterher und sind oft nur noch begrenzt nutzbar, um das aktuelle Klima zu beschreiben (vgl. Abb. 1 und z.B. Milly et al., 2008).

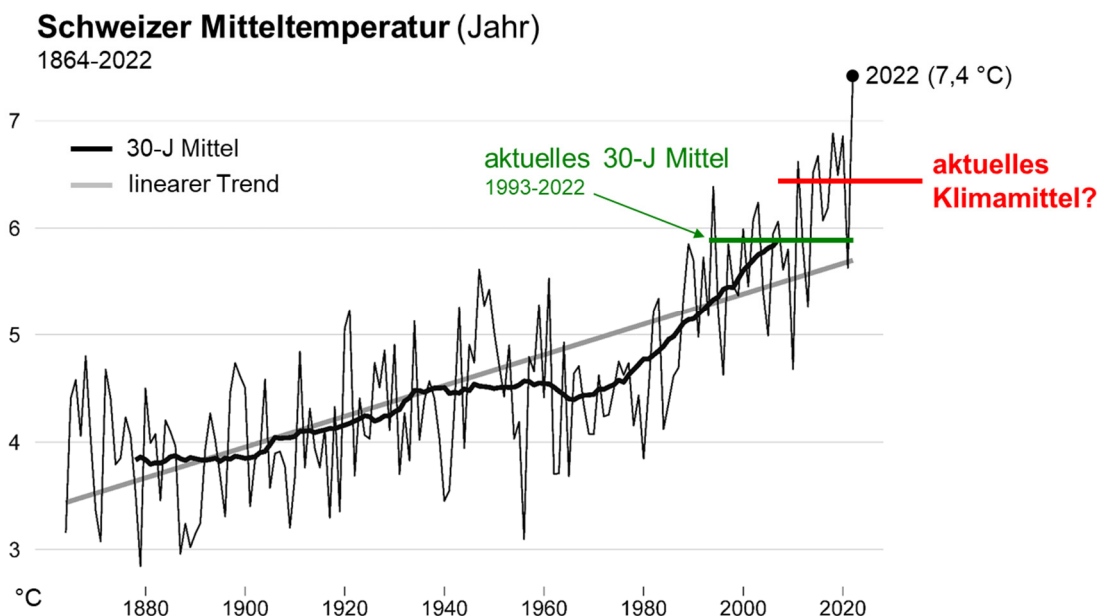


Abbildung 1: Entwicklung der Schweizer Mitteltemperatur seit 1864. Gleitendes 30-jähriges Mittel (dicke Linie) und aktuelles 30-jähriges Mittel (grüne horizontale Linie) sowie optische Hervorhebung des ungefähren Niveaus der letzten Jahre (rote horizontale Linie).

Diese Tatsache wurde schon 2007 in der World Meteorological Organization (WMO) thematisiert (WMO, 2007) und wird seit über 15 Jahren in der Literatur intensiv diskutiert (Scherrer et al. 2006; Livezey et al. 2007; Arguez and Vose 2011; Wilks 2013; Wilks and Livezey 2013; Krakauer and Devineni 2015; Rigal et al. 2019). Es geht dabei meist um ergänzende Grössen zu den klassischen Normwerten, die unter den Begriffen «alternative normals» oder «new normals» propagiert wurden. Der europäische Copernicus Climate Change Service (C3S) des ECMWF wendet z.B. einen linearen 30-jährigen Trend, um das aktuelle Klimamittel in seinem globalen Temperaturtrendmonitor zu schätzen. Im sechsten Sachstandsbericht hat der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) begonnen, das aktuelle Klimamittel als Durchschnitt der letzten zehn Jahre anzugeben (IPCC 2021).

Die oben genannten Alternativen sind alle sehr einfach (basierend auf Mittelwerte oder linearen Trends). Da die Klimaentwicklung durchaus auch nichtlinear verlaufen kann, sind Beschreibungen, die einen nichtlinearen Verlauf erlauben, sehr attraktiv. Rigal et al. (2019) haben ein statistisches Modell auf der Grundlage von Splines vorgestellt, das selbst bei einer starken künftigen Erwärmung gut funktioniert. Steinacker (2021) propagiert einen Spezialfall eines Splines zur Schätzung des Klimatrends. De Valk (2020) schlägt eine Trendlinie vor, die auf einer gewichteten lokalen linearen Regression basiert, der Implementierung von LOESS 1. Ordnung (vgl. Cleveland 1979; Cleveland und Devlin 1988). Trendlinien mit einer sehr ähnlichen Konfiguration wurden kürzlich von Hawkins et al. (2020) und Clarke und Richardson (2021) zur Überwachung der globalen Mitteltemperatur und von Cheng et al. (2022) zur Beschreibung der Entwicklung des Wärmeinhalts der Ozeane genutzt. Auch die NASA verwendet den Ansatz, um die Entwicklung ihres globalen Temperaturdatensatzes GISTEMP zu visualisieren (z. B. Lenssen et al. 2019).

In diesem Fachbericht zeigen wir am Beispiel der Schweizer Temperaturentwicklung der letzten knapp 160 und der kommenden 80 Jahre auf, welche Ansätze sich zur Beschreibung der Klimaentwicklung und der Bestimmung eines aktuellen Klimamittels gut eignen. Über die Gewichtung mittels mehrerer Kriterien wird ein passender Ansatz ausgewählt. Danach wird auf die für 2023 geplante Einführung in den operationellen Betrieb von MeteoSchweiz (Anwendungsbeispiele, Auswirkungen auf die Kommunikation, Formulierungsbeispiele) eingegangen. Am Schluss geben wir einen kurzen Ausblick auf anstehende Folgearbeiten und präsentieren technische Details der Umsetzung.

2 Methoden, Kriterien und Daten

2.1 Ansätze

Es gibt viele Möglichkeiten, ein aktuelles Klimamittel anhand vergangener Klimadaten und ohne Einbezug von Vorhersagen zu schätzen. Wir prüfen hier neun verschiedene Ansätze, die bereits heute in Wetterdiensten und in der Literatur Anwendung finden. Sie sind in Tab. 1 aufgelistet und umfassen den von der WMO empfohlenen periodisch aktualisierten 30-jährigen Mittelwert (M30.upd.10), zwei gleitende Mittelwerte (MA30 und MA10), einen gleitenden linearen Trend (LT30), einen Kernelglätter (KS15), einen kubischen Spline (SP6), eine lokale lineare Regression (LO42) sowie zwei lineare Modelle, die die grossräumige Temperatur als Prädiktor verwenden (LM.GMT und LM.TNHL). Die Parameterkonfigurationen (Fensterlängen, Bandbreiten etc.) wurden mit Ausnahme von KS15 von den etablierten Ansätzen übernommen. Die optimale Konfiguration für KS15 wurde über das Fehlerverhalten bestimmt.

Tabelle 1: In dieser Arbeit analysierte Ansätze mit einigen methodischen Details und Beispielen für ihre Verwendung (keine erschöpfende Liste). Die kursiven Ansätze werden nur für den Beobachtungszeitraum 1864-2020 angewendet.

Ansatz	Beschreibung	z.B. gebraucht von
M30.upd.10	30-jährige Mittelwerte, die alle 10 Jahre aktualisiert werden	WMO standard
MA30	30-jährige Mittelwerte, die jährlich aktualisiert werden	MeteoSwiss
MA10	10-jährige Mittelwerte, die jährlich aktualisiert werden	IPCC, NOAA
KS15	Gausscher Kernelglätter mit optimierter Bandbreite (15 Jahre)	MeteoSwiss
LT30	Linearer Trend (Daten der letzten 30 Jahre, jährlich aktualisiert)	Copernicus Climate Service
SP6	kubischer Spline Glätter (Freiheitsgrad $df=6$, fest)	Rigal et al. 2019
LO42	lokaler linearer Regressionsglätter (LOESS 1. Ordnung), trikubische Gewichtung gemäss de Valk (2020) mit Fensterlänge von 42 Jahren, zeichnet das gleitende 30-jährige Mittel sehr gut nach	KNMI, Clarke and Richardson 2021
<i>LM.GMT</i>	lineares Modell, Prädiktor: LOESS-geglättete globale Temperatur	Hawkins et al. 2020
<i>LM.TNHL</i>	lineares Modell, Prädiktor: LOESS-geglättete Landtemperatur der nördlichen Hemisphäre	MeteoSwiss

Zu beachten: LM.GMT und LM.TNHL verwenden nicht die Zeit, sondern die grossräumige Temperatur als Prädiktor. Dies ermöglicht die explizite Modellierung einiger Nichtlinearitäten in den Zeitreihen. Die Untersuchungen für LM.GMT und LM.TNHL beschränken sich auf den Beobachtungszeitraum 1864-2020.

2.2 Evaluationskriterien

Ein zentrales Evaluationskriterium ist die «performance» eines Ansatzes. Sie wird bestimmt über die Fehlerstatistik, die beschreibt, wie gut ein Ansatz das «wahre» Klimamittel beschreiben kann. Mehr Informationen dazu in Kapitel 2.4. Es gibt aber noch weitere Anforderungen an einen guten Trend- bzw. Erwartungswertschätzer. Wir definieren hier fachliche Anforderungen für die Methodenwahl. Der KNMI Technical Report 389 (de Valk, 2020) liefert hierzu eine solide Grundlage, an der wir einige Anpassungen vorgenommen haben. Abb. 2 gibt einen Überblick über die fünf Kriterien, die zur Klassifizierung und Einstufung der verschiedenen Ansätze verwendet werden.



Abbildung 2: Evaluierungskriterien zur Ansatzwahl für die Bestimmung eines aktuellen Klimamittels

Das *performance* Kriterium (kleiner Bias (mittlerer Fehler) und kleine Fehlervarianz in Bezug auf den zentrierten 30-Jahres-Mittelwert) wird in Kapitel 3 detailliert analysiert. Zwei weitere Kriterien sind, ob die Schätzungen nur von Werten abhängen, die nahe an dem betreffenden Jahr liegen (*local in time*), und ob die Methode flexibel genug ist, um Trends am Ende der Sequenz gut darzustellen (*flexibility*). Das Kriterium *applicability* beschreibt die Anwendbarkeit der Methode auf ein breites Spektrum von Klimavariablen und -indizes. Schliesslich ist auch die Einfachheit (*simplicity*) der Berechnung und der Kommunikation zu berücksichtigen.

Es ist anzumerken, dass die *local in time* und *flexibility* Kriterien zum *performance* Kriterium beitragen. Ihre ausdrückliche Berücksichtigung verleiht wichtigen Aspekten, die zu einer starken oder

schwachen Leistung führen, mehr Gewicht. Unsicherheitsinformationen können für alle Ansätze bestimmt werden und sind daher kein geeignetes Kriterium zur Unterscheidung zwischen den verschiedenen Ansätzen.

2.3 Daten

Wir verwenden die Schweizer Mitteltemperatur (Begert und Frei 2018) als Beispiel für eine stark nichtstationäre Zeitreihe mit zusätzlich grosser Jahr-zu-Jahr Variabilität. Um zu testen, wie sich die Ansätze zur Bestimmung eines aktuellen Klimamittels in einem zukünftigen Klima verhalten, werden die Beobachtungen mit den Daten der aktuellen Schweizer Klimaszenarien CH2018 (CH2018 2018; Fischer et al. 2022) kombiniert. Für diese Testzwecke und aus pragmatischen Gründen wurden die Messungen der Vergangenheit (1864-2020) einfach mit den biaskorrigierten Szenarien von Klimamodellen für die Jahre 2021-2099 zusammengehängt. Eine visuelle Überprüfung ergab, dass die kombinierten Zeitreihen eine einigermaßen sinnvolle Entwicklung und insbesondere keine Sprünge um das Jahr 2021 aufweisen, an dem die Beobachtungs- und Szenariodatensätze zusammengeführt wurden. Insgesamt wurden 45 Simulationen unter der Annahme von drei verschiedenen Emissionsszenarien betrachtet. Zudem wird die Temperatur aus dem HadCRUT5.0.1.0 (Morice et al., 2021) Datensatz für die LM.GMT und LM.TNHL Ansätze als Prädiktor verwendet.

2.4 Validierungsansatz für das «Performance» Kriterium

Als Benchmark (BM) für das *performance* Kriterium wird ein zentriertes 30-Jahresmittel verwendet. Das 30-Jahresfenster gewährleistet die Kompatibilität mit den klimatologischen Konventionen von Normwerten und wird in dieser Arbeit nicht in Frage gestellt.

Der Fehler des aktuellen Klimamittels ist definiert als

$$T_{i,m}(t) - T_{i,BM}(t),$$

wobei $T_{i,m}(t)$ die Schätzung des aktuellen Klimamittels des Ansatzes m (1...9) für die Simulation i (1...45) im Jahr t unter ausschliesslicher Verwendung von Informationen aus der Vergangenheit (das heisst bis zum Jahr t) und $T_{i,BM}(t)$ das zentrierte 30-Jahresmittel als Benchmark für die Simulation i im Jahr t unter Verwendung von 15 Jahren Daten aus der Vergangenheit und 15 Jahren Daten aus der Zukunft sind.

Bis zum Jahr 2020 sind die benutzten Daten Beobachtungen, nach 2020 sind es Daten aus Klimaprojektionen. Es wurden die Zeitreihen des aktuellen Klimamittels, der Fehler des aktuellen Klimamittels über einen bestimmten Zeitraum sowie die Fehlervarianz für die verschiedenen Ansätze untersucht.

3 Resultate

3.1 Fehleranalyse Schweizer Temperaturmittel

Abb. 3 zeigt Zeitreihen des Fehlers des aktuellen Klimamittels von den frühen 1900er Jahren bis zum späten 21. Jahrhundert. Der Ansatz, basierend auf den WMO Normalperioden (M30.upd.10), funktioniert bis in die 1970er Jahre gut, zeigt aber in den letzten Jahrzehnten eine sehr starke Unterschätzung des Niveaus von bis zu 1 °C. Da die Werte nur alle 10 Jahre aktualisiert werden, ist die Fehlerkurve zickzackförmig, wobei die kleinsten Fehler nach einer Aktualisierung und die grössten Fehler kurz vor einer Aktualisierung auftreten. Die Fehler nehmen in der Zukunft für das Szenario mit hohen Emissionen aufgrund der zunehmenden Erwärmung weiter zu. Für das Szenario mit mittleren Emissionen bleiben die Fehler in den kommenden Jahrzehnten in etwa konstant. Für das Szenario mit geringen Emissionen und deutlich abnehmender Erwärmung erreichen die Fehler derzeit ein Maximum und gehen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts gegen Null. Das von MeteoSchweiz derzeit zur Bestimmung von Klimawandelsignalen verwendete gleitende 30-Jahresmittel (MA30) schneidet nur geringfügig besser ab als M30.upd.10 (Unterschätzung von bis zu 0,7 °C in den letzten Jahrzehnten).

Die Verkürzung des Fensters für den gleitenden Mittelwert trägt dazu bei, den Fehler erheblich zu verringern, ohne die Fehlervarianz zu erhöhen. Allerdings zeigen auch das 10-Jahresmittel (MA10), wie es im jüngsten sechsten IPCC-Bewertungsbericht (IPCC 2021) verwendet wurde, und die Gaussskernel-Glättung (KS15) einen systematisch negativen Fehler in der Grössenordnung von 0,2-0,3 °C in Zeiten mit stark positiven Trends. Die gleitende 30-jährige lineare Trendlinie LT30, der kubische Spline SP6 und die LOESS-Glättung LO42 zeigen hingegen nur kleine Fehler in der nahen Vergangenheit und für die Zukunft.

Es ist zu beachten, dass alle diese Ansätze in den frühen 1950er Jahren, einige Jahre nach dem lokalen Temperaturmaximum der 1940er Jahre und in den 1980er Jahren, nach dem lokalen Temperaturminimum der 1970er Jahre, erhebliche Fehler aufweisen. LM.GMT und LM.TNHL schneiden sehr gut ab. Die Fehler haben jedoch das gleiche Vorzeichen wie die der anderen Methoden. Dies zeigt, dass auch diese Ansätze die Trendumkehr nicht vernünftig vorhersagen können. Um dies zu erreichen, wären zutreffende Vorhersagen für die nahe Zukunft notwendig. Für die Zukunft weisen LT30, SP6 und LO42 für alle betrachteten Klimaszenarien relativ geringe Fehler auf. Obwohl es kurze Perioden mit grösseren Fehlern gibt, bleiben sie meist innerhalb des 95 % Konfidenzintervalls des Benchmarks, das sich auf etwa $\pm 0,2$ °C im Beobachtungszeitraum und bis zu $\pm 0,3$ °C im Szenariozeitraum beläuft (Abb. 3, graues Band).

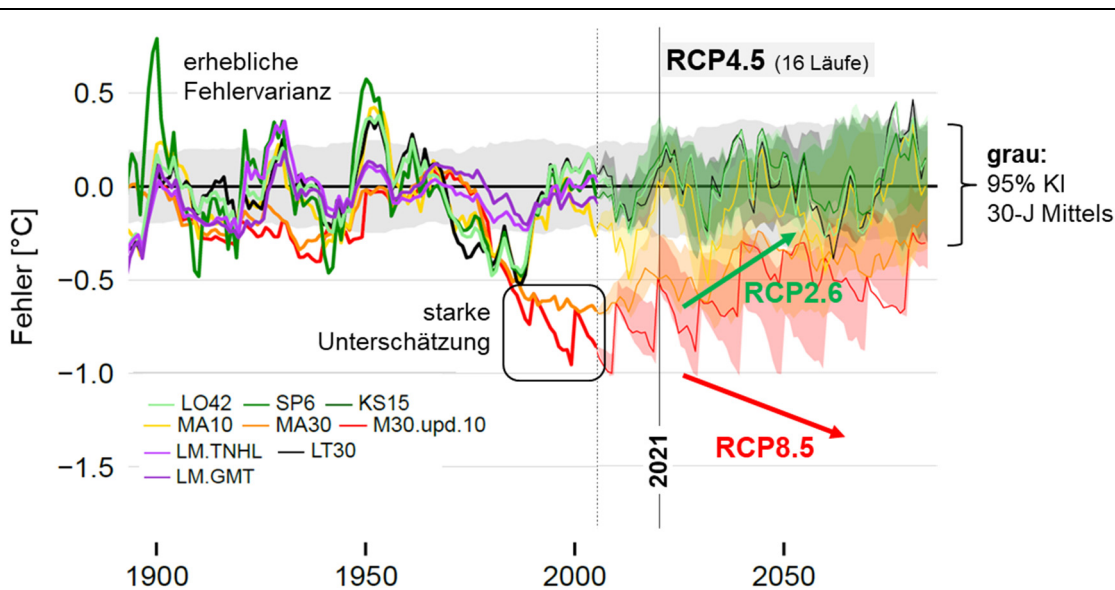


Abbildung 3: Zeitreihen des Fehlers des aktuellen Klimamittels für die neun in Tab. 1 aufgeführten Ansätze (farbige Linien) von den frühen 1900er bis zu den 2080er Jahren. Die farbigen Bänder zeigen den 90%igen Unsicherheitsbereich von 16 RCP4.5 Läufen für den Zeitraum nach dem Jahr 2005. Der graue Bereich zeigt die Unsicherheit (95 % Konfidenzintervall) des zentrierten 30-Jahresmittels. Bis 2005 basiert der Fehler nur auf Beobachtungen. Zwischen 2006 und 2020 ist er eine Kombination aus Beobachtungen und Szenariendaten. Nach 2020 basiert die Schätzung ausschliesslich auf Szenariendaten. Die dünnen Linien zeigen eine Beispielrealisierung der MIROC5-RCA4-Modellkette.

Abb. 4 fasst die Fehlerstatistiken für die neun Ansätze aus Tab. 1 zusammen. Gezeigt werden Statistiken für die Vergangenheit (1957-2020) und für drei verschiedenen Klimaszenarien, die für die nächsten Jahrzehnte (2021-2084) analysiert wurden. M30.upd.10 und MA30 zeigen bereits für die Vergangenheit eine starke Unterschätzung. Geringe Unterschätzungen in der Vergangenheit finden sich auch bei MA10 und KS15, während LT30, SP6 und LO42 nahezu unbiased sind. In der Zukunft unterschätzen M30.upd.10 und MA30 stark, wobei der Fehler stark vom Szenario abhängt (Median: -0,9 bzw. -0,7 °C für RCP8.5 und -0,5 bzw. -0,4 °C für RCP4.5). Während MA10 und KS15 für das RCP8.5 Szenario beträchtliche negative Fehler zeigen (Median bis -0,3 °C), scheiden sie für RCP4.5 und vor allem RCP2.6 recht gut ab. LT30, SP6 und LO42 zeigen für alle Szenarien eher kleine Fehler, die im Median meist weniger als $\pm 0,1$ °C vom Benchmark abweichen. Für die Vergangenheit zeigt LM.TNHL die kleinste Abweichung (-0,01 °C) und auch die Abweichung von LM.GMT ist recht gering (-0,11 °C).

Ein zusätzlicher Qualitätsmassstab ist der Vergleich der Fehler mit der Unsicherheit des Benchmarks. Bei LT30, SP6 und LO42 bleiben 82–89 % der Fehler für den zukünftigen Zeitraum innerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls des Benchmarks. Die Fehlerentwicklung und -statistiken von LT30 und LO42 sind sehr ähnlich. Der Grund dafür ist die Art und Weise, wie LO42 konstruiert ist. Der lineare Term in der lokalen Regression führt zu einem annähernd linearen Verhalten am Ende der Zeitreihe und zu einem sehr ähnlichen aktuellen Klimamittel wie diejenige von LT30 (vgl. de Valk 2020).

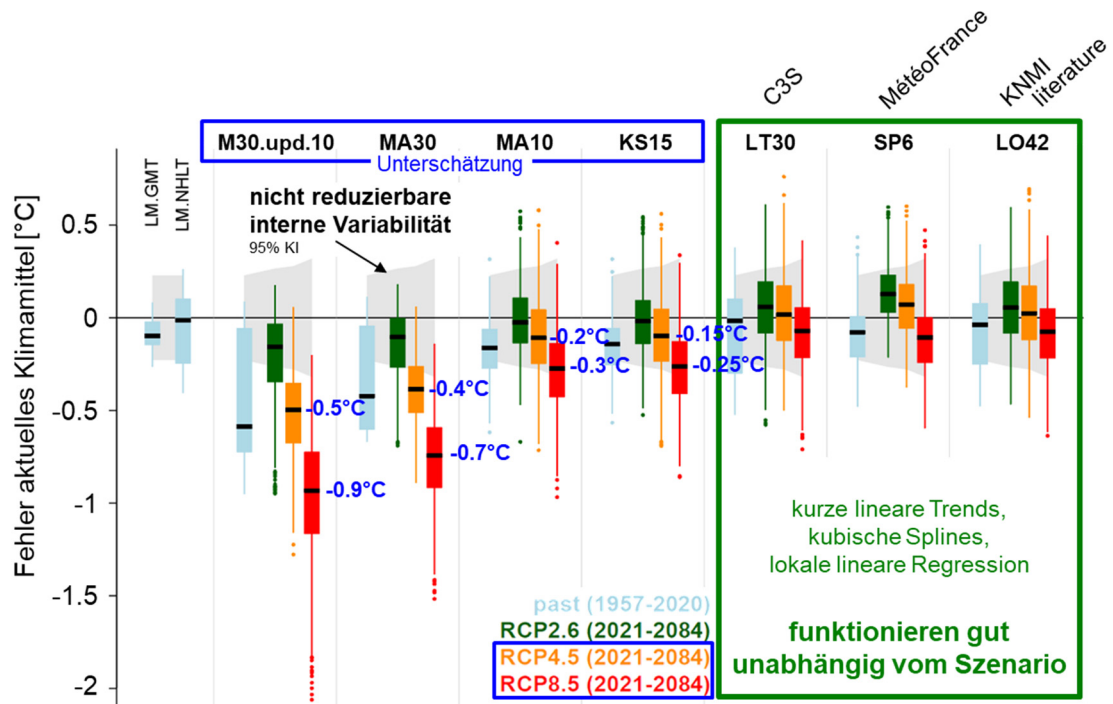


Abbildung 4: Fehlerstatistiken des aktuellen Klimamittels für verschiedene Zeiträume und die in Tab. 1 dargestellten Ansätze. Dargestellt sind die Ergebnisse für die Vergangenheit (1957-2020) in hellblau und für die Zukunft (2021-2084) in grün (RCP2.6:geringe Emissionen), in orange (RCP4.5: mittlere Emissionen) und rot (RCP8.5: hohe Emissionen). Die Fehler sind als Boxplots dargestellt (Median in schwarz, Box: 25. bis 75. Perzentil, Whisker: max(min. Fehler; 25. Perzentil minus 1,5 mal Interquartilbereich) bis min(max. Fehler; 75. Perzentil plus 1,5 mal Interquartilbereich) als Linien und Ausreisser als Punkte). Das graue Band zeigt die Unsicherheiten (95% Konfidenzintervall) des zentrierten 30-Jahresmittels.

3.2 Auswertung Kriterien und Methodenwahl

Um die am besten geeigneten Ansätze zur Schätzung des aktuellen Klimamittels zu ermitteln, bewerten wir die fünf Kriterien in Abb. 2. Für jede Kombination von Kriterium und Ansatz wird eine kategoriale Bewertung (fröhlicher-, neutraler- oder trauriger Smiley) abgegeben und in Abb. 5 dargestellt. Das *performance* Kriterium basiert auf der Analyse für die Temperaturentwicklung im Kapitel 3.1. LT30, SP6 und LO42 schneiden sowohl in der Vergangenheit, wie auch im 21. Jahrhundert sehr gut ab. Auch LM.GMT und LM.TNHL haben sehr gut abgeschnitten (hier nur für die Vergangenheit bewertet). MA10 und KS15 werden für ihre mittelmässige Leistung neutral bewertet, während MA30 und M30.upd.10 für ihre geringe Gesamtleistung negativ bewertet werden.

MA30, M30.upd.10, LT30 und SP6, für die die Koeffizienten anhand der gesamten Zeitreihe (global) geschätzt werden, sind nicht sehr *local in time*. Sie werden alle neutral eingestuft. Die anderen Ansätze sind einigermaßen lokal und werden positiv bewertet. Was die *flexibility* betrifft, sind MA30 und M30.upd.10 überhaupt nicht flexibel genug, um Trends darzustellen und erhalten eine negative Bewertung. MA10 und KS15 hinken der Entwicklung in bestimmten Fällen etwas hinterher. Sie werden neutral bewertet, während alle anderen Ansätze flexibel sind und eine positive Bewertung erhalten. Hinsichtlich *applicability* werden LM.GMT und LM.TNHL negativ bewertet, da die grossräumige

Temperatur nicht unbedingt ein guter Prädiktor für eine beliebige Variable auf der lokalen und regionalen Skala ist. Die anderen Ansätze sind für die meisten Variablen leicht anwendbar und werden positiv bewertet. Im Hinblick auf die *simplicity* werden LM.GMT und LM.TNHL negativ bewertet, da Daten auf der globalen Skala benötigt werden und das Verfahren nicht einfach zu erklären ist. M30.upd.10, MA30 und MA10 sind einfach zu berechnen und zu vermitteln. KS15, LT30, SP6 und LO42 werden neutral bewertet, da die Berechnung anspruchsvoller ist als die Berechnung einfacher Mittelwerte.

Methode \ Kriterium	M30.upd.10	MA30	MA10	KS15	LT30	SP6	LO42	LM.GMT	LM.NHLT
performance	☹️	☹️	😊	😊	😄	😄	😄	😄	😄
local in time	😊	😊	😄	😄	😊	😊	😄	😄	😄
flexibility	☹️	☹️	😊	😊	😄	😄	😄	😄	😄
applicability	😄	😄	😄	😄	😄	😄	😄	☹️	☹️
simplicity	😄	😄	😄	😊	😊	😊	😊	☹️	☹️

Abbildung 5: Bewertung der fünf Kriterien (Abb. 2) für die in Tab. 1 aufgeführten Ansätze. Ein positives Verhalten wird mit einem «lachenden grünen Smiley», ein negatives Verhalten mit einem «traurigen roten Smiley» bewertet. Ist das Verhalten neutral bzw. durchschnittlich, ist die Bewertung ein «neutraler gelber Smiley».

Insgesamt geht der **LO42 Ansatz** als Anforderungssieger hervor (knapp vor SP6 und LT30). Er schneidet bei 4 der 5 Kriterien positiv und einmal neutral ab. Neben der Verwendung für die Schätzung eines aktuellen Klimamittels inkl. Unsicherheitsabschätzung kann er als auch zur Visualisierung der nichtlinearen Klimaentwicklung verwendet werden und damit den bisher verwendeten Gaussfilter und die langjährigen linearen Trends als neue Klima-Trendlinie ersetzen. Das gilt auch für SP6 und KS15. Allerdings hat LO42 den weiteren Vorteil, dass dessen Varianz derjenigen des etablierten zentrierten 30-Jahresmittels entspricht.

4 Anwendung bei MeteoSchweiz

Ziel der Analysen in diesem Bericht war es, eine Methode zu finden, die das aktuelle Klimamittel basierend auf Beobachtungsdaten möglichst gut schätzen kann. Auf Grundlage der hier gezeigten Resultate kann MeteoSchweiz ihre bestehenden Klimaauswertungen in den folgenden Punkten ergänzen:

- Die **langfristige Klimaentwicklung (Klima-Trendlinie)**, bisher oft über einen linearen Trend bestimmt, wird neu durch eine glatte nichtlineare Kurve (LOESS, 1. Ordnung mit 42-jährigem Glättungsfenster) beschrieben. Es zeichnet das gleitende 30-jährige Mittel sehr gut nach.
- Die **mehrfährige Variabilität der Klimaentwicklung**, bisher mit einem 20-jährigen Gaussfilter dargestellt, wird neu ebenfalls durch LOESS 1. Ordnung (mit 14-jährigen Glättungsfenster) beschrieben. Es liegt nah am 10-jährigen gleitenden Mittel.
- Das **aktuelle Klimamittel**, bisher teilweise als das gleitende 30-jährige Mittel definiert, wird neu als der zeitliche Endpunkt der Klima-Trendlinie definiert. Die genaue Form der Nutzung muss noch festgelegt werden.
- Das **Klimaänderungssignal**, bisher meist definiert als Differenz zwischen dem gleitenden 10 oder 30-jährigen und dem vorindustriellen Mittel 1871-1900, kann neu als Differenz zwischen den Werten der Klima-Trendlinie für einen End- und einen Anfangszeitpunkt (bzw. einen 30-jährigen Referenzzeitraum) bestimmt werden. Es liegt auch ein Trendtest vor um zu beurteilen, ob ein signifikanter Trend vorliegt.

Im Folgenden werden die genannten Anpassungen detaillierter beschrieben und die Auswirkungen auf Produkte und Kennzahlen genauer beleuchtet. Ebenfalls wird kurz auf kommunikative Aspekte eingegangen und im Anhang die technische Implementierung vorgestellt.

4.1 Klima-Trendlinie

Die langfristige Klimaentwicklung (Klima-Trendlinie) soll neu durch lokale lineare Regression mit einem 42-jährigen Glättungsfenster beschrieben werden. Die Klima-Trendlinie basierend auf lokaler linearer Regression hat attraktive Eigenschaften:

- Die Klima-Trendlinie ist eine sehr gute Näherung für das in der Klimatologie oft verwendete gleitende 30-jährige Mittel (vgl. Abb. 6) und somit ein gleitendes Abbild der WMO Definition des Klimamittels. Sie ist glatter als das gleitende Mittel und zeigt keine abrupten Sprünge (vgl. Abb. 6).
- Sie liefert Werte für jeden Zeitpunkt, also auch am Anfang und Ende der Zeitreihe. Dies bietet Möglichkeiten, ein aktuelles Klimamittel zu bestimmen (vgl. Kap. 4.2).
- Die Klima-Trendlinie wird begleitet von einer analytisch bestimmbarer Unsicherheitsabschätzung (Konfidenzintervall) für jeden Zeitpunkt.

- de Valk (2020) präsentiert einen statistischen Test zur Prüfung, ob sich zwei Zeitpunkte signifikant voneinander unterscheiden (vgl. Kap. 4.3).

Schweizer Mitteltemperatur (Jahr)

1864-2022

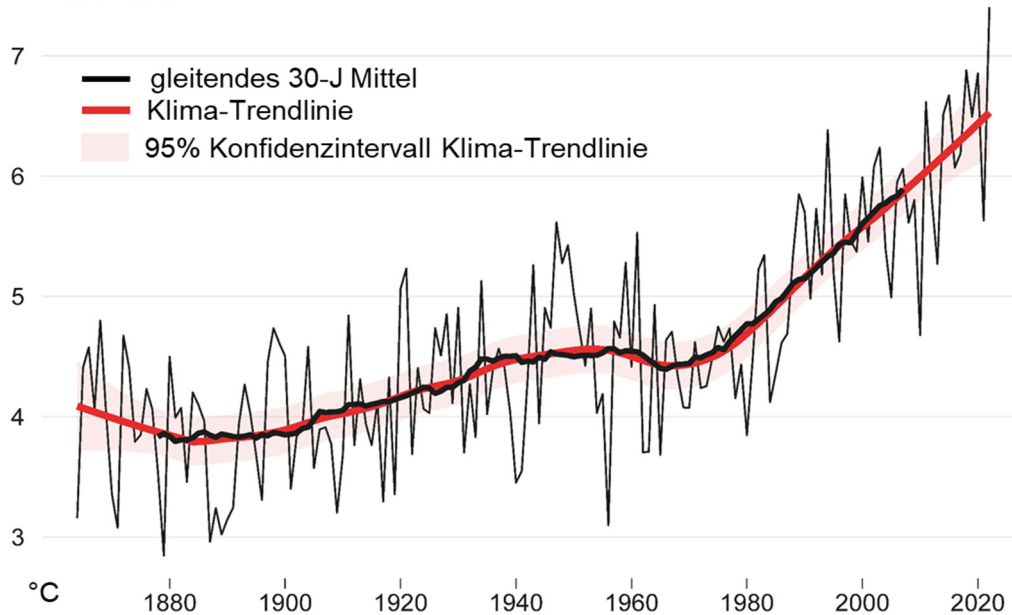


Abbildung 6: Verlauf der jährlichen Schweizer Mitteltemperatur seit 1864 (dünne schwarze Linie), des gleitenden 30-jährigen Mittels (fette schwarze Linie) sowie der Klima-Trendlinie (rot) inkl. 95% Konfidenzintervall (hellrot).

Jahres-Temperatur – Schweiz – 1864–2022

Abweichung vom Durchschnitt 1871–1900

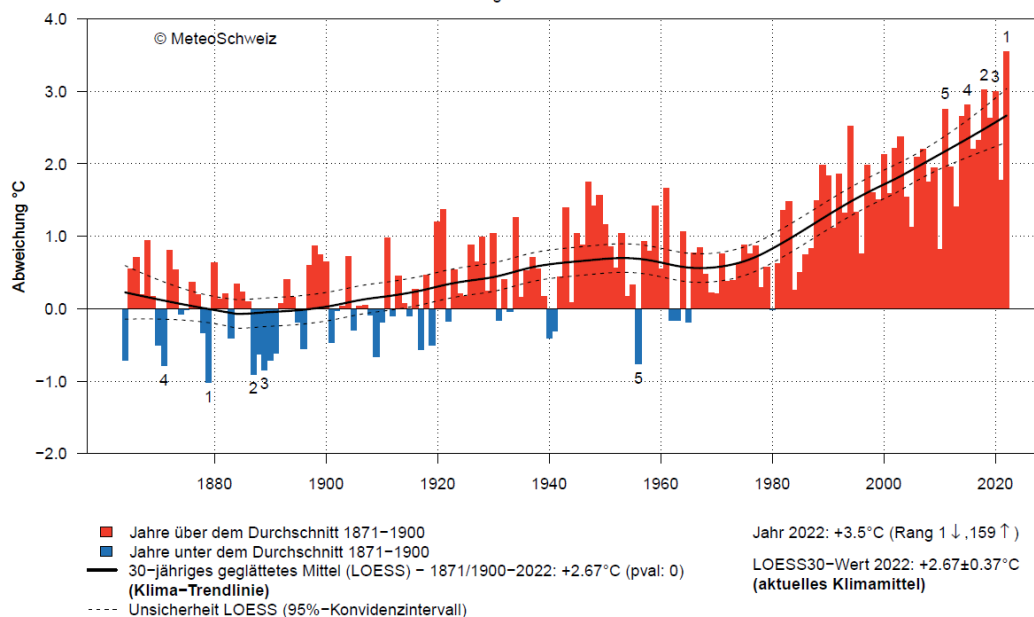


Abbildung 7: Verlauf der Schweizer Jahrestemperatur als Abweichung von vorindustriellen Mittel 1871-1900 mit Klima-Trendlinie (schwarze Kurve) und 95% Konfidenzintervall (gestrichelt). Das aktuelle Klimamittel (LOESS30-Wert 2022) und Angaben eines Trendtests (pval) sind ebenfalls angegeben (Legende unten rechts).

Neben der Klima-Trendlinie (vgl. Abb. 7), die sich zur Beschreibung des aufgeprägten Klimawandelsignals eignet, kann zur Beschreibung von mehrjährig auffallenden Phasen einen stärker schwankenden Glätter, der ein gleitendes 10-Jahresmittel annähert (LOESS Fensterbreite von 14 Jahren), benutzt werden (Abb. 8 unten). Dieser löst den bisherigen 20-jährigen Gaussglätter (Abb. 8 oben) ab, der im gezeigten Fall einen ähnlichen Verlauf aufweist.

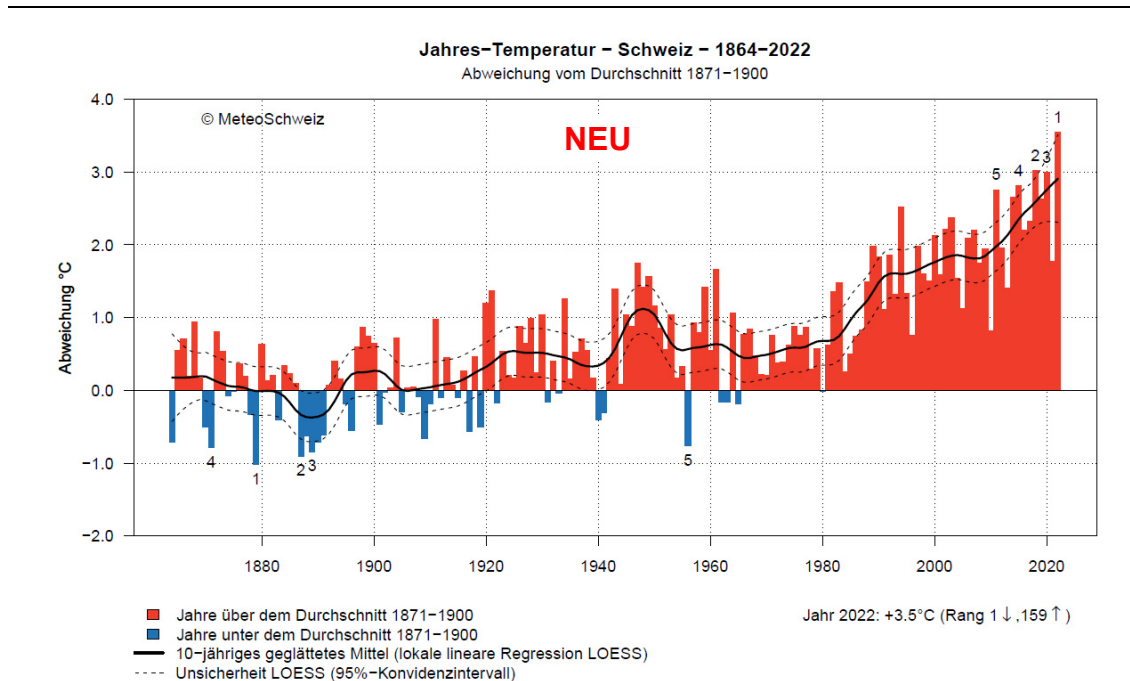
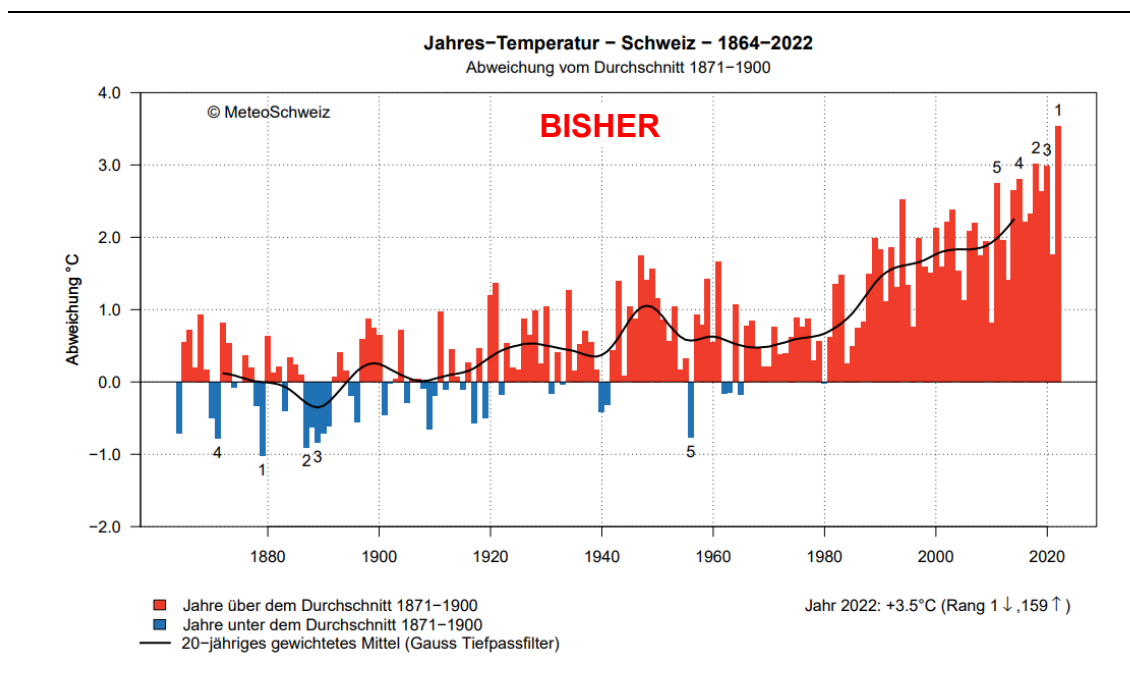


Abbildung 8: Mehrjährige Schwankungen der Schweizer Jahrestemperatur als Abweichung von vorindustriellen Mittel 1871-1900. Oben: bisher verwendete Glättung (20-jähriger Gaussglätter), die nun abgelöst wird. Unten: neue Version basierend auf LOESS inkl. 95%-Konfidenzintervall.

In einem ersten Schritt wird die Klima-Trendlinie für die Trendanalyse der langen Reihen von Temperatur sowie die Visualisierung von Niederschlag und Sonnenscheindauer an NBCN Stationen (vgl. Begert et al., 2007) und für «swissmean Regionen» (gesamte Schweiz, Nordschweiz <1000 m ü M, Nordschweiz >1000 m ü M und Südschweiz gemäss Begert und Frei, 2018) eingeführt. Die Analysen stehen für alle Monate, Jahreszeiten, Halbjahre und das Jahr in Deutsch, Französisch, Italienisch und Englisch zur Verfügung. Abb. 9 zeigt zwei Beispiele für Niederschlag und Sonnenscheindauer.

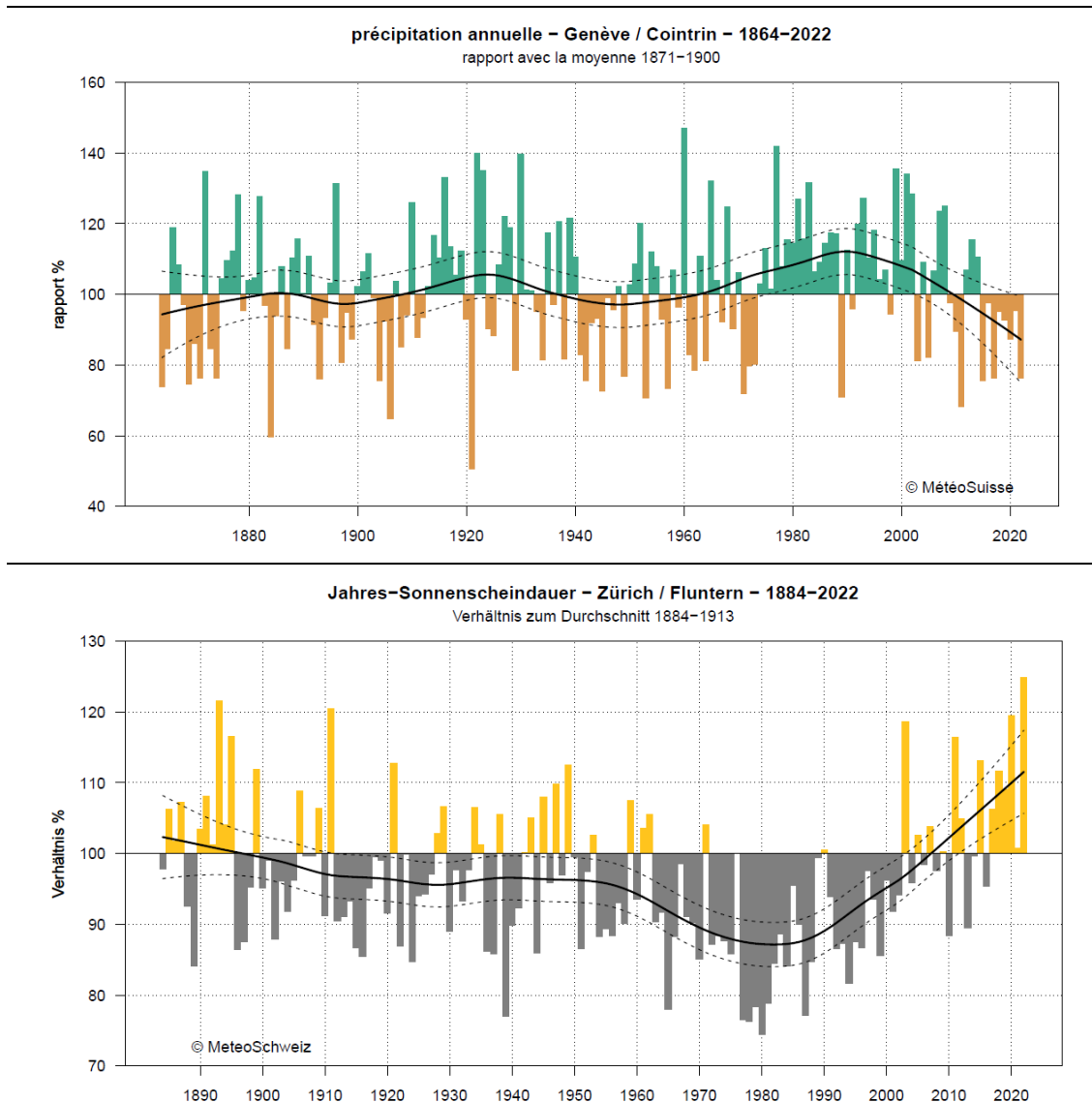


Abbildung 9: Weitere Beispiele der Darstellung der Klimaentwicklung mit der neuen Klima-Trendlinie. Oben: Jahresniederschlag in Genève/Cointrin 1864-2022, unten: Jahressonnenscheindauer in Zürich/Fluntern 1884-2022.

4.2 Aktuelles Klimamittel

4.2.1 Definition

Die neue Klima-Trendlinie liefert die Grundlage für die Bestimmung eines **aktuellen Klimamittels**, welches sich eng an die klimatologischen Standards (30-jährige Mittelungsperioden) anlehnt, und zugleich auch an den Rändern der Zeitreihe repräsentativ ist. Das aktuelle Klimamittel (= Klimamittel am Endzeitpunkt der Zeitreihe) ist der Wert der neuen Klima-Trendlinie zum Zeitpunkt des letzten Zeitschritts (vgl. Abb. 7). Wie für jeden Wert der Klima-Trendlinie können auch für das aktuelle Klimamittel analytisch eine Unsicherheitsangabe bzw. ein Konfidenzintervall bestimmt werden (vgl. Abb. 7, gestrichelte Linien).

4.2.2 Anwendungsbereich

Der Zusatznutzen eines aktuellen Klimamittels unter starkem Klimawandel ist potentiell vielfältig. Es erlaubt zum Beispiel eine bessere Einschätzung der Aktualität von Normwerten oder eine bessere Einordnung von Ereignissen und Anomalien im aktuellen Klima (vgl. Kapitel 5.1). Eine weitere wertvolle Anwendung sehen wir bei der Bestimmung von Klimaänderungssignalen. Die genaue Form der Nutzung im Betrieb muss noch festgelegt werden.

4.3 Klimaänderungssignale

MeteoSchweiz verwendet zur Bestimmung der Klimaänderungssignale seit einigen Jahren meist die Differenz der letzten 30-jährigen Periode (vgl. Scherrer et al. 2006) mit dem vorindustriellen Mittel 1871-1900 (vgl. Begert et al., 2019). Um Vergleiche mit dem globalen Klimaänderungssignal des IPCC sowie anderer Institutionen machen zu können wird in gewissen Anwendungen auch die Differenz zwischen dem Mittel der letzten Dekade und dem Mittel der vorindustriellen Periode verwendet (vgl. MeteoSchweiz Webseite «Klimawandel»). Für lange Reihen wird der lineare Trend seit einigen Jahren nicht mehr aktiv kommuniziert. Die neue Klima-Trendlinie kann genutzt werden, um das Klimaänderungssignal neu zu definieren.

4.3.1 Neue Definition

Das Klimaänderungssignal Δy für zwei Zeitpunkte 1 und 2 kann mit der Klima-Trendlinie y definiert werden als

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

De Valk (2020) präsentiert einen Test, der das Fehlen eines Trends für zwei weit auseinanderliegende und idealerweise nicht zu nah am Anfang oder Ende der Zeitreihe liegende Jahre bestimmen kann. Er zeigt allerdings auch auf, dass der Test auch am Rand in den meisten Fällen gut funktioniert.

Die obige Definition verwendet die Klima-Trendlinienwerte von Einzeljahren als Input. MeteoSchweiz hat allerdings erst kürzlich eine vorindustrielle Referenzperiode 1871–1900 eingeführt (Begert et al. 2019). Da die Klima-Trendlinie so konstruiert ist, dass sie 30-jährige Mittel sehr gut nachzeichnet und

die Differenzen zwischen den beiden sehr klein sind ($<0,1\text{ °C}$ für das jährliche Schweizer Temperaturmittel), kann für y_1 auch der Mittelwert der Originalzeitreihenwerte einer 30-jährigen Referenzperiode verwendet werden. Für die vorindustrielle Referenz heisst das, dass der Mittelwert der Originalwerte von 1871–1900 zum Zeitpunkt 1885 verwendet wird ($y_1=1885$, $y_1.as.mean=TRUE$, mehr Details im Kapitel A Technische Implementierung). Das heisst, dass per Default das aktuelle Klimaänderungssignal $\Delta y_{\text{aktuell}}$ gegenüber der vorindustriellen Referenz wie folgt bestimmt werden kann:

$$\Delta y_{\text{aktuell}} = y_{\text{aktuell}} - \bar{y}_{1871-1900}$$

Die starke Glättung der Klima-Trendlinie dürfte den Grossteil der natürlichen Variabilität eliminieren und das Klimaänderungssignal vorwiegend durch das menschengemachte Klimawandelsignal geprägt sein. Da aber keine formale «Detection/Attribution» vorgenommen wird ist bei der Wortwahl Vorsicht geboten (siehe Formulierungsbeispiele unten).

4.3.2 Auswirkungen auf die Klimaänderungssignale

Die auf der Klima-Trendlinie beruhenden Klimaänderungssignale sind im allgemeinen höher als die heute meist an der MeteoSchweiz verwendete Differenz zwischen dem gleitenden 30-Jahresmittel und dem vorindustriellen Mittel 1871-1900 (vgl. Abb. 10). Auf Monatsbasis ist die Differenz $-0,2$ bis $+1,2\text{ °C}$. Für Jahreszeiten liegt die Differenz bei $+0,3$ bis $+0,9\text{ °C}$ für Jahreszeiten und $+0,7\text{ °C}$ auf Jahresstufe. Diese Resultate überraschen nicht, da das gleitende 30-Jahresmittel für das Mittel vor 15 Jahren repräsentativ ist und nicht für «heute», wo das Klimamittel durch den Klimawandel schon wieder anders sein kann. Die Differenz zum gleitenden 10-jährigen Mittel, wie es der IPCC seit kurzem nutzt, ist deutlich kleiner. Auf Monatsbasis ist die Differenz zwischen $-0,3$ (IPCC Signal ist grösser) und $+0,5\text{ °C}$ (Signal Klima-Trendlinie ist grösser), für die Jahreszeiten $-0,2$ bis $+0,3\text{ °C}$ und auf Jahresstufe knapp $+0,2\text{ °C}$ bzw. gar nur $0,13\text{ °C}$, wenn auf zwei Kommastellen gerundet wird.

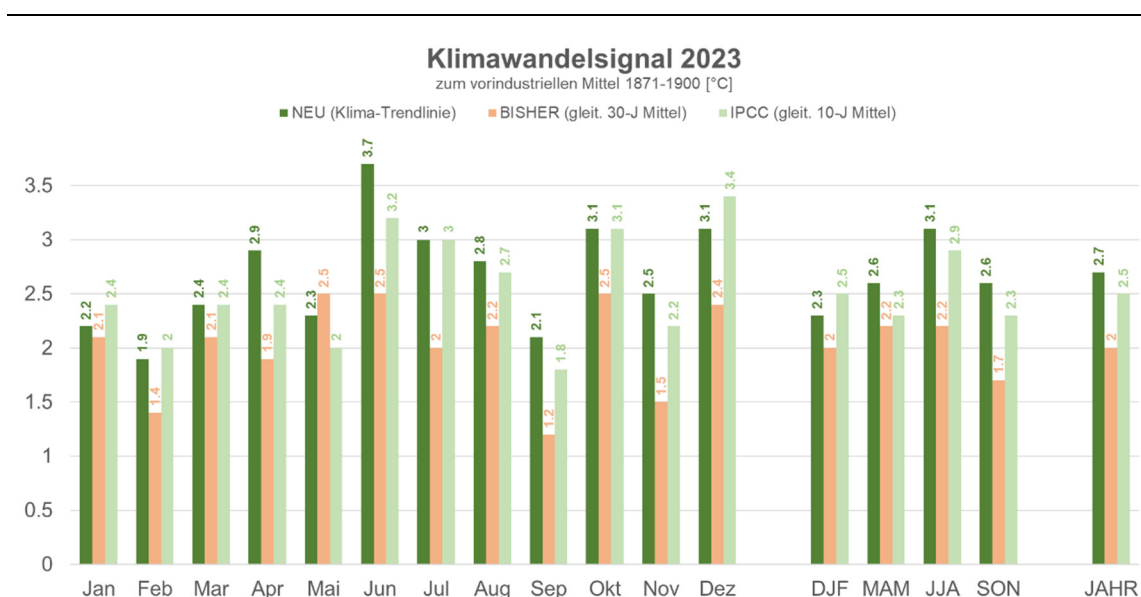


Abbildung 10: Klimaänderungssignale (Stand Januar 2023, in Grad Celsius) monatlich, saisonal und für das Jahr gegenüber den vorindustriellen Mittel 1871-1900 für die Klima-Trendlinie (neu, dunkelgrün), dem gleitenden 30-Jahresmittel (bisher, orange) und dem gleitenden 10-Jahresmittel (IPCC, hellgrün).

4.3.3 Formulierungsbeispiele

Da die oben bestimmten Klimaänderungssignale nicht aus einer formalen «Attribution» stammen, ist es wichtig saubere Formulierungen zu verwenden. Es folgen einige Vorschläge für Formulierungsbeispiele auf Deutsch:

Für Zeitreihen **mit** signifikanten **Trends** (e.g. $p < 0,05$ gemäss Trendtest oben)

- Der September ist heute (Jahr 2022) bereits 2,2 °C wärmer als im vorindustriellen Mittel 1871-1900.
- Die Schweiz hat sich gegenüber dem vorindustriellen Mittel 1871-1900 bereits um 2,5 °C erwärmt (Stand 2022).

Für Zeitreihen ohne Trend (e.g. $p > 0,05$ gemäss Trendtest oben, Stand 2022)

- Die Daten zeigen wenig Änderung im Zeitraum 1864-2022.

WICHTIG: Zur Beschreibung von mehrjähriger Variabilität kann ein stärker schwankender Glätter basierend auf lokaler linearer Regression (siehe Kap. 4.1 und Abb. 8) verwendet werden. Dieser soll aber nicht für die Bestimmung des aktuellen Klimamittels bzw. zur Bestimmung von Änderungssignalen verwendet werden. Dafür wird exklusiv die neue Klima-Trendlinie verwendet.

4.3.4 Begriffe in verschiedenen Sprachen

Tab. 2 gibt einen Überblick über die zwei neuen Kernbegriffe in den vier häufig verwendeten Sprachen Deutsch, Französisch, Italienisch und Englisch.

Tabelle 2: Kernbegriffe auf Deutsch, Französisch, Italienisch und Englisch.

Deutsch	Französisch	Italienisch	Englisch
aktuelles Klimamittel	moyenne climatique actuelle	media climatica attuale	current climate mean
Klima-Trendlinie	ligne de tendance climatique	linea di tendenza del clima	climate trend line

5 Ausblick

Die hier präsentierten Neuerungen sind ein Schritt zu einer besseren Definition und Klassifizierung des heutigen Klimas. Es gibt viele weitere Punkte, die noch nicht untersucht wurden oder gelöst sind. Einige davon kamen in der Vernehmlassung durch das ProClim auf und könnten z.B. in die Entwicklung zeitübergreifender Klimaprodukte einfließen.

Hier eine Liste von möglichen Erweiterungen:

- Prüfung der Anwendbarkeit für Indikatoren, die auf Zählgrössen basieren oder limitiert sind
- Kopplung von Beobachtungs- und Modelldaten (saisonale und dekadische Vorhersagen). Dies würde erlauben, auch für heute ein zentriertes Klimamittel zu bestimmen.
- Bessere Definition des Klimawandelsignals im Sinne einer genauen Bestimmung des menschlichen Anteils («detection/attribution»).
- Nutzung des aktuellen Klimamittels zur Einordnung von Ereignissen und Anomalien (vgl. Abb. 11) und Vereinheitlichung mit dem Ansatz zur Einordnung von Hitzeextremen (Gubler et al. 2023)

5.1 Wie extrem war die Temperatur 2022?

Abb. 11 zeigt die Möglichkeit ein Event (in diesem Fall die Jahrestemperatur 2022) im aktuellen Klima einzuordnen. 2022 ist momentan das deutlich wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen 1864 (rund 0,5 °C wärmer als der bisherige Rekordhalter 2018). Die Abweichung von 3,54 °C gegenüber dem vorindustriellen Mittel 1871-1900 lässt sich aufteilen in eine Veränderung des Klimamittels (Klimaänderungssignal) von 2,67 °C und eine zusätzliche Abweichung von +0,87 °C. Dies wäre zusammen mit 1949 und 1898 (nach 1947, 1961, 1994, 1921 und 1920) die sechstgrösste positive Abweichung gegenüber dem aktuellen Klimamittel in der Zeitreihe. In der Verteilung der Abweichungen vom aktuellen Klimamittel liegt 2022 etwa auf dem 95% Perzentil, was ungefähr einer Wiederkehrperiode von 20 Jahren entspricht. Es ist allerdings zu beachten, dass sich die Unsicherheit des Klimamittels von $\pm 0,37$ °C auch auf die Unsicherheit der Wiederkehrperiode auswirkt. Die einfache Verrechnung der Unsicherheiten führt zu einer 2022er-Anomalie zwischen +0,50 °C (~6 Jahre Wiederkehrperiode) und 1,24 °C (~100 Jahre Wiederkehrperiode).

Somit ist 2022 (Stand 2023) das deutlich wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen und auch im aktuellen Klima ein klar zu warmes, aber nicht sehr extremes Jahr.

Schweizer Mitteltemperatur (Jahr)

Abweichung vom Klimamittel

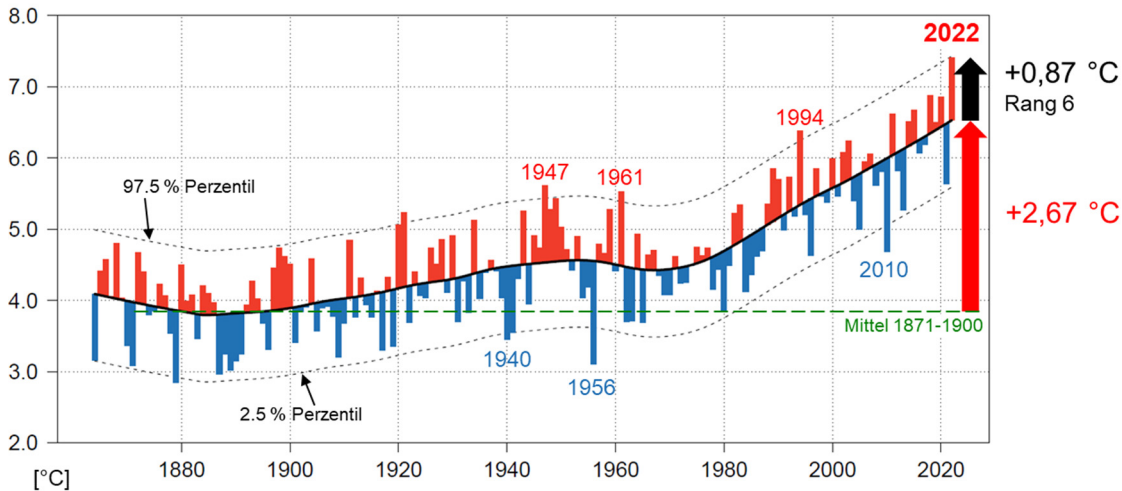


Abbildung 11: Entwicklung der jährlichen Schweizer Mitteltemperatur 1864-2022 mit Darstellung der Klima-Trendlinie (schwarz) und der Abweichungen vom Klimamittel (positive Abweichungen in rot, negative Abweichungen in blau). Ebenfalls dargestellt sind das 2,5 und 97,5% Perzentil (gestrichelte Linien) der Residuen vom Klimamittel. Die Jahre mit den drei positivsten und drei negativsten Anomalien zum aktuellen Klimamittel sind mit ihren Jahreszahlen gezeigt. Das Jahr 2022 ist auch gekennzeichnet. Die grün gestrichelte Linie zeigt das Niveau des vorindustriellen Mittels 1871-1900. Das Mittel im Jahr 2022 liegt 2,67 °C über dem vorindustriellen Niveau. Die zusätzliche Anomalie von +0,87 °C im Jahr 2022 ist die sechstgrösste positive Anomalie der Messreihe. Eine solche Anomalie tritt statistisch etwa alle 20 Jahre auf (siehe Text).

Danksagung

Ein grosser Dank geht an Cees de Valk vom KNMI, der mit seiner Arbeit zur Klima-Trendlinie eine wichtige Grundlage für unsere Arbeit geliefert hat. Dank geht auch an Reto Stöckli und Sven Kotlarski für die Begutachtung dieses Fachberichts. Zudem danken wir Stephan Bader für die Begleitung aus Klimakommunikationssicht und Rebekka Posselt für die Unterstützung bei der technischen Implementierung der Produkte. Ebenfalls wertvoll waren die Diskussionen im Team APKM sowie externe Inputs von Fachexperten, die im Sommer 2022 durch ProClim gesammelt wurden und vor allem bei der Entwicklung zeitübergreifender Klimaprodukte helfen können.

Literaturverzeichnis

Arguez, A., and R. S. Vose, 2011: The Definition of the Standard WMO Climate Normal: The Key to Deriving Alternative Climate Normals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 699-704, <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2955.1>

Begert M., Stöckli R., and M. Croci-Maspoli, 2019: Klimaentwicklung in der Schweiz - Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. *Fachbericht MeteoSchweiz*, 274, 23 pp, <https://www.meteoswiss.ch>

Begert M., and C. Frei, 2018: Long-term area-mean temperature series for Switzerland—Combining homogenized station data and high resolution grid data. *Int J Clim*, 38, 2792-2807, <https://doi.org/10.1002/joc.5460>

Begert, M., Seiz, G., Foppa, N., Schlegel, T., Appenzeller, C., and G. Müller, 2007: Die Überführung der klimatologischen Referenzstationen der Schweiz in das Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN), *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, 215, 43 pp, <https://www.meteoswiss.ch>

CH2018, 2018: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp, ISBN: 978-3-9525031-4-0, <https://www.klimaszenarien.ch>

Cheng, L., Foster, G., Hausfather, Z., Trenberth, K. E., and J Abraham, 2022: Improved Quantification of the Rate of Ocean Warming, *Journal of Climate*, 35, 4827–4840, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0895.1>

Clarke, D. C., and M. Richardson, 2021: The benefits of continuous local regression for quantifying global warming. *Earth and Space Science*, 8, e2020EA001082. <https://doi.org/10.1029/2020EA001082>

Cleveland, W. S., 1979: Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, *Journal of the American Statistical Association*, 74, 829-836, <https://doi.org/10.2307/2286407>

Cleveland, W.S., and S.J. Devlin, 1988: Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting, *Journal of the American Statistical Association*, 83, 596-610, <https://doi.org/10.1080/01621459.1988.10478639>

Copernicus Climate Change Service (C3S), 2021: Global temperature trend monitor - User guide [available at https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/app-c3s-global-temperature-trend-monitor/C3S_Application-Documentation-Global_temperature_trend_monitor_v1.0_TNS_FV_v3.5.pdf]

Fischer, A. M., et al., 2022: Climate Scenarios for Switzerland CH2018 – approach and implications. *Climate Services*, 26, 100288, <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100288>

Gubler, S., Fukutome, S., and S.C. Scherrer, 2023: On the statistical distribution of temperature and the classification of extreme events considering season and climate change – an application in Switzerland, *Theoretical and Applied Climatology*, in press, <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04530-0>

Hawkins, E., Frame, D., Harrington, L., Joshi, M., King, A., Rojas, M., and R. Sutton, 2020: Observed emergence of the climate change signal: From the familiar to the unknown. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086259, <https://doi.org/10.1029/2019GL086259>

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte et al. (eds.)]. Cambridge University Press, in press, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Krakauer, N. Y., and N. Devineni, 2015: Up-to-date probabilistic temperature climatologies. *Environ. Res. Lett.*, 10, 024014, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/024014>

Lenssen, N., Schmidt, G., Hansen, J., Menne, M., Persin, A., Ruedy, R., and D. Zyss, 2019: Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 6307-6326, <https://doi.org/10.1029/2018JD029522>

Livezey, R. E., K. Y. Vinnikov, M. M. Timofeyeva, R. Tinker, and H. M. van den Dool, 2007: Estimation and extrapolation of climate normals and climatic trends. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 1759–1776, <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1666.1>

Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., and R. J. Stouffer, 2008: Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, 319, 573-574, <https://doi.org/10.1126/science.1151915>

Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Winn, J. P., Hogan, E., Killick, R. E., et al., 2021: An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2019JD032361, <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>

Rigal, A., Azaïs, J.-M., and A. Ribes, 2019: Estimating daily climatological normals in a changing climate. *Climate Dynamics*, 53, 275-286, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4584-6>

Scherrer, S. C., Appenzeller, C., and M. A. Liniger, 2006: Temperature trends in Switzerland and Europe: Implications for climate normals. *Int. J. Clim.*, 26, 565-580, <https://doi.org/10.1002/joc.1270>

Steinacker, R., 2021: How to correctly apply Gaussian statistics in a non-stationary climate? *Theor. Appl. Climatol.*, 144, 1363–1374, <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03601-4>

de Valk, C. F., 2020: Standard method for determining a climatological trend, KNMI Technical report, 389, 33 pp [available at https://cdn.knmi.nl/system/ckeditor_assets/attachments/161/TR389.pdf]

Wilks, D. S., and R. E. Livezey, 2013: Performance of Alternative Normals for Tracking Climate Changes, Using Homogenized and Nonhomogenized Seasonal U.S. Surface Temperatures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 1677-1687, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-026.1>

WMO, 1989: Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. World Meteorological Organization Tech. Doc. 341, WCDP 10, 11 pp, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9521

WMO, 2007: The Role of Climatological Normals in a Changing Climate. WMO Tech. Doc. 1377, 130 pp, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4546

WMO, 2017: WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No. 1203, 29 pp, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166

A Technische Implementierung

Die neue Klima-Trendlinie ist aktuell (Stand 2023) zusammen mit der Berechnung des aktuellen Klimamittels und der Bestimmung des Änderungssignals in die Funktion `homogval.evo1` des Climate Analysis Tools (CAT) `evoclim` ab Version 5.0.0 implementiert und kann dort zusammen mit einer langjährigen Messreihe graphisch dargestellt werden. Zusätzlich zur Trendlinie lässt sich ein zugehöriges 95%-Konfidenzintervall sowie das Resultat des statistischen Tests zur Überprüfung der Signifikanz des Änderungssignals einzeichnen. Ausserdem kann das aktuelle Klimamittel zusammen mit der Unsicherheit aus dem Konfidenzintervall angegeben werden. Abb. 7 zeigt die grafische Umsetzung der genannten Funktionalitäten. Für die Stärke der Glättung durch den LOESS stehen vier Möglichkeiten zur Auswahl: 5-/10-/20- und 30 Jahre. Die Jahres-Angabe bezieht sich auf die Periode, deren Mittelwert durch den LOESS angenähert wird, und ist nicht zu verwechseln mit dem eigentlichen LOESS-Fenster (42 Jahre zur Berechnung des angenäherten 30-jährigen Mittelwerts). Bei der Bestimmung des Änderungssignals zwischen zwei Punkten der Klima-Trendlinie besteht die Möglichkeit, für die ältere Periode den Mittelwert der tatsächlichen Daten anstelle des Trendlinien-Punkts als Ausgangsgrösse zu verwenden. Dies deshalb, damit zum Beispiel keine Diskrepanz zur Definition der vorindustriellen Referenzperiode entstehen kann, die als Mittelwert der Periode 1871-1900 definiert ist. Der entsprechende Trendlinien-Punkt kann dazu leicht abweichen.

Der Aufruf der Klima-Trendlinie erfolgt in der Funktion `homogval.evo1` mit dem Argument `data.line="loess"`. Die Parameter zur Erstellung und Definition der Klima-Trendlinie werden `homogval.evo1` mit dem Argument `loess.param` als Liste (Datenstruktur in R) mit folgenden Elementen übergeben:

- **window**: Stärke der Glättung ausgedrückt in Anzahl Jahren, für deren Mittelwert ein Punkt der Trendlinie steht. Ein Wert aus 5, 10, 20 und 30. `window = 30` ergibt die LO42 Klima-Trendlinie, deren Endpunkt dem aktuellen Klimamittel entspricht.
- **conf.int**: Die Klima-Trendlinie kann durch ein 95%-Konfidenzintervall ergänzt werden, das als Unsicherheit der Trendlinien-Punkte angesehen werden kann (ja/nein).
- **do.diff**: Gibt an, ob das Änderungssignal berechnet werden soll (ja/nein). Zusätzlich zum Signal wird die Signifikanz des Resultats in Form des p-Werts des statistischen Tests angegeben.
- **y1, y2**: Trendlinien-Punkte (angegeben als Jahre) für die ein Änderungssignal berechnet werden soll.
- **y1.as.mean**: Gibt an, ob die Jahreszahl in `y1` als Trendlinien-Punkt oder Mittelwert einer Periode angesehen werden soll (ja/nein). Die Länge einer allfälligen Periode wird aus dem Element `window` übernommen.
- **add.exp.val**: Gibt an, ob das aktuelle Klimamittel ausgegeben werden soll (ja/nein). Das dargestellte Klimamittel entspricht dem Endpunkt der Klima-Trendlinie und wird zusammen mit einer Unsicherheit (95%-Konfidenzintervall) angegeben, sofern `conf.int=TRUE` gewählt wurde.

Folgender `homogval.evol` Aufruf für die Jahreswerte des Schweizer Temperaturmittels in der Periode 1864 bis 2022 zeigt die Verwendung der oben beschriebenen Argumenten und führt zu Abb. 12:

```
homogval.evol(homog.param = "ths200m0", stations = "swissmean", begin.date = "186401",
val.resolution = "y", anomalies = FALSE, data.line = "loess", loess.param=list(window
= 30, conf.int = TRUE, do.diff = TRUE, y1 = 1900, y2 = 2000, y1.as.mean = FALSE,
add.exp.val = TRUE), plot.title = TRUE, sig.tool.time = FALSE)
```

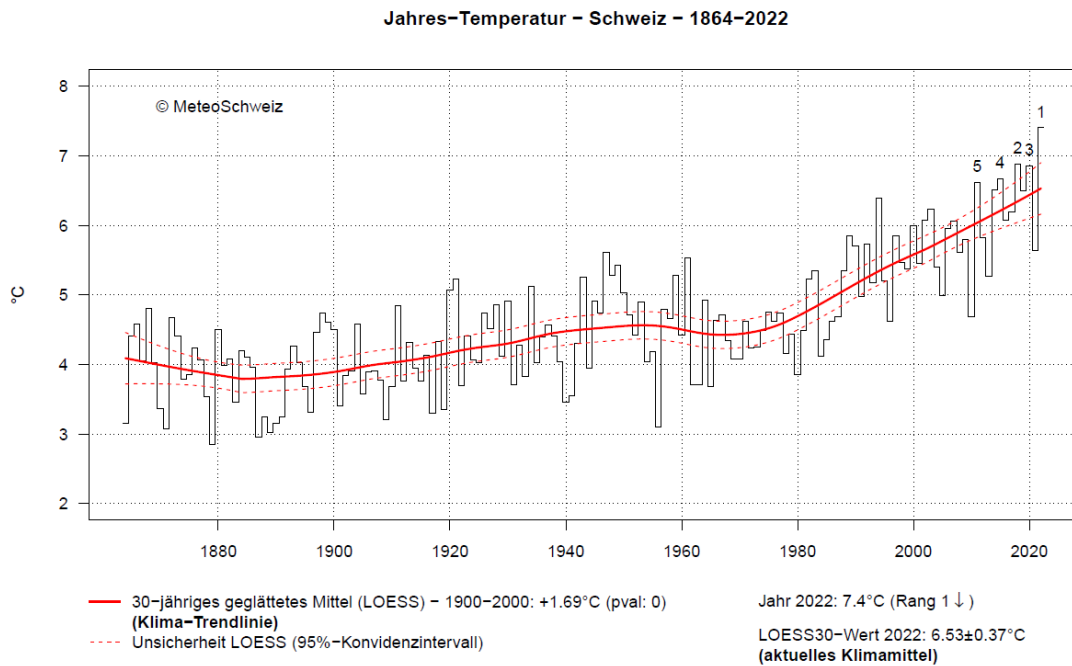


Abbildung 12: Entwicklung der Schweizer Jahresmitteltemperatur 1864-2022 mit Darstellung der Klima-Trendlinie und des 95%-Konfidenzintervalls in Rot. Zusätzlich berechnet ist das Änderungssignal im 20. Jahrhundert (Differenz zwischen den Trendlinien-Punkten 1900 und 2000) und das aktuelle Klimamittel im Jahr 2022. Mit einem p-Wert von 0 ist das Änderungssignal statistisch hoch signifikant. Die Unsicherheit des aktuellen Klimamittels beträgt $\pm 0,37^\circ\text{C}$ und entspricht dem Bereich zwischen den gestrichelten Linien im Jahr 2022.

Die in Kapitel 5 beschriebene Nutzung der Klima-Trendlinie als Basis zur Berechnung und Darstellung von Anomalien (vgl. Abb. 11) ist als zusätzliche Funktion `evol.tt.loess.anom` in `evoclim` implementiert. Ebenso die Funktion `loess.filt.knmi`, die als Basis-Funktion zur Berechnung des LOESS in den anderen Funktionen verwendet wird und die entsprechenden Berechnungen durchführt. Die implementierte Methodik ist in de Valk (2020) beschreiben.

Die Grafiken aus `homogval.evol` werden an der MeteoSchweiz für verschiedene Stationen des SMN, verschiedene Perioden und verschiedene Granularitäten sowohl für absolute Werte als auch Abweichungen zu verschiedenen Referenzperioden regelmässig automatisiert erstellt und im ProductBrowser zur Verfügung gestellt. Dabei kommen wie oben beschrieben zwei verschiedene Klima-Trendlinien zum Einsatz: Der 30-jährige Glätter wird zur Darstellung der langfristigen Klimaentwicklung verwendet, aus dem für die Temperatur zusätzlich ein Änderungssignal und ein aktuelles Klimamittel berechnet wird. Der 10-jährige Glätter wird zusätzlich verwendet, um die mehrjährige Variabilität der Entwicklung verschiedener Parameter analog zum 20-jährigen Gaussfilter zu veranschaulichen (vgl. Abb. 8).

MeteoSchweiz
Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
CH-6605 Locarno Monti
T +41 58 460 97 77
www.meteosvizzera.ch

MétéoSuisse
7bis, av. de la Paix
CH-1211 Genève 2
T +41 58 460 98 88
www.meteosuisse.ch

MétéoSuisse
Chemin de l'Aérologie
CH-1530 Payerne
T +41 58 460 94 44
www.meteosuisse.ch

