Institut Wohnen und Umwelt

Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
Germany

Fon: +49(0)6151/2904-0
Fax: +49(0)6151/2904-97

info@iwu.de
www.iwu.de

MOBASY-Teilbericht
Klimadaten für die Realbilanzierung

Grundlagen des Tools „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“

Forschungsprojekt

MOBASY

Modellierung der Bandbreiten und systematischen Abhängigkeiten des Energieverbrauchs zur Anwendung im Verbrauchscontrolling von Wohngebäudebeständen

(Verbundvorhaben Solares Bauen FKZ 03SBE0004A)

Darmstadt, den 09.06.2020

Autoren: Tobias Loga
Marc Großklos
Katrin Landgraf

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Titel: Klimadaten für die Realbilanzierung

Autoren: Tobias Loga
Marc Großklos
Katrin Landgraf

1. Auflage
Darmstadt, den 09.06.2020

ISBN: 978-3-941140-66-0

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
Germany

Telefon: +49(0)6151/2904-0 / Fax: -97
Internet: www.iwu.de

Inhalt

Einleitung 5

1 Außenlufttemperatur 6

1.1 Datenquelle 6

1.2 Monatswerte der Außenlufttemperatur und der Heiztage je Wetterstation (Datentabelle „Data.TA.HD“) 6

1.3 Ermittlung von Gradtagzahlen bzw. Heizgradtagen und Zuordnung zu Postleitzahlen (Blätter „Tab.StationMapping“, "Calc.Evaluation", "UserForm") 8

1.4 Höhenkorrektur 9

1.5 Schätzung der Zahl der Heiztage (Option bei Verwendung anderer Datenquellen) 9

2 Globalstrahlung 10

2.1 Datenquelle 10

2.2 Monatswerte der Globalstrahlung horizontal (Datentabelle „Data.Sol“) und Zuordnung zu Postleitzahlen 10

2.3 Schätzung der monatlichen Globalstrahlung auf vertikale und geneigte Flächen 11

2.4 Schätzung der monatlichen Globalstrahlung an Heiztagen 13

3 Exemplarische Anwendung und Abschätzung der Unsicherheiten 14

3.1 Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den über 5 Jahre in 30 Messstationen ermittelten detaillierten Klimadaten 14

3.2 Vergleich mit Messdaten aus Modellprojekten mit Klimastation 25

3.3 Abschätzung der Unsicherheiten 29

4 Resümee 36

ANHANG 37

Anhang A Abschätzung der monatlichen Globalstrahlung auf unterschiedlich orientierte und geneigte Flächen bei vorhandenen Monatswerten der horizontalen Einstrahlung – Herleitung der Schätzfunktion 37

A.1 Aufgabenstellung 37

A.2 Verwendete Klimadaten 37

A.3 Ansatz für die Schätzfunktion 38

A.4 Ergebnisse 43

A.5 Überprüfung der hergeleiteten Schätzfunktion und verbleibende Unsicherheiten 53

Anhang B Abschätzung der auf Heiztage entfallenden Anteile der monatlichen Globalstrahlung – Herleitung der Schätzfunktion 55

B.1 Aufgabenstellung 55

B.2 Ansatz für die Schätzfunktion 56

B.3 Ergebnisse 57

B.4 Überprüfung der hergeleiteten Schätzfunktion und verbleibende Unsicherheiten 59

Anhang C Abschätzung der Zahl der Heiztage je Monat für eine gegebene Heizgrenztemperatur – Herleitung der Schätzfunktion 61

C.1 Aufgabenstellung 61

C.2 Ansatz für die Schätzfunktionen 61

C.3 Ergebnisse 61

C.4 Überprüfung der hergeleiteten Schätzfunktion und verbleibende Unsicherheiten 63

C.5 Überprüfung des Schätzverfahrens für die Globalstrahlung an Heiztagen auf der Grundlage einer Heiztage-Schätzung 65

Anhang D Einfluss von Wärmeinseln auf Außentemperatur und Heiztage im Winter 68

Anhang E Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 70

E.1 Literatur 70

E.2 Abbildungen 71

E.3 Tabellen 72

Einleitung

Eine Zielsetzung des Projektes MOBASY ist es, für Wohngebäude unterschiedlicher energetischer Standards den Energieverbrauch auf der Grundlage einer Energiebilanzberechnung möglichst realistisch zu schätzen. Für alle Eingangsdaten einer solchen MOBASY-„Realbilanz“ sollen daher realistische mittlere Werte gefunden werden, die die in der Praxis auftretenden typischen Fälle repräsentieren. Weiterhin soll die typische Bandbreite bzw. Unsicherheit dieser Eingangsdaten abgeschätzt werden. Damit soll es in Zukunft möglich sein, für ein gegebenes Gebäude oder für eine Gebäudegesamtheit abhängig von den Informationen über den energetischen Zustand die Bandbreite des erwarteten Energieverbrauchs anzugeben – also das Intervall, in dem der Energieverbrauch mit großer Wahrscheinlichkeit liegt.

Da für viele Eingangsdaten zuverlässige empirisch ermittelte Daten fehlen, soll bei der Entwicklung des Verfahrens pragmatisch vorgegangen werden. Im Prinzip gilt es vor allem darum, systematische Verschiebungen des Energiebedarfs zu vermeiden, die beim Normnachweis nach EnEV verfahrensbedingt auftreten. Weiterhin müssen für jeden Eingangsdatenbereich die Größen identifiziert werden, deren Spannweiten bzw. Unsicherheiten den größten Einfluss auf den Energieverbrauch haben.

In Anbetracht der unsicheren Datenlage bei den verschiedenen Eingangsdaten und Randbedingungen muss das Modell der MOBASY-„Realbilanzierung“ stets auch mit Verbrauchsdaten größerer Gebäudegesamtheiten kalibriert werden. Abweichungen des Erwartungswerts und der Bandbreite von der Statistik müssen durch entsprechende Kalibrierungsfaktoren korrigiert werden. Es ist allerdings zu erwarten, dass die Abweichungen zwischen dem Energiebedarf des Realbilanz-Modells und dem gemessenen Verbrauch einer großen Zahl Gebäude sehr viel kleiner ist als dies heute beim EnEV-Normbilanz-Modell der Fall ist.

Wichtige Randbedingungen der energetischen Bilanzierung stellen die Klimadaten dar. Zum einen bestimmt die Außentemperatur die Wärmeverluste zwischen dem auf einer bestimmten Raumtemperatur beheizten Gebäudeinneren und der Umgebung. Zum anderen wird ein Teil der winterlichen Wärmeverluste durch solare Wärmeeinträge kompensiert. Je besser der Wärmeschutz eines Gebäudes ist, desto stärker wirkt sich die solare Einstrahlung im Vergleich zur Außentemperatur aus. Darüber hinaus hängen auch die solaren Erträge von thermischen Solaranlagen und PV-Anlagen natürlich von der Einstrahlung des jeweiligen Verbrauchsjahres ab.

Für die realistische energetische Bilanzierung an beliebigen Gebäudestandorten in Deutschland werden also sowohl Temperaturdaten als auch Globalstrahlungsdaten benötigt. Die Daten sollten dabei in Form monatlicher Daten mit und ohne Berücksichtigung einer Heizgrenztemperatur zur Verfügung stehen.

Im Rahmen des MOBASY-Projekts wurde das im IWU bereits vorhandene Tool („Gradtagszahlen_Deutschland.xls“ [IWU GTZ-Tool 2006-2020] weiterentwickelt, so dass nun sowohl Temperaturdaten als auch Strahlungsdaten der vergangenen Jahre enthalten sind [IWU GTZ-Tool 2020]. Dieses Excel-Werkzeug wird im vorliegenden Bericht auch als „Realklima-Tool“ bezeichnet. Im Folgenden sollen die öffentlich verfügbaren Datenquellen und das Vorgehen bei der Aufbereitung zur Nutzung in der MOBASY-Realbilanz dokumentiert werden. Die hierfür zum Teil verwendeten Schätzfunktionen und ihre Herleitung sind im Anhang dokumentiert.

1 Außenlufttemperatur

1.1 Datenquelle

Als Datenquelle dienen Temperaturdaten aus dem CDC (Climate Data Center) des Deutschen Wetterdienstes DWD (siehe Tab. 1). Aus den Datentabellen je Messstation werden die Tagesmittel der Temperatur in °C extrahiert (Variable „TMK“). Es stehen Datensätze für 1213 Stationen zur Verfügung. In den Analysen der vorliegenden Studie wurde der Zeitraum Januar 1991 bis Dezember 2018 betrachtet, für den Temperaturmesswerte von insgesamt 814 Stationen vorliegen.

Tab. 1: Quelle für die in den Analysen verwendeten Temperaturdaten

Datenquelle	Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes (DWD)
Bezeichnung der Variablen	„TMK“
Daten-Periode (Auswertung)	01.01.1991 bis 31.12.2018
Link zu den Messdaten	https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/
Beschreibung der Messgrößen	https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/BESCHREIBUNG_obsgermany_climate_daily_kl_historical_de.pdf
Liste der Stationen	https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/KL_Tageswerte_Beschreibung_Stationen.txt
Daten-Download (für den vorliegenden Bericht)	11.07.2019

1.2 Monatswerte der Außenlufttemperatur und der Heiztage je Wetterstation (Datentabelle „Data.TA.HD“)

Die Tagesmittel der Außenlufttemperatur werden je Monat gemittelt, wobei drei verschiedene Grenztemperaturen als Kriterien für die Mittelwertbildung berücksichtigt werden. Weiterhin werden die vorhandenen und berücksichtigten Werte pro Monat gezählt. Die Analyseergebnisse differenziert nach Wetterstation und Monat des Auswertezeitraums finden sich in der Tabelle „Data.TA.HD“ in der Arbeitsmappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“. Neben der ID der Wetterstation (Nummerierung des DWD) werden auch die geografischen Koordinaten angegeben.

In der Tabelle finden sich die folgenden Größen – die Bezeichnung entspricht den jeweils im Datenfeld (Spalte) "Code_Quantity" angegebenen Codes:

Tab. 2: Temperaturauswertungen in der Tabelle „Data.TA.HD“ der Arbeitsmappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“

Code*	Größe	Einheit	Heizgrenz-temperatur	Erläuterung
"TA"	Außenlufttemperatur (Mittelwert über die Tageswerte je Monat)	[° C]	-	-
"TA_10"		[° C]	10 ° C	Bedingung für die Mittelwertbildung: tägliche Temperatur gleich oder unter der Heizgrenztemperatur
"TA_12"		[° C]	12 ° C	
"TA_15"		[° C]	15 ° C	
"HD10"	Anzahl der Heiztage je Monat	[d]	10 ° C	Bedingung für die Summation: tägliche Temperatur gleich oder unter der Heizgrenztemperatur
"HD12"		[d]	12 ° C	
"HD15"		[d]	15 ° C	
"D"	Anzahl der Tage des Kalendermonats	[d]		
"CT"	Vollständigkeit der Temperaturdaten	[d / d]		Bruchteil der Tage des Monats, für die Temperaturen verfügbar sind

*) Codierung abgeleitet aus den englischen Begriffen
TA: Air temperature
HD: Heating days
D: Days
CT: Completeness of temperature data

Die Messdaten der Wetterstationen sind im Datenfeld "Code_DataType" mit „MET“ (für „metered“) gekennzeichnet. Weiterhin sind auch Standardwerte bzw. Daten aus deutschen Normen mit enthalten (ohne Bezug zu Messjahren), für die in dieser Spalte "STD" eingetragen ist.

In den Datentabellen des DWD sind fehlende Tageswerte der Außenlufttemperatur mit -999 gekennzeichnet. Bei der Mittelwertbildung der Temperatur und Summation von Heiztagen je Monat wurden diese Werte nicht berücksichtigt. Die je Monat fehlenden Tage werden im Vollständigkeitsindikator (Größe „CT“) je Station registriert, der das Verhältnis zwischen der Anzahl der vorhandenen Temperaturwerte und der Anzahl der Tage des Monats wiedergibt.[1]

Für die Anzahl der Heiztage „HD10“, „HD12“ und „HD15“ ist zu beachten, dass die Tabelle „Data.TA.HD“ die tatsächlich gemessenen unkorrigierten Werte enthält. Ist der Indikator „CT“ für einen Monat kleiner als 1 **muss für die Ermittlung eines realistischen Wertes der Heiztage je Monat eine Korrektur vorgenommen werden, bei der die erfassten Heiztage auf die vorhandenen Messwerte je Monat bezogen werden**. In der Arbeitsmappe erfolgt diese Korrektur im Blatt „Calc.Evaluation“ (siehe nächster Abschnitt).

[1] Beispiel: Außenlufttemperaturdaten für Dezember 2017 der Station 5097: Die DWD-Tabelle enthält für 10 von 31 Tagen den Eintrag -999. Da nur 21 Temperaturwerte für den Monat zur Verfügung stehen ist der Vollständigkeitsindikator in diesem Fall 21/31 = 0,68 .

1.3 Ermittlung von Gradtagzahlen bzw. Heizgradtagen und Zuordnung zu Postleitzahlen (Blätter „Tab.StationMapping“, "Calc.Evaluation", "UserForm")

Die zentrale Stelle für die Ermittlung der Gradtagzahlen bzw. Heizgradtage im Excel-Tool „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“ ist die Tabelle "Calc.Evaluation". Die entsprechenden Umformungen werden hier für jeweils eine ausgewählte Postleitzahl vorgenommen.

Die folgenden Operationen werden dort grundsätzlich für alle zur Verfügung stehenden Monate ausgeführt:

- Zuordnung von einer oder alternativ drei Wetterstationen zur ausgewählten Postleitzahl
- Im Fall der Zuordnung von drei Wetterstationen wird eine Mittelwertbildung durchgeführt, bei der mit der reziproken Entfernung zwischen dem Zentrum des Postleitzahlengebiets und den Wetterstationen (geografische Koordinaten) gewichtet wird. Hierfür werden nur die Stationen herangezogen, deren Messzeiträume den im Blatt „UserForm“ definierten Auswertezeitraum von 12 Monaten umfassen. Für die Ermittlung der Entfernung aus den Geokoordinaten wird vereinfacht mit den Faktoren 71,44 km je Grad geografischer Länge und 111,13 km je Grad geografischer Breite gerechnet.
- Enthält der Messzeitraum unvollständige Monate wird eine Schätzung der Heiztage mit Hilfe der Vollständigkeitsinformationen vorgenommen. Die Zahl der erfassten Heiztage wird mit dem Verhältnis der Tage des Kalendermonats zur Anzahl der vorhandenen Messdaten je Monat multipliziert (dabei wird wegen möglicher Rundungsfehler das Ergebnis auf die Anzahl der Tage des Kalendermonats nach oben begrenzt).
- Die Heizgradtage und die Gradtagzahl werden auf dieser Grundlage jeweils für die Heizgrenztemperaturen 10, 12, und 15 °C und im Fall der Gradtagzahl für einen frei einzugebenden Wert der Raumtemperatur bestimmt.

Die Heizgradtage und die Gradtagzahl werden entsprechend den folgenden Definitionen verwendet:

- Heizgradtage ("HDD" für „Heating Degree Days“): Summe der Differenzen zwischen der Heizgrenztemperatur und dem Tagesmittel der Außenlufttemperatur, wenn das Tagesmittel der Außenlufttemperatur unter der Heizgrenztemperatur liegt.
- Gradtagzahl ("RHDD" für „Room Heating Degree Days“): Summe der Differenzen zwischen der Raumtemperatur und der täglichen Durchschnittstemperatur, wenn die tägliche Durchschnittstemperatur unter der Heizgrenztemperatur liegt.

Im Blatt "UserForm" wird ein Zeitraum von 12 aufeinanderfolgenden Monaten ausgewählt für die die Ergebnisse tabellarisch dargestellt werden sollen. Für den Fall unvollständiger Messdaten werden hier noch Kriterien für die Ausgabe von Ergebnissen angewendet: Wenn die Extrapolation mehr als 20 zusätzliche Heiztage liefert oder die Heiztage eines Jahres um mehr als 25% erhöht, wird kein Ergebnis ausgegeben. Diese beiden Schwellen sind Default-Werte und können in der Rechenmappe geändert werden.

1.4 Höhenkorrektur

In den bergigen Regionen kann die Höhe der Gebäudestandorte deutlich von den Höhen der Klimastationen abweichen (insbesondere da Messstationen häufig in höheren Lagen oder Gipfeln aufgestellt werden). Es ist daher eine pauschale Korrektur der Höhe vorgesehen – für den Koeffizienten ist im Realklima-Tool ein Standardwert von 0,5 K / 100 m eingetragen, der bei Bedarf auch geändert werden kann. Grundlage der Höhenkorrektur sind die Höhen über NN – und zwar die Differenz zwischen dem Wert für den Gebäudestandort und der zugeordneten Klimastation bzw. dem gewichteten Mittelwert der zugeordneten nächsten drei Klimastationen.

1.5 Schätzung der Zahl der Heiztage (Option bei Verwendung anderer Datenquellen)

Im Realklima-Tool stehen tabellarisch neben den mittleren Monatstemperaturen auch die aus den Tagesdaten des DWD ermittelte Zahl der Heiztage je Monat zur Verfügung. Es gibt jedoch auch Datenquellen, die nur die mittleren Monatstemperaturen enthalten. Damit diese auch für die Heizperiodenbilanz genutzt werden können, wurde folgende Schätzfunktion für die Zahl der Heiztage je Monat abgeleitet (Beschreibung siehe Anhang C).

(1) $$\hat{d}_{HD,m} = \hat{f}_{m,HD} \cdot d_m \qquad [\,-\,]$$

mit

$\hat{d}_{HD,m}$	Schätzwert für die Anzahl der Heiztage im Monat m	[d]
d_m	Gesamtzahl der Tage des Monats m	[d]

Der Schätzwert der Anteil der Heiztage eines Monats $\hat{f}'_{m,HD}$ hängt von der Differenz zwischen Monatsmitteltemperatur und Heizgrenztemperatur ab und kann nur Werte von 0 und 1 annehmen.

(2) $$\hat{f}'_{m,HD} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (\bar{\vartheta}_{e,m} - \vartheta_b) \qquad [\,-\,]$$
$$\hat{f}_{m,HD} = \min\left(\max\left(\hat{f}'_{m,HD}, 0\right), 1\right)$$

mit

$\hat{f}_{m,HD}$	Schätzwert für den Anteil der Heiztage an der Gesamtzahl der Tage des Monats m	[-]
$\bar{\vartheta}_{e,m}$	mittlere Außenlufttemperatur des Monats m	[°C]
ϑ_b	Heizgrenztemperatur (*base temperature)*	[°C]
β_0	= 0,0485 (Regressionskoeffizient)	
β_1	= -0,082 (Regressionskoeffizient)	

Die relative Unsicherheit dieser Schätzung liegt bei 3,3% (siehe Anhang C.4).

2 Globalstrahlung

Insbesondere bei wenig verschatteten, besser gedämmten Gebäuden hat die solare Einstrahlung während der Heizzeit einen deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch. Für die Bewertung des Verbrauchs derartiger Gebäude werden daher auch Informationen über die solare Einstrahlung im Verbrauchsjahr am Standort benötigt. Die Daten sind darüber hinaus für die realistische Bilanzierung von thermischen Solaranlagen und PV-Anlagen geeignet.

2.1 Datenquelle

Als Datenquelle werden auf Satellitendaten basierende Globalstrahlungswerte (kurzwellige Strahlung) von CM SAF / EUMETSAT verwendet (siehe Tab. 3).

Tab. 3: Quelle für die in den Analysen verwendeten Globalstrahlungsdaten

Datenquelle	EUMETSAT / Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF) des Deutschen Wetterdienstes (DWD)
Bezeichnung der Variablen	“SIS” (Surface incoming shortwave radiation)
zeitliche Auflösung	Monatsmittelwerte
räumliche Auflösung	Daten-Download: 0.05° x 0.05° Daten-Bereitstellung im Excel-Tool: 0.2° x 0.2° (geogr. Breite x Länge)
Daten-Periode (Auswertung)	01.01.1991 bis 31.12.2018
Link zu den Messdaten	www.cmsaf.eu
Daten-Download (für den vorliegenden Bericht)	15.08.2019

2.2 Monatswerte der Globalstrahlung horizontal (Datentabelle „Data.Sol“) und Zuordnung zu Postleitzahlen

Von CM SAF wurden die Daten je Monat in einer Tabelle bereitgestellt, die bei einer Rasterauflösung von 0,05° (Breite x Länge) die mittleren Globalstrahlungswerte auf die Horizontale liefern. Für die Verwendung in der Arbeitsmappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“ wurden diese Daten in das gleiche Format transformiert wie die Temperaturdaten (Tabelle „Data.Sol“). Je Geo-Raster-Element gibt es so eine Zeile in der sukzessive die Monatsdaten aufgelistet sind. Zur Begrenzung der Dateigröße wurde die räumliche Auflösung auf 0,2 x 0,2° verringert. Dies entspricht etwa einer Rasterauflösung von 14 x 22 km (Ost-West- x Nord-Süd-Richtung) – die Anzahl der Datenpunkte je Monat liegt damit bei 3136.

Tab. 4: Globalstrahlungsdaten in der Tabelle „Data.Sol“ der Arbeitsmappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“

Code*	Größe	Einheit
"I_Hor"	solare Globalstrahlung (kurzwellige Einstrahlung), auf horizontale Flächen, monatlicher Mittelwert	[W/m²]
"D"	Anzahl der Tage des Kalendermonats	[d]

*) Codierung abgeleitet aus den englischen Begriffen
I_Hor: Global horizontal irradiance
CT: Completeness of temperature data

Die Zuordnung der Strahlungsdaten zu einer gegebenen Postleitzahl erfolgt entsprechend ihrer Geokoordinaten (kleinster Abstand, realisiert durch Rundung der PLZ-Geokoordinaten auf 0,2° Auflösung).

2.3 Schätzung der monatlichen Globalstrahlung auf vertikale und geneigte Flächen

Die lokalen Daten der kurzwelligen solaren Einstrahlung je Monat dienen der realistischen Abschätzung der passiven und der aktiven Solarenergienutzung. Daher werden neben der Globalstrahlung auf horizontale Flächen auch Daten für die Einstrahlung auf vertikale und geneigte Flächen benötigt. Da diese in der benötigten räumlichen Auflösung nicht als Messdaten bereitstehen, muss auf Schätzungen zurückgegriffen werden. Die entsprechenden Schätzformeln wurden auf der Grundlage der Analyse von Stundenwerten der Globalstrahlung für 30 Stationen abgeleitet (siehe Anhang A).

Die in Anhang A hergeleitete Schätzformel lautet:

(3)
$$\hat{g}_{ab,m} = e^{\beta_{ab,0}+\beta_{ab,1}\cdot\ln(f_{ab,m}\cdot g_{hor,m})} = e^{\beta_{ab,0}} \cdot \left(f_{ab,m} \cdot g_{hor,m}\right)^{\beta_{ab,1}} \quad [\text{kWh/m²}]$$

mit	$\hat{g}_{ab,m}$	geschätzter Monatswert der Globalstrahlung auf eine Fläche mit Neigung a und Orientierung b	[kWh/m²]
	$g_{hor,m}$	Monatswert der Globalstrahlung auf horizontale Fläche	[kWh/m²]
	$\beta_{ab,0}$, $\beta_{ab,1}$	Regressionskoeffizienten für die Kombination aus Neigung a und Orientierung b	[-]
	$f_{ab,m}$	Korrekturfaktor für die Kombination aus Neigung a und Orientierung b, abhängig vom Index des Monats m	[-]

Die auf die einzelnen Monate wirkende Korrekturfunktion ist wie folgt angesetzt:

(4)
$$f_{ab,m} = 1 + u_{ab} \cdot \sin\left(\frac{m - 0{,}5}{12} \cdot \pi\right)$$

mit	u_{ab}	Koeffizient für die Kombination aus Neigung a und Orientierung b	[-]
	m	Index des Monats { 1 … 12 }	[-]

Tab. 5 zeigt die durch Regression je Orientierung und Neigung hergeleiteten Parameter für die Schätzformel.

Tab. 5: Koeffizienten für die Schätzung der monatlichen Globalstrahlung auf vertikale und geneigte Flächen (Verwendung der monatlichen Globalstrahlung auf horizontale Flächen als unabhängige Variable der Schätzfunktion)

Abk.	Orientierung b	Grad Neigung a [°]	Koeffizienten der Schätzformel		
			$\beta_{ab,0}$	$\beta_{ab,1}$	u_{ab}
Hor	(Horizontal)	0			
NO 30	Nord-Ost	30	-0,70	1,10	0,00
NO 45	Nord-Ost	45	-0,63	1,06	0,00
NO 60	Nord-Ost	60	-0,59	1,03	0,00
NO 90	Nord-Ost	90	-0,69	1,01	0,00
O 30	Ost	30	-0,12	1,02	0,00
O 45	Ost	45	-0,11	1,01	0,00
O 60	Ost	60	-0,13	1,00	0,00
O 90	Ost	90	-0,27	0,99	0,00
SO 30	Süd-Ost	30	0,60	0,90	0,00
SO 45	Süd-Ost	45	0,82	0,85	0,00
SO 60	Süd-Ost	60	0,98	0,81	0,00
SO 90	Süd-Ost	90	0,00	1,15	-0,63
S 30	Süd	30	0,92	0,84	0,00
S 45	Süd	45	0,19	1,17	-0,61
S 60	Süd	60	0,29	1,16	-0,66
S 90	Süd	90	0,28	1,15	-0,75
SW 30	Süd-West	30	0,67	0,88	0,00
SW 45	Süd-West	45	0,92	0,83	0,00
SW 60	Süd-West	60	0,19	1,12	-0,57
SW 90	Süd-West	90	0,20	1,09	-0,63
W 30	West	30	-0,01	1,00	0,00
W 45	West	45	0,03	0,98	0,00
W 60	West	60	0,03	0,96	0,00
W 90	West	90	-0,09	0,94	0,00
NW 30	Nord-West	30	-0,64	1,08	0,00
NW 45	Nord-West	45	-0,55	1,04	0,00
NW 60	Nord-West	60	-0,50	1,01	0,00
NW 90	Nord-West	90	-0,62	0,99	0,00
N 30	Nord	30	-0,67	1,07	0,00
N 45	Nord	45	-0,30	0,95	0,00
N 60	Nord	60	-0,03	0,86	0,00
N 90	Nord	90	-0,14	0,85	0,00

22-10-2019

Die Unsicherheit der einzelnen Schätzwerte der monatlichen Globalstrahlung für nicht-horizontale Orientierungen liegt bei etwa ±12% (siehe Anhang A.5).

2.4 Schätzung der monatlichen Globalstrahlung an Heiztagen

Für das Monatsbilanzverfahren nach EN 13790, DIN V 4108-6 oder DIN V 18599 sind die in den Datentabellen enthaltenen Monatswerte der solaren Einstrahlung ausreichend, da die Abschätzung des an Heiztagen nutzbaren Anteils der Strahlung verfahrensintern erfolgt. Für die einfache Heizperiodenbilanz wird die Globalstrahlung an Heiztagen als Eingabegröße benötigt. Da diese im Realbilanz-Tool nicht bereitstehen, wird ein Schätzverfahren zur Ermittlung des Anteils der auf Heiztage entfallenden Globalstrahlung jeden Monats verwendet. Dies erfolgt in der Arbeitsmappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“ auf der Grundlage der Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15 °C. Bei der Anwendung der Klimadaten in der Heizperiodenbilanz muss sowohl für die Temperaturdaten als auch für die Globalstrahlungsdaten jeweils die gleiche Heizgrenztemperatur verwendet werden.

Die Schätzfunktion für die an Heiztagen anfallende Globalstrahlung bei bekannter monatlicher Globalstrahlung geht zunächst von dem Anteil der Heiztage an der Länge des Monats aus, wobei zusätzlich ein Korrekturfaktor $f_{Sol,HD,m}$ angewendet wird:

(5)
$$\hat{g}_{ab,HD,m} = f_{Sol,HD,m} \cdot \frac{d_{HD,m}}{d_m} \cdot g_{ab,m} \quad [\text{kWh/m²}]$$

mit	$g_{ab,m}$	Globalstrahlung auf eine Fläche mit Orientierung b und Neigung a für den Monat m	[kWh/m²]
	$d_{HD,m}$	Anzahl der Heiztage des Monats m	[d]
	d_m	Anzahl der Tage des Monats m	[d]

Der Korrekturfaktor $f_{Sol,HD,m}$ berücksichtigt, dass für einen Monat der Übergangszeit, dessen Tagesmitteltemperaturen sowohl über als auch unter der Heizgrenztemperatur liegen, der Monatswert der Globalstrahlung an Heiztagen etwas geringer ist als der Mittelwert der Globalstrahlung des Monats[2]:

(6)
$$f_{Sol,HD,m} = 1 - p_{Sol,HD}\left(1 - \frac{d_{HD,m}}{d_m}\right) \quad [\text{ - }]$$

mit	$p_{Sol,HD}$	= 0,19 (empirisch ermittelter Parameter, siehe Anhang B)	[-]

Der Wert des Parameters $p_{Sol,HD} = 0{,}19$ wurde mit einer Parameterstudie ermittelt (siehe Anhang B).

Diese Schätzformel wurde auf der Basis der oben genannten Klimadaten für 30 Stationen und 5 Jahre hergeleitet, für die die Globalstrahlung sowie die Temperaturen auf Tagesbasis vorlagen. Im Anhang B sind die je Orientierung und Neigung ermittelten Korrekturfaktoren dargestellt. Da die Unterschiede nur gering sind, wird zur Vereinfachung in der Excel-Mappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“ für alle Orientierungen und Neigungen der gleiche Korrekturterm verwendet: $p_{Sol,HD} = 0{,}19$

Die Unsicherheit der Schätzung der Globalstrahlung an Heiztagen liegt bei etwa 3% (siehe Anhang B.4). Wird die Zahl der Heiztage auch geschätzt (siehe Kapitel 1.5), dann liegt die kombinierte Unsicherheit bei etwa 6,0% (siehe Anhang C.5).

[2] Anschaulich heißt dies, dass bei gegen Null gehender Heiztagezahl der Anteil der Globalstrahlung an einem Heiztag 81% (=1-0,19) des Mittelwerts des Monats beträgt (siehe Diagramme in Bild 23).

3 Exemplarische Anwendung und Abschätzung der Unsicherheiten

3.1 Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den über 5 Jahre in 30 Messstationen ermittelten detaillierten Klimadaten

Um die Schätzmechanismen des Realklima-Tools zu überprüfen, wurden für die in Anhang A.2 beschriebenen 30 Messstationen die Postleitzahlen bestimmt und für diese mit dem Tool für die betreffenden 5 Jahre die Klimadaten ausgegeben.[3] Es handelt es sich um eine Plausibilisierung bzw. Prüfung der folgenden Mechanismen (teilweise in Kombination):

- räumliche Zuordnung der Messdaten zu den Postleitzahlen;
- Höhenkorrektur der Temperaturdaten;
- Schätzung der Globalstrahlung auf nicht-horizontale Flächen;
- Schätzung der Globalstrahlung an Heiztagen

Da in den Temperaturdaten des Realklima-Tools die 30 Prüfstationen enthalten sind, werden hier jeweils zwei Überprüfungen vorgenommen:

- Test inklusive Prüfstationen (Prüfung der Plausibilität);
- Test ohne Prüfstationen (Prüfung der Genauigkeit).

Die verschiedenen Tests liefern Anhaltspunkte für die Genauigkeit des Tools und seiner Mechanismen. Die Diagramme zeigen generell eine gute Übereinstimmung zwischen den am Standort gemessenen und mit dem Tool geschätzten Klimadaten.

Dabei ist für die Jahresmittel der Außentemperatur festzustellen, dass die Höhenkorrektur eine erhebliche Verbesserung der Übereinstimmung bringt – insbesondere für die Standorte mit tieferen Temperaturen (Bild 1(f) im Vergleich zu (e)). Die Höhenkorrektur funktioniert allerdings nicht so gut für die mittlere Temperatur an Heiztagen (Bild 2(f) im Vergleich zu (e)), vermutlich weil die Länge der Heizzeit nicht entsprechend korrigiert wird. Diese wenigen, aber starken Abweichungen werden auch in dem Vergleich der Heizzeiten deutlich (Bild 3(f) im Vergleich zu (e)). Für die Zukunft wäre es wünschenswert, auch hierfür eine entsprechende Korrektur vornehmen zu können (Forschungsbedarf).

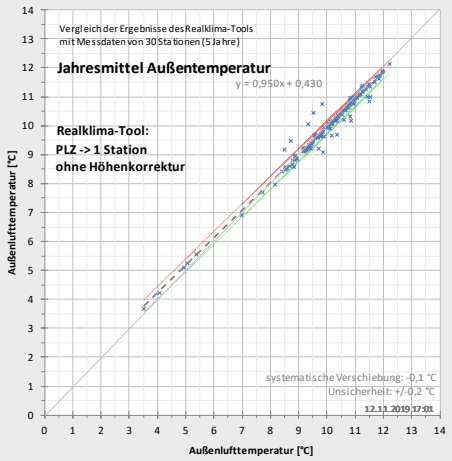
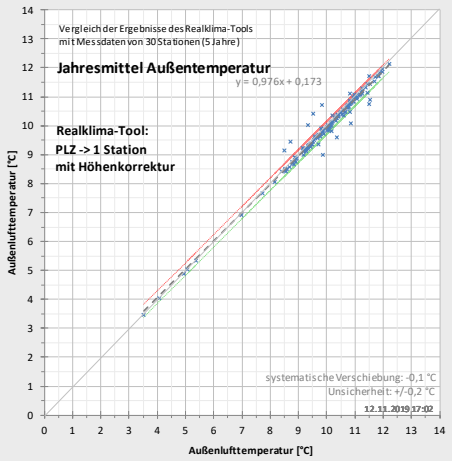
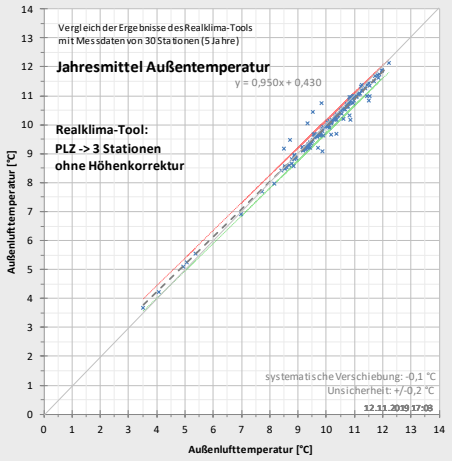
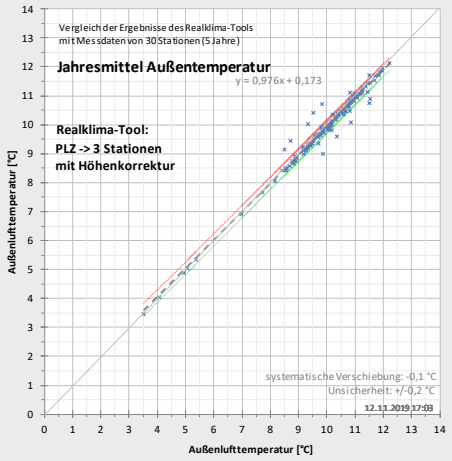
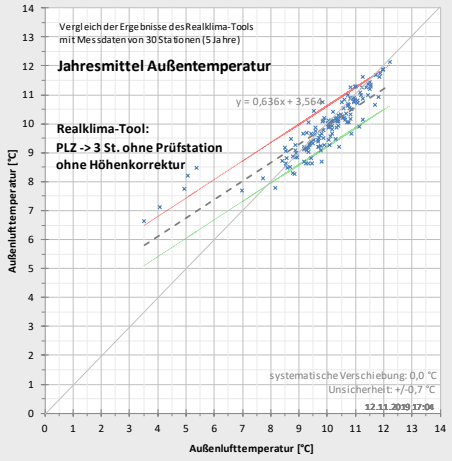
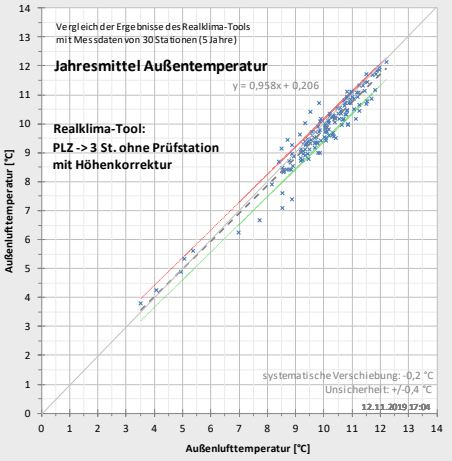
Bei der Globalstrahlung (Jahr und Heizzeit) ergibt sich erwartungsgemäß die beste Übereinstimmung bei der horizontalen Strahlung (Bild 4, Bild 5 und Bild 6). Bei den anderen Orientierungen ist die Güte der Schätzung unterschiedlich, im Fall von „vertikal Süd“ ist die Übereinstimmung am besten.

Die ermittelten relativen Standardabweichungen sind in Abschnitt 3.2 dokumentiert.

[3] Für diese Stapelverarbeitung (Laden von Eingabedaten in das Realklima-Tool und Ablegen der ermittelten Klimadaten in eine Tabelle) wurde das IWU-Tool „DataBoy.xlsm“ verwendet (Download auf der IWU-Website www.iwu.de).

3.1.1 Jahresmittel der Außenlufttemperatur

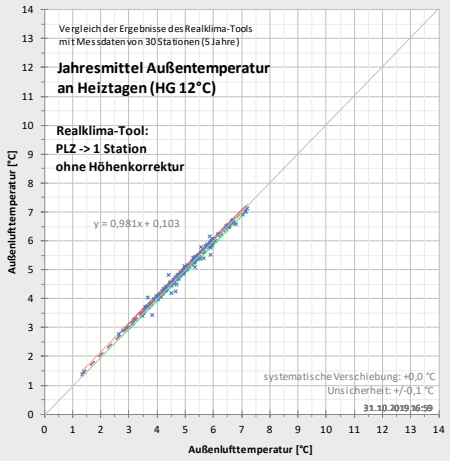
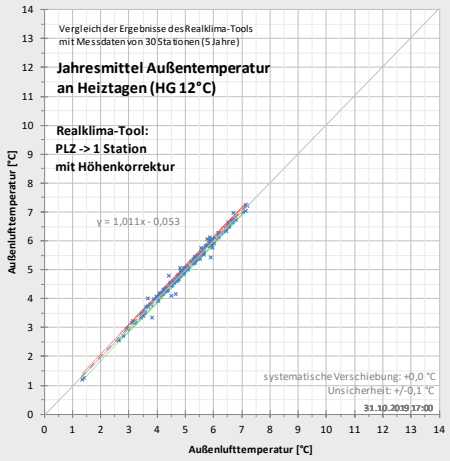
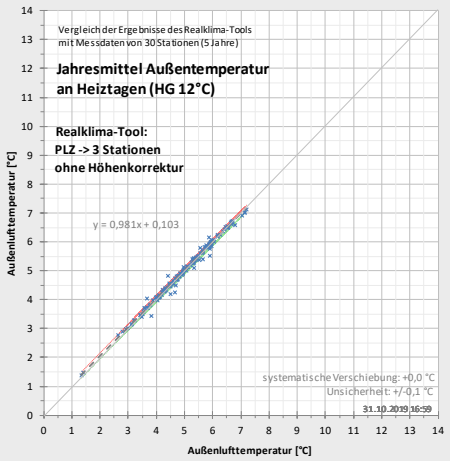
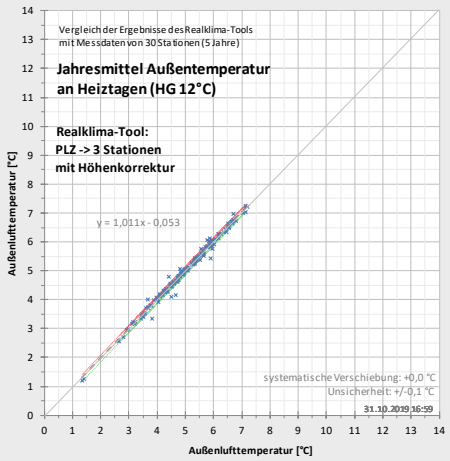
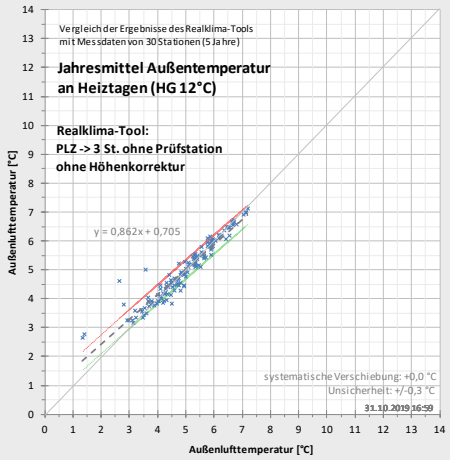
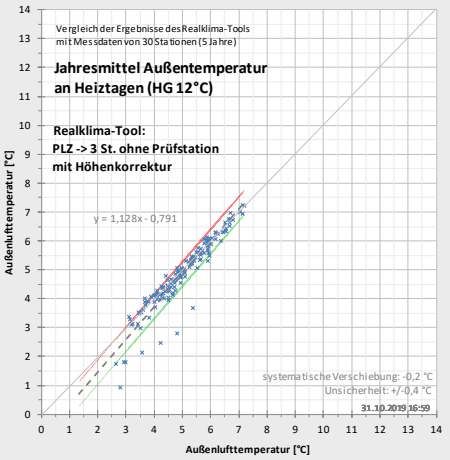
Bild 1: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools (y-Achse) mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten (x-Achse): Jahresmittel der Außenlufttemperatur

	ohne Höhenkorrektur	mit Höhenkorrektur
Plausibilität: 1 Station	 (a)	 (b)
Plausibilität: 3 Stationen	 (c)	 (d)
Genauigkeit*: 3 Stationen ohne Prüfstation	 (e)	 (f)

*) Genauigkeit der Schätzung: Bei der Ermittlung der drei nächstgelegenen Stationen wird die Prüfstation nicht berücksichtigt.

3.1.2 Jahresmittel der Außenlufttemperatur an Heiztagen (Heizgrenztemperatur 12°C)

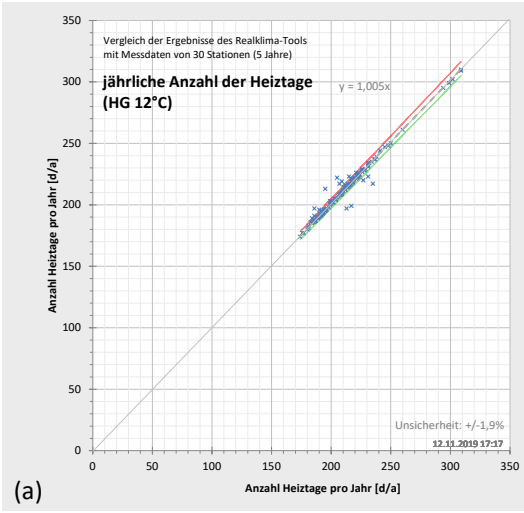
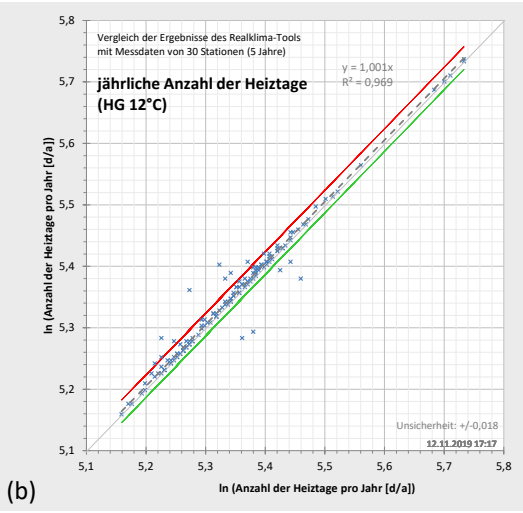
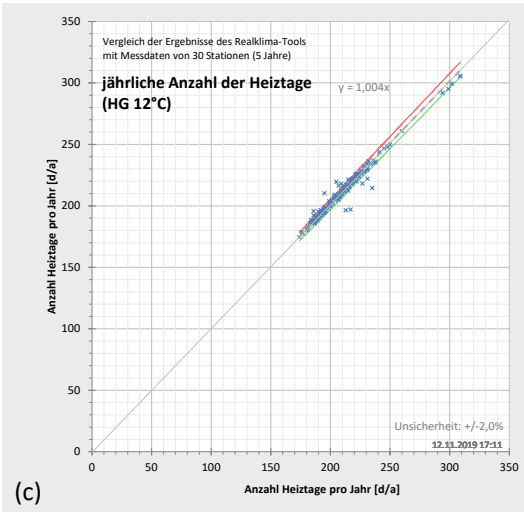
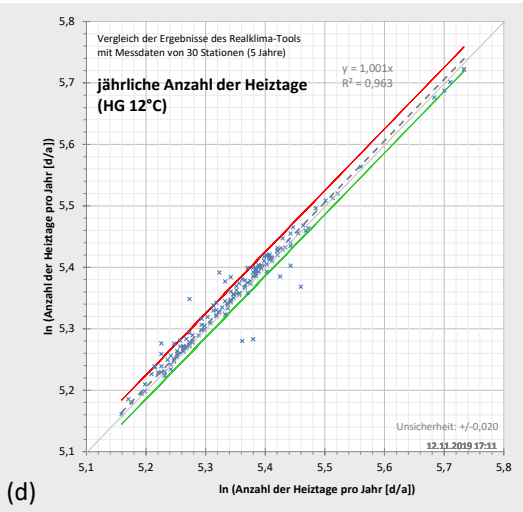
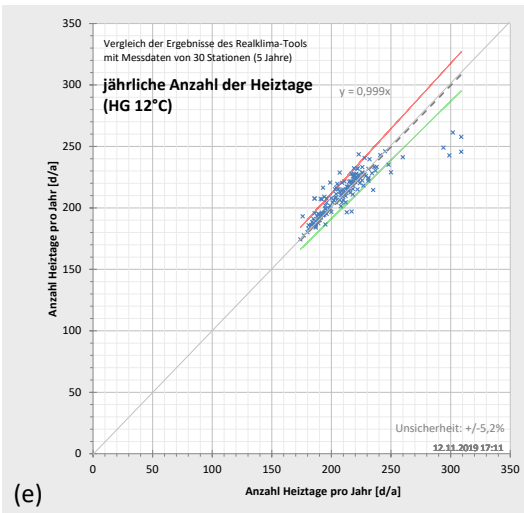
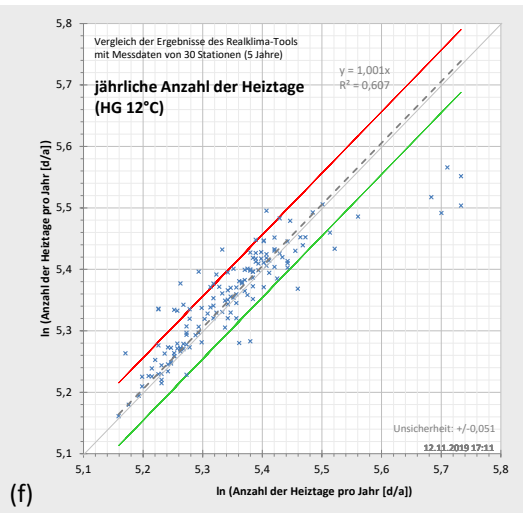
Bild 2: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools (y-Achse) mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten (x-Achse: Jahresmittel der Außenlufttemperatur an Heiztagen (Heizgrenztemperatur 12°C)

	ohne Höhenkorrektur	mit Höhenkorrektur
Plausibilität: 1 Station	 (a)	 (b)
Plausibilität: 3 Stationen	 (c)	 (d)
Genauigkeit*: 3 Stationen ohne Prüfstation	 (e)	 (f)

*) Genauigkeit der Schätzung: Bei der Ermittlung der drei nächstgelegenen Stationen wird die Prüfstation nicht berücksichtigt.

3.1.3 Anzahl der Heiztage pro Jahr

Bild 3: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Anzahl der Heiztage

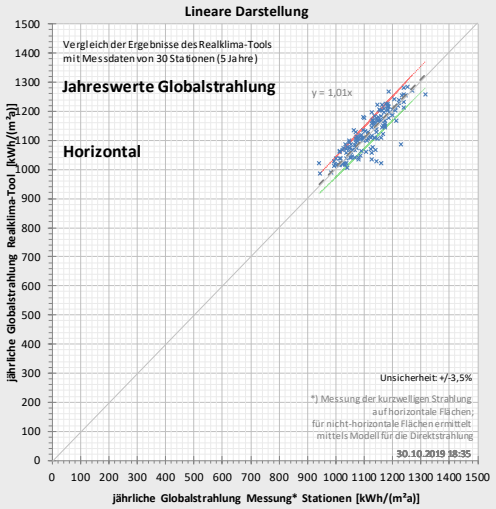
	lineare Darstellung	logarithmische Darstellung
Plausibilität: 1 Station	 (a)	 (b)
Plausibilität: 3 Stationen	 (c)	 (d)
Genauigkeit*: 3 Stationen ohne Prüfstation	 (e)	 (f)

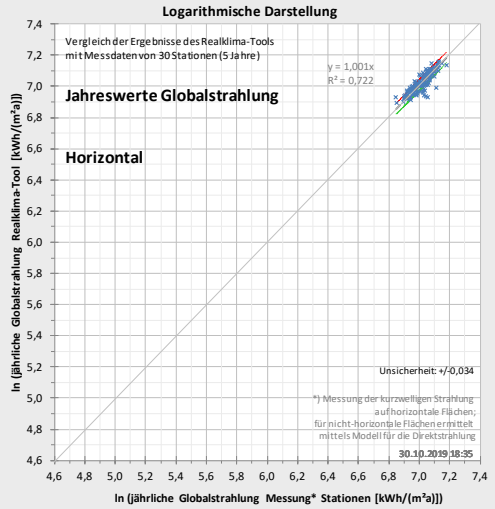
*) Genauigkeit der Schätzung: Bei der Ermittlung der drei nächstgelegenen Stationen wird die Prüfstation nicht berücksichtigt.

3.1.4 Globalstrahlung ganzjährig

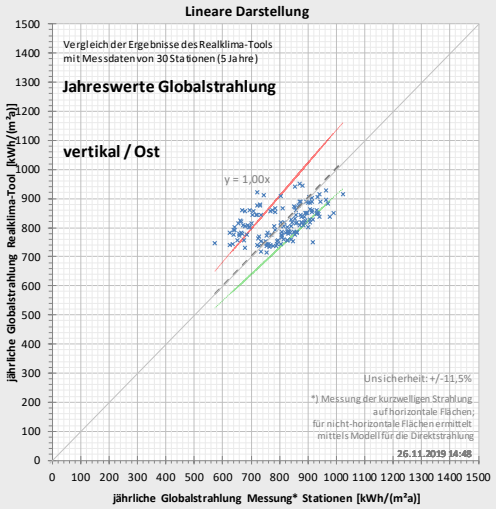
Bild 4: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Jahreswerte Globalstrahlung (folgende Seiten)

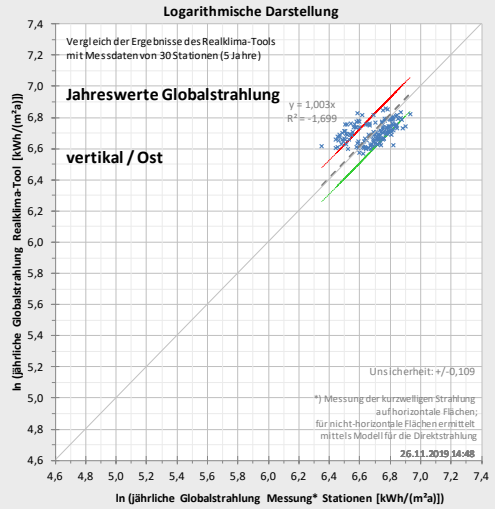
Hor



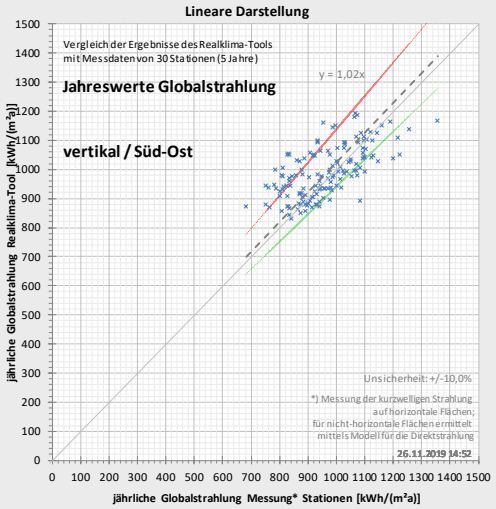


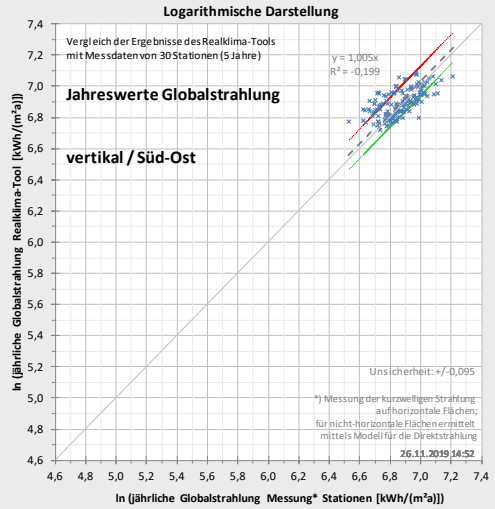
O 90°



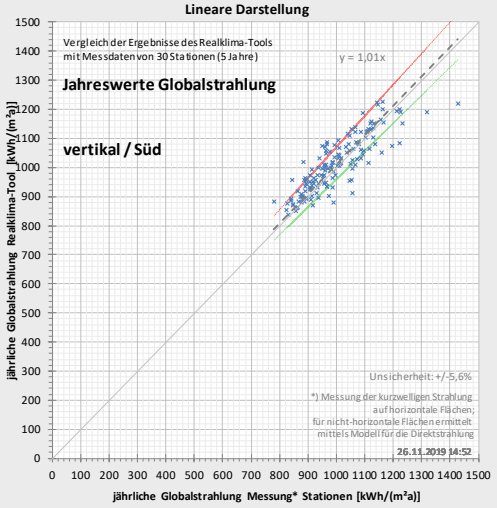


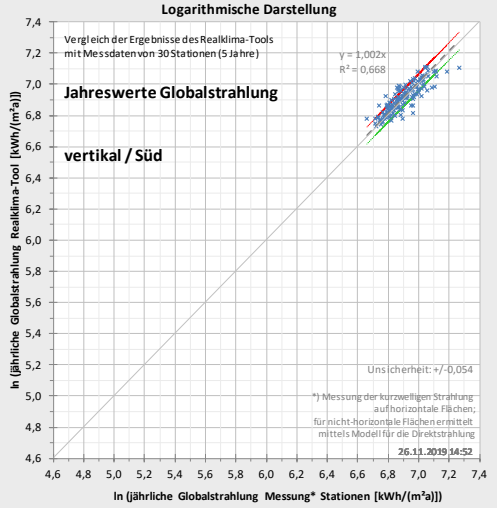
SO 90°



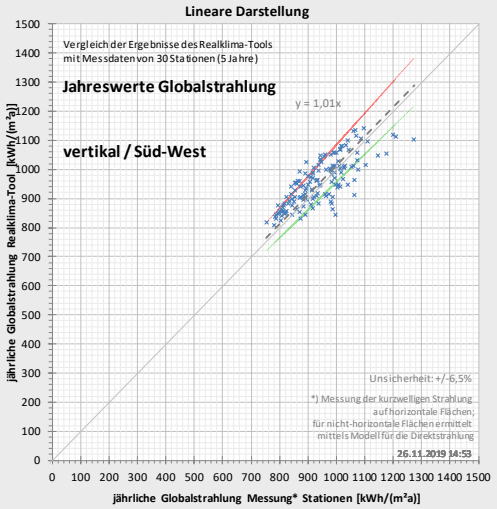


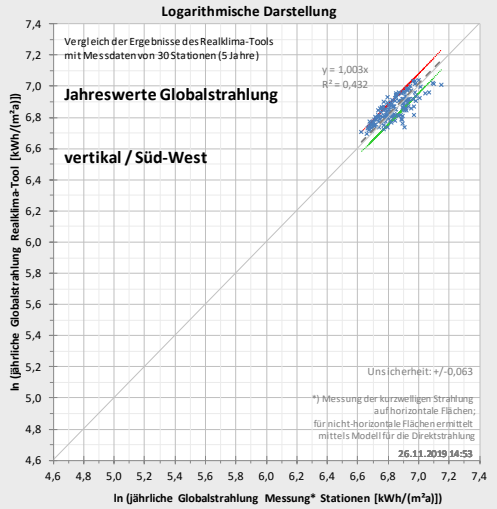
S 90°


Lineare Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
vertikal / Süd
y = 1,01x
Unsicherheit: +/-5,6%
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 14:52
jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)]
jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)]

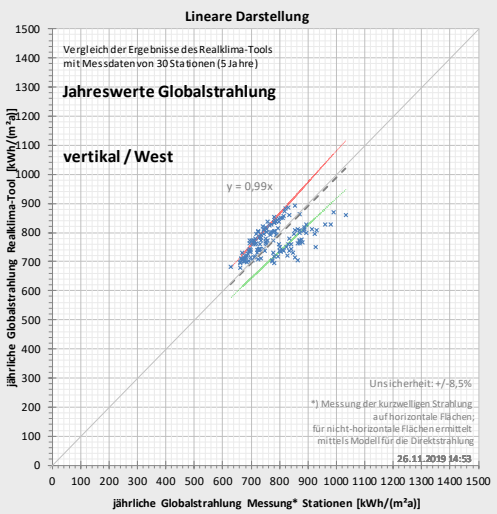

Logarithmische Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
vertikal / Süd
y = 1,002x
R² = 0,668
Unsicherheit: +/-0,054
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 14:52
ln (jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)])
ln (jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)])

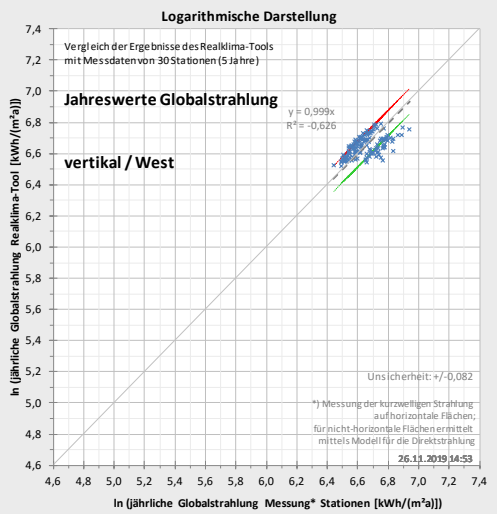
SW 90°


Lineare Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
vertikal / Süd-West
y = 1,01x
Unsicherheit: +/-6,5%
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 14:53
jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)]
jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)]

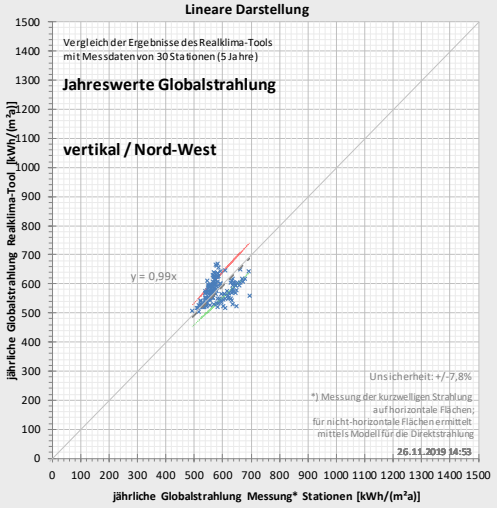

Logarithmische Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
vertikal / Süd-West
y = 1,003x
R² = 0,432
Unsicherheit: +/-0,063
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 14:53
ln (jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)])
ln (jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)])

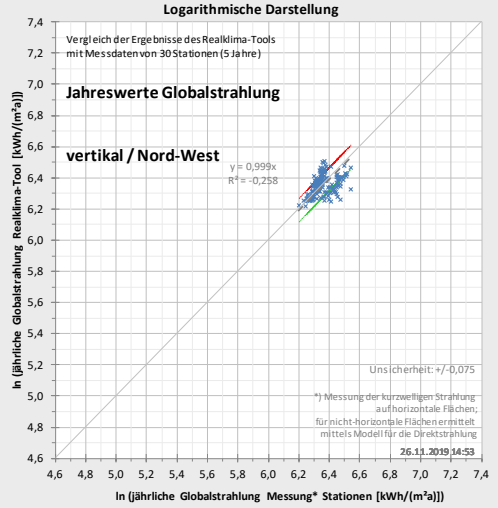
W 90°


Lineare Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
vertikal / West
y = 0,99x
Unsicherheit: +/-8,5%
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 14:53
jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)]
jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)]

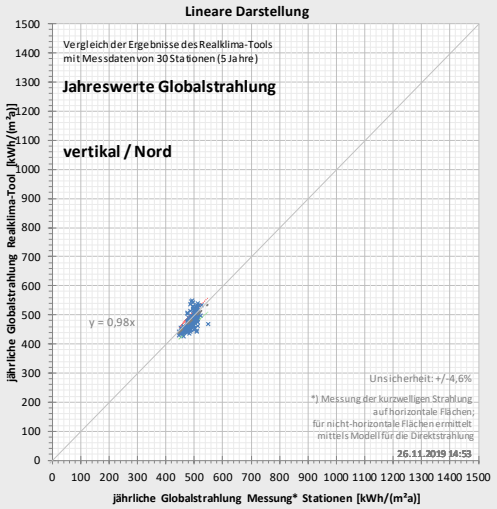

Logarithmische Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
vertikal / West
y = 0,999x
R² = -0,626
Unsicherheit: +/-0,082
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 14:53
ln (jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)])
ln (jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)])

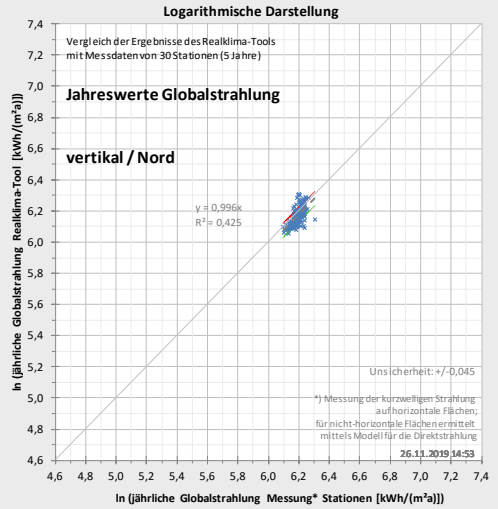
NW 90°



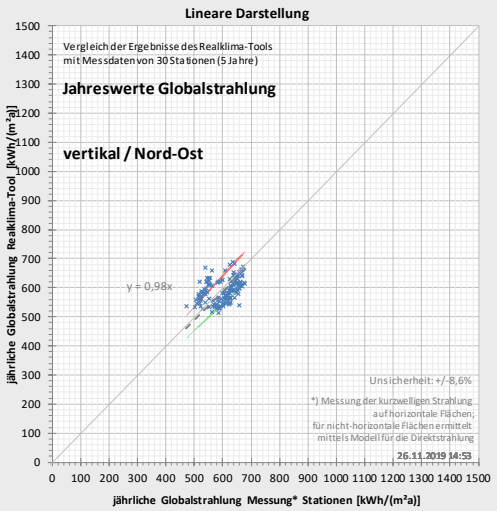


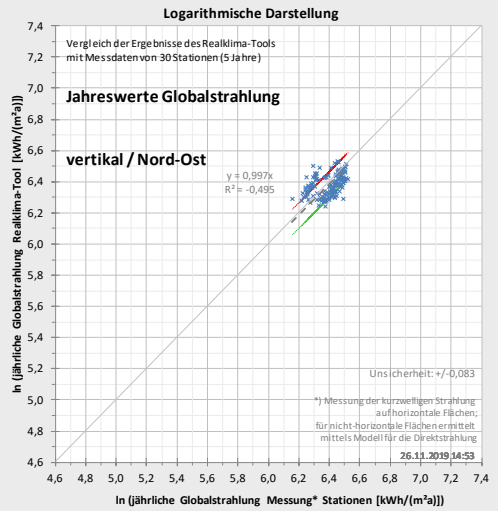
N 90°





NO 90°

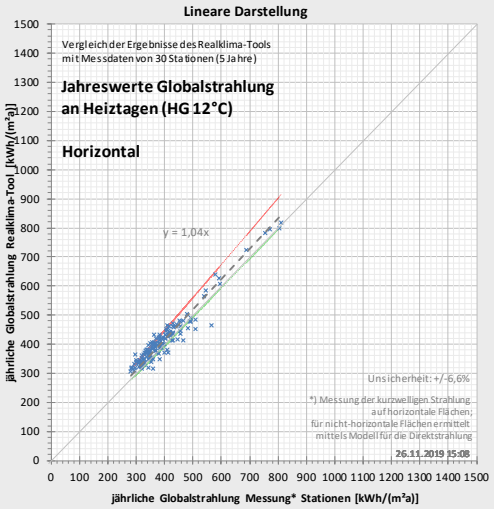


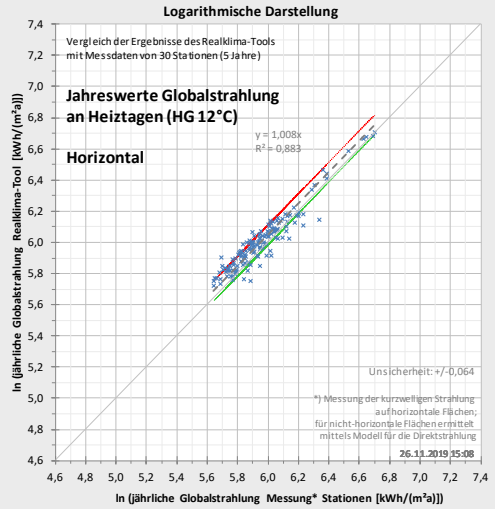


3.1.5 Globalstrahlung an Heiztagen

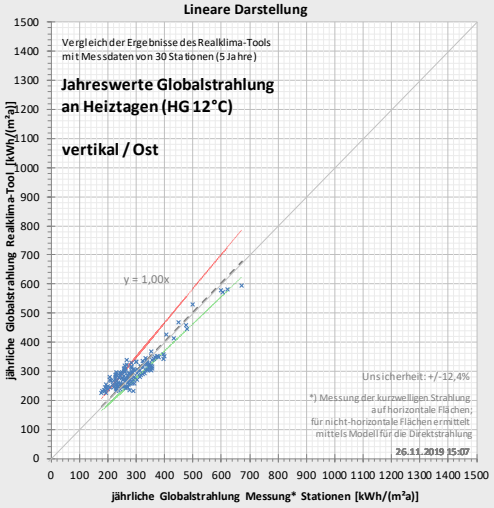
Bild 5: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Jahreswerte Globalstrahlung an Heiztagen

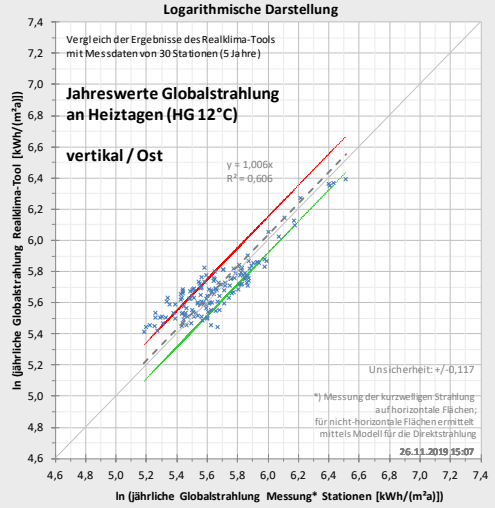
Hor



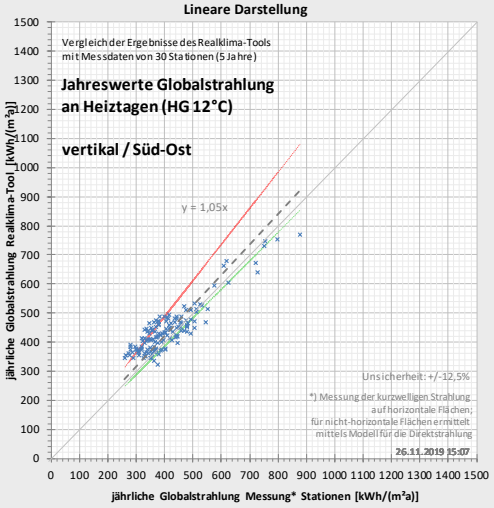


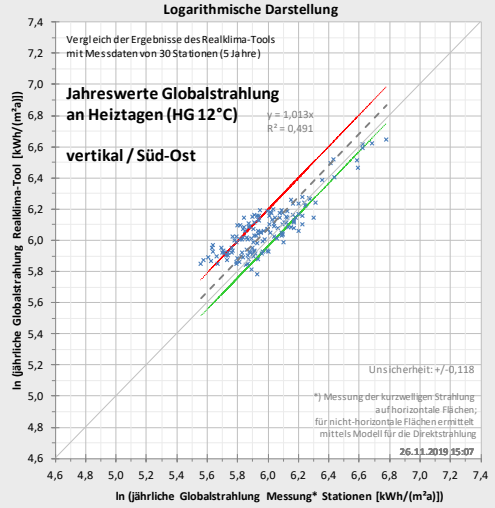
O 90°



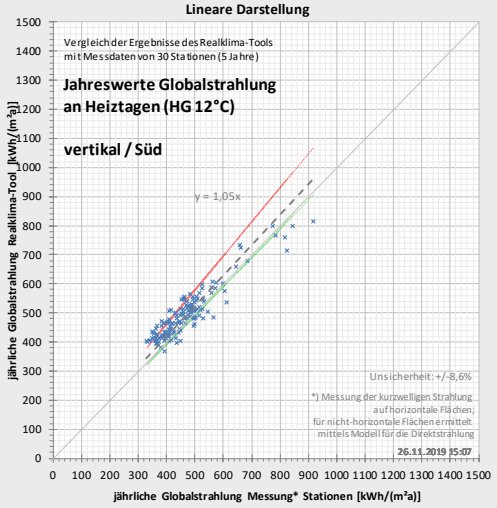


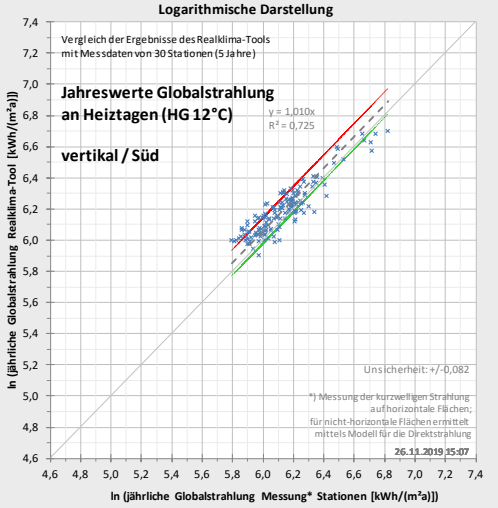
SO 90°



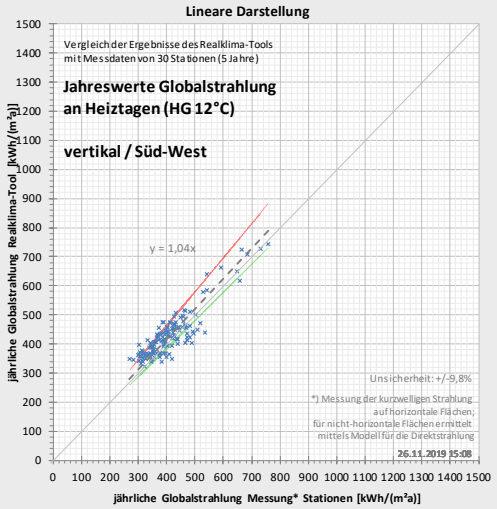


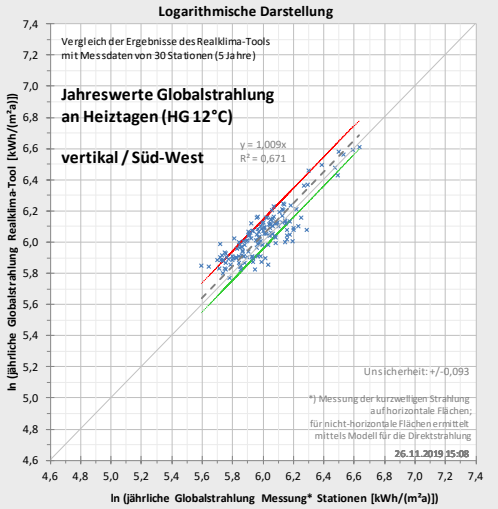
S 90°


Lineare Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
an Heiztagen (HG 12°C)
vertikal / Süd
y = 1,05x
Unsicherheit: +/-8,6%
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 15:07
jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)]
jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)]

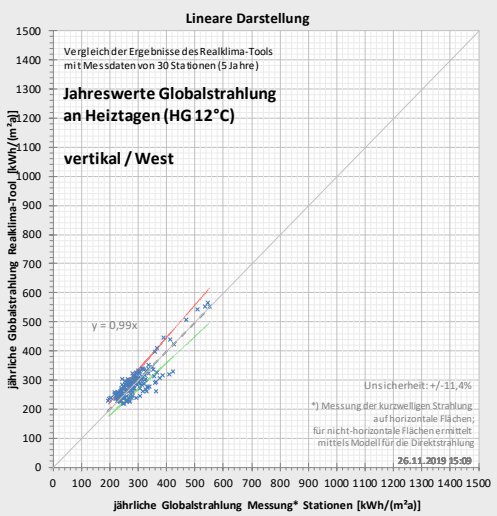

Logarithmische Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
an Heiztagen (HG 12°C)
vertikal / Süd
y = 1,010x
R² = 0,725
Unsicherheit: +/-0,082
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 15:07
ln (jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)])
ln (jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)])

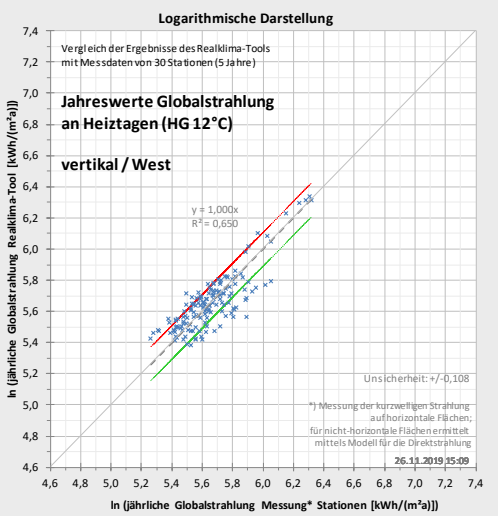
SW 90°


Lineare Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
an Heiztagen (HG 12°C)
vertikal / Süd-West
y = 1,04x
Unsicherheit: +/-9,8%
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 15:08
jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)]
jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)]

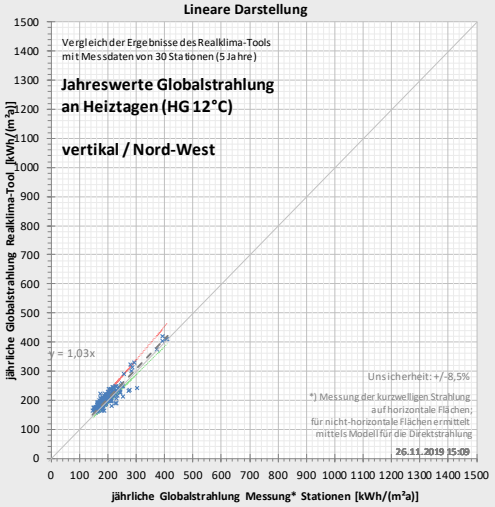

Logarithmische Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
an Heiztagen (HG 12°C)
vertikal / Süd-West
y = 1,009x
R² = 0,671
Unsicherheit: +/-0,093
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 15:08
ln (jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)])
ln (jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)])

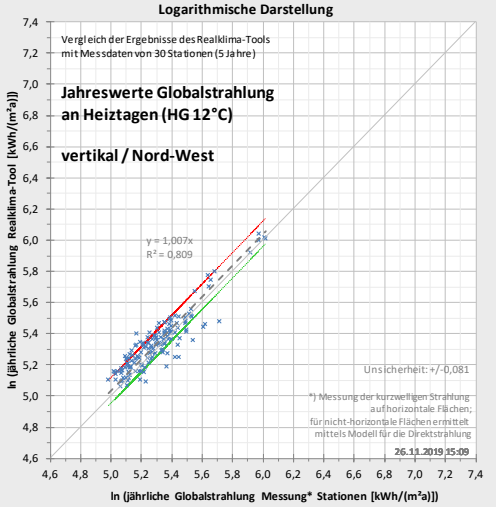
W 90°


Lineare Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
an Heiztagen (HG 12°C)
vertikal / West
y = 0,99x
Unsicherheit: +/-11,4%
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 15:09
jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)]
jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)]

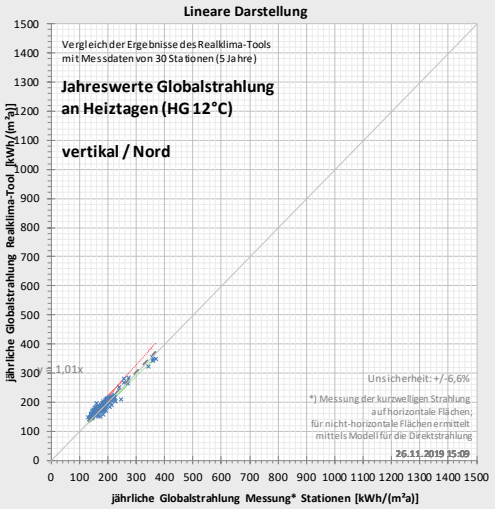

Logarithmische Darstellung
Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools
mit Messdaten von 30 Stationen (5 Jahre)
Jahreswerte Globalstrahlung
an Heiztagen (HG 12°C)
vertikal / West
y = 1,000x
R² = 0,650
Unsicherheit: +/-0,108
*) Messung der kurzwelligen Strahlung
auf horizontale Flächen;
für nicht-horizontale Flächen ermittelt
mittels Modell für die Direktstrahlung
26.11.2019 15:09
ln (jährliche Globalstrahlung Realklima-Tool [kWh/(m²a)])
ln (jährliche Globalstrahlung Messung* Stationen [kWh/(m²a)])

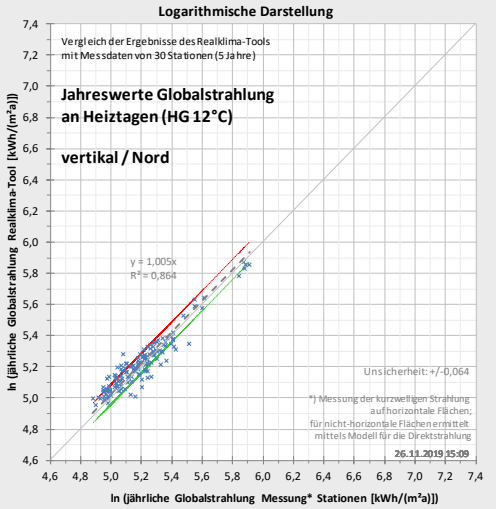
NW 90°



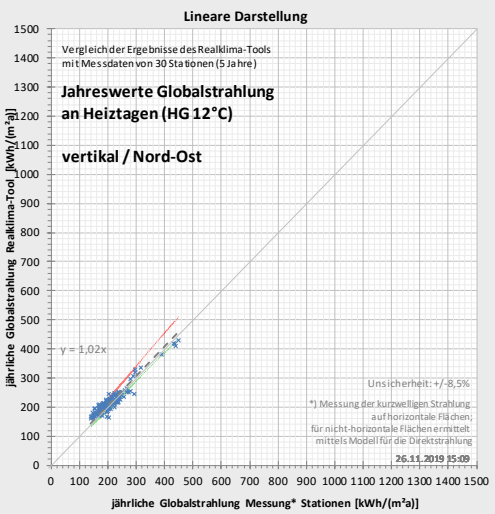


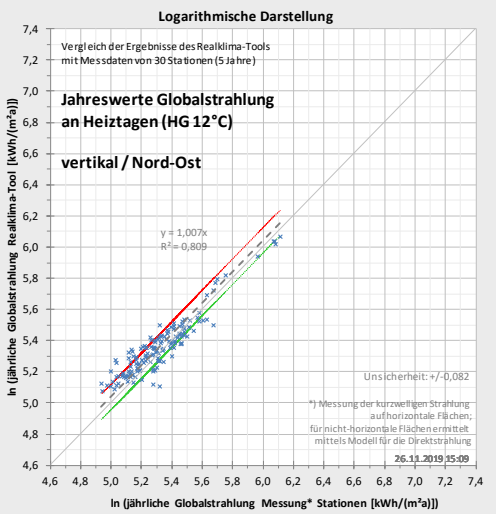
N 90°





NO 90°

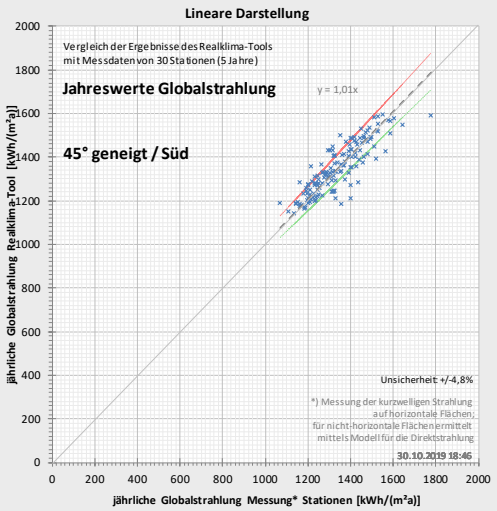


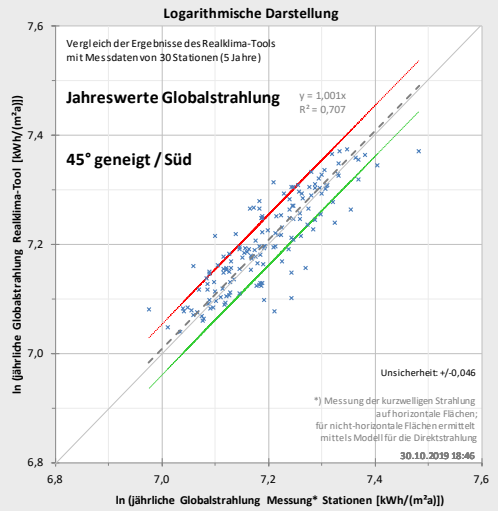


3.1.6 Globalstrahlung auf geneigte Flächen (Beispiel: Süd 45°)

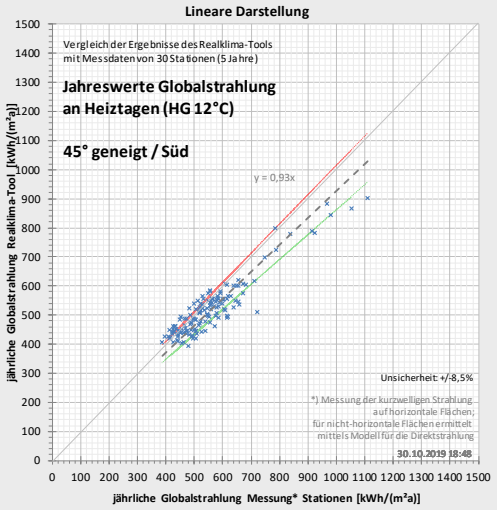
Bild 6: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Jahreswerte Globalstrahlung auf geneigte Flächen / Beispiel: Süd 45°

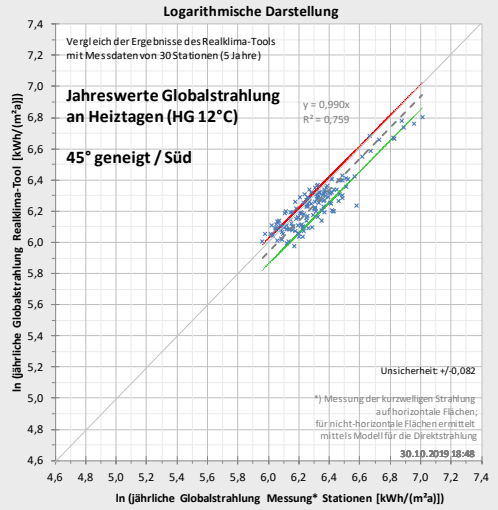
S 45° Globalstrahlung Jahreswert





S 45° Globalstrahlung an Heiztagen





3.2 Vergleich mit Messdaten aus Modellprojekten mit Klimastation

In einem weiteren Test wurden Messdaten von Klimastationen aus IWU-Modellprojekten mit den für diese Standorte durch das Realklima-Tool ausgegebenen Daten verglichen.

3.2.1 Monatswerte der Außenlufttemperatur

Für die Außenlufttemperatur zeigt sich für beide Modellprojekte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den mittleren Monatswerten der jeweiligen Klimamessstation und des Realklima-Tools (Bild 7 und Bild 8).

Bild 7: Monatswerte der Außenlufttemperatur aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus dem Modellprojekt Cordierstraße in Frankfurt/Main [Großklos et. al 2016]

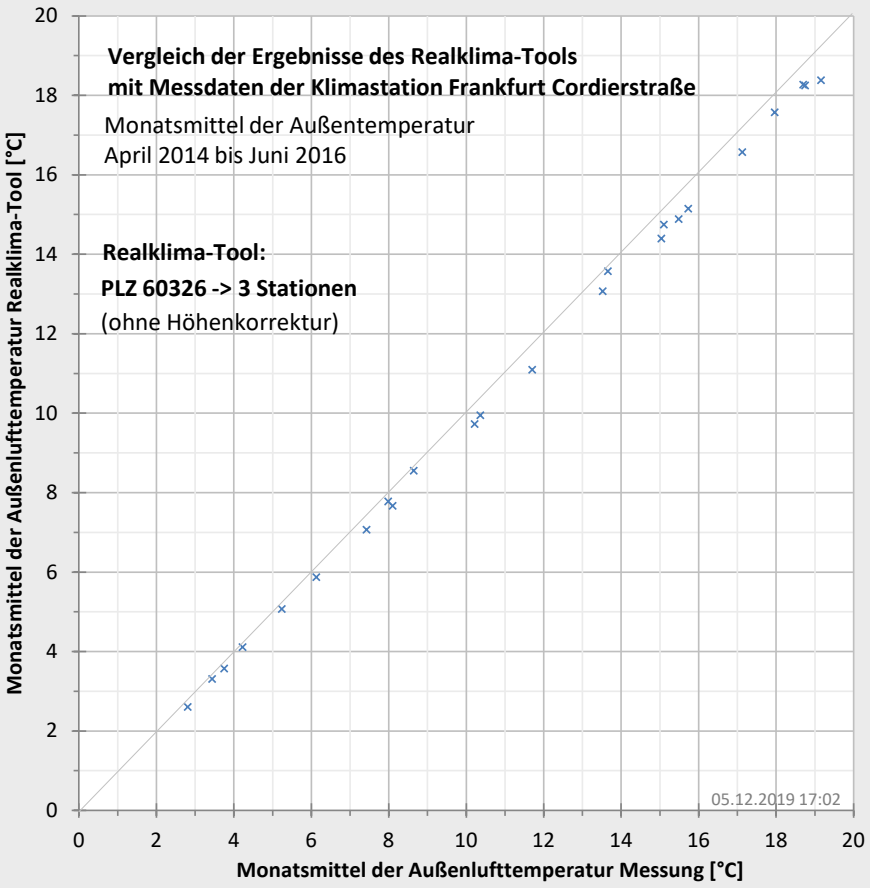
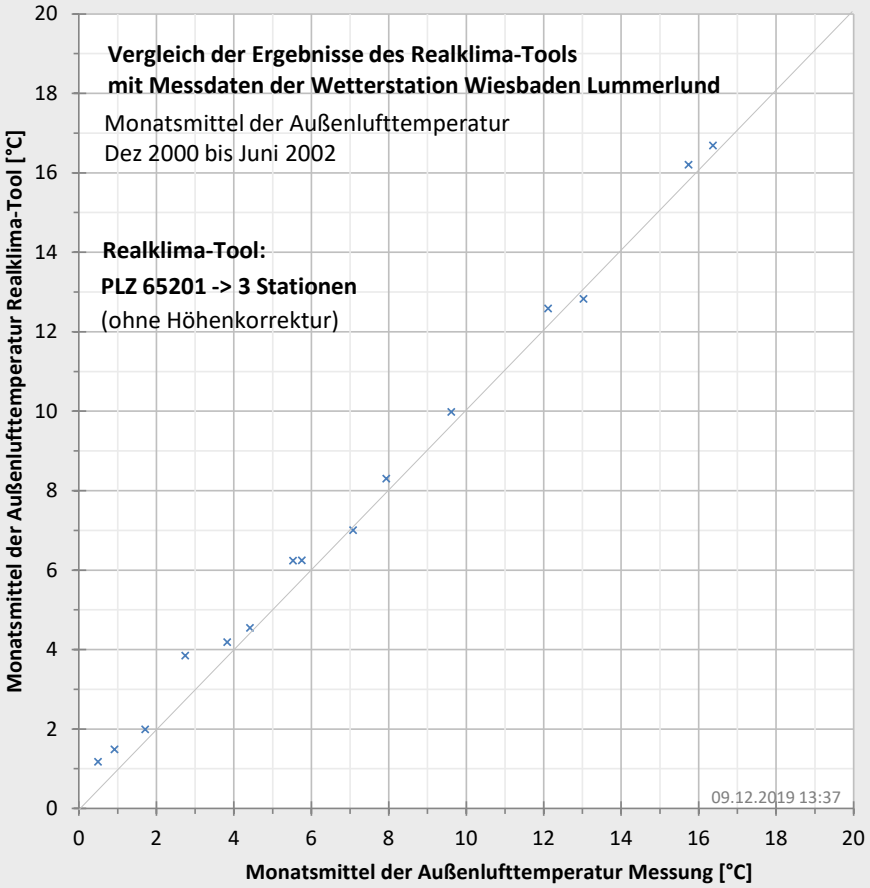


Bild 8: Monatswerte der Außenlufttemperatur aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus dem Modellprojekt Wiesbaden „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ [Ebel et. al 2003]

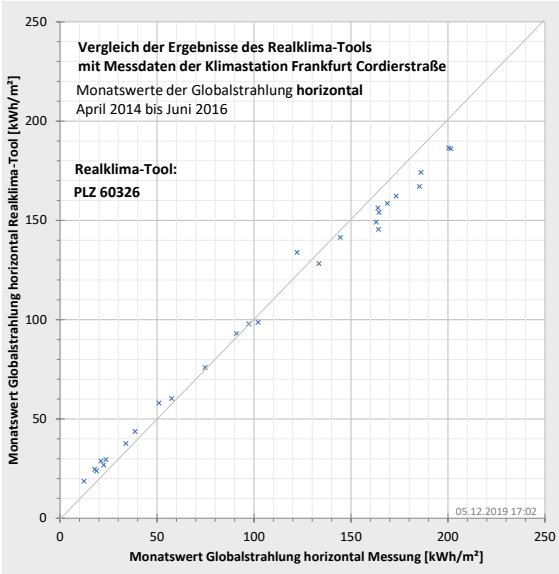
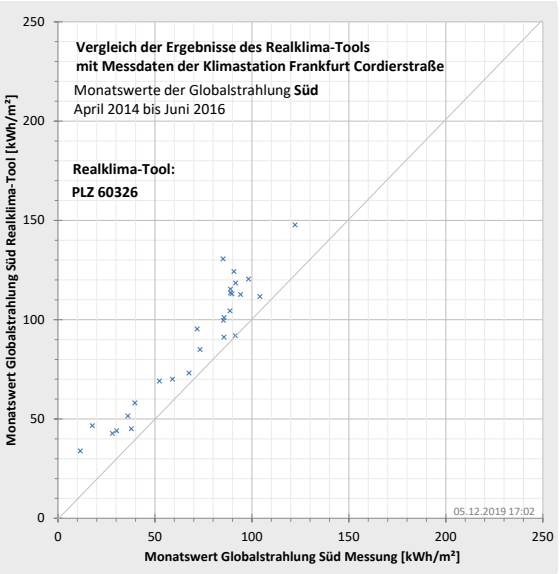
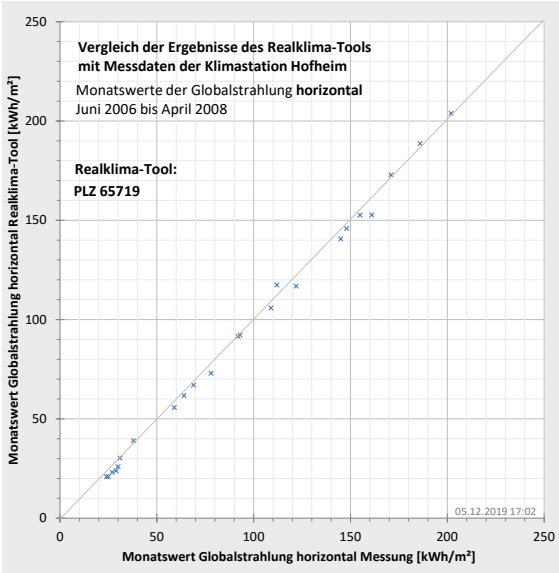
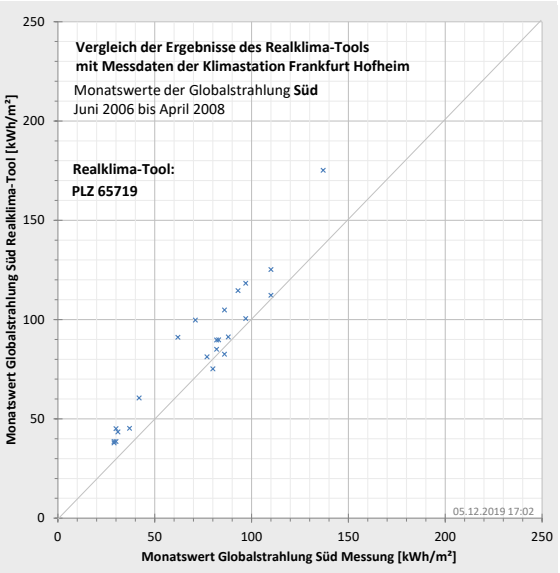


3.2.2 Monatswerte der Globalstrahlung

Die Übereinstimmung ist nicht so gut wie bei den Temperaturen. Immerhin passt bei den Modellprojekten Frankfurt Cordierstraße und Hofheim die Globalstrahlung auf die Horizontale recht gut. Dagegen überschätzt das Realklima-Tool im Fall des Modellprojekts „Wiesbaden Lummerlund“ die Globalstrahlung Horizontal um ca. 10%. Die anderen Orientierungen liefern dann ähnliche Abweichungen.

Allerdings sind diese Abweichungen zu erwarten, da der Genauigkeitstest in Abschnitt 3.1 ja eine Standardabweichung zwischen Realklimatool und Messdaten je nach Ausrichtung zwischen 8 und 13% ergeben hat.

Bild 9: Monatswerte der Globalstrahlung Horizontal und Süd aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus den Modellprojekten Cordierstraße in Frankfurt/Main [Großklos et. al 2016], Hofheim [Großklos et. al 2008] und Wiesbaden Lummerlund [Ebel et. al 2003]

	Horizontal	Süd
Modellprojekt Frankfurt Cordierstraße		
Modellprojekt Hofheim		

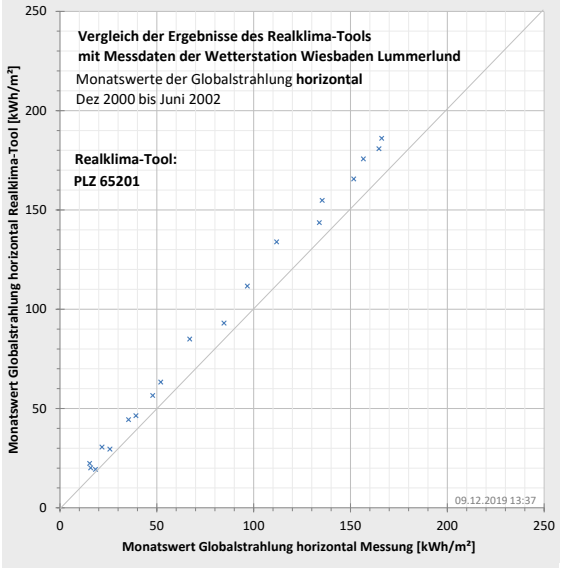
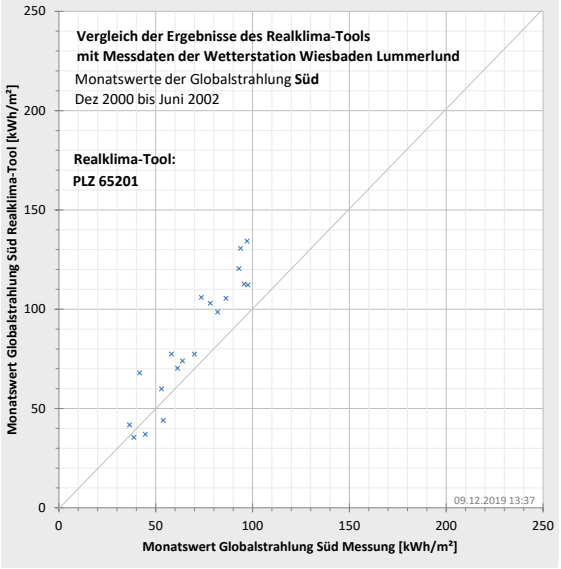
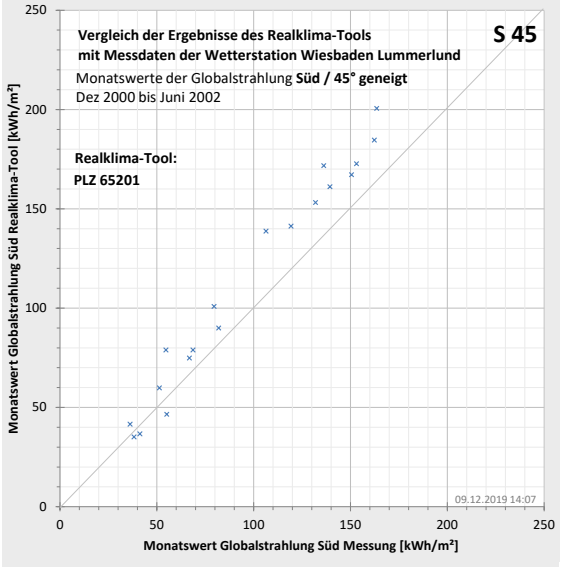
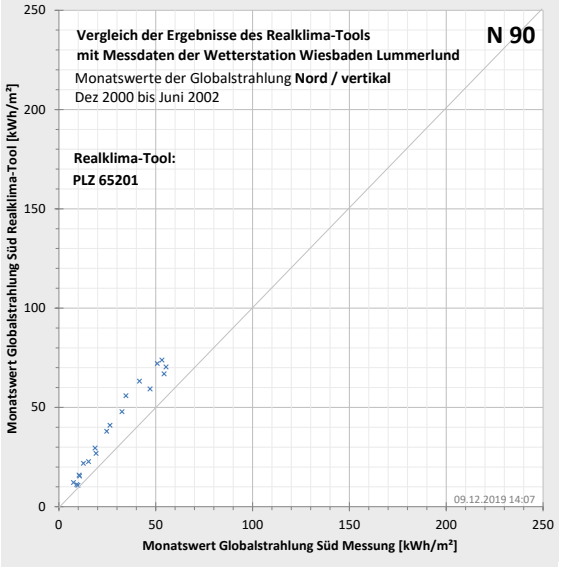
	Horizontal	Süd
Modell-projekt „Gartenhof siedlung Wiesbaden Lummer-lund“		

Bild 10: **Monatswerte der Globalstrahlung Süd / 45° geneigt und Nord aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus dem Modellprojekt Wiesbaden Lummerlund [Ebel et. al 2003]**

	Süd / 45° geneigt	Nord
Modell-projekt „Gartenhof siedlung Wiesbaden Lummer-lund“		

3.3 Abschätzung der Unsicherheiten

3.3.1 Unsicherheit der Klimadaten

Der Unsicherheit der Eingangsdaten der energetischen Bilanzierung wurde bisher in der Energieberatungspraxis nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Auch in der für den EnEV-Nachweis konzipierten Normberechnung sind solche Betrachtungen nicht vorgesehen. Soll die energetische Bilanzierung jedoch für die Prognose und das Verbrauchscontrolling verwendet werden, wird das Thema relevant. Eine zuverlässige Energiebilanz wird hier benötigt, die zum einen realistische Eingangsdaten ansetzt, zum anderen aber auch adäquat mit (insbesondere bei Bestandsgebäuden häufig) nicht vorhandenen Informationen umgeht. Für alle relevanten Eingangsdaten sollte daher die Unsicherheit quantifiziert werden. Aus den unscharfen Eingangswerten ergibt sich auch für den berechneten Endenergiebedarf ein Unsicherheitsbereich. Dieser stellt den Erwartungsbereich für den Energieverbrauch dar – ist also die Spanne, innerhalb der der Energieverbrauch bei vielen Gebäuden gleicher Art in der Mehrzahl der Fälle liegen sollte.

In den nachfolgenden Abschnitten geht es um eine Methodik für die Ex-post-Betrachtung bei bereits vorliegenden Verbrauchsdaten, also um die physikalische Modellierung der Energieströme, die für einen gemessenen Energieverbrauch eines konkreten Gebäudes an einem identifizierten Standort für ein bestimmtes Jahr verantwortlich sind. Die Unsicherheit der Klimadaten und des berechneten jährlichen Energiebedarfs soll für zwei unterschiedliche Fälle abgeschätzt und verglichen werden:

- Verwendung eines Durchschnittsklimas ohne Berücksichtigung des bekannten Standorts des Gebäudes und des betrachteten Jahres;
- Verwendung der mit dem Realklima-Tool für den Standort des Gebäudes und das betrachtete Jahr ermittelten Klimadaten.

Wichtiger Ausgangspunkt der Analysen sind dabei die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Messdaten für 30 Klimastationen mit Messdaten aus 5 Jahren.

Unsicherheit der Klimadaten bei Verwendung eines Durchschnittsklimas (also ohne Berücksichtigung ortsgenauer, jahresbezogener Klimadaten)

Als erstes soll die aus der Verwendung zeitlich und räumlich gemittelter Klimadaten resultierende Unsicherheit abgeschätzt werden.

Die Analysen in Abschnitt 3.1 basieren auf Klimadaten, die über 5 Jahre an 30 Standorten von Klimamessstationen erfasst wurden. Diese gemessenen Klimadaten werden nun als Zufallssample betrachtet, das die Bandbreite der Klimadaten an unterschiedlichen Orten in Deutschland und in verschiedenen Jahren in etwa wiedergibt. Die Auswertung der 30 x 5 Jahreswerte für Außenlufttemperatur, Anzahl der Heiztage und Globalstrahlung ergibt die in Tab. 6 dargestellten Mittelwerte und Streuungen:

Tab. 6: Streuung der auf die Heizzeit bezogenen Klimadaten für über ganz Deutschland verteilte Messstationen / daraus abgeleitete Unsicherheit der Energiebilanz-Eingangsdaten bei Verwendung eines Durchschnittsklimas
(Stichprobe von 30 Klimamessstationen / 5 Jahren)

Größe	konkrete Messwerte	Analyse-Ergebnis (bezogen auf die Heiztage eines Jahres)		Rechenwert für die Unsicherheit bei Anwendung für ein Einzelgebäude
		Mittelwert (Durchschnittsklima)	**Streuung** Standardabweichung der Messwerte (150 Werte je Größe)	
Außenlufttemperatur an Heiztagen	30 Messstationen / 5 Jahre (vgl. Bild 2)	5,0 °C	+/- 1,10 K	+/-1,1 K
Temperaturdifferenz zwischen innen und außen an Heiztagen (bei 20°C Raumtemperatur)		20 °C - 5 °C = 15 K	+/- 7,3 %	+/- 7%
Anzahl der Heiztage	30 Messstationen / 5 Jahre (vgl. Bild 3)	211 d/a	+/- 23 d/a (+/- 11%)	+/- 11%
resultierend: Gradtagzahl* (bei 20°C Raumtemperatur)	ermittelt aus Außenlufttemperatur und Heiztagen*	15 K · 211 d/a = 3165 Kd/a	(7% + 11% = 18%*) +/- 0,18 · 3165 = +/- 570 Kd/a	+/- 18%
Globalstrahlung an Heiztagen in kWh/(m²a)	30 Messstationen / 5 Jahre (vgl. Bild 5)	Hor: 395	+/- 94 (+/- 24 %)	+/- 24%
		Ost**: 295	+/- 82 (+/- 28 %)	
		Süd**: 469	+/- 101 (+/- 22 %)	
		West**: 291	+/- 64 (+/- 22 %)	
		Nord**: 184	+/- 42 (+/- 23 %)	

*) Addition der Standardabweichungen unter der Annahme, dass Außenlufttemperaturen und Anzahl der Heiztage direkt zusammenhängen

**) Für die von horizontalen Flächen abweichenden Orientierungen liegen keine direkt durch die Klimastationen gemessenen Daten vor. Die Daten wurden mit Hilfe eines Direktstrahlungsmodells aus den stündlichen Messwerten der horizontalen Einstrahlung berechnet und monatsweise summiert (siehe Abschnitt 2.3).

Unsicherheit der mit dem Realklima-Tool für einen konkreten Standort und ein konkretes Jahr ermittelten Klimadaten

Werden die klimatischen Randbedingungen für die Bilanzierung eines konkreten Gebäudes auf der Grundlage der Postleitzahl des Standortes und des betrachteten Verbrauchsjahrs nach dem in Kapitel 1 und 2 dargestellten Verfahren ermittelt, so ist gegenüber dem Durchschnittsklima eine Verringerung der Unsicherheit der energetischen Bilanzierung zu erwarten.

Grundlage für die Quantifizierung der Unsicherheiten sind hier die Vergleichsrechnungen in Abschnitt 3.1.2 für die Außenlufttemperaturen an Heiztagen, 3.1.3 für die Anzahl der Heiztage und 3.1.5 für die Globalstrahlung an Heiztagen. Mit dem Realklima-Tool waren dort für die Standorte der 30 Messstationen auf

Basis der jeweiligen Postleitzahlen die lokalen Klimadaten für die gegebenen 5 Jahre abgeschätzt und mit den tatsächlich am Standort gemessenen verglichen worden.[4]

Tab. 7 zeigt die jeweils berechneten Mittelwerte und Streuungen für die Daten, die für die Kalkulation des Heizenergiebedarfs eines Gebäudes relevant sind. In der Spalte rechts daneben sind jeweils daraus abgeleitete vereinfachte Ansätze für die Unsicherheiten als Pauschalwerte angesetzt.

Tab. 7: Abschätzung der Unsicherheiten des Verfahrens zur Postleitzahl-bezogenen Zuordnung von Klimadaten: Vergleich der mit dem Realklima-Tool auf Grundlage der Postleitzahlen geschätzten Klimadaten mit den jahresbezogenen, lokal gemessenen Klimadaten
(Stichprobe von 30 Klima-Messstationen / 5 Jahren)

Größe	**Vergleich der mit dem Realklima-Tool ermittelten Werte mit den konkreten Messwerten für 30 Messstationen (Prüfstationen) / 5 Jahre**	**Analyse-Ergebnis** (bezogen auf die Heiztage eines Jahres)		**Rechenwert für die Unsicherheit** bei Anwendung für ein Einzelgebäude
		Durchschnittsklima als Referenz für relative Unsicherheit	**Streuung** Standardabweichung der Differenz zwischen dem Schätzwert des Tools und dem Messwert (150 Werte je Größe)	
Außenlufttemperatur an Heiztagen	3 Stationen ohne Prüfstation (vgl. Bild 2)	5,0 °C	+/- 0,4 K	+/-0,4 K
Temperaturdifferenz zwischen innen und außen an Heiztagen (bei 20°C Raumtemperatur)		20 °C - 5 °C = 15 K	+/- 2,6 %	+/- 3%
Anzahl der Heiztage	3 Stationen ohne Prüfstation (vgl. Bild 3)	211 d/a	+/- 11 d/a (+/- 5,2%)	+/- 5%
resultierend: Gradtagzahl* (bei 20°C Raumtemperatur)	ermittelt aus Außenlufttemperatur und Heiztagen*	15 K · 211 d/a = 3165 Kd/a	(3% + 5% = 8%*) +/- 0,08 · 3165 = +/- 253 Kd/a	+/- 8%
Globalstrahlung an Heiztagen in kWh/(m²a)	bei der Prüfstation gemessene Einstrahlung (vgl. Bild 5)	Hor: 395	+/- 30 (+/- 7,6 %)	+/- 10%
		Ost**: 295	+/- 39 (+/- 13,2 %)	
		Süd**: 469	+/- 42 (+/- 9,0 %)	
		West**: 291	+/- 34 (+/- 11,8 %)	
		Nord**: 184	+/- 13 (+/- 7,3 %)	

*) Addition der Standardabweichungen unter der Annahme, dass Außenlufttemperaturen und Anzahl der Heiztage direkt zusammenhängen

**) Für die von horizontalen Flächen abweichenden Orientierungen liegen keine direkt durch die Klimastationen gemessenen Daten vor. Die Daten wurden mit Hilfe eines Direktstrahlungsmodells aus den stündlichen Messwerten der horizontalen Einstrahlung berechnet und monatsweise summiert (siehe Abschnitt 2.3).

[4] Im Fall der Temperaturen werden im Realklima-Tool hierzu die nächsten drei Klimastationen herangezogen – für den Test wurden jedoch die Daten der unter der Postleitzahl direkt verfügbaren Messstation nicht berücksichtigt (detaillierte Beschreibung in Abschnitt 3.1). Es handelt sich daher im Fall der Temperaturen um eine konservative Abschätzung.

In den Bergregionen kann sich die Unsicherheit der Außenlufttemperatur je nach Lage der Messstation noch erhöhen – insbesondere wenn die Höhe des Standorts nicht bekannt ist, also auch keine Höhenkorrektur durchgeführt werden kann.

Neben diesen auf das geographische Zuordnungsverfahren und die Schätzverfahren für die Globalstrahlung bezogenen Unsicherheiten, muss man vom Vorhandensein weiterer Unschärfen ausgehen – insbesondere von der Messunsicherheit der verwendeten Sensoren sowie mit der durch Luftströmungen und anderen Effekten (Tallage, Flussnähe, Waldnähe, Bebauungsdichte, usw.) bedingten lokal- und mikroklimatischen Unterschiede (siehe auch Anhang D). Diese können derzeit nur schwer quantifiziert werden.

3.3.2 Abschätzung der Auswirkung auf den Endenergiebedarf

Unsicherheit des Endenergiebedarfs bei Berechnung mit Durchschnittsklima (also ohne Berücksichtigung ortsgenauer und zeitgenauer Klimadaten)

Im Folgenden soll grob abgeschätzt werden, wie sich die Unsicherheit der Außenlufttemperatur und die Unsicherheit der Globalstrahlung auf den Heizenergiebedarf auswirkt, wenn der Standort des Gebäudes nicht bekannt ist bzw. wenn generell mit Standardklimadaten gerechnet wird.

Für einen unsanierten Altbau mit einem wohnflächenbezogenen jährlichen Heizenergiebedarf von 220 kWh/(m²a) ergibt sich unter Ansatz der in dem vorangegangen Abschnitt dargestellten Unsicherheiten bei Verwendung eines geographisch und zeitlich gemittelten Standardklimas für ganz Deutschland eine Unsicherheit von etwa ±40 kWh/(m²a) und somit eine relative Unsicherheit von ±18%. Für ein Passivhaus mit einem Heizenergiebedarf von 28 kWh/(m²a) liegt die durch Verwendung des Standardklimas bedingte Unsicherheit des Endenergiebedarfs bei ca. ±8 kWh/(m²a), also relativ bei ±28%. Während die relative Bedeutung also mit Verbesserung des Wärmeschutzstandards zunimmt, wird die absolute Bedeutung des Klimaeinflusses sehr stark reduziert.

Während beim Altbau die Auswirkung der Unsicherheit der Globalstrahlung im Vergleich zur Außenlufttemperatur minimal ist, ist sie für das Passivhaus bedeutsamer. Allerdings liegt der relative Anteil an der klimadatenbedingten Gesamtunsicherheit auch hier nur etwa bei 10%, da nach Fehlerfortpflanzungsgesetz das Gewicht der Einzelbeiträge durch das Quadrat der Standardabweichungen bestimmt ist.[5]

[5] Beitrag der Globalstrahlung zur gesamten Unsicherheit: $9^2 / (27^2 + 9^2) = 10\%$

Tab. 8: Beispielhafte Abschätzung der durch Verwendung eines Standardklimas (Durchschnittsklima) bedingten Unsicherheiten des Endenergiebedarfs für zwei unterschiedliche Gebäudestandards

	Altbau	Passivhaus	
Ansatz für Raumtemperatur	20	22	°C
Temperaturdifferenz zwischen innen und außen in der Heizperiode	15	17	K
Anzahl der Heiztage*	211	211	d/a
Gradtagzahl	3165	3587	Kd/a
Transmissions- und (effektive) Lüftungswärmeverluste	200	40	kWh/(m²a)
innere Wärmegewinne	15	15	kWh/(m²a)
solare Wärmegewinne	10	10	kWh/(m²a)
Heizwärmebedarf	175	20	kWh/(m²a)
Wärmeverluste Anlagentechnik konstant	25	5	kWh/(m²a)
Aufwandszahl Wärmeerzeugung	1,1	1,1	
Endenergiebedarf Heizung	**220**	**27,5**	**kWh/(m²a)**
Auswirkung der Unsicherheit der Außenlufttemperatur			
Unsicherheit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen	**+/- 1,1 K** *(+/- 7,3%)*	**+/- 1,1 K** *(+/- 6,4%)*	
Unsicherheit der Anzahl der Heiztage	**+/- 23 d/a** *(+/- 11%)*	**+/- 23 d/a** *(+/- 11%)*	
resultierende Unsicherheit der Gradtagzahl**	7,3% + 11% = ca. +/- 18% +/- 0,18 · 3165 = 570 Kd/a	6,4% + 11% = ca. +/- 17% +/- 0,17 · 3587 = 610 Kd/a	
resultierende Unsicherheit des Endenergiebedarfs	+/- 0,18 · 200 · 1,1 = +/- 40	+/- 0,17 · 40 · 1,1 = +/- 7,5	kWh/(m²a)
relative Unsicherheit des Endenergiebedarfs	***+/- 18 %***	***+/- 27 %***	
Auswirkung der Unsicherheit der Globalstrahlung*			
Unsicherheit der Globalstrahlung***	**+/- 24 %**	**+/- 24 %**	
Unsicherheit der solaren Gewinne	0,24 · 10 = +/- 2,4	0,24 · 10 = +/- 2,4	kWh/(m²a)
resultierende Unsicherheit des Endenergiebedarfs	+/- 2,4 · 1,1 = +/- 2,6	+/- 2,4 · 1,1 = +/- 2,6	kWh/(m²a)
relative Unsicherheit des Endenergiebedarfs	***+/- 1,2 %***	***+/- 9 %***	
Auswirkung der Unsicherheit der Klimadaten insgesamt			
Unsicherheit des Endenergiebedarfs			
relativ	***+/- 18 %***	***+/- 28 %***	
absolut	**+/- 40**	**+/- 7,8**	**kWh/(m²a)**

*) Ansatz: in beiden Fällen Heizgrenztemperatur 12°C (beim Passivhaus wird die durch ein höheres Gewinn-Verlust - Verhältnis reduzierte Heizgrenztemperatur in diesem Fall kompensiert durch die höhere Raumtemperatur)

**) unter der Annahme, dass Außenlufttemperaturen und Anzahl der Heiztage direkt zusammenhängen

***) ohne Berücksichtigung der durch unbekannte Verschattung bedingten Unsicherheiten

Tab. 9: Beispielhafte Abschätzung der bei Zuordnung der orts- und zeitgenauen Klimadaten über Postleitzahlen verbleibenden Unsicherheit des Endenergiebedarfs (Realbilanzierung) für zwei unterschiedliche Gebäudestandards

	Altbau	Passivhaus	
Ansatz für Raumtemperatur	20	22	°C
Temperaturdifferenz zwischen innen und außen in der Heizperiode	15	17	K
Anzahl der Heiztage	211	211	d/a
Gradtagzahl	3165	3587	Kd/a
Transmissions- und (effektive) Lüftungswärmeverluste	200	40	kWh/(m²a)
innere Wärmegewinne	15	15	kWh/(m²a)
solare Wärmegewinne	10	10	kWh/(m²a)
Heizwärmebedarf	175	20	kWh/(m²a)
Wärmeverluste Anlagentechnik konstant	25	5	kWh/(m²a)
Aufwandszahl Wärmeerzeugung	1,1	1,1	
Endenergiebedarf Heizung	**220**	**27,5**	**kWh/(m²a)**
Auswirkung der Unsicherheit der Außenlufttemperatur			
Unsicherheit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen	**+/- 0,4 K** *(+/- 2,6%)*	**+/- 0,4 K** *(+/- 2,4%)*	
Unsicherheit der Anzahl der Heiztage	**+/- 11 d/a** *(+/- 5,2%)*	**+/- 11 d/a** *(+/- 5,2%)*	
resultierende Unsicherheit der Gradtagzahl*	2,6% + 5,2% = **ca. +/- 8%** +/- 0,08 · 3165 = +/- 253 Kd/a	2,4% + 5,2% = **ca. +/- 8%** +/- 0,08 · 3587 = +/- 287 Kd/a	
resultierende Unsicherheit des Endenergiebedarfs	+/- 0,08 · 200 · 1,1 = 18	+/-0,08 · 40 · 1,1 = 3,5	kWh/(m²a)
relative Unsicherheit des Endenergiebedarfs	***+/- 8 %***	***+/- 13 %***	
Auswirkung der Unsicherheit der Globalstrahlung*			
Unsicherheit der Globalstrahlung**	**+/- 10 %**	**+/- 10 %**	
Unsicherheit der solaren Gewinne	+/- 1,0	+/- 1,0	kWh/(m²a)
resultierende Unsicherheit des Endenergiebedarfs	+/- 1,0 · 1,1 = 1,1 kWh/(m²a)	+/- 1,0 · 1,1 = 1,1 kWh/(m²a)	kWh/(m²a)
relative Unsicherheit des Endenergiebedarfs	***+/- 0,5 %***	***+/- 4 %***	
Auswirkung der Unsicherheit der Klimadaten insgesamt			
Unsicherheit des Endenergiebedarfs			
relativ	***+/- 8 %***	***+/- 14 %***	
absolut	**+/- 18**	**+/- 3,7**	**kWh/(m²a)**

Ansatz: Heizgrenztemperatur 12°C

*) unter der Annahme, dass Außenlufttemperaturen und Anzahl der Heiztage direkt zusammenhängen

**) ohne Berücksichtigung der durch unbekannte Verschattung bedingten Unsicherheiten

Unsicherheit des Endenergiebedarfs bei bekannten Klimadaten (über PLZ zugeordnet)

In ähnlicher Weise kann die bei Verwendung des Realklima-Tools unter Zuordnung von orts- und zeitgenauen monatlichen Klimadaten zur Postleitzahl des Gebäudes entstehenden Unsicherheiten des Endenergiebedarfs abgeschätzt werden. Im Fall des unsanierten Altbaus kann die Unsicherheit des Endenergiebedarf gegenüber dem Fall mit Standardklima von ±40 auf ±18 kWh/(m²a) reduziert und damit mehr als halbiert werden. Auch im Fall des Passivhauses wird eine Halbierung von ±8 auf ±4 kWh/(m²a) erreicht.

Tab. 10 zeigt noch einmal die Ergebnisse der Unsicherheitsbetrachtung für den Endenergiebedarf im Vergleich.

Tab. 10: Abgeschätzte Unsicherheiten des Endenergiebedarfs / Vergleich zwischen Standardklima und ortsgenauen Jahres-Klimadaten bei Ansatz zweier sehr unterschiedlicher Gebäudestandards

	Altbau	Passivhaus	
absolute Unsicherheiten			
Standardklima	+/- 40	+/- 7,8	kWh/(m²a)
orts- und zeitgenaue Klimadaten	+/- 18	+/- 3,7	kWh/(m²a)
relative Unsicherheiten			
Standardklima	+/- 18 %	+/- 28 %	
orts- und zeitgenaue Klimadaten	+/- 8 %	+/- 14 %	

4 Resümee

Mit Hilfe des Tools „Gradtagzahlen_Deutschland.xls“ werden vom IWU seit 2006 durch den Deutschen Wetterdienst publizierte Temperaturdaten so aufbereitet, dass sie für verschiedene Standorte in Deutschland als monatliche Mittelwerte, als monatliche Heiztage und als Gradtagzahlen bzw. Heizgradtage zur Verfügung stehen. Im Kontext des Projekts „MOBASY“ wurde das Tool auf insgesamt 814 Temperatur-Messstationen erweitert. Weiterhin stehen nun auch monatliche Werte der Globalstrahlung auf verschieden orientierte Flächen für über 3000 Standorte zur Verfügung. Da die als Quelle verwendeten satellitengestützt ermittelten Globalstrahlungswerte nur für die horizontale Orientierung vorliegen, werden Schätzfunktionen für andere Orientierungen angewendet, welche im Rahmen von MOBASY aus detaillierten Messdaten abgeleitet worden sind. Ebenfalls auf der Basis von Schätzfunktionen wird die Globalstrahlung an Heiztagen ermittelt, die für die einfache Heizperiodenbilanz erforderlich ist.

Neben dieser für die gewählte Postleitzahl und 12 Monate vorkonfigurierten Auswertungen bietet die Excel-Arbeitsmappe noch folgende Daten:

- Die Auswertetabelle für die gewählte Postleitzahl umfasst alle ab 1991 verfügbaren Monate in tabellarischer Form sowie die zu Grunde liegenden Temperaturdaten der drei nächsten Klimastationen vor Korrektur von Messdatenausfällen. Hier kann der Rechengang und die Anwendung der Schätzfunktionen direkt nachvollzogen werden.
- Die monatlichen Rohdaten für Außenlufttemperatur, Anzahl der Heiztage und Globalstrahlung stehen für alle Standorte auch tabellarisch zur Verfügung. Messdatenausfälle bei den Außenlufttemperaturen sind im Vollständigkeitsindikator dokumentiert.

Der vorliegende Bericht mit dem zugehörigen Anhang dokumentiert die methodischen Grundlagen, die Validierung und die Abschätzung der Unsicherheiten. Zudem wird beispielhaft aufgezeigt, welcher Gewinn an Genauigkeit durch ortsgenaue, jahresbezogene Klimadaten gegenüber der Verwendung eines Durchschnitts- bzw. Standardklimas bei der Berechnung des Endenergiebedarfs erzielt werden kann.

ANHANG

Anhang A Abschätzung der monatlichen Globalstrahlung auf unterschiedlich orientierte und geneigte Flächen bei vorhandenen Monatswerten der horizontalen Einstrahlung – Herleitung der Schätzfunktion

A.1 Aufgabenstellung

Wie in Kapitel 2 beschrieben stehen Messdaten für die Globalstrahlung in der gewünschten räumlichen und zeitlichen Auflösung nur für horizontal angeordnete Flächen zur Verfügung. Für vertikale oder geneigte Flächen muss die Globalstrahlung aus diesen Daten abgeschätzt werden. Für die Herleitung entsprechender Schätzformeln werden von 30 Wetterstationen über 5 Jahre aufgezeichnete Messdaten der Globalstrahlung verwendet.

A.2 Verwendete Klimadaten

Basis der Entwicklung der Schätzfunktionen für die geneigte Solarstrahlung waren Messdaten der Globalstrahlung von 30 über ganz Deutschland verteilte Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes aus den Jahren 2011 bis 2015. Neben Daten von 21 Stationen aus dem Climate Data Center (CDC) konnten zusätzlich Messdaten von 9 SCAPP-Messstationen des DWD in die Auswertungen einfließen, die im Rahmen des Forschungsprojekts EEGebaeudeZukunft (FKZ 03ET4019) durchgeführt wurden [Diefenbach et. al 2017]. In den verwendeten Klimadatensätzen liegen Solarstrahlungsdaten für die Globalstrahlung und die diffuse Strahlung auf die horizontale Fläche des jeweiligen Standortes vor. Bei den Messdaten wurden Datenlücken ggf. sinnvoll ergänzt, außerdem wurden sie einheitlich auf 365 Tage pro Jahr gekürzt. Unter Verwendung des Algorithmus nach [DIN 5034] wurden anschließend unter Berücksichtigung der Koordinaten des jeweiligen Standortes zunächst die Ortszeit und anschließend die Winkel für die Sonnenhöhe und den Azimut berechnet. Aus diesen Winkeln, der Neigung und der Orientierung wurde die Globalstrahlung auf die geneigte, orientierte Fläche berechnet. Hier kam das Modell nach Klucher zum Einsatz, das in [Quaschning 2015] beschrieben ist. Diese Berechnung wurde für den Beginn und das Ende jedes Zeitschrittes vorgenommen und der Mittelwert aus den beiden Globalstrahlungswerten auf die orientierte, geneigte Fläche berechnet. Das verbessert die Abbildung des Einflusses der direkten Strahlung in den Fällen, in denen zu Beginn oder am Ende des Zeitschrittes der Winkel zwischen der Flächennormalen der Hüllfläche und dem Sonnenstand größer als 90° ist (die Fläche also theoretisch für einen Teil des Zeitschrittes von der Rückseite beschienen würde). Gleiches gilt in Zeitschritten mit Sonnenauf- bzw. -untergang. Diese berechneten solaren Einstrahlungen auf die geneigten Flächen wurden als Eingangsgrößen für das Schätzverfahren verwendet.

Die Temperaturdaten der Stationen wurden für die Herleitung von Funktionsgleichungen zur Abschätzung des auf die Heiztage entfallenden Anteils der Globalstrahlung (siehe Anhang B) sowie für die Abschätzung der Zahl der Heiztage (siehe Anhang C) verwendet.

A.3 Ansatz für die Schätzfunktion

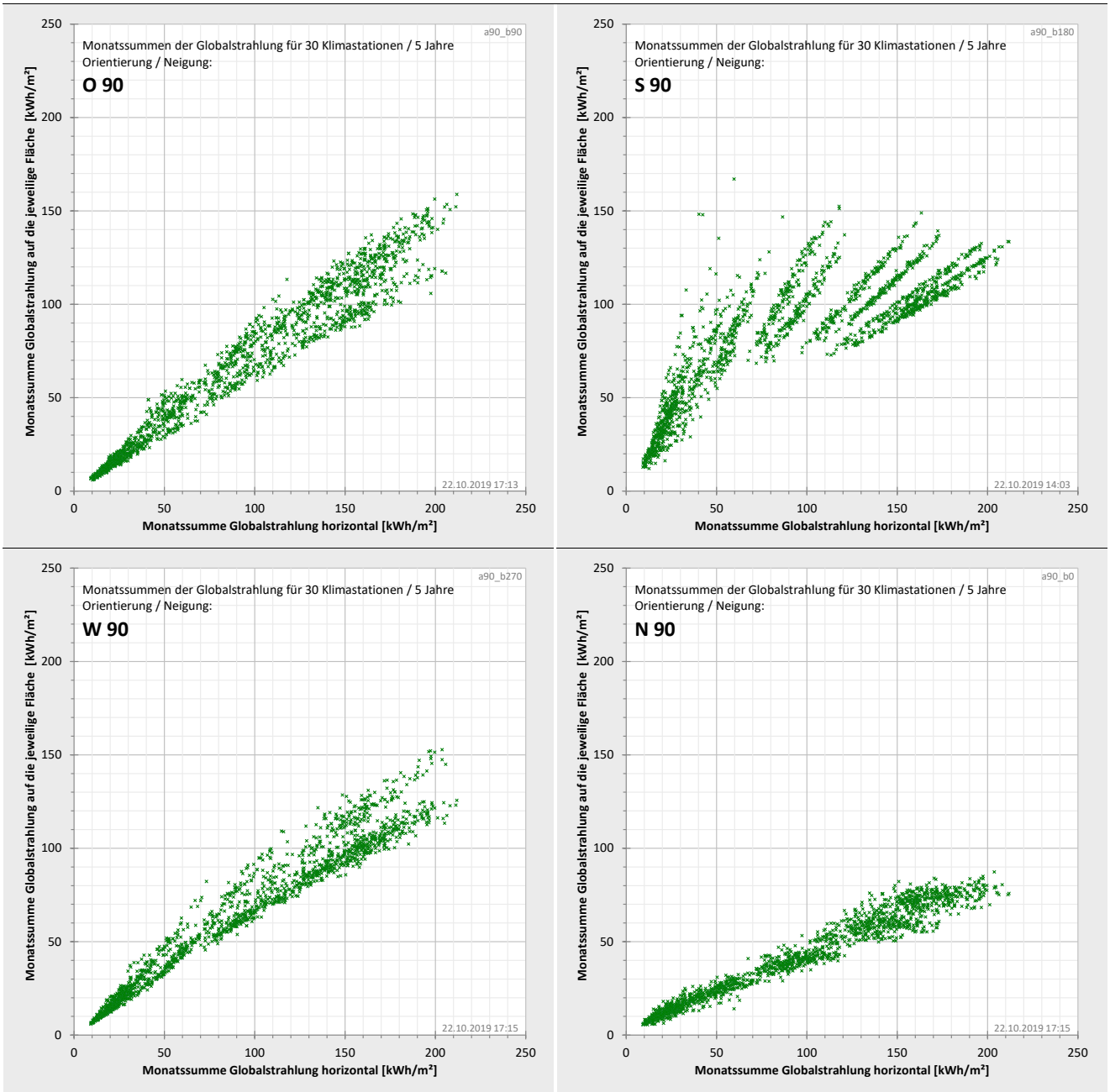
Die oben dargestellten Daten für 30 Klimastationen wurden in Tabellen mit Monatssummen der Globalstrahlung auf verschieden orientierte und geneigte Flächen zusammengefasst. Sie sind der Ausgangspunkt der folgenden Analysen.

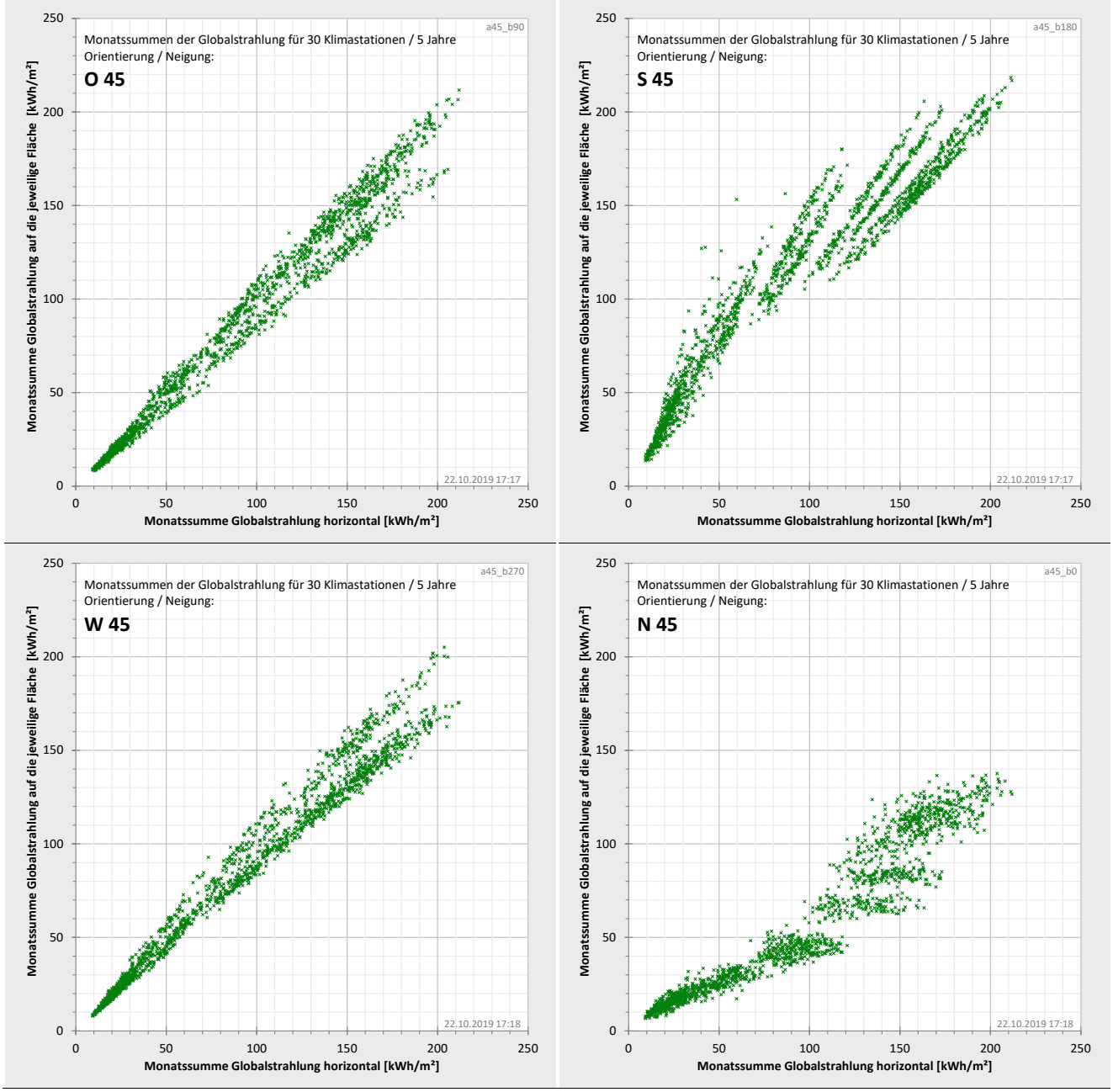
Die in Bild 11 dargestellten Diagramme zeigen den Zusammenhang zwischen Monatswerten der Globalstrahlung auf unterschiedlich orientierte und geneigte Flächen mit Monatswerten der horizontalen Globalstrahlung. Es handelt sich um einen Auszug der Daten für die vier Haupthimmelsrichtungen Ost, Süd, West, Nord mit jeweils einer Neigung 90° (vertikal) und 45°. Darüber hinaus zur Verfügung stehen Daten für die Orientierung zwischen den Haupthimmelsrichtungen und für die Neigungen 30° und 60° (Diagramme hier nicht dargestellt).

In der Mehrzahl der Diagramme zeigt sich in der Tendenz eine lineare Abhängigkeit – der gedachte Trend schneidet die Ordinate nahe Null. Die absolute Streuung nimmt mit zunehmender horizontaler Globalstrahlung zu, die relative Streuung erscheint über den gesamten Wertebereich etwa gleich hoch.

Auffällig sind jedoch die nach Süden orientierten Flächen (vertikal und 45°) sowie die 45° geneigte nach Norden weisende Fläche. Hier teilt sich die Punktewolke in verschiedene Fächer auf, die ihrerseits in der Tendenz linear sind und unterschiedliche Steigungen besitzen, wobei durch gedachte Trends auch hier die Ordinate etwa bei Null geschnitten wird. Durch Herausfiltern einzelner Monate wird erkennbar, dass jeder Monat jeweils einem Ast des Fächers zugeordnet werden kann. Die Ursache der Auffächerung ist also das im Jahresgang sich verändernde Verhältnis der Globalstrahlung geneigt zu horizontal und die Zusammenfassung der sich von Tag zu Tag langsam verändernden Verhältnisse in mittleren Monatswerten.

Bild 11: Monatswerte der Globalstrahlung auf verschieden orientierte und geneigte Flächen aufgetragen über den Monatswerten der Globalstrahlung auf horizontale Flächen – Werte für 30 Klimastationen und 5 Jahre




a45_b90
Monatssummen der Globalstrahlung für 30 Klimastationen / 5 Jahre
Orientierung / Neigung:
O 45
22.10.2019 17:17
Monatssumme Globalstrahlung auf die jeweilige Fläche [kWh/m²]
Monatssumme Globalstrahlung horizontal [kWh/m²]
a45_b180
Monatssummen der Globalstrahlung für 30 Klimastationen / 5 Jahre
Orientierung / Neigung:
S 45
22.10.2019 17:17
Monatssumme Globalstrahlung auf die jeweilige Fläche [kWh/m²]
Monatssumme Globalstrahlung horizontal [kWh/m²]
a45_b270
Monatssummen der Globalstrahlung für 30 Klimastationen / 5 Jahre
Orientierung / Neigung:
W 45
22.10.2019 17:18
Monatssumme Globalstrahlung auf die jeweilige Fläche [kWh/m²]
Monatssumme Globalstrahlung horizontal [kWh/m²]
a45_b0
Monatssummen der Globalstrahlung für 30 Klimastationen / 5 Jahre
Orientierung / Neigung:
N 45
22.10.2019 17:18
Monatssumme Globalstrahlung auf die jeweilige Fläche [kWh/m²]
Monatssumme Globalstrahlung horizontal [kWh/m²]

Im Folgenden sollen die unabhängige und die abhängige Variable so transformiert werden, dass eine lineare Regression möglich ist. Das Vorgehen entspricht in weiten Teilen der in [Hörner et al. 2016] und [Loga et al. 2019] dargestellten Methodik zur Ermittlung von Funktionsgleichungen zur Verbrauchsschätzung – dort werden auch einige Grundlagen insbesondere zur Anwendbarkeit der linearen Regression erörtert.

A.3.1 Transformation durch Logarithmieren beider Variabler

Es wird zunächst der Logarithmus der unabhängigen und der abhängigen Variable gebildet. Bild 12 zeigt für das Beispiel der Orientierung Ost / Neigung 45° das Ergebnis dieser Transformation. In Bild 12a sind analog zu Bild 11 zunächst die Datenpunkte in ein Diagramm mit linearen Koordinaten eingetragen. Durch die Logarithmierung wird erreicht, dass die Streuung der abhängigen Variablen (y-Achse) über den gesamten Bereich der unabhängigen Variable (x-Achse) absolut etwa konstant ist (Bild 12b). Dies ist eine wichtige Voraussetzung der linearen Regression (vgl. [Loga et al. 2019] Abschnitt 4.3). Im Bild ist das entsprechende lineare Modell eingetragen, das sich aus einer Vielzahl möglicher Modelle durch Minimierung der Summe der Residuenquadrate ergibt – das also die kleinste verbleibende Streuung hat. Die in der Gleichung y = 1,0126 x – 0,1113 gefundenen Parameter geben die Steigung und den Schnittpunkt mit der Ordinate an und werden im Folgenden als β_1 und β_0 bezeichnet (dass die Steigung bei dieser geneigten Fläche fast genau gleich 1,0 ist, ist reiner Zufall). Das ebenfalls eingetragene Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0{,}9889$ sagt, dass das lineare Modell etwa 99% der Streuung der Punktwolke erklären kann. Die einfache Schätzfunktion liefert also in diesem Fall Werte, die sehr nahe an den tatsächlichen Daten liegen.

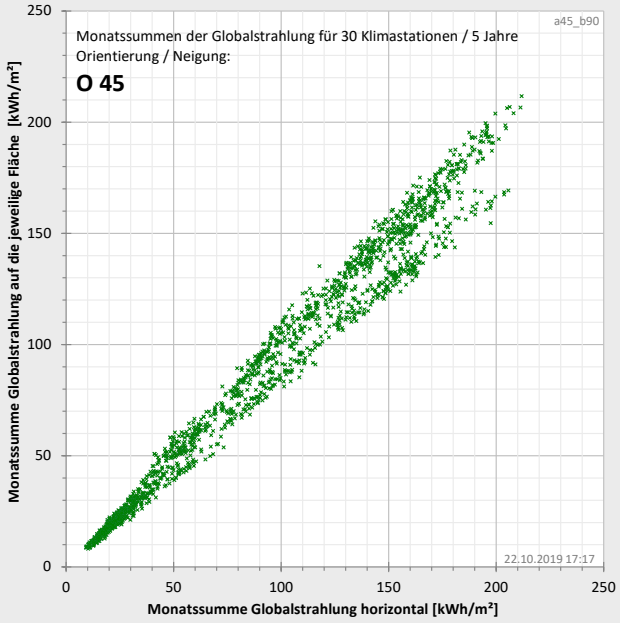
A.3.2 Zusätzliche Transformation zur Ausschaltung des Monatseinflusses für Fälle mit „Auffächerung“

Um auch für die Fälle mit Auffächerung eine lineare Regression zu ermöglichen, wird die unabhängige Variable zusätzlich zur Logarithmierung so transformiert, dass die Auffächerung minimiert wird. Dies wird mit einer Sinusfunktion erreicht, deren Eingangsvariable die Nummer des Monats darstellt und deren halbe Wellenlänge gerade 12 Monate umfasst. Beispielhaft ist das Ergebnis für eine vertikale nach Süden orientierte Fläche in Bild 12 d dargestellt. Die verbleibende Streuung ist hier deutlich größer, es können jedoch immerhin noch 92% der Streuung durch das Modell erklärt werden.

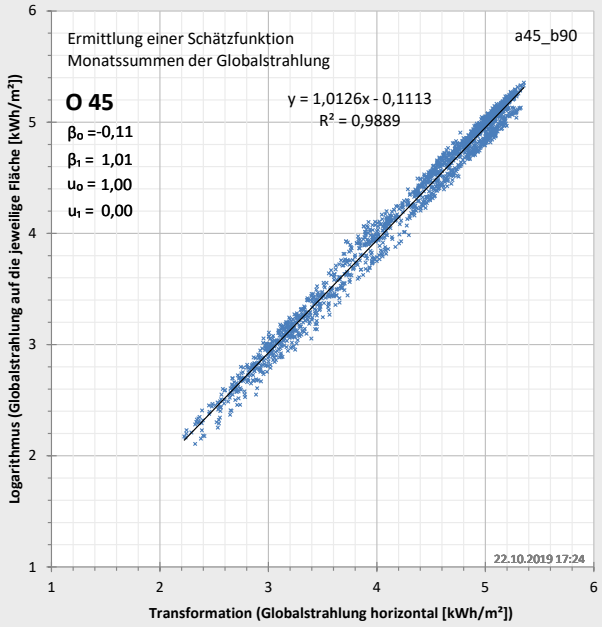
Bild 12: **Abhängigkeit der auf geneigte Flächen auftreffenden Globalstrahlung von der horizontalen Globalstrahlung, beispielhaft für eine nach Osten orientierte um 45° geneigte Fläche und eine nach Süden orientierte vertikale Fläche**
Wertepaare der Stichprobe ohne und mit Transformation der Variablen; Anwendung eines linearen Modells nach Transformation

Beispiel: Orientierung Ost / 45° geneigt

(a) Ausgangsvariablen

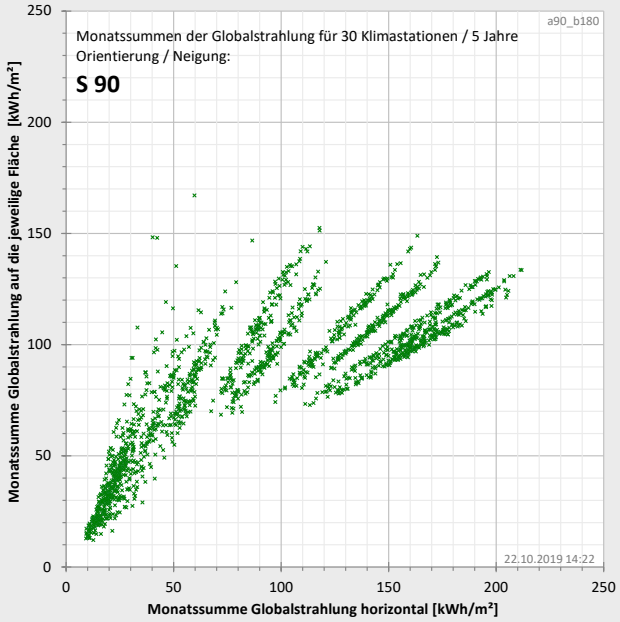


(b) transformierte Variablen

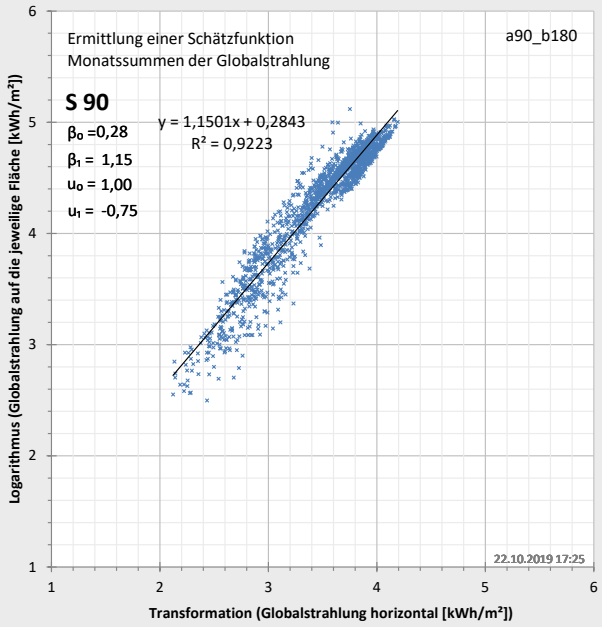


Beispiel: Orientierung Süd / vertikal

(c) Ausgangsvariablen



(d) transformierte Variablen



A.3.3 Ansatz für die Schätzfunktion und Definition der Parameter

Zur Vereinfachung wird für alle Neigungen / Orientierungen die gleiche Schätzfunktion verwendet, die sowohl den Logarithmus als auch den Sinus enthält. Für die Fälle ohne Auffächerung ist die Amplitude des Sinus dann einfach Null.

Durch die oben beschriebene Transformation der Variablen ergibt sich folgendes lineares Modell:

(7) $$\ln(g_{ab,m}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(f_m \cdot g_{hor,m})$$

mit	$g_{ab,m}$	Monatswert der Globalstrahlung auf eine Fläche mit Neigung a und Orientierung b	[kWh/m²]
	$g_{hor,m}$	Monatswert der Globalstrahlung auf horizontale Fläche	[kWh/m²]
	β_0, β_1	Regressionskoeffizienten	[-]
	f_m	Korrekturfunktion	[-]

Für den auf die einzelnen Monate wirkenden Korrekturfaktor wird eine Sinusfunktion mit halber Wellenlänge je Jahr angesetzt:

(8) $$f_m = 1 + u \cdot \sin\left(\frac{m - 0{,}5}{12} \cdot \pi\right)$$

mit	u	Koeffizient	[-]
	m	Index des Monats { 1 … 12 }	[-]

Durch Umwandlung kann nun die Schätzfunktion abgeleitet werden:

(9) $$\hat{g}_{ab,m} = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(f_m \cdot g_{hor,m})} = e^{\beta_0} \cdot (f_m \cdot g_{hor,m})^{\beta_1}$$ [kWh/m²]

mit	$\hat{g}_{ab,m}$	geschätzter Monatswert der Globalstrahlung mit Neigung a und Orientierung b

A.4 Ergebnisse

A.4.1 Parameter der Schätzfunktion

Die durch Regression gewonnenen Parameter der Schätzfunktion für die unterschiedlich orientierten und geneigten Flächen sind in Tab. 11 dargestellt.

Tab. 11: Parameter der Schätzfunktion für unterschiedlich orientierte und geneigte Flächen und Standardabweichung der Verhältnisse aus geschätzter Globalstrahlung zu exaktem Wert

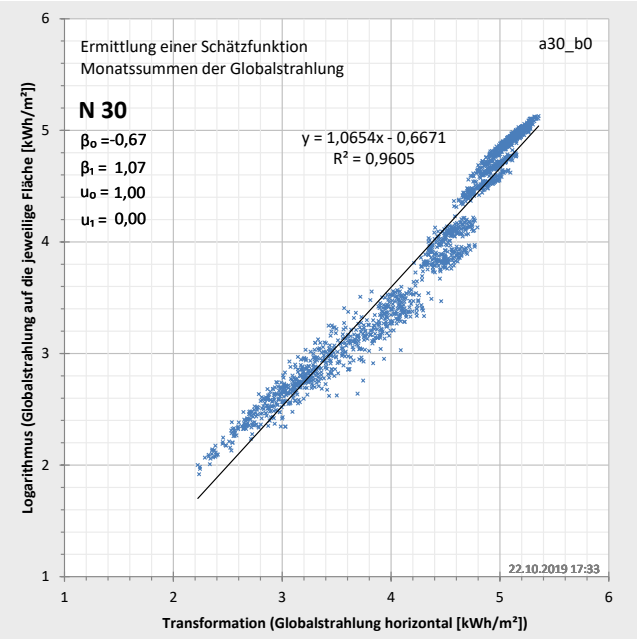
Abk.	Orientierung	Grad Neigung	Abk. in der Parameterstu-die	β_0	β_1	u	R^2	Standard-abwei-chung $\hat{g}_{ab}/g_{ab}$
Hor	**-**	**0**	**a0**					
NE_30	North-East	30	a30_b45	-0,70	1,10	0,00	0,98	12%
NE_45	North-East	45	a45_b45	-0,63	1,06	0,00	0,98	13%
NE_60	North-East	60	a60_b45	-0,59	1,03	0,00	0,98	12%
NE_90	**North-East**	**90**	**a90_b45**	**-0,69**	**1,01**	**0,00**	**0,99**	**9%**
E_30	East	30	a30_b90	-0,12	1,02	0,00	0,99	7%
E_45	East	45	a45_b90	-0,11	1,01	0,00	0,99	9%
E_60	East	60	a60_b90	-0,13	1,00	0,00	0,98	11%
E_90	**East**	**90**	**a90_b90**	**-0,27**	**0,99**	**0,00**	**0,98**	**13%**
SE_30	South-East	30	a30_b135	0,60	0,90	0,00	0,98	9%
SE_45	South-East	45	a45_b135	0,82	0,85	0,00	0,97	12%
SE_60	South-East	60	a60_b135	0,98	0,81	0,00	0,95	15%
SE_90	**South-East**	**90**	**a90_b135**	**0,00**	**1,15**	**-0,63**	**0,95**	**15%**
S_30	South	30	a30_b180	0,92	0,84	0,00	0,98	11%
S_45	South	45	a45_b180	0,19	1,17	-0,61	0,98	11%
S_60	South	60	a60_b180	0,29	1,16	-0,66	0,96	13%
S_90	**South**	**90**	**a90_b180**	**0,28**	**1,15**	**-0,75**	**0,92**	**16%**
SW_30	South-West	30	a30_b225	0,67	0,88	0,00	0,98	9%
SW_45	South-West	45	a45_b225	0,92	0,83	0,00	0,97	13%
SW_60	South-West	60	a60_b225	0,19	1,12	-0,57	0,97	12%
SW_90	**South-West**	**90**	**a90_b225**	**0,20**	**1,09**	**-0,63**	**0,94**	**15%**
W_30	West	30	a30_b270	-0,01	1,00	0,00	0,99	6%
W_45	West	45	a45_b270	0,03	0,98	0,00	0,99	8%
W_60	West	60	a60_b270	0,03	0,96	0,00	0,98	10%
W_90	**West**	**90**	**a90_b270**	**-0,09**	**0,94**	**0,00**	**0,98**	**12%**
NW_30	North-West	30	a30_b315	-0,64	1,08	0,00	0,98	12%
NW_45	North-West	45	a45_b315	-0,55	1,04	0,00	0,98	13%
NW_60	North-West	60	a60_b315	-0,50	1,01	0,00	0,98	12%
NW_90	**North-West**	**90**	**a90_b315**	**-0,62**	**0,99**	**0,00**	**0,99**	**9%**
N_30	North	30	a30_b0	-0,67	1,07	0,00	0,96	20%
N_45	North	45	a45_b0	-0,30	0,95	0,00	0,94	20%
N_60	North	60	a60_b0	-0,03	0,86	0,00	0,96	15%
N_90	**North**	**90**	**a90_b0**	**-0,14**	**0,85**	**0,00**	**0,97**	**12%**

17-12-2019

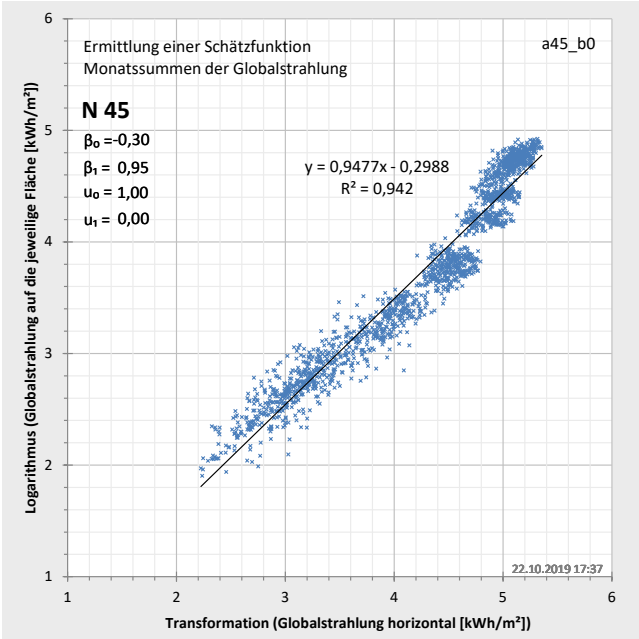
A.4.2 Diagramme zur Visualisierung der linearen Regression bei transformierten Variablen

Bild 13: Orientierung Nord (0°)

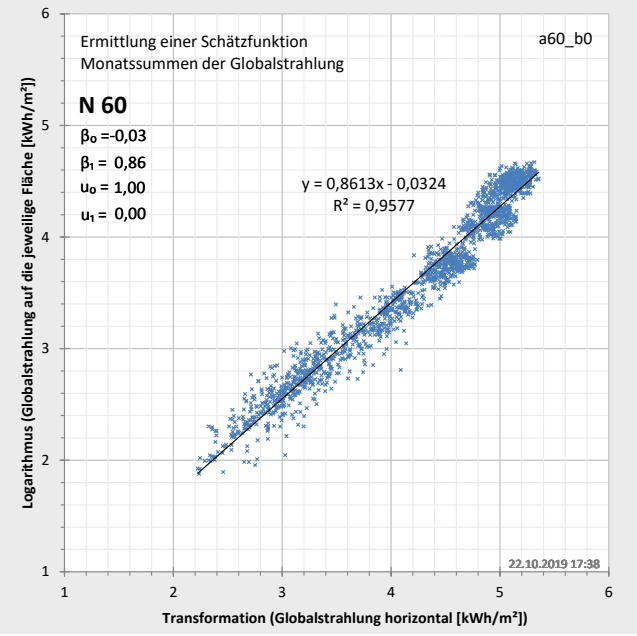
Neigung 30°



Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°

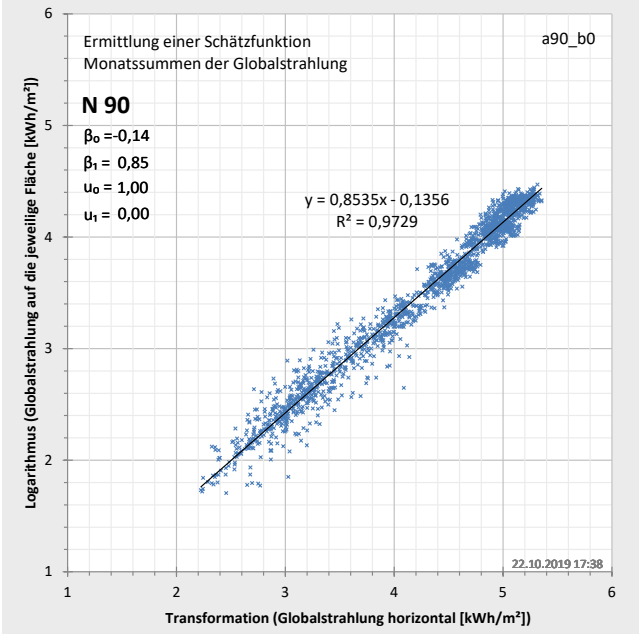
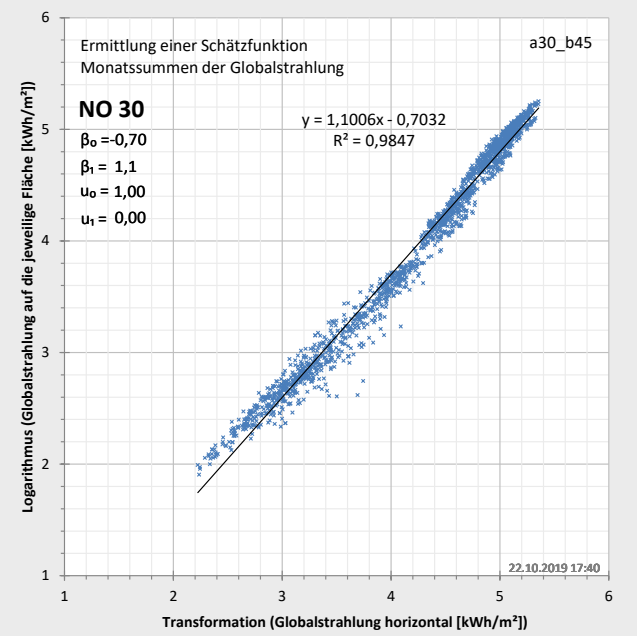
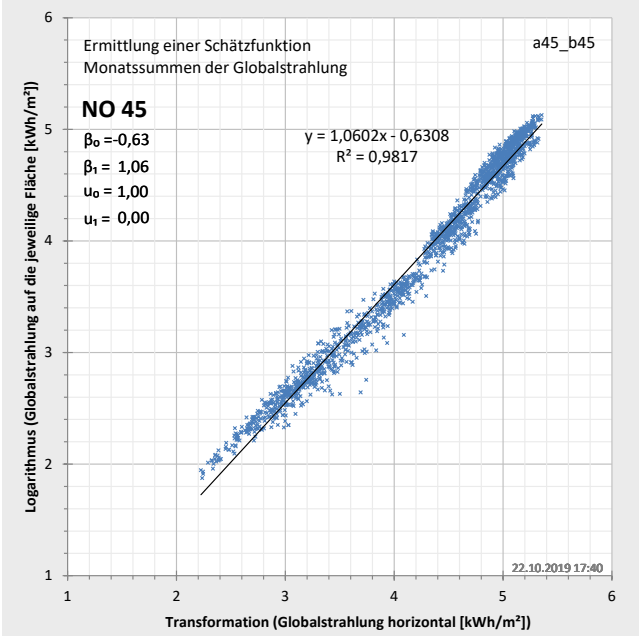


Bild 14: Orientierung Nord-Ost (45°)

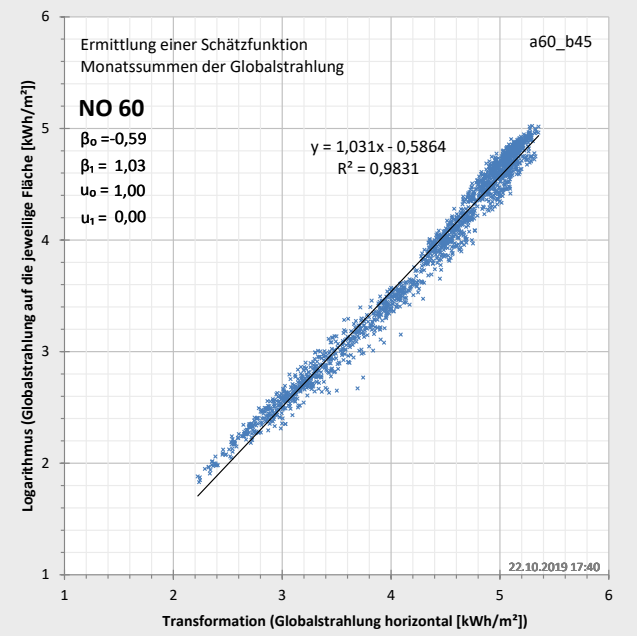
Neigung 30°



Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°

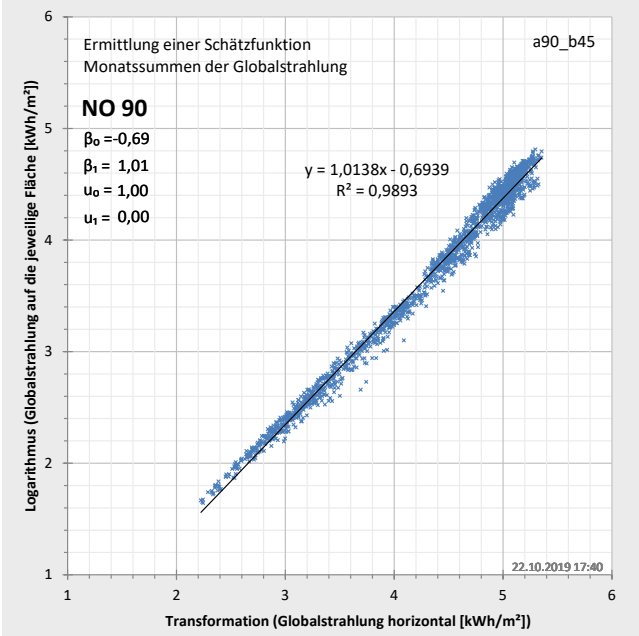
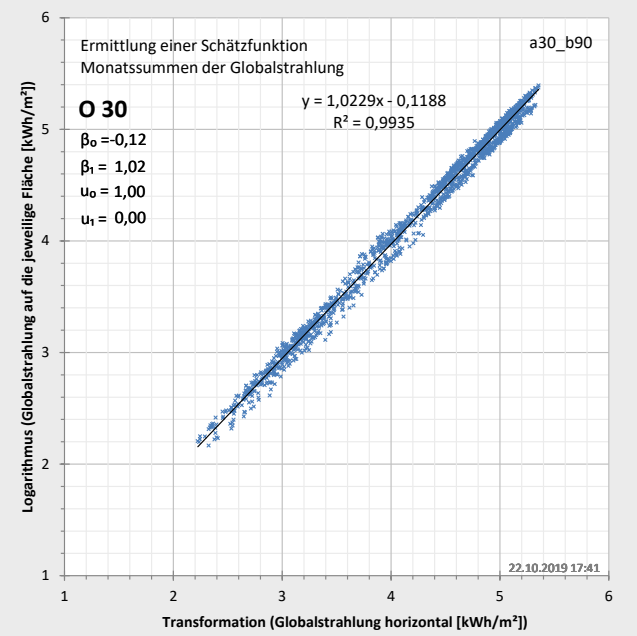
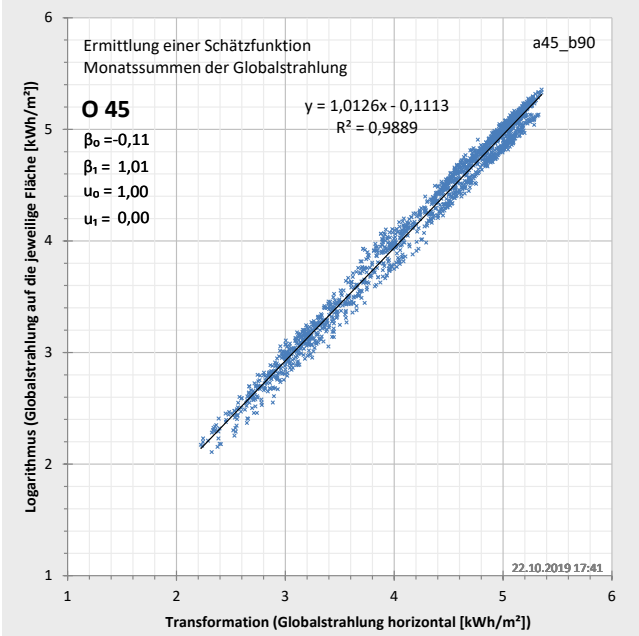


Bild 15: Orientierung Ost (90°)

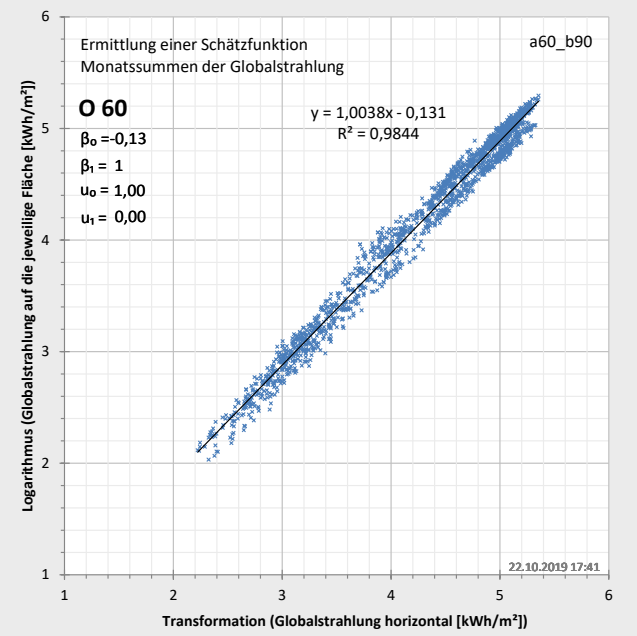
Neigung 30°



Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°

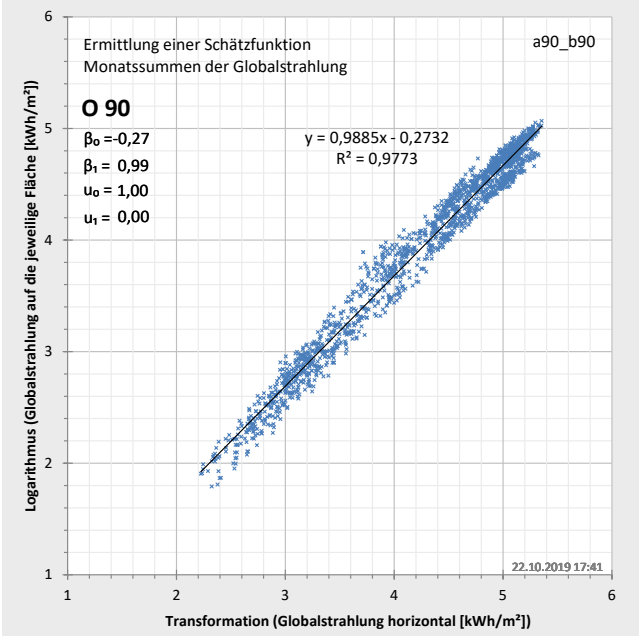
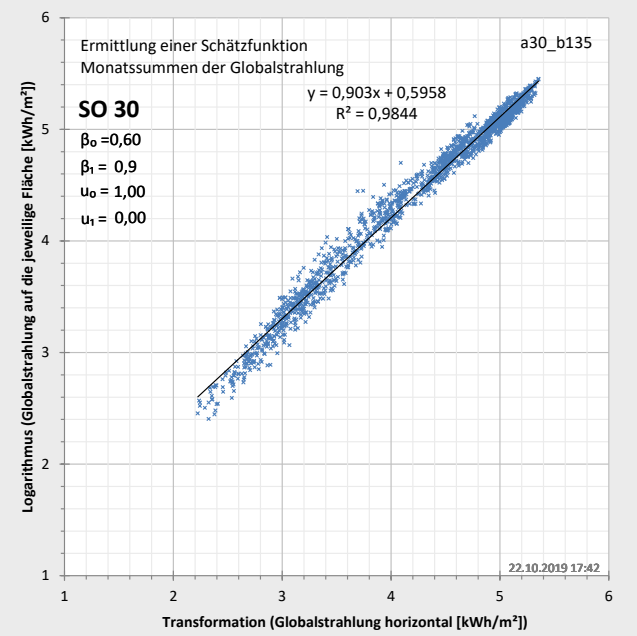
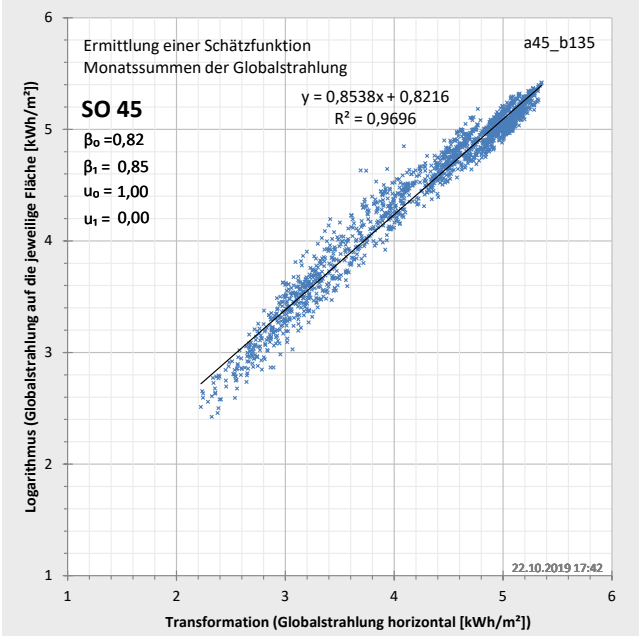


Bild 16: Orientierung Süd-Ost (135°)

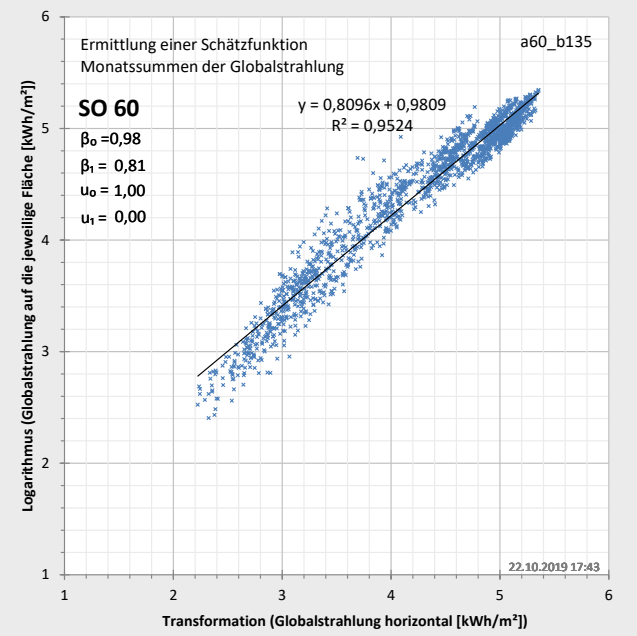
Neigung 30°



Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°

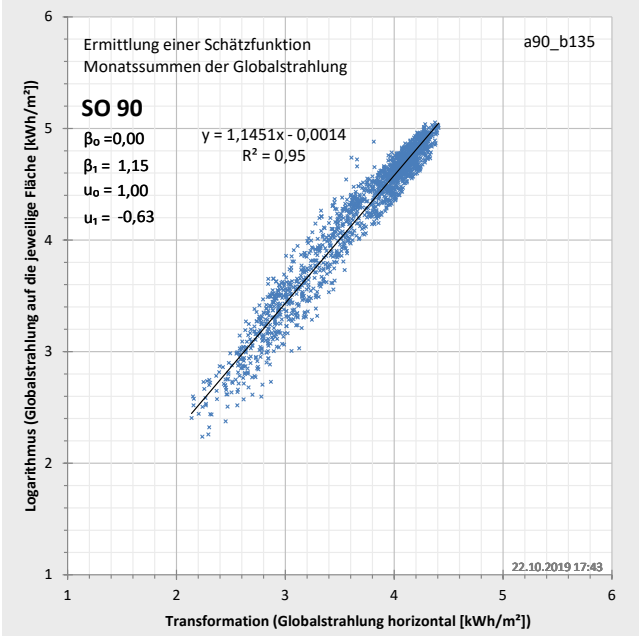
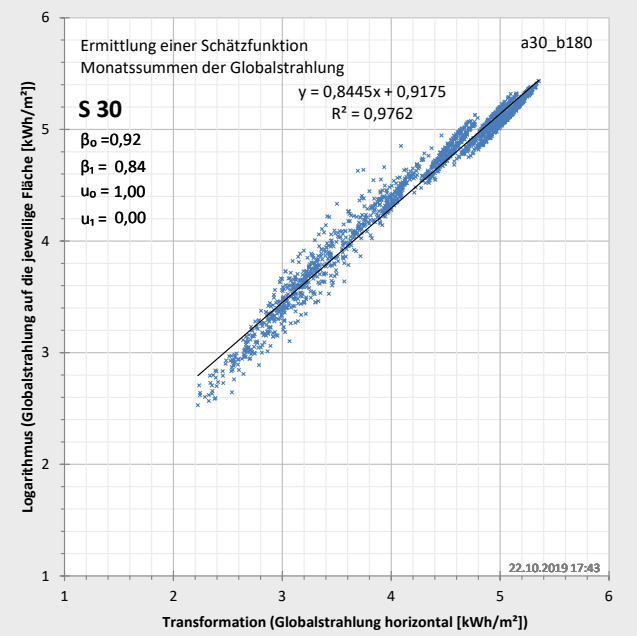
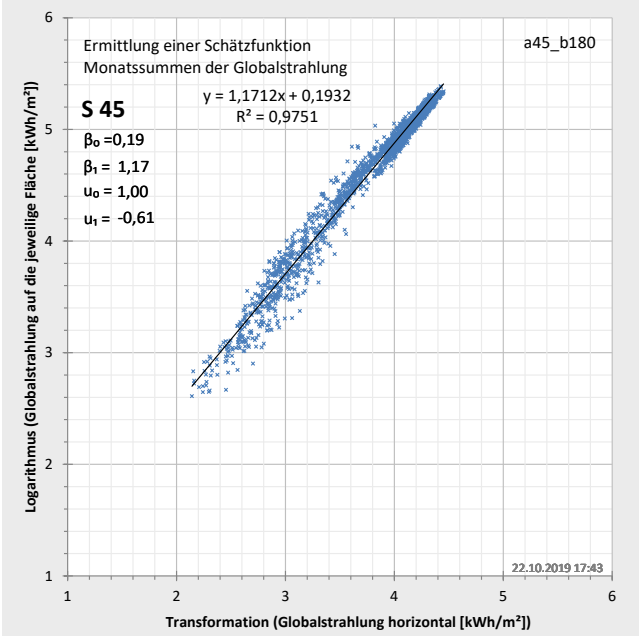


Bild 17: Orientierung Süd (180°)

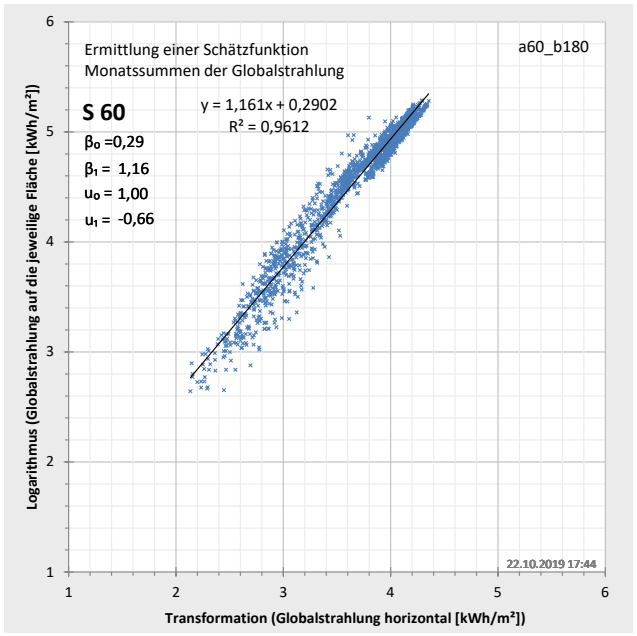
Neigung 30°



Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°

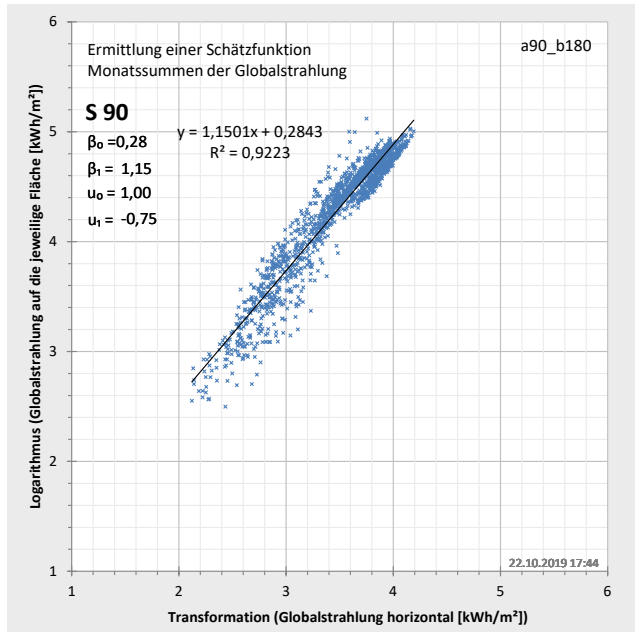
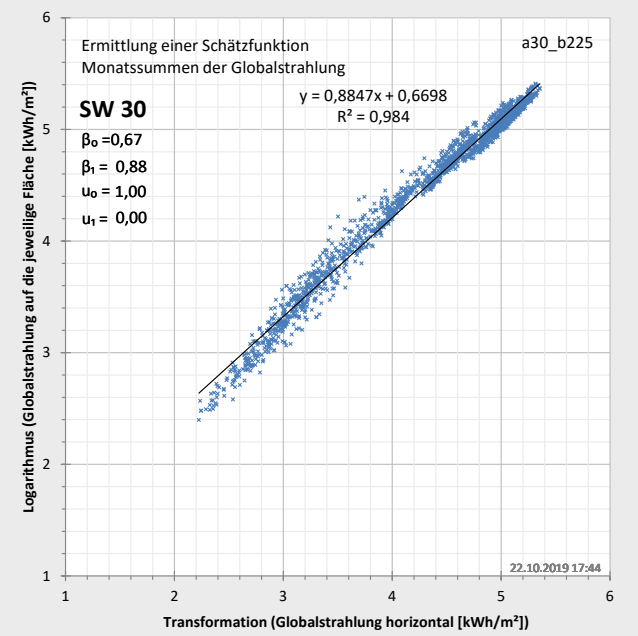
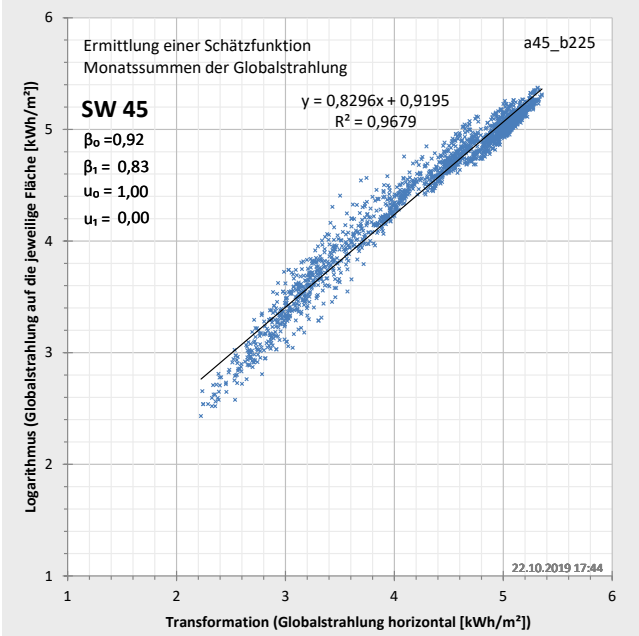


Bild 18: Orientierung Süd-West (225°)

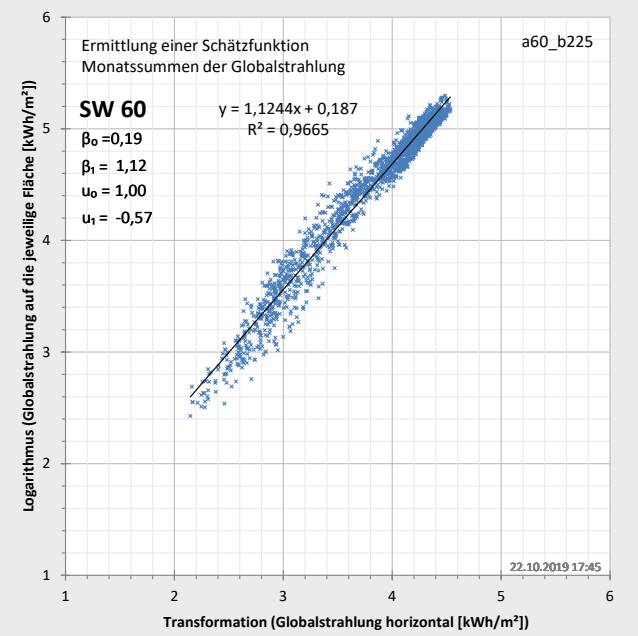
Neigung 30°



Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°

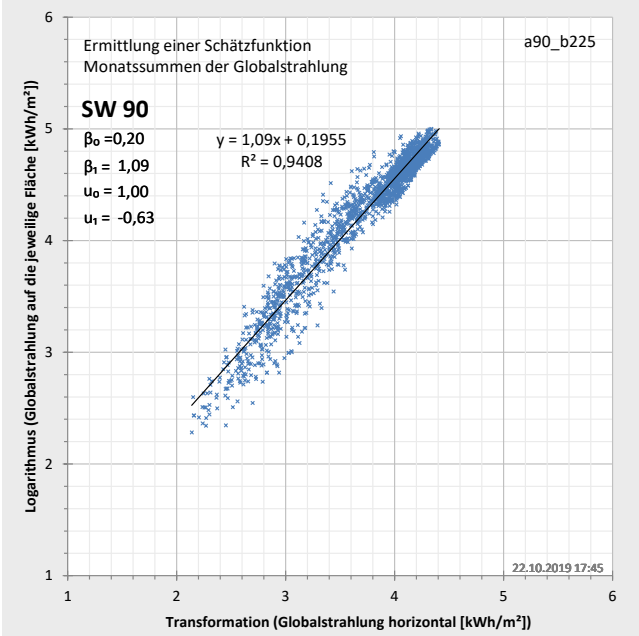
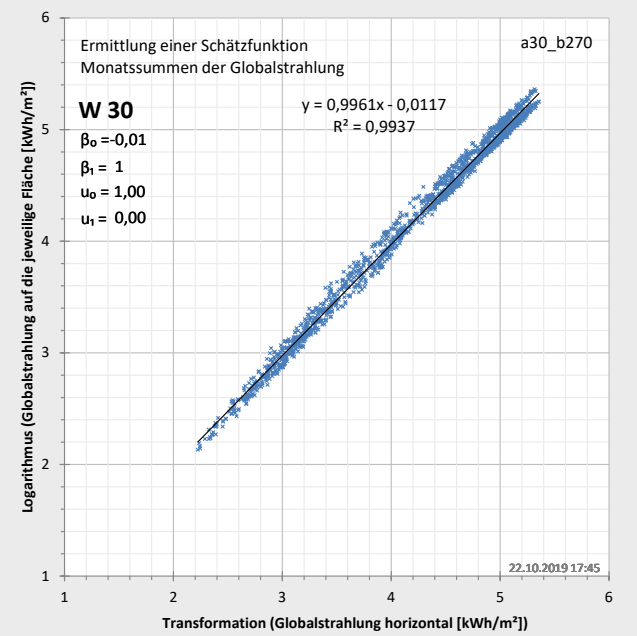
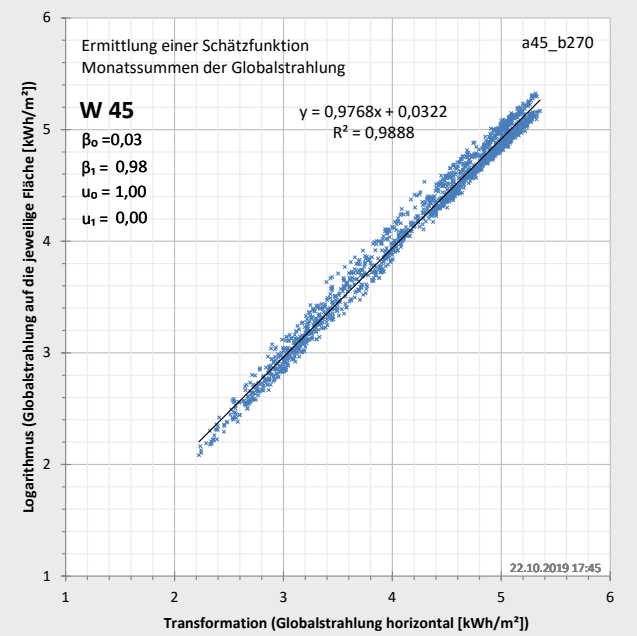


Bild 19: Orientierung West (270°)

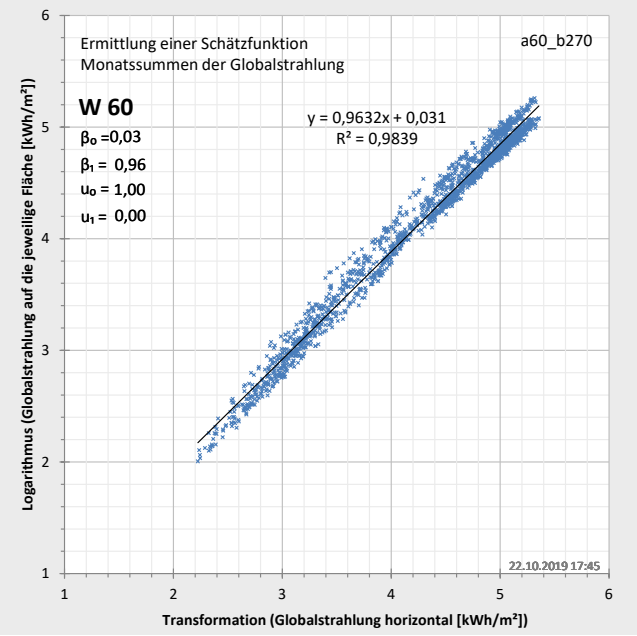
Neigung 30°



Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°

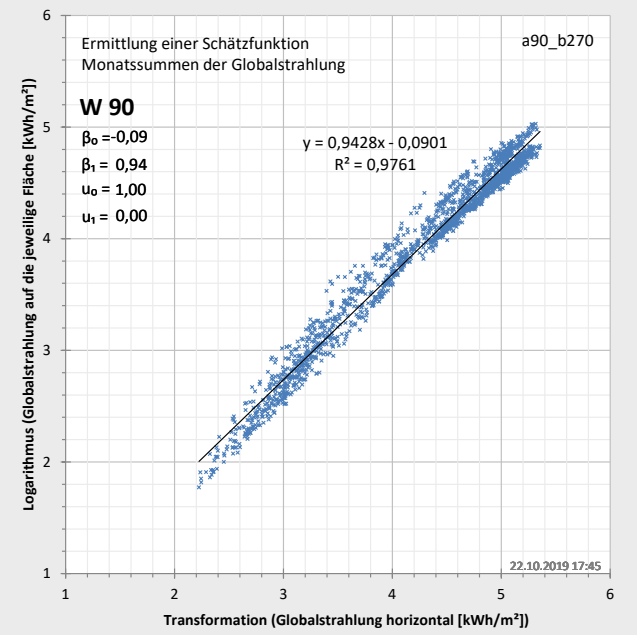
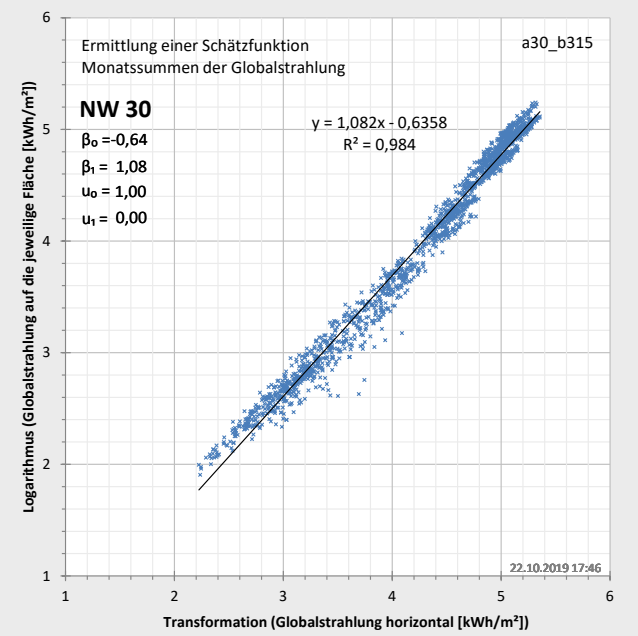
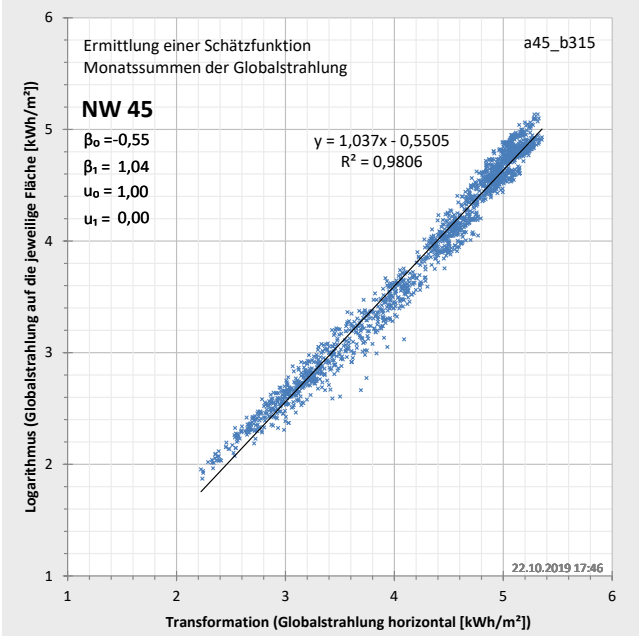


Bild 20: Orientierung Nord-West (315°)

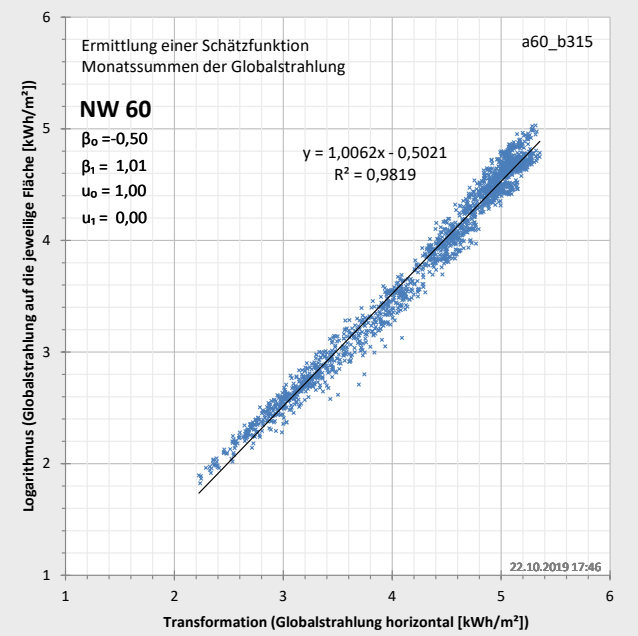
Neigung 30°



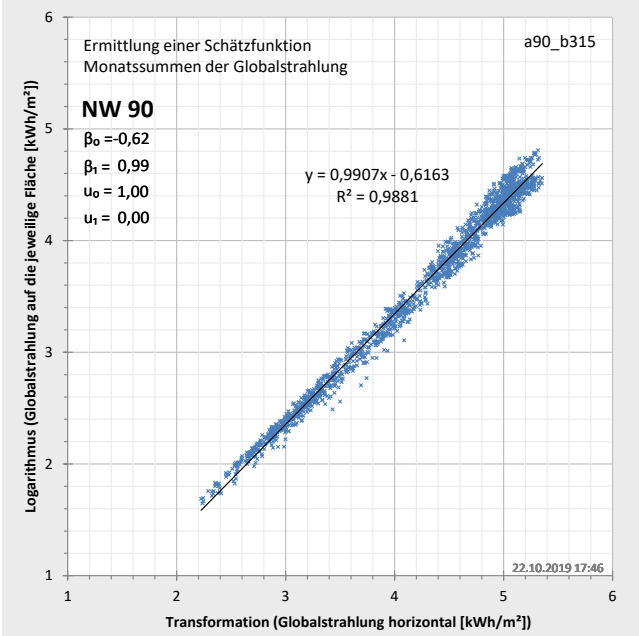
Neigung 45°



Neigung 60°



Neigung 90°



A.5 Überprüfung der hergeleiteten Schätzfunktion und verbleibende Unsicherheiten

Die Schätzfunktionen wurden durch Vergleich der geschätzten mit den tatsächlichen Monatswerten der Globalstrahlung überprüft. Auch hier werden wieder beide Variablen logarithmiert, um eine über den ganzen Bereich der unabhängigen Variablen etwa gleich große Streuung der abhängigen Variablen zu erreichen. Die folgenden Diagramme zeigen wieder beispielhaft die Orientierungen Ost/45° und Süd/90°. Die lineare Regression liefert erwartungsgemäß in beiden Beispielen eine Steigung sehr nahe 1,0. Dabei ist das Modell für Ost/45° mit einem R^2 von 0,99 deutlich besser als Süd/90° mit R^2 = 0,92.

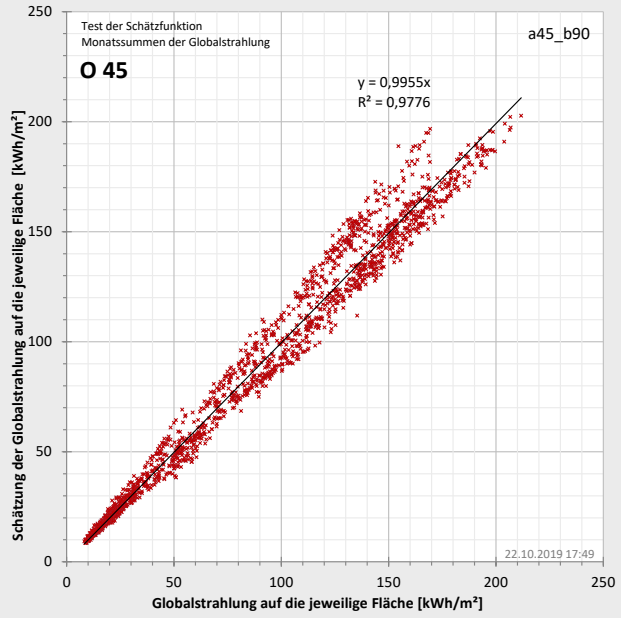
Um die Unsicherheit des Modells bezogen auf den Einzelfall abzuschätzen, wurden je Neigung/Orientierung für alle Monatswerte jeweils die Verhältnisse aus geschätzter Globalstrahlung zu exaktem Wert ermittelt und die Standardabweichung dieses Verhältnisses bestimmt. Die Werte liegen zwischen 6 und 20% (siehe Tab. 11 ganz rechts). Der Mittelwert der Standardabweichungen über alle Orientierungen ist 12%.

Die Unsicherheit der Schätzung kann für das hier anvisierte Verbrauchscontrolling in Anbetracht anderer Unsicherheiten (z.B. Verschattungen) als akzeptabel betrachtet werden.

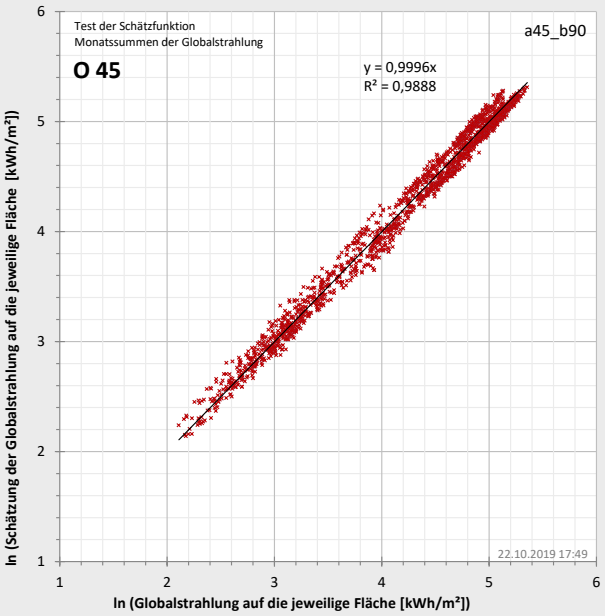
Bild 21: geschätzte über gemessener Globalstrahlung für zwei beispielhafte Orientierungen in linearer und in logarithmischer Darstellung

Beispiel: Orientierung Ost / 45° gerneigt

(a) lineare Darstellung

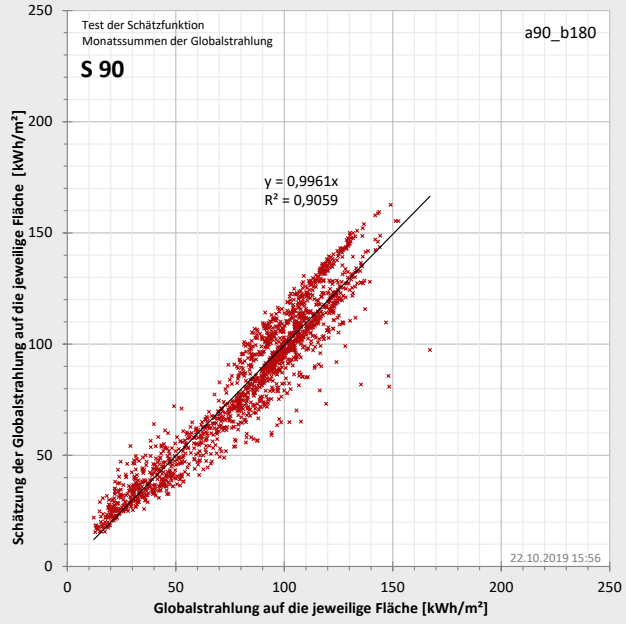


(b) logarithmische Darstellung

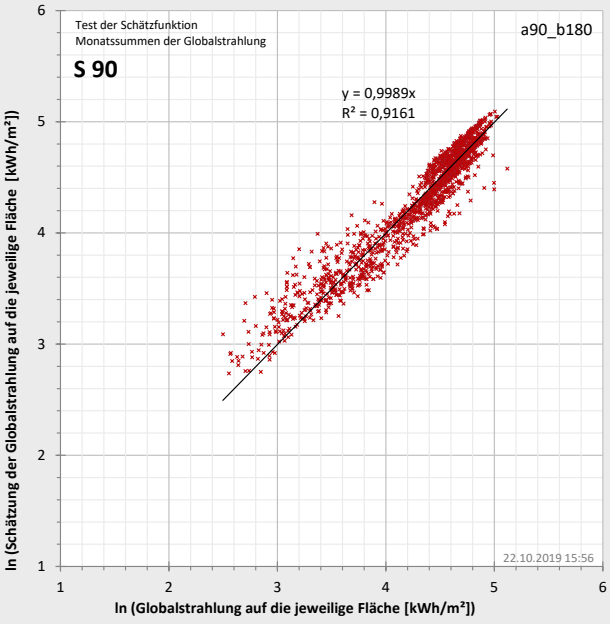


Beispiel: Orientierung Süd / vertikal

(c) lineare Darstellung



(d) logarithmische Darstellung



Anhang B Abschätzung der auf Heiztage entfallenden Anteile der monatlichen Globalstrahlung – Herleitung der Schätzfunktion

B.1 Aufgabenstellung

Für die beim Verbrauchscontrolling auf der einfachsten Stufe verwendete Heizperiodenbilanz (entsprechend DIN V 13790, DIN V 4108-6, bzw. [TABULA CalcMethod 2013]) wird die Summe der Globalstrahlung an Heiztagen benötigt. Für die Globalstrahlung stehen aus den in Anhang A.2 beschriebenen Klimadaten jedoch jeweils nur Monatswerte zur Verfügung, eine direkte Ermittlung der Globalstrahlung an Heiztagen wäre nur sehr aufwändig aus den Tagesdaten für die Solarstrahlung möglich.[6] Daher wird eine Schätzfunktion benötigt, mit der die Globalstrahlung an Heiztagen eines Monats aus der Globalstrahlung des Monats und der Anzahl der Heiztage (für eine gegebene Heizgrenztemperatur) ermittelt werden kann.

Ausgangspunkt sind wie bei der Herleitung der Schätzfunktion für die nicht-horizontale Globalstrahlung die Realklimadatensätzen mit Tageswerten der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung auf verschiedene Orientierungen für 30 Klimastationen und 5 Jahre (Beschreibung der Daten: siehe Anhang A, Abschnitt A.2).

[6] Zudem würde sich durch die Erweiterung der Datentabellen um die Globalstrahlung an Heiztagen für drei Heizgrenztemperaturen die Größe der Arbeitsmappe des Realklimatools (derzeit 20 MB) etwa verdoppeln, was die Handhabung bei Download und Anwendung durch Energieberater doch deutlich einschränken würde.

B.2 Ansatz für die Schätzfunktion

Als Ausgangspunkt dient die Schätzfunktion [LEG 1999], die auf dem Schweizerischen Verfahren SIA 380/1 [SIA 380/1] basiert: Je Monat wird die gesamte Globalstrahlung mit dem Verhältnis der Heiztage zu den Tagen des Monats multipliziert (Bild 22). Darüber hinaus gibt es einen Korrekturterm, der berücksichtigt, dass für einen Monat der Übergangszeit (Tagesmitteltemperaturen liegen sowohl über als auch unter der Heizgrenztemperatur) der Mittelwert der Globalstrahlung an Heiztagen unter dem Mittelwert der Globalstrahlung des Monats liegt. Je weniger Heiztage ein Monat hat, desto stärker wirkt sich diese Korrektur aus. Bei dem Ansatz nach [SIA 380/1] [LEG 1999] (Bild 22) würde für einen Monat, der nur einen Heiztag hat, für diesen Tag nur etwa 60% der durchschnittlichen Globalstrahlung des Monats angesetzt.

Bild 22: Vereinfachte Schätzung der monatlichen Globalstrahlung an Heiztagen nach dem Schema von [SIA 380/1] [LEG 1999] / Auszug aus [LEG 1999]

Die Globalstrahlung während der Heiztage wurde für die Jahressumme mit der Formel für den Reduktionsfaktor f_s wie folgt berechnet:

$$G = \sum_{m=1}^{12} \frac{HT_m}{T_m} \cdot fs \cdot G_m \qquad (kWh/(m^2a*))$$

$$f_s = \left(\frac{HT_m}{T_m} \cdot 0{,}4 \right) + 0{,}6 \qquad (-)$$

wobei HT_m = Heiztage im Monat m (d/Monat)
T_m = Tage im Monat m (d/Monat)
G_m = Globalstrahlung im Monat m (kWh/(m²Monat))

Analog wird die folgende Gleichung für die Schätzung der an Heiztagen anfallenden Globalstrahlung $\hat{g}_{ab,m,HD}$ bei bekannter monatlicher Globalstrahlung aufgestellt:

(10)
$$\hat{g}_{ab,HD,m} = f_{Sol,HD,m} \cdot \frac{d_{HD,m}}{d_m} \cdot g_{ab,m} \qquad [kWh/m²]$$

mit	$g_{ab,m}$	Globalstrahlung auf eine Fläche mit Orientierung b und Neigung a für den Monat m	[kWh/m²]
	$d_{HD,m}$	Anzahl der Heiztage des Monats m	[d]
	d_m	Anzahl der Tage des Monats m	[d]

Der Korrekturfaktor $f_{Sol,HD,m}$ ist wie folgt definiert:

(11)
$$f_{Sol,HD,m} = 1 - p_{Sol,HD}\left(1 - \frac{d_{HD,m}}{d_m}\right) \qquad [-]$$

mit	$p_{Sol,HD}$	empirisch ermittelter Parameter	[-]

Der Ermittlung des Parameters $p_{Sol,HD}$ erfolgt auf der Grundlage der in Abschnitt A.2 beschriebenen Realklimadatensätzen.

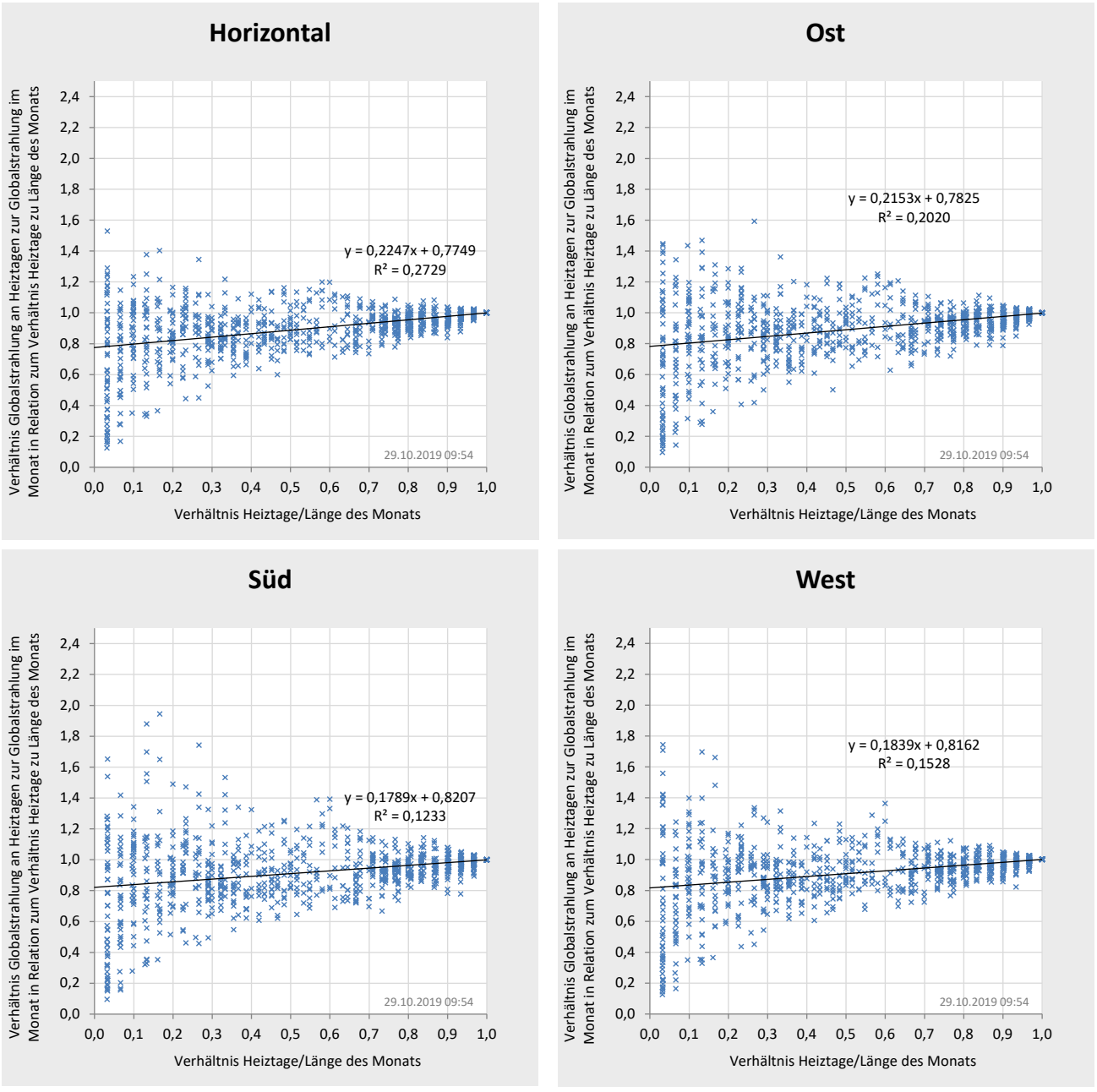
B.3 Ergebnisse

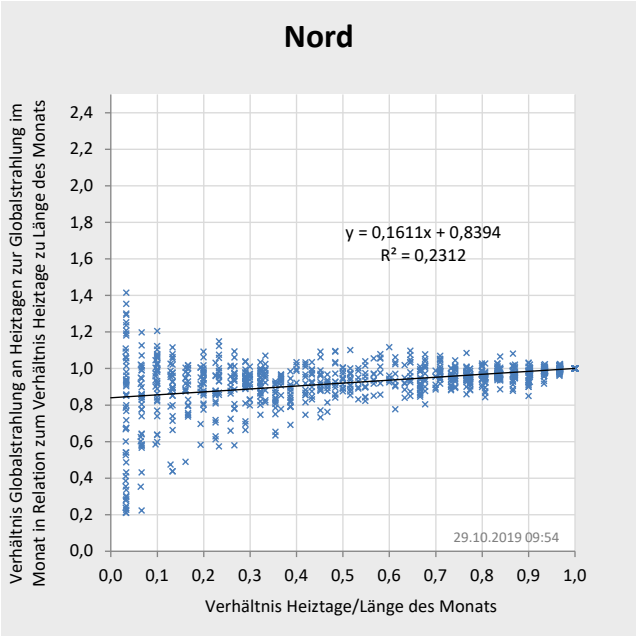
Die folgenden Diagramme zeigen für die Hauptorientierungen den Zusammenhang zwischen der monatlichen Globalstrahlung an Heiztagen und der Anzahl der Heiztage des Monats:

- Auf der x-Achse dargestellt ist das Verhältnis der Anzahl von Heiztagen zur Anzahl der Tage im Monat.
- Auf der y-Achse dargestellt ist das Verhältnis der Globalstrahlung an Heiztagen zur Globalstrahlung im Monat in Relation zum Verhältnis Heiztage zu Länge des Monats.

Die Ordinate wird im Bereich um 0,8 geschnitten, die genauen Werte werden von Tab. 12 wiedergegeben.

Bild 23: Verhältnis Globalstrahlung an Heiztagen zur Globalstrahlung im Monat in Relation zum Heiztageanteil des Monats aufgetragen über den Heiztageanteil des Monats – jeweils für die Hauptorientierungen
Datenpunkte für 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren)





Die lineare Regression ergibt die folgenden Schätzparameter, die zu einem einheitlichen Wert von 0,19 zusammengeführt werden können (die damit einhergehende Ungenauigkeit der Schätzung liegt bei wenigen Prozent, bezogen auf den Schätzwert, siehe nächster Abschnitt).

Tab. 12 Ergebnisse der Analyse / Schätzparameter für die fünf Hauptorientierungen

	Parameter $p_{Sol,HD}$ differenziert nach Himmelsrichtung	Parameter $p_{Sol,HD}$ vereinfacht
Horizontal	0,225	0,19
Ost	0,215	
Süd	0,179	
West	0,184	
Nord	0,161	
Mittelwert	0,193	

Der Parameter $p_{Sol,HD}$ liegt damit nur etwa bei der Hälfte des Wertes der Schweizerischen [SIA 380/1] – der Effekt ist also deutlich kleiner. Ein Grund hierfür könnten die in der Schweiz gegenüber Deutschland doch unterschiedlichen Wetterverhältnisse sein.

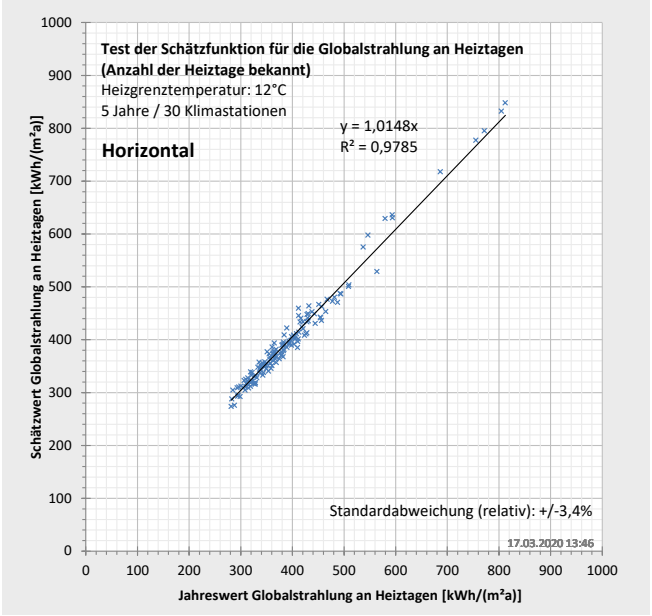
B.4 Überprüfung der hergeleiteten Schätzfunktion und verbleibende Unsicherheiten

Um die Schätzformel für die Globalstrahlung an Heiztagen zu überprüfen und die verbleibende Unsicherheit zu ermitteln, wird sie für die 30 Klimastationen angewendet. Die Jahressummen der geschätzten Monatswerte werden über den Jahressummen der tatsächlichen Monatswerte im xy-Diagramm aufgetragen.

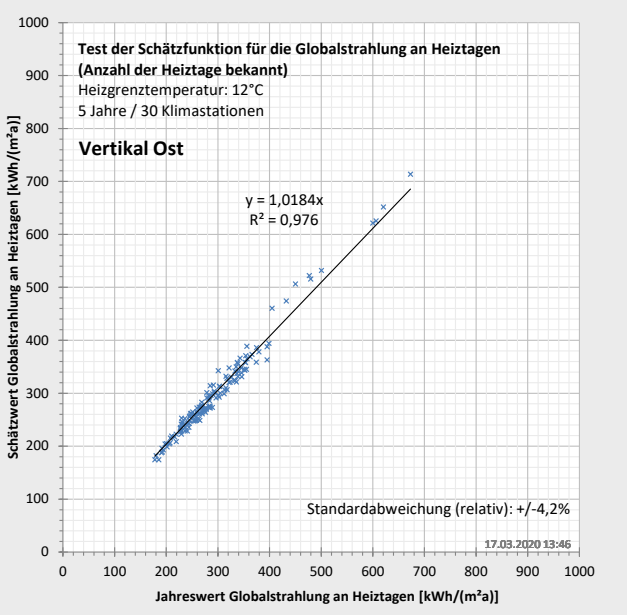
Die relative Standardabweichung zwischen den Werten der Schätzformel und der Messung liegt je nach Orientierung zwischen ca. 2 und 4%, im Mittel bei 3,3%. Die Schätzung ist also recht genau.

Bild 24: Anwendung der Schätzformel für die monatliche Globalstrahlung an Heiztagen: Geschätzte Jahreswerte der Globalstrahlung an Heiztagen aufgetragen über den tatsächlichen Jahreswerten der Globalstrahlung an Heiztagen – jeweils für die Hauptorientierungen
Datenpunkte für 30 Klimastationen (jeweils für 5 Kalenderjahre)

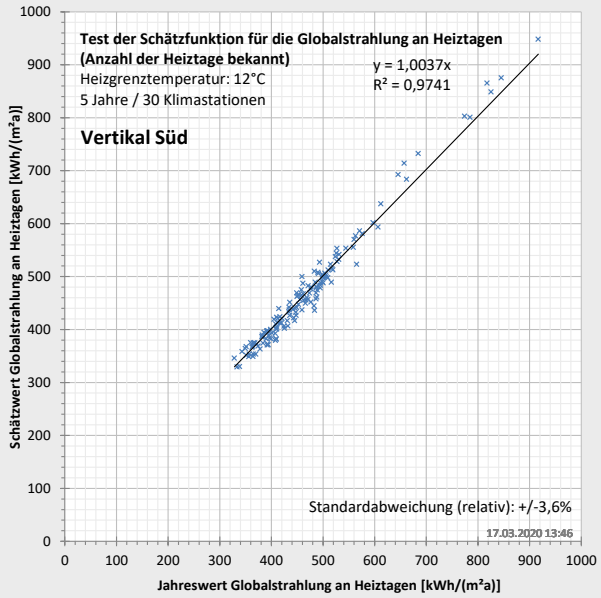
Horizontal



Vertikal Ost



Vertikal Süd



Vertikal West

Vertikal Nord

Anhang C Abschätzung der Zahl der Heiztage je Monat für eine gegebene Heizgrenztemperatur – Herleitung der Schätzfunktion

C.1 Aufgabenstellung

Im Realklima-Tool steht tabellarisch neben den mittleren Monatstemperaturen auch die aus den Tagesdaten des DWD ermittelte Zahl der Heiztage je Monat zur Verfügung. Es gibt jedoch auch Datenquellen, die nur die mittleren Monatstemperaturen enthalten. Damit diese auch für die Heizperiodenbilanz genutzt werden können, soll hier noch eine Schätzfunktion für die Zahl der Heiztage je Monat entwickelt werden.

C.2 Ansatz für die Schätzfunktionen

Es ist wahrscheinlich, dass es einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Heiztage je Monat und der Differenz zwischen der Monatsmitteltemperatur und der Heizgrenztemperatur gibt. Der folgende Ansatz geht von einem linearen Zusammenhang aus:

(12) $$\hat{d}_{HD,m} = \hat{f}_{m,HD} \cdot d_m \qquad [\,-\,]$$

mit	$\hat{d}_{HD,m}$	Schätzwert für die Anzahl der Heiztage im Monat m	[d]
	d_m	Gesamtzahl der Tage des Monats m	[d]

Die Schätzfunktion für den Anteil der Heiztage eines Monats hängt linear mit der Differenz zwischen Monatsmitteltemperatur und Heizgrenztemperatur zusammen und kann nur Werte von 0 und 1 annehmen.

(13) $$\hat{f}'_{m,HD} = \beta_0 + \beta_1 \cdot (\bar{\vartheta}_{e,m} - \vartheta_b) \qquad [\,-\,]$$
$$\hat{f}_{m,HD} = \min\left(\max\left(\hat{f}'_{m,HD}, 0\right), 1\right)$$

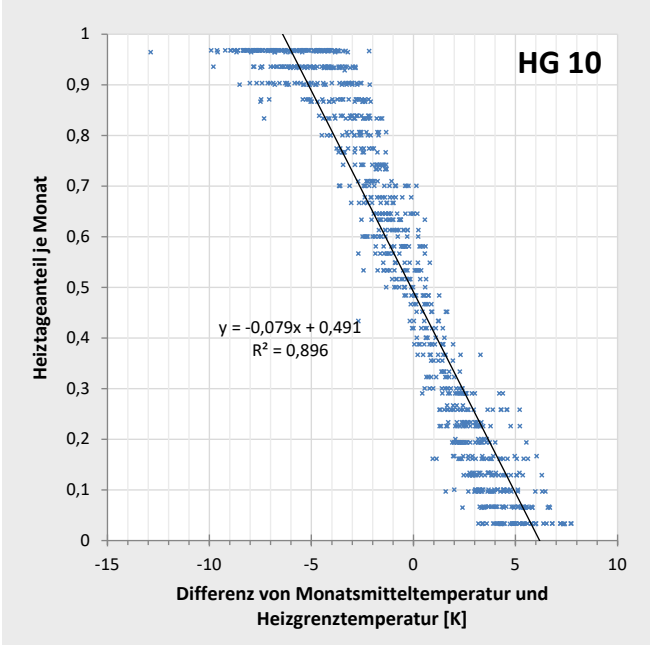
mit	$\hat{f}_{m,HD}$	Schätzwert für den Anteil der Heiztage an der Gesamtzahl der Tage des Monats m	[-]
	$\bar{\vartheta}_{e,m}$	mittlere Außenlufttemperatur des Monats m	[°C]
	ϑ_b	Heizgrenztemperatur (*base temperature)*	[°C]
	β_0, β_1	Regressionskoeffizienten	

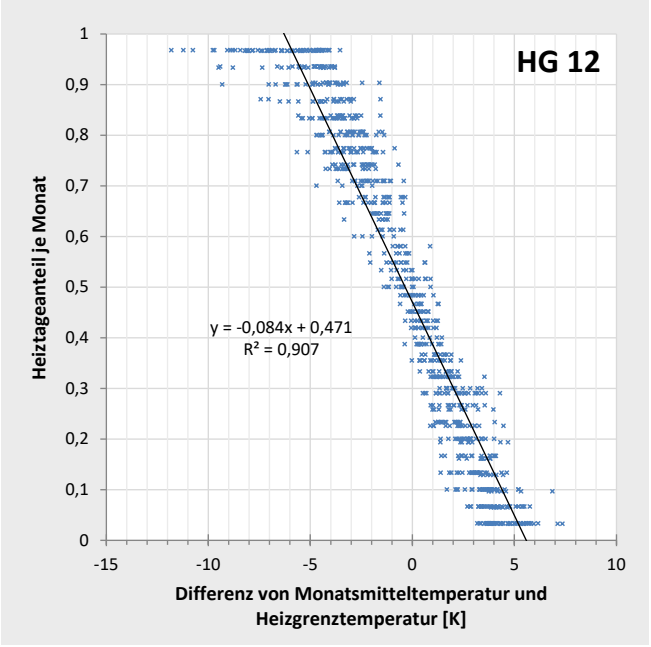
C.3 Ergebnisse

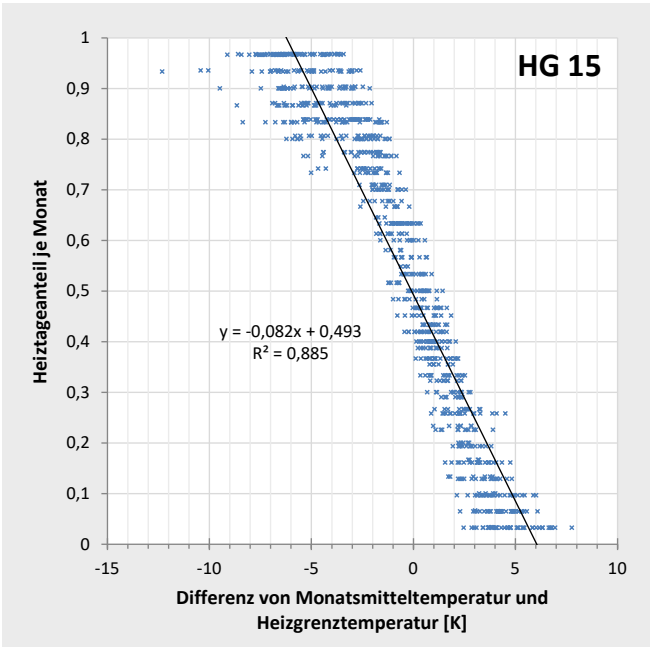
Für die oben genannten 30 Klimastationen liegen für einen Zeitraum von 5 Jahren differenzierte Klimadaten vor. Es konnte also die Anzahl der Heiztage für jeden der 60 Monate je Klimastation exakt ermittelt werden. In den folgenden Diagrammen ist für alle 1800 Messmonate der Heiztageanteil $f_{m,HD}$ über der Differenz zwischen und Heizgrenztemperatur und Monatsmitteltemperatur aufgetragen sowie das Ergebnis der line-

aren Regression – jeweils für die Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15°C. Tab. 13 zeigt die Regressionskoeffizienten.

Bild 25: Heiztageanteil je Monat aufgetragen über die Differenz von Monatsmitteltemperatur und Heizgrenztemperatur – jeweils für die Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15°C (Bezeichnungen „HG 10“, „HG 12“, „HG 15“)
Datenpunkte = Monatswerte der 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren)







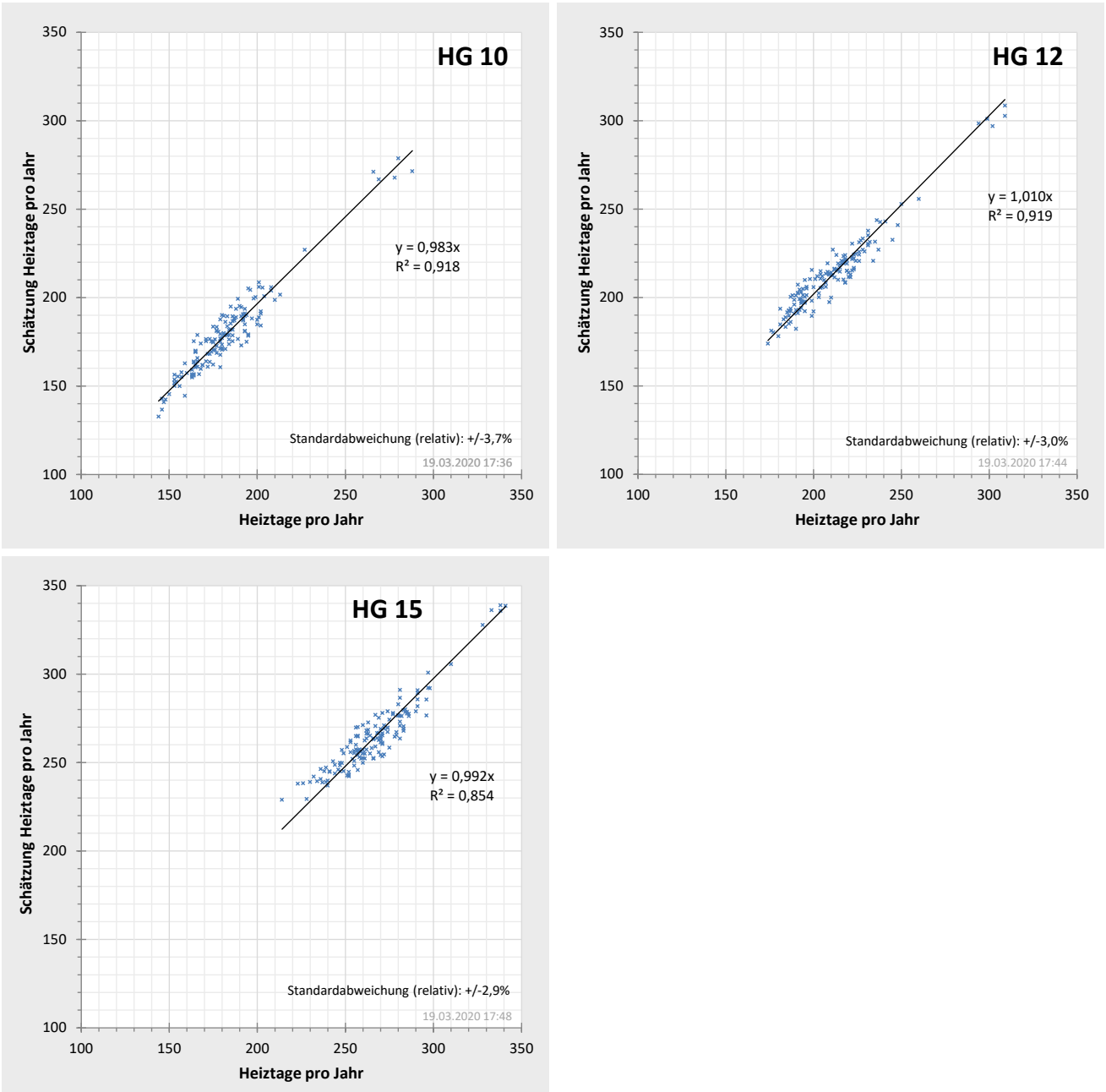
Tab. 13: Regressionskoeffizienten für die Heiztage-Schätzfunktion
(differenziert nach Heizgrenztemperatur und gesamt)

ϑ_b	β_0	β_1
10°c	0,491	-0,079
12°C	0,471	-0,084
15°C	0,493	-0,082
gesamt	**0,0485**	**-0,082**

C.4 Überprüfung der hergeleiteten Schätzfunktion und verbleibende Unsicherheiten

Die Schätzformel für die Zahl der Heiztage je Monat wird für die 30 Klimastationen angewendet. Die Jahressummen der geschätzten Monatswerte werden über den Jahressummen der tatsächlichen Monatswerte im xy-Diagramm aufgetragen. Die Unsicherheit der Schätzung (relative Standardabweichung) liegt zwischen 3 und 4%.

Bild 26: Anwendung der Schätzformel: geschätzte Heiztage je Jahr aufgetragen über den tatsächlichen Heiztagen je Jahr – jeweils für die Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15°C
Datenpunkte = Jahreswerte der 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren)

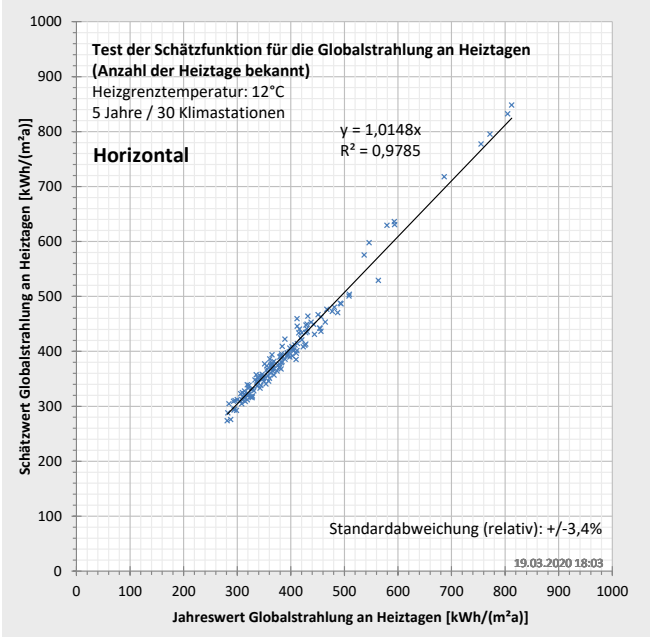


C.5 Überprüfung des Schätzverfahrens für die Globalstrahlung an Heiztagen auf der Grundlage einer Heiztage-Schätzung

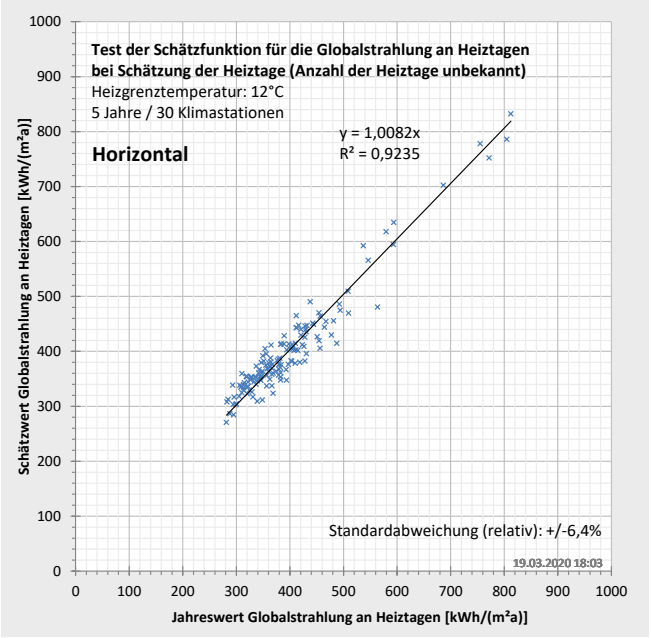
Im Anhang B.4 wurde die Unsicherheit der Schätzung der Globalstrahlung an Heiztagen über alle Orientierungen auf 3,3% geschätzt. Die folgenden Analysen zeigen die Gesamtunsicherheit der kombinierten Schätzung, also der Schätzung der Heiztage und der Schätzung der Globalstrahlung an Heiztagen. Über alle Orientierungen erhöht sich die Unsicherheit bei dieser Kombination auf 6,0%.

Bild 27: Anwendung der Schätzformel im Fall einer Heiztage-Schätzung: Geschätzte Jahreswerte der Globalstrahlung an Heiztagen aufgetragen über den tatsächlichen Jahreswerten der Globalstrahlung an Heiztagen – jeweils für die Hauptorientierungen
Datenpunkte für 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren); Heizgrenztemperatur 12°C; Parameter der Schätzfunktion Globalstrahlung an Heiztagen in beiden Fällen vereinfacht

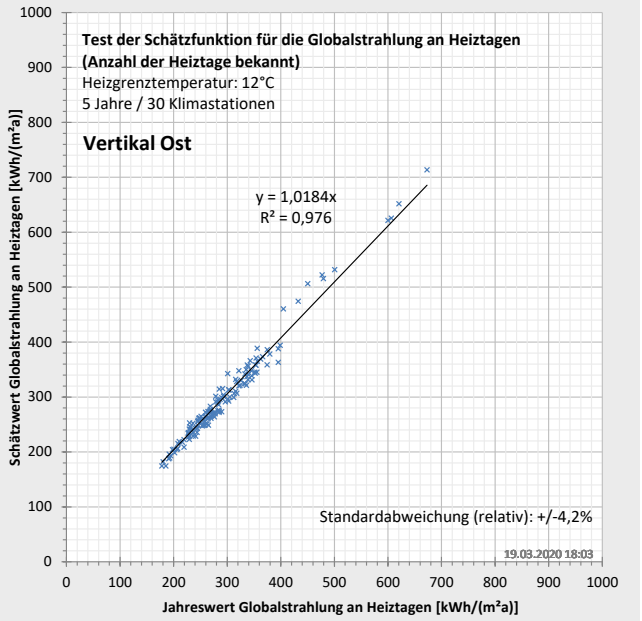
Anzahl der Heiztage bekannt



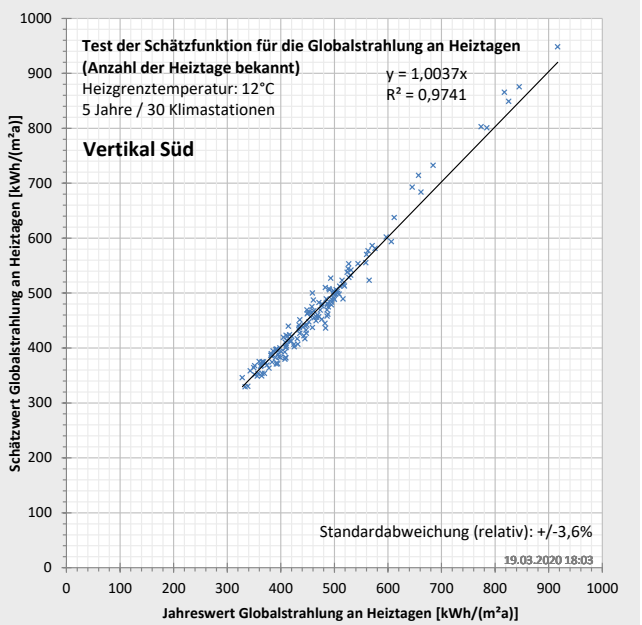
Anzahl der Heiztage unbekannt

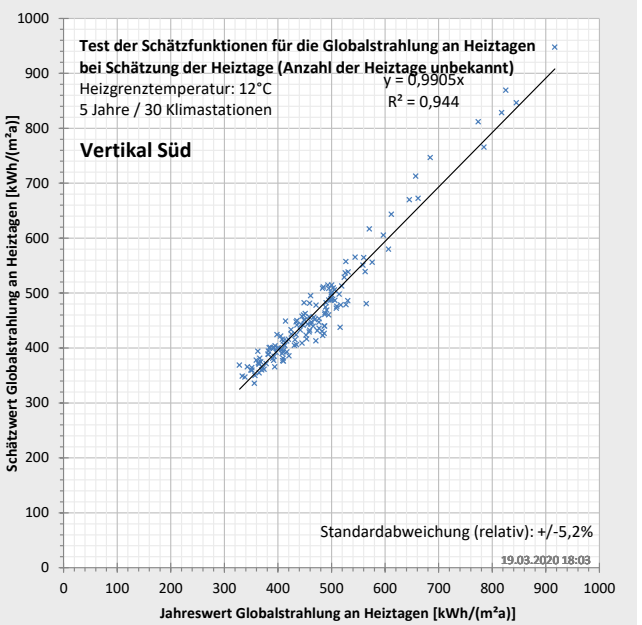


Anzahl der Heiztage bekannt



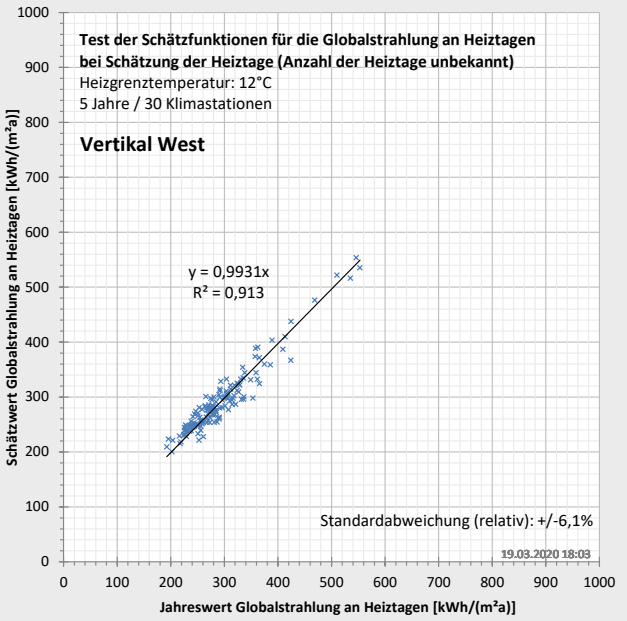
Anzahl der Heiztage unbekannt

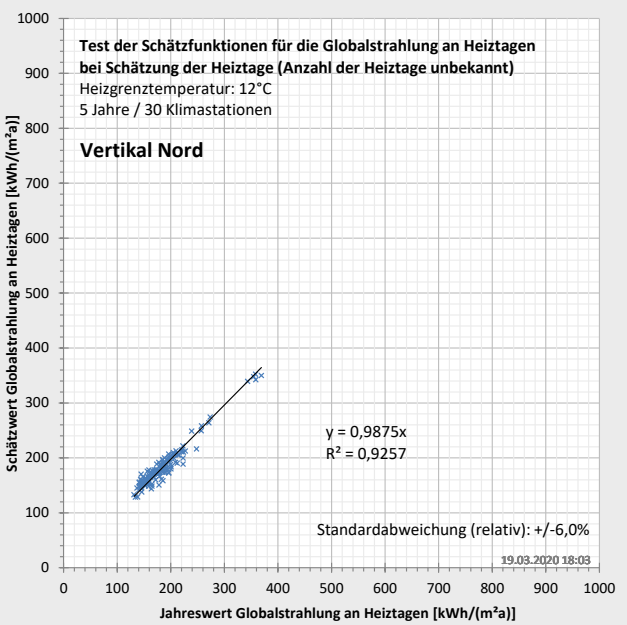




Anzahl der Heiztage bekannt

Anzahl der Heiztage unbekannt





Anhang D Einfluss von Wärmeinseln auf Außentemperatur und Heiztage im Winter

Die Wettermessstationen des DWD werden so platziert, dass Hindernisse, die Strahlung, Wind oder Niederschlag abschirmen, einen Mindestabstand vom Messfeld besitzen. Damit wird gewährleistet, dass eine freie Exposition der Station gegenüber den meteorologischen Einflussgrößen vorhanden ist [DWD 2018]. Die Temperatur in städtischen Regionen wird aber durch die Bebauung und die Versiegelung beeinflusst. Gebäude schirmen den Wind ab, versiegelte Flächen absorbieren mehr Wärmestrahlung und geben diese zeitverzögert ab. Weiterhin wird die Auskühlung durch das Sichtfeld zum Himmel beeinflusst. Diese und weitere Einflussfaktoren bewirken, dass es in Städten wärmer ist als im Umland, was auch als „Wärmeinsel“ (oder „urban heat island“ - UHI) bezeichnet wird.

Über Wärmeinseln wird vor allem bezüglich der sommerlichen Temperaturen diskutiert, da dicht bebaute Städte nachts im Sommer weniger auskühlen. Abhängig von der Bevölkerungsdichte einer Region ergibt sich ein linearer Zusammenhang der maximalen städtischen Wärmeinselintensität vom Logarithmus der Stadtbevölkerung von bis zu 8 K bei europäischen Millionenstädten [Kuttler 2009]. In abgeschwächter Form werden Temperatur und Strahlung aber auch im Winter durch die Bebauung beeinflusst. In [Kuttler et al. 2011] wird für das Stadtgebiet von Gelsenkirchen eine Variation der Heiztage 2010/11 zwischen 244 (Altstadt) und 257 Tagen (Vorort) festgestellt (entsprechend 5 %).

Große Parks senken die Temperatur um bis zu 4 K ab und diese Temperaturreduktion kann bis zu 1300 m weit in bebautes Gebiet hinein reichen. Bei kleineren Grünflächen wirkt die Temperaturreduktion deutlich weniger weit in die umliegende Bebauung hinein [Kuttler 2010].

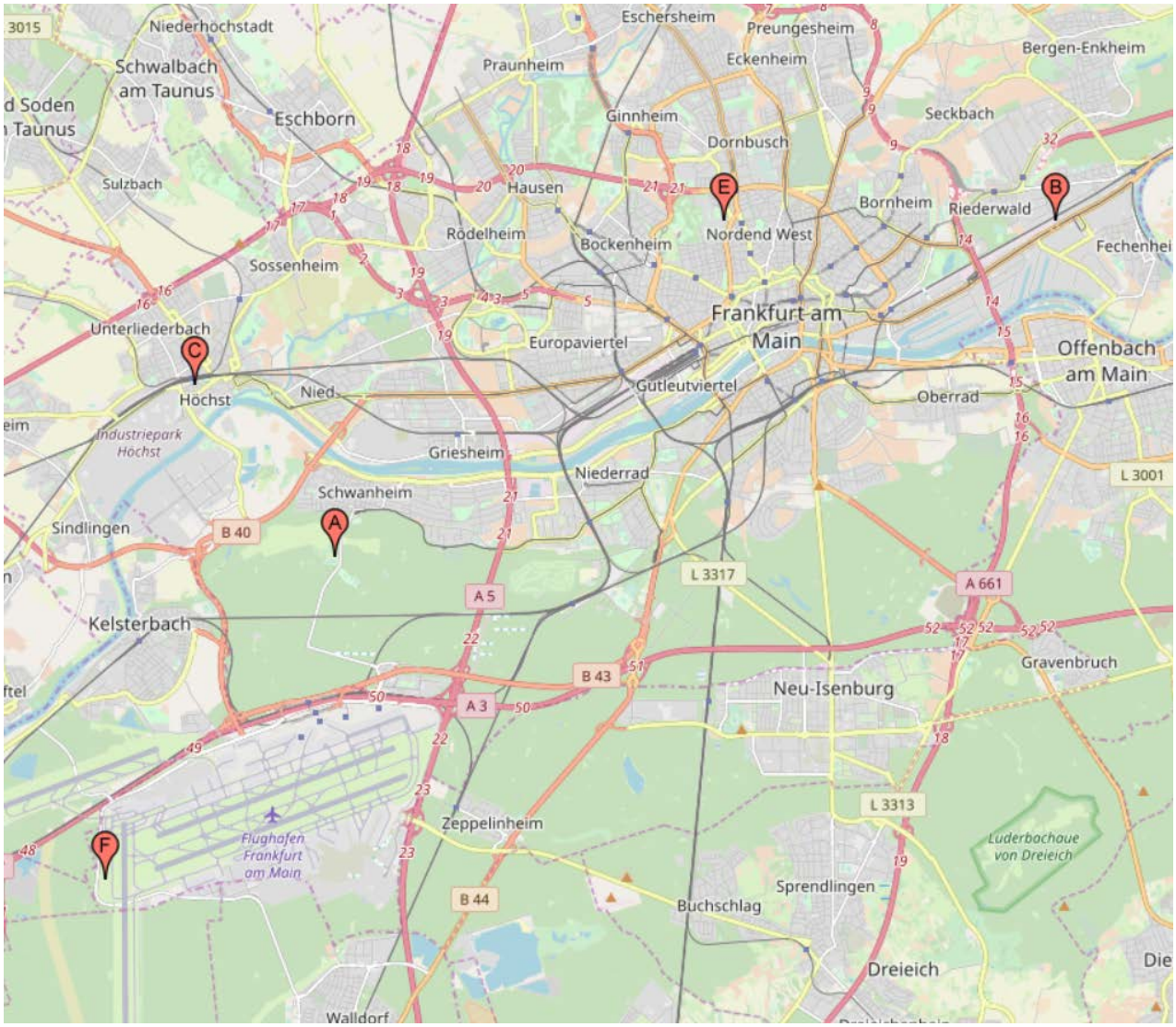
Da der Wärmeinsel-Effekt stark von der sommerlichen Erwärmung dominiert wird, werden im Folgenden exemplarisch für Frankfurt am Main unterschiedliche Stationen bezüglich der Heiztage und der Heizgradtage verglichen. Bild 28 zeigt die Lage der Stationen im Stadtgebiet. Flughafen und Schwanheim liegen in nicht bebautem Umfeld bzw. in Grünanlagen, die übrigen repräsentieren unterschiedliche städtische Bebauung.

Tab. 14: Heiztage und Heizgradtage für 5 Messstationen in Frankfurt am Main für die Heizperiode 2017/18 [Datenquellen: Deutscher Wetterdienst und Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie]

	FFM-Flughafen (1420) (DWD)		FFM-Westend (1424) (DWD)		FFM-Höchst (HLNUG)		FFM-Ost (HLNUG)		FFM-Schwanheim (HLNUG)	
	Heiztage	Heizgradtage	Heiztage	Heizgradtage	Heiztage	Heizgradtage	Heiztage	Heizgradtage	Heiztage	Heizgradtage
Aug 17	2	0,4	1	0,1	0	0	1	0,4	1	0,2
Sep 17	18	42,2	17	31,3	14	25,6	19	34,6	21	51
Okt 17	31	102,3	27	77	28	79,1	27	84,6	31	102,4
Nov 17	30	272	30	252,5	30	256,1	30	264,6	30	274,3
Dez 17	31	346,2	31	331,4	31	335,2	31	340,1	31	344
Jan 18	31	280,5	31	270,1	31	274,5	31	280,2	31	281,2
Feb 18	28	420,3	28	411,6	28	414,2	28	425,4	28	428,1
Mrz 18	31	316	31	302,2	31	306,2	31	312,7	31	321,3
Apr 18	17	53,2	14	38,6	14	39,8	12	39,8	20	57,1
Mai 18	7	15,2	5	12,7	5	10,8	6	14,6	7	18
Jun 18	2	1,9	2	1	1	0,8	2	1,3	2	1,1
Jul 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jahressumme	228	1850,2	217	1728,5	213	1742,3	218	1798,3	233	1878,7

Gegenüber dem bisher verwendeten „Standardklima“ für Frankfurt (Frankfurt-Flughafen) ergeben sich sowohl bei den Heiztagen als auch bei den Heizgradtagen (Heizgrenze 15 °C) Unterschiede von -7 % bis +2 % (Tab. 15).

Bild 28: Lage der ausgewerteten Messstationen [Kartenquelle: geoplaner.com/OpenStreetMap]



Die folgende Tabelle zeigt die Heiztage und die Heizgradtage für die untersuchten Stationen von August 2017 bis Juli 2018.

Tab. 15: Prozentuale Abweichungen bei Heiztagen und Heizgradtagen 2017/18 für 4 Stationen in Frankfurt am Main gegenüber der Messstation Frankfurt-Flughafen

	Abweichung zu FFM-Flughafen	
	Heiztage	Heizgradtage
FFM-Westend	-5%	-7%
FFM-Höchst	-7%	-6%
FFM-Ost	-4%	-3%
FFM-Schwanheim	2%	2%

Anhang E Literatur-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

E.1 Literatur

[Diefenbach et. al 2017] Diefenbach, Nikolaus, Großklos, Marc; Grafe, Michael, Müller, André; Born, Rolf; Ruppert, Hann; Graf, Klaus-Martin; Krzikalla, Norbert: Modellentwicklung zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage im Wohngebäudesektor. — Zwischenbericht im Projekt „Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudesektor: Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage (EE-GebaeudeZukunft)“; Darmstadt: IWU, 2017

[DWD 2018] Deutscher Wetterdienst: Einheitliche Beobachtungsanleitung für nebenamtliche Stationen (EBAN). Offenbach, Juli 2018

[DIN 5034] DIN 5034-2:1985-02: Tageslicht in Innenräumen; Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin, 1985

[Ebel et. al 2003] Ebel, Witta; Großklos, Marc; Knissel, Jens; Loga, Tobias; Müller, Kornelia: Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern. Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der 'Gartenhofsiedlung Lummerlund' in Wiesbaden-Dotzheim. Energieteil des Endberichts; Bauprojekt, messtechnische Auswertung; Darmstadt: IWU, 2003

[Großklos et. al 2016] Großklos, Marc; Schaede, Margrit; Hinz, Eberhard: Mehrfamilienhaus mit Energiegewinn Cordierstraße 4, Frankfurt am Main - Endbericht der Messphase 2014-2016; Darmstadt: IWU, 2016

[Großklos et. al 2008] Großklos, Marc; Diefenbach, Nikolaus; Enseling, Andreas; Lohmann, Günter; Hacke, Ulrike (IWU); Reuther, S.; Weber, C. (PlanungsgruppeDrei); Feldmann, R. (Energie & Haus): Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim - Endbericht Gesamtvorhaben. — Untersuchung gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (über Projektträger Jülich) und Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung; Darmstadt: IWU, 2008

[Hörner et al. 2016] Hörner, Michael; Cischinsky, Holger; Lichtmeß, Markus: Analyse der Diskrepanz von Energiebedarf und -verbrauch bei Energiepässen von Wohngebäuden in Luxemburg; Teil1: Methode der multiplen linearen Regression; Bauphysik 38 (2016). Heft 3

[IWU GTZ-Tool 2006-2020] Großklos, Marc: „Gradtagzahlen Deutschland“, MS-Excel-Tool „Gradtagzahlen_Deutschland.xls“; Institut Wohnen und Umwelt (IWU); aufbereitete Monatswerte der Außenlufttemperatur, gemessen durch den Deutschen Wetterdienst DWD; mit jährlicher Aktualisierung der Daten; Darmstadt, 2006 bis 2020

[IWU GTZ-Tool 2020] Großklos, Marc; Loga, Tobias: MS-Excel-Tool „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“; Institut Wohnen und Umwelt (IWU) 2020

[Kuttler 2009] Wilhelm Kuttler: Stadtklima - Teil 2: Phänomene und Wirkung. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung (UWSF) 16 (4), 263-274 (2004)

[Kuttler 2010] Kuttler, W.: Urbanes Klima, Teil 2. In: Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft, Jg. 70 (2010) Nr. Heft 9, September, S. 378 - 382. URL: http://www.uni-due.de/imperia/md/content/geographie/klimatologie/x604-kuttler2.pdf, abgerufen 12.12.2018

[Kuttler et al. 2011] Kuttler, W.; Mersmann, M.; Barlag, A.-B.: Gesamtstädtische Klimaanalyse Gelsenkirchen. Abschlussbericht. Universität Duisburg Essen, 2011. URL: https://www.gelsenkirchen.de/de/infrastruktur/umwelt/klima/stadtklima/_doc/stadtklimaanalyse_ge_2011_abschlussbericht_optimiert.pdf, abgerufen: 12.12.2018

[LEG 1999] Leitfaden Energiebewußte Gebäudeplanung; Hrsg. Hessisches Umweltministerium; Wiesbaden 1989 / 1993 / 1995 / 1999

[Loga et al. 2019] Loga, Tobias; Stein, Britta; Hacke, Ulrike; Müller, André; Großklos, Marc; Born, Rolf; Renz, Ina; Cischinsky, Holger; Hörner, Michael; Weber, Ines: Berücksichtigung des Nutzerverhaltens bei energetischen Verbesserungen; Hrsg.: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR); BBSR-Online-Publikation 04/2019; Bonn, März 2019 / ISSN 1868-0097 / https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2019/bbsr-online-04-2019-dl.pdf

[Quaschning 2015] Quaschning, V.: Regenerative Energien; 9. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2015

[SIA 380/1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: SIA 380/1 „Energie im Hochbau“; Zürich 1988

[TABULA CalcMethod 2013] Loga, Tobias; Diefenbach, Nikolaus: TABULA Calculation Method – Energy Use for Heating and Domestic Hot Water. Reference Calculation and Adaptation to the Typical Level of Measured Consumption; TABULA documentation; IWU, Darmstadt / Germany – January 2013 http://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/report/TABULA_CommonCalculationMethod.pdf

E.2 Abbildungen

Bild 1: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools (y-Achse) mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten (x-Achse): Jahresmittel der Außenlufttemperatur 15

Bild 2: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools (y-Achse) mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten (x-Achse: Jahresmittel der Außenlufttemperatur an Heiztagen (Heizgrenztemperatur 12°C) 16

Bild 3: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Anzahl der Heiztage 17

Bild 4: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Jahreswerte Globalstrahlung (folgende Seiten) 18

Bild 5: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Jahreswerte Globalstrahlung an Heiztagen 21

Bild 6: Vergleich der Ergebnisse des Realklima-Tools mit den durch 30 Stationen gemessenen Daten: Jahreswerte Globalstrahlung auf geneigte Flächen / Beispiel: Süd 45° 24

Bild 7: Monatswerte der Außenlufttemperatur aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus dem Modellprojekt Cordierstraße in Frankfurt/Main [Großklos et. al 2016] 25

Bild 8: Monatswerte der Außenlufttemperatur aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus dem Modellprojekt Wiesbaden „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ [Ebel et. al 2003] 26

Bild 9: Monatswerte der Globalstrahlung Horizontal und Süd aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus den Modellprojekten Cordierstraße in Frankfurt/Main [Großklos et. al 2016], Hofheim [Großklos et. al 2008] und Wiesbaden Lummerlund [Ebel et. al 2003] 27

Bild 10: Monatswerte der Globalstrahlung Süd / 45° geneigt und Nord aus dem Realklima-Tool, aufgetragen über Messwerten aus dem Modellprojekt Wiesbaden Lummerlund [Ebel et. al 2003] 28

Bild 11: Monatswerte der Globalstrahlung auf verschieden orientierte und geneigte Flächen aufgetragen über den Monatswerten der Globalstrahlung auf horizontale Flächen – Werte für 30 Klimastationen und 5 Jahre 39

Bild 12: Abhängigkeit der auf geneigte Flächen auftreffenden Globalstrahlung von der horizontalen Globalstrahlung, beispielhaft für eine nach Osten orientierte um 45° geneigte Fläche und eine nach Süden orientierte vertikale Fläche Wertepaare der Stichprobe ohne und mit Transformation der Variablen; Anwendung eines linearen Modells nach Transformation 42

Bild 13: Orientierung Nord (0°) 45

Bild 14: Orientierung Nord-Ost (45°) 46

Bild 15: Orientierung Ost (90°) 47
Bild 16: Orientierung Süd-Ost (135°) 48
Bild 17: Orientierung Süd (180°) 49
Bild 18: Orientierung Süd-West (225°) 50
Bild 19: Orientierung West (270°) 51
Bild 20: Orientierung Nord-West (315°) 52
Bild 21: geschätzte über gemessener Globalstrahlung für zwei beispielhafte Orientierungen in linearer und in logarithmischer Darstellung 54
Bild 22: Vereinfachte Schätzung der monatlichen Globalstrahlung an Heiztagen nach dem Schema von [SIA 380/1] [LEG 1999] / Auszug aus [LEG 1999] 56
Bild 23: Verhältnis Globalstrahlung an Heiztagen zur Globalstrahlung im Monat in Relation zum Heiztageanteil des Monats aufgetragen über den Heiztageanteil des Monats – jeweils für die Hauptorientierungen Datenpunkte für 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren) 57
Bild 24: Anwendung der Schätzformel für die monatliche Globalstrahlung an Heiztagen: Geschätzte Jahreswerte der Globalstrahlung an Heiztagen aufgetragen über den tatsächlichen Jahreswerten der Globalstrahlung an Heiztagen – jeweils für die Hauptorientierungen Datenpunkte für 30 Klimastationen (jeweils für 5 Kalenderjahre) 59
Bild 25: Heiztageanteil je Monat aufgetragen über die Differenz von Monatsmitteltemperatur und Heizgrenztemperatur – jeweils für die Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15°C (Bezeichnungen „HG 10“, „HG 12“, „HG 15“) Datenpunkte = Monatswerte der 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren) 62
Bild 26: Anwendung der Schätzformel: geschätzte Heiztage je Jahr aufgetragen über den tatsächlichen Heiztagen je Jahr – jeweils für die Heizgrenztemperaturen 10, 12 und 15°C Datenpunkte = Jahreswerte der 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren) 64
Bild 27: Anwendung der Schätzformel im Fall einer Heiztage-Schätzung: Geschätzte Jahreswerte der Globalstrahlung an Heiztagen aufgetragen über den tatsächlichen Jahreswerten der Globalstrahlung an Heiztagen – jeweils für die Hauptorientierungen Datenpunkte für 30 Klimastationen (jeweils für einen Zeitraum von 5 Jahren); Heizgrenztemperatur 12°C; Parameter der Schätzfunktion Globalstrahlung an Heiztagen in beiden Fällen vereinfacht 65
Bild 28: Lage der ausgewerteten Messstationen [Kartenquelle: geoplaner.com/OpenStreetMap] 69

E.3 Tabellen

Tab. 1: Quelle für die in den Analysen verwendeten Temperaturdaten 6
Tab. 2: Temperaturauswertungen in der Tabelle „Data.TA.HD“ der Arbeitsmappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“ 7
Tab. 3: Quelle für die in den Analysen verwendeten Globalstrahlungsdaten 10
Tab. 4: Globalstrahlungsdaten in der Tabelle „Data.Sol“ der Arbeitsmappe „Gradtagzahlen-Deutschland.xlsx“ 11
Tab. 5: Koeffizienten für die Schätzung der monatlichen Globalstrahlung auf vertikale und geneigte Flächen (Verwendung der monatlichen Globalstrahlung auf horizontale Flächen als unabhängige Variable der Schätzfunktion) 12
Tab. 6: Streuung der auf die Heizzeit bezogenen Klimadaten für über ganz Deutschland verteilte Messstationen / daraus abgeleitete Unsicherheit der Energiebilanz-Eingangsdaten bei Verwendung eines Durchschnittsklimas (Stichprobe von 30 Klimamessstationen / 5 Jahren) 30
Tab. 7: Abschätzung der Unsicherheiten des Verfahrens zur Postleitzahl-bezogenen Zuordnung von Klimadaten: Vergleich der mit dem Realklima-Tool auf Grundlage der Postleitzahlen geschätzten

	Klimadaten mit den jahresbezogenen, lokal gemessenen Klimadaten (Stichprobe von 30 Klima-Messstationen / 5 Jahren)	31
Tab. 8:	Beispielhafte Abschätzung der durch Verwendung eines Standardklimas (Durchschnittsklima) bedingten Unsicherheiten des Endenergiebedarfs für zwei unterschiedliche Gebäudestandards	33
Tab. 9:	Beispielhafte Abschätzung der bei Zuordnung der orts- und zeitgenauen Klimadaten über Postleitzahlen verbleibenden Unsicherheit des Endenergiebedarfs (Realbilanzierung) für zwei unterschiedliche Gebäudestandards	34
Tab. 10:	Abgeschätzte Unsicherheiten des Endenergiebedarfs / Vergleich zwischen Standardklima und ortsgenauen Jahres-Klimadaten bei Ansatz zweier sehr unterschiedlicher Gebäudestandards	35
Tab. 11:	Parameter der Schätzfunktion für unterschiedlich orientierte und geneigte Flächen und Standardabweichung der Verhältnisse aus geschätzter Globalstrahlung zu exaktem Wert	44
Tab. 12	Ergebnisse der Analyse / Schätzparameter für die fünf Hauptorientierungen	58
Tab. 13:	Regressionskoeffizienten für die Heiztage-Schätzfunktion (differenziert nach Heizgrenztemperatur und gesamt)	63
Tab. 14:	Heiztage und Heizgradtage für 5 Messstationen in Frankfurt am Main für die Heizperiode 2017/18 [Datenquellen: Deutscher Wetterdienst und Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie]	68
Tab. 15:	Prozentuale Abweichungen bei Heiztagen und Heizgradtagen 2017/18 für 4 Stationen in Frankfurt am Main gegenüber der Messstation Frankfurt-Flughafen	69