



Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in Deutschland

Annett Püschel, Wiebke Winzig und Manfred Theel

Veröffentlichung: Januar 2023



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	2
Zusammenfassung	3
Summary	3
1 Einleitung und Motivation	4
2 Datenbasis	4
3 Auswertungen	6
3.1 Allgemeine räumliche Verteilung der Globalstrahlung in Deutschland	6
3.2 Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in Deutschland	7
3.3 Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in den Bundesländern	9
3.4 Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 nach Monaten	10
4 Mögliche Erklärungen für die Beobachtungen	12
5 Literaturverzeichnis	15

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vieljährige mittlere Jahressummen der Globalstrahlung [kWh/m ²] in Deutschland der Zeiträume 1983 - 1990, 1991 - 2000, 2001 - 2010, 2011 - 2020.	6
Abbildung 2: Jahressummen der Globalstrahlung [kWh/m ²] in Deutschland 1983 - 2020	7
Abbildung 3: Abweichung der vieljährigen mittleren Jahressumme der Globalstrahlung [kWh/m ²] in Deutschland der Zeiträume 1991 - 2000, 2001 - 2010 und 2011 - 2020 zu 1983 - 1990.	8
Abbildung 4: Jahressummen der Globalstrahlung [kWh/m ²] in Brandenburg	10
Abbildung 5: Deutschlandweiter Jahresgang der mittleren Monatssummen der Globalstrahlung	11
Abbildung 6: Änderung der mittleren Monatssumme der Globalstrahlung [kWh/m ²] über den Zeitraum 1983 - 2020 für Brandenburg, Deutschland und Baden-Württemberg.	11
Abbildung 7: Abweichung der mittleren Globalstrahlung von 2011 - 2020 zu 1983 - 1990 in kWh/m ²	12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere jährliche Globalstrahlungssumme [kWh/m ²] für Deutschland und die Bundesländer	9
--	---

Zusammenfassung

Auf die Entwicklung der Globalstrahlung wird nicht nur in Deutschland ein immer stärkerer Fokus gelegt. Aufgrund von Klimaveränderungen, der politischen Situation und einem generellen Umdenken in der Bevölkerung steigt die Nachfrage nach erneuerbaren Energien stetig an. Insbesondere die weltweit verfügbare Solarenergie erfährt einen imposanten Boom.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die Entwicklung der Globalstrahlung von Beginn der zuverlässigen flächenhaften Datenverfügbarkeit 1983 bis zum Jahr 2020 für Deutschland. Ein Vergleich der vier zurückliegenden Dekaden zeigt die positive Entwicklung der Globalstrahlung.

Die größten positiven Veränderungen sind in Nordrhein-Westfalen sowie in Brandenburg und Sachsen entlang der polnischen Grenze zu verzeichnen. Gründe für den Anstieg der Globalstrahlung sind die verbesserte Luftqualität durch den starken Rückgang der Emissionen in den genannten Regionen sowie Veränderungen in der Bewölkung. Das resultierende Aufhellen der Atmosphäre wird als „Brightening-Effekt“ bezeichnet.

Summary

The development of global radiation is becoming an increasingly important topic, not only in Germany. Due to climatic changes, the political situation and a general rethinking among the population, the demand for renewable energies is steadily increasing. In particular, solar energy, which is available worldwide, is experiencing an immense boom.

This report provides an overview of the development of global radiation from the beginning of reliable nationwide data availability in 1983 to the year 2020 for Germany. A comparison of the four previous decades shows the positive development of global radiation.

The greatest positive changes can be observed in North Rhine-Westphalia and in Brandenburg and Saxony along the Polish border. Reasons for the increase in global radiation are the improved air quality due to the strong decrease in emissions in the aforementioned regions as well as changes in cloud cover. The resulting phenomenon is called "brightening effect".

1 Einleitung und Motivation

Die Globalstrahlung ist die auf der Erde empfangene solare Strahlung bezogen auf eine horizontale Fläche. Sie setzt sich aus der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung zusammen. Die Diffusstrahlung ist die an Luftmolekülen, Aerosolen und Wolken gestreute solare Strahlung. Die Direktstrahlung legt hingegen ohne gestreut zu werden den kürzesten Weg durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche zurück. Die Energieausbeute der Globalstrahlung variiert räumlich und zeitlich. Sie ist unter anderem abhängig von der geografischen Breite, der Höhe über dem Meeresspiegel, der Jahres- und Tageszeit, den Wetterbedingungen und den Luftbedingungen. Die Globalstrahlung gibt an, wie viel Energie der kurzwelligeren Strahlung von der Sonne auf der horizontalen Erdoberfläche ankommt. Daher ist sie zum Beispiel eine wichtige Eingangsgröße für die Planung und den Betrieb von Photovoltaik-Anlagen.

Die langjährige, flächendeckende Erfassung und Auswertung der Globalstrahlungsdaten ist von enormer Wichtigkeit im Zusammenhang der Interpretation weiterer Wetterparameter, des Energiekreislaufs und des Klimasystems. Dementsprechend wird in diesem Bericht dargestellt, wie sich die Globalstrahlung in Deutschland seit Beginn der zuverlässigen flächendeckenden Datenverfügbarkeit 1983 bis 2020 entwickelt hat.

Die Ergebnisse können wegweisend für die Energiewirtschaft sein, deren Entwicklung mit wachsendem Interesse in der Öffentlichkeit verfolgt wird. Auch für andere wirtschaftliche Bereiche, wie zum Beispiel die Landwirtschaft, spielt die Veränderung der Globalstrahlung eine wichtige Rolle.

2 Datenbasis

Die Datenbasis für diesen Bericht sind Monatssummen der deutschlandweiten Globalstrahlung. Diese basieren auf Satellitendaten, die mit Bodenmesswerten aus dem Strahlungsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verknüpft werden. Die Auflösung beträgt 1 x 1 km. Daraus ergeben sich ca. 359.000 Rasterfelder für ganz Deutschland. Die Daten liegen in der Einheit Kilowattstunde pro Quadratmeter (kWh/m²) vor. Im OpenData-Servicebereich des DWD stehen deutschlandweite Rasterdatensätze der Global-, Diffus und Direktstrahlung zur Verfügung (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/). Zusätzlich sind hier Tages-, Stunden- und 10-Minutensummen der Strahlungsmessstationen zu finden (https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/).

Verlässliche Produkte aus Satelliten- und Bodendaten für die Globalstrahlung stehen seit 1983 zur Verfügung. Deshalb umfasst die erste hier betrachtete „Dekade“ nur acht Jahre (1983 - 1990)¹. Zudem lagen im Dezember 1988 keine Daten vor. Diese wurden durch Mitteilung aus den Monaten Dezember zwei Jahre davor und danach ergänzt, um eine Jahressumme für 1988 bilden zu können. Entsprechende Karten sind auf unserer Internetseite <https://www.dwd.de/globalstrahlung> zu finden. Im CDC-Portal (<https://cdc.dwd.de/portal/>) sind Rasterdaten der Monats- und Jahressummen für beliebige Orte in Deutschland abrufbar und stehen zum Download bereit.

¹ Der Einfachheit halber wird auch der Zeitraum 1983 - 1990 im Folgenden als „Dekade“ bezeichnet.

Die Monatssummen der satellitenabgeleiteten Globalstrahlungsprodukte des Satelliten Meteosat wurden bis 2014 mit dem Verfahren von Möser und Raschke (1984) berechnet. Ab 2015 werden Daten des EUMETSAT² verwendet. Die bodennahe Globalstrahlung wird aus der von der Erd-Atmosphäre reflektierten solaren Strahlung, die von Satellitensensoren erfasst wird, abgeleitet. Wichtigster Parameter, der diese Größe beeinflusst, ist die Bewölkung. Von Bedeutung sind außerdem der Sonnenstand, die Höhe der Wolkenobergrenze sowie das Rückstrahlvermögen der Erdoberfläche (Albedo), die Luftfeuchte, der Ozongehalt, die Wolken-tröpfchenverteilung und die Aerosolkonzentration in der Luft.

Im Bodenmessnetz des Deutschen Wetterdienstes werden Pyranometer³- und ScaPP⁴-Geräte eingesetzt, um Strahlungsmesswerte zu erfassen. Die daraus berechneten Monatssummen unterliegen einer Plausibilitäts- und Qualitätsprüfung von hoher Güte. Die Anzahl der Bodenmessstationen, die bei der monatlichen Kartenerstellung verwendet wird, variiert leicht von Monat zu Monat. Messausfälle können dazu führen, dass Stationen bei der Kartenerstellung nicht berücksichtigt werden. Über den betrachteten Zeitraum hat sich die Dichte des Strahlungsmessnetzes erhöht und sich die Qualität der Messgeräte verbessert. Es fließen hauptsächlich Daten der qualitativ hochwertigeren Pyranometer-Stationen in die Kartenerstellung ein.

Durch ein ursprünglich von Czeplak et al. (1991) entwickeltes Verfahren werden die auf satellitenbasierenden Globalstrahlungsdaten mit den Bodenmesswerten verschnitten, woraus die monatlichen und jährlichen Strahlungskarten generiert werden.

Die Globalstrahlungskarten der vieljährigen mittleren Jahressummen (Dekadenmittel), wie in Abbildung 1 dargestellt, werden aus den einzelnen Jahressummen gebildet. Die Abweichungskarten (Abbildung 3) zeigen die Differenz zwischen den jeweiligen Dekaden und dem Zeitraum 1983 bis 1990.

² EUMETSAT: European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites. Die Satelliten beobachten das Wetter, das Klima und die Umwelt aus dem Weltall.

³ Ein Pyranometer dient zur Messung der Globalstrahlung. Als Messfühler dient eine aus hintereinander geschalteten Thermoelementen bestehende geschwärzte Thermosäule. Die Messunsicherheit eines Pyranometers für Stundenwerte ist kleiner als 3 %.

⁴ Ein ScaPP (engl. Scanning Pyrheliometer and Pyranometer) misst die Direkt- und Diffusstrahlung mit einer Siliziumzelle. Daraus berechnet sich die Globalstrahlung. Die Messunsicherheit eines ScaPP-Gerätes beträgt für Stundenwerte weniger als 20 % und auf Tagessummen bezogen weniger als 10 %.

3 Auswertungen

3.1 Allgemeine räumliche Verteilung der Globalstrahlung in Deutschland

In Abbildung 1 sind die vieljährigen Jahressummen der Globalstrahlung der vier Dekaden 1983 - 1990, 1991 - 2000, 2001 - 2010 und 2011 - 2020 dargestellt. Die durchschnittliche Globalstrahlungsverteilung in Deutschland spiegelt über alle vier Zeiträume verschiedene Klimaregionen wider. Es lassen sich mehrere Gebiete erkennen.

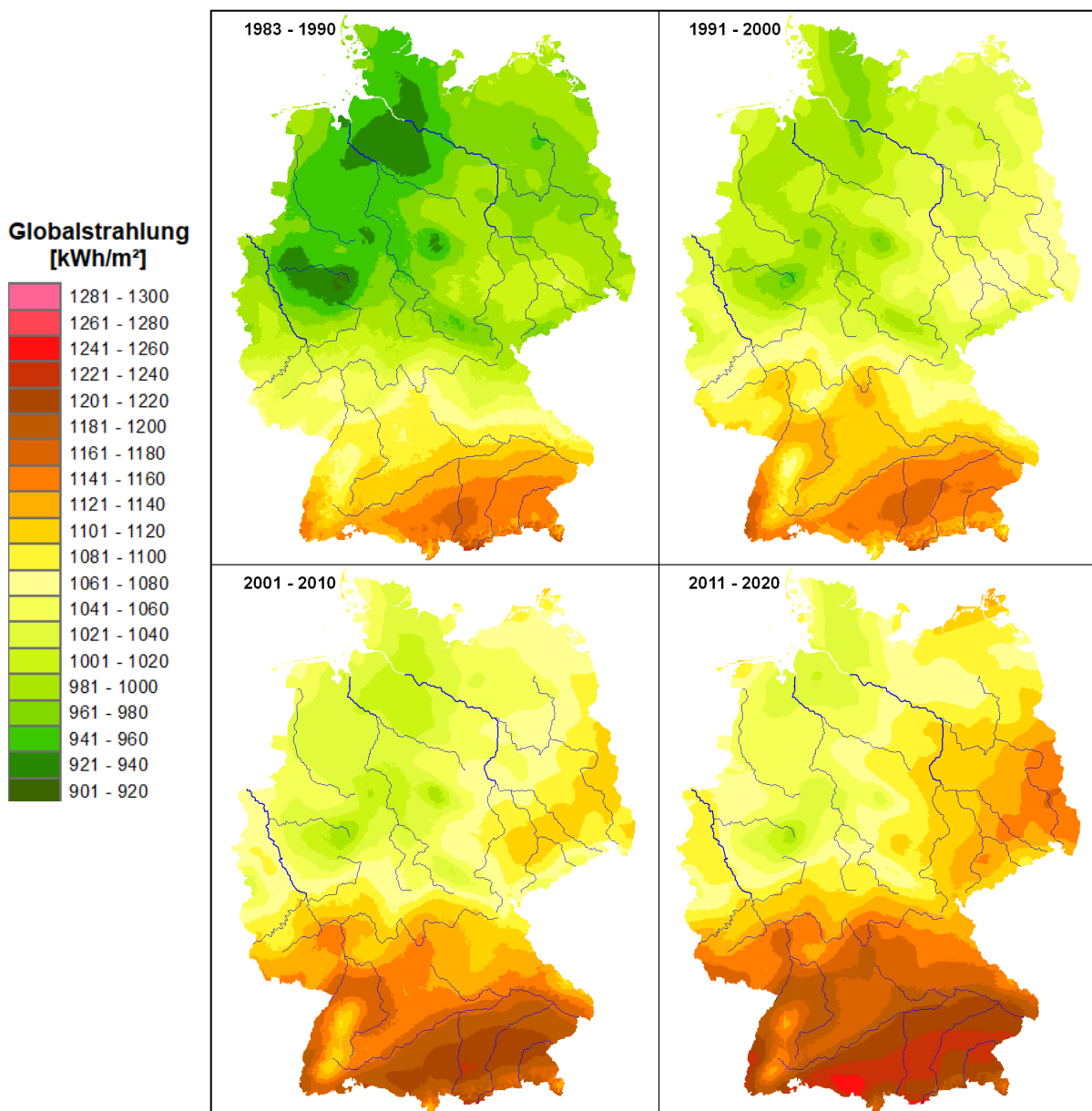


Abbildung 1: Vieljährige mittlere Jahressummen der Globalstrahlung [kWh/m²] in Deutschland der Zeiträume 1983 - 1990, 1991 - 2000, 2001 - 2010, 2011 - 2020.

Südlich des Mains befindet sich das Gebiet der höchsten Einstrahlung. Kennzeichnend ist das wolkenärmere kontinentale Klima. Das Strahlungsmaximum liegt sowohl im Zeitraum 1983 - 1990 (1.270 kWh/m^2) als auch 2011 - 2020 (1.275 kWh/m^2) im Alpenvorland. Im Westen Deutschlands ist die Globalstrahlung am geringsten. Grund hierfür sind wolkenreiche Westwetterlagen. Das Strahlungsminimum befindet sich im Sauerland (1983 - 1990: 915 kWh/m^2 , 2011 - 2020: 991 kWh/m^2). Der Osten Deutschlands ist vom kontinentalen Klima geprägt und somit wolkenärmer als der Westen. Entsprechend höher ist die Globalstrahlung. An Nord- und Ostseeküste wird die Jahressumme der Globalstrahlung von der hohen Anzahl an Sonnenstunden in den Sommermonaten beeinflusst. Diese resultiert aus der Tageslänge und der stabilen Schichtung der Atmosphäre über der kühlen See, welche der Wolkenbildung entgegenwirkt. Die mittlere jährliche Globalstrahlung in allen Teilen Deutschlands im Laufe des betrachteten Zeitraums gestiegen.

3.2 Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in Deutschland

Die Jahressumme der Globalstrahlung in Deutschland ist seit 1983 bis 2020 gestiegen. Abbildung 2 zeigt diesen Trend (blaue Linie) sowie die jährlichen Globalstrahlungssummen (blaue Punkte). Anhand der Dekadenmittel (orange Linien) ist erkennbar, dass die Globalstrahlungssummen kontinuierlich angestiegen sind. Die mittlere Änderung pro Jahr beträgt deutschlandweit $+3,4 \text{ kWh/m}^2$. Im Zeitraum 1983 - 1990 lag die mittlere Globalstrahlungssumme pro Jahr bei ca. 1.014 kWh/m^2 . Im Zeitraum 2011 - 2020 waren es 1.114 kWh/m^2 . Diese Zunahme entspricht etwa der Globalstrahlungssumme eines durchschnittlichen Septembers (Abbildung 5).

Besonders strahlungsreiche Jahre waren 2003 (1.197 kWh/m^2) und 2018 (1.207 kWh/m^2) während 1984 (970 kWh/m^2) und 1987 (950 kWh/m^2) die Jahre mit den geringsten Strahlungssummen sind. Aus der Grafik ist ebenfalls erkennbar, dass der Anstieg der Globalstrahlung zu Beginn des betrachteten Zeitraums größer ist als zum Ende. Dies deckt sich mit dem Ergebnis weiterer Studien (Wild, et al., 2021).

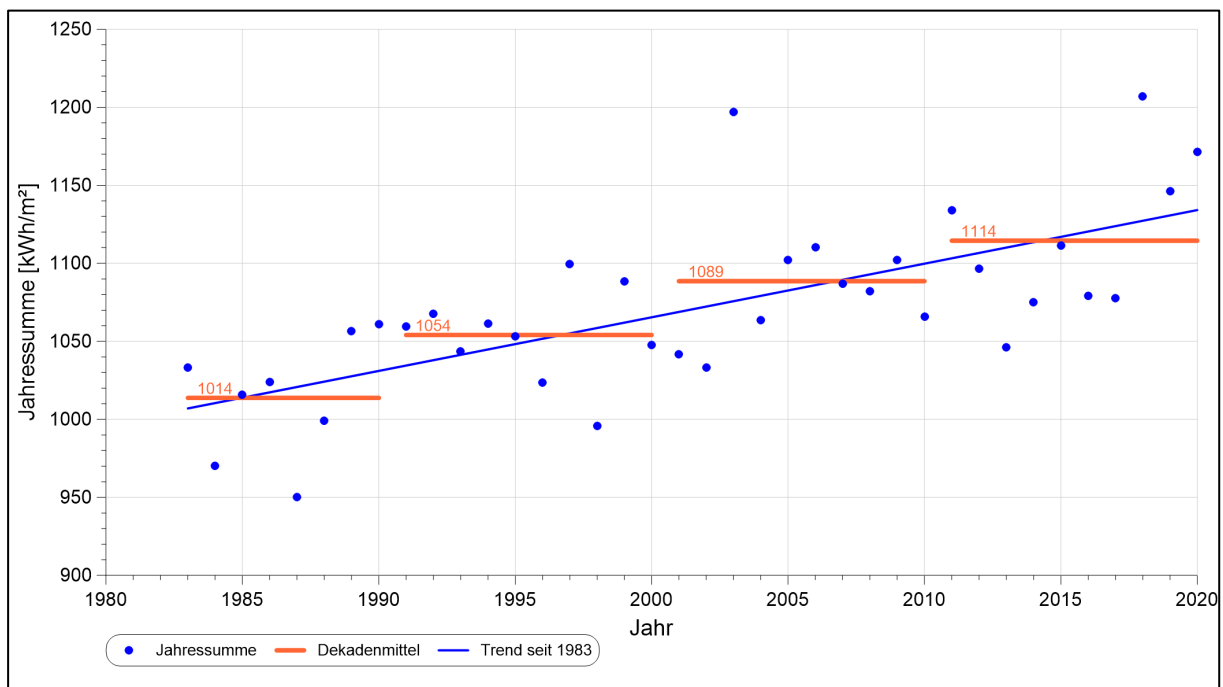


Abbildung 2: Jahressummen der Globalstrahlung [kWh/m^2] in Deutschland 1983 - 2020 mit Dekadenmitteln und Trend ($+3,4 \text{ kWh/m}^2$ pro Jahr).

Abbildung 3 zeigt die Abweichung der Globalstrahlung der Dekaden 1991 - 2000, 2001 - 2010 und 2011 - 2020 zu 1983 - 1990. Die Abweichung des Mittels 2011 - 2020 zu 1983 - 1990 liegt bei 100 kWh/m². Dabei werden im Maximum 177 kWh/m² und im Minimum -11 kWh/m² erreicht. Besonders starke positive Abweichungen sind in Brandenburg und Sachsen entlang der polnischen Grenze zu erkennen. Im Ruhrgebiet sind ebenfalls starke positive Abweichungen zu verzeichnen. In den südlichen Alpen, an der Grenze zu Österreich, sind hingegen sehr geringe bis gar keine Abweichungen zu beobachten. Ähnliches gilt für die Nordseeküste sowie einige Gebirgsregionen wie Sauerland, Eifel und Schwarzwald.

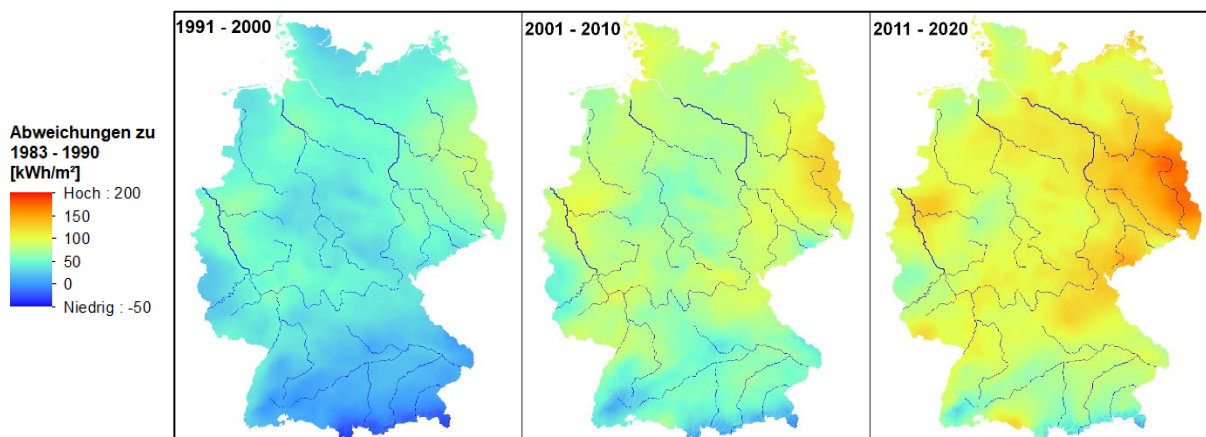


Abbildung 3: Abweichung der vieljährigen mittleren Jahressumme der Globalstrahlung [kWh/m²] in Deutschland der Zeiträume 1991 - 2000, 2001 - 2010 und 2011 - 2020 zu 1983 - 1990.

3.3 Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in den Bundesländern

Tabelle 1 zeigt für den Zeitraum 1983 - 2020 die Rangliste der linearen Änderung der Globalstrahlung pro Jahr in kWh/m². Die Werte sind absteigend sortiert und mit den dazugehörigen mittleren Dekadenwerten pro Bundesland abgebildet. Im deutschlandweiten Mittel beträgt der Zuwachs 3,4 kWh/m² pro Jahr. Bei einem Vergleich der Flächenländer⁵ hat Brandenburg mit 4,4 kWh/m² pro Jahr den höchsten Zuwachs, gefolgt von Sachsen mit 4,2 kWh/m². Den niedrigsten Zuwachs mit 2,8 kWh/m² pro Jahr verzeichnet das Bundesland Baden-Württemberg, gefolgt von Rheinland-Pfalz mit 2,9 kWh/m². Beim Vergleich aller Dekadenmittel ist in allen Bundesländern eine Zunahme der Globalstrahlung festzustellen.

Tabelle 1: Mittlere jährliche Globalstrahlungssumme [kWh/m²] für Deutschland und die Bundesländer in den Dekaden 1983 - 1990, 1991 - 2000, 2001 - 2010 und 2011 - 2020.

Bundesland	1983 - 1990	1991 - 2000	2001 - 2010	2011 - 2020	Lineare Änderung kWh/m ² pro Jahr für 1983 - 2020
Berlin	969,2	1045,1	1076,8	1116,4	4,7
Brandenburg	978,6	1047,3	1080,5	1116,0	4,4
Sachsen	1000,2	1054,5	1090,3	1130,1	4,2
Hamburg	928,7	975,1	1007,3	1041,8	3,8
Sachsen-Anhalt	987,2	1038,4	1065,4	1101,0	3,7
Saarland	1052,4	1091,5	1127,6	1156,6	3,5
Thüringen	985,1	1024,7	1060,8	1092,0	3,5
Bremen	934,0	992,2	1010,6	1037,3	3,5
Mecklenburg-Vorpommern	980,4	1028,0	1059,8	1082,7	3,4
Deutschland	1013,7	1054,0	1088,5	1114,5	3,4
Niedersachsen	953,1	999,5	1027,8	1052,5	3,3
Schleswig-Holstein	951,1	989,1	1035,4	1044,7	3,3
Nordrhein-Westfalen	958,1	1007,7	1039,5	1057,2	3,3
Hessen	996,9	1041,9	1073,3	1093,0	3,1
Bayern	1093,7	1113,4	1154,9	1182,4	3,0
Rheinland-Pfalz	1033,0	1072,7	1105,3	1119,6	2,9
Baden-Württemberg	1102,3	1122,8	1157,9	1185,4	2,8

⁵ Bundesländer, die keine Stadtstaaten sind

Abbildung 4 zeigt den linearen Zuwachs der Globalstrahlung von $4,4 \text{ kWh/m}^2$ pro Jahr für Brandenburg, als das Bundesland mit der größten Zunahme, für den Zeitraum 1983 - 2020. Die Dekadenmittelwerte sind als orange Linien abgebildet; die Jahressummen werden mit blauen Punkten symbolisiert. Besonders der erste Dekadenmittelwert (1983 - 1990) unterscheidet sich stark von dem deutschlandweiten Mittel (Abbildung 2).

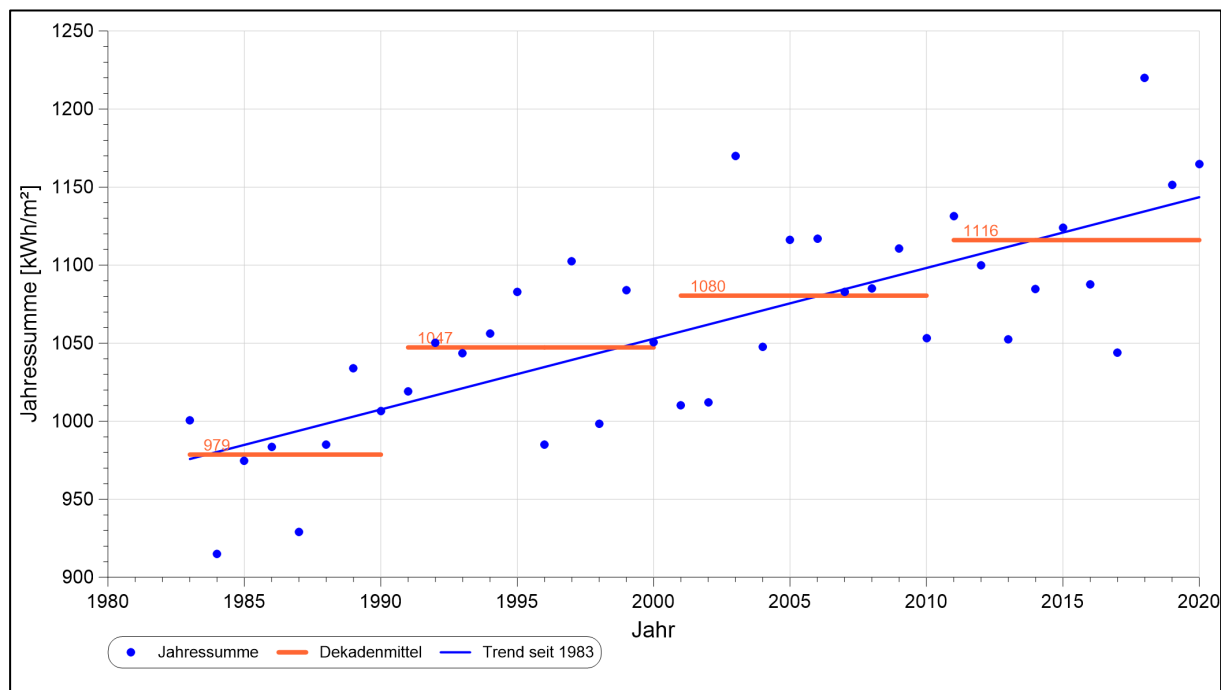


Abbildung 4: Jahressummen der Globalstrahlung [kWh/m^2] in Brandenburg 1983 - 2020 mit Dekadenmittel und Trend ($+4,4 \text{ kWh/m}^2$ pro Jahr).

3.4 Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 nach Monaten

Die Intensität der Globalstrahlung ist nicht gleichmäßig auf das Jahr verteilt, wie Abbildung 5 veranschaulicht. In den Sommermonaten ist die Globalstrahlung in Deutschland aufgrund des höheren Sonnenstands höher als zu anderen Jahreszeiten. Die Summe in den Monaten Mai bis Juli kann bis zu zehnfach höher liegen als im Januar oder Dezember. Eine Änderung der Globalstrahlung in den Sommermonaten hat entsprechend größere Auswirkungen auf das Jahresmittel als die Änderung in den Wintermonaten (Behr, et al., 2021).

Der Zuwachs an Globalstrahlung ist in einigen Monaten größer als in anderen (Abbildung 6). Die genannte Abbildung zeigt die mittlere Änderung der mittleren Monatssumme pro Jahr im Zeitraum 1983 - 2020 für Deutschland, Brandenburg und Baden-Württemberg in kWh/m^2 . Der größte Zuwachs ist im April und im Juni zu beobachten, während Oktober bis Januar kaum eine Rolle spielen. Laut Behr et al. (2021) ist die große Zunahme an Globalstrahlung im Frühling hauptsächlich auf veränderte Bedeckungsverhältnisse zurückzuführen.

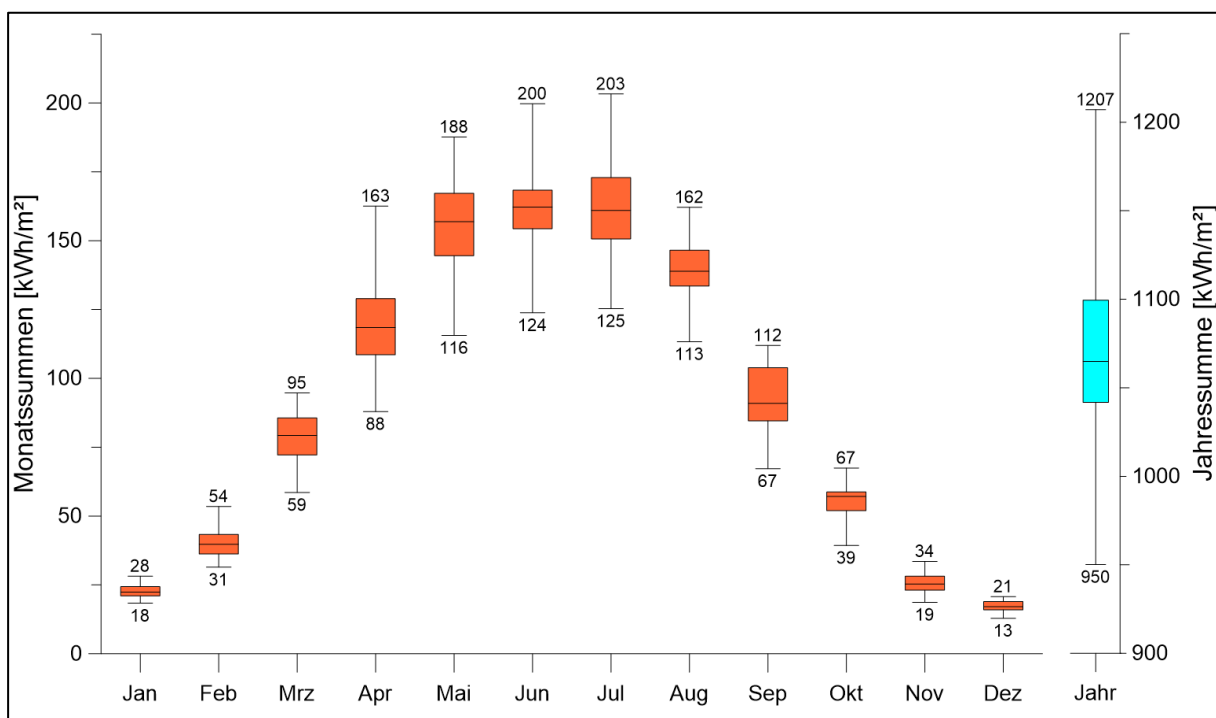


Abbildung 5: Deutschlandweiter Jahresgang der mittleren Monatssummen der Globalstrahlung [kWh/m²] für den Zeitraum 1983 - 2020 (Mitte). Mittlere Jahressumme der Globalstrahlung in Deutschland in kWh/m² (rechts). Die farbigen Kästen zeigen das 25/75-Perzentil.

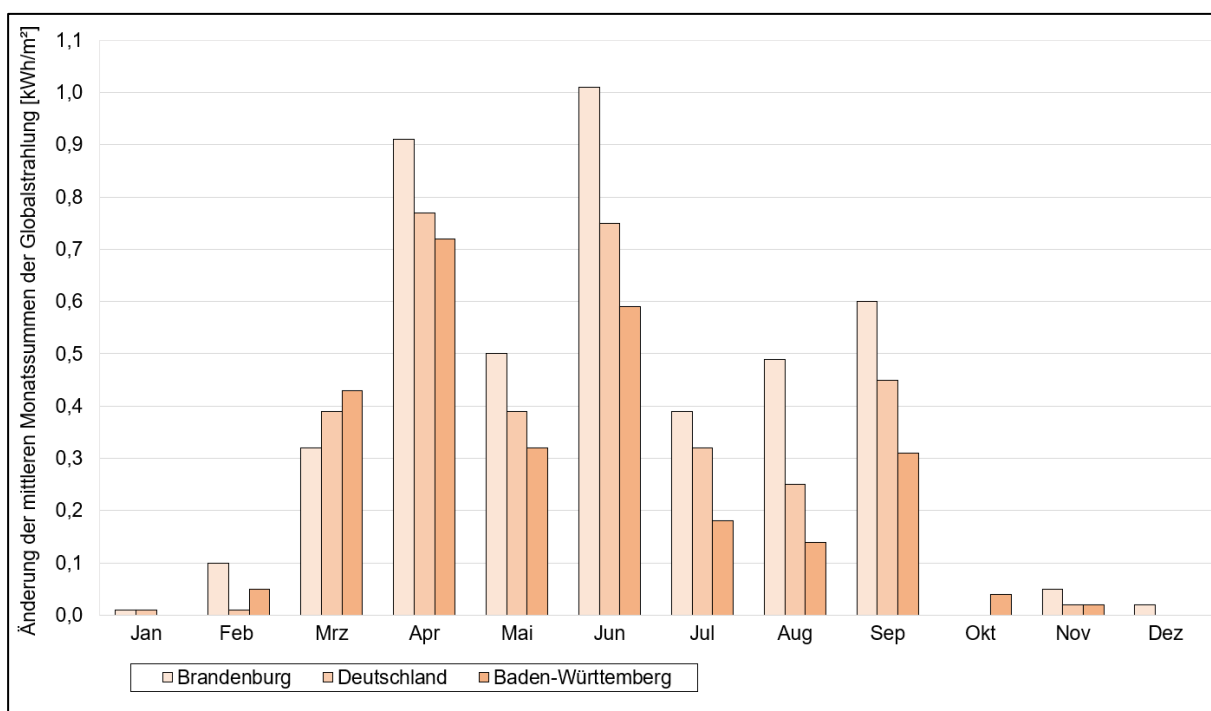


Abbildung 6: Änderung der mittleren Monatssumme der Globalstrahlung [kWh/m²] über den Zeitraum 1983 - 2020 für Brandenburg, Deutschland und Baden-Württemberg.

4 Mögliche Erklärungen für die Beobachtungen

Der Anstieg der Globalstrahlung über den betrachteten Zeitraum hat verschiedene Ursachen. In diversen wissenschaftlichen Untersuchungen werden die Bewölkung und vom Menschen induzierte Aerosole in der Atmosphäre als zwei wichtige Faktoren genannt (Chiacchio & Vitolo, 2012; Behr, et al., 2021). Entsprechend werden einige Erklärungsmöglichkeiten für den Anstieg der Globalstrahlung in Deutschland im Folgenden kurz aufgeführt.

Ein Blick auf die Veränderung der Globalstrahlung in Deutschlands Nachbarländern zeigt, dass die Globalstrahlung sich nicht gleichförmig in Europa verändert hat (Abbildung 7). Die größten Zunahmen der Globalstrahlung scheinen in den alpinen Gebieten Frankreichs, Österreichs und der Schweiz unrealistisch zu sein. Diese sind vermutlich auf eine verbesserte Detektion von schneebedeckten Oberflächen ab 1994 zurückzuführen. Im Westen Großbritanniens und Frankreichs hat die Globalstrahlung kaum zugenommen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Pfeifroth et al. (2018) überein.

Dennoch kann in ganz Europa seit den 1980er Jahren der sogenannte „Brightening-Effekt“ in der Atmosphäre beobachtet werden. Im Zuge dessen erhöht sich die Lichtdurchlässigkeit der Atmosphäre durch Veränderungen der Bewölkung und einer Verminderung der Aerosolkonzentration (Cherian, et al., 2014; Pfeifroth, et al., 2018). Dies bedeutet einen mittleren Anstieg der Globalstrahlung von 1,9 - 2,4 W/m² pro Dekade (Pfeifroth, et al., 2018). Der stärkste Effekt des Brightening zeigt sich in Osteuropa und Nordwesteuropa im Frühjahr (Pfeifroth, et al., 2018). Laut Pfeifroth et al. (2018) kann der beobachtete Effekt des Brightening hauptsächlich durch eine Veränderung in der Bewölkung erklärt werden. Diese kann sowohl natürlichen Ursprungs sein und/oder durch den indirekten Effekt von anthropogenen Aerosolen auf die Wolkenbildung hervorgerufen werden (Pfeifroth, et al., 2018).

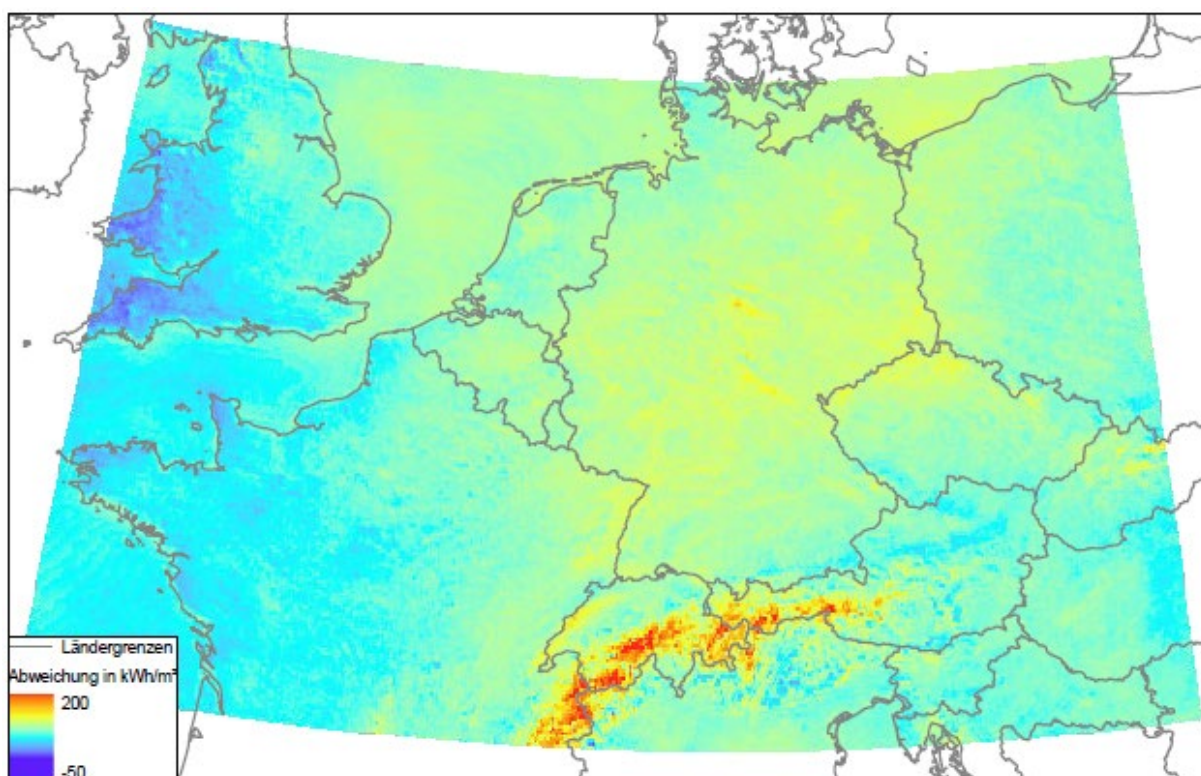


Abbildung 7: Abweichung der mittleren Globalstrahlung von 2011 - 2020 zu 1983 - 1990 in kWh/m². Die Daten basieren auf SARA-3 Satellitendaten.

Laut Wild et al. (2021), welche eine langjährige Globalstrahlungsmessreihe aus Potsdam untersucht haben, tragen hauptsächlich Verringerungen der anthropogenen Aerosolkonzentration in der Luft zum Brightening-Effekt bei. Die Untersuchungen zeigen, dass der Brightening-Effekt auch unter wolkenlosen Bedingungen auftritt und die dekadischen Veränderungen somit nicht alleine durch natürliche Schwankungen im Klimasystem erklärt werden können (Wild, et al., 2021). Cherian et al. (2014) nähern sich der Fragestellung anhand verschiedener Klimamodelle (CMIP5⁶) und kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass die Reduktion der menschenverursachten Aerosole den Anstieg in der Globalstrahlung in Europa erklären kann. Ein Argument, das für die Aerosolkonzentration als Treiber des Brightenings spricht, ist die Stabilisierung beziehungsweise Abschwächung des Anstiegs der Globalstrahlung in den vergangenen zwei Dekaden (Abbildung 2), welche durch erfolgreich umgesetzte Maßnahmen zur Erhöhung der Luftqualität erklärbar ist (Wild, et al., 2021).

In Europa hat sich die Luftqualität zwischen 2010 und 2020 größtenteils verbessert (European Environment Agency, 2022). In einigen Ländern, wie z. B. Österreich und Tschechien hat sich die Luftqualität stärker verbessert, als z. B. im Vereinigten Königreich oder Frankreich. In Deutschland ist die Luftverschmutzung in den vergangenen 25 Jahren ebenfalls stark zurückgegangen (Umweltbundesamt, 2022).

Die Belastung durch Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀) und Stickstoffdioxid (NO₂) hat sowohl in den Ballungsräumen als auch auf dem Land seit 1995 im Trend abgenommen. Die Luftqualität in ländlichen Gegenden ist generell besser als in urbanen Bereichen (Umweltbundesamt, 2022). 1995 lag die PM₁₀-Konzentration in verkehrsnahen Regionen noch bei 46 µg/m³ und in ländlicher Umgebung bei 22 µg/m³. 2020 hat sich der ländliche Wert halbiert. Die PM₁₀-Konzentration in verkehrsnahen Regionen lag im selben Jahr bei 18 µg/m³ (Umweltbundesamt, 2022). Allerdings ist dieser Trend nicht linear. Ursächlich dafür, dass in einigen Jahren die Luftverschmutzung etwas höher ist als in anderen, können bestimmte Wetterlagen sein. Die Belastung ist beispielsweise bei winterlichen Hochdruckwetter- und Ostlagen auf Grund des eingeschränkten Luftaustauschs in Bodennähe höher. Im Sommerhalbjahr führen jene Wetterlagen zu einer Abtrocknung der Bodenoberfläche, wodurch die Aufwirbelung von Staubpartikeln begünstigt wird. Wetterlagen, bei denen die Luft gut durchmischt wird, wie z. B. Nordwest- und Südwestlagen, weisen ganzjährig gute Austauschbedingungen auf, was sich positiv auf die Luftqualität auswirkt (Umweltbundesamt, 2009).

Die Luftqualität in Deutschland hat sich in einigen Gebieten stärker verbessert als in anderen. Die Bundesländer unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Größe, sondern auch bezüglich Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte, Wirtschaftsstruktur und Energieversorgung (Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2022). All diese Faktoren haben Einfluss auf die in dem Bundesland entstammenden Emissionen. Nordrhein-Westfalen (NRW), Brandenburg und Sachsen zählen zu den Kohleländern. Seit 1990 ist ein starker Rückgang der energiebezogenen Emissionen zu verzeichnen. Nach der Wiedervereinigung gingen besonders in den ostdeutschen Bundesländern, auf Grund der Schließung von energieintensiven Industrieanlagen, die Emissionen zurück. Entsprechend hoch ist hier, wie auch im bevölkerungsstarken und vom Ruhrgebiet geprägten NRW, der Rückgang der energiebezogenen Emissionen im Vergleich zu den anderen Bundesländern (Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2022).

Eine Auswertung der deutschlandweit gemittelten Sonnenscheindauer von 1950 bis 2021 hat ähnliche Ergebnisse gebracht wie die der Globalstrahlung. Im langjährigen Trend ist eine Zunahme der Sonnenscheindauer zuerkennen (Bär & Kaspar, 2022).

⁶ Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

Ein Anstieg der Globalstrahlung aufgrund erhöhter Sonnenaktivität lässt sich ausschließen. Die Sonnenaktivität unterliegt natürlichen 11-jährigen Schwankungen (Space Weather Prediction Center, 2022). Bei der Betrachtung von Dekadenmittel, wie in dieser Auswertung, werden diese Schwankungen entsprechend herausgemittelt. Durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Land ist es schwierig, den exakten Einfluss der Sonnenaktivität auf das Klima zu bestimmen. Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl und Aktivität der Sonnenflecken nur einen sehr geringen Einfluss auf die von der Sonne ausgestrahlte Energie hat (National Weather Service, kein Datum; Bonewitz, 2019). Zudem beziehen sich die Schwankungen zum Großteil auf die ultraviolette Strahlung, welche bei der Messung der Globalstrahlung eine untergeordnete Rolle spielt (Bonewitz, 2019; Wild, et al., 2021).

Der Anstieg der Globalstrahlung in Deutschland kann also vermutlich durch das Zusammenspiel aus verbesserter Luftqualität und veränderten Wolkenmustern erklärt werden. Dennoch ist der Brightening-Effekt generell noch nicht vollständig verstanden, da weltweit nur wenige lange Datenreihen zur Globalstrahlung vorliegen. Besonders über den Ozeanen, in abgelegenen Regionen und in Gebirgen ist das Datenaufkommen lückenhaft (Pfeifroth, et al., 2018).

5 Literaturverzeichnis

- Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2022. *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen in den Bundesländern*, Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V..
- Bär, F. & Kaspar, F., 2022. *Meteorologischer Jahresrückblick energierelevanter Wetterelemente für das Jahr 2021*, s.l.: Deutscher Wetterdienst / BMDV Expertennetzwerk.
- Behr, H. D., Jung, C., Trentmann, J. & Schindler, D., 2021. Using satellite data for assessing spatiotemporal variability and complementarity of solar resources – a case study from Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, 30(6), pp. 515-532.
- Bonewitz, J., 2019. *Einfluss der variablen Sonnenaktivität auf die Erdatmosphäre*. [Online] Available at: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/10/26.html [Zugriff am 10 10 2022].
- Cherian, R., Quaas, J., Salzmann, M. & Wild, M., 2014. Pollution trends over Europe constrain global aerosol forcing as simulated by climate models. *Geophysical Research Letters*, 41(6), pp. 2176-2181.
- Chiacchio, M. & Vitolo, R., 2012. Effect of cloud cover and atmospheric circulation patterns on the observed surface solar radiation in Europe. *Journal of Geophysical Research*, 117(D18), pp. 1-20.
- Czeplak, G., Noia, M. & Ratto, C. F., 1991. An assessment of a statistical method to estimate solar irradiance at the earth's surface from geostationary satellite data. *Renewable Energy*, 1(5/6), pp. 737 - 743.
- European Environment Agency, 2022. *2021 country fact sheets*. [Online] Available at: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2021-country-fact-sheets> [Zugriff am 22 10 2022].
- Möser, W. & Raschke, E., 1984. Incident solar radiation over Europe estimated from Meteosat data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(1), pp. 166 - 170.
- National Weather Service, kein Datum *The Sun and Sunspots*. [Online] Available at: <https://www.weather.gov/fsd/sunspots> [Zugriff am 05 10 2022].
- Pfeifroth, U. et al., 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), pp. 1735-1754.
- Space Weather Prediction Center, 2022. *Solar Cycle Progression*. [Online] Available at: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> [Zugriff am 05 10 2022].
- Umweltbundesamt, 2009. *Entwicklung der Luftqualität in Deutschland*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Umweltbundesamt, 2022. *Entwicklung der Luftqualität*. [Online] Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/daten-karten/entwicklung-der-luftqualitaet#entwicklung-der-luftqualitat-in-deutschland> [Zugriff am 05 10 2022].
- Wild, M., Wacker, S., Yang, S. & Sanchez-Lorenzo, A., 2021. Evidence for Clear-Sky Dimming and Brightening in Central Europe. *Geophysical Research Letters*, 48(6), pp. 1-9.

Zitiervorschlag:

Püschel, A., Winzig, W. & Theel, M., 2022. Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in Deutschland. Deutscher Wetterdienst.



Redaktion

Deutscher Wetterdienst
Regionales Klimabüro Hamburg
Bernhard-Nocht-Straße 76
D - 20359 Hamburg

E-Mail: Strahlung.Hamburg@DWD.de

Tel.: +49 (69) 8062-6022



Über www.dwd.de gelangen Sie
auch zu unseren Auftritten in:

