

Verbundprojekt: Normentwurf zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Glas und Glas-PV-Modulen (BIPV) im Bauwesen (Thermobruch)

Joint research project: Standard for determining the thermal stress of glass and glass PV modules
(BIPV) in the construction industry

Schlussbericht zum WIPANO-Projekt (FKZ: 03TN0007A-D)
Laufzeit: 01.10.2020 bis 30.09.2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Projektkonsortium.



Frank Ensslen
Andreas Beinert
Achour Mahfoudi
Wiebke Herzberg
Elke Lorenz
Markus Heck



Gregor Schwind
Miriam Schuster
Matthias Seel
Jens Schneider



Michael Elstner
Steffen Schäfer
Michaela Wondrakova



Christof Erban
Dominik Götz

Im Unterauftrag (von ISM+D) beteiligte Partner:



Robert Sommer
Sebastian Hinmüller



Joachim Röhner

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1 Inhaltsverzeichnis		
1	Inhaltsverzeichnis	i
2	Ausgangssituation, Motivation und Ziele für das Projekt	1
2.1	Stand von Wissenschaft und Technik	1
2.2	Französische Norm NF DTU 39 P3	2
2.2.1	Einleitung	2
2.2.2	Außenlufttemperatur, Innenraumlufttemperatur und solare Einstrahlungsintensität	3
2.2.3	Berechnung der Glastemperaturen	4
2.2.4	Einwirkung (thermisch induzierte Spannung)	6
2.2.5	Widerstand	6
2.2.6	Nachweis	6
2.2.7	Zusammenfassung	6
2.2.8	Verbesserungspotentiale der NF DTU 39 P3	7
2.3	Englische Berechnungsmethode („John-Colvin“-Methode)	7
2.4	Projektziele	8
3	Angaben zum Forschungsprojekt	9
3.1	Projektstruktur	9
3.2	Ziele und Beschreibung der Arbeitspakete	11
3.3	Grenzen des Projekts und Untersuchungsmöglichkeiten in einem Folgeprojekt	13
3.4	Dissemination und Publikationen	13
3.5	Danksagung	14
4	Parameter für thermisch induzierte Beanspruchungen	15
4.1	Einleitung	15
4.2	Einflussgrößen bei Verglasungen	15
4.3	Typische thermisch verursachte Glasschäden bei Verglasungen	17
4.3.1	Beispiel 1 - Brüstungsverglasung	17
4.3.2	Beispiel 2 - Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas	17
4.3.3	Beispiel 3 - Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas	18
4.3.4	Beispiel 4 - Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas	19
4.3.5	Beispiel 5 - Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas	20
4.4	Einflussgrößen bei BIPV-Modulen	20
4.5	Typische thermisch verursachte Glasschäden bei BIPV-Modulen	24
5	Spezifikation von für die Projektpartner relevanten Glas- und PV-Produkte	27
5.1	In der Praxis relevante Isolierglasaufbauten	27
5.2	In der Praxis relevante BIPV-Aufbauten	30
5.2.1	Dünnschicht Glas-Glas Module	30
5.2.2	Kristalline Glas-Folien Module	31
5.2.3	Kristalline Glas-Glas-Module	32
6	Parametereingrenzung für numerische Simulationen	34
6.1	Untersuchungen zu Verglasungen	34
6.1.1	Einfluss von meteorologischen Randbedingungen	34
6.1.2	Einfluss einer (Teil)Verschattung	34

6.1.3	Einfluss von der Glaskonstruktion bzw. Verglasung (Glasaufbau inkl. Rahmen)	34
6.1.4	Einfluss der Verhältnisse auf der Innen-/Raumseite	35
6.1.5	Auswahl und Festlegung für FE-Parameterstudien	35
6.2	Untersuchungen zu BIPV-Modulen	36
6.2.1	Einfluss von meteorologischen Randbedingungen	36
6.2.2	Einfluss einer (Teil)Verschattung	36
6.2.3	Einfluss von Befestigungskonstruktion und Moduldesign	36
6.2.4	Einfluss durch die Einbausituation (Hintergrund/Raum)	37
6.2.5	Einfluss des Betriebszustandes	37
6.2.6	Auswahl und Festlegung für FE-Parameterstudien	37
7	Meteorologische Randbedingungen	39
7.1	Einleitung und Überblick	39
7.2	Eingangsdaten	39
7.2.1	Atmosphärische Daten	39
7.2.2	Temperaturdaten	40
7.3	Berechnung der Einstrahlung	40
7.3.1	Datensatz von Zuständen geringer atmosphärischer Trübung	40
7.3.2	Modell für Clearsky-Strahlung	41
7.3.3	Umrechnung der Einstrahlung auf geneigte Flächen (Transposition)	42
7.4	Datensatz von Extremtemperaturen	44
7.5	Charakteristische Tageswerte von Einstrahlung und Außenlufttemperatur	44
7.6	Vereinfachtes Modell der thermisch induzierten Spannung	44
7.7	Identifikation kritischer meteorologischer Bedingungen für die Glasspannungen	46
7.8	Karten kritischer meteorologischer Bedingungen	50
7.9	Höhenkorrektur der meteorologischen Parameter	50
7.9.1	Höhenkorrektur der solaren Einstrahlung	51
7.9.2	Höhenkorrektur der Außenlufttemperatur	51
7.10	Normierte Strahlungstagesprofile	51
7.11	Zusammenfassung	52
8	Validierungsversuche mit Dreifach-Isolierverglasungen	53
8.1	Versuchseinrichtung	53
8.2	Versuchskörper mit Messstellen	54
8.3	Versuchsaufbau	55
8.4	Versuchsdurchführung	56
8.4.1	Dreifach-Sonnenschutzglas (ipacol neutral 50/27)	57
8.4.2	Dreifach-Wärmedämmglas (iplus 1.1)	57
8.5	Versuchsauswertung	58
8.5.1	Versuch 1	58
8.5.2	Versuch 2	59
8.5.3	Versuch 3	60
8.5.4	Versuch 4	61
8.5.5	Versuch 5	62
9	Validierungsversuche mit BIPV-Modulen	65

9.1	Versuchseinrichtung	65
9.2	Versuchskörper mit Messstellen	66
9.3	Versuchsaufbau	67
9.4	Versuchsdurchführung	68
9.5	Versuchsauswertung	69
9.6	Abgleich mit FEM-Simulationen	73
10	Modellierung von Verglasungen mittels der Methode der Finiten Elemente	77
10.1	Einleitung	77
10.2	Berechnung thermisch äquivalenter Fensterrahmen	77
10.3	Modellierung der Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum inkl. Validierung	78
10.4	Stationäre Berechnung des initialen Ausgangszustandes vor Sonnenaufgang	81
10.5	Transiente Berechnung nach Sonnenaufgang	82
10.6	Berechnung der thermisch induzierten Spannungen	83
10.7	Modellvalidierung anhand von Experimenten aus AP 4	85
11	Parameterstudien für Verglasungen mittels der Methode der Finiten Elemente	86
11.1	Einfluss genereller Modellierungsparameter	86
11.1.1	Analysen zur Modellierung der solaren Einstrahlung auf der Außenseite der Verglasung	86
11.1.2	Analysen zur stationären und transienten Berechnung	86
11.1.3	Analysen zur eindimensionalen Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum	86
11.1.4	Analysen zur Zeitschrittweite für die transiente Berechnung	87
11.1.5	Analysen zu thermisch äquivalenten Rahmen (Holz und Aluminium)	87
11.2	Einfluss von meteorologischen Randbedingungen	87
11.2.1	Methodik zur Auswertung der meteorologischen Daten	87
11.2.2	Analysen zur zeitlichen Auflösung von DWD-Messdaten und Clearsky-Modelldaten	92
11.2.3	Analysen zur Variation des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten	93
11.2.4	Analysen zur spontan auftretenden solaren Einstrahlung	93
11.3	Einfluss einer (Teil)Verschattung	94
11.3.1	Analysen von Verschattungsgeometrien	94
11.3.2	Analysen zur spontan auftretenden unveränderlichen Teilverschattung	95
11.3.3	Analysen zur zeitlich variablen/beweglichen Teilverschattung	95
11.4	Einfluss von der Glaskonstruktion bzw. Verglasung (Glasaufbau inkl. Rahmen)	95
11.4.1	Analysen von verschiedenen Beschichtungsoptionen	95
11.4.2	Analysen zur Variation der thermischen Rahmeneigenschaften	95
11.4.3	Analysen zur Rahmenfarbe (Holzrahmen)	96
11.4.4	Analysen zur Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter	96
11.4.5	Analysen zur Glasdicke	96
11.4.6	Analysen zur Wärmeleitung des Glases im Vergleich zur NF DTU 39 P3	97
11.4.7	Analysen zur Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum	97
11.5	Einfluss der Verhältnisse auf der Innen-/Raumseite	97
11.5.1	Analysen zu identischen Randbedingungen auf der Außen- und Innenseite (Bauzustand)	97
11.5.2	Analysen zur Erhöhung der Innenraumlufttemperatur	98
12	Modellierung der BIPV-Module mittels der Methode der Finiten Elemente	99
12.1	Einleitung und Modellbeschreibung	99

12.1.1	Wärmeerzeugung durch Bestromung der Solarzelle bei freier Konvektion	100
12.1.2	Wärmeerzeugung durch Bestromung der Solarzelle bei erzwungener Konvektion	101
12.1.3	Wärmeerzeugung durch Einstrahlung	101
12.2	Vollformatmodul	102
13	Parameterstudien für BIPV-Module mittels der Methode der Finiten Elemente	104
13.1	Analysen zu den meteorologischen Umgebungsbedingungen	104
13.2	Analysen zum Rahmen	106
13.3	Analysen zu den Betriebsbedingungen	106
13.4	Analysen zum Solarzellen-Belegungsgrad	107
13.5	Analysen zum Randabstand der Zellen zur Modulkante	108
13.6	Analysen zur Glasdicke	108
13.7	Analysen zur Verschattung	109
13.8	Analysen zum Unterschied von kristallinem Silizium zu Dünnschicht	111
13.9	Analyse weiterer allgemeiner Modellierungsparameter	112
13.10	Zusammenfassung	113
14	Berechnungsverfahren für Verglasungen	115
14.1	Einleitung	115
14.2	Randbedingungen und Annahmen für die Berechnung	117
14.3	Vereinfachte 1D Temperatur- und Spannungsberechnung	118
14.4	2D Temperatur- und Spannungsberechnung mit Hilfe der FEM	119
14.5	3D Temperatur- und Spannungsberechnung mit Hilfe der FEM	120
15	Berechnungsverfahren für BIPV-Module	122
15.1	Allgemeines zur Modellierung	122
15.2	Angaben zur Geometrie	122
15.3	Angaben zum Netz	122
15.4	Angaben zu den Randbedingungen	122
16	Vorschlag für einen Normentwurf für Verglasungen	124
16.1	Einleitung	124
16.2	Anwendungsbereich	124
16.3	Normative Verweise	124
16.4	Begriffe	124
16.4.1	Stationäre Berechnung	125
16.4.2	Transiente Berechnung	125
16.4.3	Teilverschattung	125
16.4.4	Solare Einstrahlungsintensität	125
16.4.5	Albedo durch Umgebung	125
16.4.6	Wärmestrahlung	125
16.4.7	Radiativer Wärmeübergangskoeffizient	125
16.4.8	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	125
16.4.9	Kombinierter Wärmeübergangskoeffizient	125
16.4.10	Temperaturzonen	125
16.4.11	Temperaturzone 1	126
16.4.12	Temperaturzone 2	126

16.4.13	Temperaturzone 3	126
16.4.14	Temperaturzone 4	126
16.4.15	Kalter Tag	126
16.4.16	Warmer Tag	126
16.4.17	Kalter Übergangstag	126
16.4.18	Warmer Übergangstag	127
16.5	Symbole	127
16.5.1	Lateinische Großbuchstaben	127
16.5.2	Lateinische Kleinbuchstaben	127
16.5.3	Griechische Kleinbuchstaben	128
16.6	Allgemeines	128
16.7	Randbedingungen auf der Außenseite der Verglasung	128
16.7.1	Kombinierter Wärmeübergangskoeffizient	128
16.7.2	Maximale solare Einstrahlungsintensität in Temperaturzonen 2 und 4	128
16.7.3	Diffuse solare Einstrahlungsintensität in Temperaturzonen 1 und 3	129
16.7.4	Höhenkorrektur der maximalen solaren und diffusen Einstrahlungsintensität	129
16.7.5	Außenlufttemperatur	129
16.7.6	Höhenkorrektur der Außenlufttemperatur	129
16.8	Verglasungsspezifische Randbedingungen	130
16.8.1	Wärmetransport im Scheibenzwischenraum und anderen unbelüfteten Hohlräumen	130
16.8.2	Direkter Strahlungsabsorptionsgrad	130
16.9	Randbedingungen auf der Innenseite der Verglasung	130
16.9.1	Kombinierter Wärmeübergangskoeffizient	130
16.9.2	Innenraumlufttemperatur	131
16.10	Vereinfachte eindimensionale Temperatur- und Spannungsberechnung	131
16.10.1	Allgemeines	131
16.10.2	Stationäre Temperaturberechnung	131
16.10.3	Transiente (instationäre) Temperaturberechnung	133
16.10.4	Berechnung der maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Zonen	134
16.10.5	Berechnung der thermisch induzierten Spannung (ohne Teilsicherheitsbeiwerte)	134
16.11	Zweidimensionale Temperatur- und Spannungsberechnung mit der FEM	134
16.11.1	Allgemeines	134
16.11.2	Stationäre Temperaturberechnung	137
16.11.3	Transiente (instationäre) Temperaturberechnung	138
16.11.4	Berechnung der thermisch induzierten Spannung (ohne Teilsicherheitsbeiwerte)	138
16.12	Dreidimensionale Temperatur- und Spannungsberechnung mit der FEM	139
16.12.1	Allgemeines	139
16.12.2	Stationäre Temperaturberechnung	140
16.12.3	Transiente (instationäre) Temperaturberechnung	140
16.12.4	Berechnung der thermisch induzierten Spannung (ohne Teilsicherheitsbeiwerte)	140
17	Berechnungen für eine beispielhafte Verglasung	141
17.1	Methodik, Konzept und Ziel	141
17.2	Ausgewählte Verglasung	141
17.3	Meteorologische Eingangsdaten für den Standort ISM+D	143

17.3.1	Stationäre Berechnung – Kalte Tage	143
17.3.2	Stationäre Berechnung – Warme Tage	143
17.3.3	Transiente Berechnung – Alle Situationen	144
17.4	Vereinfachte stationäre 1D Temperatur- und Spannungsberechnung	147
17.4.1	Berechnung der Temperaturen in Zone 1	147
17.4.2	Berechnung der Temperaturen in Zone 2	148
17.4.3	Berechnung der Temperaturen in Zone 3	149
17.4.4	Berechnung der maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Zonen	150
17.4.5	Berechnung der thermisch induzierten Spannung	152
17.5	Stationäre 2D Temperatur- und Spannungsberechnung	153
17.5.1	Ergebnisse der Temperaturen in Zone 1	154
17.5.2	Ergebnisse der Temperaturen in Zone 4	156
17.5.3	Berechnung der thermisch induzierten Spannung	157
17.6	Stationäre 3D Temperatur- und Spannungsberechnung	160
17.6.1	Berechnung der thermisch induzierten Spannung	163
17.7	Transiente 3D Temperatur- und Spannungsberechnung	164
17.7.1	Berechnung der thermisch induzierten Spannung	165
17.8	Vergleich der Berechnungsverfahren	166
17.8.1	Kalte Tage und kalte Übergangstage (stationär und transient)	166
17.8.2	Warme Tage und warme Übergangstage (stationär und transient)	168
17.8.3	Zusammenfassung	169
18	Vorschlag für einen Normentwurf für BIPV-Module (EN 50583 / IEC 62093)	170
18.1	Anwendungsbereich	170
18.2	Normentext	170
19	Berechnungen für ein beispielhaftes BIPV-Modul	176
20	Optionale Verwertung der Projektergebnisse in einer Berechnungssoftware	177
20.1	Aktuelle Situation	177
20.2	Neue Ansätze	178
21	Verwertung der meteorologischen Daten	180
21.1	Verwertung für die Normung	180
21.2	Optionale Verwertungsmöglichkeiten	180
21.2.1	Möglichkeit 1: Definition/Beschreibung „Meteorologische Daten“	180
21.2.2	Möglichkeit 2: Direkte Implementierung in vorhandene Berechnungssoftware	181
21.2.3	Möglichkeit 3: Stand-Alone Programmmodul (kl. Weblösung) „Meteorologische Daten“	181
21.3	Konzept für eine meteorologische Datenbank	181
22	Literaturverzeichnis	183
Anhang A1	Übersicht der Einflussgrößen bei Verglasungen	I
Anhang A2	Übersicht der Einflussgrößen bei BIPV-Modulen	II
Anhang A3	Geodätische Höhen ü.N.N. der Gitternetzpunkte	III
Anhang A4	Meteorologische Daten - warme Tage	IV
Anhang A4.1	Nord – Azimut = 0°	IV

Anhang A4.2	Nord-Ost – Azimut = 45°	V
Anhang A4.3	Ost – Azimut = 90°	VI
Anhang A4.4	Süd-Ost – Azimut = 135°	VII
Anhang A4.5	Süd – Azimut = 180°	VIII
Anhang A4.6	Süd-West – Azimut = 225°	IX
Anhang A4.7	West – Azimut = 270°	X
Anhang A4.8	Nord-West – Azimut = 315°	XI
Anhang A5	Meteorologische Daten - kalte Tage	XII
Anhang A5.1	Nord – Azimut = 0°	XII
Anhang A5.2	Nord-Ost – Azimut = 45°	XIII
Anhang A5.3	Ost – Azimut = 90°	XIV
Anhang A5.4	Süd-Ost – Azimut = 135°	XV
Anhang A5.5	Süd – Azimut = 180°	XVI
Anhang A5.6	Süd-West – Azimut = 225°	XVII
Anhang A5.7	West – Azimut = 270°	XVIII
Anhang A5.8	Nord-West – Azimut = 315°	XIX
Anhang A6	Normierte Strahlungsprofile für transiente Berechnungen	XX
Anhang A6.1	Nord – Azimut = 0°	XX
Anhang A6.2	Nord-Ost – Azimut = 45°	XXI
Anhang A6.3	Ost – Azimut = 90°	XXII
Anhang A6.4	Süd-Ost – Azimut = 135°	XXIII
Anhang A6.5	Süd – Azimut = 180°	XXIV
Anhang A6.6	Süd-West – Azimut = 225°	XXV
Anhang A6.7	West – Azimut = 270°	XXVI
Anhang A6.8	Nord-West – Azimut = 315°	XXVII
Anhang A7	Anhaltswerte für Innenraumlufttemperaturen	XXVIII
Anhang A8	Modellvalidierung anhand von Experimenten mit Isolierverglasungen	XXIX
Anhang A8.1	Versuch 1	XXIX
Anhang A8.2	Versuch 5	XXX

2 Ausgangssituation, Motivation und Ziele für das Projekt

2.1 Stand von Wissenschaft und Technik

Das Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) der Technischen Universität Darmstadt, hat im Jahr 2016 zur Klärung der Problematik der thermisch induzierten Spannungen fundierte Vorstudien [53] durchgeführt, die auf numerischen Berechnungen und Wetterdaten aus einem Testreferenzjahr basieren. In den Vorarbeiten des ISM+D wurden Zweifach- und Dreifach-Isolierverglasungen (insgesamt neun verschiedene Beschichtungsoptionen) mit einer Fassadenorientierung nach Süd-Ost betrachtet. Die durch die thermische Beanspruchung induzierten Spannungszustände wurden, anhand ausgewählter kritischer Temperatur- und Strahlungskombinationen in Abhängigkeit der Jahreszeit und dem resultierenden Temperaturfeld in der Glasebene, ermittelt. Als Grundlage diente das Testreferenzjahr TRY 2011 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Standort Potsdam. Die Kombination aus Morgensonne (hohe Einstrahlung) und kalter Nacht wurde bei der Entscheidung für die kritische Fassadenausrichtung Süd-Ost berücksichtigt. Unter Einbeziehung der Materialeigenschaften der verschiedenen Komponenten der Isolierglaseinheiten (Glas, Abstandhalter, Dichtstoff) wurde das Spannungsfeld in den Gläsern berechnet.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass kritische Spannungen von über 36 MPa (charakteristische Kantenfestigkeit gemäß [9]) an den Glasrändern auftreten und somit ein normativ geregeltes Verfahren zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung für Glas im Bauwesen notwendig ist. Diese Isolierglaseinheiten erfordern den Einsatz von Einscheibensicherheitsglas, um einen Einsatz ohne weitere Prüfung zu rechtfertigen.

In einer Veröffentlichung von AGC Interpane und AGC Glass Europe [42] werden in der Praxis verwendete Bemessungsmethoden (französische Norm NF DTU 39 P3 [39]) beschrieben und verglichen. Es werden die Vor- und Nachteile der französischen Norm hervorgehoben und Punkte, die aktualisiert und verallgemeinert werden sollten, herausgearbeitet. Darüber hinaus werden in dieser Veröffentlichung numerische Berechnungen auf der Grundlage verschiedener meteorologischer Datensätze durchgeführt und verglichen. Es hat sich in [42] gezeigt, dass die verwendeten meteorologischen Datensätze zu unterschiedlichen thermisch induzierten Spannungen in der gleichen Verglasung führen. Daher müssen die meteorologischen Daten umfassend ausgewertet und die daraus resultierenden Beanspruchungen der Fassadenverglasung abgeschätzt werden.

Es gibt weitere Beispiele als einschlägige Literatur:

- Glasschäden: Oberflächenschäden, Glasbruch in Theorie und Praxis [55]
- Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion [44]

Darüber hinaus gibt es mehrere Merkblätter, die auf die Problematik hinweisen und mögliche Einflussfaktoren nennen, zum Beispiel:

- Thermische Beanspruchung von Glas [27]
- AGGA-Merkblatt - Thermische Beanspruchung von Glasbruch [28]
- Thermische Beanspruchung von Gläsern in Fenstern und Fassaden [54]

Folgende Normen bzw. Richtlinien existieren zudem:

- CNR-DT 210 (Italienischer Leitfaden) [7]
- NF DTU 39 P3 (französische Norm) [39]
- CEN/TS 19100-1 Design of glass structures (Annex C) [40]

Durch die Bemühungen und Maßnahmen rund um die Energiewende gewinnt die Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV) mit Glas-Glas-Modulen als Bestandteil einer energieeffizienten, solaren Gebäudehülle zunehmend an Bedeutung, so dass auch in diesem Bereich Forschungsbedarf für die Klärung und Analyse von thermisch induzierten Spannungen besteht.

Zusammenfassend lässt sich die Ausgangssituation wie folgt beschreiben:

- Meteorologische Daten sind für thermische Analysen wesentlich. Solche Datensätze (ca. 30 Jahre alt) werden z. B. in der Praxis derzeit häufig eingesetzten und kostenpflichtigen Software Vitrage Décision verwendet. Für fundierte Analysen jedoch fehlen aktuelle, transparent ermittelte und frei verfügbare Datensätze bzw. Karten (Strahlungs-Außenlufttemperatur-Karten) für Deutschland (Europa), welche die meteorologischen Bedingungen beschreiben, die in Vertikalfassaden mit verschiedener Orientierung zu thermomechanischen Extrembeanspruchungen bei Mehrscheiben-Isolierglaseinheiten und bauwerkintegrierten Photovoltaikmodulen (BIPV) führen. Weil dafür insbesondere Extremwerte von Strahlung und Außenlufttemperatur relevant sind, ist eine transparente Datengrundlage zur Ermittlung dieser Werte erforderlich. Daten wie Typische Meteorologische Jahre (TMYs), welche typische, somit eher mittlere Bedingungen abbilden und deren Algorithmus zur Erzeugung oft unbekannt ist, sind hier beispielsweise als Datengrundlage ungeeignet. Von Anbietern, wie z. B. Meteonorm oder PVGIS, können verschiedene meteorologische Datenprodukte bezogen werden, jedoch ist unklar, ob in den Datenprodukten die für die thermische Belastung relevanten Extremwertkombinationen von Einstrahlung und Außenlufttemperatur enthalten sind, und falls ja, wie diese identifiziert werden können. Zur Ermittlung von Karten der für thermische Extrembeanspruchungen relevanten meteorologischen Bedingungen wird ein Rasterdatensatz benötigt, der ganz Deutschland (Europa) umfasst, sowie eine hohe zeitliche Auflösung (10 Minuten) bietet, um entsprechende meteorologische Extremwerte abzubilden.
- Berichte über häufige Schadensfälle infolge thermisch induzierter Beanspruchung aus der Sachverständigenpraxis, vorwiegend bei
 - Isolierglaseinheiten mit bestimmten Kombinationen von Sonnenschutz-/Wärmedämmschichten (meist Dreifach-Isolierglaseinheiten) und
 - bauwerkintegrierten Photovoltaikmodulen, meist Dünnschichtmodulen (aus technologischen Gründen, z. B. mit der Verwendung von gebohrtem Floatglas).
- Hoher Aufwand bei der Risikobewertung im Rahmen von thermischen Spannungsanalysen, wegen unklarer Randbedingungen (Planungs- und Nutzungsdetails sind oft unklar) und nicht standardisierter Berechnungsverfahren.
- In Ermangelung alternativer Berechnungsmethoden europaweit lediglich Verwendung der französischen Norm NF DTU 39 P3 [39] in Kombination mit der Software Vitrages Décision und Anwendung des „englischen Modells“ („John-Colvin“-Methode). Dabei besteht Unklarheit, welche Methode die richtige für Fassadenverglasungen und BIPV-Module ist.
- Veraltete und unklare Ansätze in der französischen Norm (vgl. Abschnitt 2.2.8) sowie bei der „John-Colvin“-Methode.
- Fehlen von einheitlichen definierten Berechnungsverfahren (z. B. stationär oder instationär/transient, betrachteter Zeitraum etc.) und Annahmen für die Simulationsparameter.
- Gängige Praxis ist eine rein qualitative bzw. pauschale Bemessung von Verglasungskonstruktionen mit Einscheibensicherheitsglas (ESG). Meist Vernachlässigung der thermisch induzierten Spannungen bei BIPV-Modulen durch den Einsatz standardmäßig vorgespannter bzw. thermisch behandelter Gläser bei kristallinen Silicium-Zellen.
- Nichtvorhandensein einer validierten und kommerziell verfügbaren Software zur thermischen Spannungsberechnung.
- Keine Zugänglichkeit zu verschiedenen in der Vergangenheit durchgeführten Forschungsprojekten oder Fallstudien ohne Eingang in nationale und europäische Normungsgremien.

2.2 Französische Norm NF DTU 39 P3

2.2.1 Einleitung

Thermisch induzierte Spannungen in Verglasungen werden dadurch verursacht, dass sich der unverschattete Bereich des Glases (Zone 2, vgl. Abbildung 2-1) bei Sonneneinstrahlung stärker erwärmt, als verschattete Bereiche (Zone 3, vgl. Abbildung 2-1) und die meist durch Rahmenprofile eingefassten Kanten des Glases (Zone 1, vgl. Abbildung 2-1). Die Glaskanten sind üblicherweise durch einen Rahmen verschattet, während Bereiche der Verglasung außerhalb der Einrahmung von der direkten Umgebung

verschattet werden können. Der wärmere mittlere Bereich dehnt sich im Verhältnis zu den kühleren Rändern aus und führt zu Zugspannungen im Glas, welche oftmals an den Glasrändern maximal werden. Wenn der Temperaturunterschied zwischen der wärmeren Mitte und den kühleren Rändern groß genug ist, können die daraus induzierten Spannungen dazu führen, dass sich an den Kanten des Glases Risse bilden.

Für jede Verglasung, die einer Teilverschattung ausgesetzt ist, werden drei Zonen, in welchen die Temperatur berechnet wird, betrachtet (siehe Abbildung 2-1). Die Geometrie der Verschattung spielt keine Rolle.

Bei der Berechnung der Temperatur an den Glaskanten wird die Wirkung der thermischen Trägheit (nur bei der transienten Berechnung!) des Rahmens zusammen mit dem Einfluss des Abstandhalters zwischen den Scheiben berücksichtigt, der dazu neigt, die Temperaturen der beiden benachbarten Glaskanten auszugleichen. In der NF DTU 39 P3 [39] werden sogenannte Temperaturantwortkurven (inkl. zeitlichem Verlauf) der Zone 1 für verschiedene Rahmensysteme bereitgestellt. Diese wurden laut NF DTU 39 P3 [39] numerisch mit Hilfe der Methode der finiten Elemente für Frankreich für repräsentative meteorologische Situationen an Zweifach-Isoliergläsern mit metallischem Abstandhalter mit Rahmen heller Farbe berechnet und ausgewertet (siehe auch Abschnitt 2.2.7).

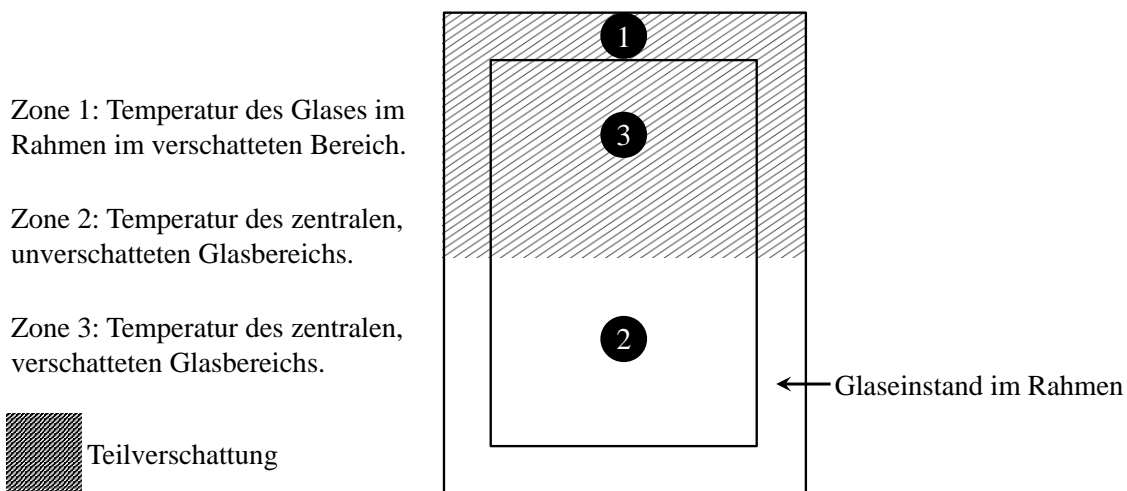


Abbildung 2-1: Einteilung der Verglasung in Temperaturzonen gemäß NF DTU 39 P3 [39].

2.2.2 Außenlufttemperatur, Innenraumlufttemperatur und solare Einstrahlungsintensität

Für die meteorologischen Eingangsdaten werden seitens NF DTU 39 P3 [39] für das transiente und stationäre Berechnungsverfahren solare Einstrahlungsintensitäten und Außenlufttemperaturen vorgegeben. Es werden alle vier Jahreszeiten mit jeweils einem repräsentativen Tag betrachtet. Zusätzlich werden für die Außen- und Innenseite der Verglasung jahreszeitabhängige Wärmeübergangskoeffizienten vorgegeben (siehe Tabelle 8 in [39]) und die Innenraumlufttemperatur angegeben.

Außenlufttemperatur:

Die minimalen und maximalen Außenlufttemperaturen werden mit Hilfe einer Landkarte von Frankreich gerastert dargestellt (siehe Abbildungen 20 bis 22 in [39]). Eine Höhenkorrektur der Temperaturen ist möglich und kann durch die dort gegebene Berechnungsvorschrift umgesetzt werden. Für das transiente Berechnungsverfahren wird eine tägliche Tagestemperaturamplitude in Abhängigkeit des Standorts von 15 K bzw. 20 K vorgesehen. Eine mathematische Beschreibung der Tagestemperaturkurve ist nicht angegeben. Die Form der Tagestemperaturkurven kann jedoch anhand der Abbildung 25 in [39] als sinusförmig abgeschätzt werden. Die minimale Tagestemperatur wird morgens um 5 Uhr, die maximale Tagestemperatur wird nachmittags um 14 Uhr erreicht.

Innenraumlufttemperatur:

Die Innenraumlufttemperatur wird in Abhängigkeit der Jahreszeiten und in Abhängigkeit der Neigung der Verglasung angegeben (Tabelle 5 in [39]). Für das transiente Berechnungsverfahren ist die Innenraumlufttemperatur konstant anzusetzen.

Solare Einstrahlungsintensität:

Für die jeweilige Fassadenorientierung werden in Abhängigkeit der Jahreszeiten solare Einstrahlungskurven für das transiente Berechnungsverfahren gegeben, welche eine maximale solare Einstrahlungsintensität von 800 W/m² aufweisen. Für das stationäre Berechnungsverfahren werden in Abhängigkeit der geodätischen Höhe solare Einstrahlungsintensitäten angegeben. Durch einen Korrekturfaktor kann die Neigung der Verglasung berücksichtigt werden. In verschatteten Bereichen der Verglasung ist eine diffuse solare Einstrahlung von 10 % der solaren Einstrahlungsintensität bzw. mindestens 75 W/m² anzusetzen.

2.2.3 Berechnung der Glastemperaturen

Die Berechnung der Temperatur der einzelnen Zonen kann stationär (keine Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit) oder transient/instationär (Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit) erfolgen. Beide Berechnungsverfahren berücksichtigen die temperaturabhängige Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum (SZR) mittels EN 673 [21]. Die Absorptionsgrade der einzelnen Gläser können mit Hilfe eines bereitgestellten Berechnungsverfahrens, welches auf die zurückgezogene EN 13363-2 [14] (Nachfolge: EN ISO 52022-3 [23]) verweist, ermittelt werden.

Hinweis: Die Gleichungen (2-1) bis (2-11) wurden aus der französischen Norm NF DTU 39 P3 übernommen.

Transienter Zustand:

- Temperatur der Zone 1:

Zur Ermittlung der Temperatur der Gläser in der Zone 1 wird auf die sogenannten Temperaturantwortkurven (Zweifach-Isoliergläser) zurückgegriffen. Diese können auch auf andere meteorologische Situationen extrapoliert werden. Entsprechende Formeln sind in [39] angegeben. Im Fall eines Dreifach-Isolierglases darf die Temperatur der Mittelscheibe in Zone 1 über den Mittelwert von Außen- und Innenscheibentemperatur in Zone 1 ermittelt werden. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts bestätigen diesen Ansatz.

Hier zeigt sich bereits die Problematik des Vorgehens, da die in [39] angegebenen Temperaturantwortkurven nicht den aktuellen hoch wärmedämmenden Rahmen entsprechen.

- Temperatur der Zone 2 und Zone 3:

In der Zone 2 und Zone 3 wird mit Hilfe der transienten Wärmebilanzierung jeder Einzelscheibe die Ermittlung der Glastemperatur ermöglicht. Die Wärmebilanz erfolgt dabei vereinfacht; d. h., dass die Wärmeleitfähigkeit des Glases und damit der Temperaturgradient über die Dicke der Einzelscheiben vernachlässigt wird. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts haben gezeigt, dass diese Annahme valide ist. Die NF DTU 39 P3 gibt die nachfolgenden Gleichungen (2-1) und (2-2) zur Ermittlung der Glastemperaturen an (siehe Gleichung 14 in [39]). Evtl. vorhandene Sonnenschutz oder Jalousien können durch Erweiterung der Formeln ebenfalls berücksichtigt werden.

$$e_i \cdot c_v \cdot \rho_v \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{j=1}^n hr_{ij} \cdot (\theta_j - \theta_i) + hc_{ij} \cdot (\theta_k - \theta_i) + \alpha e_i \cdot \phi \quad (2-1)$$

Für das äußerste bzw. innerste Element sind die folgenden Summanden in der Gleichung (2-1) hinzuzufügen.

$$\begin{aligned} \text{Innenseite: } & +h_i \cdot (\theta_{ai} - \theta_i) \\ \text{Außenseite: } & +h_e \cdot (\theta_{ae} - \theta_i) \end{aligned} \quad (2-2)$$

Stationärer Zustand:

- Temperatur der Zone 1:

Im ersten Schritt werden die Temperaturen in Zone 3 für jede Glasscheibe ermittelt. Im Anschluss werden die Temperaturen der Zone 1 jeder Glasscheibe über den Mittelwert der Gläser berechnet; z. B. bei einem Dreifach-Isolierglas ergibt sich die Temperatur der Außenscheibe in der Zone 1 = $1/2 \cdot (\text{Temperatur der Außenscheibe in Zone 3} + \text{Temperatur der Mittelscheibe in Zone 3})$. Bei einem Zweifach-Isolierglas resultiert für die Außen- und Innenscheibe folglich die gleiche Temperatur in der Zone 1 mittels $1/2 \cdot (\text{Temperatur der Außenscheibe in Zone 3} + \text{Temperatur der Innenscheibe in der Zone 3})$.

- Temperatur der Zone 2 und Zone 3:

In der Zone 2 und Zone 3 wird mit Hilfe der stationären Wärmebilanzierung jeder Einzelscheibe die Ermittlung der Glastemperatur ermöglicht. Die Wärmebilanz erfolgt dabei vereinfacht; d. h., dass die Wärmeleitfähigkeit des Glases und damit der Temperaturgradient über die Dicke der Einzelscheiben vernachlässigt wird. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts haben gezeigt, dass diese Annahme valide ist. Die NF DTU 39 P3 gibt die nachfolgenden Gleichungen (2-3) und (2-4) zur Ermittlung der Glastemperaturen an (siehe Gleichung 17 in [39]). Evtl. vorhandene Sonnenschutz- oder Jalousien können durch Erweiterung der Formeln ebenfalls berücksichtigt werden.

$$\alpha_{ie} \cdot \phi_s = \sum_j h_{c_{ij}} \cdot (\theta_i - \theta_j) + \sum_k h_{r_{ik}} \cdot (\theta_i - \theta_k) \quad (2-3)$$

Für das äußerste bzw. innerste Element sind die folgenden Summanden in Gleichung (2-3) hinzuzufügen.

$$\begin{aligned} \text{Innenseite: } & +h_i \cdot (\theta_i - \theta_{ai}) \\ \text{Außenseite: } & +h_e \cdot (\theta_i - \theta_{ae}) \end{aligned} \quad (2-4)$$

Die NF DTU 39 P3 bietet als weitere Vereinfachung der Temperaturberechnung im stationären Zustand folgende Methodik an, welche die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum stark vereinfacht mit Hilfe des U_g -Werts der Verglasung abschätzt. Hier wird durch weitere Faktoren das Sommer- bzw. Winterszenario berücksichtigt. In beiden Szenarien wird die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum jedoch konstant modelliert und nicht anhand der tatsächlich vorhandenen meteorologischen Situation berechnet. Evtl. vorhandene Sonnenschutz- oder Jalousien können durch Erweiterung der Formeln ebenfalls berücksichtigt werden.

- Die Glastemperatur der Zone 1 (siehe Gleichung 19 in [39]) wird mit Hilfe von Gleichung (2-5) berechnet.

$$\theta_1 = (h_i \cdot \theta_{ai} + h_e \cdot \theta_{ae}) / (h_i + h_e) \quad (2-5)$$

- Die Glastemperatur der Zone 2 und 3 (siehe Gleichung 25 und 26 in [39]) wird mit Hilfe der Gleichungen (2-6) und (2-7) berechnet.

Außenscheibe:

$$\theta_{v1} = \frac{h_t \cdot (h_i \cdot \theta_{ai} + \alpha_{2e} \cdot \phi) + (h_i + h_t) \cdot (h_e \cdot \theta_{ae} + \alpha_{1e} \cdot \phi)}{(h_i + h_t) \cdot (h_e + h_t) - h_t^2} \quad (2-6)$$

Innenscheibe:

$$\theta_{v2} = \frac{h_t \cdot (h_e \cdot \theta_{ae} + \alpha_{1e} \cdot \phi) + (h_e + h_t) \cdot (h_i \cdot \theta_{ai} + \alpha_{2e} \cdot \phi)}{(h_i + h_t) \cdot (h_e + h_t) - h_t^2} \quad (2-7)$$

Für die folgenden Sonderfälle werden in [39] weitere Hinweise und Formeln gegeben:

- Schiebetüren, außenläufig, an der Wand entlanglaufend
- Schiebetüren, innenläufig, in der Wand verschwindend
- Verglasungen vor opakem Bauteil
- Stufen-Isolierglas

2.2.4 Einwirkung (thermisch induzierte Spannung)

Für jede Einzelscheibe wird die maßgebende Temperaturdifferenz über die größte Differenz zwischen den einzelnen Temperaturzonen mit Gleichung (2-8) ermittelt.

$$\delta\theta = \max(\theta_{2,ext} - \theta_{3,ext}, \theta_{2,ext} - \theta_{1,ext}) \quad (2-8)$$

Mit Hilfe der maßgebenden Temperaturdifferenz werden die thermisch induzierten Spannungen vereinfacht mit Hilfe der folgenden Gleichung (2-9) ermittelt.

$$\sigma_{th} = k_t \cdot E \cdot \alpha \cdot \delta\theta \quad (2-9)$$

2.2.5 Widerstand

Der Widerstand des Glases wird nach Gleichung (2-10) ermittelt.

$$\sigma_{adm} = k_v \cdot k_a \cdot \sigma_{vm} \quad (2-10)$$

2.2.6 Nachweis

Der Nachweis der Sicherheit gegen thermisch induzierten Spannungsbruch erfolgt schließlich nach Gleichung (2-11).

$$\sigma_{th} < \sigma_{adm} \quad (2-11)$$

Zusätzlich zum Nachweisformat über die Spannungen können gemäß NF DTU 39 P3 [39] auch die Temperaturunterschiede oder auch die Absorptionsgrade als Vergleichskriterium verwendet werden.

2.2.7 Zusammenfassung

Das Konzept der französischen Norm NF DTU 39 P3 berücksichtigt die physikalischen Gesetze und referenziert auch auf EN-Normen. Da die französische Norm in den Neunzigerjahren geschrieben wurde, sind viele Daten veraltet und einige der EN-Normen sind nicht mehr gültig.

Die Auswirkung von Rahmen/Abstandhaltern wird durch Koeffizienten angegeben, die für Produkte/Fenster berechnet wurden, die im Zeitraum der 1990er Jahre verwendet wurden. Der U_f -Wert der Rahmen lag zu dieser Zeit in einem Wertebereich von 5,5 bis 7,0 W/(m² K). Heutzutage haben die Standardrahmenprodukte einen U_f -Wert von etwa 1,0 - 1,5 W/(m² K) (für Neubauten und Passivhäuser teilweise sogar < 1,0 W/(m² K)).

Für den Randverbund wurde in der französischen Norm von einem Aluminiumabstandhalter ausgegangen, welcher zu diesem Zeitpunkt dem Stand der Technik entsprach. Zum heutigen Stand der Technik werden jedoch Abstandhalter eingesetzt die zum Teil um den Faktor 10 geringere Wärmeleitfähigkeiten vorweisen und somit gänzlich andere Glaskantentemperaturen resultieren („warme Kante“).

Der Einfluss der Glaskante war für eine Doppelverglasung (4/12/4) ohne Beschichtung mit niedrigem Emissionsgrad angegeben. Das führte zu niedrigen Temperaturen an der Glaskante und zu höheren Temperaturunterschieden. Heutzutage ist dieser Einfluss geringer, durch bessere Abstandhalter und low-e Beschichtungen und der immer häufigeren Verwendung von Dreifach-Wärmedämmglas. Das führt zu niedrigeren Temperaturunterschieden. Die hier genannten Informationen über die verwendeten Daten von früher, wurden von ehemaligen Mitarbeitern dieser Arbeitsgruppen übermittelt.

Die in der NF DTU 39 P3 enthaltenen meteorologischen Daten wurden damals für 95 Bereiche (ähnlich wie Landkreise oder Bezirke) in Frankreich ermittelt und somit können diese Daten nur für Projekte in Frankreich angewendet werden. Die Quelle der meteorologischen Daten (Sonneneinstrahlung und Außenlufttemperatur) ist mehr als 60 Jahre alt. Auch die Sonnenlaufbahn ist nur für Frankreich gültig. Um künftig in Deutschland bzw. ggf. auch in Europa die Berechnung thermisch induzierter Spannungen zu ermöglichen, werden frei verfügbare und relevante meteorologische Daten benötigt.

Die Formeln für die Außenlufttemperatur bei stationärer Temperaturberechnung der NF DTU 39 P3 wurden für Frankreich erstellt. Informationen darüber, wie diese ermittelt wurden, sind nicht bekannt. Diese Werte sind somit auch nur für Frankreich gültig. Für Berechnungen außerhalb Frankreichs, muss geprüft werden, ob diese Formeln gültig sind. Oder es muss eine andere Methode genutzt werden, um die Außenlufttemperaturen zu bestimmen. Die Informationen über die verwendeten Daten von früher, wurden von ehemaligen Mitarbeitern dieser Arbeitsgruppen übermittelt. Bei den Überarbeitungen dieser Norm in den vergangenen Jahren wurde die meteorologische Datenbank nicht erneuert.

Die zulässige Spannung (entspricht dem Widerstand im Sinne der Bemessung) wird nach einer Formel mit einem bestimmten Widerstand in Abhängigkeit von der Glas-/ Kantenqualität und der Lagerung des Glases berechnet. Es lässt sich keine Quelle finden, aus der hervorgeht, wie die Biegezugfestigkeit festgelegt wurde und ob sie immer noch gültig ist bzw. auf der sicheren Seite liegt.

2.2.8 Verbesserungspotentiale der NF DTU 39 P3

Im Allgemeinen ist es möglich, die französischen Norm NF DTU 39 P3 als Basis zur Erstellung eines Normentwurfs zu verwenden - insbesondere kann die Berechnungsmethode für die Temperaturberechnung in der Glasmitte (weit entfernt vom Rahmen und Randverbund), die auf den physikalischen Gesetzen basiert und den Prinzipien der europäischen Normen folgt verwendet werden. Einige EN-Normen wurden in den letzten Jahren geändert und der neue Berechnungsansatz bzw. der im Projekt zu erarbeitende Vorschlag zum Normentwurf sollte sich auf die aktuell gültigen Normen beziehen.

Die Angabe der meteorologischen Randbedingungen (solare und diffuse Einstrahlungsintensität, Außenlufttemperatur und Innenraumlufttemperatur) sollte aktuell und für den Standort Deutschland (und andere europäische Länder) spezifiziert sein. Dies muss für sowohl für thermisch stationäre als auch transiente Berechnungen umgesetzt werden.

Bzgl. der Rahmenprofile wäre es gut, „Standard“-Rahmentypen oder Gruppen von Profilen zu spezifizieren, die einen Durchschnitt angeben, der „allgemein“ verwendet werden kann. Außerdem sollten einige Typen/Gruppen von Abstandhaltern in Abhängigkeit von ihrer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit angegeben werden.

Es ist zu prüfen, ob die drei angegebenen Zonen in Abbildung 2-1, für die Berechnung generell relevant sind und ob sich dadurch die höchsten Temperaturdifferenzen ergeben bzw. die Berechnung auf der sicheren Seite liegt. Einerseits wird die maximale Temperaturdifferenz berechnet, andererseits ist es wichtig zu wissen, welche zulässige Spannung für das Glas anzusetzen ist. Es sollten Versuche durchgeführt werden, um die Festigkeit für jede Glas-/Kantenqualität zu ermitteln (WIPANO Kantenfestigkeit FKZ: 03TNH010F). Damit kann dann geprüft werden, ob die Formeln in der französischen Norm alle Parameter berücksichtigen.

2.3 Englische Berechnungsmethode („John-Colvin“-Methode)

Die „John-Colvin“-Methode (auch als „Pilkington“-Methode bekannt) stellt ein Berechnungsverfahren dar, welches weder normativ umgesetzt noch anderweitig publiziert wurde. Sie wurde in den 70er/80er Jahren vom Pilkington Technical Advisory Service entwickelt. Es ist ein Verfahren, welches das Berechnen der thermischen Sicherheit einer Glasfassade unter Sonneneinstrahlung ermöglicht. Sie wurde in erster Linie für Einfach- und Doppelverglasungen entwickelt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass dieses Verfahren nur für vertikal angebrachte Glasfassaden anwendbar ist. Es ist nicht möglich, mit dieser Methode spezielle Designs und Konstruktionen wie Brüstungen oder Shadow-box-Typen usw. zu berechnen. Alle Optionen können auf der Grundlage vereinfachter Gleichungen und der Verwendung unterschiedlicher Koeffizienten, z. B. für verschiedene Schattentypen, berechnet werden. Es ist jedoch nicht möglich, mit dieser Methode die genaue Glaskonstruktion oder den Glasaufbau direkt zu bestimmen. Die

meteorologischen Daten werden anhand der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung (ohne Einfluss der Ausrichtung) und des Tagesgangs (ohne Einfluss der Jahreszeit) definiert.

Diese Methode ist relativ einfach und entspricht daher nicht dem aktuellen Bedarf an einer detaillierteren Analyse für aktuelle, dem Stand der Technik entsprechenden, Fenster- und Fassadenverglasungen. Seitens der Industrie wird nicht empfohlen, sie für Dreifachverglasungen oder für spezielle Designs und Konstruktionen (z. B. Schiebetüren) zu verwenden. Die Spannungsberechnungen sind konservativ und liegen auf der „sicheren Seite“.

2.4 Projektziele

Motiviert und ausgehend vom Stand der Wissenschaft und Technik ergeben sich für dieses Projekt die folgenden Ziele:

- Entwicklung von deutschlandweit einsetzbaren Strahlungs-Außenlufttemperatur-Karten, die meteorologische Bedingungen wiedergeben, die zu realistischen und sich ungünstig auswirkenden thermomechanischen Extrembeanspruchungen bei Mehrscheiben-Isolierglaseinheiten und bauwerkintegrierten Photovoltaikmodulen (BIPV) in Vertikalfassaden mit verschiedener Orientierung führen.
- Kategorisierung der Parameter, wie z. B. meteorologische Daten, Verschattung, Konstruktion, Fassadenausrichtung, etc., welche thermischen Glasbruch in bestimmten Glaskonstruktionen und bei BIPV-Modulen induzieren.
- Entwicklung vereinheitlichter, vereinfachter und numerischer Berechnungsmethoden.
- Identifizierung von Anknüpfungspunkten zur Weiterentwicklung und Aktualisierung von Inhalten der französischen Norm und Überführung der Projektergebnisse in die zu entwickelnden Normentwürfe.
- Erarbeitung eines (europäischen) Normentwurfs zu thermisch induzierten Spannungen in Fassadenverglasungen und bauwerkintegrierten (Glas-Glas-)Photovoltaikmodulen, um eine wirtschaftliche Planung zu ermöglichen und Schadensfälle zu vermeiden.
- Vorstellung der Normentwürfe in den zuständigen CEN-Gremien.
- Schaffung einer Grundlage für die Entwicklung einer Berechnungssoftware.

Als weiteren Arbeitsinhalt soll die existierende und weit verbreitete französische Norm NF DTU 39 P3 (vgl. Abschnitt 2.2.8) auf entsprechende überarbeitungsbedürftige Inhalte hinsichtlich der aktuellen technologischen Verbesserungen bzw. Entwicklungen bei Isoliergläsern, Abstandhaltern und Rahmenkonstruktionen überprüft werden. Hierbei ist vorgesehen, Anknüpfungspunkte in diesem Projekt zu identifizieren, weiterzuentwickeln und in einen Normentwurf einfließen zu lassen. Dieser soll dann innerhalb der zuständigen Normungsgremien als Vorschlag vorgestellt werden.

3 Angaben zum Forschungsprojekt

3.1 Projektstruktur

Das Verbund-Forschungsprojekt „Normentwurf zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Glas und Glas-PV-Modulen (BIPV) im Bauwesen“ gliederte sich in sieben Arbeitspakete:

- AP 1: Definition des Umfangs und der relevanten Parameter
- AP 2.1: Auswertung der relevanten meteorologischen Datensätze
- AP 2.2: Spezifische Auswertung in Bezug auf die Berechnungsmethode
- AP 3.1: Untersuchung durch numerische Simulation
- AP 3.2: Entwicklung einer Berechnungsmethode (numerisch und vereinfacht mit Hilfe von Handformeln)
- AP 4: Experimentelles Validierungsprogramm
- AP 5: Ausarbeitung eines Normentwurfs

Das Projektkonsortium bestand aus der Interpane Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH, der Sunovation Produktion GmbH, dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und der Technischen Universität Darmstadt - Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) - Glass Competence Center (GCC). Im Unterauftrag der Technischen Universität Darmstadt befanden sich außerdem: Sommer Informatik GmbH und Ingenieurbüro RBGT Bauphysik und Glastechnik, Joachim Röhner.

Abbildung 3-1 zeigt den Projektstrukturplan (PSP) mit den einzelnen Arbeitspaketen und deren Wechselwirkungen. Außerdem ist der iterative Ansatz zwischen den Arbeitspaketen 2.1, 3.1, 2.2 und 3.2 dargestellt. Der Projektablaufplan (PAP), die vier Meilensteine und eine Übersicht über die einzelnen Projekttreffen ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

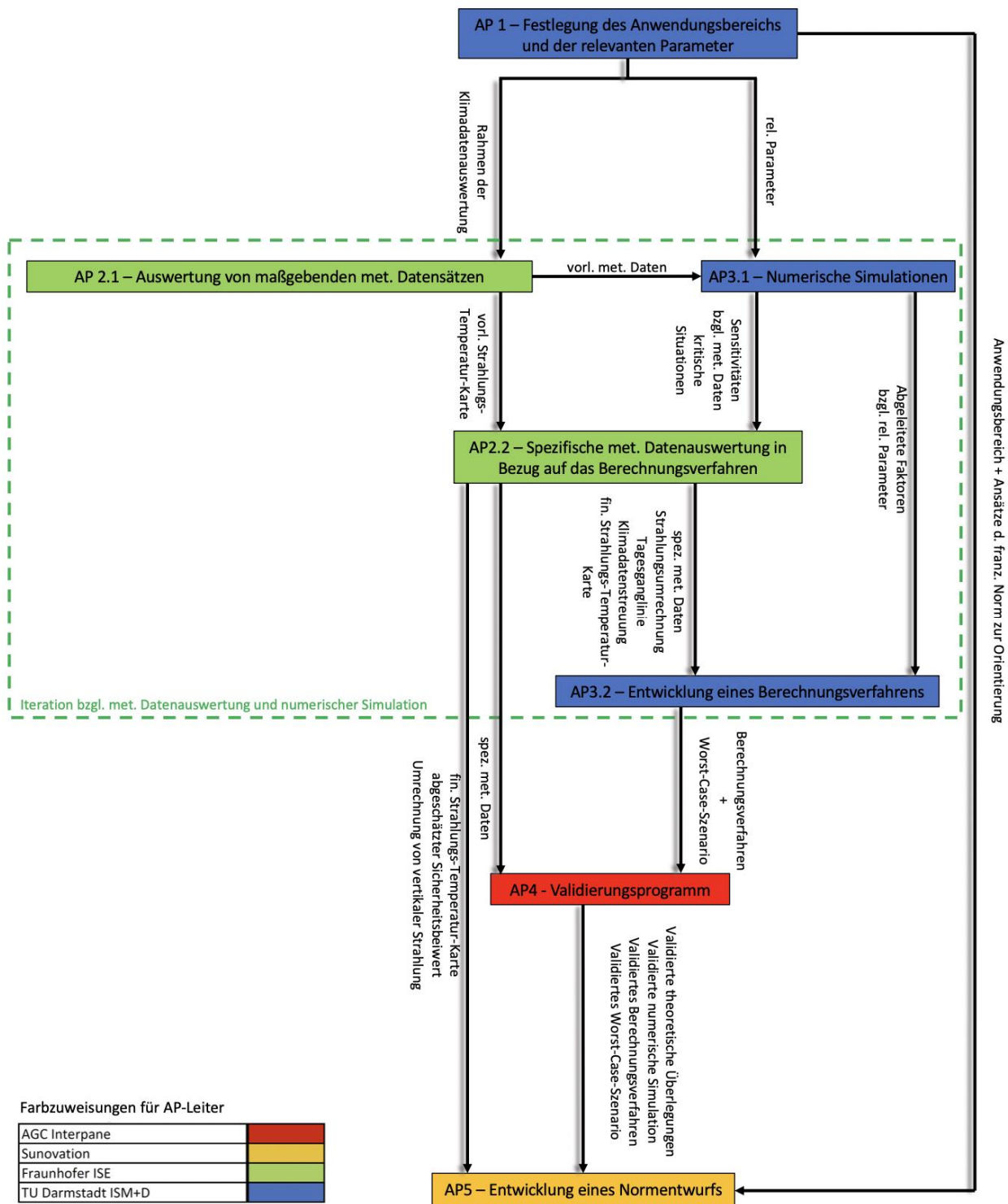


Abbildung 3-1: Projektstrukturplan (PSP).

Farbzuweisungen:	PM
AGC Interpane	17,0
Sunovation	13,0
Fraunhofer ISE	15,5
TU Darmstadt ISM+D	25,2

Arbeitspakete	Zeit	2020			2021											2022					Resource in PM						
		O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A		M	J	J	A	S	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		20	21	22	23	24	
Festlegung des Anwendungsbereichs und der relevanter Parameter	AP 1																										5,0
Auswertung von maßgebenden Klimadatensätzen	AP 2.1																										3,0
Untersuchungen durch numerische Simulation	AP 3.1																										3,0
Spezifische Klimadatenauswertung in Bezug auf das Berechnungsverfahren	AP 2.2																										1,9
Entwicklung eines Berechnungsverfahrens (numerisch und vereinfacht mittels Handformeln)	AP 3.2																										8,8
Experimentelles Validierungsprogramm	AP 4																										2,0
Erarbeitung eines Normentwurfs	AP 5																										2,0
Meilensteine																											1,0
Zu untersuchende Parameter und Aufbauten identifiziert																											2,0
Klimadatenauswertung, numerische Simulationen und Berechnungsverfahren abgeschlossen																											1,7
Validierung abgeschlossen																											4,0
Normentwurf erstellt																											4,0

		2020			2021											2022											
		O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
Projekttreffen / Reisekosten	Ort																										
Kick Off Meeting, Abstimmung rel. Parameter, Klimadaten	Online	X																									
Projekttreffen 1, num. Simulation, Klimadaten	Online								X																		
Projekttreffen 2, Werksbesuch Sunovation / AGC, num. Simulation, Klimadaten	Plattling														X												
Projekttreffen 3, Abstimmung Versuche	Online																X										
Projekttreffen 4, Abstimmung Normentwurf	Online																					X					
Projekttreffen 5, finale Abstimmung	Elsfeld																									X	

Abbildung 3-2: Projektablaufplan (PAP).

3.2 Ziele und Beschreibung der Arbeitspakete

In AP 1 wurde der Anwendungsbereich der einzelnen Normen für Glaskonstruktionen und bauwerkintegrierte Glas-Glas-PV-Module (BIPV) mit ihren unterschiedlichen Zielen und Inhalten festgelegt. Darüber hinaus wurden aktuelle Erfahrungen aus der Ingenieurpraxis zur thermischen Spannungsanalyse, die Darstellung des Standes von Wissenschaft und Technik sowie Erkenntnisse aus Schadensfällen zusammengefasst. Es sollten Fragen geklärt werden wie: Welche relevanten Parameter (z. B. meteorologische Daten, Verschattung, Konstruktion, Fassadenorientierung etc.) für thermisch bedingten Glasbruch bei Verglasungen und bei BIPV-Modulen sind auszuwählen bzw. (vorläufig) zu kategorisieren? In welchem Rahmen und mit welchen Parametern sollte die Auswertung der meteorologischen Daten erfolgen?

Ein Schwerpunkt dieses Projektes war die Entwicklung fundierter, relevanter und frei verfügbarer meteorologischer Datensätze bzw. meteorologischer Karten (Strahlungs-Außenlufttemperatur-Karten), die für Deutschland (Europa) meteorologischen Bedingungen beschreiben, welche wiederum zu realistischen und sich ungünstig auswirkenden thermomechanischen Extrembeanspruchungen bei Isolierglaseinheiten und BIPV-Modulen in Vertikalfassaden mit verschiedener Orientierung führen. In AP 2.1 wurden die relevanten meteorologischen Parameter identifiziert und in ihrer Variation hinsichtlich Jahreszeit, räumlicher Verteilung sowie zeitlicher und räumlicher Auflösung bewertet. Zu diesem Zweck wurde die Korrelation von Strahlungsdaten und Temperaturwerten analysiert. Es ergab sich dabei die Frage: Welche Strahlungs-Außenlufttemperatur-Kombinationen sind in Abhängigkeit von Standort und Jahreszeit charakteristisch für Glasbruch? Zunächst wurden in AP 3.1 in einem iterativen Prozess vorläufige Datensätze verwendet, um vororientierende numerische Simulationen der thermischen Beanspruchung von Verglasungen und BIPV-Strukturen durchzuführen.

Innerhalb des AP 3.1 wurden die Sensitivitäten der Einflussparameter ermittelt und schließlich mit den vorläufigen meteorologischen Datensätzen aus AP 2.1 sowohl für konventionelle Verglasungen in Fassaden als auch für BIPV-Module kategorisiert. Einerseits konnten Faktoren abgeleitet werden, die eine einfache manuelle und stationäre Berechnung im Gegensatz zu einer komplexen instationären Berechnung ermöglichen (vgl. AP 3.2). Andererseits dienten die ermittelten Sensitivitäten zur iterativen Spezifizierung der meteorologischen Datensätze in AP 2.2.

In AP 2.2 sollte die endgültige Version der nach Standort und Orientierung bezogenen meteorologischen Datensätze bzw. meteorologischer Karten (Strahlungs-Außenlufttemperatur-Karten) für Vertikalfassaden hinsichtlich des Berechnungsverfahrens verfeinert werden. In diesem Zusammenhang war vorgesehen, die Streuung zur Abschätzung eines Sicherheitsfaktors sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit der thermischen Beanspruchung von Fassadenverglasungen und Glas-PV-Modulen zu ermitteln. Dies wurde wegen der bei Projektantrag nicht überschaubaren Komplexität dieses Themenbereichs innerhalb dieses Projekts nicht bearbeitet. Für eine vollständige Bemessung von Verglasungen und BIPV-Anlagen in der Zukunft ist dies jedoch unerlässlich und muss durch weitere Forschung erarbeitet werden.

Unter Verwendung der - je nach Standort und Orientierung - spezifizierten meteorologischen Datensätze (Strahlungs-Außenlufttemperatur-Karten) aus AP 2.2 wurden in AP 3.2 valide Berechnungsmethoden für Fassadenverglasungen und BIPV-Module entwickelt. Die Umstellung von der dreidimensionalen transienten Berechnung auf eine einfache manuelle Berechnung mit Faktoren wie Geometrie, Verschattung, Strahlung, Temperatureffekte etc. wurde durchgeführt. Darüber hinaus wurde ein Konzept entwickelt, das die Berechnung im stationären Zustand mit Hilfe einer einfachen manuellen Berechnung ermöglicht. Worst-Case-Szenarien für Verglasungen und BIPV in Fassaden wurden dann für einen Normentwurf definiert.

Die experimentelle Validierung in AP 4 diente dazu, die theoretischen Überlegungen zu validieren und die verschiedenen numerischen Modelle zu kalibrieren. Zu diesem Zweck wurde in diesem Arbeitspaket ein Versuchsprogramm entwickelt und es wurden ausgewählte Probekörper für Verglasungen und BIPV hergestellt. Es wurde immer ein komplettes System, d. h. Isolierglas oder PV-Modul einschließlich Rahmenkonstruktion, getestet. Die Experimente wurden in speziellen Prüfständen im akkreditierten TestLab PV Modules des Fraunhofer ISE durchgeführt. Die Versuchsdaten wurden anschließend ausgewertet und die numerischen Berechnungsmodelle ggf. entsprechend angepasst.

In AP 5 wurde auf Basis der Ergebnisse aus AP 1 bis AP 4 jeweils ein Normentwurf (Verglasung und BIPV) erarbeitet und von Vertretern vom ISM+D, AGC Interpane und Sunovation sowie vom Fraunhofer ISE in den entsprechenden Normungsgremien zur Diskussion gestellt.

Tabelle 3-1: Zuordnung der Arbeitspakete zu den Berichtskapiteln.

AP 1: Definition des Umfangs und der relevanten Parameter	Abschnitt 4 bis 6, Anhang A1 und Anhang A2
AP 2.1: Auswertung der relevanten meteorologischen Datensätze	Abschnitte 7.1 bis 7.5
AP 2.2: Spezifische Auswertung in Bezug auf die Berechnungsmethode	Abschnitte 7.6 bis 7.10
AP 3.1: Untersuchung durch numerische Simulation	Abschnitte 10 bis 13
AP 3.2: Entwicklung einer Berechnungsmethode	Abschnitte 14 und 15
AP 4: Experimentelles Validierungsprogramm	Abschnitte 8 und 9, sowie Abschnitt 10.7 und Anhang A8
AP 5: Ausarbeitung eines Normentwurfs	Abschnitte 16 und 18

3.3 Grenzen des Projekts und Untersuchungsmöglichkeiten in einem Folgeprojekt

Bedingt durch den sehr weitläufigen Parameterraum (Rahmenkonstruktion, Schattengeometrie, Verglasungsaufbauten, Abstandhalterkonstruktion, etc.) ergab sich eine Begrenzung des zu untersuchenden Parameterraums. Insbesondere die Frage nach der Widerstandsseite, sprich der charakteristischen Glaskantenfestigkeit, die als Gegenüberstellungswert für die Bemessung im Sinne der EN 1990 (Eurocode 0) benötigt wird, konnte im Rahmen des Projekts nicht beantwortet werden. Hier wird auf andere Forschungsprojekte verwiesen (u. a. WIPANO Kantenfestigkeit FKZ: 03TNH010F).

In einem Forschungsfolgeprojekt sollen weitere, bisher nicht betrachtete Parameter und Einflussgrößen, fundiert untersucht werden. In der folgenden Liste sind einige davon aufgeführt:

- Isolierglaseinheiten mit Photovoltaik
- Shadow-Box, Brüstungselemente, Schiebetüren, geklebte Verglasungen, Stufengläser, Gläserne Raumecke, Fassadenkonstruktionen
- Verschiedene Glasgeometrien: z. B. rund, trapezförmig, zylindrisch gebogen
- Verschiedenartig gerahmte Gläser z. B. punktgelagerte Gläser
- Sicherheitsfaktoren für thermische Beanspruchungen
- Superposition (Einwirkungskombinationen) der thermischen Beanspruchung mit mechanischen Beanspruchungen (z. B. Eigengewicht, Wind, Lasten aus Personenverkehr)
- HotSpot-Analyse (BIPV)
- Erarbeitung meteorologischer Daten für ganz Europa
- Auswirkungen/Veränderung der meteorologischen Daten durch Klimawandel (Extrapolation)
- Verfeinerung des Geländemodells (hoch aufgelöst)
- Risikoabschätzung für Häufigkeiten
- Statistische Betrachtungen, Fehleranalyse für meteorologische Daten

3.4 Dissemination und Publikationen

Um die internationale Sichtbarkeit des Forschungsthemas zu stärken, Forschungsergebnisse zu präsentieren und zu diskutieren, wurden im Rahmen der Challenging Glass Conference 8 (Juni 2022) der Technischen Universität in Delft sowohl das Gesamtprojekt selbst in [25] als auch Berechnungsergebnisse für Verglasungen aus Abschnitt 11.2.1 in [48] publiziert. Im März 2023 wurden weitere Berechnungsergebnisse auf der Glasbau Konferenz in Dresden [49] und der Tagung Glas im konstruktiven Ingenieurbau 18 in München [50] vorgestellt und veröffentlicht. Des Weiteren wurden Projektergebnisse zu den thermomechanischen FEM-Simulationen von BIPV-Modulen beim BIPV-Forum 2023 in Bad Staffelstein vorgetragen und im Tagungsband veröffentlicht [3]. Für die EUPVSEC 2023 in Lissabon wurde dahingehend ein Abstract [4] eingereicht.

Im Rahmen der Glass Performance Days 2023 in Tampere, Finnland, wird ein vier-stündiger Workshop (Seminar) vorbereitet, in welchem die Grundlagen zur Ermittlung thermisch induzierter Spannungen und Berechnungsverfahren anhand von Beispielen vorgestellt werden. Dieses Seminar soll den direkten Transfer des Wissens in die Praxis ermöglichen.

Durch die Mitarbeit in den Normungsgremien für

Verglasungen

- CEN/TC 129/WG 8 und
- CEN/TC 250/SC 11/WG 1 - zuständig für CEN/TS 19100 - Design of glass structures

und

BIPV-Module

- CENELEC TC 82 - zuständig für EN 50583 [18]- und
- „Joint Working Group 11 on BIPV“ von IEC TC 82 bzw. ISO TC 160 WG9 - verantwortlich für IEC 63092 [34] -

wurden die entwickelten Berechnungsverfahren (vgl. Abschnitt 14 und Abschnitt 15) und die Normentwürfe (vgl. Abschnitt 16 und Abschnitt 18) präsentiert und zur Diskussion gestellt.

Während der Projektlaufzeit sind am ISM+D zwei Master-Thesen entstanden [11] und [12], die sich mit der Thematik der thermisch induzierten Spannungen beschäftigen. Die Ergebnisse dieser Abschlussarbeiten sind in die FEM-Parameterstudien eingeflossen und ergänzten das Projekt sehr sinnvoll.

3.5 Danksagung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Verbundprojekt »Thermobruch«: Normentwurf zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Glas und Glas-PV-Modulen (BIPV) im Bauwesen wird durch das Deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert unter dem Förderkennzeichen 03TN0007A-D.

Außerdem gilt der Dank dem Bundesverband Flachglas e.V. und dem Fachverband Konstruktiver Glasbau e.V. für die finanzielle Unterstützung der Vorstudie [53] als Grundlage zur Aufarbeitung der gesamten Projektthematik.

4 Parameter für thermisch induzierte Beanspruchungen

4.1 Einleitung

Die Größe von thermisch induzierten Spannungen in Gläsern wird durch verschiedene Parameter (z. B. meteorologische Situation, konstruktiver Aufbau der Verglasung, etc., vgl. Abschnitte 6.1 und 6.2) beeinflusst. Innerhalb von AP 1 wurden basierend auf den Erfahrungen der Industriepartner Einflussgrößen und Parameter gesammelt und im Anschluss basierend auf numerischen Simulationen untersucht.

4.2 Einflussgrößen bei Verglasungen

Verglasungen werden täglich weltweit verbaut, in der Regel als definierte und größtenteils standardisierte Systeme in den verschiedensten Bauwerkstypen und Fassaden, wobei es festgelegte Parameter gibt, u. a. Standort, Konstruktionsart, Gebäudenutzung, etc. Die hieraus resultierenden Einflussfaktoren bzw. -größen lassen sich somit in drei Bereiche und wiederum jeweils in Unterbereiche aufteilen.

- **Außenseite der Gebäudehülle**
Zur Außenseite gehören z. B. der Standort, meteorologischen Bedingungen vor Ort, die Orientierung (Himmelsrichtung), die Neigung (Einbauwinkel), die Umgebungsbebauung, externe Verschattungssysteme bzw. außenliegende konstruktionsbedingte Einflüsse. Als Unterbereiche können z. B. die Geometrie der Teilverschattung oder auch dessen Intensität (Einstrahlung) genannt werden.
- **Konstruktionsebene (Mitte)**
Die Konstruktionsebene beinhaltet das Verglasungssystem mit all seinen Komponenten und konstruktiven Einflüssen. Dazu gehören u. a. die Art des Systems (Einfachfenster, Kastenfenster, Fassadensysteme, etc.), sowie die Verglasungsart (Monoglas oder Isolierglas), die Faktoren der einzelnen Komponenten und auch statische Einflüsse wie die Art der Lagerung. In den Unterbereichen lassen sich schließlich Parameter wie die Rahmenfarbe oder auch Wärmedämm- und Sonnenschutzbeschichtungen nennen.
- **Raumseite des Gebäudes**
Die Raumseite bildet den Abschluss mit allen im Gebäude vorhandenen Einflüssen, die sich auf die jeweilige Verglasung auswirken können, wie z. B. innenliegende Blend-/ Verdunklungssysteme oder auch abgehängte Decken oder Brüstungsverglasungen/Shadow-boxen. Der Belüftungsgrad von Blendschutzsystemen z. B. lässt sich in die Unterbereiche einsortieren.

Abbildung A-A in Anhang A1 zeigt eine exemplarische Übersicht, welche im Rahmen des Projekts erstellt wurde. Es ist anzumerken, dass diese nicht als absolut vollständig angesehen werden kann. Sie versucht jedoch die Vielzahl der Einflussgrößen und die Zusammenhänge der unterschiedlichen Ebenen untereinander aufzuzeigen. Aus diesen drei Bereichen und Unterbereichen und deren unterschiedlichen Einflussfaktoren bilden sich eine Vielzahl von Kombinationen. Einige davon sind statischer Natur, aber es gibt auch viele variable Faktoren/Einflüsse, die sich gegenseitig beeinflussen können. Das kann sich positiv bzw. negativ auf die vorhandenen bzw. angedachten Verglasungen auswirken. Dieses Wechselspiel aus den verschiedenen Einflüssen/Faktoren und z. B. den bauphysikalischen Anforderungen kann dazu führen, dass ein und derselbe Faktor sich einmal negativ und einmal positiv auf die Spannungen auswirken kann. Beispielsweise kann man hier die Absorption einer beschichteten Scheibe nennen, welche sich ggf. positiv auf den Wärmeschutz, jedoch negativ (sprich höhere Spannungen) auf die thermisch induzierten Spannungen auswirkt.

Im Allgemeinen muss eine Verglasung den gegebenen Einwirkungen widerstehen. So muss beispielsweise jede Verglasung in einem Gebäude in der Lage sein, auf die Wirkung eines Schattenwurfs zu reagieren, der durch ständige oder vorübergehende äußere Hindernisse entsteht, und zwar für alle möglichen meteorologische Bedingungen des jeweiligen Standorts. Beachtet werden sollte nicht nur der finale Einbauzustand/Nutzungszustand der Verglasung, sondern auch die Situation während der Bauphase (nicht geschlossenes bzw. nicht beheiztes Gebäude).

Aktuell kommt die französische Norm im alltäglichen Projektgeschehen zum Einsatz, um die thermisch induzierten Spannungen in den Gläsern unter den ungünstigsten Bedingungen nachzuweisen. Wie in Abschnitt 2.2 vorgestellt, erfolgt die Berechnung der Spannungen auf Basis der maximalen Temperaturdifferenz im Glas. Die Temperaturdifferenz im Glas wird u. a. durch die folgenden Einflussfaktoren beeinflusst:

- Art und Zusammensetzung der Verglasungseinheit: Anzahl der Komponenten, energetische Eigenschaften (wie z. B. Beschichtungen auf verschiedenen Positionen)
- Standortspezifische meteorologische Bedingungen (Sonneneinstrahlung, Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wärmeübergangskoeffizient, usw.)
- Randbedingungen im Inneren (Innenlufttemperatur, Wärmeübergangskoeffizient)
- Beschaffenheit und Umgebung des Rahmens (Art/thermische Trägheit des Rahmens, Farbe des Rahmens, Art des Abstandhalters bzw. des gesamten Randverbundes)
- Vorhandensein von Teilverschattung (Schattenwurf, Umgebung - Bäume, Gebäude usw.)
- Vorhandensein und Art einer Jalousie oder eines Paravents/Vorhangs (außen, innen)
- Vorhandensein und Art eines Hindernisses hinter dem Glas (abgesenkte Decke, Säule usw.)
- Vorhandensein und Art einer Heiz-/Kühlquelle hinter dem Glas (Heizkörper usw.)

Die Oberflächen der Einzelscheiben einer Verglasungseinheit werden von außen nach innen durchnummeriert, wobei die Neigung der Verglasung (von der Horizontalen ausgehend) angegeben wird (siehe auch Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Insbesondere für die Angabe der Lage der Beschichtungen ist die Nummerierung (Positionen) erforderlich. Schließlich beeinflussen die Beschichtungen den Wärmetransport durch das Isolierglas und gleichzeitig die Absorption der Gläser, weswegen deren Lage von besonderer Relevanz für thermisch induzierte Spannungen ist.

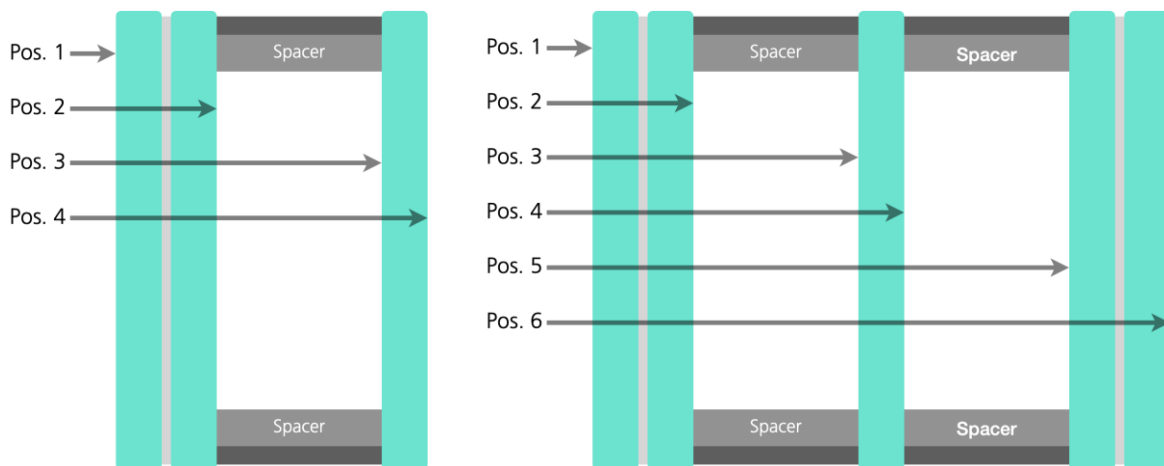


Abbildung 4-1: Prinzip bei der Nummerierung der Isolierglasoberflächen für ein Zweifach-Isolierglas (links) und ein Dreifach-Isolierglas (rechts).

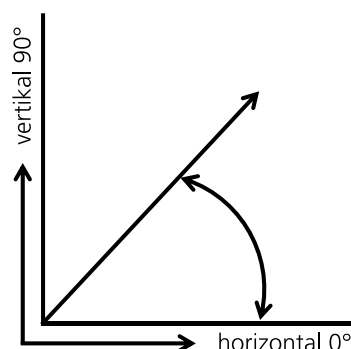


Abbildung 4-2: Beispiel für die Angabe der Neigung gegenüber der Horizontalen.

4.3 Typische thermisch verursachte Glasschäden bei Verglasungen

Im Folgenden werden verschiedene Beispiele für thermisch induzierte Glasbrüche an Verglasungen aus der Praxis vorgestellt.

4.3.1 Beispiel 1 - Brüstungsverglasung

Beim ersten Beispiel handelt sich um eine Brüstungsverglasung in einem Bürogebäude in Belgien. Das Isolierglas hatte folgenden Aufbau:

- 6 mm Teilvorgespanntes Glas (TVG) mit einer Sonnenschutzbeschichtung auf Pos. 2
- 9 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- 8 mm emailliertes Glas TVG mit einer dunkelgrauen Farbe auf Pos. 4

Ein Teil des Glases zerbrach an den Gestellen, ein anderer Teil am Gebäude (siehe Abbildung 4-3). Das Hauptproblem bei diesem thermischen Glasbruch war die erhöhte Absorption infolge der Emaillierung auf der Glasoberfläche.



Abbildung 4-3: Thermisch induzierter Bruch an einer Brüstungsverglasung (Quelle: AGC Interpane).

4.3.2 Beispiel 2 - Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Dieser Glasbruch eines Dreifach-Wärmedämmglases stellte sich im Rahmenbereich (Abbildung 4-5) ein. Das Projekt hat seinen Standort in Deutschland (Bergisch Gladbach). Die Fassade ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Das Isolierglas setzte sich dabei wie folgt zusammen:

- 6 mm Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG), Weißglas mit einer Wärmeschutzbeschichtung auf Pos. 2
- 14 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- 6 mm ESG, Weißglas
- 14 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- Verbundsicherheitsglas (VSG) 44.2 aus Floatglas, mit einer Wärmeschutzbeschichtung auf Pos. 5.

Die Abmessungen der Verglasung betrug (B/H) 1124 x 490 mm. Bruchauslöser war hier, dass auf der Innenseite der Verglasung dunkle Gegenstände in direktem Kontakt zur Verglasung aufgestellt wurden, was einen Wärmestau bewirkte.



Abbildung 4-4: Thermisch induzierter Bruch an einem Sonnenschutzglas - Übersicht (Quelle: AGC Interpane).



Abbildung 4-5: Thermisch induzierter Bruch an einem Sonnenschutzglas - Detail (Quelle: AGC Interpane).

4.3.3 Beispiel 3 - Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Der Bruch ereignete sich an einem Zweifach-Isolierglas in einem Bürogebäude in der Tschechischen Republik. Es handelt sich um ein Zweifach-Isolierglas, wobei eine der Scheiben bläulich eingefärbt und zusätzlich mit einer low-e Beschichtung versehen war. Es handelte sich hierbei um (thermisch entspanntes) Floatglas. Als Bruchursache wurde der Heizkörper (siehe Abbildung 4-6), welcher sich zu nahe an der Verglasung befindet, identifiziert. In der Kombination mit der höheren Absorption des eingefärbten Glases führte dies schließlich zu einer ungleichmäßigen Erwärmung des Glases und somit zu einem thermischen Glasbruch.



Abbildung 4-6: Thermisch induzierter Bruch an einem Zweifach-Isolierglas in einem Bürogebäude (Quelle: AGC Interpane).

4.3.4 Beispiel 4 - Zweifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Es handelt sich hier um eine Zweifach-Isolierverglasung mit zwei nicht vorgespannten Einzelscheiben aus Floatglas. Bei der Planung wurde lediglich eine äußere Verschattung berücksichtigt. Die Ursache des Bruchs war jedoch in diesem Fall ein Wasserkocher (siehe Abbildung 4-7). Der Wasserdampf „erhitzte“ einen Teil der Innenscheibe. Der Temperaturunterschied, der nun zwischen dem erhitzten Bereich und dem „kalten“ Rand der Glasscheibe entstand, war zu groß und führte hier zum thermischen Glasbruch.



Abbildung 4-7: Thermisch induzierter Bruch an einem Zweifach-Isolierglas in einem Wohngebäude (Quelle: AGC Interpane).

4.3.5 Beispiel 5 - Dreifach-Isolierglas als Wärmedämmglas

Dieses Beispiel zeigt einen thermisch induzierten Glasbruch an einer Verglasung in einem Kindergarten, bei dem die Ursache zunächst nicht direkt erkennbar war, da laut Planung und Berechnungen alle konstruktiven Einflüsse berücksichtigt wurden. Das Isolierglas setzte sich dabei wie folgt zusammen:

- 6 mm Floatglas mit low-e Beschichtung auf Pos. 2
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- 6 mm Floatglas
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argon befüllt
- VSG 66.2 aus Floatglas mit einer low-e Beschichtung auf Pos. 5

Der Bruchursprung fand sich an der unteren Kante des Isolierglases. Das Isolierglas musste ausgebaut werden, um festzustellen, ob es sich um einen thermischen oder mechanisch verursachten Bruch handelte. Nach dem Entfernen der Glashalteleisten, konnte man, wie in Abbildung 4-8 erkennbar, Reste von Fenstermal Farben erkennen. Nach Rücksprache mit den Mitarbeitern des Kindergartens wurde bestätigt, dass hier eine großflächige Bemalung mit Fenstermal Farben entfernt wurde. Diese war aber zur Zeit des Glasbruches noch auf der Scheibe. Durch die dunkelgrüne Farbe hat sich die innere bemalte Scheibe stärker aufgeheizt als der Rand der Verglasung. Dieser Temperaturunterschied zwischen dem bemalten und den unbemalten Bereichen hat in diesem Fall den thermischen Glasbruch ausgelöst.



Abbildung 4-8: Thermisch induzierter Bruch an einem Dreifach-Isolierglas in einem Kindergarten (Quelle: AGC Interpane).

4.4 Einflussgrößen bei BIPV-Modulen

Photovoltaikmodule haben im Gegensatz zu konventionellen – meist transparenten – Gläsern solaraktive Schichten oder solaraktive Komponenten, die Sonnenlicht je nach Technologie unterschiedlich stark absorbieren und in Strom umwandeln. Abbildung 4-9 zeigt nach [29] exemplarisch für einen Siliziumhalbleiter die Bereiche, die zur Umsetzung in Strom genutzt werden können.

Silizium hat bei 300 K eine Bandlücke bei einer Wellenlänge von 1100 nm. Dies hat zur Folge, dass nur Strahlung mit einer Wellenlänge von exakt 1100 nm vollständig in Strom umgewandelt werden kann. Strahlung mit geringerer Wellenlänge und daher größerer Photonenenergie verliert einen von der Wellenlänge abhängigen Teil seiner Energie durch Thermalisierung. Strahlung mit einer größeren Wellenlänge und daher kleineren Photonenenergie kann von Silizium nicht absorbiert und in Strom umgewandelt werden. Für langwellige Strahlung ist Silizium transparent. Lediglich der in Abbildung 4-9 in Rot hervorgehobene Bereich kann in Strom umgewandelt werden.

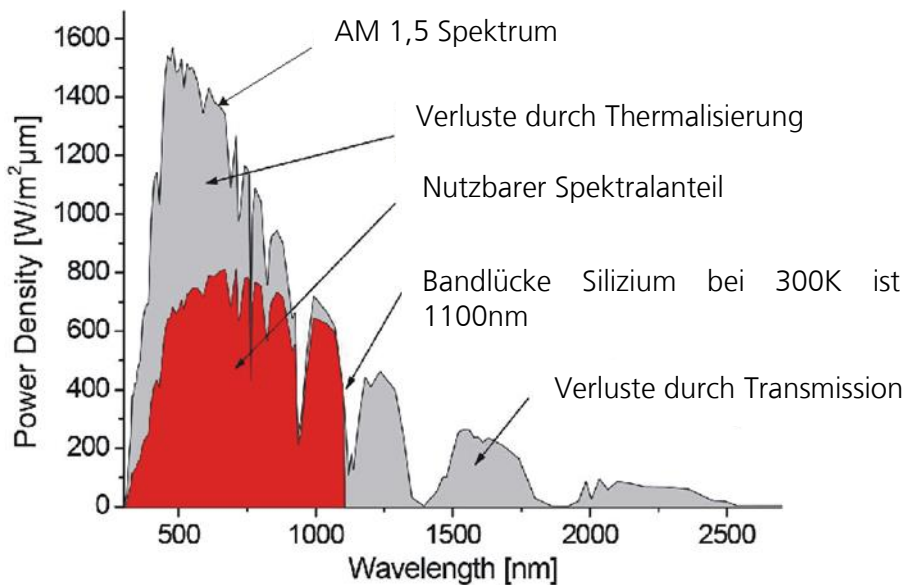


Abbildung 4-9: Verluste durch Thermalisierung und Transmission für Silizium [29].

Unabhängig von diesen Technologie-bedingten Verlusten verursachen Verschattungen weitere Verluste.

Diese Verschattungen können z. B. hinsichtlich ihrer Ursache in eine Mikro-, Meso- und Makroverschattung unterteilt werden:

- Mikroverschattung beschreibt eine Verschattung der solaraktiven Fläche durch das Modul selbst.
- Mesoverschattung beschreibt eine Verschattung der solaraktiven Fläche durch Bauteile, die zum Solarsystem gehören.
- Makroverschattung beschreibt eine Verschattung der solaraktiven Fläche durch Gegenstände und Bauteile, die sich in der Umgebung des Solarsystem befinden.

Zugleich können sie hinsichtlich ihrer Auftrittsdauer in permanent und temporär klassifiziert werden:

- Permanente Verschattung beschreibt eine Verschattung der solaraktiven Fläche, die einen zeitlich ortsfesten Bereich beibehält (weder die Größe, der Ort noch die Intensität der Verschattung unterliegen zeitlichen Veränderungen).
- Temporäre Verschattung beschreibt eine Verschattung der solaraktiven Flächen die keinen zeitlich ortsfesten Bereich beibehält (sowohl die Größe als auch der Ort oder die Intensität der Verschattung unterliegen zeitlichen Veränderungen). Veränderungen können sowohl einzeln als auch in Kombination auftreten.

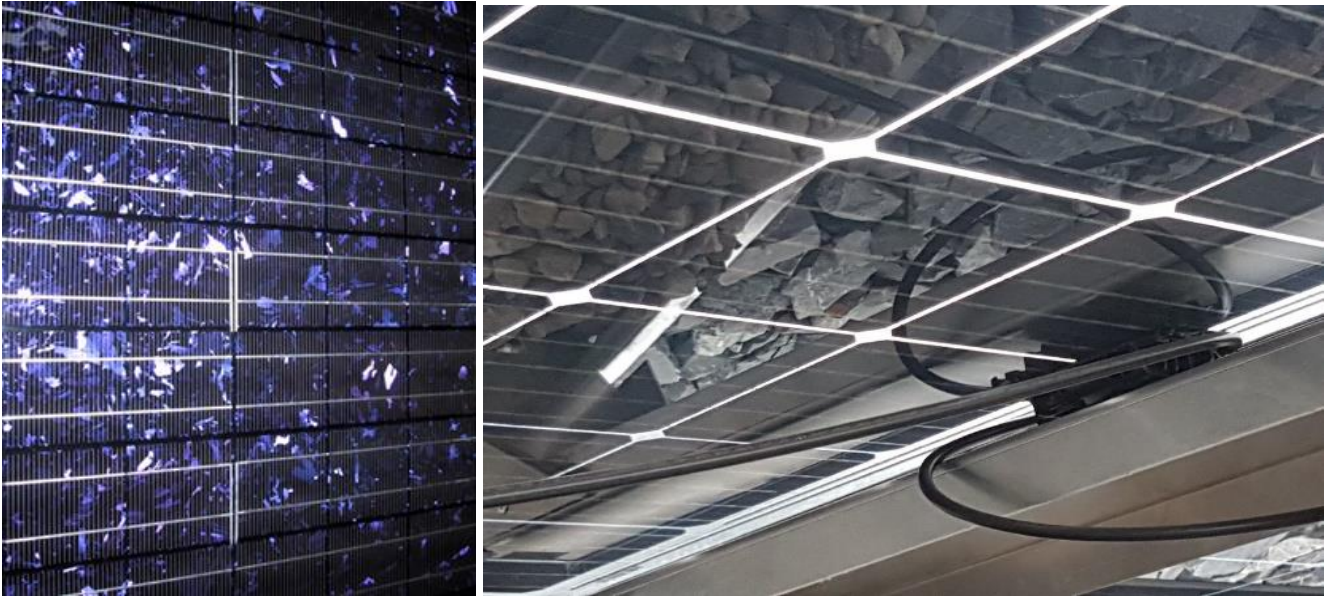


Abbildung 4-10: Beispiele für eine Mikroverschattung; links: permanente Verschattung durch Verbinder, rechts: temporäre Verschattung durch Kabel.

Die Abbildung 4-10 zeigt zwei Beispiele für Mikroverschattungen. Im Bild links verursacht ein vor der Solarzelle angebrachter elektrischer Verbinder eine lokale, kontinuierliche, in der Größe unveränderliche - daher permanente - Verschattung. Im Bild rechts verursacht ein Kabel auf der Rückseite eines bifacialen Solarmoduls eine lokal, nicht kontinuierliche Verschattung der solaraktiven Zellrückseite.



Abbildung 4-11: Beispiele für eine Mesoverschattung; links: permanente Verschattung durch Halterung, rechts: temporäre Verschattung durch Vogelkot.

Die Abbildung 4-11 zeigt zwei Beispiele für Mesoverschattungen. Im Bild links verursacht ein zur Halterung der Solarmodule benötigtes Aluminiumprofil eine lokale, kontinuierliche, in der Größe unveränderliche - daher permanente - Verschattung. Im Bild rechts verursachen Verschmutzungen durch Vogelkot eine weder lokal noch zeitlich kontinuierliche Verschattung der Solarmodule.



Abbildung 4-12: Beispiele für Makroverschattung; links: permanente Verschattung durch Nachbargebäude, rechts: temporäre Verschattung durch Person.

Die Abbildung 4-12 zeigt zwei Beispiele für Makroverschattungen. Im Bild links verursacht ein der Solaranlage gegenüberliegendes Gebäude das auf Grund seiner langsamen lokalen örtlichen und zeitlichen Veränderung als quasi unveränderliche - daher permanente - Verschattung angesehen werden kann. Im Bild rechts verursacht ein Passant eine zeitlich nicht kontinuierliche Verschattung der Solarmodule.

Abbildung A-B in Anhang A2 zeigt eine exemplarische Übersicht, welche im Rahmen des Projekts erstellt wurde. Es ist anzumerken, dass diese nicht als absolut vollständig angesehen werden kann. Sie versucht jedoch die Vielzahl der Einflussgrößen und die Zusammenhänge der unterschiedlichen Ebenen untereinander aufzuzeigen. Aus diesen drei Bereichen und Unterbereichen und deren unterschiedlichen Einflussfaktoren bilden sich eine Vielzahl von Kombinationen. Einige davon sind statischer Natur, aber es gibt auch viele variable Faktoren/Einflüsse, die sich gegenseitig beeinflussen können. Das kann sich positiv bzw. negativ auf die vorhandenen bzw. angedachten BIPV-Module auswirken. Dieses Wechselspiel aus den verschiedenen Einflüssen/Faktoren und z. B. den bauphysikalischen Anforderungen kann dazu führen, dass ein und derselbe Faktor sich einmal negativ und einmal positiv auf die Spannungen auswirken kann.

4.5 Typische thermisch verursachte Glasschäden bei BIPV-Modulen

PV-Module bestehen aus vergleichbar wenig einzelnen Komponenten. Diese sind:

- Glas
- Solarzellen (im Falle von kristalliner Solartechnik)
- Solaraktiv beschichtetes Glas (im Falle von Dünnschicht Solartechnik)
- Verbundmaterial
- Elektrische Verbinder
- Anschlussdosen mit Kabeln und Steckern
- Ggf. einem umlaufenden Rahmen oder rückseitig aufgebracht Schienen zur Montage

Alle diese Komponenten können wie Abbildung 4-13 zeigt im Laufe des Betriebs auf Grund unterschiedlicher Einwirkung unterschiedliche Fehler aufweisen.

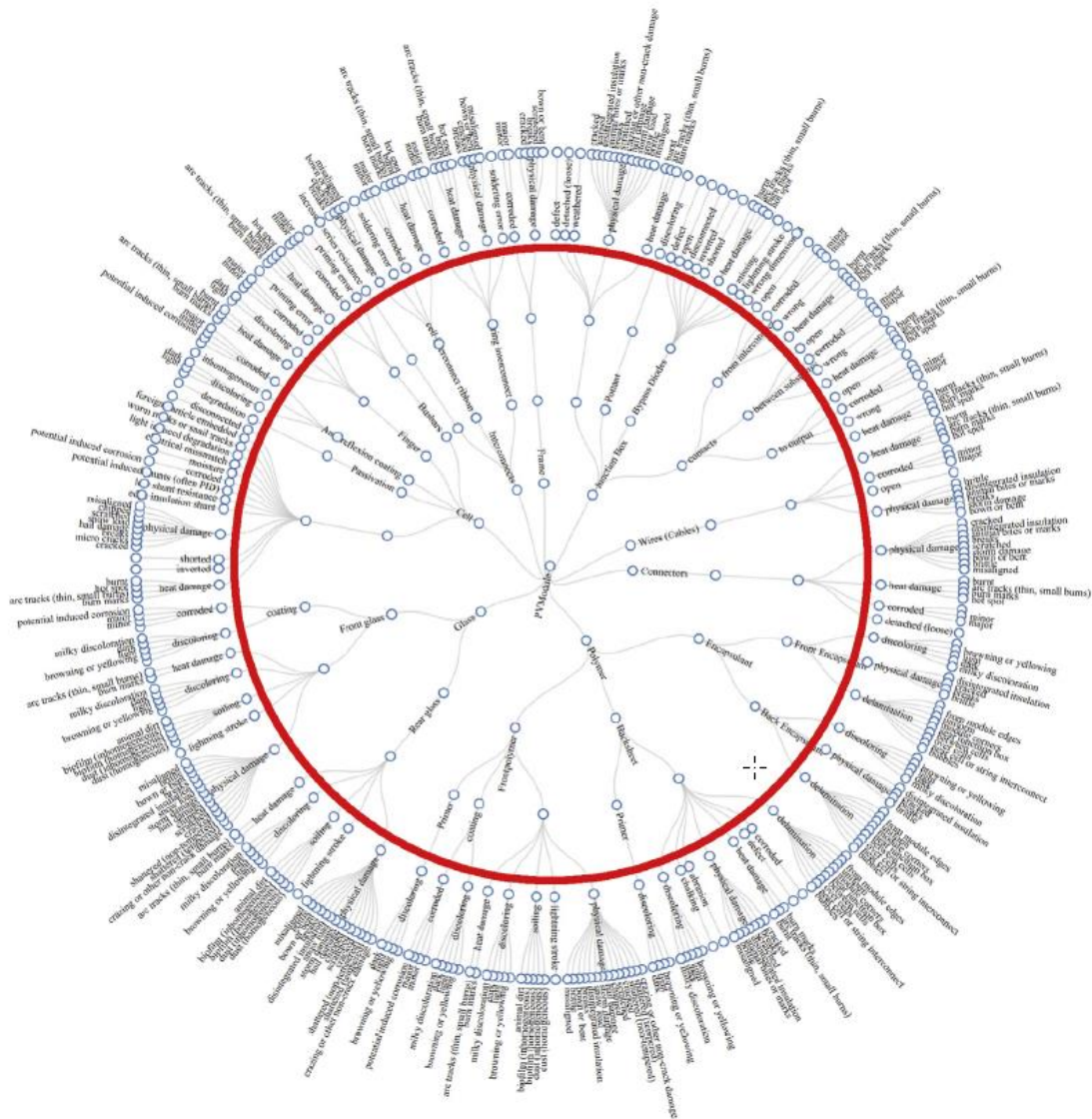


Abbildung 4-13: Typische Schäden bei PV-Modulen während der Betriebszeit nach [31].

Thermisch verursachte Glasschäden sind daher nur ein sehr kleiner Teil aller möglichen auftretenden Fehler bei PV-Modulen (vgl. Abbildung 4-14).

Da sich Glas als Werkstoff im auftretenden Temperaturbereich (bei PV-Anlagen) sehr robust verhält - es sind weder Verfärbungen, Deformationen, etc. bekannt - sind lediglich die nachfolgenden zwei durch Temperatureinfluss bedingte Schadensmechanismen bekannt:

- Spontaner Glasbruch durch Nickelsulfid-Einschlüsse (tritt nur bei thermisch vorgespannten Gläsern, meist Einscheibensicherheitsglas, abgekürzt ESG, auf)
- Glasbruch durch thermisch induzierte Zugspannungen im Glas

Anmerkung:

Der spontane Glasbruch durch Nickelsulfid-Einschlüsse (NiS) tritt nur bei thermisch vorgespannten Gläsern (z. B. ESG) auf. Durch eine Umwandlung von ursprünglich vorhandenem α -NiS in β -NiS geht eine Volumenausweitung einher, deren Wachstumsgeschwindigkeit durch die hohen Betriebstemperaturen von Photovoltaik-Modulen begünstigt wird. Die lokale Volumenvergrößerung führt zu Zugspannungen in der Zugzone im Glasquerschnitt, die - sobald deren Magnitude größer ist als die Zugfestigkeit an entsprechender Stelle – spontan zum Glasbruch führt. Dieser Fehlermechanismus wird durch Herstellung von ESG gemäß [15] vermieden. Hierbei wird das Glas einem definierten Heißlagerungsprozess unterzogen, in dessen Verlauf betroffene Gläser brechen.

Der oben beschriebene Glasbruchmechanismus ist nicht Inhalt dieses Forschungsvorhabens.

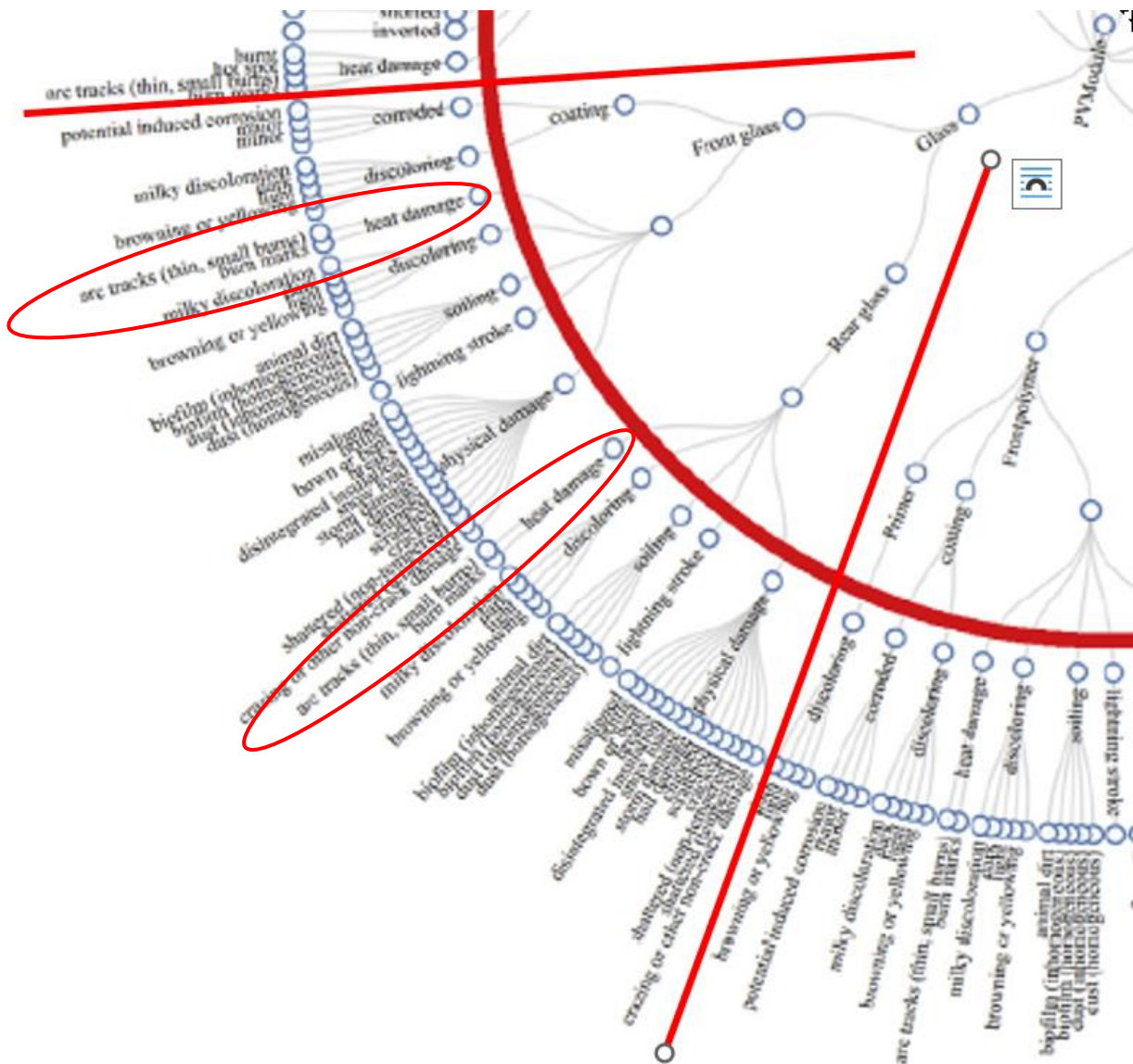


Abbildung 4-14: Typische thermisch verursachte Schäden bei PV-Modulen nach [31] – Ausschnitt von Abbildung 4-13.

Abbildung 4-15 zeigt exemplarisch zwei durch Temperaturdifferenzen gebrochene Gläser, links, ein Dünnschichtmodul mit amorpher Silicium-Technologie (a-Si) und rechts, ein PV-Modul mit kristallinen Solarzellen.

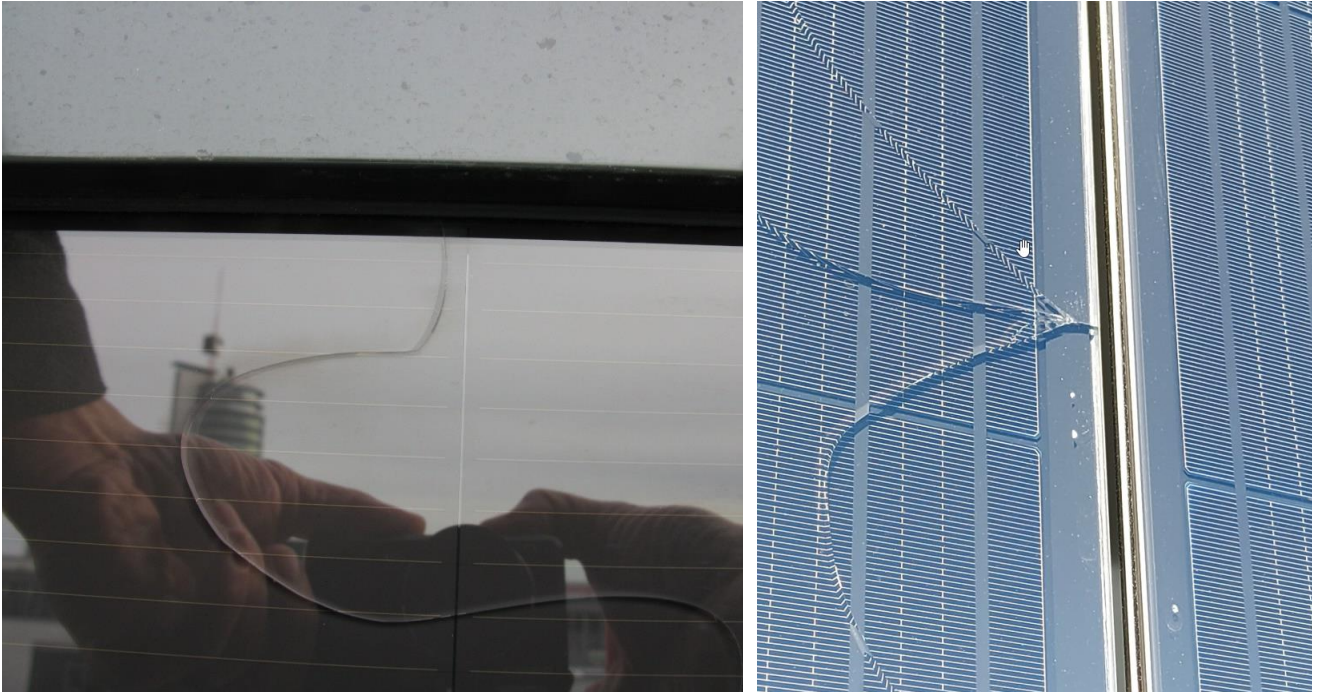


Abbildung 4-15: Typische thermisch induzierte Glasbrüche bei kundenspezifisch gefertigten Glas-Glas-BIPV-Modulen, links: a-Si-Dünnschicht, rechts: kristalline Zelltechnologie.

5 Spezifikation von für die Projektpartner relevanten Glas- und PV-Produkte

5.1 In der Praxis relevante Isolierglasaufbauten

Das sich in einem Rahmen befindliche Isolierglas entspricht einem der wesentlichsten Parameter. Wie auch bei den übergeordneten Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 4.2), gibt es auch, bedingt durch die verschiedenen Anforderungen in der Planung, eine Vielzahl unterschiedlicher Kombinationen von Isolierglasaufbauten. Darunter gehören z. B. die Ästhetik mit ihren gestalterischen Freiheiten hinsichtlich Geometrie und Form sowie die Farbgebung (eingefärbte Gläser oder auch Gläser mit Siebdruck) und Reflexionsgrad.

Ebenfalls existieren Anforderungen, die aus der Energieeffizienz (klimatisch an regionale Bedürfnisse angepasst) resultieren. Beispielsweise ist zu vermeiden, dass im Sommer ein zu hoher Kühlbedarf des Gebäudeinnern und im Winter gleichzeitig ein zu hoher Heizbedarf entsteht. Oftmals steht dies im Widerspruch zu den Bedarfen an natürlichem Licht im Gebäude, der Behaglichkeit und dem Raumklima.

Weitere Faktoren ergeben sich aus der Produktionstechnik, der logistischen Abwicklung (z. B. große Verglasungen) sowie aus der Konstruktion bzw. dem Verglasungssystem.

Durch die in jedem Projekt veränderten Randbedingungen hinsichtlich der oben genannten Faktoren, kann nicht direkt definiert werden, welcher der genannten Parameter den größten Einfluss auf die thermisch induzierten Spannungen hat. Hierfür ist jeweils die Berechnung der thermisch induzierten Spannungen erforderlich.

In Abbildung 5-1 ist eine Auswahl von verschiedenen Isolierglasaufbauten dargestellt. Dabei wurde versucht, die am Markt meist nachgefragten und die verschiedenen Anwendungen widerzuspiegeln. Diese fangen bei Einfachverglasungen (ggf. Brüstungen) an und gehen über standardmäßige Zwei- und Dreifach-Isoliergläser mit Wärmeschutzbeschichtungen für z. B. den Wohnungsbau weiter. Außerdem sind Zwei- und Dreifach-Sonnenschutzverglasungen für den Wohnungsbau und Nichtwohngebäude (z. B. Bürogebäude) dargestellt. Zusätzlich werden auch Sonderlösungen wie Sonnenschutzverglasungen mit einer voll- oder teilemaillierten Scheibe für Sonderkonstruktionen (z. B. Brüstungsverglasungen und sogenannte Shadow-boxen) betrachtet.

Jede Scheibe bzw. jedes Isolierglas hat seine speziellen strahlungsphysikalischen Eigenschaften (Absorption, Reflexion und Transmission) und wirkt sich dementsprechend unterschiedlich auf die Konstruktion und die resultierenden Temperaturen (und damit auch auf die Spannungen) aus. Wichtige Indikatoren sind die Energieabsorption und die Energier reflexion einer Verglasung. Auch die Positionen der Beschichtung (siehe Abbildung 4-1) innerhalb des Isolierglases haben besondere Auswirkungen auf die thermischen Berechnungen. Anhand Abbildung 5-1 lassen sich die Unterschiede in den strahlungsphysikalischen Werten erkennen.

Diese technischen Werte können von verschiedenen Glasherstellern im Markt in Erfahrung gebracht oder falls vorhanden, mit deren frei verfügbaren Berechnungstools ermittelt werden. Das gilt in der Regel nur für Standardverglasungen. Sonderlösungen müssen bei den technischen Abteilungen der Hersteller anfragt werden. Allerdings sind die Informationen dann immer auf die Produkte der einzelnen Hersteller limitiert. Validierte Software-Lösungen am Markt, wie z. B. WinSLT von Sommer Informatik GmbH, sind hier mit Produkten vieler verschiedener Hersteller doch um einiges breiter aufgestellt. Die Werte in Abbildung 5-1 wurden mit Hilfe von WinSLT berechnet. Die Abbildung 5-2 zeigt exemplarisch die strahlungsphysikalischen Berechnungsergebnisse für das Isolierglases 3-fach-04 (siehe Abbildung 5-1), welche als Eingangsgrößen für die numerischen Simulationen in den später folgenden Abschnitten 10 und 11 verwendet werden.

In diesem Projekt wurden weitergehend beispielhaft Zweifach- und Dreifach-Isoliergläser mit Wärmedämm- und Sonnenschutzschichten untersucht (vgl. Abschnitt 11).

Glass description			Glass properties									
Glass type	Glass composition	Built-up	tv	g	te	pe	pe'	ae_1	ae_2	ae_3	Ug	Gegenprobe te + pe + ae = 100% Strahlung
1-fach-01	55.2		88.00	79.00	74.44	7.04	7.04	18.53			5.44	100.0
2-fach-01	2-fach Isolierglas 4-16-:44.2 - iplus 1.1 #3		80.07	63.70	52.61	27.72	20.94	7.07	12.60		1.1	100.0
2-fach-02	2-fach Isolierglas 4-16-:4 - iplus 1.1 #3		81.59	64.29	58.13	27.95	27.12	7.09	6.83		1.12	100.00
2-fach-03	2-fach Isolierglas 55.2-:16-8 - ipasol 70/37 #2		68	35.64	32.49	26.74	37.7	38.99	1.78		1.03	100.00
2-fach-04	2-fach Isolierglas 8-:16-8- - ipasol 70/37 #2 and RAL 9005 full frit #4		1.1	33.18	0.54	32.59	6.84	30.64	36.23		1.03	100.00
3-fach-01	3-fach Isolierglas 4-:16-4-16-:44.2 - iplus 1.1 #2 und #5		72.66	52.74	43.08	32.08	26.44	12.89	3.76	8.20	0.57	100.00
3-fach-02	3-fach Isolierglas 4-16-:4-16-:44.2 - iplus 1.1 #3 und #5		72.66	54.78	43.01	32.87	26.23	7.41	8.55	8.17	0.57	100.00
3-fach-03	3-fach Isolierglas 4-16-:4-16-:4 - iplus 1.1 #3 und #5		73.93	54.91	46.39	32.99	31.96	7.41	8.57	4.64	0.57	100.00
3-fach-04	3-fach Isolierglas 8-:16-6-16-:55.2 - ipasol 50/27 #2 und #4		43.10	23.47	19.58	24.54	26.72	51.86	2.24	1.77	0.56	100.00
3-fach-05	3-fach Isolierglas 8-:16-6-16-:55.2 - ipasol 50/27 #2 und #5		43.10	23.88	19.60	24.56	26.17	51.89	1.22	2.73	0.56	100.00
3-fach-06	3-fach Isolierglas 8-:16-6-:16-55.2 - ipasol 70/37 #2 und #4		60.87	32.92	28.19	34.68	28.51	31.30	3.16	2.66	0.54	100.00
3-fach-07	3-fach Isolierglas 8-:10-6-10-8- - ipasol 70/37 #2 and Low-E#5 and RAL 9005 full frit #6		0.99	31.51	0.47	34.08	6.82	31.16	1.65	32.64	0.797	100

tv: Lichttransmissionsgrad
g: Gesamtenergiedurchlassgrad
te: direkter Strahlungstransmissionsgrad
pe: direkter Strahlungsreflexionsgrad außen
pe': direkter Strahlungsreflexionsgrad innen
ae_1: Absorption Scheibe 1
ae_2: Absorption Scheibe 2
ae_3: Absorption Scheibe 3
Ug: Wärmedurchgangskoeffizient

Abbildung 5-1: Relevante Isolierglasaufbauten und deren strahlungsphysikalische Eigenschaften (AGC Interpane).

Berechnung SommerGlobal

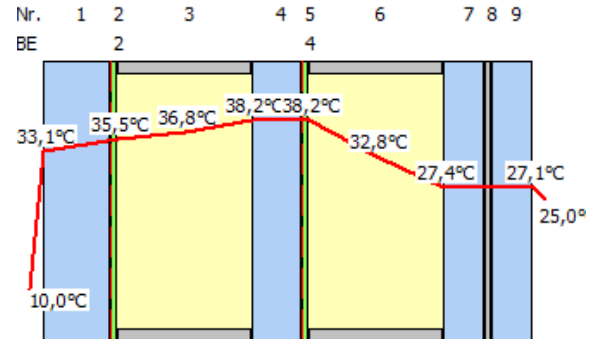
3-fach Isolierglas 8:-16-6-16-:55.2 ipasol 50/ 27 # 2 und iplus 1.1 # 5

Projekt: 3-fach-04

Position: 01

Schichtaufbau (von außen nach innen)

Nr.	BE	Bezeichnung	mm
1		Planibel Clearlite (aktualisiert 07.07.2017)	8,00
2	2	ipasol neutral 50/27 (εn=2%) (aktualisiert 07.07.2017)	16,00
3		Luft	6,00
4		Planibel Clearlite (aktualisiert 07.07.2017)	16,00
5	4	iplus 1.1 (εn=3%) (aktualisiert 12.11.2018)	5,00
6		Luft	0,38
7		Planibel Clearlite (aktualisiert 07.07.2017)	5,00
8		PVB-Folie (aktualisiert 08.05.2009)	5,00
9		Planibel Clearlite (aktualisiert 07.07.2017)	5,00
			56,38



Transmission, Reflexion, Absorption

$\rho_v = 0,0934$ (Lichtreflexionsgrad außen)

$T_{UV} = 0,0021$ (ultravioletter Transmissionsgrad)

$\rho'_v = 0,1417$ (Lichtreflexionsgrad innen)

$T_v = 0,4316$ (Lichttransmissionsgrad)

$\rho_e = 0,2454$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad außen)

$T_e = 0,1970$ (direkter Strahlungstransmissionsgrad)

$\rho'_e = 0,2810$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad innen)

$R_a = 90,97$ (allgemeiner Farbwiedergabeindex)

α_e 1 = 0,5186; 3 = 0,0224; 5 = 0,0165 (direkter Strahlungsabsorptionsgrad)

EN 410

SC = 0,2733 (Shading Coefficient, g/0,87)

$q_i = 0,0407$ (sekundäre Wärmeabgabe nach innen)

b-Faktor = 0,2972 (VDI 2078, g/0,80)

$g = 0,2378$ (Gesamtenergiedurchlassgrad)

EN 673 Einbauwinkel = 90° vertikal

$U_g = 0,7320 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Wärmedurchgangskoeffizient)
Korrigierter Emissionsgrad gemäß EN 12898:2019

EN ISO 52022-3 $T_e = 10,00 \text{ °C}$ $T_i = 25,00 \text{ °C}$

$E_s = 1100,0 \text{ W/m}^2$ Systemhöhe = 2,00 m

$g_{th} = 0,0126$ (Wärmestrahlungsfaktor)

$h_{c,e} = 20,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ $h_{c,i} = 13,20 \text{ W/m}^2\text{K}$

$g_c = 0,0348$ (Konvektionsfaktor)

$q_i = 0,0474$ (sekundäre Wärmeabgabe nach innen)

$g_v = 0,0000$ (Belüftungsfaktor)

$g_{tot} = 0,2444$ (Gesamtenergiedurchlassgrad)

$L^*a^*b^*,D$: 71,60; -8,28; 6,91 CIELAB (D65, 10°) Transmission

$L^*a^*b^*,Re$: 36,89; -4,86; -4,32 CIELAB (D65, 10°) Reflexion außen

$L^*a^*b^*,Ri$: 44,71; 0,60; -9,48 CIELAB (D65, 10°) Reflexion innen

$R_a,D(x; y)$: 91 (0,3108; 0,3512) Farbwiedergabe Transmission

$R_a,R(x; y)$: 84 (0,2829; 0,3147) Farbwiedergabe Reflexion

$R_i,D(1-8)$: 1=88,82;2=94,12;3=95,45;4=87,30;5=89,49;6=93,59;7=94,34;8=84,68; Farbwiedergabe Transmission Testfarben 1 - 8

$R_i,R(1-8)$: 1=84,74;2=95,98;3=78,37;4=77,75;5=86,73;6=92,53;7=85,22;8=73,62; Farbwiedergabe Reflexion Testfarben 1 - 8

SCSW: 0,2264 Short wave shading coefficient

LWSC: 0,0468 Long wave shading coefficient

VORSPANNEN: Dreifachaufbau und Mittelscheibe beschichtet. Absorption > 50%

Schwankungen der licht- und strahlungstechnischen Werte wegen chemischer Zusammensetzung von Glas und Herstellprozesses möglich. Funktionswerte berücksichtigen die zugelassenen Toleranzen entsprechend der Produktnormen. Das Rechenergebnis gibt keine Auskunft über die technische Ausführbarkeit des Aufbaus.

Wir weisen darauf hin, daß die Berechnungen auf Grundlage von Spektraldaten der Hersteller erstellt wurden. Die Firma Sommer Informatik GmbH übernimmt keine Haftung sowohl für die Vollständigkeit als auch für die Richtigkeit der Herstellerdaten. Für die Leistungserklärung sind die zur Verfügung gestellten Herstellerdaten gesondert zu bestätigen.

EN 410, EN 673, EN ISO 52022-3, EN 12898:2019

Abbildung 5-2: Beispielhafte Berechnung der strahlungsphysikalischen Eigenschaften des Isolierglasaufbaus 3-fach-04 (vgl. Abbildung 5-1) mit der Software WinSLT.

5.2 In der Praxis relevante BIPV-Aufbauten

Photovoltaikmodule können in unterschiedlichen Technologien hergestellt werden. Photovoltaikmodule können daher nach unterschiedlichen Kriterien kategorisiert oder katalogisiert werden. Häufige Kriterien sind z. B. die Art des verwendeten Halbleiters - direkter oder indirekter Halbleiter, die Dicke des Halbleiters - Dünnschicht oder kristallin (Dickschicht), etc. Ebenso häufig werden Photovoltaikmodule auch anhand des Modulaufbaus unterscheiden: Glas-Folien Module, Glas-Glas Module, flexible Folienmodule.

Die Art der Unterscheidung richtet sich daher häufig daran aus, welcher Unterschied für eine spezielle Fragestellung als relevant angesehen wird.

Für die Fragestellung dieses Forschungsprojektes, welche für BIPV-Anwendungen verwendeten Photovoltaikmodule durch lokale Verschattung hinsichtlich eines Glasbruches gefährdet sind, erscheint daher folgende Unterscheidung als oberste Kategorie sinnvoll (vgl. Abbildung 5-3):

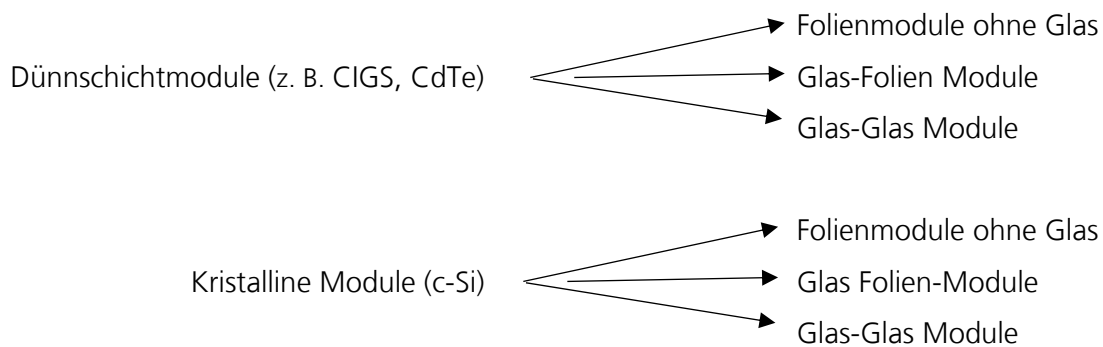


Abbildung 5-3: Unterscheidung für durch lokale Verschattung gefährdete BIPV-Module.

Von diesen verfügbaren sechs Modultypen haben sich drei sehr gebräuchliche Typen herauskristallisiert, die im Bereich BIPV vorrangig Verwendung finden.




Diese sind:

- Dünnschicht Glas-Glas-Module
- Kristalline Glas-Folien-Module
- Kristalline Glas-Glas-Module

5.2.1 Dünnschicht Glas-Glas Module

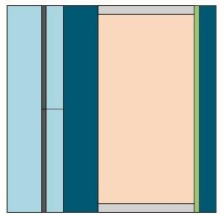
Die Kategorie Dünnschicht Glas-Glas-Module (vgl. Tabelle 5-1) lassen sich weiter unterteilen, ob der auf das Trägerglas aufgebrachte solaraktive Schichtstapel auf die der Sonne zugewandten Seite des Glases (sog. Superstrat- Aufbau) oder auf die der Sonne abgewandten Seite des Glases (sog. Substrat-Aufbau) aufgebracht wird.

Tabelle 5-1: Kategorisierung und Aufbau von Dünnschicht Glas-Glas-Modulen.

	Halbleiter	Typische Modulgröße	Typische Moduleffizienz	Typ. Anzahl Module / String (bei 1000 V Systemspannung)	Schnitt
Substrataufbau	CIGS	ca. 1 m ²	12-14 %	10	
Superstrataufbau	CdTe	ca. 2,4 m ²	17-19 %	4	
Superstrataufbau	a-Si	ca. 0,8 m ²	5,7 %	n/a	

Dünnschicht Glas-Glas-Module können zu Isolierglas weiterverarbeitet werden. Da CIGS- und CdTe-Module in der Regel nicht als transluzente Varianten hergestellt werden, weisen Dünnschicht-Isolierglasmodule meist die a-Si Technologie auf (vgl. Tabelle 5-2). Es sind Transparenzgrade von ca. 10 % bis 30% umsetzbar.


Tabelle 5-2: Aufbau eines Dünnschicht-Isolierglasmoduls mit a-Si Technologie.

	Halbleiter	Typische Modulgröße	Typische Moduleffizienz	Typ. Anzahl Module / String (bei 1000 V Systemspannung)	Schnitt
Superstrataufbau	a-Si	ca. 0,8 - 3,6 m ²	4 % (10 % Transparenz) 3,5 % (20 % Transparenz) 2,8 % (30 % Transparenz)	n/a	

5.2.2 Kristalline Glas-Folien Module

Kristalline Glas-Folien-Module werden in überwiegender Anzahl in festen Abmessungen und mit einer Zellanzahl von 120 oder 144 Zellen hergestellt (vgl. Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Aufbau eines kristallinen Glas-Folien-Moduls.



Halbleiter	Typische Modulgröße	Typische Moduleffizienz	Transparenz	Typ. Anzahl Module / String (bei 1000 V Systemspannung)	Schnitt
Si	ca. 1,8 m ²	19,5 %	0 %	18	

Kristalline Glas-Folien-Module lassen sich nicht zu Isolierglas weiterverarbeiten, da sich auf der rückseitigen Folie keine weiteren Gläser resp. Abstandshalter aufbringen lassen.

5.2.3 Kristalline Glas-Glas-Module

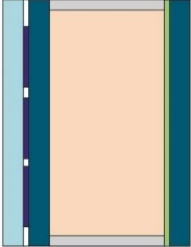
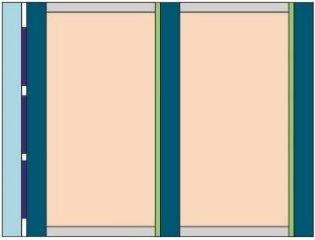
Kristalline Glas-Glas-Module werden in überwiegender Anzahl in festen Abmessungen und mit einer Zellanzahl von 120 oder 144 Zellen hergestellt (vgl. Tabelle 5-4). Darüber hinaus gibt es in geringem Umfang kundenspezifisch hergestellte Glas-Glas-Module, die hinsichtlich des prinzipiellen Modulaufbaus identisch zu den Modulen mit festen Abmessungen sind. Bei kundenspezifischen Modulen können im Gegensatz zu den Modulen mit fester Größe den Kundenwünschen entsprechend Parameter, wie z. B. die Glasgröße, das Glasformat, die Zellbelegung, die Glasdicke, die Zellanzahl, die Glasfarbe, eine Glasbedruckung oder auch die Art der Zellbelegung angepasst werden.

Tabelle 5-4: Aufbau eines kristallinen Glas-Glas-Moduls.

Halbleiter	Typische Modulgröße	Typische Moduleffizienz	Transparenz	Typ. Anzahl Module / String (bei 1000 V Systemspannung)	Schnitt
Si	ca. 1,8 m ²	19,5 %	7,4 %	18	
Si	0,5 - ca. 7 m ²	1,0 -19,5 %	7,4 %- 99 %	n/a	

Kristalline Glas-Glas-Module können zu Isolierglas weiterverarbeitet werden. Hier sind nahezu alle Glasaufbauten, die die Glasindustrie anbietet, möglich. In Tabelle 5-5 sind exemplarisch ein Zweifach- und ein Dreifach-Isolierglasaufbau dargestellt.

Tabelle 5-5: Aufbau eines kristallinen Glas-Glas-Moduls als Zweifach- und Dreifach-Isolierglas.

Halbleiter	Typische Modulgröße	Typische Moduleffizienz	Transparenz	Typ. Anzahl Module / String (bei 1000 V Systemspannung)	Schnitt
Si	0,5 - ca. 7 m ²	1,0 -19,5 %	7,4 %-99 %	n/a	
Si	0,5 - ca. 7 m ²	1 -19,5 %	7,4 %-99 %	n/a	

In diesem Projekt wurden weitergehend kristalline Glas-Glas-Module beispielhaft in einer vorgehängten hinterlüftete Fassade untersucht (vgl. Abschnitt 13).

6 Parametereingrenzung für numerische Simulationen

6.1 Untersuchungen zu Verglasungen

Für eine, in der numerischen Simulation überschaubare und handhabbare Festlegung der Parameteranzahl wurde eine Eingrenzung der in Abschnitt 4.2 vollständig dargestellten Parameter für thermisch induzierte Beanspruchung an Fassadenverglasungen durchgeführt. Hierdurch ergab sich eine neue und übersichtlichere Struktur für die Einflussgrößen bei Verglasungen. Diese Struktur - „Einflussfaktoren für Temperaturfeld und Temperaturgradient“ benannt - mit ihren jeweiligen Inhalten wird nachfolgend beschrieben.

Die wesentlichen Einflussfaktoren für das Temperaturfeld und den Temperaturgradienten bei Verglasungen können in vier Hauptgruppen gegliedert werden:

- Meteorologische Randbedingungen (Abs. 6.1.1)
- (Teil)Verschattung (Abs. 6.1.2)
- Glaskonstruktion, Verglasung (Glasaufbau und Befestigung bzw. Rahmen) (Abs. 6.1.3)
- Verhältnisse auf der Innen-/Raumseite (Abs. 6.1.4)

In den vorgenannten Hauptgruppen ist dabei jeweils zwischen stationären bzw. konstanten (d. h. zeitlich unabhängigen) und transienten (d. h. zeitlich abhängigen) Faktoren zu unterscheiden. In Abschnitt 6.1.5 sind die Einflussfaktoren gelistet, die im Forschungsprojekt mit den numerischen Parameterstudien eingehender betrachtet bzw. untersucht wurden.

6.1.1 Einfluss von meteorologischen Randbedingungen

Für die detaillierte Abhandlung wird auf Abschnitt 7 verwiesen.

Zu erfassen sind als konstante Faktoren der geographische Standort nach Längen- und Breitengrad und die geodätische Höhe (ü.N.N.). Außerdem wird für die Einstrahlung die Himmelsrichtung unterschieden. In diesem Projekt wurden insgesamt acht Orientierungen in 45°-Schritten beginnend bei Nord (0°) betrachtet.

Als transiente Faktoren gelten hier die direkte und diffuse Einstrahlungsintensität und der Sonneneinstrahlungswinkel, umgewandelt auf die Vertikale, und die Außenlufttemperatur. Zusätzlich dazu sind der äußere Wärmeübergangskoeffizient, der von der Strahlungstemperatur der Umgebung und der natürlichen Konvektion (infolge Winds) abhängt sowie die Albedo (d. h. das Maß für die Reflektion der einfallenden Sonnenstrahlung durch die Umgebung, z. B. Schneeoberfläche, Wiese) zu nennen.

Es wurden Datensätze von Strahlungs- und Außenlufttemperaturwerten erstellt, welche die meteorologischen Bedingungen, bei denen hohe thermische Beanspruchungen zu erwarten sind, wiedergeben. Die Datensätze decken die Region Deutschland mit einem feinen Netz (Rasterweite 0,75°, bezogen auf den Längen- bzw. Breitengrad) ab.

6.1.2 Einfluss einer (Teil)Verschattung

Für die detaillierte Abhandlung wird auf Abschnitt 11.3 verwiesen.

Im Folgenden wird der Begriff „Verschattung“ synonym mit „Teilverschattung“ verwendet.

Die Verschattung (eigentlich einordbar als „keine“ Bestrahlung) lässt sich als ein gemischter transienter und stationärer Zustand beschreiben. Wesentlich dabei ist hier die Verschattungsintensität (Unterscheidung zwischen Vollabdeckung, z. B. hervorgerufen durch einen Raffstore oder auch eine Teilabdeckung, z. B. hervorgerufen durch einen Dachüberstand). Des Weiteren sind die Dauer und die Geometrie der Verschattung hinsichtlich der Fassadenverglasung zu unterscheiden. Daneben existiert die unplanmäßige Abkühlung der Glasoberfläche beispielsweise mit einem Wasserschlauch (Reinigung von Verglasungen), was im Rahmen des Forschungsprojekts jedoch nicht weiter untersucht wurden.

6.1.3 Einfluss von der Glaskonstruktion bzw. Verglasung (Glasaufbau inkl. Rahmen)

Für die detaillierte Abhandlung wird auf die Abschnitte 11.2.1 und 11.4 verwiesen.

Das zeitlich konstante Parameterfeld beinhaltet den Einbauwinkel (Neigungswinkel) und die Einbauhöhe der Verglasung am Gebäude.

Dazu kommen die thermischen Eigenschaften (spezifische Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit) der Bestandteile der Verglasung (Isolierglaseinheit, Abstandhalter am Isolierglasrand und Rahmenkonstruktion).

Hinsichtlich des in die Rahmenkonstruktion eingebauten Mehrscheiben-Isolierglases sind die licht- und strahlungsphysikalischen Eigenschaften - Absorption, Transmission und Reflektion - zu nennen.

Die Einbindetiefe des Glases in den Rahmen bzw. die Rahmenabdeckung im Bereich der Glaskante stellt ebenfalls einen konstanten Parameter dar.

Auf der anderen Seite steht als transienter Einflussfaktor die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum (Konvektion und Wärmestrahlung), die sich, bedingt durch die sich ändernden Glastemperaturen infolge solarer Einstrahlung, mit der Zeit ebenfalls ändert. Die Wärmeübertragung infolge Konvektion wird dabei z. B. durch die Dicke des Scheibenzwischenraums und die wärmetechnischen Eigenschaften des Füllgases beeinflusst, während die Wärmeübertragung infolge Wärmestrahlung u. a. durch den Emissionsgrad der zum Scheibenzwischenraum hin orientierten Glasoberflächen beeinflusst wird.

Je nach Einbausituation ist bei den transienten Einflussparametern ggf. ein „thermisches Hindernis“ oder ein vorhandener Wärmestau - z. B. großflächige, voreinander geschobene Schiebetüren - zu berücksichtigen.

6.1.4 Einfluss der Verhältnisse auf der Innen-/Raumseite

Für die detaillierte Abhandlung wird auf Abschnitt 11.5 verwiesen.

Das Raumvolumen stellt einen konstanten Parameter dar.

Als transiente oder zeitlich veränderliche Faktoren sind die Raumtemperatur (abhängig vom Raumvolumen), der innere Wärmeübergangskoeffizient, je nach Einbausituation ggf. ein „thermisches Hindernis“ oder ein vorhandener Wärmestau - z. B. ein schwarzes Sofa, Plissee, schwerer Vorhang - und, falls vorhanden, die Belüftung der Glasinnenoberfläche, eine zusätzliche Wärmequelle (z. B. Heizkörper) oder Kühlung (z. B. Klimagerät, Lüftungsschlitze) zu nennen.

6.1.5 Auswahl und Festlegung für FE-Parameterstudien

In Bezug zu den in den Abschnitten 6.1.1 bis 6.1.4 beschriebenen Einflussgrößen wurden für die Parameterstudien mittels der FEM folgende Einflussgrößen zur Untersuchung festgelegt und variiert.

Generelle Modellierungsparameter:

- Solare Einstrahlung auf der Außenseite der Verglasung (Rahmenleibungen etc.)
- Stationäre vs. transiente Berechnung
- Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum
- Zeitschrittweite
- Thermisch äquivalente Rahmen (Holz und Aluminium)

Meteorologische Randbedingungen:

- Datenbasis: Messdaten DWD vs. Clearsky-Wettermodell
- Solare Einstrahlung und Außenlufttemperatur
- Äußerer Wärmeübergangskoeffizient
- Spontan entstehende solare Einstrahlung

(Teil)Verschattung:

- Verschiedene Verschattungsgeometrien
- Spontan entstehender unveränderliche Teilverschattung
- Zeitlich variable/bewegliche Verschattung

Glaskonstruktion bzw. Verglasung (Glasaufbau inkl. Rahmen):

- Verschiedene Beschichtungsoptionen (bei Sonnenschutz- und Wärmedämmgläsern) mit Hilfe abstrahierter Verglasungen (Option 1, 2 und 3, siehe Abschnitt 11.2.1)
- Zeitgemäße Holz- und Aluminiumrahmen sowie SSG-Verglasung
- Variation der thermischen Rahmeneigenschaften (Holz)
- Rahmenfarbe (hell und dunkel)
- Variation der Wärmeleitfähigkeit der Abstandhaltersysteme
- Dicke der Gläser
- Wärmeleitung Glas (isotrop, orthotrop) als Vergleich zur französischen Norm
- Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum

Verhältnisse auf der Innen-/Raumseite:

- Randbedingungen auf äußerer und innerer Seite identisch (Bauzustand)
- Wärmedämmglas mit dunklem innenliegenden Sichtschutz

6.2 Untersuchungen zu BIPV-Modulen

Analog zu Abschnitt 6.1 wurde für eine, in der numerischen Simulation überschaubare und handhabbare Festlegung der Parameteranzahl eine Eingrenzung der in Abschnitt 4.4 vollständig dargestellten Parameter für thermisch induzierte Beanspruchungen an BIPV-Modulen durchgeführt. Hierdurch ergab sich eine neue und übersichtlichere Struktur an Einflussgrößen für PV-Anlagen. Diese Struktur - „Einflussfaktoren für Temperaturfeld und Temperaturgradient“ benannt - mit ihren jeweiligen Inhalten wird nachfolgend beschrieben.

Die wesentlichen Einflussfaktoren für das Temperaturfeld und den Temperaturgradienten bei BIPV-Anwendungen können in fünf Hauptgruppen gegliedert werden:

- Meteorologische Randbedingungen (Abs. 6.2.1)
- (Teil)Verschattung (Abs. 6.2.2)
- Moduldesign/Glaskonstruktion (Abs. 6.2.3)
- Einbausituation (Abs. 6.2.4)
- Betriebszustand (Abs. 6.2.5)

In den vorgenannten Hauptgruppen ist dabei jeweils zwischen stationären bzw. konstanten (d. h. zeitlich unabhängigen) und transienten (d. h. zeitlich abhängigen Faktoren) zu unterscheiden. In Abschnitt 6.2.6 sind die Einflussfaktoren gelistet, die im Forschungsprojekt mit den numerischen Parameterstudien eingehender betrachtet bzw. untersucht wurden.

6.2.1 Einfluss von meteorologischen Randbedingungen

Siehe dazu Abschnitt 6.1.1 und Abschnitt 13.1.

6.2.2 Einfluss einer (Teil)Verschattung

Siehe dazu Abschnitt 6.1.2 und Abschnitt 13.7

6.2.3 Einfluss von Befestigungskonstruktion und Moduldesign

Für die detaillierte Abhandlung wird auf die Abschnitte 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 13.6 und 13.8 verwiesen.

Das zeitlich konstante Parameterfeld beinhaltet den Einbauwinkel (Neigungswinkel) und die Einbauhöhe der BIPV-Anlage am Gebäude.

Dazu kommen die thermische Trägheit der eingesetzten Materialien in Bezug auf ihre Dicke, Oberflächengröße und spezifische Wärmekapazität sowie die Dichte und deren Wärmeleitfähigkeit.

Hinsichtlich des in die Befestigungskonstruktion eingebauten BIPV-Moduls sind die licht- und strahlungsphysikalischen Eigenschaften - Absorption, Transmission und Reflektion - zu definieren.

Die Einbindetiefe des Moduls in den Rahmen bzw. die Rahmenabdeckung, falls vorhanden, im Bereich der Glaskante stellt ebenfalls einen konstanten Parameter dar. Dieses hat Auswirkungen auf den Wärmedurchgangskoeffizienten (U -Wert) des BIPV-Moduls (Modul plus Rahmen).

Bei Modulen ist bzgl. der Zelltechnologie zwischen kristallinen Siliziumzellen oder der Dünnschichttechnologie zu unterscheiden (Abschnitt 13.8). Dieses hat somit Auswirkung auf die Schichtstapel, Materialdicken von Deckgläsern (Abschnitt 13.6), Einkapselungsfolien, den Modultransparenzgrad – bedingt durch den Zellbelegungsgrad (Abschnitt 13.4) bzw. Zellabstand untereinander - und ist damit wiederum entscheidend für die Absorptionseigenschaften (Aufheizung) des Moduls. Außerdem sind hierfür sowohl das Zelldesign (z. B. Voll-/Halbzelle) als auch die Zellverschaltung (seriell/parallel) relevant.

Als weiterer Einflussfaktor auf das Temperaturfeld und den Temperaturgradienten bei BIPV-Modulen ist die Herstellqualität zu nennen, d. h. sind (bereits) etwaige Bauteilfehler (z. B. Diode) und/oder Produktionsfehler (z. B. Lötfehler) vorhanden.

Je nach Einbausituation sind bei den transienten Einflussparametern ggf. ein „thermisches Hindernis“ oder ein vorhandener Wärmestau zu berücksichtigen.

6.2.4 Einfluss durch die Einbausituation (Hintergrund/Raum)

Für BIPV-Anwendungen ist hierbei beispielsweise zu unterscheiden zwischen Modulen, die in einer Isolierglaseinheit als Außenscheibe angeordnet sind, oder Modulen, die in einer vorgehängten hinterlüfteten Außenwandbekleidung (VHF) verbaut sind. Letztere Einbausituation bildet den Schwerpunkt in den FE-Analysen, die in Abschnitt 13 detailliert abgehandelt werden.

Für die Parameter zur Beschreibung der Verhältnisse auf der Innen-/Raumseite bei PV-Modulen in Isolierglasscheiben wird auf Abschnitt 6.1.4 verwiesen.

Für PV-Module als VHF benötigt es eine genaue Beschreibung des Abstandes zur Fassade, dem Temperaturunterschied zur Umgebungstemperatur und des Luftstroms, um den resultierenden Wärmeübergang des PV-Modul zu bestimmen.

6.2.5 Einfluss des Betriebszustandes

Für eine genaue Ermittlung von Temperaturfeld und Temperaturgradient ist bei PV-Modulen der Betriebszustand festzulegen. Hierbei ist zwischen zwei transienten Faktoren zu unterscheiden:

- a) Der fehlerfreie Betrieb mit einem unverschatteten Modul - mit inaktive(n) Bypassdiode(n) - und mit verschatteten Modulbereich(en) - mit aktive(n) Bypassdiode(n).
- b) Der Fehlerfall mit Hotspots durch Teilverschattung und defekte(n) Bypassdiode(n) oder Hotspots/Lichtbögen infolge schlechter/offener Lötstellen.

Im Rahmen der FE-Analysen in diesem Projekt (vgl. Abschnitt 13) wurde der fehlerfreie Betriebszustand im maximalen Arbeitspunkt (MPP) und in Leerlaufspannung (OC) untersucht.

6.2.6 Auswahl und Festlegung für FE-Parameterstudien

In Bezug zu den in den Abschnitten 6.2.1 bis 6.2.5 beschriebenen Einflussgrößen wurden für die Parameterstudien mittels der FEM folgende Einflussgrößen zur Untersuchung festgelegt und variiert.

Meteorologische Randbedingungen:

- Warmer und kalter Tag mit hoher Einstrahlung für einen Süd Azimut
- Äußerer Wärmeübergangskoeffizient
- Spontan entstehende solare Einstrahlung

(Teil)Verschattung:

- Verschiedene Verschattungsgeometrien

Moduldesign und Befestigungskonstruktion (Modulaufbau, Zelldesign und Befestigung bzw. Rahmen):

- Rahmen
- Belegungsgrad mit Solarzellen
- Randabstand der Zellen zur Modulkante
- Glasdicke
- Unterschied von kristallinem Silizium zu Dünnschicht

Betriebszustände:

- Maximaler Arbeitspunkt (MPP)
- Leerlaufspannung (OC)

Generelle Modellierungsparameter:

- Stationäre vs. transiente Berechnung
- Kamineffekt und Temperatur im Spalt zwischen PV-Modul und Fassade

7 Meteorologische Randbedingungen

7.1 Einleitung und Überblick

Meteorologische Bedingungen, im Besonderen die solare Einstrahlung und die Außenlufttemperatur bestimmen wesentlich die in Gläsern auftretende thermisch induzierte Spannung. Um thermisch induzierten Glasbruch zu verhindern, ist es somit von großer Bedeutung die Extrembedingungen von Strahlung und Temperatur, welchen die Gläser ausgesetzt sind und standhalten sollen, standortbezogen zu ermitteln.

Prinzipiell steigt die thermisch induzierte Spannung mit steigender Einstrahlung, während in Bezug auf die Außenlufttemperatur sowohl besonders hohe als auch besonders niedrige Werte relevant werden können. Da Einstrahlung und Temperatur meteorologisch gekoppelte Größen sind, weisen die auftretenden Werte Korrelationen auf, die nicht vernachlässigt werden sollten. Ziel war es daher, die auftretenden Extremwerte für Strahlung und Temperatur nicht separat, sondern als Wertepaar zu ermitteln.

Insbesondere Extremwerte von Strahlung und Außenlufttemperatur können unter besonderen Umständen zu hohen Glasbeanspruchungen in Form von thermisch induzierten Spannungen führen. Extremwerte zu ermitteln, erfordert eine Datengrundlage in der auch Extremwerte enthalten sind. Aus diesem Grund sind Daten wie Typische Meteorologische Jahre (TMYs), welche typische, somit eher mittlere Bedingungen abbilden und deren Algorithmus zur Erzeugung oft unbekannt ist, hier als Datengrundlage nicht geeignet gewesen. Auf die Nutzung von Programmen, wie z. B. Meteororm wurde verzichtet, da aus Gründen der Transparenz und der weiteren Nutzbarkeit in diesem Projekt frei verfügbare Daten zum Einsatz kommen sollten. Auch Anbieter frei verfügbarer Strahlungsdatenprodukte, wie z. B. PVGIS, stellten nicht die für dieses Projekt relevanten Daten direkt zur Verfügung. Denn in diesem Projekt bzw. für die thermische Beanspruchung von Gläsern relevant ist Clearsky-Strahlung mit hoher Intensität, also bei geringer atmosphärischer Trübung, in hoher zeitlicher Auflösung (10 Minuten) und als Rasterdatensatz, der ganz Deutschland umfasst. Ein derartiger Datensatz kann so nicht direkt über beispielsweise Meteororm oder PVGIS bezogen werden. Um die Extrembedingungen für thermische Belastung von Gläsern transparent zu ermitteln, wurden daher als Datengrundlage frei verfügbare historische meteorologische Rohdaten (gemessen und modelliert) über einen Zeitraum von 11 Jahren (2010 - 2020) gewählt. Die Betrachtung der solaren Einstrahlung wurde auf Strahlung bei unbewölktem Himmel - die sogenannte 'Clearsky-Strahlung' - beschränkt, da diese der stärksten Einstrahlung über längere Zeiträume und somit auch einer sehr hohen thermisch induzierten Spannung entspricht. Die Einstrahlung wurde des Weiteren auf vertikale Flächen verschiedener Orientierung umgerechnet, um typische Vertikalfassaden abzubilden.

In den folgenden Abschnitten wird eine Methodik erläutert, mit der aus historischen Daten der Region Deutschland zunächst Datensätze von Extremwerten von Strahlung und Temperatur erstellt wurden. Aus diesen Datensätzen wurden dann wiederum die für die thermisch induzierte Spannung besonders kritischen Wertekombinationen ermittelt und extrahiert. Aus dieser Vorgehensweise resultierten schlussendlich Karten für Deutschland, welche für Vertikalflächen verschiedener Ausrichtung die meteorologischen Bedingungen beschreiben, welche zu thermomechanischen Extrembeanspruchungen bei Isolierglaseinheiten und BIPV-Modulen führen.

7.2 Eingangsdaten

Dieser Abschnitt beschreibt die meteorologischen Rohdatensätze, aus welchen die für dieses Projekt relevanten Strahlungs- und Temperaturdatensätze erstellt wurden.

7.2.1 Atmosphärische Daten

Solare Einstrahlung für unbewölkten Himmel ('Clearsky-Strahlung') ist wesentlich abhängig von der Sonne-Erde-Geometrie und kann für beliebige Zeitpunkte mit Hilfe eines Clearsky-Modells berechnet werden, welches diese geometrischen Zusammenhänge implementiert. Zusätzlich wird die Clearsky-Strahlung durch den Trübungszustand der Atmosphäre beeinflusst, welcher zeitabhängig und irregulär variabel ist. Das hier verwendete Clearsky-Modell 'Simplified Solis' aus [36] berücksichtigt eine Trübung durch zwei atmosphärische Parameter, nämlich Wasserdampf (water vapor, WV) und optische Dicke von Aerosolen (aerosol optical depth, AOD) bei einer Wellenlänge von 700 nm.

Historische Daten bzgl. WV und AOD, welche die Region Deutschland abdecken, können aus einer atmosphärischen Reanalyse gewonnen werden. Dies ist ein numerisches Modell, welches an Messdaten angepasst wurde, um atmosphärische Bedingungen großflächig und in einer regulären räumlichen Auflösung bestmöglich wiederzugeben. Als Basis für das weitere Vorgehen wurde hier der atmosphärische Reanalyse-Datensatz EAC4 aus [37] mit folgenden Eckdaten verwendet:

- Region: Deutschland
- Räumliche Auflösung: 0,75° lat/lon
- Zeitraum: 11 Jahre, 2010 - 2020
- Zeitliche Auflösung: 3 h
- Parameter: WV, AOD@670 nm

7.2.2 Temperaturdaten

Historische Daten der Lufttemperatur für die Region Deutschland können ebenfalls aus einem Reanalyse-Datensatz gewonnen werden. Als Basis für das weitere Vorgehen wurde hier die Lufttemperatur in 2 m Höhe aus dem Reanalyse-Datensatz ERA5 aus [32] mit folgenden Eckdaten genutzt:

- Region: Deutschland
- Räumliche Auflösung: 0,25° lat/lon (später in Abschnitt 7.4 auf 0,75° lat/lon umgerechnet)
- Zeitraum: 11 Jahre, 2010 - 2020
- Zeitliche Auflösung: 1 h
- Parameter: Temperatur (2 m)

7.3 Berechnung der Einstrahlung

Wie bereits in Abschnitt 7.2.1 beschrieben, kann solare Einstrahlung für den unbewölkten Himmel ('Clearsky-Strahlung') mit Hilfe eines Clearsky-Modells berechnet werden. Die Clearsky-Strahlung hängt neben geometrischen Aspekten des Sonne-Erde-Systems auch vom Trübungszustand der Erdatmosphäre ab, welcher zeitlich variabel ist und, je nach Modell, durch verschiedene Parameter beschrieben werden kann. Zur Berechnung der Einstrahlung wurde das Clearsky-Modell 'Simplified Solis' [36] genutzt, welches die Trübung durch zwei atmosphärische Parameter: Wasserdampf (water vapor, WV) und optische Dicke von Aerosolen (aerosol optical depth, AOD) berücksichtigt. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Vorgehensweise zur Erstellung von Strahlungszeitreihen, von der Verarbeitung der Rohdaten der atmosphärischen Parameter WV und AOD, bis hin zur Berechnung der Einstrahlung auf vertikale Flächen verschiedener Orientierung.

7.3.1 Datensatz von Zuständen geringer atmosphärischer Trübung

Um mit Hilfe des Solis-Modells Clearsky-Strahlungsverläufe zu erzeugen, müssen zunächst die atmosphärischen Eingangsparameter WV und AOD festgelegt werden. Weil die thermisch induzierten Spannungen im Glas mit steigender solarer Einstrahlung ebenfalls ansteigen, sind eine hohe Einstrahlung bzw. geringe atmosphärische Trübung relevant. Dies bedeutet, dass zur Erzeugung relevanter Einstrahlung die beiden Parameter WV und AOD niedrig angesetzt werden sollten.

Zunächst wurde der in Abschnitt 7.2.1 beschriebene Rohdatensatz der Größen WV und AOD betrachtet. Das Clearsky-Modell Simplified Solis benötigt prinzipiell als Eingangsparameter eine optische Dicke der Aerosole bei einer Wellenlänge von 700 nm. Diese ist im Reanalyse-Datensatz EAC4 nicht verfügbar, daher wurden die nächstliegenden verfügbaren Werte bei 670 nm genutzt. WV und AOD zeigen Variabilität auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen. Dominierend ist bei beiden Parametern ein saisonaler Verlauf, mit zusätzlichen Fluktuationen auf größeren (verschiedene Jahre) und kleineren (Tage, Stunden) Skalen. Um den saisonalen Verlauf zu berücksichtigen, wurde zur Festlegung von WV und AOD der folgende zeitabhängige, monatliche Ansatz gewählt: Für jeden Monat wurde die gemeinsame Verteilung von WV und AOD dieses Monats der letzten 11 Jahren betrachtet. Die Werte für WV und AOD wurden dann derart gewählt, dass die Auftrittswahrscheinlichkeit von Zuständen mit niedrigeren Werten von AOD und WV 2 % betrug. Jedem der Monatswerte von AOD und WV wurde ein Zeitstempel des 15. Tags des Monats zugeordnet. Diese Werte wurden anschließend zeitlich linear interpoliert, um Zeitreihen von einem Jahr abzubilden, welche dann für die Berechnung der Clearsky-Strahlungszeitreihen genutzt werden konnten (siehe Abschnitt 7.3.2).

7.3.2 Modell für Clearsky-Strahlung

Die solare Einstrahlung für den unbewölkten Himmel (Clearsky-Strahlung) wurde mit Hilfe der Open-Source-Implementierung in PVLIB [33] des Modells 'Simplified Solis' [36] berechnet. Dieses Modell benötigt folgende Eingangsparameter: Sonnenstand, optische Dicke der Aerosole bei 700 nm (AOD), Wasserdampf (WV), atmosphärischer Druck und extraterrestrische Einstrahlung. Die Information zur Höhe des Standorts geht implizit über den Sonnenstand und den Druck in die Berechnung mit ein. Für AOD und WV kamen die aus dem EAC4 Datensatz bestimmten, monatliche Werte zum Einsatz (siehe Abschnitt 7.3.1). Es können sowohl die Globalhorizontalstrahlung (GHI) als auch die beiden Strahlungskomponenten Diffushorizontalstrahlung (DHI) und Direktnormalstrahlung (DNI) durch das Solis-Modell berechnet werden. Diffus- und Direktkomponente der Strahlung bilden die Grundlage zur Umrechnung der Strahlung auf geneigte Flächen (siehe Abschnitt 7.3.3). Die hier verwendete Implementierung des Solis-Modells erzeugt Instantanwerte für gegebene Zeitstempel, daher wurden zunächst Zeitreihen von einer Minute Auflösung generiert, welche dann zur weiteren Verwendung auf eine Auflösung von 10 Minuten gemittelt wurden. Abbildung 7-1 zeigt Beispiele der erzeugten Strahlungszeitreihen in 10-Minuten-Auflösung für drei verschiedene Tage an einem exemplarischen Standort in der Nähe der Stadt Saarbrücken (49° nördliche Breite, 7° östliche Länge).

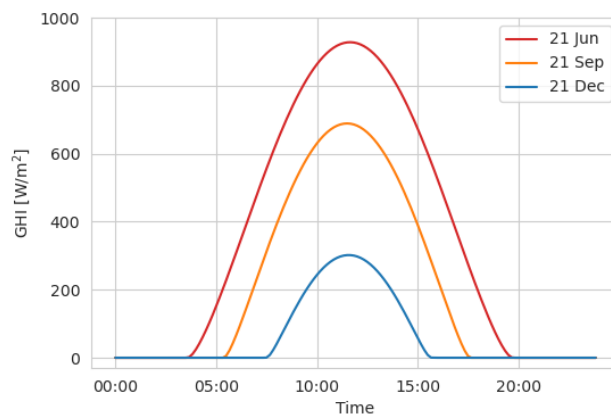


Abbildung 7-1: Globalhorizontalstrahlung (GHI) berechnet durch das Solis-Modell für drei exemplarische Tage an einem Standort bei 49° nördlicher Breite und 7° östlicher Länge.

Um die Qualität der berechneten Strahlungsdaten in Bezug auf reale Einstrahlung sicherzustellen, wurde ein Vergleich der berechneten GHI-Werte mit Strahlungsdaten von 18 Messstationen des DWD (Deutscher Wetterdienst) [8] durchgeführt. Diesen Vergleich zeigt Abbildung 7-2. Hier ist die berechnete Clearsky-Strahlung in Relation zur gemessenen Einstrahlung, welche auch Situationen mit Bewölkung enthält, aufgetragen. Würden berechnete und gemessene Strahlung gänzlich übereinstimmen, wäre im dargestellten Diagramm nur die Diagonale (gestrichelte Linie) mit Daten besetzt. Weil in den gemessenen Daten auch Bewölkungssituationen enthalten sind, zeigt sich im Diagramm stattdessen ein dreieckiger Bereich oberhalb der Diagonalen, bei dem die gemessene Strahlung niedriger als die berechnete Strahlung ist, sowie ein Bereich unterhalb der Diagonalen, der zeigt, wenn die gemessene Strahlung höher als die berechnete Strahlung ist. Der besetzte Bereich unterhalb der Diagonalen kann durch Situationen sehr geringer atmosphärischer Trübung sowie Überstrahlungseffekte durch Streuung oder Beugung des Lichts an Wolken hervorgerufen werden. Eine Übereinstimmung der modellierten Strahlungswerte mit den Messungen ist an der deutlichen Häufung der Daten um die Diagonale herum zu erkennen. Dieser stark besetzte Bereich entsteht, da Clearsky-Situationen in Messwerten gehäuft auftreten. Stimmt der Verlauf der diagonalen Häufung mit dem Verlauf der Diagonalen des Diagramms überein, zeigt dies die Übereinstimmung der modellierten Daten mit realer (gemessener) Einstrahlung.

Um eine für eine hohe thermische Beanspruchung (bzw. hohes Glasbruchrisiko) relevante Einstrahlung zu erzeugen, wurden, wie in Abschnitt 7.3.1 beschrieben, die atmosphärischen Parameter WV und AOD des Clearsky-Modells einer geringen Trübung entsprechend angesetzt. Daraus resultiert, wie erkennbar in Abbildung 7-2, dass die diagonale Häufung - wie für dieses Projekt beabsichtigt - tendenziell leicht oberhalb

der Diagonalen des Diagramms zu liegen kommt. Insgesamt liegen damit ca. 87% der betrachteten Datenpunkte (Zeitreihen der Jahre 2010 bis 2020 für 18 Standorte der Messstationen) oberhalb der Diagonalen und werden somit durch die Modellierung abgedeckt.

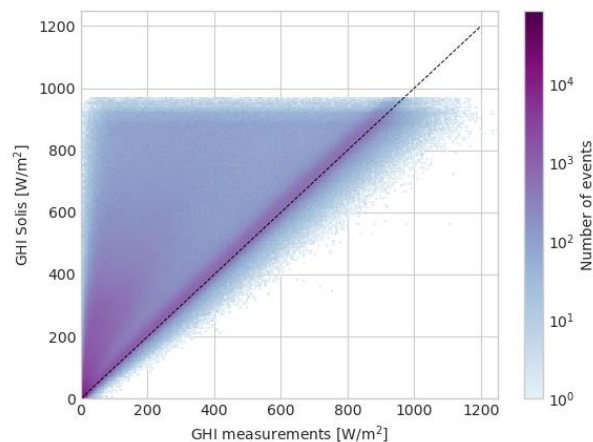
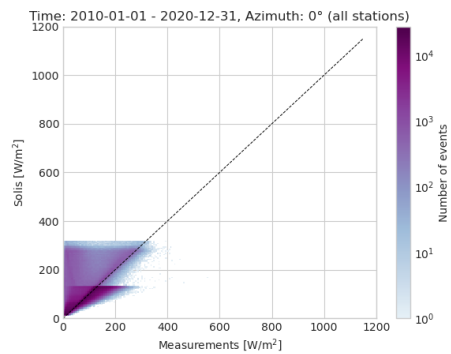


Abbildung 7-2: Globalhorizontalstrahlung (GHI) berechnet durch das Solis-Modell aufgetragen gegen Strahlungsmesswerte von 18 DWD-Stationen über einen Zeitraum von 11 Jahren in einer Zeitauflösung von 10 Minuten.

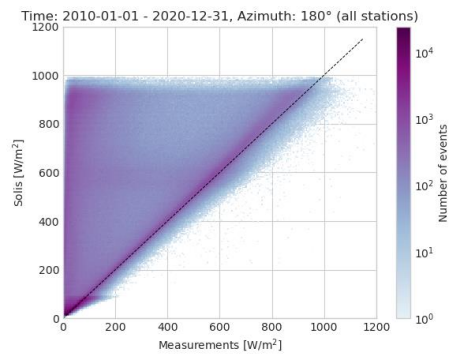
7.3.3 Umrechnung der Einstrahlung auf geneigte Flächen (Transposition)

Die Clearsky-Strahlung, welche mit dem Solis-Modell erzeugt wurde, wurde anschließend auf unterschiedliche Flächen mit einer Neigung von 90° (vertikale Fläche) und acht verschiedenen Orientierungen mit Azimutwinkeln von 0° bis 270° in Schritten von 45° umgerechnet, um die solare Einstrahlung auf verschiedene Vertikalfassaden abzubilden. Die Winkelangaben beziehen sich dabei auf den Nordazimut (Nord = 0° , Ost = 90° , Süd = 180° , West = 270°). Bei diesem auch als Transposition bezeichneten Prozess wurde zur Umrechnung der Himmeldiffusstrahlung das Perez-Modell aus [41] angewendet und bei der Berechnung der Bodendiffusstrahlung eine Albedo von 0,2 angenommen. Eine Validierung der transponierten Clearsky-Strahlung des Solis-Modells mit ebenfalls transponierten Strahlungsmesswerten von 18 DWD-Stationen ist in Abbildung 7-3 dargestellt. Auch hier zeigt sich wieder, dass das gehäufte Auftreten von Clearsky-Situationen in den Messwerten einen stark besetzten Bereich in den Diagrammen hervorruft, welcher sich jeweils diagonal durch die Diagramme zieht. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der Solis-Clearsky-Werte mit den Messwerten zu erkennen, da die diagonalen Häufungen sehr gut mit den Diagonalen der Diagramme (gestrichelte Linien) übereinstimmen. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt und mit dem Modellansatz der geringen atmosphärischen Trübung bzw. hohen thermischen Beanspruchung beabsichtigt, kommen die stark besetzten Bereiche auch hier wieder tendenziell etwas oberhalb der Diagonalen zu liegen, so dass für die große Mehrheit der Fälle die berechnete Einstrahlung über der gemessenen Einstrahlung liegt. Es wird somit eine gute Abdeckung der Situationen hoher Einstrahlung durch die Modellierung erreicht.

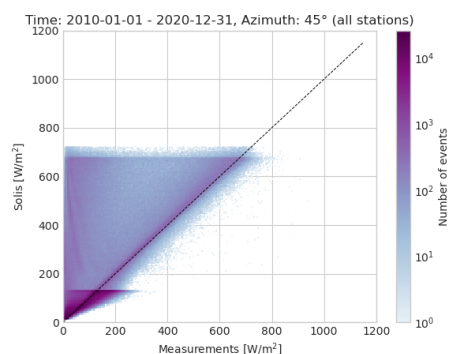
Im Gegensatz zur Betrachtung von Clearsky-Strahlung auf horizontale Flächen (GHI) können für geneigte Flächen selbst bei Clearsky-Bedingungen Situationen auftreten, in denen keine Direktstrahlung, sondern nur Diffusstrahlung auf die Fläche trifft. Diese Situationen sind in den Diagrammen von Abbildung 7-3 als stärker besetzte dreieckige Bereiche bei niedrigen Strahlungsniveaus identifizierbar. Hier stimmen Messwerte und Modell weniger gut überein, was jedoch aufgrund der geringen Strahlungsniveaus für Situationen starker thermischer Belastung nicht relevant wird.



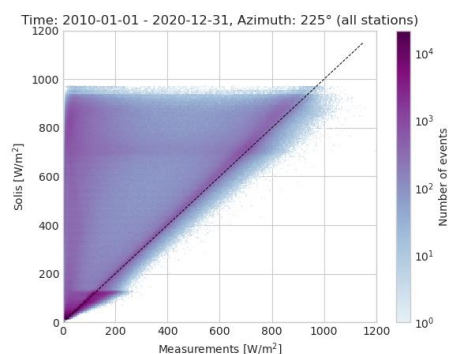
Nord



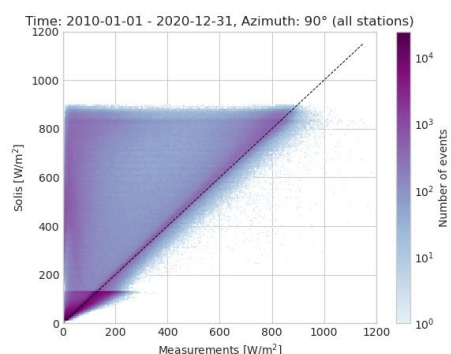
Süd



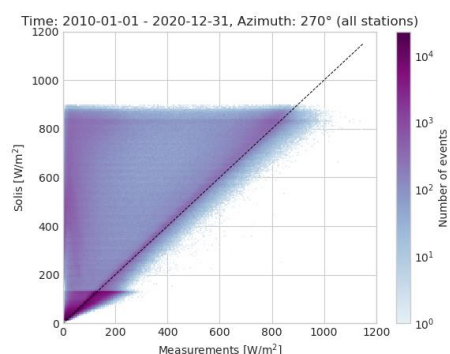
Nord-Ost



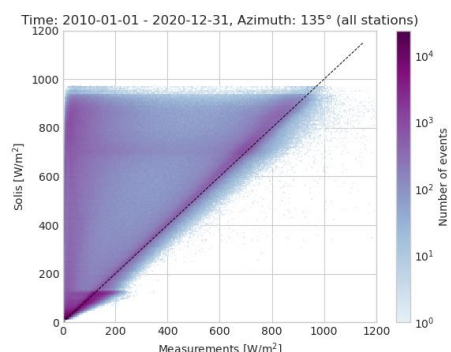
Süd-West



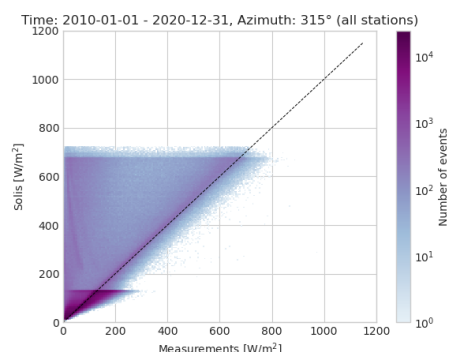
Ost



West



Süd-Ost



Nord-West

Abbildung 7-3: Transponierte Clearsky-Strahlung des Solis-Modells für 8 Orientierungen aufgetragen gegen transponierte Strahlungsmesswerte von 18 DWD-Stationen über einen Zeitraum von 11 Jahren in einer Zeitauflösung von 10 Minuten.

7.4 Datensatz von Extremtemperaturen

Neben dem Datensatz der Einstrahlung wird auch ein Datensatz der für thermische Beanspruchung relevanten Außenlufttemperaturen benötigt. Die thermische Beanspruchung von Glas kann, je nachdem, ob es sich um eine Außenscheibe oder Innenscheibe handelt, mit zunehmender oder abnehmender Temperatur ansteigen. Daher sind sowohl maximale als auch minimale Werte der Temperatur relevant. Ein Datensatz von Temperaturextremwerten wurde wie folgt erstellt:

Ausgangspunkt bildeten Temperaturzeitreihen des in Abschnitt 7.2.2 beschriebenen ERA5 Datensatzes. Die räumliche Auflösung wurde durch Mitteln von $0,25^\circ$ auf $0,75^\circ$ reduziert, um den Datensatz an die räumliche Auflösung des erstellten Strahlungsdatensatzes anzupassen. Die Zeitreihen der Länge von 11 Jahren wurden anschließend auf einen Zeitraum von einem Jahr reduziert, indem für jeden Zeitpunkt (in stündlicher Auflösung) innerhalb eines Jahres der Maximal- und Minimalwert aus den für die 11 verschiedenen Jahre auftretenden Werten ausgewählt wurde. Damit ergaben sich zwei Extremwertzeitreihen der Länge eines Jahres, welche die für thermische Beanspruchungen relevanten Minimal- und Maximaltemperaturen enthalten. Im Anschluss wurde die zeitliche Auflösung dieser Extremwertzeitreihen von einer Stunde auf 10 Minuten durch lineare Interpolation erhöht, um die Zeitreihen an die zeitliche Auflösung der Strahlungszeitreihen anzupassen.

7.5 Charakteristische Tageswerte von Einstrahlung und Außenlufttemperatur

Die Strahlungszeitreihen in 10-Minuten-Auflösung für die acht unterschiedlichen Orientierungen (siehe Abschnitt 7.3.3) sowie die beiden Zeitreihen der Temperaturextremwerte in 10-Minuten-Auflösung (siehe Abschnitt 7.4) konnten des Weiteren auf charakteristische Tageswerte reduziert werden, welche die auftretende, thermisch induzierte Spannung bestimmen (siehe dazu auch Abschnitt 11.2.1). Für die Strahlung sind dies die Tagesmaximalwerte. Für die Temperaturen wurde jeweils der Maximal- und Minimalwert in einem Zeitfenster von drei bis vier Stunden um die Strahlungsmaxima herum ausgewählt, um eine leichte Korrelation der beiden Größen Strahlung und Temperatur innerhalb eines Tages zu erhalten. Dies ergibt einen Datensatz, welcher für jeden Tag eines Jahres die zwei für die thermisch induzierte Spannung charakteristischen Wertepaare, das heißt Strahlungstagesmaximum kombiniert mit zugehöriger Minimal- bzw. Maximalaußenlufttemperatur, enthält.

7.6 Vereinfachtes Modell der thermisch induzierten Spannung

Um aus den charakteristischen Tageswerten (siehe Abschnitt 7.5), welche die thermisch induzierte Spannung bestimmen, diejenigen Tage bzw. Bedingungen zu ermitteln, die zu Extrembeanspruchungen bei Isolierglaseinheiten und BIPV-Modulen führen können, ist eine Berechnung der tatsächlich auftretenden Spannung notwendig. Dies kann prinzipiell mit Hilfe von FEM-Simulationen erfolgen, was jedoch sehr rechenintensiv ist. Deshalb erfolgte die Entwicklung eines Ansatzes, welcher die Berechnung der Spannung deutlich vereinfacht: Es wurde zunächst für wenige ausgewählte Situationen eine vollständige FEM-Simulation (siehe Abschnitt 11.2.1) durchgeführt. Aus den resultierenden Ergebnissen konnten dann, wie im Folgenden beschrieben, vereinfachte Modelle der thermisch induzierten Spannung abgeleitet werden. Diese dienen zur Identifikation der meteorologischen Datensätze, die zu Extrembeanspruchungen bei Isolierglaseinheiten und BIPV-Modulen in Vertikalfassaden verschiedener Orientierung führen können.

Aus den Ergebnissen der FEM-Simulationen, welche detailliert in Abschnitt 11.2.1 beschrieben sind, wurde die thermisch induzierte Spannung σ in Abhängigkeit des Strahlungstagesmaximums I_{daymax} und der zugehörigen Außenlufttemperatur T_{ext} für verschiedene simulierte Absorptionsoptionen 1 bis 4 (Erläuterungen siehe Abschnitt 11.2.1) extrahiert und bereitgestellt. Diese Daten dienen als Eingangsdaten für eine lineare Regression (je Absorptionsoption), wobei die Regressionsmodelle mit folgendem Ansatz (Gleichung (7-1)) aufgestellt wurden:

$$\sigma(I_{\text{daymax}}, T) = c_0 + c_1 \cdot I_{\text{daymax}} + c_2 \cdot T_{\text{ext}} \quad (7-1)$$

Dabei sind:

- I_{daymax} = Tagesmaximum der Einstrahlung
- $T_{\text{ext.}}$ = zugehörige Außenlufttemperatur
- c_0, c_1, c_2 = Regressionsparameter

Die Regressionsparameter c_0, c_1 und c_2 wurden jeweils für die verschiedenen Absorptionsoptionen ermittelt und sind in Tabelle 7-1 gegeben. Über diesen Ansatz ergaben sich vereinfachte lineare Modelle zur Berechnung der auftretenden Spannung, abhängig von Strahlungstagesmaximum I_{daymax} und Außenlufttemperatur $T_{\text{ext.}}$, mit Hilfe derer sich für beliebige Eingangsdaten von Strahlung und Außenlufttemperatur die thermisch induzierte Spannung abschätzen lässt. Die damit modellierten Spannungsverläufe für eine hoch absorbierende Außen-, Mittel- und Innenscheibe (Option 1, 2 und 3) zeigt Abbildung 7-4, wobei die niedrig absorbierende Option 4 der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt ist. Es ist anzumerken, dass sich die Spannung der Mittelscheibe nahezu temperaturunabhängig verhält, aber im Vergleich zu den anderen Fällen die stärkste Abhängigkeit zur Einstrahlung aufweist.

Tabelle 7-1: Regressionsparameter für Optionen 1 bis 4. Für Optionen 1 bis 3 werden die Regressionsparameter jeweils nur für die hoch absorbierende Scheibe angegeben.

	c_0 (Achsenabschnitt) [MPa]	c_1 (Einstrahlungsintensität) [MPa/(W/m ²)]	c_2 (Außenlufttemperatur) [MPa/°C]
Option 1 (Außen)	-1,942	0,025	0,116
Option 2 (Mitte)	-1,287	0,046	-0,011
Option 3 (Innen)	3,158	0,037	-0,130
Option 4 (Außen)	-1,883	0,005	0,119
Option 4 (Mitte)	-0,134	0,015	-0,009
Option 4 (Innen)	2,958	0,003	-0,133

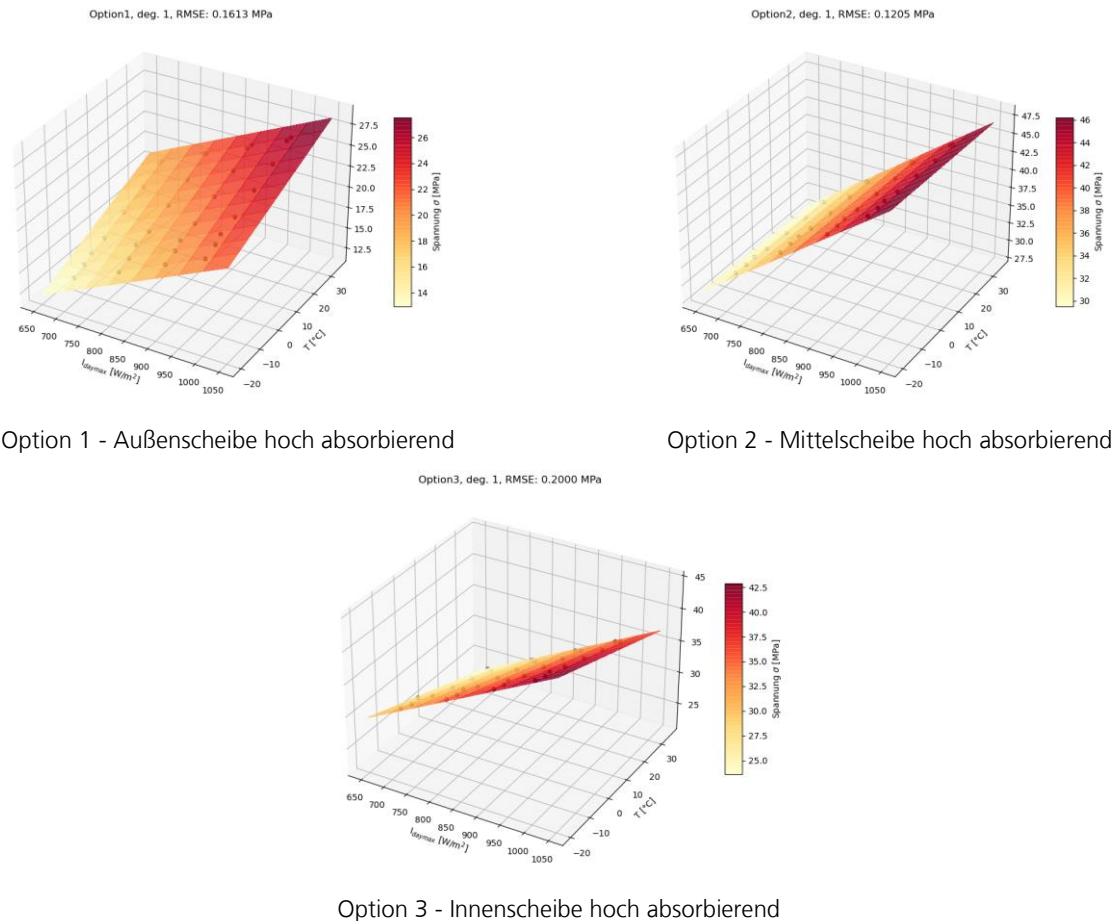


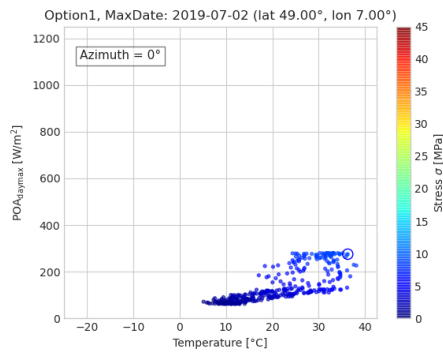
Abbildung 7-4: Modelle der thermisch induzierten Spannung für eine Außen-, Mittel- und Innenscheibe in Abhängigkeit von Strahlungstagesmaximum und zugehöriger Temperatur.

7.7 Identifikation kritischer meteorologischer Bedingungen für die Glasspannungen

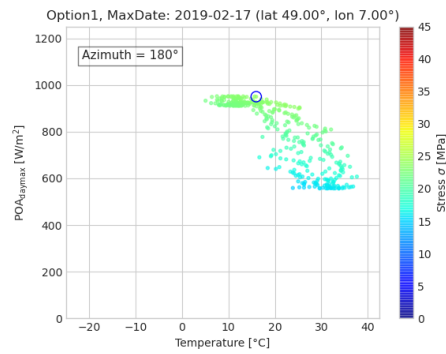
Um die meteorologischen Bedingungen zu identifizieren, die zu Extrembeanspruchungen bei Isolierglaseinheiten und BIPV-Modulen in Vertikalfassaden verschiedener Orientierung führen können, wurden die erstellten Regressionsmodelle der thermisch induzierten Spannung (siehe Abschnitt 7.6) für die unterschiedlichen Absorptionsoptionen auf den Datensatz der charakteristischen Tageswerte (siehe Abschnitt 7.5) von solarer Einstrahlung und Außenlufttemperatur für jede Orientierung angewendet. Aus den auftretenden Spannungswerten wurde das Maximum bestimmt und das zugehörige Strahlungs- und Temperaturwertepaar als kritische Bedingung für die thermisch induzierte Spannung - je nach Orientierung und Absorptionsoption - identifiziert. Berechnete Spannungswerte zu Strahlungs-Temperatur-Wertepaaren sind für einen exemplarischen Standort (49° nördliche Breite, 7° östliche Länge, welcher in der Nähe der Stadt Saarbrücken liegt) in Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6 zu sehen. Abbildung 7-5 zeigt Spannungswerte eines Modells für die hoch absorbierende Außenscheibe (Option 1), Abbildung 7-6 zeigt Spannungswerte eines Modells für die hoch absorbierende Innenscheibe (Option 3). Ein blauer Kreis markiert den Punkt maximaler Spannung im jeweiligen Datensatz. Eine Bestimmung der Punkte maximaler Spannung mittels des Modells für die hoch absorbierende Mittelscheibe (Option 2) konnte ausgelassen werden, da dieses Modell nur eine sehr geringe negative Abhängigkeit von der Temperatur besitzt. Dies hat zur Folge, dass die kritischen Bedingungen für die Mittelscheibe bereits durch die kritischen Bedingungen der hoch absorbierenden Innenscheibe (Option 3) abgedeckt werden, da dieses Modell ebenfalls eine negative Temperaturabhängigkeit und im Verhältnis dazu hohe Strahlungsabhängigkeit besitzt (siehe Tabelle 7-1). Eine Auswertung für die niedrig absorbierende Option 4 wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da hier die resultierenden Spannungsniveaus deutlich geringer ausfallen. Die Abhängigkeiten von solarer Einstrahlung und Außenlufttemperatur bei Option 4 ähneln denen der Optionen 1, 2 und 3, es

ergibt sich lediglich ein geringerer Einfluss der Einstrahlung. Option 4 wird somit durch die Optionen 1 und 3 abgedeckt und muss nicht gesondert betrachtet werden.

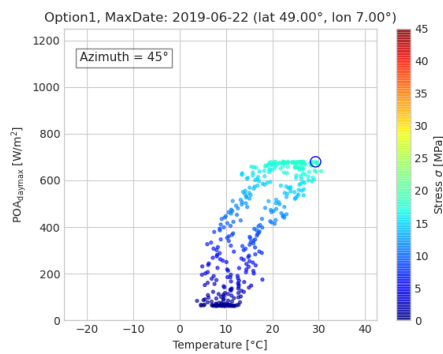
Die Vereinfachung der Auswertung der meteorologischen Daten über die Absorptionsoptionen und die anschließende Regressionsanalyse sollte nicht als allgemeingültig angesehen werden, sondern sollte bei Verwendung anderer meteorologischer Daten oder anderer Modelle (z. B. andere Rahmenkonstruktionen) überprüft werden.



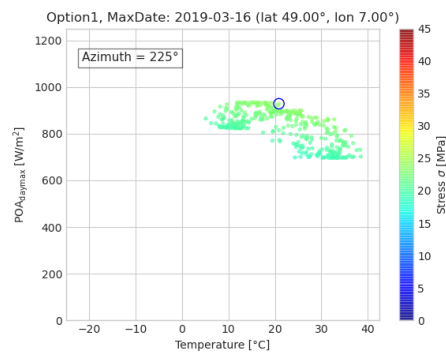
Nord



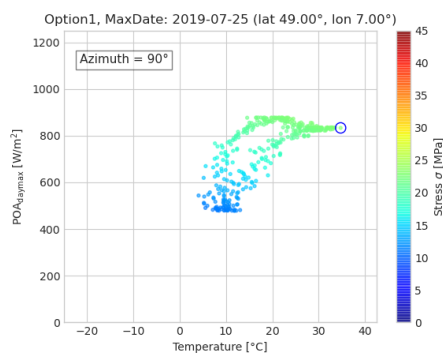
Süd



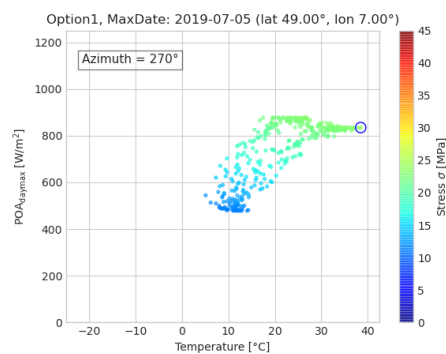
Nord-Ost



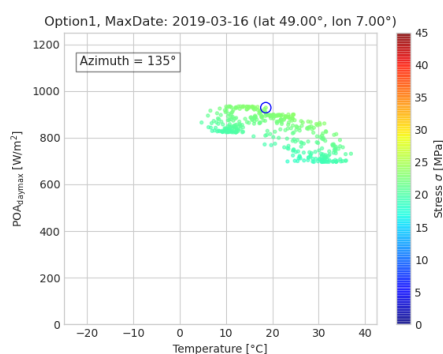
Süd-West



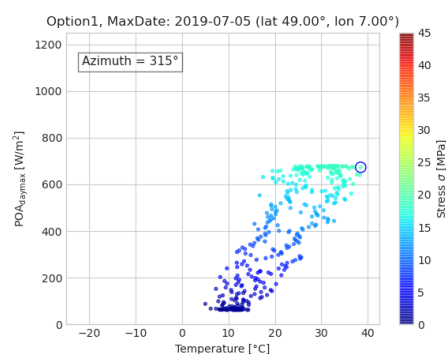
Ost



West

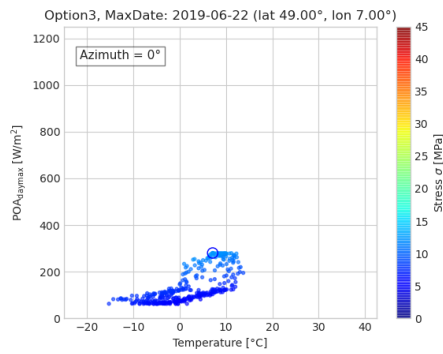


Süd-Ost

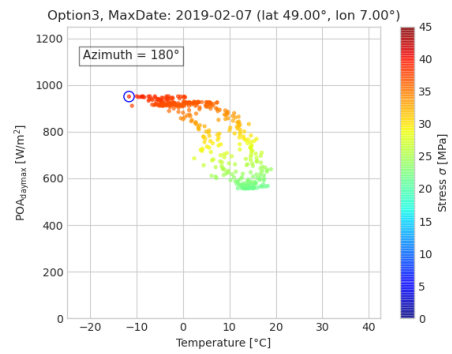


Nord-West

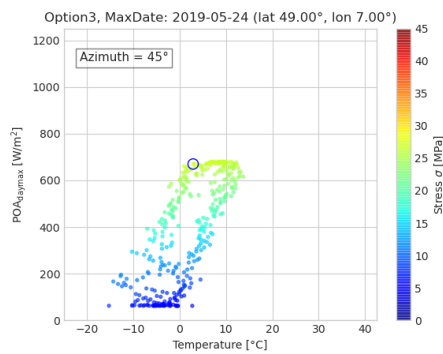
Abbildung 7-5: Spannungswerte in Abhängigkeit der charakteristischen Tageswerte eines Jahres von Strahlung und Temperatur für einen exemplarischen Standort und acht verschiedene Orientierungen einer vertikalen Fläche (Neigung 90°). Berechnung der Spannungswerte mittels Regressionsmodell der Außenscheibe (Option 1).



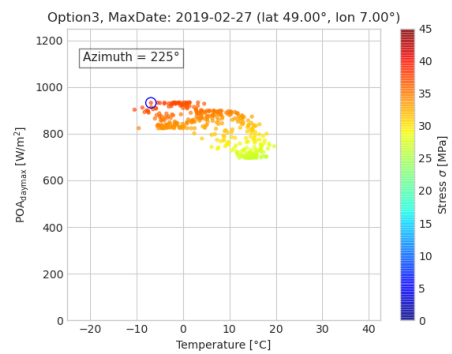
Nord



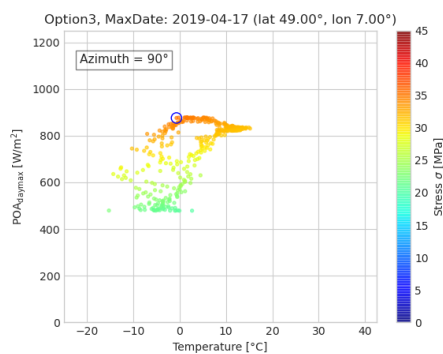
Süd



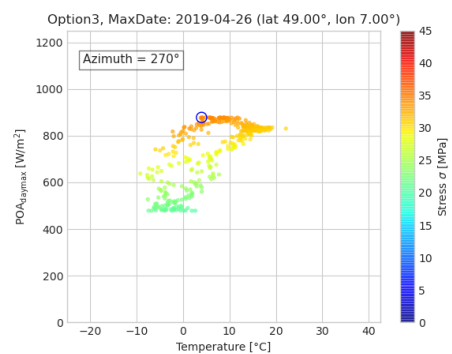
Nord-Ost



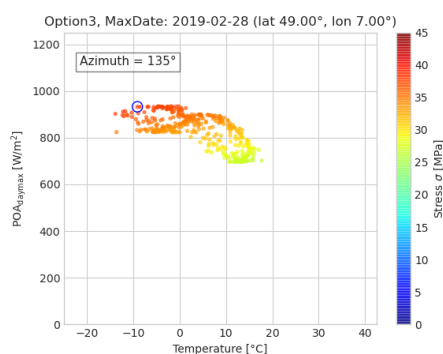
Süd-West



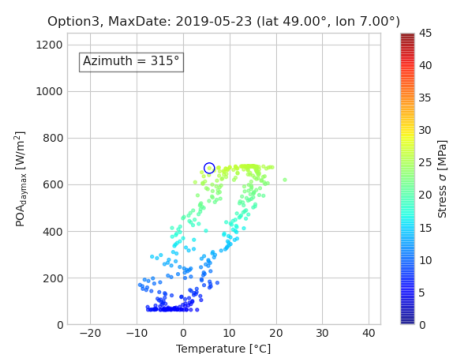
Ost



West



Süd-Ost



Nord-West

Abbildung 7-6: Spannungswerte in Abhängigkeit der charakteristischen Tageswerte eines Jahres von Strahlung und Temperatur für einen exemplarischen Standort und acht verschiedene Orientierungen einer vertikalen Fläche (Neigung 90°). Berechnung der Spannungswerte mittels Regressionsmodell der Innenscheibe (Option 3).

7.8 Karten kritischer meteorologischer Bedingungen

Mittels der in Abschnitt 7.6 beschriebenen Modelle und des im vorangegangenen Abschnitt 7.7 beschriebenen Verfahrens wurden die kritischen meteorologischen Bedingungen (Strahlungs-Außenlufttemperatur-Wertepaare, welche die maximale Glasspannung induzieren) für jeden Gitterpunkt des zuvor erstellten meteorologischen Datensatzes (siehe Abschnitt 7.2 bis Abschnitt 7.5) bestimmt und zu Tabellen bzw. Karten zusammengefasst. Damit ergeben sich für jede Fassadenorientierung sowie jeweils die Isolierglas-Außenscheibe (Option 1) und die Isolierglas-Innenscheibe (Option 3) entsprechende kritische Kombinationen von solarer Einstrahlung und zugehöriger Außenlufttemperatur (warme und kalte Tage). In Abbildung 7-7 sind beispielhaft Karten für eine Südorientierung gegeben. Die tabellierten Daten für alle Orientierungen befinden sich in Anhang A4 und Anhang A5.

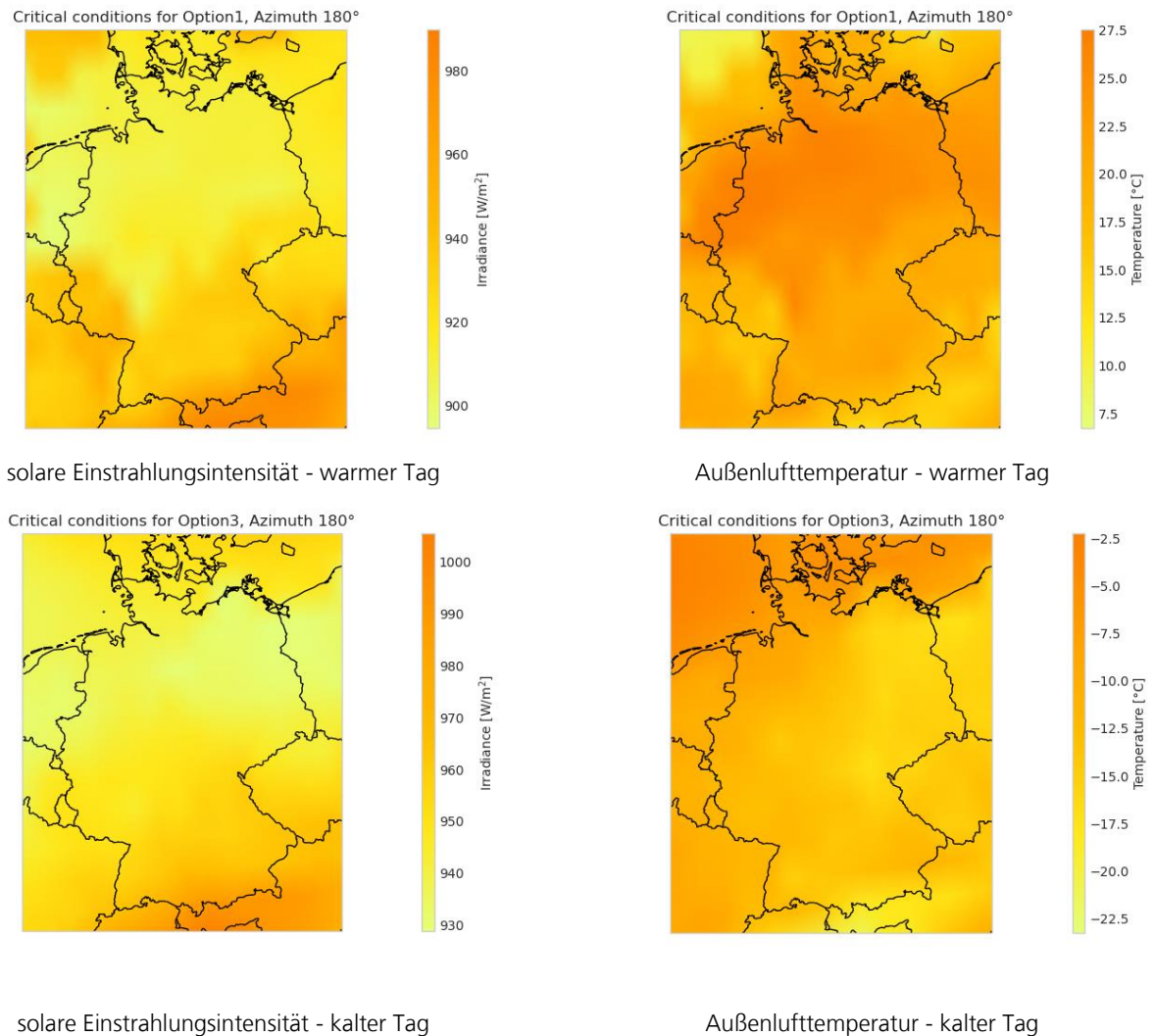


Abbildung 7-7: Kritische meteorologische Wertepaare (links: Einstrahlung, rechts: Temperatur) für eine vertikale (Neigung 90°) und nach Süden (Azimut 180°) orientierte Fläche. Oben: Bedingungen für eine Außenscheibe (relevant am warmen Tag). Unten: Bedingungen für eine Innenscheibe (relevant am kalten Tag).

7.9 Höhenkorrektur der meteorologischen Parameter

Die ermittelten Außenlufttemperatur- und Strahlungswerte (siehe Tabellen in Anhang A4 und Anhang A5) beziehen sich auf eine mittlere geodätische Höhe ü.N.N. des jeweiligen Gitterpunktes. Diese Höhen sind in im Anhang A3 zu finden. Bei abweichender Höhe sollte eine Anpassung der Werte über eine entsprechende Höhenkorrektur (siehe Abschnitt 7.9.1 und Abschnitt 7.9.2) vorgenommen werden.

7.9.1 Höhenkorrektur der solaren Einstrahlung

Die Änderung der solaren Einstrahlung mit der Höhe kann näherungsweise über einen linearen Ansatz abgebildet werden, wie er nachfolgend in Gleichung (7-2) dargestellt ist.

$$I_{\text{max,corrected}} = I_{\text{max}} + a \cdot (h - h_{\text{geodät.}}) \quad (7-2)$$

Dabei sind:

- $I_{\text{max,corrected}}$ = maximale solare Einstrahlung inkl. Höhenkorrektur
- I_{max} = maximale solare Einstrahlung des Gitterpunkts, entnommen aus Anhang A4 und Anhang A5
- $a = 0,055 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ m})$
- h = tatsächliche Ortshöhe in m
- $h_{\text{geodät.}}$ = zugehörige geodätische Höhe des Gitterpunkts in m

Der Parameter a wurde aus einer Analyse von CAMS McClear Daten [38], [30], [43] zu $55 \text{ W}/\text{m}^2$ pro 1000 Höhenmeter, also $a = 0,055 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ m})$ abgeschätzt. Dazu wurden 3 verschiedene Standorte und verschiedene Orientierungen untersucht. Die in den untersuchten Daten auftretenden Werte reichten von ca. $0,007 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ m})$ für eine Nord-Orientierung bis hin zu ca. $0,088 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ m})$ bei einer Westorientierung. Da der Wert a aus Daten mit Höhendifferenzen bis ca. 2000 m abgeleitet wurde, wird angeraten die Höhenkorrektur auch nur in einem Wertebereich bis zu maximal 2000 m Höhendifferenz zu verwenden.

7.9.2 Höhenkorrektur der Außenlufttemperatur

Um die Außenlufttemperaturwerte $T_{\text{ext.}}$ hinsichtlich der Ortshöhe zu korrigieren, kann Gleichung (7-3) verwendet werden [51].

$$T_{\text{ext.,corrected}} = T_{\text{ext.}} - 6,5/1000 \cdot (h - h_{\text{geodät.}}) \quad (7-3)$$

Dabei sind:

- $T_{\text{ext.,corrected}}$ = Außenlufttemperatur inkl. Höhenkorrektur
- $T_{\text{ext.}}$ = Außenlufttemperatur des Gitterpunkts, entnommen aus Anhang A4 und Anhang A5
- h = tatsächliche Ortshöhe in m
- $h_{\text{geodät.}}$ = zugehörige geodätische Höhe des Gitterpunkts in m

7.10 Normierte Strahlungstagesprofile

Um mit Hilfe der in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten kritischen meteorologischen Bedingungen (Strahlungs-Temperatur-Wertepaare) nicht nur eine stationäre, sondern auch eine transiente Berechnung der thermisch induzierten Spannung zu ermöglichen, wurden exemplarische normierte solare Einstrahlungsprofile von drei verschiedenen Tagen (21. Juni, 21. September, 21. Dezember) für einen Ost-West-zentrierten Standort (bezogen auf Deutschland) erzeugt. Diese normierten Strahlungsprofile können auf gewünschte kritische Strahlungswerte (siehe Anhang A4 und Anhang A5) skaliert werden, wodurch eine transiente Rechnung der thermisch induzierten Spannung zu gegebenen kritischen Bedingungen möglich wird. Beispiele der Profile für eine vertikale Fläche mit Nord-, Süd-, Ost- und Westorientierung sind in Abbildung 7-8 gegeben. Die Profile aller berechneten Orientierungen befinden sich in tabellierter Form im Anhang A6.

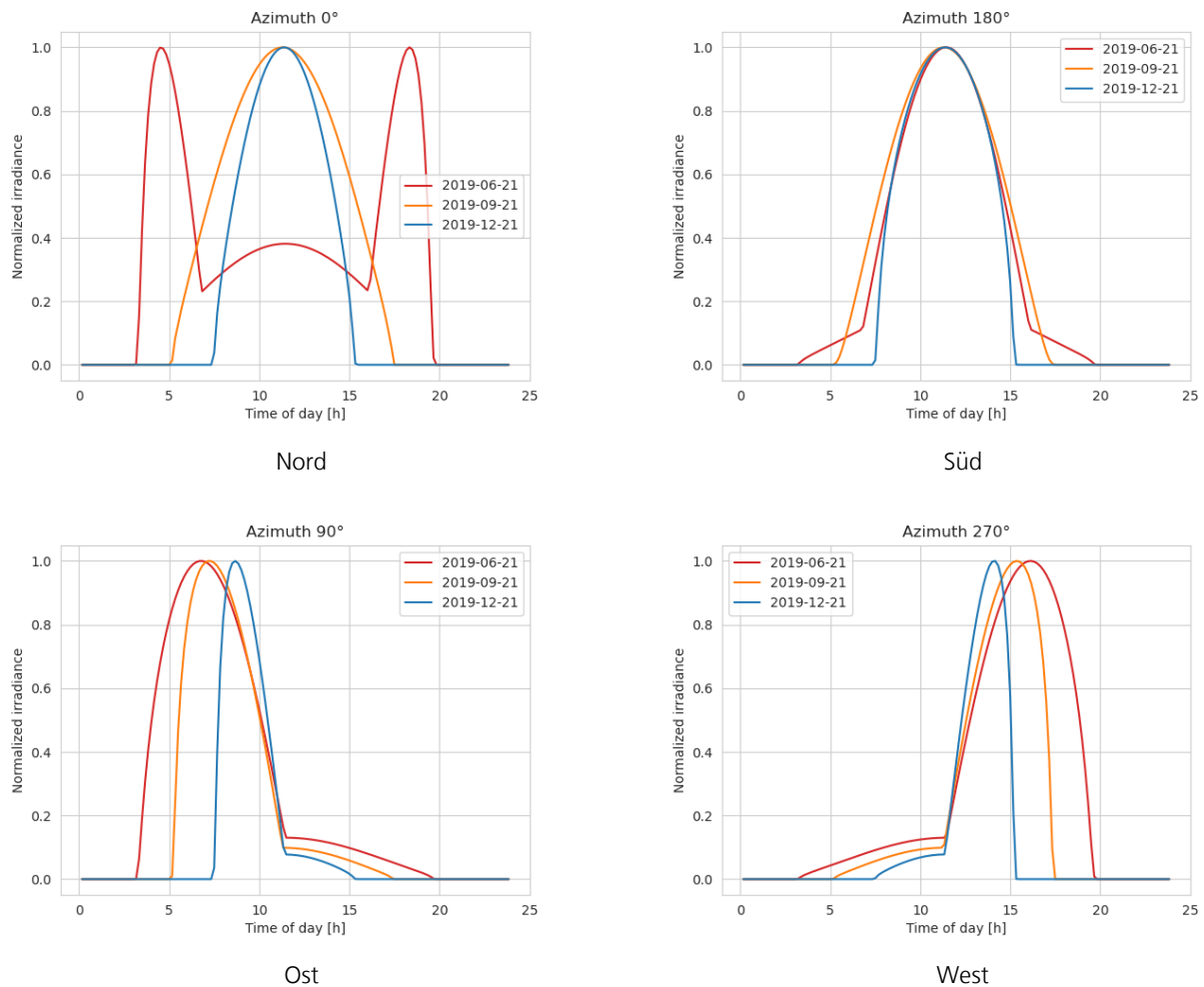


Abbildung 7-8: Normierte Tagesprofile der Strahlung für 21. Juni, 21. September und 21. Dezember exemplarisch für Nord-, Süd-, Ost-, und Westorientierung.

7.11 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Methodik beschrieben, mit welcher meteorologische Extrembedingungen für thermische Beanspruchung von Isolierglaseinheiten und BIPV-Modulen in Vertikalfassaden verschiedener Orientierung ermittelt werden können. Zunächst wurden aus meteorologischen Rohdaten Datensätze von relevanten Extremwerten (hohe Einstrahlung, hohe sowie niedrige Temperaturen) erstellt. Zusätzlich wurden Modelle zur vereinfachten Berechnung thermisch induzierter Spannung aus Ergebnissen von FEM-Simulationen abgeleitet. Mit Hilfe dieser Modelle konnten aus den Datensätzen der meteorologischen Extremwerte (Strahlungs-Temperatur-Wertepaare) die Situationen maximaler thermischer Beanspruchung identifiziert werden. Die Vorgehensweise wurde für jeden Standort eines Rasterdatensatzes angewandt, so dass sich schlussendlich Karten bzw. Tabellen der kritischen Bedingungen für thermische Belastung für die Region Deutschland ergaben. Derartige Datensätze waren bisher nicht verfügbar und können hiermit bereitgestellt werden. Der zur Verfügung gestellte Datensatz zeichnet sich durch die Transparenz des Erzeugungsprozesses sowie die Validierung durch Messwerte aus.

8 Validierungsversuche mit Dreifach-Isolierverglasungen

Im Rahmen von AP 4 wurden mit Dreifach-Isolierverglasungen Experimente zur Validierung der numerischen Modelle und Berechnungsmethoden bzgl. thermisch induzierter Spannungen durchgeführt.

8.1 Versuchseinrichtung

Abbildung 8-1 zeigt die Doppel-Klimawechselkammer im TestLab PV Modules am Fraunhofer ISE. Die zwei Klimakammern (Außen- und Innenmodul) sind durch einen individuell gestaltbaren Probenhalter voneinander trennbar. Dieser kann verschiedene Aufbauten wie Wände, Fassadenelemente oder Verglasungseinheiten aufnehmen, so dass unabhängig voneinander verschiedene Klimaeinstellungen je Kammer vorgenommen werden können. Beispielsweise lassen sich so Fassadenkonstruktionen unter realen Klimaverhältnissen (außen und innen) testen.



Abbildung 8-1: Sicht auf die Doppel-Klimawechselkammer im TestLab PV Modules am Fraunhofer ISE mit Außenmodul (linke Kammer) und Innenmodul (rechte Kammer).

An der Stirnseite des Außenmoduls ist ein Sonnensimulator angebracht, der mit sechs 4 kW-Metall-Halogenidstrahlern (siehe Abbildung 8-2 links) auf der Probenebene eine Grundeinstrahlung von etwa „einer Sonne“, d. h. ca. 1.100 W/m^2 aufbringen lässt, welche elektronisch oder über Filternetze noch variiert werden kann. Im Inneren der Kammer sind Diffusorscheiben (siehe Abbildung 8-2 Mitte) angebracht, die die Homogenität der Einstrahlung durch die sechs Strahlungslampen verbessern. Die örtliche Homogenität liegt in der Klasse B, was vereinfacht gesagt etwa $\pm 10 \%$ entspricht.

Die Höhe der Einstrahlung während der Versuche wurde mit einem Pyranometer vorab in Probenebene ermittelt und lag zwischen 900 W/m^2 und 1.000 W/m^2 .



Abbildung 8-2: Anordnung der Strahlungslampen außerhalb der Doppel-Klimawechselkammer (links) und Solarstrahler mit vorgesetzter Diffusorscheibe im Außenmodul, ausgerichtet auf die Versuchskörper (Mitte).

Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte über einen Datenlogger Agilent 34970A mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute (als Mittelwert von 10-s-Messungen). Als Temperatursensoren wurden Thermoelemente vom Typ K (Nickel-Chrom-Nickel) verwendet, sie wurden individuell kalibriert und weisen eine Abweichung < 1 K auf.

8.2 Versuchskörper mit Messstellen

Für die Validierungsversuche an Verglasungen wurden zwei Probekörper (bereitgestellt durch AGC Interpane) in der Versuchseinrichtung geprüft: Ein Sonnenschutzglas als Dreifach-Isolierglas mit einer Sonnenschutzschicht (ipasol neutral 50/27) auf Position 2 und Wärmeschutzschicht (low-e, iplus 1.1) auf Position 5 mit „warme Kante“ Abstandhalter [6] und ein Wärmedämmglas als Dreifach-Isolierglas mit Wärmeschutzschichten (low-e, iplus 1.1) auf den Positionen 2 und 5 - vgl. Nummerierung in Abbildung 4-1 - mit „warme Kante“ Abstandhalter und einer schwarzen Folie über die obere Hälfte auf der Position 6 betrachtet.

Die Abmessungen der Isoliergläser betragen $B / H = 80 \text{ cm} / 160 \text{ cm}$. Die Glasdicken wurden mit konstant 6 mm gewählt, um die späteren numerischen Berechnungen zur Modellvalidierung einfacher durchführen zu können. Die Breite der Scheibenzwischenräume wurde zu 16 mm festgelegt. Die Scheibenzwischenräume waren mit Luft befüllt.



Abbildung 8-3: Isolierglasprobekörper, Links: Isolierglas auf Holzständer, Mitte links: Thermoelemente am Glasrand, Mitte rechts: Thermoelemente-Herausführung aus Scheibenzwischenraum und rechts: Thermoelemente im Scheibenzwischenraum.

Die Thermoelemente wurden, wie in Abbildung 8-4 (oberer Bereich) und Abbildung 8-5 (unterer Bereich) dargestellt, am Isolierglas (Sonnenschutz- und Wärmedämmglas) angebracht. Die Thermoelemente, welche sich in den Scheibenzwischenräumen befinden, wurden von AGC Interpane (in der Isolierglasfertigung in Plattling) auf die Gläser geklebt. Die Kabel der Thermoelemente wurden über den Randverbund aus den Scheibenzwischenräumen herausgeführt (orange Linien in Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5 sowie Abbildung 8-3 c). Alle weiteren Thermoelemente wurden im Versuchslabor am Fraunhofer ISE appliziert. Die Thermoelemente, welche sich auf Position 1 befanden (PU1 und PL1) wurden mit kleinen Korkklebplättchen abgedeckt, um die direkte Bestrahlung dieser Thermoelemente – und soweit möglich der dahinterliegenden Messstellen - zu verhindern.

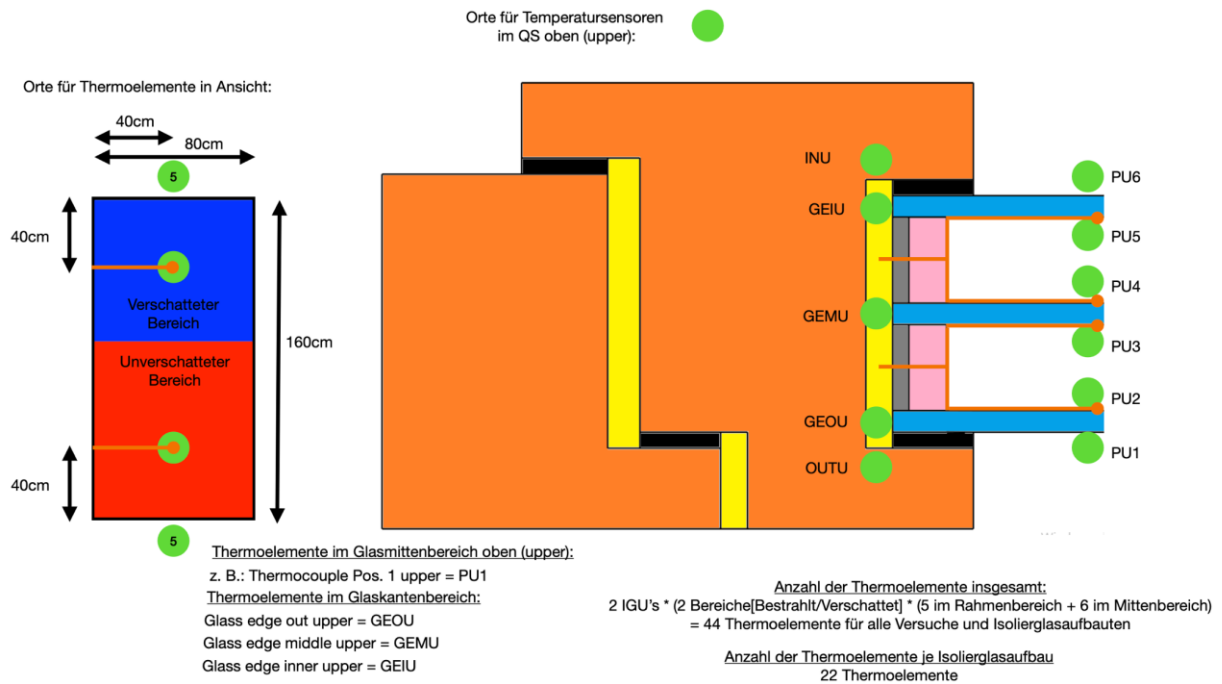


Abbildung 8-4: Anordnung der Thermolemente im oberen Bereich der Isoliergläser.

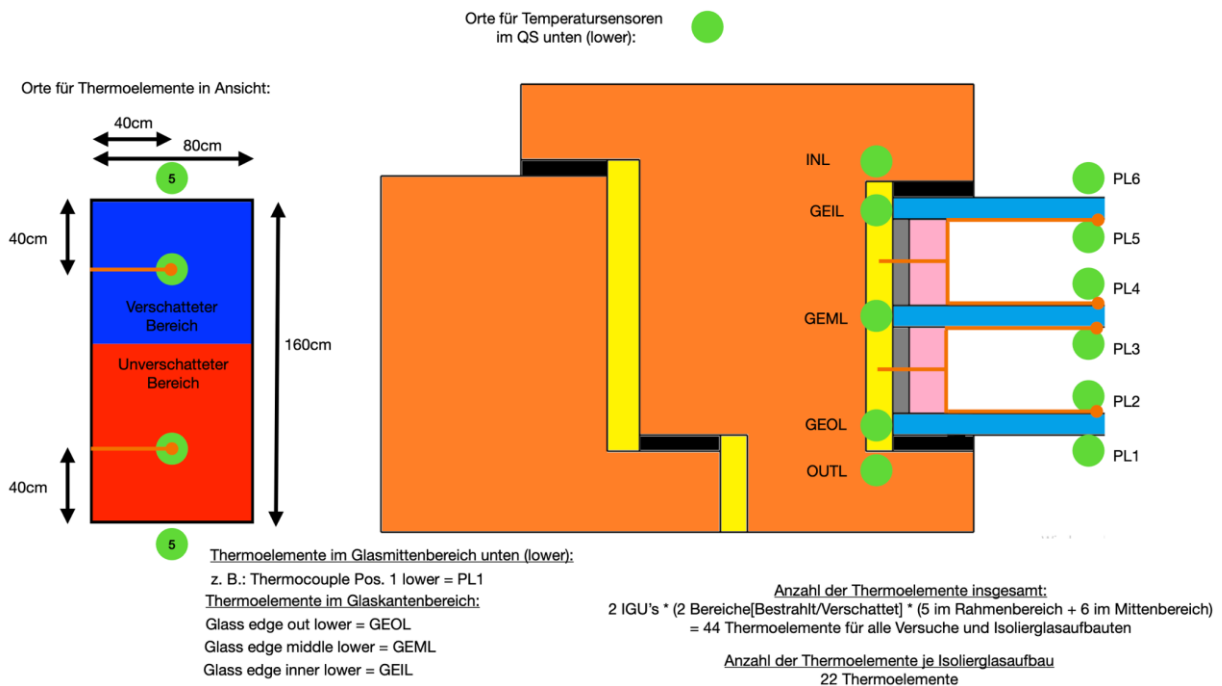


Abbildung 8-5: Anordnung der Thermolemente im unteren Bereich der Isoliergläser.

8.3 Versuchsaufbau

Die in Abschnitt 8.2 beschriebenen Isoliergläser wurden in die Doppel-Klimawechselkammer im TestLab Modules des Fraunhofer ISE nacheinander eingebaut. Die solare Einstrahlung im Außenmodul wurde wie zuvor beschrieben mit Hilfe von Solarstrahlern realisiert. Die gewünschte Temperatur auf der Vorder- bzw. Rückseite des Isolierglases wurde mit Hilfe einer Klimaanlage eingestellt. Die Isoliergläser wurden in einen Holzrahmen eingebaut. Den Holzrahmen umgab ein weiteres Holzbrett, welches als Raumtrenner zwischen Außen- und Innenmodul diente. In Abbildung 8-6 ist exemplarisch ein Isolierglas, welches sich im

Versuchsstand befindet, dargestellt. Die Verschattung wurde halbseitig mit Hilfe eines Aluminiumblechs realisiert. Der Holzrahmen wurde im Innenmodul durch verschraubte Kanthölzer (Fichten-/Buchenholz) hergestellt und im Außenmodul umlaufend 10 cm breit mit weißer Farbe angestrichen, um dort die Absorption zu reduzieren. Das Isolierglas wurde an seinem unteren Rand auf zwei Verglasungsklotze aufgestellt. Im oberen Bereich des Rahmens wurden am linken und rechten Rand des Isolierglases je ein Verglasungsklotz zur Halterung eingebaut. Die sich in der Verglasung (Isolierglas inkl. Rahmen) einstellenden Temperaturen wurden mit Hilfe von Thermoelementen, welche vom Fraunhofer ISE gefertigt und kalibriert werden, mit einer Frequenz von 1/10 Hz (alle 10 Sekunden) aufgezeichnet.

Während der Prüfungen wurde die Windgeschwindigkeit der durch die Kammer verursachten Umluftzirkulation mit einem Hitzdrahtanemometer im Abstand von etwa 2 cm vor den Isolierglaseinheiten bestimmt und dokumentiert.



Abbildung 8-6: Eingebautes Dreifach-Isolierverglas, links: Außenmodul (AM) der Klimakammer mit eingebautem Sonnenschutzglas; rechts: Innenmodul (IM) der Klimakammer mit eingebautem Sonnenschutzglas.

8.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung nach Einbau der Probekörper und Verbindung der Thermoelemente mit dem Datenlogger beinhaltete jeweils zunächst die sogenannte Konditionierung der Probekörper über Nacht. Diese Vorgehensweise stellte sicher, dass sich für alle Konstruktionsbestandteile ein thermisch stationärer Zustand eingestellt hat. Im Anschluss wurden die Strahlungslampen eingeschaltet. Der Versuch wurde beendet, wenn sich an den Thermoelementen ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Der Gleichgewichtszustand wurde dabei derart definiert, dass sich die Temperaturen in jedem Thermoelement innerhalb von 10 Minuten um weniger als 1 K ändern ($< 1 \text{ K} / 10 \text{ min}$).

Insgesamt wurden für die Isoliergläser fünf Versuche (siehe Abbildung 8-7) durchgeführt, welche wie hier kurz aufgelistet werden:

- Versuch 1: Dreifach-Sonnenschutzglas, Teilverschattung oben
- Versuch 2: Dreifach-Sonnenschutzglas, Teilverschattung unten
- Versuch 3: Dreifach-Wärmedämmglas, ohne Teilverschattung, schwarze Folie oben
- Versuch 4: Dreifach-Wärmedämmglas, Teilverschattung unten, schwarze Folie oben
- Versuch 5: Dreifach-Wärmedämmglas, Teilverschattung unten, schwarze Folie mit dahinterliegender Wärmedämmung oben



Abbildung 8-7: Übersicht der Validierungsversuche für Isoliergläser.

8.4.1 Dreifach-Sonnenschutzglas (ipasol neutral 50/27)

Über Nacht wurden für das Sonnenschutzglas im Außenmodul als Lufttemperatur 35 °C und im Innenmodul 20 °C eingestellt. Am darauffolgenden Morgen wurden die Strahlungslampen eingeschaltet, wobei die obere Hälfte der Sonnenschutzverglasung mit Hilfe des Aluminiumblechs verschattet wurde (siehe Abbildung 8-7 ganz links). Das Aluminiumblech wurde bereits am Abend vorher in den Versuchsstand eingebaut. Nachdem der Gleichgewichtszustand an allen Thermoelementen erreicht wurde, wurden zusätzlich fünf Minuten lang die Temperaturen aufgezeichnet. Anschließend wurden die Strahlungslampen ausgeschaltet.

Im nächsten Schritt wurde das Aluminiumblech oben demontiert und unten montiert (siehe Abbildung 8-7 Mitte-links), um die Verschattung nun über die untere Hälfte der Verglasung zu realisieren. Hintergrund dabei war, ob für die gemessenen Temperaturen ein anderes Ergebnis resultiert, da die Konvektion innerhalb des Scheibenzwischenraums (SZR) verändert wird. Zur Erklärung: Befindet sich die Verschattung oben, so erwärmt sich das Füllgas im SZR unten und steigt nach oben auf. Befindet sich dagegen die Verschattung unten, so erwärmt sich das Füllgas im SZR oben und kann nicht weiter aufsteigen, da es sich bereits oben befindet.

Nachdem das Aluminiumblech unten montiert war, wurde für die weitere Durchführung wie oben beschrieben vorgegangen.

8.4.2 Dreifach-Wärmedämmglas (iplus 1.1)

Über Nacht wurden für das Wärmedämmglas im Außenmodul als Lufttemperatur 10 °C und im Innenmodul 25 °C eingestellt. Am darauffolgenden Morgen wurden die Strahlungslampen eingeschaltet, wobei die obere Hälfte des Wärmedämmglases auf der Innenseite, sprich Position 6, mit einer schwarzen Folie beklebt war (siehe Abbildung 8-7 mittig). Eine Verschattung mit Hilfe des Aluminiumblechs wurde erst im nächsten Experiment vorgesehen. Nachdem der Gleichgewichtszustand an allen Thermoelementen erreicht wurde, wurden zusätzlich fünf Minuten lang die Temperaturen aufgezeichnet. Anschließend wurden die Strahlungslampen ausgeschaltet.

Im nächsten Schritt wurde das Aluminiumblech unten montiert, um die Teilverschattung nun über die untere Hälfte der Verglasung zu realisieren (siehe Abbildung 8-7 Mitte-rechts). Die schwarze Folie über die

obere Hälfte auf Position 6 wurde nicht entfernt. Nach Anbringen des Aluminiumblechs wurden die Strahlungslampen wieder eingeschaltet. Durch das Anbringen der Teilverschattung sollten die Temperaturunterschiede in der Isolierglaseinheit vergrößert werden. Eine Konditionierung des Isolierglases über Nacht wurde nicht durchgeführt, da lediglich der nun verschattete Bereich abkühlen musste. Nach dem das Gleichgewicht erreicht wurde, galt dieser Versuch als abgeschlossen.

Im letzten Schritt wurde, bei eingeschalteten Strahlungslampen, im Bereich hinter der schwarzen Folie (im Innenmodul) auf Position 6 eine Wärmedämmung aus Polystyrol (Wärmeleitfähigkeit $0,034 \text{ W}/(\text{m K})$) mit einer Dicke von 18 cm angebracht, um die Temperaturunterschiede im Glas in diesem unverschatteten Bereich weiter zu erhöhen und ggf. einen thermisch induzierten Bruch des Glases auszulösen (siehe Abbildung 8-7 ganz rechts). Die zusätzlich eingebaute Wärmedämmung in Kombination mit der schwarzen Folie simulierte das Szenario des dunklen Sofas hinter einer Verglasung. Bedingt durch das Schmelzen der Wärmedämmung stellte sich kein thermisches Gleichgewicht ein, da sich das thermische System änderte. Die Temperaturdaten wurden jedoch weiter aufgezeichnet und die Strahlungslampen kurze Zeit nach dem Schmelzen abgeschaltet.

8.5 Versuchsauswertung

8.5.1 Versuch 1

In Abbildung 8-8 sind die aufgezeichneten Temperaturen des Sonnenschutzglases mit oben liegender Teilverschattung dargestellt. Der Gleichgewichtszustand stellt innerhalb von ca. fünf Stunden ein, wobei die größten Änderungen der Temperaturen innerhalb der ersten ein bis zwei Stunden auftreten. Die Außenscheibe erreicht in ihrer Mitte (Messstellen PL1 und PL2, siehe auch Abbildung 8-5) eine maximale Temperatur von ca. $46 \text{ }^\circ\text{C}$ (Erwärmung um ca. 11 K), während die Mittelscheibe eine maximale Temperatur von ca. $53 \text{ }^\circ\text{C}$ (Erwärmung um ca. 25 K) in ihrer Mitte erreicht.

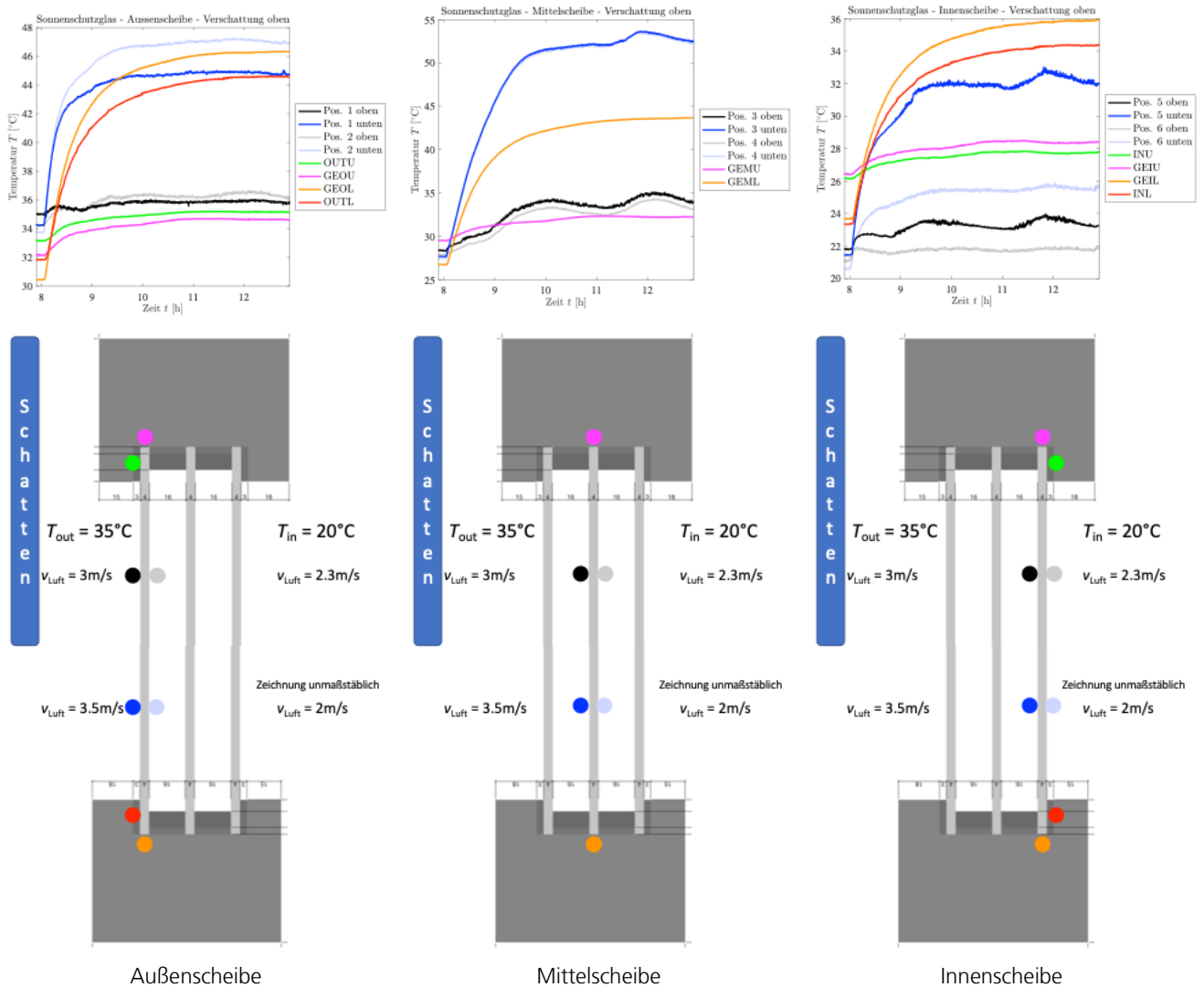


Abbildung 8-8: Versuch 1 - Sonnenschutzglas - Teilverschattung oben.

Eine Ursache für die leicht welligen Verläufe verschiedener Messstellen konnte nicht identifiziert werden. Es lässt sich an dieser Stelle lediglich vermuten, dass sich ggf. die Konvektion im Scheibenzwischenraum verändert hat und somit schwankende Temperaturmessungen resultierten. Für die später folgende numerische Simulation der Versuche wurde dieses Verhalten vernachlässigt. Die Gegenüberstellung der experimentell und numerisch ermittelten Temperaturen ist im Anhang A8.1 gegeben.

8.5.2 Versuch 2

In Abbildung 8-9 sind die aufgezeichneten Temperaturen des Sonnenschutzglases mit unten liegender Teilverschattung dargestellt. Der Gleichgewichtszustand stellte sich analog zum Versuch mit Teilverschattung oben ein. Anhand der aufgezeichneten Temperaturdaten zeigt sich zudem, wie die ehemals unverschatteten Bereiche durch die Verschattung (nun unten liegend) abkühlen.

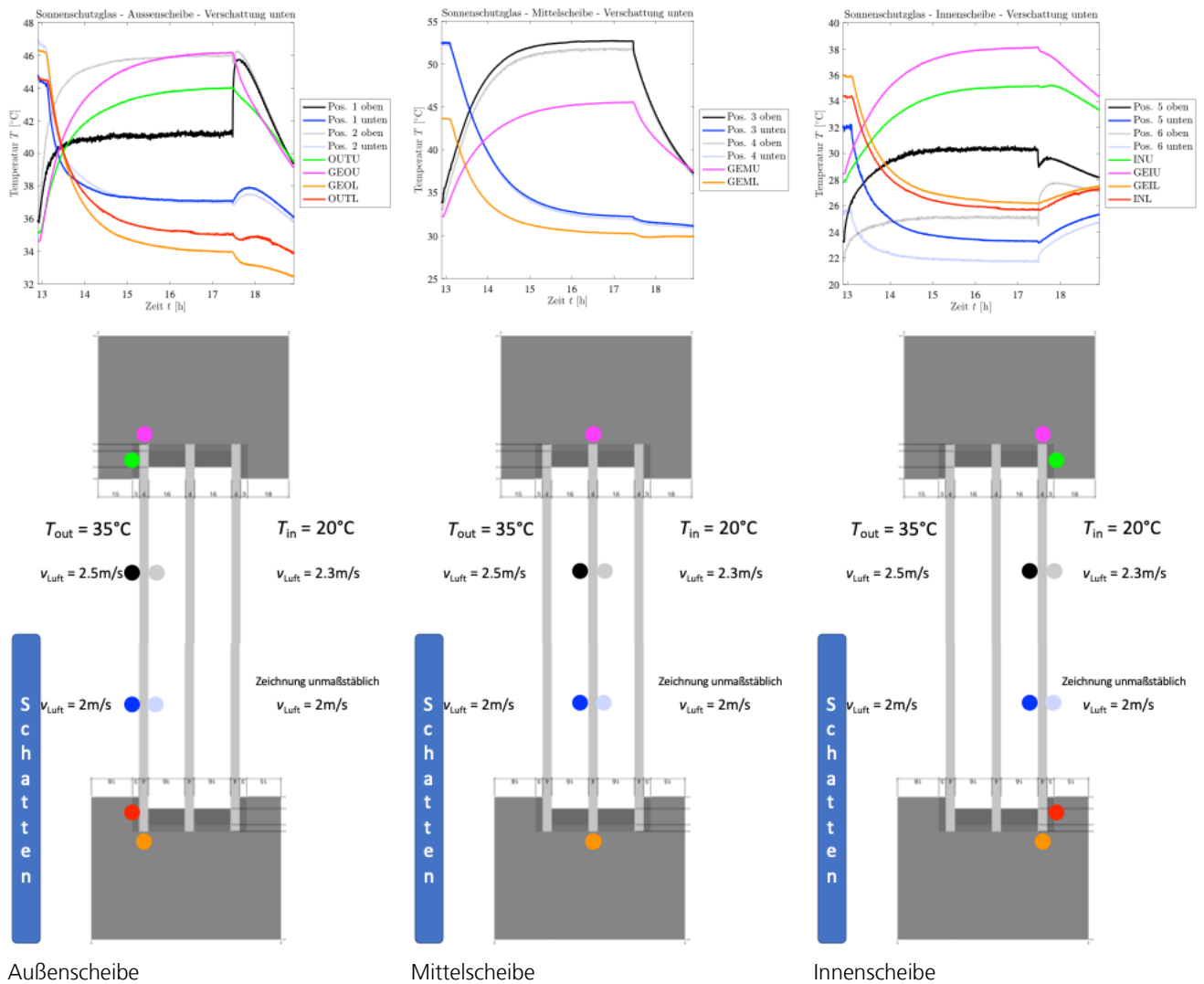


Abbildung 8-9: Versuch 2 - Sonnenschutzglas - Teilverschattung unten.

Besonders interessant zu erwähnen ist die Temperaturentwicklung der Außen- und Innenscheibe, nachdem die Strahlungslampen um ca. 17:30 Uhr ausgeschaltet wurden. Während die Temperatur der Mittelscheibe sinkt, steigen die Temperaturen der Außenscheibe (Messstellen PU1 und PU2, siehe auch Abbildung 8-4) und der Innenscheibe (Messstellen PU5 und PU6) an. Dies zeigt, dass die noch warme Mittelscheibe die Außen- und Innenscheibe wieder erwärmt. Dieser Effekt lässt sich auch in Abschnitt 8.5.5 (Wärmedämmglas, Teilverschattung unten, Wärmedämmung oben, schwarze Folie oben) beobachten.

Die Vermutung hinsichtlich der sich veränderten Konvektion im Scheibenzwischenraum infolge der veränderten Lage der Teilverschattung (oben und unten, vgl. Erläuterung in Abschnitt 8.4.1) konnte widerlegt werden, da sich anhand der gemessenen Temperaturverläufe an Stelle GEML in Abbildung 8-8 und GEMU in Abbildung 8-9 keine nennenswerten Unterschiede zeigen. Für künftige Betrachtungen bzgl. der Lage (oben oder unten) der Teilverschattung von Isoliergläsern kann somit die Unterscheidung entfallen.

8.5.3 Versuch 3

In Abbildung 8-10 sind die aufgezeichneten Temperaturen des Wärmedämmglases ohne Teilverschattung dargestellt. Der Gleichgewichtszustand wird nahezu nach ca. vier Stunden erreicht. Die Unterschiede der Temperaturentwicklung innerhalb der Außen- und Mittelscheibe ist oben und unten annähernd identisch (ca. 3 K Differenz zwischen den oben und unten gemessenen Temperaturen an den Stellen PL3, PL4, PU3 und PU4), während sich für die Innenscheibe deutliche Unterschiede (11 K Differenz zwischen den oben

und unten gemessenen Temperaturen an den Stellen PL5, PL6, PU5 und PU6) zeigen. Hier zeigt sich der Einfluss der schwarzen Folie auf der Glasoberfläche.

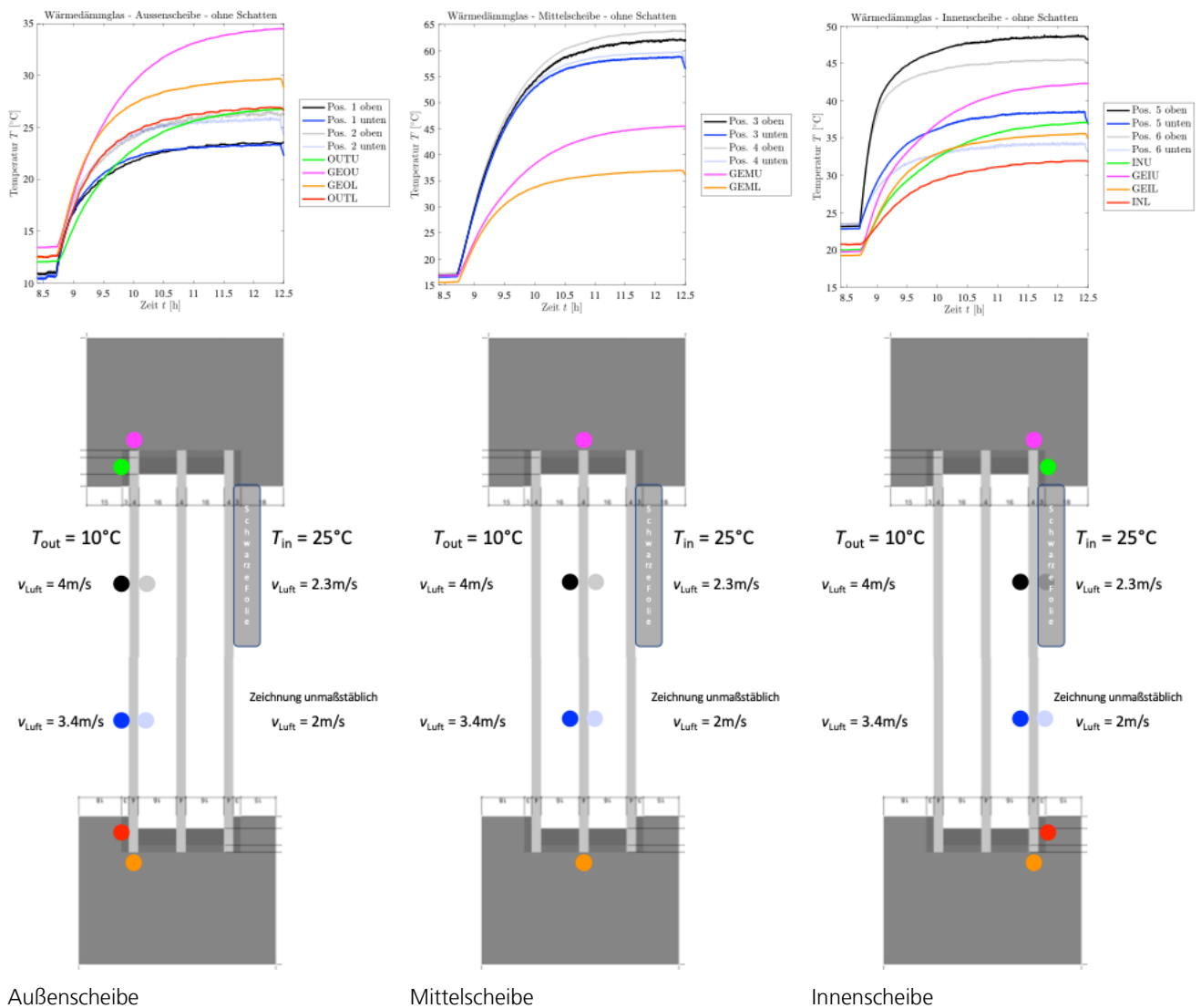


Abbildung 8-10: Versuch 3 - Wärmedämmglas - ohne Teilverschattung, mit schwarzer Folie.

8.5.4 Versuch 4

In Abbildung 8-11 sind die aufgezeichneten Temperaturen des Wärmedämmglases mit unten liegender Teilverschattung dargestellt. Der Gleichgewichtszustand wird nahezu nach ca. vier Stunden erreicht. Durch die eingebaute Verschattung im unteren Bereich des Isolierglases kühlen dort die Gläser entsprechend ab. Die Temperaturen im oberen Bereich des Isolierglases verändern sich nicht nennenswert. Die aufgezeichneten Versuchsdaten zeigen das Verhalten, was zu erwarten war.

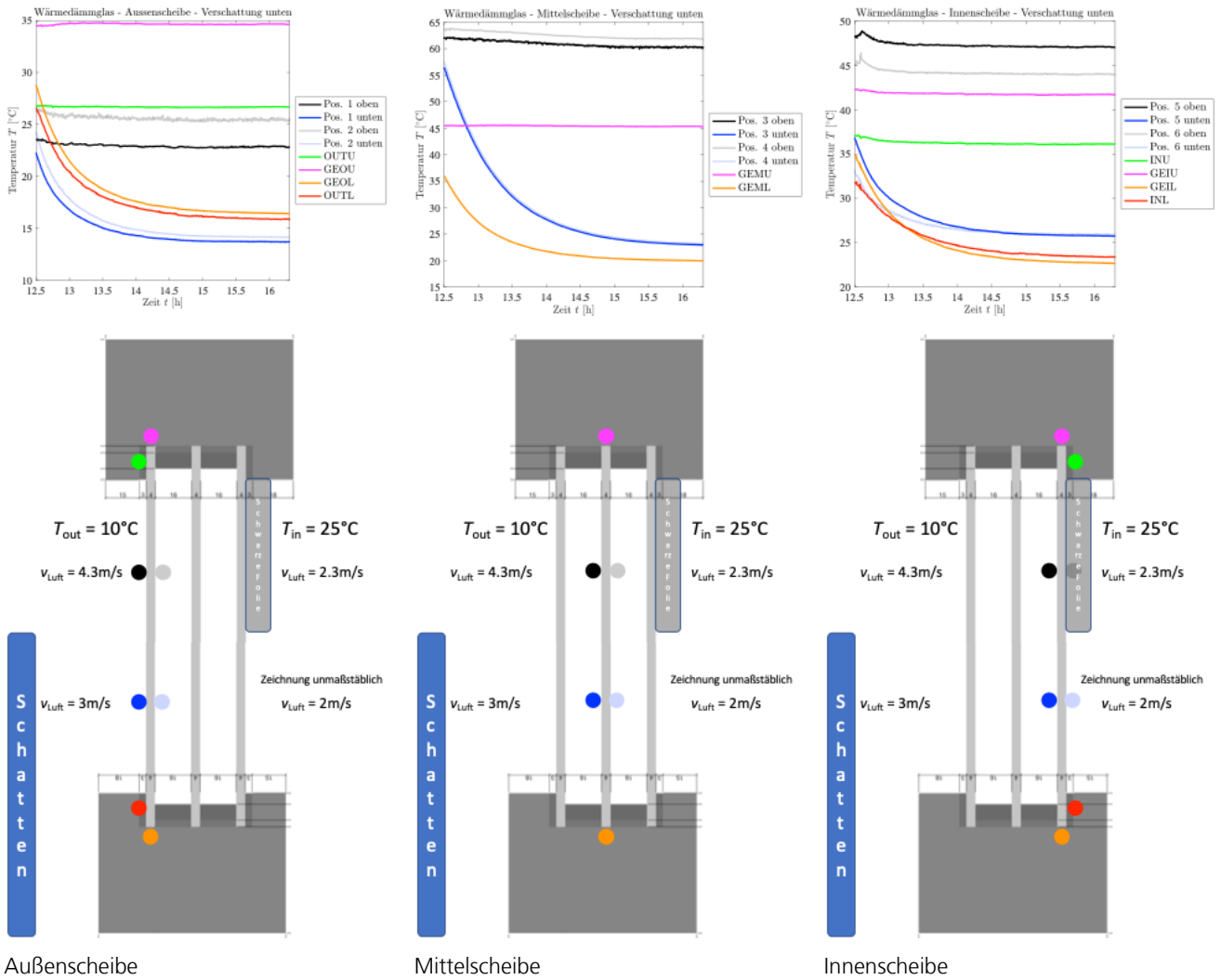


Abbildung 8-11: Versuch 4 - Wärmedämmglas - Teilverschattung unten, mit schwarzer Folie.

8.5.5 Versuch 5

In Abbildung 8-12 sind die aufgezeichneten Temperaturen des Wärmedämmglases mit unten liegender Teilverschattung und oben zusätzlich eingebauter Wärmedämmung dargestellt. Der Gleichgewichtszustand konnte, wie sich anhand der Temperaturen zeigt, nicht erreicht werden. Die Strahlungslampen wurden abends gegen 20:30 Uhr ausgeschaltet.

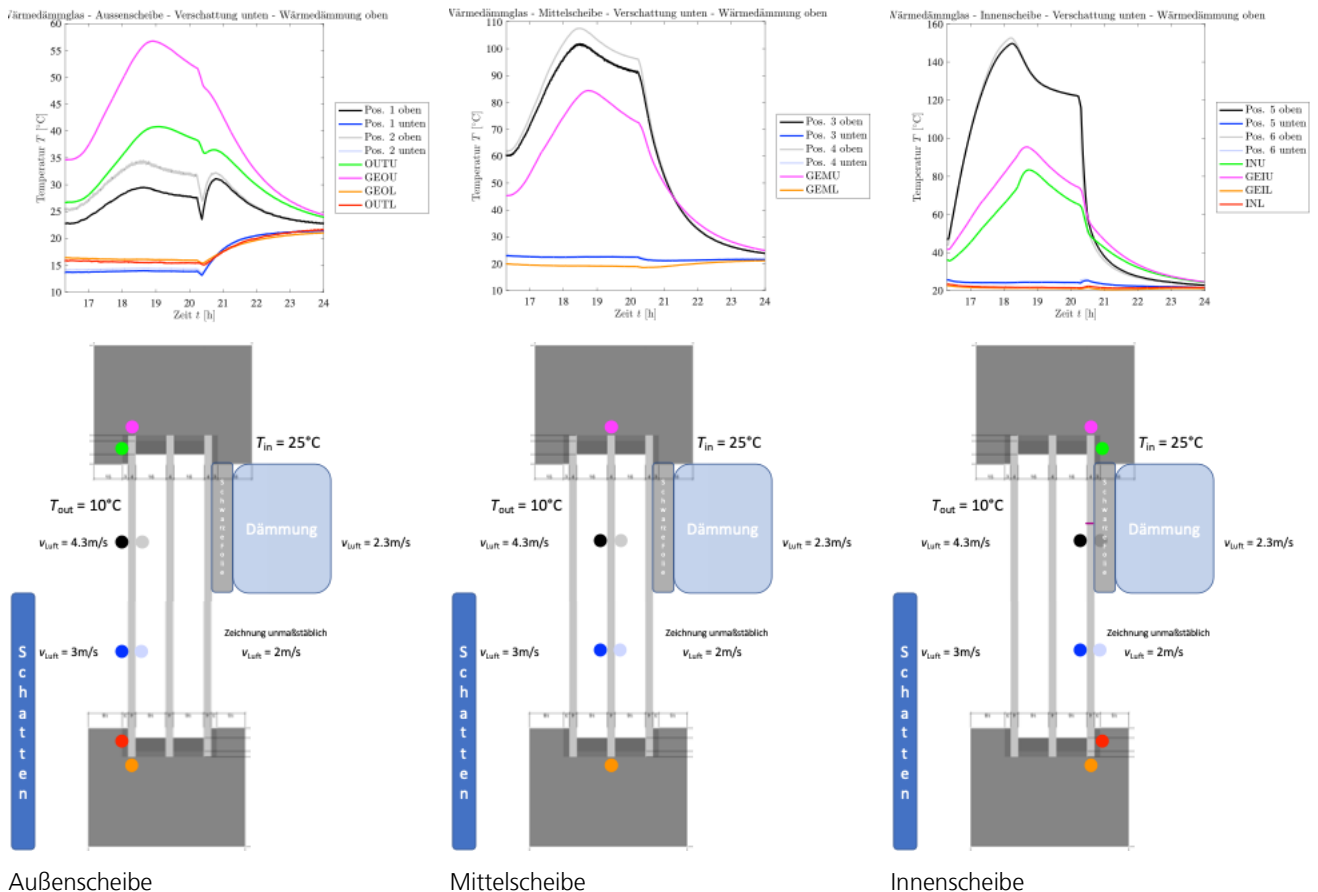


Abbildung 8-12: Versuch 5 - Wärmedämmglas - Teilverschattung unten, Wärmedämmung oben, mit schwarzer Folie.

Wie sich anhand der aufgezeichneten Temperaturen zeigt, resultiert durch den Einbau der Wärmedämmung, welche in direktem Kontakt zum Isolierglas steht, ein starker Temperaturanstieg in allen Glasscheiben. Bei der Außenscheibe zeigt sich, dass die Glaskantentemperatur im Vergleich zur Temperatur in Glasmitte stärker und höher ansteigt. Grund hierfür ist, dass durch die Wärmedämmung der Wärmetransport über den Rahmen reduziert wird und somit ein „Wärmestau“ resultiert. Für die Mittelscheibe zeigt sich, dass die Glaskantentemperatur ähnlich stark ansteigt wie die Temperatur in Glasmitte, wobei letztere im Vergleich zur Glaskante ein höheres Temperaturniveau (ca. 100 °C vs. ca. 80 °C) erreicht. Die aufgezeichneten Temperaturen der Innenscheibe zeigen das gleiche Verhalten, wobei das Temperaturniveau der Glasmitte mit ca. 150 °C nochmals deutlich höher liegt als das der Mittelscheibe.

Nachdem der Versuch gegen 20:30 Uhr beendet war und die Strahlungslampen ausgeschaltet wurden, wurde die Wärmedämmung aus dem Versuchsaufbau entfernt. Es zeigte sich (siehe auch Abbildung 8-13), dass die Wärmedämmung schmolz und sich somit das thermische System veränderte. Dieses Verhalten kann anhand der aufgezeichneten Temperaturen (Zeitpunkt des Schmelzens der Dämmung ca. 18:30 Uhr) und dem zwischenzeitlichen Sinken der Glasktemperaturen nachvollzogen werden.

Außerdem konnte ein thermisch induzierter Bruch der Innenscheibe, welcher sich von der Kante aus fächer- bzw. palmenförmig einstellte, dokumentiert werden (siehe Abbildung 8-14 links und mittig). Zu welchem Zeitpunkt der thermische Bruch stattfand, lässt sich im Nachhinein leider nicht feststellen. Um den Zeitpunkt des Bruchs in künftigen Experimenten dokumentieren zu können, sollte eine Video- und Audioüberwachung der Gläser installiert werden. Die Bruchstruktur (Anzahl der Rissverzweigungen) lässt darauf schließen, dass die Bruchspannung hoch war. Zum Vergleich: bei niedrigen Bruchspannungen kommt es oftmals nur zu wenigen Rissverzweigungen und zusätzlich verlaufen die Risse nicht linear, sondern stark geschwungen durch das Glas.

Der Bruch stellte sich bei ca. 46 cm, gemessen von der Oberkante des Isolierglases (siehe Abbildung 8-14 rechts), ein und lag damit im unverschatteten Bereich, dessen Wärmeentwicklung durch die schwarze Folie

und die Wärmedämmung stark erhöht wurde. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus den numerischen Simulationen (vgl. Anhang A8.2) Die Gegenüberstellung der experimentell und numerisch ermittelten Temperaturen ist im Anhang A8.2 gegeben.



Abbildung 8-13: Wärmedämmglas - Teilverschattung unten, Wärmedämmung oben, mit schwarzer Folie - geschmolzene Wärmedämmung.



Abbildung 8-14: Wärmedämmglas - Teilverschattung unten, Wärmedämmung oben, mit schwarzer Folie - thermisch induzierter Glaskantenbruch der Innenscheibe.

9 Validierungsversuche mit BIPV-Modulen

Im Rahmen von AP 4 wurden mit BIPV-Modulen Experimente zur Validierung der numerischen Modelle und Berechnungsmethoden bzgl. thermisch induzierter Spannungen durchgeführt.

9.1 Versuchseinrichtung

Abbildung 9-1 zeigt die Doppel-Klimawechselkammer im TestLab PV Modules am Fraunhofer ISE. Die zwei Klimakammern (Außen- und Innenmodul) sind durch einen individuell gestaltbaren Probenhalter voneinander trennbar. Dieser kann verschiedene Aufbauten wie Wände, Fassadenelemente oder Verglasungseinheiten aufnehmen, so dass unabhängig voneinander verschiedene Klimaeinstellungen je Kammer vorgenommen werden können. Beispielsweise lassen sich so Fassadenkonstruktionen unter realen Klimaverhältnissen (außen und innen) testen.



Abbildung 9-1: Sicht auf die Doppel-Klimawechselkammer im TestLab PV Modules am Fraunhofer ISE mit Außenmodul (linke Kammer) und Innenmodul (rechte Kammer).

An der Stirnseite des Außenmoduls ist ein Sonnensimulator angebracht, der mit sechs 4 kW-Metall-Halogenidstrahlern (siehe Abbildung 9-2 links) auf der Probenebene eine Grundeinstrahlung von etwa „einer Sonne“, d. h. ca. 1.100 W/m^2 aufbringen lässt, welche elektronisch oder über Filternetze noch variiert werden kann. Im Inneren der Kammer sind Diffusorscheiben (siehe Abbildung 9-2 Mitte) angebracht, die die Homogenität der Einstrahlung durch die sechs Strahlungslampen verbessern. Die örtliche Homogenität liegt in der Klasse B, was vereinfacht gesagt etwa $\pm 10 \%$ entspricht.

Die Höhe der Einstrahlung während der Versuche wurde mit einem Pyranometer vorab in Probenebene ermittelt und lag zwischen 900 W/m^2 und 1.000 W/m^2 .



Abbildung 9-2: Anordnung der Strahlungslampen außerhalb der Doppel-Klimawechselkammer (links) und Solarstrahler mit vorgesetzter Diffusorscheibe im Außenmodul, ausgerichtet auf die Versuchskörper (Mitte); Ansicht auf die Rückseite der Holztafelung hinter den PV-Modulen innerhalb der Prüfkammer im Innenmodul (rechts).

Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt über einen Datenlogger Agilent 34970A mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute (als Mittelwert von 10-s-Messungen). Als Temperatursensoren wurden Thermoelemente vom Typ K (Nickel-Chrom-Nickel) verwendet, sie wurden individuell kalibriert und weisen eine Abweichung < 1 K auf.

Während der Prüfung der BIPV-Module wurden diese durch elektronische Lasten im MPP-Betrieb (Maximum Power Point = maximaler Arbeitspunkt) gehalten, dies geschah mit Hilfe von Lasten des Typs ESL-Solar (siehe Abbildung 9-3).



Abbildung 9-3: Elektronische Last mit Typ ESL-Solar.

9.2 Versuchskörper mit Messstellen

Für die Validierungsversuche von PV-Modulen in AP 4 waren für eine simulierte Anwendung als vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) zwei verschiedene Modulausführungen - jeweils identische Glas-Glas-Module in den Abmessungen $B / H = 120 \text{ cm} / 60 \text{ cm}$ - vorgesehen. Zum einen wurden zwei Module mit einer vollflächigen Zellenbelegung (PERC-Zellen), zum anderen mit einer Zellenteilbelegung, d. h. teiltransparenten Zellstruktur (ebenfalls PERC-Zellen) durch Sunovation gefertigt.

Alle Module wurden mit Temperatursensoren zur Erfassung der im Versuch durch Bestrahlung und konditionierte Raumtemperatur auftretenden Erwärmung ausgestattet. Insgesamt wurden vierzig Thermoelemente, jeweils zehn pro Modul, appliziert. Das Messstellenkonzept sah vor, Thermofühler in der Ebene der Solarzellenrückseite (Bezeichnung Pos. 3_x) direkt hinter einer Zelle, im Zellenzwischenraum, in der Modulmitte, an der Modulkante und in der Modulecke sowie an denselben Stellen auf dem Rückseitenglas (Bezeichnung Pos. 4_x), jeweils übereinanderliegend, anzuordnen.

Das Applizieren im Verbundzwischenraum erfolgte bei Sunovation während der Modulfertigung, die Befestigung der Fühler auf den Rückseitengläsern wurde im Versuchslabor am Fraunhofer ISE durchgeführt. Zur Vermeidung der direkten Bestrahlung von jeweils („unverschatteten“) Messstellen dienten kleine Korkklebepunkte, die jeweilig auf dem Modul-Vorderseitenglas aufgeklebt wurden. Abbildung 9-4 zeigt die Modulausführungen mit der jeweiligen Platzierung der Messstellen inkl. Verkabelung.

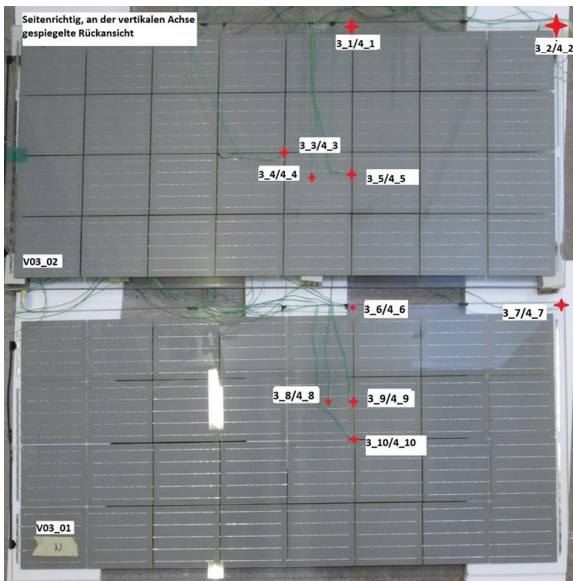


Abbildung 9-4: Modulausführungen und Lage der Messstellen mit vollbelegtem (links) und teilbelegtem (rechts) Zelldesign.

9.3 Versuchsaufbau

Wie eingangs erwähnt wurden die Versuche zur Validierung des FE-Modells für BIPV-Module anhand einer simulierten Anwendung als VHF durchgeführt. Innerhalb eines Versuchsdurchlaufs wurden die beiden identischen (vollbelegten) Module gleichzeitig und mit derselben Ausrichtung übereinander angeordnet getestet. Durch diese Anordnung sollten insgesamt zwei Messwerte („Mini-Statistik“) pro Versuchsdurchlauf und pro Messpunkt redundant ermittelt werden. Zugleich sollte eine VHF im Minimalformat bzw. als Detailausschnitt untersucht werden. Damit das Konzept genauso bei den teilbelegten Modulen mit versehentlich spiegelverkehrt applizierten Thermofühlern so aufging, musste die Module gegeneinander verdreht (mit gegenläufiger Ausrichtung) in den Versuchsstand eingebaut werden (vgl. Abbildung 9-4).

Als Wand zwischen Außen- und Innenmodul der Prüfkammer diente auf der Modulrückseite ein Holzbrett, welches im Abstand von ca. 43 mm hinter den Modulen im Wandausschnitt zwischen Außen- und Innenmodul der Klimawechselkammer angeordnet war. Die Module selbst waren punktförmig mit vier handelsüblichen, individuell montierbaren Klemmhaltern (jeweils zwei Stück an den Längsseiten oben und unten, vgl. Abbildung 9-5, unten rechts) an Alu-Schienen befestigt. Abbildung 9-5 zeigt den Einbau der jeweiligen PV-Module im Versuchsstand. Zur Dokumentation und Messung der Einstrahlung wurde ein Pyranometer auf einem Dreibein eingesetzt (vgl. Abbildung 9-5, oben rechts). Die gemessene Höhe der Einstrahlung lag bei den Versuchen zwischen 900 - 1.000 W/m².



Abbildung 9-5: Jeweils zwei baugleiche Module mit vollflächiger und teiltransparenter Zellbelegung mit punktueller Klemmbefestigung im Versuchsstand.

Abbildung 9-6 zeigt den Versuchsaufbau bei den vollbelegten PV-Modulen, Abbildung 9-7 bei den teilbelegten PV-Modulen nach dem Anbringen der horizontalen und vertikalen Teilverschattung mittels eines dünnen Aluminium-Blechs, das im Abstand von 20 cm vor den Proben mit Gewindestangen gehalten wurde.

Während der Prüfungen wurde die Windgeschwindigkeit der durch die Kammer verursachten Umluftzirkulation mit einem Hitzdrahtanemometer im Abstand von etwa 2 cm vor den Modulen bestimmt und dokumentiert. Zusätzlich erfolgte diese Messung auch im Zwischenraum mittig zwischen Modul und der dahinterliegenden Holzwand.



Abbildung 9-6: Module mit vollflächiger Zellbelegung bei horizontaler und vertikaler Teilverschattung.



Abbildung 9-7: Module mit teilflächiger Zellbelegung bei horizontaler und vertikaler Teilverschattung.

9.4 Versuchsdurchführung

Vor dem Einschalten der Solarstrahler wurden die Versuchsmodule über mehrere Stunden hinweg auf eine Temperatur von ca. 10 °C im Maximum Power Point (MPP), d. h. also im Betrieb mit maximalem Arbeitspunkt, vorkonditioniert. Nachdem sich die Anfangs-Zieltemperatur stabil eingependelt hatte, wurde die Messung gestartet und die Solarstrahler angeschaltet.

Während der kurzen Umbauten zwischen dem unverschatteten Szenario und den verschatteten Szenarien bleiben die Lampen aus technischen Gründen an. Im Folgenden der Ablauf im Detail.

Versuchsdurchlauf 1 mit den vollbelegten PV-Modulen:

- Vorkonditionierung auf 10 °C, unverschattet
- Messbeginn
- Strahlungslampen einschalten und einschwingen (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h) im MPP-Betrieb (d. h. mit max. Arbeitspunkt)
- Umschalten auf OC-Betrieb (d. h. Leerlaufspannung) und einschwingen (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h)
- Strahlungslampen bleiben eingeschaltet: Schatten horizontal und einschwingen der Rand-Thermofühler (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h)
- Strahlungslampen bleiben eingeschaltet: Schatten vertikal und einschwingen der Rand-Thermofühler (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h)
- Versuchsende und Umbau auf „teilbelegte PV-Module“

Versuchsdurchlauf 2 mit den teilbelegten PV-Modulen:

- Vorkonditionierung auf 10 °C, unverschattet
- Messbeginn
- Strahlungslampen einschalten und einschwingen (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h) im MPP-Betrieb
- Umschalten auf OC-Betrieb und einschwingen (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h)
- Strahlungslampen bleiben eingeschaltet: Schatten horizontal und einschwingen der Rand-Thermofühler (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h)
- Strahlungslampen bleiben eingeschaltet: Schatten vertikal und einschwingen der Rand-Thermofühler (Abbruchkriterium: 1 K / 10 min.; max. 1,5 h)
- Versuchsende und Ausbau

9.5 Versuchsauswertung

Abbildung 9-8 und Abbildung 9-9 zeigen die ausgewerteten Messkurven der Thermofühler über jeweils die gesamte Versuchsdauer bei den PV-Modulen mit Zellenvollbelegung. Abbildung 9-10 und Abbildung 9-11 zeigen die Thermofühlermesskurven bei den Modulen mit Zellenteilbelegung.

Ersichtlich ist der jeweilige zeitabhängige Temperaturverlauf und das Einschwingen bei der Vorkonditionierung bei ca. 10 °C über Nacht mit maximalem Arbeitspunkt (Maximum Power Point, MPP) - hier nur ungefähr die letzte Stunde dargestellt -, zum Zeitpunkt des Einschaltens der Solarstrahler (mit unverschatteten Modulen), beim Umschalten in den Leerlaufbetrieb (Open Circuit, OC), beim Umbau für die horizontale Teilverschattung sowie am Ende beim Umbau für die vertikale Teilverschattung.

Zu Abbildung 9-8: In der Ebene der Solarzellenrückseite des mit Zellen vollbelegten unteren Moduls wurde die höchste Temperatur von ca. 46 °C (unverschattet, OC) jeweils im PV-Zellenzwischenraum (T3.9, T3.10) sowie hinter der PV-Zelle (T3.8) gemessen.

Im oberen Modul lagen diese Werte (T3.3, T3.5 und T3.4) als Pendant zwischen ungefähr 33 °C und 35 °C deutlich niedriger. Am geringsten waren die Werte an der Modulkante und in der Modulecke mit ca. 20 °C (unteres Modul) bzw. ca. 10 °C (oberes Modul).

Bei den jeweiligen Teilverschattungen fielen alle Werte unter 20 °C.

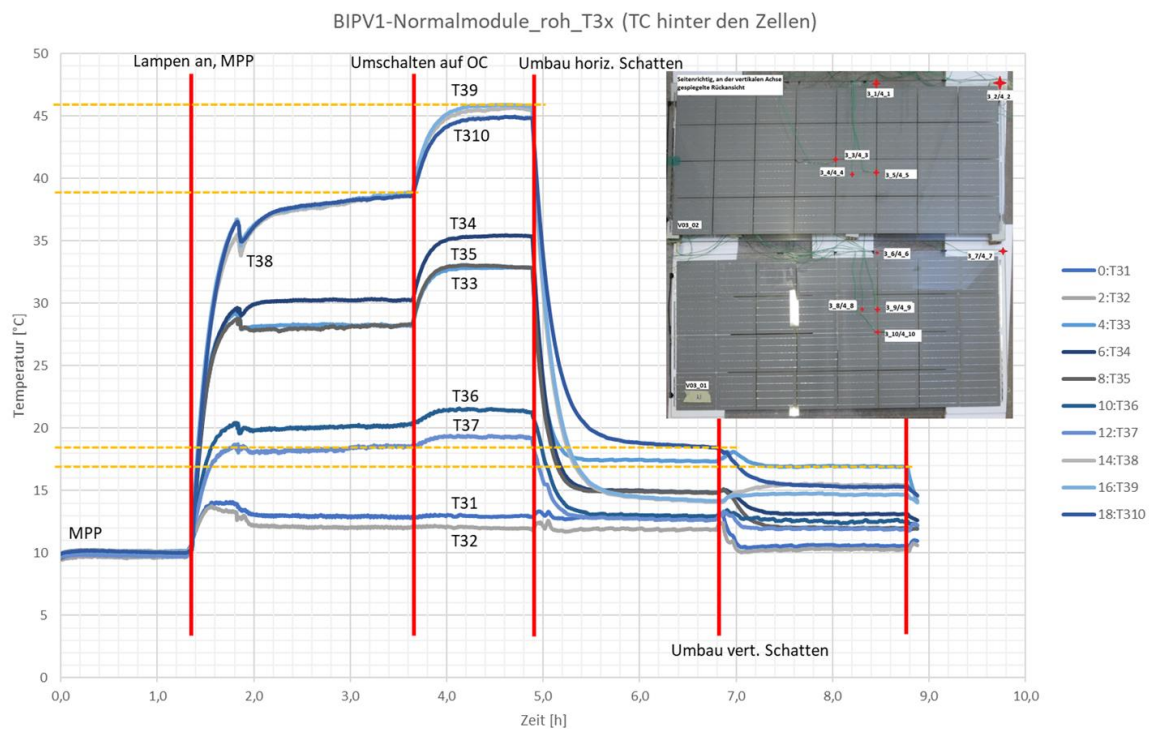


Abbildung 9-8: Ausgewertete Messkurven der Temperatursensoren in der Ebene der Solarzellenrückseite bei Zellenvollbelegung über die gesamte Versuchsdauer.

Zu Abbildung 9-9: Auf der Modulglasrückseite des mit Zellen vollbelegten unteren Moduls hingegen wurde die höchste Temperatur von ca. 42 °C (unverschattet, OC) im PV-Zellenzwischenraum (T4.9, T4.10) gemessen. Der Messfühler hinter der PV-Zelle (T4.8) fiel während des Versuchs ab, daher liegt hier kein Messwert vor.

Im oberen Modul lagen diese Werte (T4.3, T4.5 und T4.4) als Pendant zwischen ungefähr 27 °C und 30 °C ebenfalls wesentlich niedriger. Am geringsten waren die Werte auch hier an der Modulkante und in der Modulecke mit ca. 20 °C (unteres Modul) bzw. ca. 11 °C (oberes Modul).

Bei den jeweiligen Teilverschattungen fielen alle Werte unter den Wert von 17 °C.

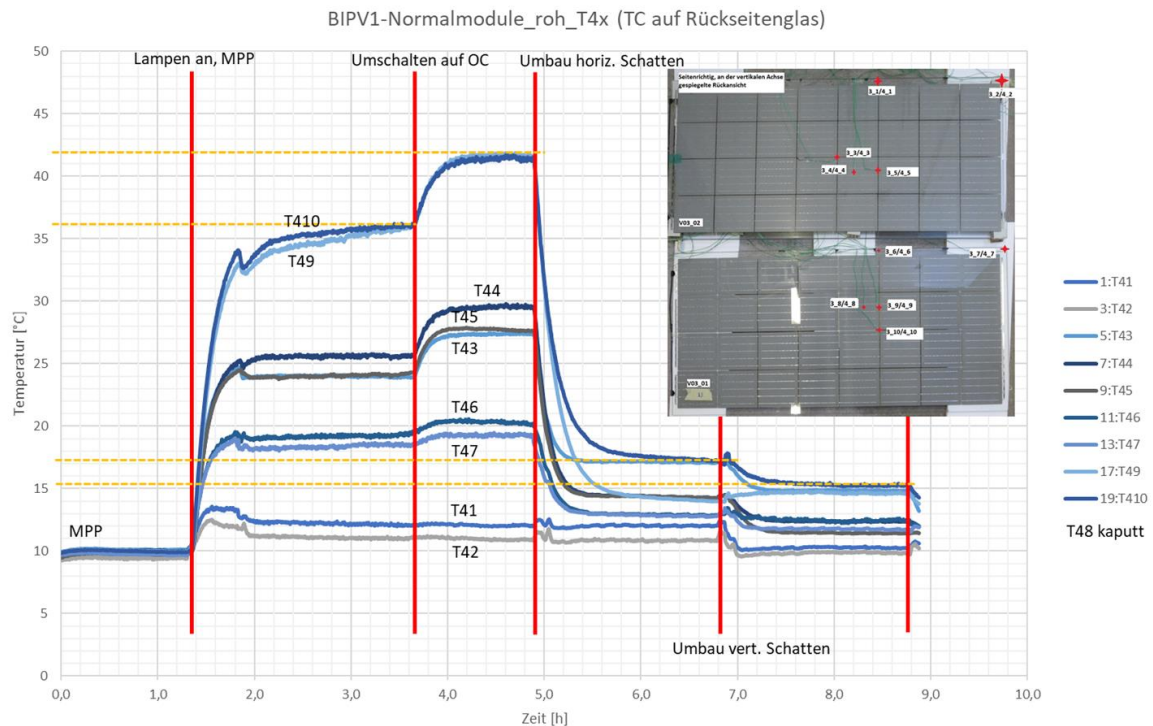


Abbildung 9-9: Ausgewertete Messkurven der Temperatursensoren (ohne T48) auf dem Modulrückseitenglas bei Zellenvollbelegung über die gesamte Versuchsdauer.

Zu Abbildung 9-10: In der Ebene der Solarzellenrückseite des mit Zellen teilbelegten unteren Moduls wurde die höchste Temperatur von ca. 47 °C (unverschattet, OC) hinter der einen PV-Zelle (T3.10) gemessen. Im PV-Zellenzwischenraum (T3.8, T3.9) wurden Werte von ca. 34 °C bis 36 °C erreicht.

Im oberen Modul lagen diese Werte hinter der PV-Zelle mit ca. 34 °C (T3.1) deutlich niedriger und im Zellenzwischenraum (T3.2, T3.3) ähnlich zwischen ungefähr 33 °C und 35 °C. Am geringsten waren die Werte an der Modulkante und in der Modulecke mit ca. 20 °C (unteres Modul) bzw. ca. 10 °C (oberes Modul).

Bei der jeweiligen Teilverschattungen rutschten alle Werte unter den Wert von 17 °C.

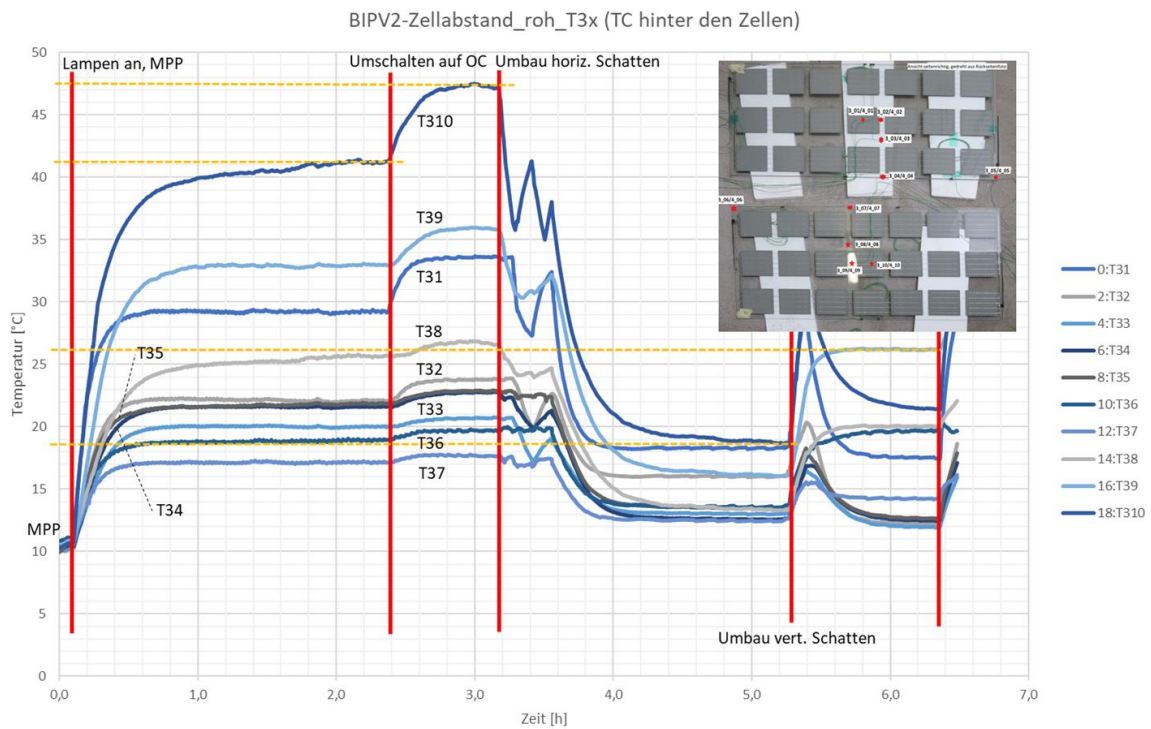


Abbildung 9-10: Ausgewertete Messkurven der Temperatursensoren in der Ebene der Solarzellenrückseite bei Zellenteilbelegung über die gesamte Versuchsdauer.

Zu Abbildung 9-11: Auf der Modulglasrückseite des mit Zellen teilbelegten unteren Moduls wurde die höchste Temperatur von ca. 42 °C (unverschattet, OC) hinter der einen PV-Zelle (T4.10) gemessen. Im PV-Zellenzwischenraum variierten die Werte von T4.9 mit ca. 35 °C und T4.8 mit 27 °C.

Im oberen Modul lagen diese Werte hinter der PV-Zelle mit ca. 26 °C (T4.1) deutlich niedriger und im Zellenzwischenraum (T4.2, T4.3) leicht niedriger bei ungefähr 21 °C. Am niedrigsten waren die Werte an der Modulkante und in der Modulecke mit ca. 18 °C (unteres Modul) bzw. ca. 22 °C (oberes Modul).

Bei der jeweiligen Teilverschattungen rutschten alle Werte unter den Wert von 18 °C.

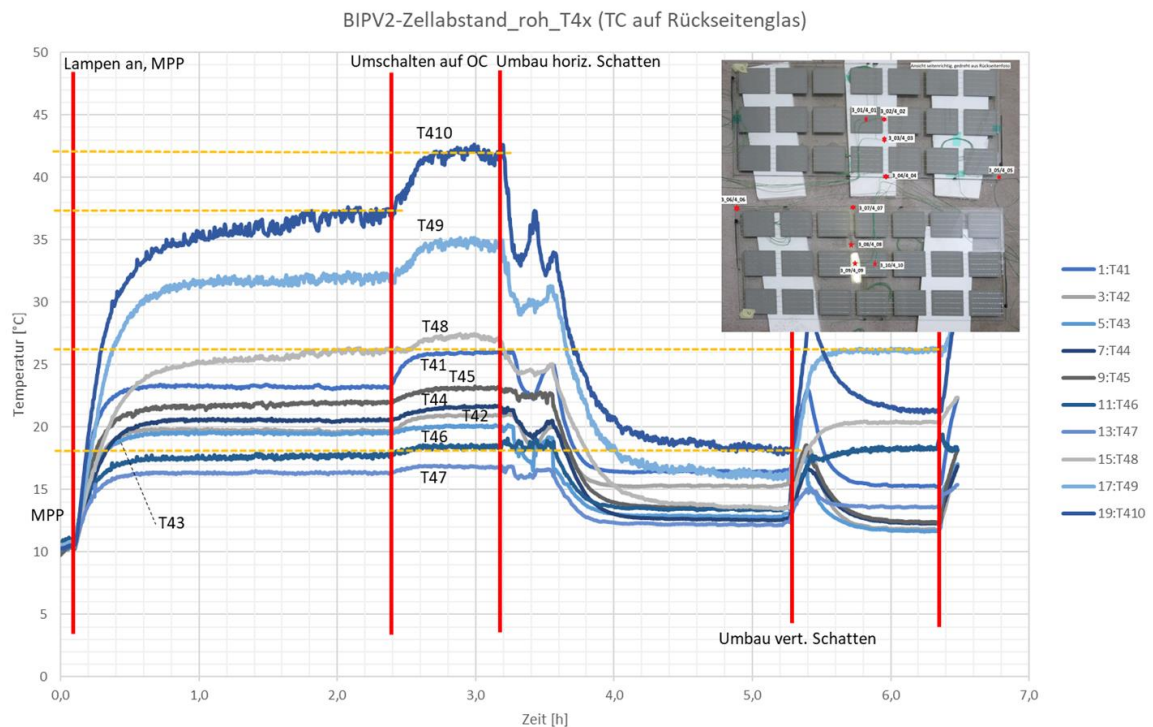


Abbildung 9-11: Ausgewertete Messkurven der Temperatursensoren auf dem Modulrückseitenglas bei Zellenteilbelegung über die gesamte Versuchsdauer.

9.6 Abgleich mit FEM-Simulationen

Die oben beschriebenen Validierungsversuche wurden mit FE-Modellen simuliert. Dafür wurde das in Abschnitt 12 beschriebene FE-Modell so gut wie möglich an den Versuchsaufbau angepasst. Die größte Herausforderung stellte dabei die inhomogene Temperaturverteilung innerhalb der Klimakammer dar, insbesondere hinter den PV-Modulen. Einen wesentlichen Einfluss darauf hatte die Luftströmung. Die Luft strömte oberhalb der Module in die Kammer ein, wurde dann von der Wand abgelenkt und strömte hinter den Modulen nach unten. Dies führte zusammen zu einer inhomogenen Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturverteilung hinter den PV-Modulen.

Um dieses Verhalten in den FEM-Simulationen korrekt abzubilden, wäre eine Fluidodynamik-Simulation notwendig, was den Rahmen des Projektes überschritten hätte. Daher wurde das Verhalten in dem FE-Modell durch die Verwendung von verschiedenen kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten für das obere und untere PV-Modul abgebildet. Die kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten wurden dabei gemäß EN ISO 6946 [24] berechnet. Die dazu benötigten Werte für Temperatur und Windgeschwindigkeit wurden so gut wie möglich im Laufe der Versuche gemessen. Die resultierenden Werte sind in Tabelle 9-1 abgebildet. Da im FE-Modell jeweils ein fester Wert pro PV-Modul angenommen wurde, ohne Berücksichtigung des Gradienten, ist anzunehmen, dass das eine der größten Fehlerquellen bzw. Ursachen für eine Abweichung zu den experimentellen Messdaten sein würde.

Einen weiteren Einfluss auf die FE-Ergebnisse ergab die im Versuch mit einem Alu-Blech umgesetzte Erzeugung der Teilverschattung, wie in Abbildung 9-6 dargestellt. Es zeigte sich in den Versuchen auf den PV-Modulen ein Kern- und ein Halbschatten.

Im FE-Modell wurde dies abgebildet, indem die Einstrahlung innerhalb der Teilverschattung von 100 % auf 0 % reduziert wurde. Dies hat zur Folge, dass für die Temperatursensoren im Bereich der Verschattung, sowie daran angrenzend eine größere Abweichung zu erwarten ist. Für die Einstrahlung wurde der Mittelwert von 920 W/m^2 der gemessenen Einstrahlung verwendet. Die Leerlaufspannung (OC) wurde im FE-Modell über eine Erhöhung der Absorption in der Solarzelle von 0,73 um die Effizienz der Solarzelle (22 %) auf 0,95 realisiert.

Es wurden insgesamt vier FE-Modelle zur Validierung erstellt. Eins für das obere und untere PV-Modul mit jeweils voller und teilweiser Solarzellenbelegung.

Tabelle 9-1: Gemessene Temperatur und Windgeschwindigkeit sowie die daraus gemäß EN ISO 6946 errechneten Wärmeübergangskoeffizienten für das obere und untere PV-Modul.

		Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]				
		Temperatur [°C]	Wind- geschwindigkeit [m/s]	Strahlung	Konvektion	Kombiniert
PV- Modul oben	Vorder- seite	11	4	4,7	20	24,7
	Hinter- seite	12,7	2	4,8	12	16,8
PV- Modul untern	Vorder- seite	13,2	2	4,8	12	16,8
	Hinter- seite	15,6	0,2	4,9	4,8	9,7

Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse der vollbelegten PV-Module (Abbildung 9-12) und dann die der teilbelegten (Abbildung 9-13) dargestellt und diskutiert. Dabei sind jeweils die geschlossenen Symbole mit durchgezogener Linie die Messwerte und die offenen Symbole mit gepunkteter Linie die simulierten Werte. Bei den Messwerten ist der Übersichtlichkeit halber nur jeder 50. Messpunkt eingezeichnet. Der transienten FEM-Simulation ging eine stationäre Simulation voraus, um den Anfangszustand mit Bestrahlung zu ermitteln. Daher beginnen die FEM-Kurven im Gegensatz zu den Messkurven nicht bei 10 °C Umgebungstemperatur. In den Grafiken ist jeweils durch die grauen Linien der Wechsel zum nächsten Versuchsaufbau eingezeichnet. In allen FEM-Simulationen wurde der gleiche zeitliche Ablauf verwendet, während bei den Messungen die genauen Wechsellpunkte leicht variierten, daher sind die Kurven z. T. leicht zueinander verschoben.

Zunächst zur Beschreibung der oberen vollbelegten PV-Module (Abbildung 9-12 obere Reihe): Die simulierten Temperaturen auf Ebene der Solarzellenrückseite beschreiben den gemessenen Temperaturverlauf sehr gut, mit Ausnahme des Messpunktes T3.1, dieser zeigt in der Simulation eine höhere Temperatur, sowie einen Anstieg der Temperatur beim Wechsel von MPP zu OC, welcher in den Messdaten nicht zu sehen ist. Dies könnte auf leicht unterschiedliche Positionen der Auswertung im FE-Modell im Vergleich zur Positionierung der Temperatursensoren im PV-Modul zurückzuführen sein. Die Messpunkte T3.3, T3.4 und T3.5 stimmen sehr gut überein mit einer maximalen Abweichung von 3 K bei Messpunkt T3.3 und einer minimalen Abweichung von 1,7 K bei Messpunkt T3.4.

Auf der Außenseite des Rückseitenglases zeigt sich qualitativ das gleiche Bild, mit dem Unterschied, dass die simulierten Temperaturwerte schon im MPP ca. 4 K über den Messwerten liegt, was darauf hindeutet, dass die bestimmten kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten, auf Grund der sehr inhomogenen Temperatur und Luftströmung in der Klimakammer, zu niedrig sind.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei dem unteren PV-Modul. Hier sind sowohl auf Zellebene als auch auf Glasebene die simulierten Temperaturen von Beginn an auf einem höheren Temperaturniveau. Da bei beiden Schattenarten alle Messpunkte im Schatten liegen, zeigt sich erwartungsgemäß hier kein großer Unterschied zwischen den Messwerten und Simulation. Mit Ausnahme des Messpunktes T3.9, welche sich in der Teilverschattung befindet und nicht exakt nachgebildet wurde. Die Außenseite des Rückseitenglases zeigt im Wesentlichen den gleichen Verlauf.

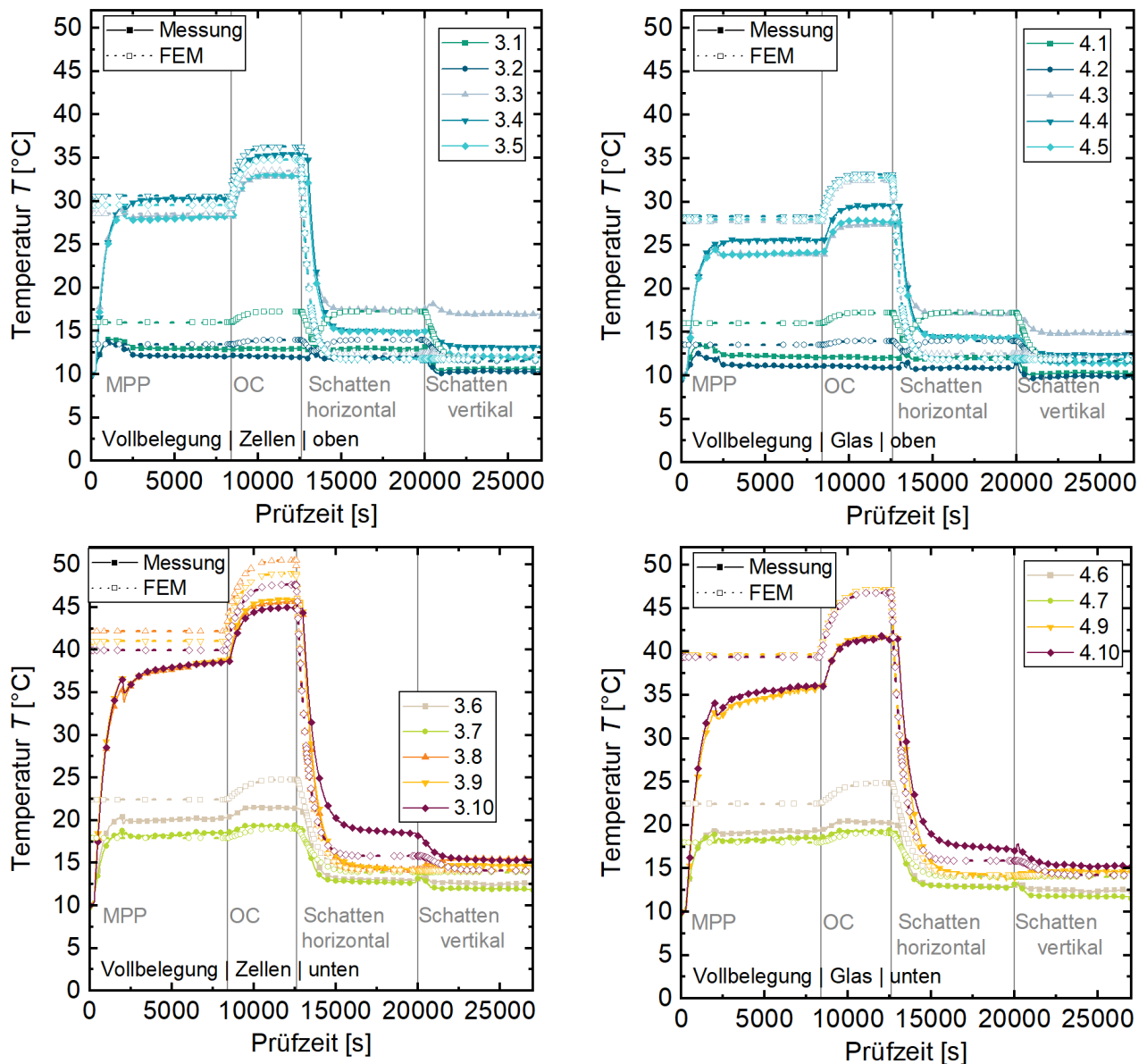


Abbildung 9-12: Abgleich gemessene (durchgehende Linien und geschlossene Symbole) und simulierte (gepunktete Linie und offene Symbole) Temperatur für die vollbelegten PV-Module. Obere Reihe: Modul oben, untere Reihe: Modul unten; linke Spalte: Wert auf Ebene der Solarzellrückseite, rechte Spalte: Wert auf Rückseite des hinteren Glases.

Nun zu den teilbelegten PV-Modulen (Abbildung 9-13 obere Reihe): Hier stimmen bei Messpunkt T3.1 Simulation und Experiment auf zellebene im MPP genau überein, im OC mit einer Abweichung von 1,3 K. Allerdings zeigt sich wieder bei den Verschattungen, dass die Wahl der Verschattungsmodellierung nicht geeignet war, da in der Simulation der Messpunkt komplett verschattet ist, während im Experiment der Messpunkt sich in der Verschattung befinden muss. Überraschend ist hier auch die erhebliche Abweichung der Messpunkte T3.3, T3.4 und T3.5 (Stringzwischenraum und Glasrand): in der Simulation werden diese so gut wie nicht von der Einstrahlung beeinflusst, während in der Messung insbesondere im MPP und OC ca. 22 °C erreicht werden. In der Verschattung nähern sich die Messwerte allerdings bis auf 1 K an die Simulation an, was vermuten lässt, dass die Abschirmung von der Einstrahlung bei diesen Messpunkten nicht vollständig erreicht wurde. Auf der Außenseite des Rückseitenglases zeigt sich im Wesentlichen das gleiche Bild, mit Ausnahme, dass der Messpunkt T3.1 in der Simulation 4,9 K höhere Werte als die Messung hat. Dies lässt wieder auf einen zu niedrig angenommenen kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten schließen.

Zuletzt wird das untere teilbelegte PV-Modul betrachtet (Abbildung 9-13 untere Reihe). Hier stimmen für den Messpunkt T3.10 Simulation und Messung ebenfalls auf Zellebene sehr gut überein. Die Abweichung ist auf Glasebene nur leicht höher, so dass hier die kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten recht gut passen. Dafür weichen die Messpunkte T3.9 und T4.9 5 K bzw. 4 K voneinander ab. Der Messpunkt befindet sich im Zellzwischenraum, wie in Abbildung 9-4 zu sehen. Hier ist der Temperaturgradient sehr hoch, so dass die genaue Positionierung des Messpunktes einen signifikanten Einfluss hat. Die deutlich höhere Temperatur der Messwerte an den Messpunkten T3.8 und T4.8 wird auch auf eine ungenügende Abschirmung zurückgeschlossen, da bei Verschattung Simulation und Messung gut übereinstimmen.

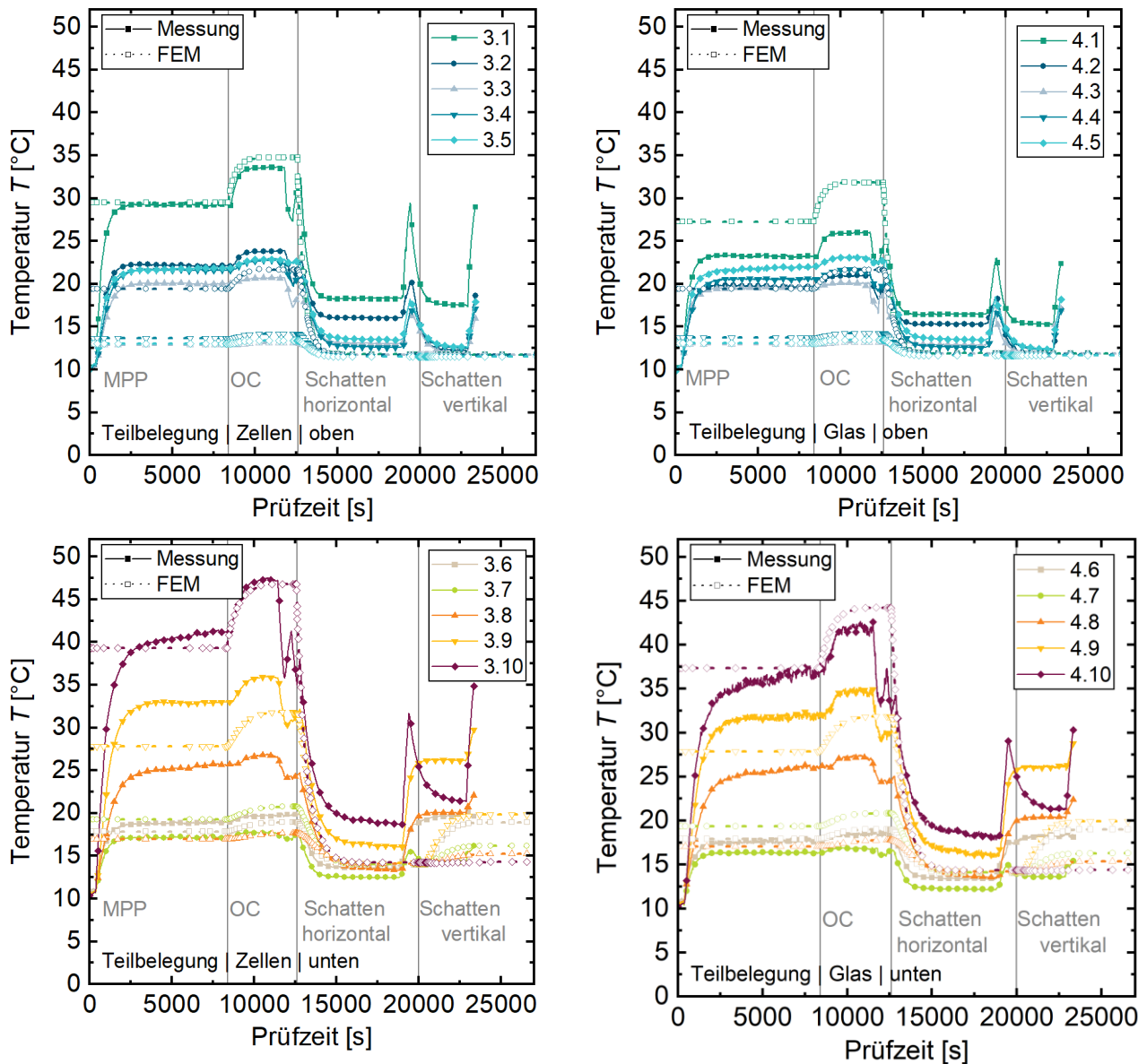


Abbildung 9-13: Abgleich gemessene (durchgehende Linien und geschlossene Symbole) und simulierte (gepunktete Linie und offene Symbole) Temperatur für die teilbelegten PV-Module. Obere Reihe: Modul oben, untere Reihe: Modul unten; linke Spalte: Wert auf Ebene der Solarzellrückseite, rechte Spalte: Wert auf Rückseite des hinteren Glases.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die FEM-Simulation qualitativ die Validierungsversuche sehr gut abbildet. Der quantitative Abgleich gestaltet sich jedoch schwierig, da die inhomogene Temperaturverteilung und Luftströmung in der Simulation nicht abgebildet werden konnten.

10 Modellierung von Verglasungen mittels der Methode der Finiten Elemente

10.1 Einleitung

Für die numerischen Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente wurden thermisch-mechanisch gekoppelte Modelle in ANSYS [2] generiert. Diese beinhalten die Gläser, den Rahmen und den zweistufigen Randverbund des Scheibenzwischenraums. Es wurden zwei- (Flächen) und dreidimensionale (Volumen) numerische Modelle erzeugt. Mit Hilfe dieser FE-Modelle konnten die Parameterstudien (vgl. Abschnitt 11) und die Nachrechnung der Validierungsversuche (vgl. Abschnitt 8 und Abschnitt 10.7) erfolgen.

Die gekoppelte thermisch-mechanische Simulation wurde in drei Schritten durchgeführt, die in Abbildung 10-1 grafisch dargestellt sind. Im ersten Schritt wurde der initiale Temperaturzustand des numerischen Modells über eine thermisch stationäre Berechnung (in der Regel vor Sonnenaufgang) ermittelt. Die dadurch berechnete Temperatur in jedem Knoten des thermisch stationären FE-Modells wurde dann als Starttemperatur auf die Knoten des thermisch transienten FE-Modells übertragen. In der transienten Simulation erfolgte dann durch die zusätzliche Eingabe der solaren Einstrahlungsintensität im Modell die Simulation der Temperaturentwicklung über die Zeit. Die Temperaturen eines jeden Zeitschrittes wurden im Anschluss auf das mechanische Modell übertragen. Dort wurden auf Basis der transient berechneten Temperaturverteilung die thermischen Dehnungen und - über das Elastizitätsgesetz - die thermisch induzierten Spannungen für jeden Zeitschritt ermittelt.

Für die dreidimensionalen FE-Modelle fanden für die Modellierung der Volumenkörper in ANSYS SOLID90 Elemente [1] Verwendung. Die Kontaktdefinition zwischen den Volumenkörpern erfolgte mit Hilfe von CONTA174 und TARGE170 Elementen [1] programmgesteuert. Die thermischen Randbedingungen (Konvektion und Wärmestromdichte) wurden mit Hilfe von SURF152 Elementen [1] abgebildet.

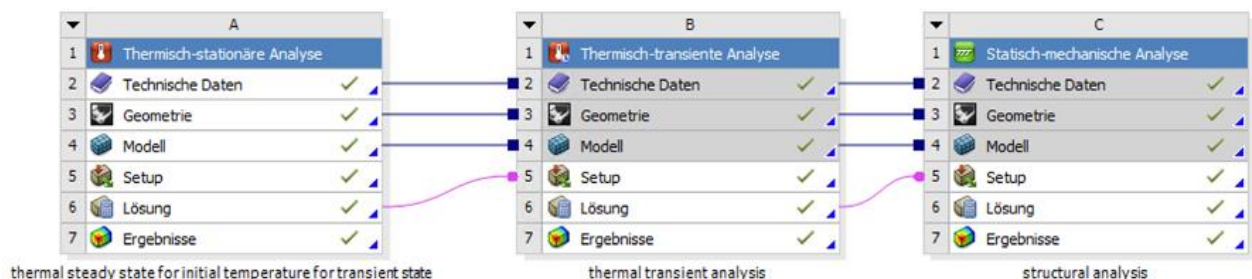
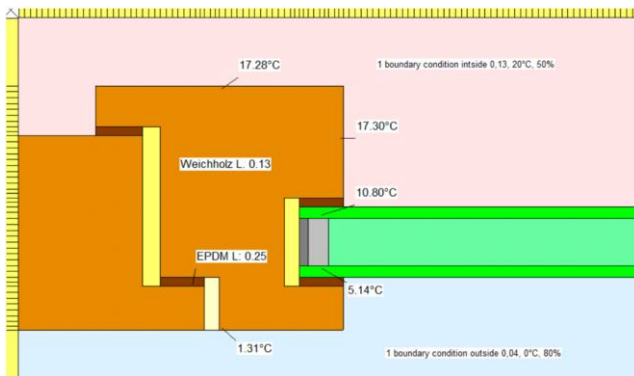


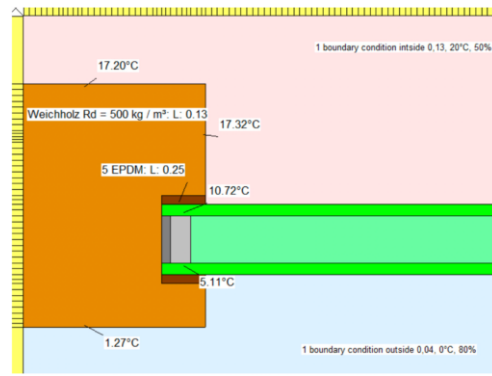
Abbildung 10-1: Berechnungsablauf der gekoppelten thermisch-mechanischen FE-Simulation in ANSYS.

10.2 Berechnung thermisch äquivalenter Fensterrahmen

Um den Modellierungs- und Berechnungsaufwand in den dreidimensionalen Modellen zu reduzieren, wurde die Geometrie und Materialzuweisung der Holz- und Aluminiumrahmen durch das Ingenieurbüro RBGT (im Unterauftrag ISM+D) vereinfacht. Hierbei wurden die geometrischen und wärmetechnischen Eigenschaften der sogenannten thermisch äquivalenten Rahmen mit Hilfe von stationären zweidimensionalen Berechnungen im Berechnungstool WinISO (Sommer Informatik GmbH) ermittelt. Das Kriterium für die thermische Äquivalenz wurde derart definiert, dass die Glaskantentemperaturen für eine gegebene meteorologische Situation identisch sind. In Abbildung 10-2 links ist der unveränderte Holzrahmen gemäß ift-Richtlinie WA-08/1 [35] und in Abbildung 10-2 rechts der dazu ermittelte thermisch äquivalente Holzrahmen dargestellt. Analog ist der unveränderte und thermisch äquivalente Aluminiumrahmen in Abbildung 10-3 dargestellt. Durch zweidimensionale Berechnungen in ANSYS konnten die Geometrie und Materialeigenschaften der thermisch äquivalenten Rahmen, welche durch das Ingenieurbüro RBGT ermittelt wurden, validiert werden. Im Anschluss erfolgte durch diese vereinfachte Geometrie der Einstieg in die dreidimensionalen Berechnungen.

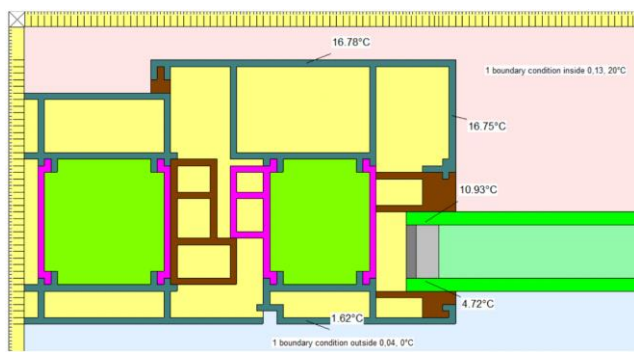


Holzrahmen gem. ift-Richtlinie WA-08/1, Bild A1 [35]

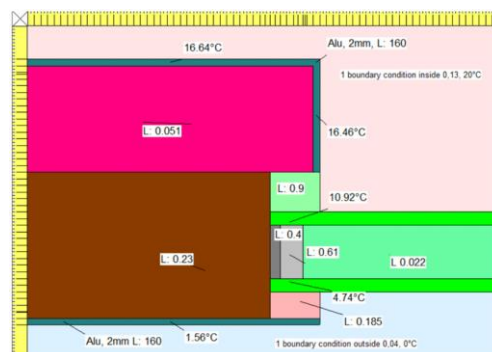


Thermisch äquivalenter Holzrahmen

Abbildung 10-2: Gegenüberstellung des originalen und des thermisch äquivalenten Holzrahmens.



Aluminiumrahmen gem. ift-Richtlinie WA-08/1, Bild A7 [35]



Thermisch äquivalenter Aluminiumrahmen

Abbildung 10-3: Gegenüberstellung des originalen und des thermisch äquivalenten Aluminiumrahmens.

10.3 Modellierung der Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum inkl. Validierung

Der Scheibenzwischenraum (SZR) stellt im numerischen FE-Modell - und auch bei analytischen Berechnungen - eine Besonderheit dar, da es sich hierbei um ein Gas (hier ein Gemisch aus: 90 % Argon und 10 % Luft) und nicht um einen Feststoff handelt. Die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum erfolgt schließlich über die Wärmestrahlung der Glasoberflächen (der Emissionsgrad ist hier die entsprechende Einflussgröße) und die Konvektion des Gases und dessen physikalischen Eigenschaften sowie konstruktiven Randbedingungen (z. B. Breite des Scheibenzwischenraums). Die Konvektion wiederum ist ein Resultat aus der Strömungsgeschwindigkeit des Gases. Mit Hilfe der Gleichungen von EN 673 [21] kann der Wärmetransport und die damit verknüpften Wärmeübergangskoeffizienten infolge Strahlung und Konvektion temperaturabhängig berechnet werden. Für die Wärmestrahlung wird dabei eine Linearisierung über eine Taylor-Reihenentwicklung [26] vorgenommen, welche ausreichend genaue Ergebnisse liefert und die Berechnung stark vereinfacht. Durch die Linearisierung der Wärmestrahlung dürfen die Übertragungsmechanismen von Konvektion (linear) und Strahlung überlagert (Superposition) werden, wie in [21] definiert. Mit Hilfe von Konvektionsrandbedingungen, welche mit überlagerten Wärmeübergangskoeffizienten gespeist werden, kann die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum eindimensional berechnet werden. Ebenfalls ist es möglich – wenn der überlagerte Wärmeübergangskoeffizient bekannt ist – eine resultierende äquivalente Wärmeleitfähigkeit für das Füllgas zu ermitteln und das Füllgas selbst als Festkörper zu modellieren (übliche Vorgehensweise der bauphysikalischen Praxis bei thermischen Berechnungen bei energetischen Betrachtungen).

Für die im Rahmen des Projekts durchgeführten numerischen Simulationen in ANSYS wurde auf die Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit und die damit verbundene Modellierung eines Festkörpers zur Repräsentation des Füllgases verzichtet. Grund hierfür ist, dass die Lösung, sprich die resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten in jedem Fall im Vorhinein berechnet werden müssen und

eine anschließende neue Modellierung mit Festkörper(n) im SZR aufwändiger wäre. Um sicherzustellen, dass diese Vorgehensweise valide Ergebnisse liefern kann, wurde für verschiedene Isoliergläser (Wärmedämm- und Sonnenschutzgläser, horizontal wie vertikal) der Wärmedurchgangskoeffizient U_g gemäß EN 673 [21] über numerische Simulationen berechnet und mit Hilfe der analytischen Berechnung sowie der Berechnung mit Hilfe des Programms WinSLT (Sommer Informatik GmbH) abgeglichen.

In Abbildung 10-4 ist das „quasi-eindimensionale“ FE-Modell für die Validierung der Wärmeübertragung im SZR dargestellt. Hierbei wird ein Dreifach-Isolierglas mit seinen drei Einzelscheiben mit jeweils 4 mm Nenndicke betrachtet. Jedes Glas wird in der Fläche mit einem finiten Element und über seine Dicke mit drei finiten Elementen örtlich diskretisiert. Die Bezeichnung „quasi-eindimensional“ bedeutet, dass zwar das Modell selbst dreidimensional ist, jedoch Rahmen und Randverbund nicht modelliert werden und man sich somit in der ungestörten Glasmitte („weit entfernt“ von Rahmen und Randverbund) befindet, welche eindimensional berechnet werden kann (vgl. NF DTU 39 P3). Allgemein wird diese Vorgehensweise damit begründet, dass die Wärmeübertragung ausschließlich im zentralen Glasbereich betrachtet wird und störende Randeffekte, die aus Rahmen und Randverbund resultieren, vernachlässigt werden dürfen. Gleichzeitig wird dabei die Annahme getroffen, dass das Isolierglas entsprechend große Abmessungen (kein Grenzwert in EN 673 definiert) aufweist. Diese Art und Weise der Modellierung der Wärmeübertragung wurde für alle später folgenden Simulationen beibehalten. Eine detailliertere Untersuchung der Wärmeübertragung im Randbereich (in der Nähe der Abstandhalter) wurde nicht durchgeführt. Es wurde angenommen, dass die Konvektion im Randbereich niedriger sein wird, jedoch schließlich dieser Einfluss auf die thermisch induzierten Spannungen vernachlässigbar ist.

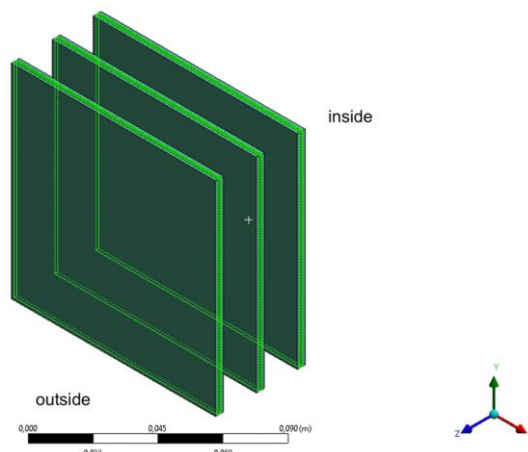


Abbildung 10-4: „Quasi-eindimensionales“ numerisches ANSYS-Modell zur Validierung über eine U_g -Wert-Berechnung.

Für die numerische Berechnung des U_g -Werts in ANSYS wurden zur Wärmeübertragung über den SZR auf den zu den Scheibenzwischenräumen hin orientierten Glasoberflächen (Pos. 2 und 3 sowie Pos. 4 und 5, vgl. Abbildung 10-5) Konvektionsrandbedingungen mit kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten angesetzt. Diese Randbedingungen erfordern die Eingabe von Umgebungstemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten, welche zunächst unbekannt sind und über eine iterative Berechnung ermittelt werden müssen. Dabei entspricht die Umgebungstemperatur für die Konvektionsrandbedingung von Pos. 2 dem berechneten Temperaturergebnis von Pos. 3 ($T_{\text{Umgebungstemperatur der Pos.2}} = T_{\text{Oberflächentemperatur der Pos.3}}$) und umgekehrt. Dies gilt ebenso für den SZR mit den Pos. 4 und 5. In der ersten Berechnung (Iterationsschritt 0) wurden die Oberflächentemperaturen, wie in Abbildung 10-5 dargestellt, gewählt (initialer Schätzwert, basierend auf den inneren und äußeren Umgebungstemperaturen). Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse der Oberflächentemperaturen von Iteration 0 auf die Umgebungstemperaturen der Konvektionsrandbedingungen für Iterationsschritt 1 übertragen. Die Oberflächentemperaturen der Konvektionsrandbedingungen wurden in jedem Iterationsschritt angepasst, bis die Wärmestromdichte (z-Richtung vgl. Abbildung 10-4) durch jede Glasscheibe des numerischen Modells den gleichen Wert angenommen haben (Konvergenzkriterium, stationärer Zustand ohne Sonneneinstrahlung). Die Wärmestromdichte wurde am mittleren Element jeder Glasscheibe ausgewertet.

Abbildung 10-6 zeigt, dass sowohl die Oberflächentemperaturen der einzelnen Gläser als auch die Wärmestromdichten in den einzelnen Glasscheiben ab dem dritten Iterationsschritt sehr gut konvergieren.

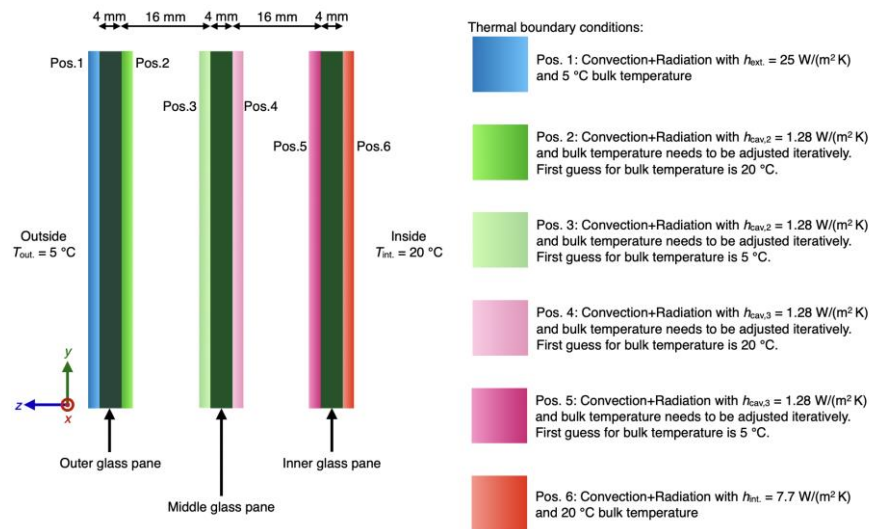


Abbildung 10-5: Konvektionsrandbedingungen mit kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten auf „quasi-eindimensionalem“ FE-Modell für Wärmeübertragung im SZR im Schnitt dargestellt.

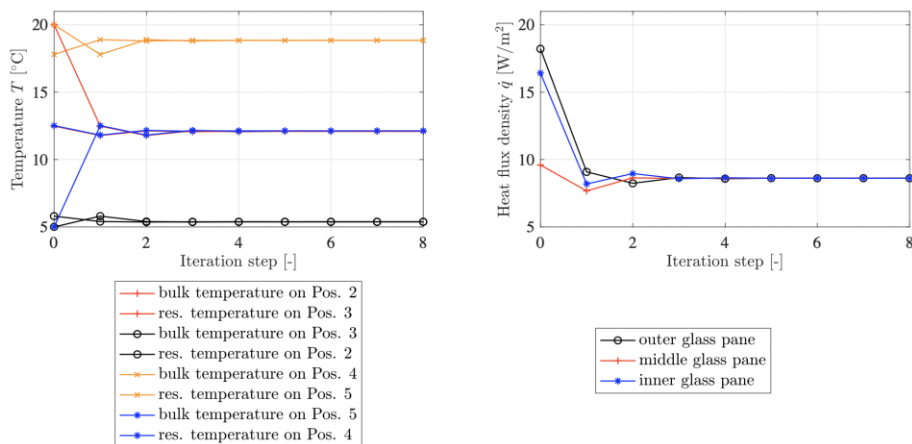


Abbildung 10-6: Ergebnis der iterativen Berechnung der Wärmeübertragung im SZR. Links: Umgebungs- und Oberflächentemperaturen für die Konvektionsrandbedingungen mit kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten für den SZR einer Dreifach-Isolierglaseinheit, rechts: Wärmestromdichte in jeder Glasscheibe.

Wie sich im Vergleich zwischen der numerischen und der analytischen Berechnung mit den Gleichungen (10-1) und (10-2) zeigt, resultiert das gleiche Ergebnis für den U_g -Wert. Die Wärmeübertragung im SZR kann schließlich mit Hilfe von Konvektionsrandbedingungen mit kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten über eine temperaturabhängige - und damit iterative - Berechnung valide erfolgen.

$$U_{g, \text{numerisch}} = \frac{\dot{q}}{\Delta T} = \frac{8,617 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{15\text{K}} \approx 0,57 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (10-1)$$

$$U_{g, \text{analytisch}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{ext.}}} + \frac{1}{h_{\text{cav},1}} + \frac{1}{h_{\text{cav},2}} + \frac{1}{h_{\text{int.}}} + 3 \cdot \frac{d_{\text{Glas}}}{\lambda_{\text{Glas}}}} \quad (10-2)$$

$$U_{g,\text{analytisch}} = \frac{1}{\frac{1}{25} + 2 \cdot \frac{1}{1,28} + \frac{1}{7,7} + 3 \cdot \frac{0,004}{1}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,57 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

10.4 Stationäre Berechnung des initialen Ausgangszustandes vor Sonnenaufgang

Im ersten Schritt wurde die für die thermisch transiente Berechnung benötigte Starttemperaturverteilung im numerischen Volumenkörpermodell bestimmt, wobei der Zeitpunkt kurz vor Sonnenaufgang verwendet wurde (vgl. Abbildung 10-1). Die Berechnung der Starttemperaturverteilung erfolgte über eine thermisch stationäre Berechnung ohne Sonneneinstrahlung und ohne Verschattung. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient wurde mit $10,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ angenommen (basierend auf [39]). Die äußere Umgebungstemperatur wurde gemäß der betrachteten meteorologischen Situation angepasst (siehe Abschnitt 11.2.1 und Abbildung 11-1). Der innere Wärmeübergangskoeffizient wurde gemäß EN 673 [21] und in Anlehnung an NF DTU 39 P3 [39] mit $7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ gewählt. Die Innentemperatur wurde für jede meteorologische Situation (vgl. Abbildung 11-1) mit $20 \text{ }^\circ\text{C}$ konstant angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient im Scheibenzwischenraum wurde für das Zweifach-Isolierglas zu $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und für das Dreifach-Isolierglas zu $1,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ zunächst konstant angesetzt. Diese Wärmeübergangskoeffizienten wurden nach den Vorgaben der EN 673 [21] berechnet und für alle Berechnungen vorläufig konstant angenommen, um die Simulationen zu vereinfachen.

In Abbildung 10-7 sind die Konvektionsrandbedingungen exemplarisch für eine Dreifach-Isolierglaseinheit in einem Querschnitt zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass an den Oberflächen der Abstandhalter keine Randbedingungen angesetzt wurden, da sich der jeweils gegenüberliegende Abstandhalter aufgrund der Symmetrie auf dem gleichen Temperaturniveau befindet und somit kein Wärmestrom zwischen den gegenüberliegenden Abstandhaltern stattfindet.

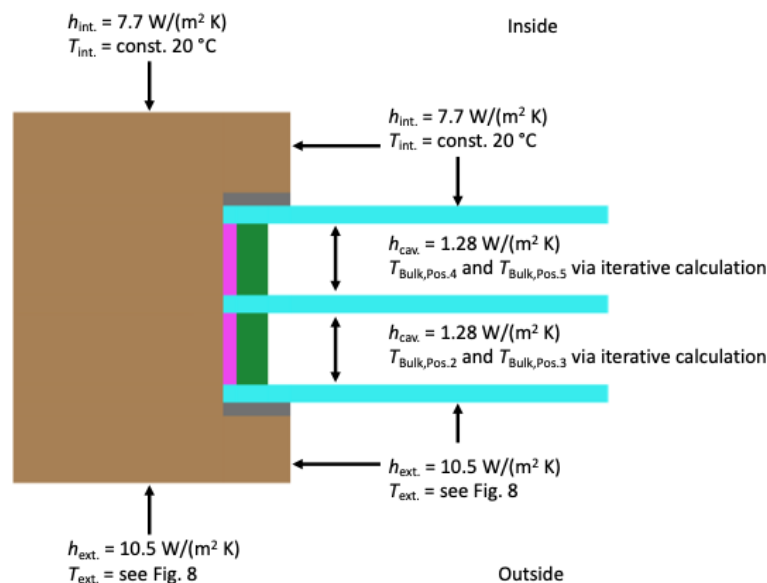


Abbildung 10-7: Konvektionsrandbedingungen für thermische stationäre und thermisch transiente Simulationen, beispielhaft für eine Dreifach-Isolierglaseinheit mit vereinfachtem Holzrahmen.

Die Umgebungstemperaturen für die Konvektionsrandbedingungen auf den den Scheibenzwischenraum zugewandten Glasflächen wurden so lange neu berechnet (iterative Vorgehensweise), bis die Differenz zwischen der Eingabe (Umgebungstemperatur der Konvektionsrandbedingung) und dem Ergebnis (Temperatur der gegenüberliegenden Glasfläche) nahezu null betrug (Kriterium: Änderung $< 0,001 \text{ K}$). Diese Vorgehensweise orientiert sich an der NF DTU 39 P3 [39], wobei dort zusätzlich die Temperaturabhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt wird. Sobald die Iterationen abgeschlossen waren, ergab sich die Starttemperaturverteilung für die thermisch transiente Simulation.

10.5 Transiente Berechnung nach Sonnenaufgang

Im Rahmen der thermisch transienten Simulationen wurden die Randbedingungen der solaren Einstrahlung im numerischen Modell ergänzt. In ANSYS wurden dafür sogenannte Wärmestromdichten auf den unverschatteten projizierten Glasoberflächen und Rahmenoberflächen definiert.

Bei Betrachtung des Sonnengangs um eine vertikale z. B. in Richtung Süden orientierte Verglasung ergibt sich, dass die verschiedenen Oberflächen der Verglasung in verschiedene Orientierung ausgerichtet sind. So sind z. B. die vertikalen Rahmenleibungen der in Richtung Süd orientierten Glasoberfläche zum einen in Richtung Ost, als auch in Richtung West orientiert (vgl. Abbildung 10-8). In Bezug auf die nördliche Hemisphäre werden morgens schließlich die in Richtung Osten orientierten Oberflächen und nachmittags die in Richtung Westen orientierten Oberflächen durch die Sonne bestrahlt, was in Abbildung 10-8 dargestellt ist. Ob die solare Einstrahlung auf die, im Vergleich zur Verglasung, andersartig orientierten Oberflächen (Rahmenleibungen und Abstandhalteroberflächen) ebenfalls berücksichtigt werden sollte, wurde mit Hilfe einer kurzen Studie untersucht.

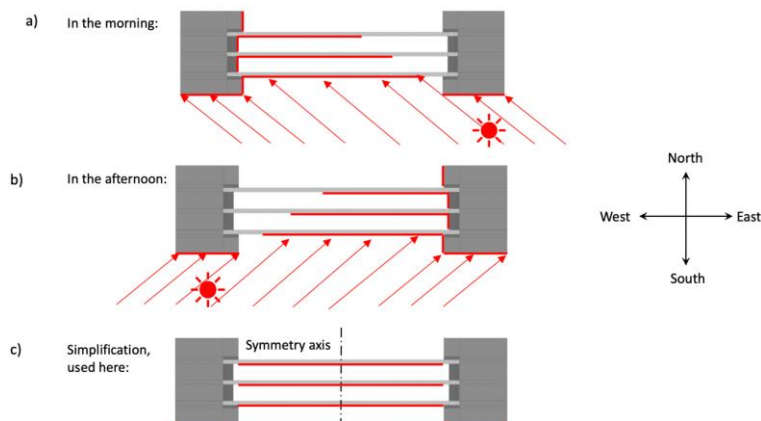


Abbildung 10-8: Solare Einstrahlung auf Verglasung unter Berücksichtigung des Sonnengangs über den Tag.

Diese numerische Studie wurde für ein Zweifach-Wärmedämmglas (mit der low-e Beschichtung iplus 1.1 auf Position 3) mit 7 % Absorption beider Gläser in einer Süd-Ost-Ausrichtung durchgeführt. Hierbei wurde auf die Rahmenoberflächen die solare Einstrahlung in Abhängigkeit der Orientierung der Oberflächen berücksichtigt (sinngemäß dargestellt in Abbildung 10-8 a und b). Es zeigt sich anhand der Ergebnisse in Abbildung 10-9, dass die Vernachlässigung der solaren Einstrahlung auf den Rahmen- und Abstandhalteroberflächen, zu höheren thermisch induzierten Spannungen führt. Es wurde basierend auf diesen Ergebnissen im Projektkonsortium beschlossen, dass die solare Einstrahlung nur auf die Oberflächen angesetzt wird, die in die betrachtete Fassadenausrichtung hin orientiert sind (siehe Abbildung 10-8 c), um die Berechnungen zu vereinfachen und um Ergebnisse zu erhalten, die auf der „sicheren Seite“ liegen.

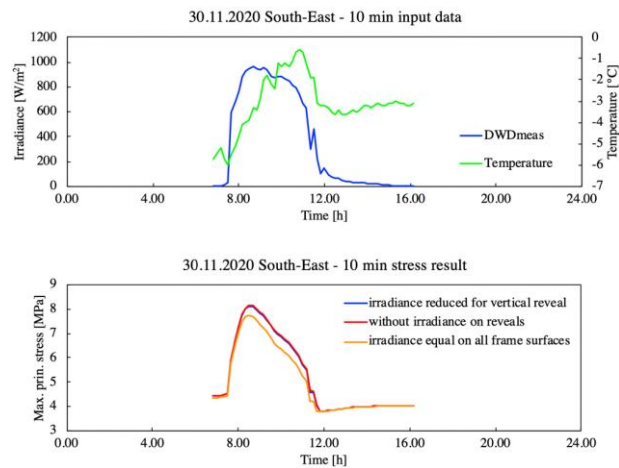


Abbildung 10-9: Eingangsdaten und Ergebnis der thermisch induzierten Spannung mit und ohne Berücksichtigung der solaren Einstrahlung auf Rahmenleibungen für eine in Richtung Süd-Ost orientierte Verglasung.

Für alle weiteren numerischen Simulationen wurde schließlich die solare Einstrahlung nur noch auf die projizierten Oberflächen angesetzt. In Abbildung 10-10 ist dies an einem Schnitt durch die Verglasung inkl. Rahmen und Abstandhalter veranschaulicht.

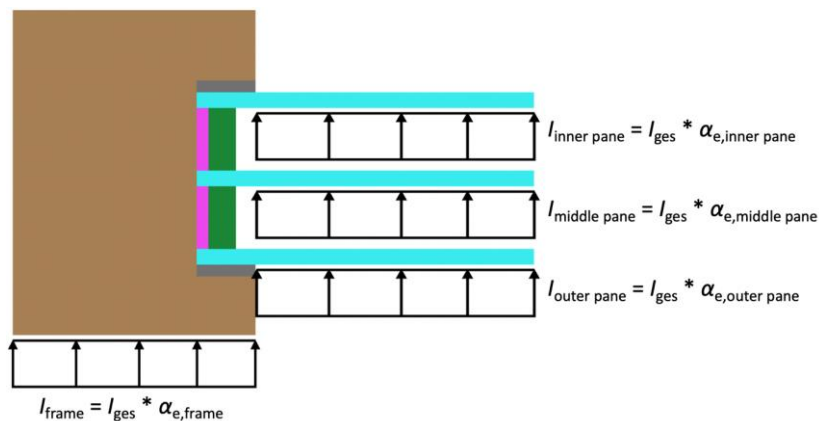


Abbildung 10-10: Wärmestromdichte-Randbedingungen für numerische Simulation zur vereinfachten Erfassung der solaren Einstrahlung.

Wie sich anhand von Abbildung 10-8 zeigt, resultiert durch die Konstruktion selbst eine zeitlich variable Teilverschattung. Die Thematik des Vorhandenseins von Schatten wird in später in Abschnitt 11.3 näher untersucht.

10.6 Berechnung der thermisch induzierten Spannungen

Im nächsten Schritt wurden die Temperaturen der einzelnen Zeitschritte aus der thermischen transienten Berechnung auf das mechanische FE-Modell (vgl. Abbildung 10-1) in ANSYS übertragen. Im mechanischen FE-Modell wurden die Volumenkörper für den Holzrahmen und seine Bestandteile sowie die Volumenkörper des Isolierglas-Randverbunds nicht berücksichtigt, weil eine freie Wärmeausdehnung der Verglasung innerhalb des Rahmens (x-y-Ebene vgl. Abbildung 10-11) angenommen wurde. Diese starke Vereinfachung ließ sich damit begründen, dass im hier betrachteten Fall von einer sogenannten stehenden Verglasung ausgegangen wurde. Außerdem wurde unterstellt, dass der zweistufige Randverbund (bestehend aus dem Abstandhalter mit Polyisobutylen als Primärdichtung und Polysulfid als Sekundärdichtung) nur eine geringe Schubsteifigkeit aufweist und somit der Ausdehnung der Einzelscheiben in der x-y-Ebene nicht entgegenwirkt. Die Einzelscheiben wurden mit Hilfe von drei Verschiebungsrandbedingungen gelagert, die in der folgenden Abbildung 10-11 grafisch dargestellt sind.

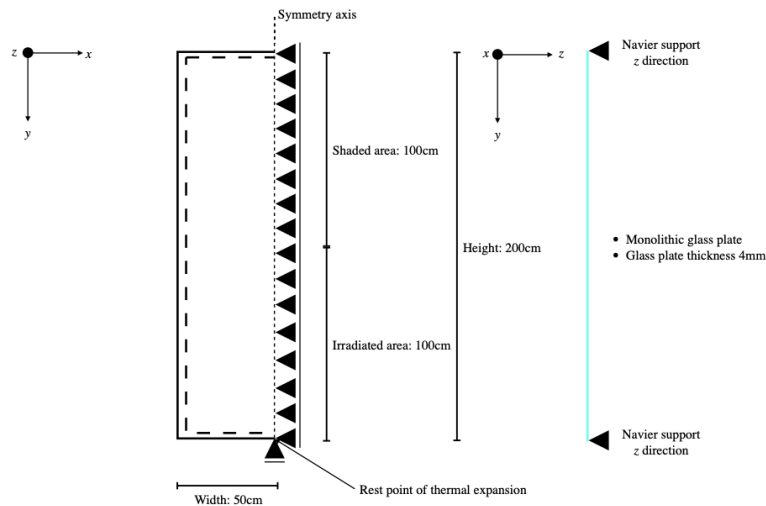


Abbildung 10-11: Statisches System für die äußere, mittlere und innere Scheibe unter Ausnutzung der Symmetrie für Doppel- und Dreifach-Isolierglaseinheiten.

Die Randbedingungen für die mechanische Berechnung werden wie folgt zusammengefasst:

- Umlaufende gelenkige Lagerung an den Glaskanten (C-förmig wegen der Ausnutzung der Symmetrie) senkrecht zur Glasebene, was einer Festhaltung in z-Richtung entspricht,
- unverschiebliche Lagerung in x-Richtung auf der Symmetrieffläche des numerischen FE-Modells,
- unverschiebliche Lagerung in y-Richtung eines Eckknotens (hier auf der Symmetrieachse).
- Die Verglasungsklotze wurden in der mechanischen Simulation vernachlässigt. Es ist anzumerken, dass das reale mechanische System, bestehend aus Isolierglas, Verglasungsklotz, Randverbund und Rahmen, wahrscheinlich eine höhere Steifigkeit in der x-y-Ebene aufweist als das numerische FE-Modell, bei dem diese Komponenten (Rahmen, Randverbund und Verglasungsklotze) vernachlässigt wurden. Es wird vermutet, dass durch die Verglasungsklotze die resultierenden Spannungen sowohl größer (infolge von lokalen Spannungskonzentrationen) als auch kleiner ausfallen können (infolge der Verhinderung der Ausdehnung in der x-y-Ebene).

Vor den thermisch-mechanischen Simulationen wurde eine Studie zur geometrischen Diskretisierung des FE-Modells durchgeführt, wobei die thermisch induzierte Spannung an der Glaskante als Konvergenzkriterium verwendet wurde. Abbildung 10-12 bis Abbildung 10-14 stellen die Ergebnisse der Netzstudie dar.

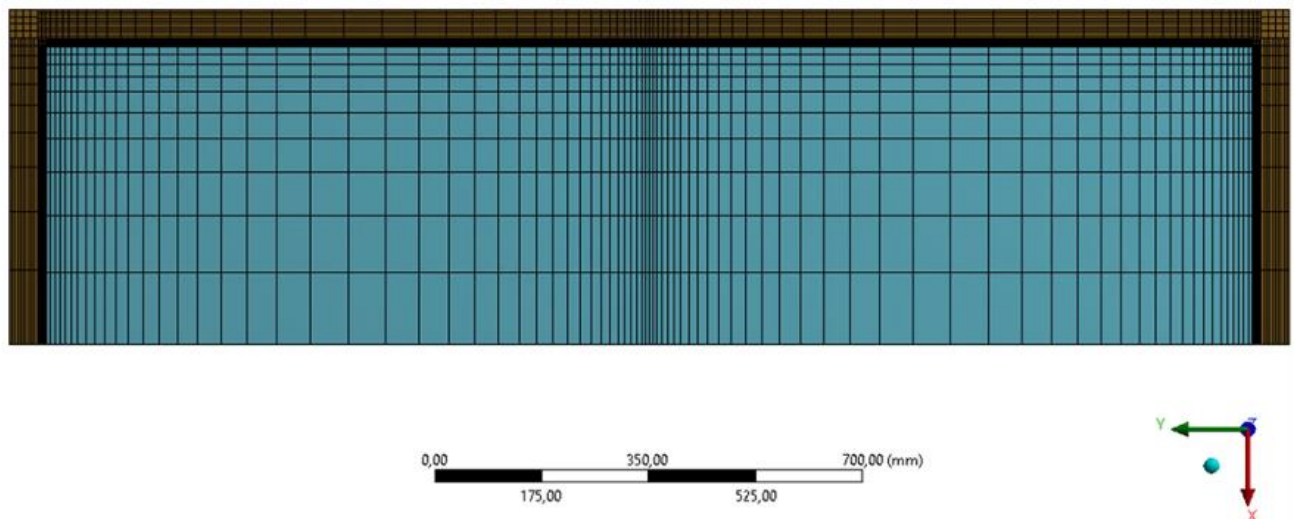


Abbildung 10-12: Vernetzung der Isolierglaseinheit. Ansicht des thermisch stationären und transienten FE-Modells in ANSYS.

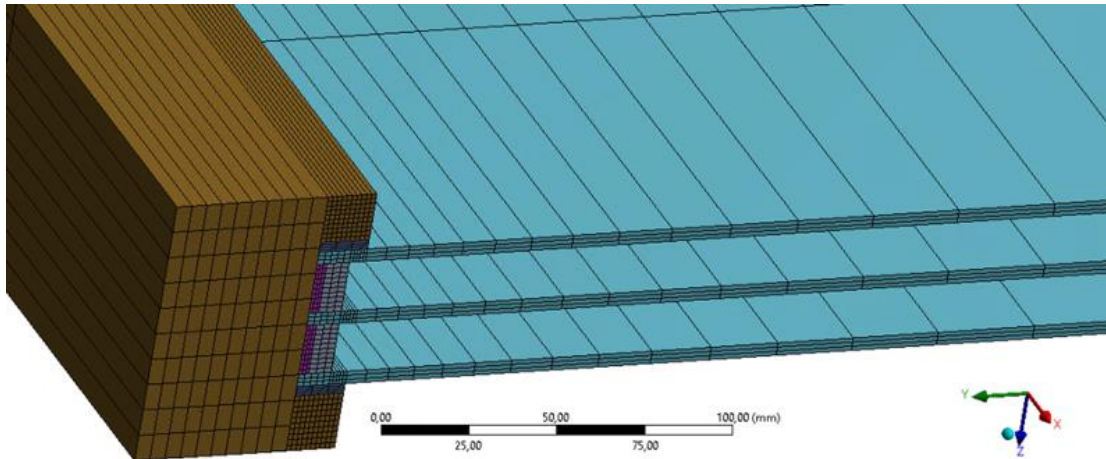


Abbildung 10-13: Vernetzung der Isolierglaseinheit. Isometrische Ansicht des thermisch stationären und transienten FE-Modells im Detail in ANSYS.

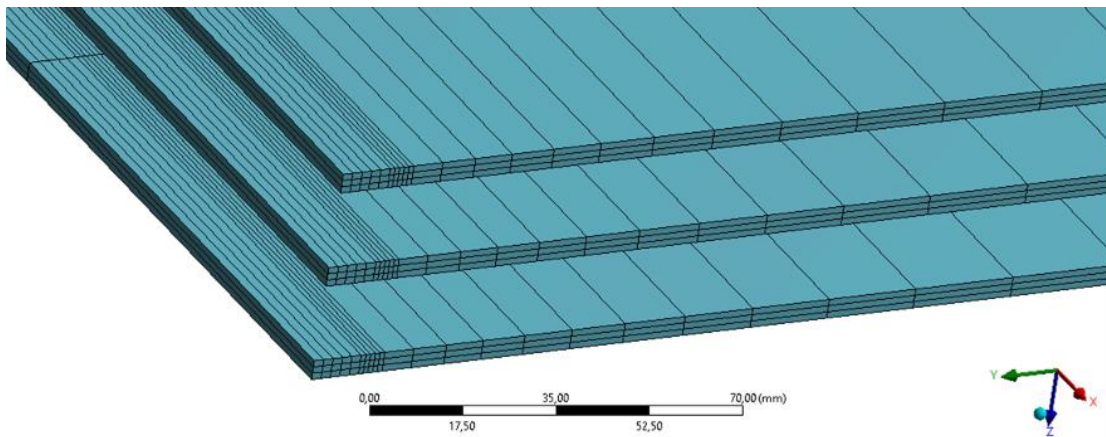


Abbildung 10-14: Vernetzung der Isolierglaseinheit. Isometrische Ansicht des mechanischen FE-Modells im Detail in ANSYS.

10.7 Modellvalidierung anhand von Experimenten aus AP 4

Die experimentellen Untersuchungen aus AP 4 lieferten für die Validierung der numerischen Modelle wertvolle Daten. Im Rahmen von thermisch stationären und transienten Simulationen in ANSYS wurde das sich einstellende Temperaturniveau in den Verglasungen (Sonnenschutz- und Wärmedämmglas, siehe auch Abschnitt 8) erfolgreich nachgestellt. Hierbei zeigte sich, dass die durch die Strahlungslampen aufgebrachte Einstrahlungsintensität im numerischen Modell auch auf die Abstandhalteroberflächen und Rahmenleibungen appliziert werden musste, um an der Glaskante vergleichbare Temperaturen zu erhalten. Es konnte mit der numerischen Simulation/Nachrechnung der Experimente gezeigt werden, dass die gewählte Modellierung der eindimensionalen temperaturabhängigen Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum (Superposition von Wärmestrahlung und Konvektion mit Konvektionsrandbedingungen) valide Ergebnisse liefert. Detaillierte Ergebnisse (transienter Temperaturverlauf) lassen sich in Anhang A8 in Abbildung A-C bis Abbildung A-G finden.

11 Parameterstudien für Verglasungen mittels der Methode der Finiten Elemente

Im Rahmen der Parameterstudien wird der in Abschnitt 6.1.5 eingegrenzte Parameterraum mit Hilfe der in Abschnitt 10 beschriebenen FE-Modelle in ANSYS numerisch untersucht.

11.1 Einfluss genereller Modellierungsparameter

11.1.1 Analysen zur Modellierung der solaren Einstrahlung auf der Außenseite der Verglasung

Anhand einer Vorstudie wurde untersucht, ob die solare Einstrahlung auch auf flankierende Bauteile, wie etwa Rahmenleibungen und Abstandhalteroberflächen aufzubringen ist (siehe Abschnitt 10.5, Abbildung 10-8 und Abbildung 10-9). Auf der sicheren Seite liegend kann die solare Einstrahlung auf diesen Oberflächen vernachlässigt werden.

Um die thermisch induzierten Spannungen zu reduzieren, wäre es vereinfachend möglich auf die flankierenden Bauteile eine diffuse solare Einstrahlung aufzubringen. Insbesondere bei Abstandhaltern mit einer schwarzen Oberflächenfarbe (resultiert in erhöhter Absorption und damit in einer erhöhten Glaskantentemperatur), könnte es hier zu einer Reduzierung der Spannungen kommen. Um die diffuse Einstrahlung zu berücksichtigen, muss mindestens eine zweidimensionale thermische Berechnung durchgeführt werden.

11.1.2 Analysen zur stationären und transienten Berechnung

Im Rahmen der Projektbearbeitung stellte sich die zentrale Frage, ob die Berechnung der sich im Glas einstellenden Temperaturen stationär oder transient erfolgen muss. Um diese Frage zu beantworten, wurden anhand der Optionen 1 bis 4 (vgl. Abschnitt 11.2.1) für einen warmen und einen kalten Tag sowohl stationäre als auch transiente Berechnungen durchgeführt und die resultierenden Spannungen verglichen. Es zeigte sich, dass in den meisten Fällen die stationäre Berechnung ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Sind detailliertere Ergebnisse/Berechnungen erforderlich, so sollte eine transiente Berechnung mit einer Zeitschrittweite von 10 Minuten (siehe Abschnitt 11.1.4) durchgeführt werden. Einen weiteren Vergleich zwischen der stationären und der transienten Berechnung lässt sich in Abschnitt 11.2.1 finden.

11.1.3 Analysen zur eindimensionalen Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum

Die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum (SZR) stellt eine strömungsmechanische Aufgabe dar, welche im Rahmen des Forschungsprojekts durch vereinfachte Ansätze abgebildet wurde (siehe Abschnitt 10.3). Das strömungsmechanische Verhalten des Gases findet dreidimensional in der Verglasung statt, während der vereinfachte Ansatz darin besteht, weit entfernt von Rahmen und Randverbund die Glaskantentemperaturen auszuwerten und die temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten eindimensional zu berechnen. Diese Wärmeübergangskoeffizienten werden dann im vereinfachten Ansatz konstant über die gesamte zum SZR hinzeigenden Glasoberflächen angesetzt. Damit wird unterstellt, dass im Randbereich des Glases (innerhalb des SZR) die gleichen Strömungsverhältnisse herrschen wie in der Glasmitte.

Um zu überprüfen, ob dieser eindimensionale Ansatz gerechtfertigt ist, wurde ein zweidimensionales FE-Modell (Zweifach-Isolierglas mit einer „warmen Kante“ [6] und Aluminiumrahmen) erzeugt. In ANSYS kann eine sog. Strahlungsrandbedingung verwendet werden, welche keine Definition/Eingabe einer Umgebungstemperatur benötigt, da das Modell eigenständig diese Temperaturen iterativ ermittelt. Auf den Pos. 2 und 3 der Verglasung (Glasoberflächen zum SZR hin orientiert) wurden schließlich Strahlungsrandbedingungen mit den jeweiligen Emissionsgraden definiert. Im Vergleichsmodell wurden im Gegensatz dazu Konvektionsrandbedingungen angesetzt, die die Eingabe von Wärmeübergangskoeffizienten und der jeweiligen Umgebungstemperatur benötigen. Die Ermittlung dieser erfolgte im Vorfeld mit Hilfe der stationären Berechnung eindimensional in MATLAB. Damit wurde dann das Zweifach-Isolierglas mit low-e Beschichtung auf Pos. 3 bzw. ohne low-e Beschichtung simuliert. Die Wärmeübertragung erfolgte ohne Konvektion, da diese nur mit Hilfe einer fluiddynamischen Simulation berechnet werden könnte.

Die Ergebnisse zeigen keinen Unterschied zwischen einem eindimensionalen oder mehrdimensionalen (2D) Wärmetransport.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die eindimensionale Wärmeübertragung im SZR eine gerechtfertigte und valide Annahme darstellt, wobei weitere und detailliertere Untersuchungen, ggf. mit Hilfe fluiddynamischer Simulationen, sinnvoll wären.

11.1.4 Analysen zur Zeitschrittweite für die transiente Berechnung

Die Wahl der Zeitschrittweite für die transiente Berechnung wurde ebenfalls untersucht. Im ersten Schritt wurde, basierend auf der aktuellen Berechnungspraxis, eine Zeitschrittweite von 60 Minuten angesetzt. Zur Verfeinerung wurden noch 10-Minuten- und Ein-Minuten-Schritte untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Zeitschrittweite von 60 Minuten anwendbar ist, jedoch mit 10 Minuten Schritten höhere Spannungen resultieren. Die Zeitschrittweite von einer Minute ist zu detailliert und die Ergebnisse unterschieden sich kaum von denen mit der 10-Minuten Schrittweite.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Zeitschrittweite der transienten Berechnung 10 Minuten betragen sollte.

11.1.5 Analysen zu thermisch äquivalenten Rahmen (Holz und Aluminium)

Die aktuell auf dem Markt verfügbaren Rahmensysteme von Verglasungen sind hinsichtlich ihrer Geometrie teilweise sehr kompliziert (insbesondere Rahmen mit kleinen Hohlkammern, Dichtungen etc., siehe Abbildung 10-3, links). Wenn dreidimensionale Berechnungen durchgeführt werden sollen, so ergibt sich hinsichtlich der Modellierung an der Ecke der Verglasung ein erheblicher Aufwand bzgl. der Vernetzung des Modells. Um den Vernetzungsaufwand zu reduzieren und gleichzeitig korrekte Ergebnisse zu erhalten, wurden der Holz- und Aluminiumrahmen seitens des Ingenieurbüros RBGT (Unterauftrag ISM+D) hinsichtlich ihrer Geometrie vereinfacht (siehe Abbildung 10-3, rechts). Gleichzeitig mussten die Materialeigenschaften für die vereinfachten Geometrien korrigiert werden. Mit Hilfe der vereinfachten Rahmen war es schließlich möglich dreidimensionale Berechnungen durchführen zu können. Im Fall von zweidimensionalen Temperaturberechnungen ist es möglich die exakte Rahmengeometrie zu berücksichtigen, da hier der Modellierungsaufwand im Vergleich zur dreidimensionalen Berechnung stark reduziert ist.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass im Fall einer zweidimensionalen Temperaturberechnung (Schnitt durch Rahmen und Verglasung) die exakte Rahmengeometrie vergleichsweise einfach berücksichtigt werden kann. Im Fall einer dreidimensionalen Berechnung kann es erforderlich werden die Rahmengeometrie mit Hilfe einer zweidimensionalen Berechnung zu vereinfachen, wobei ggf. gleichzeitig die Materialeigenschaften ebenfalls korrigiert werden müssen.

11.2 Einfluss von meteorologischen Randbedingungen

11.2.1 Methodik zur Auswertung der meteorologischen Daten

Der direkte solare Absorptionsgrad α_e der einzelnen Glasscheiben (als Ergebnis aus Berechnungen gemäß EN 410 [17] und EN ISO 52022-3 [23]) ist ein entscheidender Einflussfaktor für die Größe der thermisch induzierten Spannungen, da die Wärmeentwicklung im Glas durch diesen stark beeinflusst werden kann. Die in der Praxis eingesetzten Isolierglaseinheiten können unterschiedliche Kombinationen von Sonnenschutz- und Wärmedämmschichten aufweisen, die den Absorptionsgrad je Glasscheibe beeinflussen. Gleichzeitig kann der jeweilige Absorptionsgrad der Gläser durch die Konstruktion selbst (z. B. gefärbtes Glas) oder/und durch den Nutzer (z. B. Anbringung von innenliegenden Sonnenschutzvorrichtungen, Platzierung von Möbeln oder anderen Innenraumgegenständen zu nahe am Isolierglas von innen) beeinflusst werden. Um den Einfluss des Absorptionsgrades auf die thermisch induzierten Spannungen in den einzelnen Glasscheiben verallgemeinert zu untersuchen und gleichzeitig Extremsituationen aufzuzeigen, wurden durch Überlegungen bestimmte Absorptionsoptionen definiert, die in Tabelle 11-1 und Tabelle 11-2 dargestellt sind. Für Verglasungen in der Praxis geben EN 410 [17] und EN ISO 52022-3 [23] Formeln vor, mit denen der Absorptionsgrad α_e unter Berücksichtigung der Mehrfachreflexion der Sonnenstrahlen durch die Gläser wellenlängenabhängig je Einzelscheibe berechnet werden kann.

Bei den in diesem Projektabschnitt frei festgelegten Absorptionsoptionen (siehe Tabelle 11-1 und Tabelle 11-2) wurde darauf geachtet, den Absorptionsgrad auf für die Praxis realistisch erreichbare Maximalwerte

zu begrenzen. Der Absorptionsgrad α_e der äußeren Scheibe wurde mit 50 % festgelegt, was ein üblicher hoher Wert für ein Sonnenschutzglas sein kann (Option 1 für Zweifach-Isolierglas und Dreifach-Isolierglas). Der Absorptionsgrad der mittleren Scheibe wurde auf 15 % maximiert, was sich über die Kombination einer low-e Beschichtung auf der Mittelscheibe mit Nutzungseinflüssen wie etwa der Anbringung von z. B. hellen, stark reflektierenden Jalousien oder einem Sichtschutz auf der Innenseite (Option 2 nur für Dreifach-Isolierglas) resultiert. Für die innere Glasscheibe wurde der Absorptionsgrad ebenfalls mit 50 % festgesetzt, um die Einflüsse der Nutzung widerzuspiegeln, z. B. die Anbringung einer dunklen Folie auf der Innenscheibe (d. h. Option 2 für Zweifach-Isolierglas und Option 3 für Dreifach-Isolierglas).

Um einschätzen zu können, ob niedrig absorbierende Wärmedämmgläser, welche im Wohnungsbau oftmals eingebaut werden, als kritisch zu bewerten sind, wurden für das Zweifach-Isolierglas zusätzlich die Option 3 (entspricht dem Aufbau 2-fach-02 in Abbildung 5-1) und für das Dreifach-Isolierglas die Option 4 (entspricht dem Aufbau 3-fach-01 in Abbildung 5-1) definiert. Für diese beiden Optionen wurden die Absorptionsgrade α_e der einzelnen Glasscheiben mit Hilfe von WinSLT (Berechnung nach EN 410 [17] und EN ISO 52022-3 [23]) bestimmt. Dabei wurden die wellenlängenabhängigen Werte für Transmission τ und Reflexion ρ und ρ' der Einzelscheiben berücksichtigt.

Die in Tabelle 11-1 und Tabelle 11-2 genannten Optionen wurden schließlich für verschiedene meteorologische Szenarien (siehe dazu Abbildung 11-1) numerisch in ANSYS simuliert. Hierbei wurde die maximale solare Einstrahlung zwischen 700 W/m^2 und 1.000 W/m^2 variiert, was einer realistischen Größenordnung entspricht, wie die meteorologischen Analysen in Abschnitt 7 gezeigt haben. Die Verglasung war dabei immer in Richtung Süden orientiert. Durch die Variation der Außenlufttemperatur und die gleichzeitige Variation der solaren Einstrahlung konnten die resultierenden thermisch induzierten Spannungen verallgemeinert ermittelt werden und lieferten die Basis für die Auswertung kritischer meteorologischer Daten (siehe Abschnitt 7.6).

Tabelle 11-1: Absorptionsoptionen der Zweifach-Isolierglaseinheit.

	Direkter Strahlungsabsorptionsgrad der Außenscheibe [%]	Direkter Strahlungsabsorptionsgrad der Innenscheibe [%]
Option 1	50	5
Option 2	5	50
Option 3	7	7

Tabelle 11-2: Absorptionsoptionen der Dreifach-Isolierglaseinheit.

	Direkter Strahlungsabsorptionsgrad der Außenscheibe [%]	Direkter Strahlungsabsorptionsgrad der Mittelscheibe [%]	Direkter Strahlungsabsorptionsgrad der Innenscheibe [%]
Option 1	50	5	5
Option 2	5	15	5
Option 3	5	5	50
Option 4	13	4	5

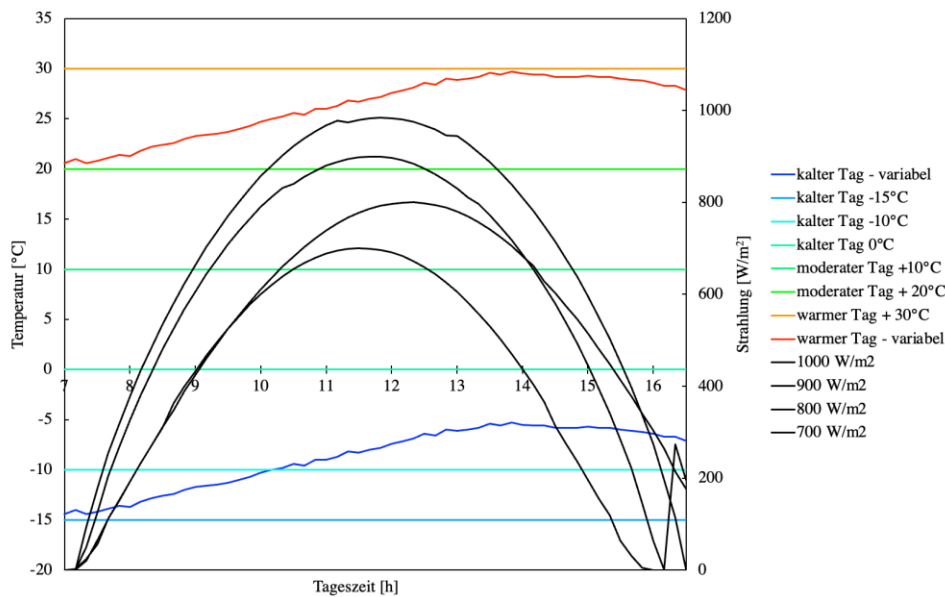


Abbildung 11-1: Meteorologische Eingangsdaten für die numerischen Simulationen der Absorptionsoptionen 1 bis 4 für anschließende Auswertung der meteorologischen Daten für Ermittlung der kritischsten Einwirkungskombinationen aus solarer Einstrahlung und Außenlufttemperatur.

Für die hier vorgestellten numerischen Simulationen wurden außerdem die folgenden Randbedingungen in ANSYS gewählt:

- Vereinfachter Holzrahmen (vgl. Abbildung 10-2 rechts)
- Solarer Absorptionsgrad des Rahmens: 20 %
- Teilverschattung der Verglasung (Isolierglas inkl. Rahmen)
- Intensität der Teilverschattung: 100 % (keine diffuse Einstrahlung in Teilverschattung)
- Geometrie der Teilverschattung: horizontal geradlinig über die obere Hälfte der Verglasung
- Zweistufiger Randverbund des Isolierglases bestehend aus Kunststoffabstandhalter ($\lambda_{2\text{-box}} = 0,28 \text{ W}/(\text{m K})$) und Polysulfid als Sekundärdichtung
- Materialeigenschaften gemäß Tabelle 17-1 und Tabelle 17-2

Für das Zweifach-Isolierglas wurde aus Zeitgründen die Studie abgekürzt und nur die Einstrahlungskurve mit $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$ verwendet, was schließlich insgesamt in 24 numerischen Berechnungen = 3 Optionen * 1 solare Einstrahlungskurve * 8 Außenlufttemperaturen resultierte. Für das Dreifach-Isolierglas wurden alle Einstrahlungskurven verwendet. Für das Dreifach-Isolierglas resultierten damit insgesamt 128 numerische Berechnungen = 4 Optionen * 4 solare Einstrahlungskurven * 8 Außenlufttemperaturen. Je Absorptionsoption entstand damit ein Datensatz von 32 Datenterzettis (solare Einstrahlung, Außenlufttemperatur, maximale thermisch induzierte Spannung), welche im Raum mit Hilfe einer dreidimensionalen linearen Regressionsanalyse angepasst wurden (siehe Abschnitt 7.6), um schließlich die linearen Spannungsfunktionen in Abhängigkeit von Einstrahlung und Außenlufttemperatur für die jeweiligen Optionen zu erhalten. Mit diesen Spannungsfunktionen konnten im Anschluss die meteorologischen Daten flächig ausgewertet werden (siehe dazu Abschnitte 7.6 bis 7.8).

Abbildung 11-2 bis Abbildung 11-6 zeigen exemplarisch Ergebnisse aus den thermisch-mechanischen Berechnung unter Berücksichtigung der verschiedenen Optionen. Wie sich anhand der hoch absorbierenden Optionen 1 und 3 für das Dreifach-Isolierglas zeigt, resultieren sowohl für hohe solare Einstrahlungen ($1.000 \text{ W}/\text{m}^2$) als auch für niedrigere Einstrahlungswerte von $700 \text{ W}/\text{m}^2$ für die Außen-/Innenscheibe als auch für die Mittelscheibe sehr hohe thermisch induzierte Spannungen. Bei Option 2 (Abbildung 11-3) zeigt sich, dass die thermisch induzierte Spannung der Mittelscheibe nahezu unabhängig von der Außenlufttemperatur ist. Begründen lässt sich dieses Verhalten damit, dass sich die Mittelscheibe in der Mitte des Temperaturgradienten zwischen der Außen- und Innenseite des Isolierglases befindet.

Es zeigt sich weiterhin, dass für die Außenscheibe an warmen Tagen und die Innenscheibe an kalten Tagen die höchsten thermisch induzierten Spannungen resultieren. Für die Glasscheibe auf der wärmeren Seite resultieren, basierend auf den hier getroffenen Annahmen, die höheren Spannungen. Dies gilt sowohl für das Dreifach-, als auch für das Zweifach-Isolierglas.

Anhand der Option 3 für das Zweifach-Isolierglas wird zusätzlich der Unterschied hinsichtlich der verwendeten Tagestemperaturkurven ersichtlich. Vergleicht man die Ergebnisse, welche mit der variablen Tagestemperaturkurve des kalten Tages ermittelt wurden mit den Ergebnissen, welche mit der konstanten Außenlufttemperatur von -15 °C ermittelt wurden, so lässt sich feststellen, dass die Unterschiede bzgl. der Spannungen sehr gering sind. Dies deutet darauf hin, dass die zeitliche Variation der Tagestemperatur eine eher untergeordnete Rolle bei der Ermittlung der thermisch induzierten Spannung spielt. Außerdem kann ggf. auf eine transiente Berechnung verzichtet und eine stationäre Berechnung als ausreichend genau erachtet werden.

Die hier ermittelten Ergebnisse (Abbildung 11-2 bis Abbildung 11-5) sind in [48] bereits teilweise publiziert worden.

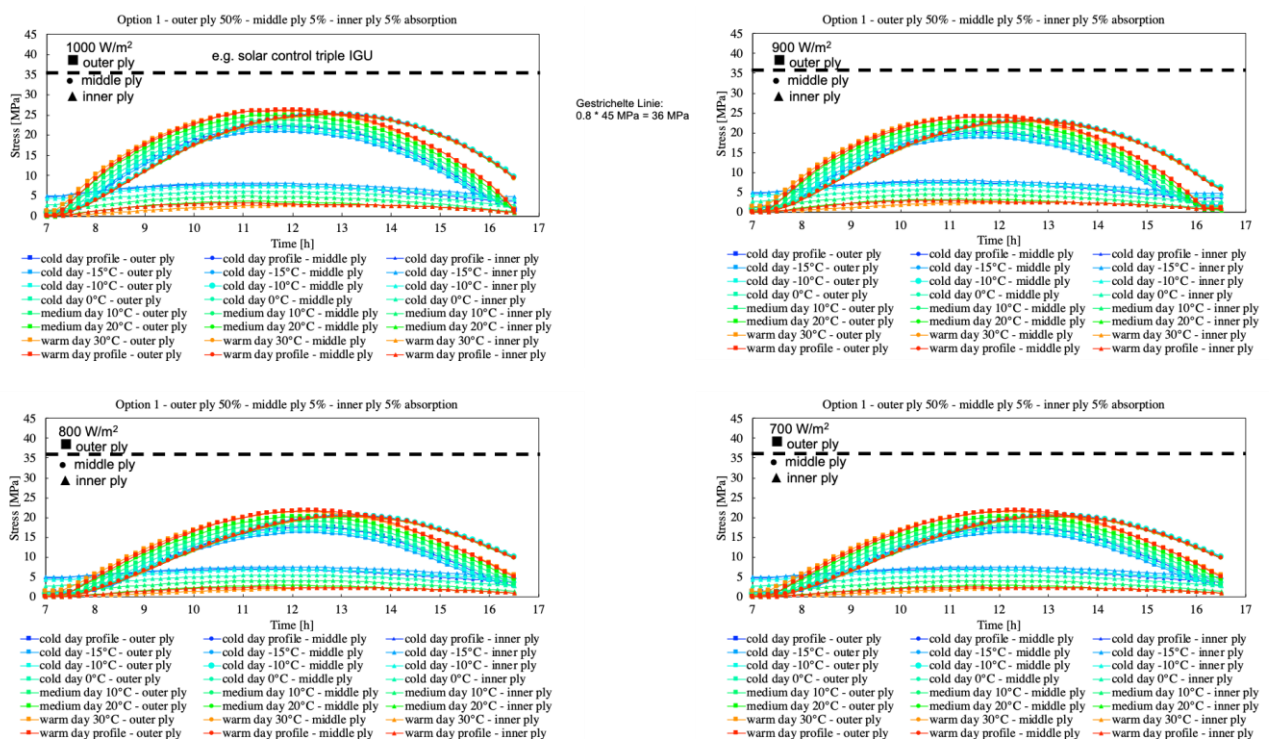


Abbildung 11-2: Thermisch induzierte Spannungen für Option 1 des Dreifach-Isolierglases.

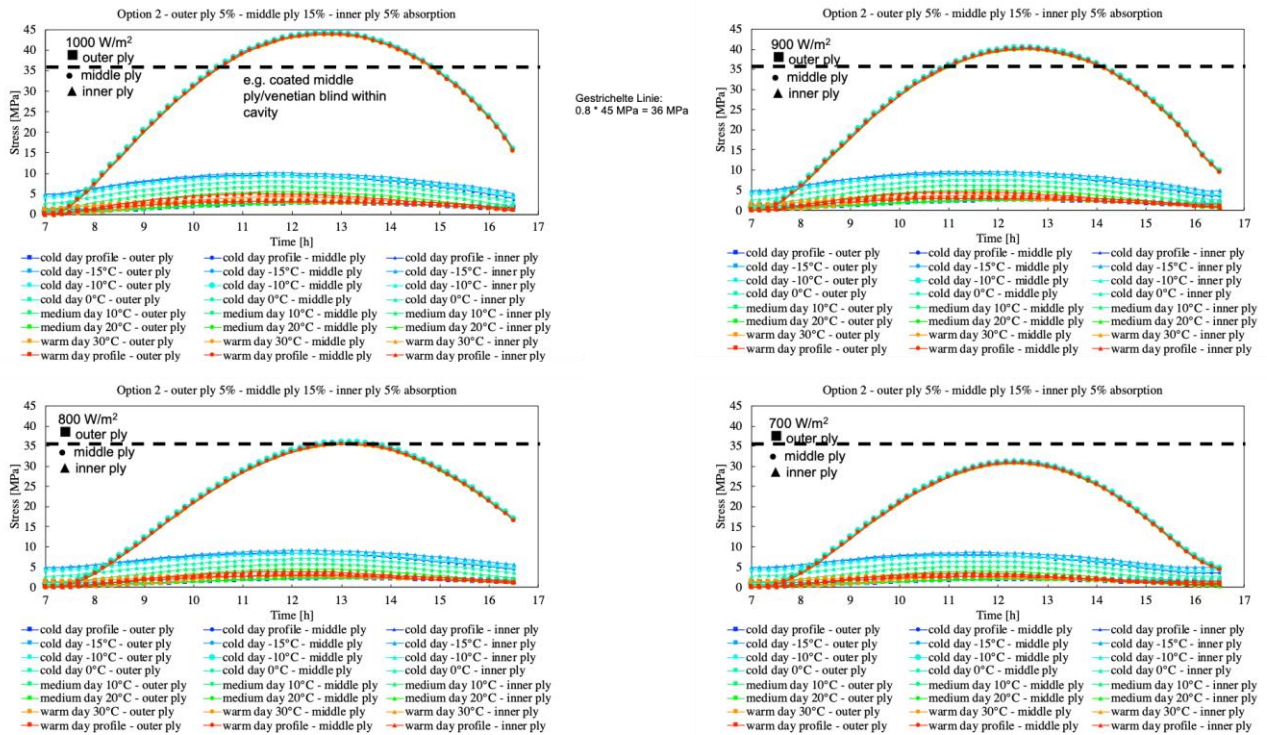


Abbildung 11-3: Thermisch induzierte Spannungen für Option 2 des Dreifach-Isolierglases.

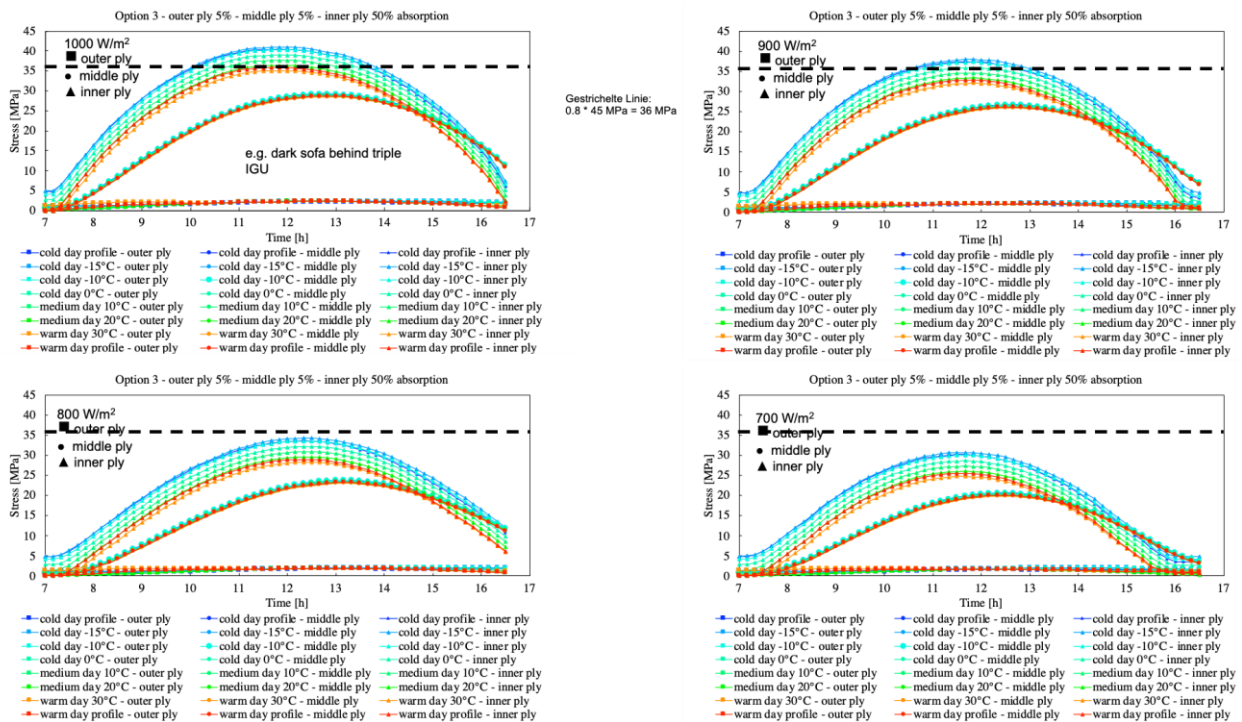


Abbildung 11-4: Thermisch induzierte Spannungen für Option 3 des Dreifach-Isolierglases.

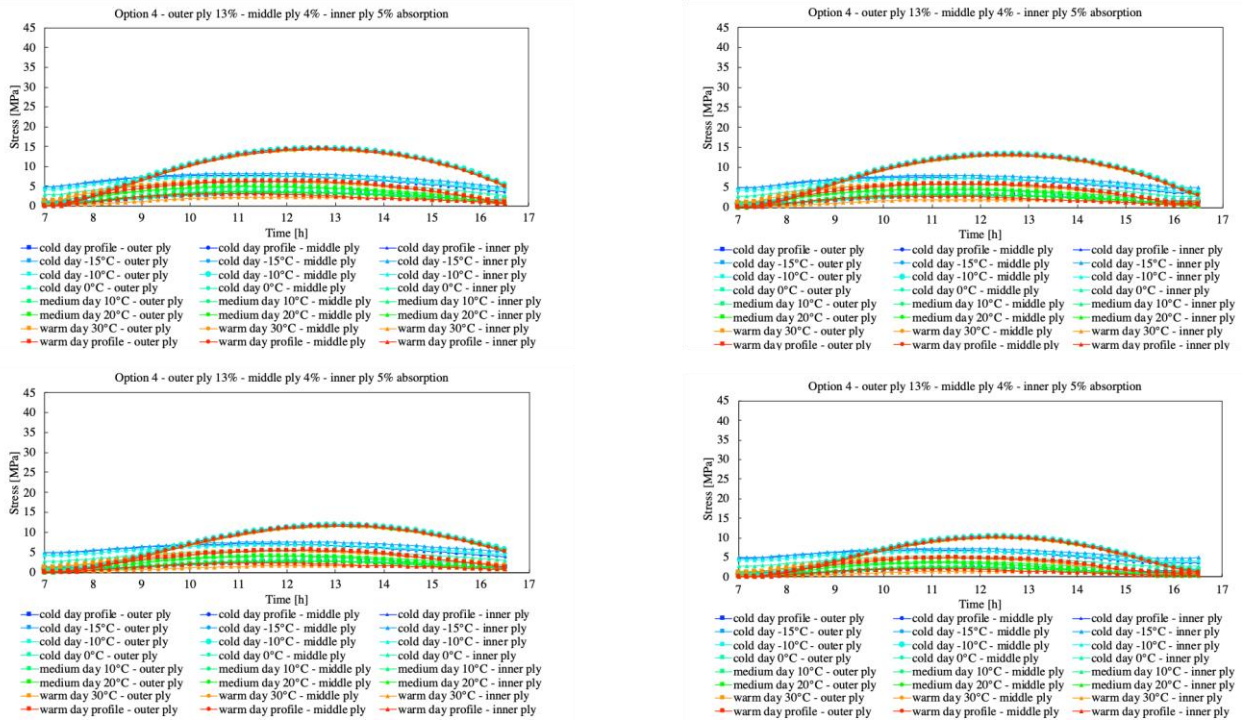


Abbildung 11-5: Thermisch induzierte Spannungen für Option 4 des Dreifach-Isolierglases.

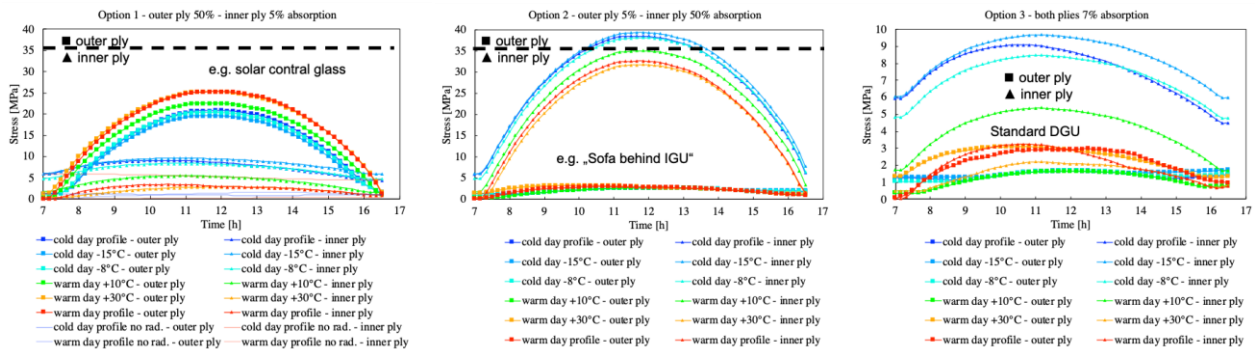


Abbildung 11-6: Thermisch induzierte Spannungen für Option 1, 2 und 3 des Zweifach-Isolierglases mit 1.000 W/m² solarer Einstrahlung.

11.2.2 Analysen zur zeitlichen Auflösung von DWD-Messdaten und Clearsky-Modelldaten

Im Rahmen der numerischen Berechnungen wurde überprüft, welche zeitliche Auflösung der meteorologischen Daten für die Berechnung thermisch induzierter Spannungen relevant ist. Dafür wurden sowohl Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), als auch Modelldaten eines Clearsky-Modells in der numerischen Simulation verwendet.

Anhand der Simulationen hat sich gezeigt, dass

- für über einen längeren Zeitraum anhaltende Strahlungspeaks aus Messdaten im Vergleich zum Clearsky-Modell höhere Spannungen resultieren (10 min Daten verwendet),
- kurzzeitig anhaltende Strahlungspeaks aus Messdaten im Vergleich zum Clearsky-Modell nicht zu höheren Spannungen führen,
- wenn Messdaten verwendet werden, 10 min Daten im Vergleich zu 60 min Daten relevante Ergebnisse liefern,
- wenn Clearsky-Daten verwendet werden, ebenfalls 10 min Daten im Vergleich zu 60 min Daten relevante Ergebnisse liefern,

- eine zeitliche Auflösung unter 10 min (Simulation mit 1 min Zeitschritten durchgeführt) nicht zielführend ist, da nur geringfügig höhere Spannungen resultieren, wenn kleinere Zeitschritte verwendet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Verwendung von Clearsky-Wettermodelldaten bzgl. der solaren Einstrahlung mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min für die Berechnung thermisch induzierter Spannungen gute Ergebnisse liefern.

11.2.3 Analysen zur Variation des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten

In den numerischen Modellen wurde auf den äußeren Oberflächen der Verglasung ebenfalls (vgl. Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum im Abschnitt 10.3) „nur“ eine Konvektionsrandbedingung mit kombiniertem Wärmeübergangskoeffizient verwendet. Es gelten hierbei die gleichen Voraussetzungen hinsichtlich der Linearisierung der Wärmeübertragung mittels Strahlung, weswegen die Wärmeübertragungsmechanismen von Konvektion und Strahlung überlagert (Superposition) werden dürfen (vgl. EN ISO 6946 [24]).

Bei der Ermittlung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten spielt die Anordnung der Verglasung (vertikal/horizontal/geneigt) eine wichtige Rolle, da bei der Wärmeübertragung mittels Strahlung die Strahlungstemperatur der Umgebung eingeht. Eine Vertikalverglasung „sieht“ zu gleichen Anteilen das Himmelsgewölbe und die Umgebung, eine Horizontalverglasung „sieht“ nur das Himmelsgewölbe. Es ist hierbei anzumerken, dass die Himmelstemperatur im Vergleich zur Umgebungstemperatur vollkommen unterschiedlich ausfallen kann. Eine Analyse für eine Vertikalverglasung zeigte, dass der Strahlungsanteil des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten in folgendem Bereich realistische Werte annehmen kann: $2,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \leq h_{\text{rad.}} \leq 5,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Zusätzlich wird der äußere Wärmeübergangskoeffizient durch die Konvektion beeinflusst, die bedingt durch Wind stark erhöht werden kann. Eine Analyse des Fraunhofer ISE von 18 DWD-Messstandorten zeigte, dass in 50 % der Fälle bei einer solaren Einstrahlung von mindestens $800 \text{ W}/\text{m}^2$ die Windgeschwindigkeit ca. $3,3 \text{ m/s}$ betrug. Bei Verwendung der linearen Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und konvektivem Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten gemäß EN ISO 6946 [24] resultiert der konvektive Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten $h_{\text{conv.}}$ zu $17,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ($= 4 + 4 * 3,3 \text{ m/s}$).

Mit Hilfe der Superposition der Anteile aus Strahlung und Konvektion ergibt sich schließlich, dass der äußere kombinierte Wärmeübergangskoeffizient für Vertikalverglasungen in einem Bereich zwischen $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und $23 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ liegt. Unter der Annahme, dass kein Wind auf der Außenseite der Verglasung (entspricht dann einem konvektiven Anteil von $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) einwirkt, liegt der äußere kombinierte Wärmeübergangskoeffizient $h_{\text{ext.}}$ zwischen ca. $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Für die numerischen Simulationen wurden schließlich die folgenden beiden äußeren Wärmeübergangskoeffizienten: $10,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und $21 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ verwendet, um die Unterschiede hinsichtlich der thermisch induzierten Spannungen zu ermitteln.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Außenscheibe einer Vertikalverglasung die Situation ohne äußeren Wind relevant wird, während für die Innenscheibe die Situation mit Wind relevant wird. Es sind hierbei immer die verwendeten konstruktiven Randbedingungen (z. B. Holzrahmen, „warme Kante“ Abstandhalter [6], etc.) zu beachten.

11.2.4 Analysen zur spontan auftretenden solaren Einstrahlung

Eine spontan entstehende solare Einstrahlung wurde im Projekt ebenfalls untersucht. Hierbei sollte die Situation untersucht werden, wenn z. B. eine ehemals verschattete Verglasung plötzlich/schlagartig solarer Einstrahlung ausgesetzt wird. Hervorgerufen kann dieses Phänomen ggf. durch die umliegende Bebauung oder auch ein Aufklaren des Himmels bzw. einer sich auflösenden Bewölkung.

Die Studien haben gezeigt, dass diese Situation für hoch absorbierende Gläser (Optionen 1 bis 3 für das Dreifach-Isolierglas) nicht relevant wird. Bei den niedrig absorbierenden Gläsern (Option 4) zeigte sich, dass für die Innenscheibe an kalten Tagen und die Außenscheibe an warmen Tagen geringfügig höhere Spannungen (Spannungsniveau bei ca. 6 MPa bis 9 MPa mit Abweichung bis max. 8%) resultieren. Für die

Mittelscheibe resultierten für alle Optionen höhere Spannungen (Spannungsniveau bei ca. 13 MPa und 45 MPa mit Abweichung von ca. 18 %), wenn die kontinuierliche solare Einstrahlung als Randbedingung verwendet wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die kontinuierliche solare Einstrahlung über den Tag zu relevanten thermisch induzierten Spannungen führt.

11.3 Einfluss einer (Teil)Verschattung

11.3.1 Analysen von Verschattungsgeometrien

In der französischen Norm NF DTU 39 P3 [39] wird für die Berechnung eine konstant/zeitlich unveränderliche Teilverschattung berücksichtigt, wobei, bedingt durch das eindimensionale Berechnungsverfahren, keine Geometrie vorgegeben wird. In der italienischen Richtlinie CNR DT 210 [7] werden verschiedene Verschattungsgeometrien vorgestellt (siehe Abbildung 11-7) und ihre jeweilige Geometrie qualitativ als kritisch bzw. weniger kritisch hinsichtlich thermisch induzierter Spannungen kategorisiert. Mit Hilfe eines online Werkzeugs, was unter folgendem Link <http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html> (letzter Aufruf am 27.01.2023) abgerufen werden kann, können basierend auf dreidimensionalen Konstruktionszeichnungen Schattenwürfe für weltweite Standorte ermittelt werden.


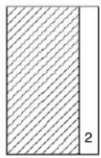


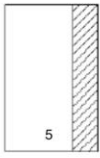




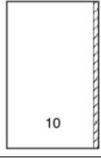
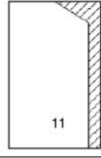
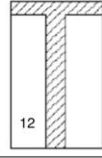
Least dangerous shadows				
Dangerous shadows				
Most dangerous shadows				

Abbildung 11-7: Kategorisierung von Verschattungsgeometrien gemäß CNR DT 210 [7].

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Verschattungsgeometrien detailliert (transient thermisch-mechanisch) und weitere Schattengeometrien vereinfacht (Ansatz einer vereinfachten Temperaturbeanspruchung einer Glasscheibe ohne thermische Berechnung im Vorfeld) untersucht. Im Rahmen der detaillierten Untersuchungen wurden die folgenden Schattenszenarien (Geometrieauswahl basierend auf Erfahrungswerten) als zeitlich unveränderliche Schatten simuliert:

- unverschattet (Referenzszenario)
- horizontal (Abb. Abbildung 11-7, Nr. 6)
- L-förmig (Abbildung 11-7, Nr. 8)
- doppelt diagonal (Abbildung 11-7, Nr. 9)
- vertikal (Abbildung 11-7, Nr. 10)
- T-förmig (Abbildung 11-7, Nr. 12, [11])

Die Verschattungsintensität betrug 100 % (d. h. vollständige Verschattung ohne Einstrahlungsanteile). Im Vergleich dazu setzt die französische Norm innerhalb der verschatteten Bereiche eine diffuse solare Einstrahlung von mindestens 10 % der solaren Einstrahlung bzw. mindestens 75 W/m² an.

Die ermittelten thermisch induzierten Spannungen erreichten den Maximalwert in der Situation mit der doppelt diagonal verlaufenden Verschattung (Singularität an der Schattenspitze und der damit einhergehenden Spannungsüberhöhung). Basierend auf der Praxiserfahrung der Projektpartner und der

Partner im Unterauftrag des ISM+D wurde das Auftreten dieser Verschattungsgeometrie als sehr selten eingestuft. Die horizontal verlaufende Verschattungsgeometrie mit einer Ausdehnung über 10 % der Isolierglashöhe (Teilverschattung der Verglasung) wurde hingegen als sehr wahrscheinlich und damit relevante Situation eingeschätzt.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass bei der Berechnung thermisch induzierter Spannungen in jedem Fall eine Verschattung der Isolierverglasung berücksichtigt werden muss, da sich hierdurch die Glaskantenspannungen drastisch erhöhen. Für die Berücksichtigung der Verschattungsgeometrie an einer real vorhandenen Fassade ist eine Schattenwurfanalyse erforderlich. Falls diese Information jedoch nicht einholbar ist, so kann mit Hilfe einer 10 % horizontal oder vertikal verlaufenden Teilverschattung der Verglasung eine weitestgehend abgesicherte Dimensionierung erfolgen. Falls Schattengeometrien mit Winkeln entstehen (z. B. doppelt diagonal verlaufende Teilverschattung), so ist ggf. zu überprüfen, wie hoch die solare Einstrahlungsintensität im Übergangsbereich zwischen unverschattetem und verschattetem Bereich ist, um Spannungsüberhöhungen infolge Singularitäten zu vermeiden.

11.3.2 Analysen zur spontan auftretenden unveränderlichen Teilverschattung

Die Situation der spontan auftretenden solaren Einstrahlung wurde bereits im Abschnitt 11.2.4 untersucht und es zeigte sich, dass dieses Szenario nicht relevant ist. Da gleichzeitig vermutet wurde, dass die Situation einer abrupt auftretenden unveränderlichen Teilverschattung relevant werden könnte, wurde diese untersucht.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die aus diesem Szenario resultierenden thermisch induzierten Spannungen zu keiner relevanten Bemessungssituation führen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Situation mit kontinuierlicher Teilverschattung für die Bemessung von Verglasungen hinsichtlich thermisch induzierter Spannungen relevant ist.

11.3.3 Analysen zur zeitlich variablen/beweglichen Teilverschattung

Im Rahmen einer Master-Thesis [12] wurde eine SSG-Verglasung (*structural sealant glazing*) betrachtet, die einer zeitlich variablen Teilverschattung ausgesetzt ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der zeitlich veränderliche Schatten zu geringeren Spannungen im Glas führt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Teilverschattung eine konstante/zeitlich nicht veränderliche Schattengeometrie für die Bemessung einer Verglasung hinsichtlich thermisch induzierter Spannungen relevant ist.

11.4 Einfluss von der Glaskonstruktion bzw. Verglasung (Glasaufbau inkl. Rahmen)

11.4.1 Analysen von verschiedenen Beschichtungsoptionen

Mit Hilfe der Optionen 1 bis 4 für das Dreifach-Isolierglas und den Optionen 1 bis 3 für das Zweifach-Isolierglas wurde der Parameter der Beschichtungsoptionen (für Sonnenschutzgläser und Wärmedämmgläser mit unterschiedlichen Absorptionsgraden) bereits im Abschnitt 11.2.1 untersucht und die Ergebnisse dargestellt.

11.4.2 Analysen zur Variation der thermischen Rahmeneigenschaften

Um verschiedene Rahmenkonstruktionen verallgemeinert untersuchen zu können – der Rahmenquerschnitt inkl. seiner Materialität ist oftmals sehr komplex (vgl. Abbildung 10-3) – wurden anhand des vereinfachten Holzrahmens die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität variiert und die thermisch induzierten Spannungen ermittelt. Die thermischen Eigenschaften des Abstandhalters wurden hierbei nicht variiert.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde dabei wie folgt variiert: Es wurde der U_g -Wert der Verglasung gemäß EN 673 ermittelt. Im Anschluss wurde der U_f -Wert, und damit die Wärmeleitfähigkeit, des Holzrahmens mit den Verhältnissen von 1/10, 1/1 (lag bereits vor) und 10/1 zum U_g -Wert variiert. Die Dichte und die spezifische Wärmekapazität blieben dabei jedoch konstant. Daraus folgte schließlich, dass im ersten Fall die Wärmeleitfähigkeit des Rahmens nur noch einem 1/10 der „Wärmeleitfähigkeit“ (U_g -Wert) der Verglasung entsprach, während im dritten Fall die Wärmeleitfähigkeit des Rahmens 10-mal höher war als die der

Verglasung. Die Ergebnisse dieser Berechnungen (warmer/kalter Tag für Optionen 1 bis 3) haben gezeigt: je höher der U_f -Wert des Rahmens, desto höher die resultierenden thermisch induzierten Spannungen.

Im nächsten Schritt wurde die Wärmekapazität (thermische Trägheit) variiert. Die Wärmeleitfähigkeit bzw. der U_f -Wert des Rahmens blieb dabei konstant. Es wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst wurde das Produkt von Dichte und spezifischer Wärmekapazität ermittelt. Im Anschluss wurde dieses Produkt einmal mit dem Faktor von 1/100 (Fall 1) und einmal von 100/1 (Fall 3, Fall 2 stellt die Referenz dar) multipliziert und die resultierenden Materialeigenschaften in ANSYS angepasst und die Spannungen berechnet (warmer/kalter Tag für Optionen 1 bis 3). Die Ergebnisse für Fall 3 zeigten, dass bei hohem Produkt von Dichte und spezifischer Wärmekapazität, im Vergleich zu Fall 1 und 2 höhere thermisch induzierte Spannungen resultieren. Im Vergleich von Fall 1 und Fall 2 ergab sich nahezu kein Unterschied. Dafür konnte noch keine Erklärung gefunden werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass hohe Wärmeleitfähigkeiten und hohe Produkte aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte zu höheren thermisch induzierten Spannungen führen.

11.4.3 Analysen zur Rahmenfarbe (Holzrahmen)

Die Farbe einer Oberfläche beeinflusst dessen Absorption der solaren Einstrahlung. Für die Untersuchung verschiedener Rahmenfarben wurden folgende Absorptionsgrade gewählt: 20 % (hell) und 95 % (dunkel). Die Ergebnisse der Berechnungen (kalter/warmer Tag für Optionen 1 bis 3) zeigten, dass für alle Absorptionsoptionen (1 bis 4) mit dem Rahmen mit der niedrigeren Absorption die maßgebenden Spannungen resultieren. Besonders groß waren die Unterschiede für die Außenscheibe, da sich hier der durchwärmende Effekt des sehr warm werdenden Rahmens bei hoher Absorption noch ausgeprägter auswirkt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für den Rahmen die korrekte Rahmenfarbe und eine daraus abgeschätzte Absorption für die Bemessung einer Verglasung hinsichtlich thermisch induzierter Spannungen verwendet werden sollte. Falls keine Aussagen zur Rahmenfarbe vorliegen, so sollte eine helle Rahmenfarbe und somit eine niedrige Absorption der Rahmenoberflächen angenommen werden.

11.4.4 Analysen zur Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter

Um den Einfluss der Abstandhalter und deren thermischen Eigenschaften auf die resultierenden thermisch induzierten Spannungen zu untersuchen, wurden zweidimensionale Simulationen in ANSYS durchgeführt. Dabei wurden drei Abstandhalter („kalte“, „moderate“ und „warme Kante“ [6]) mit den zwei Rahmen aus Abschnitt 10.2 kombiniert und für identische meteorologische Randbedingungen die Glaskantentemperatur ermittelt. Die Rahmen wurden dabei mit ihrer exakten Geometrie und Materialzuweisung und nicht vereinfacht modelliert. Die Ergebnisse wurden im Konferenzband Glasbau 2023 [49] vorgestellt. Die Untersuchungen zeigten, dass die ermittelten Glaskantentemperaturen sehr unterschiedlich im Vergleich zu den vorgegebenen Glaskantentemperaturen der französischen Norm ausfallen (vgl. Abschnitt 2.2.3 und Abschnitt 2.2.8). Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz der „warmen Kante“ als technisch aktuelle Variante der Abstandhalter in Kombination mit technisch aktuellen Rahmen tendenziell zu niedrigeren thermisch induzierten Spannungen führen.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass die Temperaturvorgaben der NF DTU 39 P3 [39] zwar Anhaltswerte für die Glaskantentemperaturen geben können, diese jedoch stark von den an aktuellen Rahmen und Abstandhaltern ermittelten Temperaturen abweichen. Für die künftige Berechnung von Glaskantentemperaturen sollten vorzugsweise zweidimensionale Temperaturberechnungen durchgeführt werden, hierbei bietet es sich an die finite Elemente Methode zu benutzen. Dabei können die korrekte Rahmengenometrie, die zugehörige Materialität und die korrekte Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter miteinbezogen werden.

11.4.5 Analysen zur Glasdicke

Im Rahmen einer Master-Thesis [11] wurde der Einfluss der Glasdicke auf die thermisch induzierten Spannungen untersucht. Es zeigte sich, dass sich durch eine Erhöhung der Glasdicke die Absorption des Glases erhöht. Dadurch resultierten schließlich auch höhere thermisch induzierte Spannungen.

Zusammenfassend lässt sich demgemäß festhalten, dass für die Bemessung einer Verglasung hinsichtlich der thermisch induzierten Spannungen die korrekten Glasdicken zu verwenden sind.

11.4.6 Analysen zur Wärmeleitung des Glases im Vergleich zur NF DTU 39 P3

In der französischen Norm ist ein eindimensionales Berechnungsverfahren dokumentiert. Dieses vernachlässigt die Wärmeleitung zwischen den angrenzenden Temperaturzonen (vgl. Abbildung 2-1) im Glas, was einer orthotropen Wärmeleitung entspricht. Orthotrop meint hierbei, dass die Wärmeleitung des Glases in der Glasebene vernachlässigt wird und lediglich über die Glasdicke erfolgt. Im Rahmen der dreidimensionalen Simulationen in ANSYS wurde die Wärmeleitfähigkeit des Glases von isotrop (Wärmeleitung in alle drei Raumrichtungen identisch) auf orthotrop verändert und die Wärmeleitfähigkeit in der Glasebene auf nahezu null (aufgrund numerischer Stabilität/Konvergenz) gesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass die orthotrope Wärmeleitung zu sehr hohen thermisch induzierten Spannungen führt. Dies zeigte, dass die Anwendung des Verfahrens der französischen Norm zu höheren Spannungen führt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Modellierung der isotropen Wärmeleitfähigkeit zum einen realistischer ist und zum anderen somit zu niedrigeren thermisch induzierten Spannungen führt.

11.4.7 Analysen zur Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum

Im vereinfachten stationären Berechnungsverfahren von NF DTU 39 P3 [39] wird die Annahme einer konstanten Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum (SZR) getroffen. Dabei wird der U_g -Wert der Verglasung gemäß EN 673 verwendet, von welchem der äußere und innere Wärmeübergangskoeffizient subtrahiert werden ($0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) = 1/25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) + 1/7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$), siehe Abschnitt 9.3.2.2 in [39]). Im Rahmen der eigenen FE-Berechnungen wurde der Ansatz einer konstanten mit dem Ansatz einer temperaturabhängigen Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum untersucht und verglichen.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine konstante Wärmeübertragung im SZR im Vergleich zu einer temperaturabhängigen Wärmeübertragung für die Außen- und Innenscheibe nahezu keine Veränderung hinsichtlich der thermisch induzierten Spannung liefert. Für die Mittelscheibe hingegen zeigte sich eine sehr starke Abhängigkeit zwischen kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten und thermisch induzierten Spannungen.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt darin, dass der äußere und innere Wärmeübergangskoeffizient mit $10,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bzw. $7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ um jeweils ein Vielfaches größer sind als die Wärmeübergangskoeffizienten im SZR (1 bis $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) für die Mittelscheibe. Durch die niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Seiten der Mittelscheibe ergibt sich schließlich eine Art Isolation der Mittelscheibe.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das vereinfachte stationäre Verfahren der NF DTU 39 P3 für Zweifach-Isoliergläser anwendbar ist. Sind detaillierte Ergebnisse gewünscht, so sollte die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum jedoch temperaturabhängig durchgeführt werden. Für Dreifach-Isoliergläser (oder i -fach-Isoliergläser, $i > 2$) muss der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient temperaturabhängig und damit entsprechend iterativ ermittelt werden. Diese Vorgehensweise wird bereits in der aktuellen Programmversion von WinSLT der Sommer Informatik GmbH umgesetzt.

11.5 Einfluss der Verhältnisse auf der Innen-/Raumseite

11.5.1 Analysen zu identischen Randbedingungen auf der Außen- und Innenseite (Bauzustand)

Um den Einfluss des Bauzustandes, sprich äußere gleich innere Randbedingung, zu untersuchen, wurden an den Optionen 1 bis 3 für das Dreifach-Isolierglas für einen warmen und kalten Tag numerische Simulationen in ANSYS durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten hohe Spannungen und, dass die Außenlufttemperatur auf die resultierenden thermisch induzierten Spannungen keinen Einfluss hat. Durch die Variation der Außenlufttemperatur änderte sich lediglich das Ausgangstemperaturniveau, welches entsprechend höher bzw. niedriger ausfiel. Die resultierenden Spannungen änderten sich entsprechend nicht. Die Spannung hängt in diesem Zustand nur noch von der Absorption der Gläser und vermutlich ebenfalls vom Rahmen und seiner Absorption ab.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Bauzustand (z. B. einer noch nicht geschlossenen Fassade) bzw. die Lagerung von Gläsern in mehreren Lagen auf Glasständern berücksichtigt werden muss, da auch hier große Spannungen resultieren können.

11.5.2 Analysen zur Erhöhung der Innenraumlufttemperatur

Im Rahmen dieser Studie wurde der Einfluss einer erhöhten Innenraumlufttemperatur - unter Berücksichtigung der Option 4 - auf die thermisch induzierten Spannungen untersucht. Hierbei stellt die erhöhte Innenraumlufttemperatur den Einfluss eines dunklen Sichtschutzes (z. B. dunkles Plissee) auf der Verglasungsinnenseite dar. Dunkle innenliegende Gegenstände (mit Abstand zum Glas, die eine gewisse Belüftung zulassen) erhöhen die innenliegende Umgebungstemperatur und erhöhen oftmals nur geringfügig die Absorption der Gläser. Die Absorption der Gläser kann durch helle reflektierende hinter der Verglasung liegende Gegenstände (z. B. helles Plissee) erhöht werden, wobei sich die innere Umgebungslufttemperatur nicht bzw. nur geringfügig ändert.

Die Ergebnisse zeigten im Vergleich zur Situation ohne innenliegenden Sichtschutz, dass für die Außenscheibe die Spannungen sinken, während sie für die Mittel- und Innenscheibe ansteigen.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass für die künftige Berechnung thermisch induzierter Spannungen die korrekte Einbausituation der Verglasung erfasst werden sollte. Sind planmäßig dunkle oder auch hoch reflektierende innen liegende Sichtschutze vorgesehen, so sind diese in der Berechnung in jedem Fall zu berücksichtigen. Eventuelle Nutzungsänderungen der Innenräume, die mit der Zeit auftreten können, können vom Planer und der Bemessung bei Bauwerkerrichtung nicht berücksichtigt werden. Falls Nutzungsänderungen (Installation von Sichtschutz, Möbel, etc.) eintreten und diese das thermische Verhalten der Verglasung beeinflussen, so empfiehlt es sich, die Einflüsse der Nutzungsänderung durch eine neue Berechnung zu überprüfen.

12 Modellierung der BIPV-Module mittels der Methode der Finiten Elemente

12.1 Einleitung und Modellbeschreibung

Im ersten Schritt wurde ein thermisches 3D FE-Modell eines Ein-Zelle-PV-Moduls erstellt. Mit diesem FE-Modell wurden die thermischen Randbedingungen einzeln untersucht. Das Modell wurde zuvor beim Projektpartner Sunovation durch Versuche validiert. Abbildung 12-1 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau bei Sunovation, Abbildung 12-2 das dazugehörige FE-Modell.

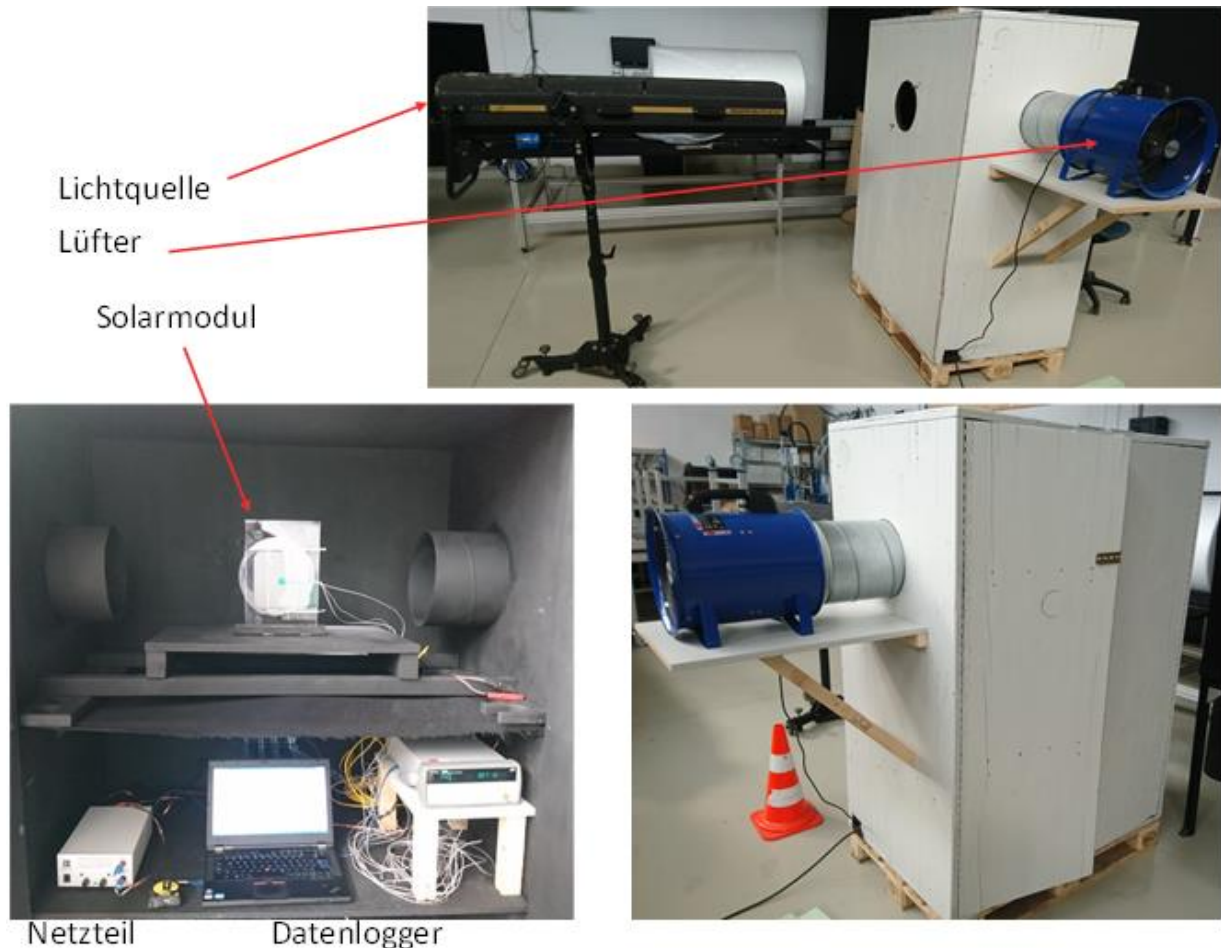


Abbildung 12-1: Versuchsaufbau für Ein-Zell-Module bei Sunovation zur Validierung des thermischen FEM-Modells.

Zur Validierung des FE-Ein-Zell-Modells wurden drei Versuchsserien durchgeführt:

1. Wärmeerzeugung durch Bestromung der Solarzelle bei freier Konvektion (Abschnitt 12.1.1)
2. Wärmeerzeugung durch Bestromung der Solarzelle bei erzwungener Konvektion durch Luftstrom (Abschnitt 12.1.2)
3. Wärmeerzeugung durch Einstrahlung (Abschnitt 12.1.3)

Jede Serie wurde an einem Glas-Glas-PV-Modul mit je einer Solarzelle (PERC) und je vier Pt100 Thermoelementen durchgeführt. Die Thermoelemente befanden sich dabei jeweils im Mittelpunkt der Solarzelle in verschiedenen Schichten des PV-Moduls:

1. auf der Außenseite der Sonnenzugewandten Seite,
2. auf der Vorderseite der Solarzelle,
3. auf der Rückseite der Solarzelle und
4. auf der Außenseite des rückseitigen Glases.

Es hat sich gezeigt, dass durch den symmetrischen Aufbau kein signifikanter Unterschied zwischen Vorder- und Rückseite besteht. Daher werden im Folgenden nur die Werte für die Rückseite gezeigt. Es wurde der zeitliche Verlauf der Temperatur gemessen, bis sie sich auf ein Plateau eingependelt hat.

Ebenfalls erfolgte eine Variation der Glasdicken mit 4 mm, 8 mm und 12 mm.

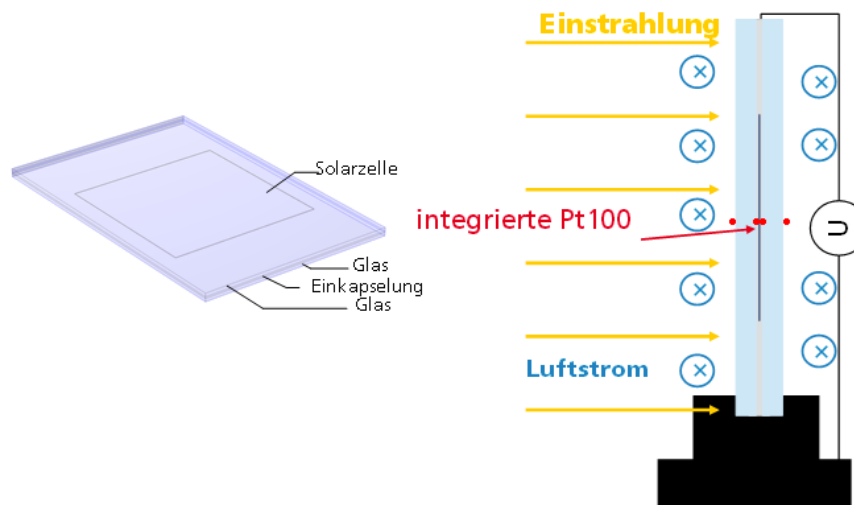


Abbildung 12-2: links: Geometrische Repräsentation des Ein-Zellen-Moduls im FEM-Modell; rechts: schematische Darstellung der physikalischen Randbedingungen sowie Position der Pt100 Thermoelemente. Die gelben Pfeile deuten dabei die Einstrahlung an, die blauen Kreise mit x den Luftstrom parallel zur Glasfläche (in die Bildschirmenebene).

12.1.1 Wärmeerzeugung durch Bestromung der Solarzelle bei freier Konvektion

Abbildung 12-3 zeigt die Ergebnisse der ersten Versuchsserie. Dabei wurde die angesetzte Stromstärke variiert. Die Werte wurden so gewählt, dass sie ca. 100 %, 75 % und 50 % des Kurzschlussstroms entsprechen. Die Simulationen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen, der Unterschied ist mit maximal 0,3 °C (1,6 %) sehr gering. Die Stromstärke hat einen deutlichen Einfluss auf die Temperatur, dahingegen ist der Einfluss der Glasdicke deutlich geringer. Erschwerend kommt hinzu, dass die Probenkammer nicht temperiert ist und somit entsprechend der Umgebungsbedingungen zwischen ca. 17 °C und 22 °C schwankte. Dies lässt eine eindeutige Auswertung der Temperaturunterschiede nicht zu. Da in der Simulation die Probenkammertemperatur als Umgebungstemperatur gesetzt wurde, ist diese davon nicht betroffen.

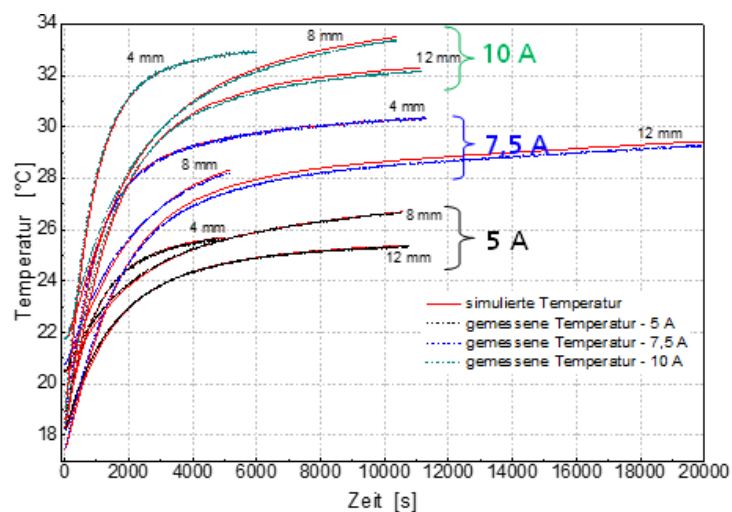


Abbildung 12-3: Simulation (rote durchgehende Linien) und Messung (gestrichelt) der Temperatur im Rückseiten Glas bei verschiedenen Stromstärken für verschiedene Glasdicken.

12.1.2 Wärmeerzeugung durch Bestromung der Solarzelle bei erzwungener Konvektion

Im nächsten Schritt wurde das Ein-Zell-Modul mit einem Luftstrom von ca. 2 m/s beströmt und die gleichen Messungen wiederholt. Abbildung 12-4 zeigt die Ergebnisse. Qualitativ stimmen Simulation und Messung weiterhin gut überein, allerdings ist die quantitative Abweichung mit bis zu 22 % deutlich höher. Die Ursache liegt in der sehr inhomogenen und nicht-laminaren Strömung. Der Luftstrom wurde mit einem Lüfter erzeugt, wobei die Windgeschwindigkeit durch die angelegte Leistung geregelt wurde.

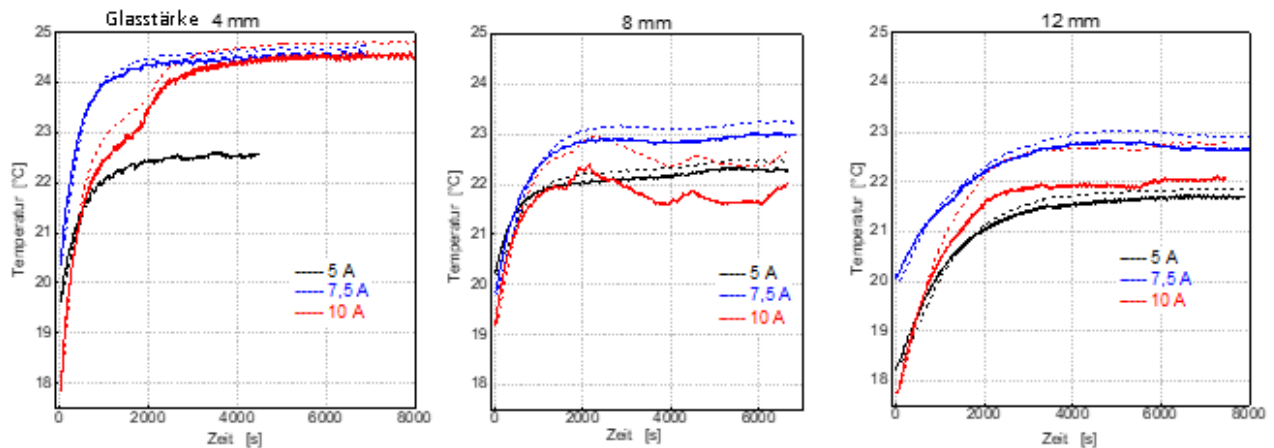


Abbildung 12-4: Simulation (gestrichelte Linien) und Messung (durchgehend) der Temperatur im Rückseiten Glas bei verschiedenen Stromstärken bei 2 m/s Luftströmung für verschiedene Glasdicken.

12.1.3 Wärmeerzeugung durch Einstrahlung

Zuletzt wurde die Wärmeerzeugung durch Einstrahlung untersucht. Hierfür wurde wieder die natürliche Konvektion ohne Luftstrom verwendet. Die Temperaturen auf der Solarzelloberseite stimmen sehr gut überein, wobei bei 1.100 W/m² Einstrahlung die gemessene Temperatur 3 °C (7 %) unter der simulierten liegt, was auf eine höhere Konvektion durch einen leichten Luftstrom schließen lässt (vgl. Abbildung 12-5). Laut den Messdaten liegt das Glas auf einem bis zu 7 °C niedrigeren Temperaturniveau als die Solarzelle.

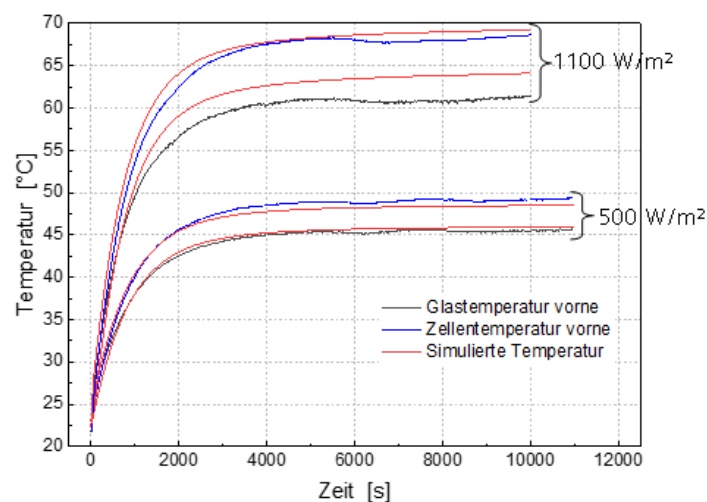


Abbildung 12-5: Simulation (rote Linie) und Messung der Temperatur im Vorderseiten Glas (blaue Linie) und auf der Solarzelloberseite (schwarze Linie) bei 500 W/m² und 1.100 W/m² Einstrahlung für 4 mm Glasdicke.

12.2 Vollformatmodul

Die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen bei Sunovation flossen in die Erstellung eines thermomechanischen dreidimensionalen FEM-Modells eines typischen Glas-Glas-BIPV-Moduls in einer vorgehängten hinterlüfteten Fassadenverkleidung (VHF). Die Glasscheiben haben je eine Dicke von 4 mm, eine Länge von 1.320 mm und eine Breite von 697 mm. Es wird ein Silikon-Einkapselungsmaterial verwendet. Das PV-Modul hat vier Strings mit je acht Solarzellen von $156,75 \times 156,75 \times 0,18 \text{ mm}^3$. An die PV-Modul Rückseite ist umlaufend (bündig mit der Kante) ein quadratischer Hohlprofil-Rahmen mit Kantenlänge 40 mm aufgeklebt. Abbildung 12-6 zeigt die geometrische Abbildung in dem verwendeten FEM-Programm COMSOL Multiphysics.

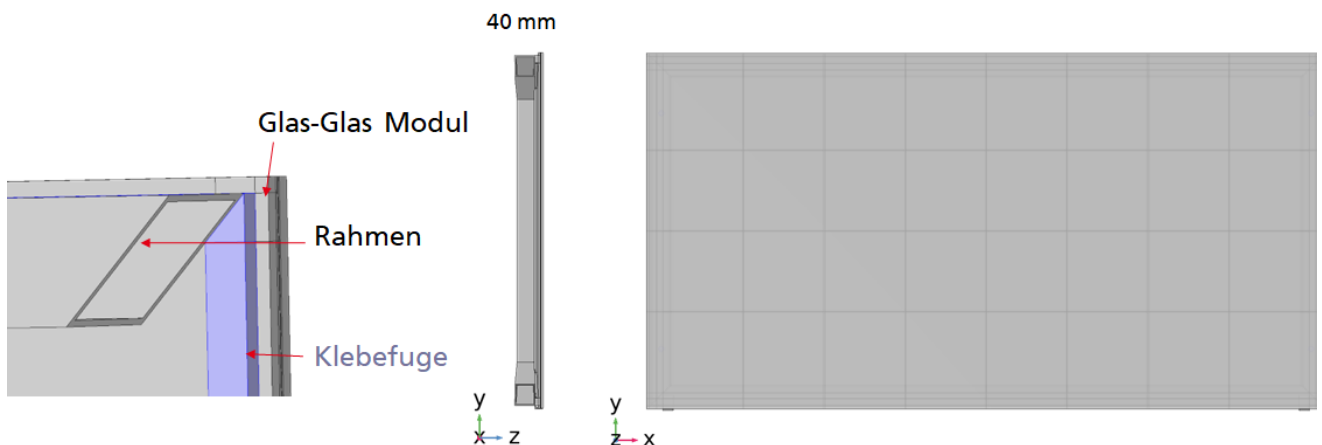


Abbildung 12-6: Geometrische Repräsentation des untersuchten BIPV-Moduls.

Abbildung 12-7 zeigt die verwendeten Randbedingungen im thermischen und mechanischen FEM-Modell.

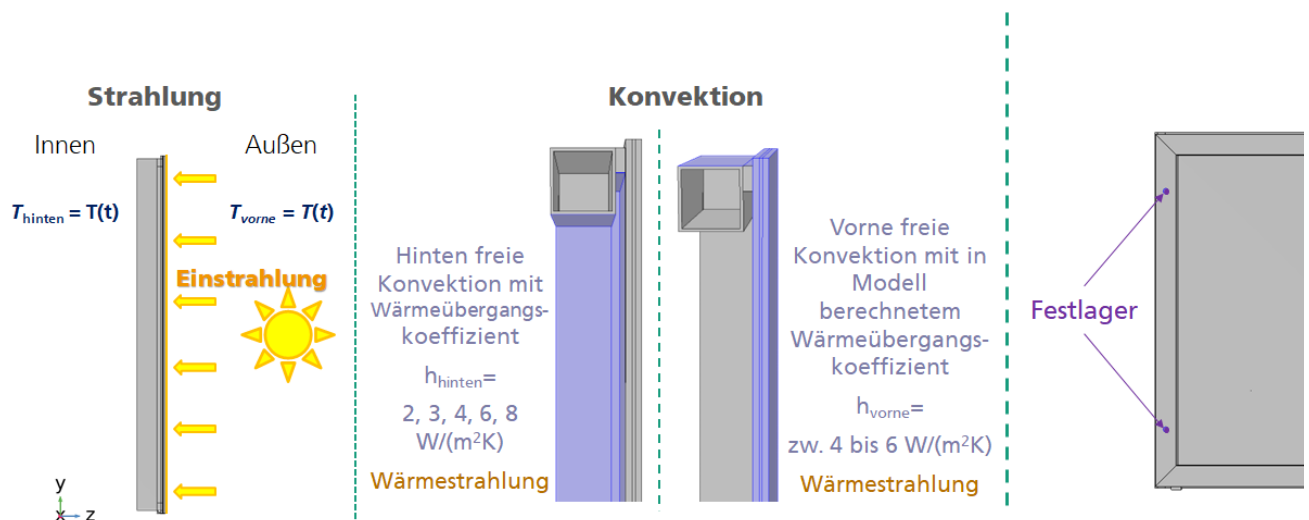


Abbildung 12-7: Schematische Darstellung der gewählten Randbedingungen im thermischen und mechanischen FE-Modell.

Die verwendeten Materialeigenschaften sind in Tabelle 12-1 gegeben.

Tabelle 12-1: In der FEM-Simulation des BIPV-Moduls verwendeten Materialeigenschaften.

Schicht	Dichte [kg/m ³]	E-Modul [GPa]	Poissonzahl [-]	Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Wärmekapazität [J/(kg·K)]
Glas	2530	74	0,2	9	1	720
Solarzellen	2330	130	0,28	2,6	149	703
Einkapselung	970	0,0001	0,4	300	0,2	1500
Kleber	67	0,00043	0,49	769	0,2	1500
Rahmen	2700	70	0,33	23	238	900

In Abbildung 12-8 sind die meteorologischen Daten, welche für die transiente numerischen Simulationen in Abschnitt 13 verwendet werden, dargestellt. Basierend auf den Untersuchungen in Abschnitt 11.2.1 wurde ein repräsentativer warmer und kalter Tag mit hoher solarer Einstrahlung für eine Süd-Orientierung ausgewählt.

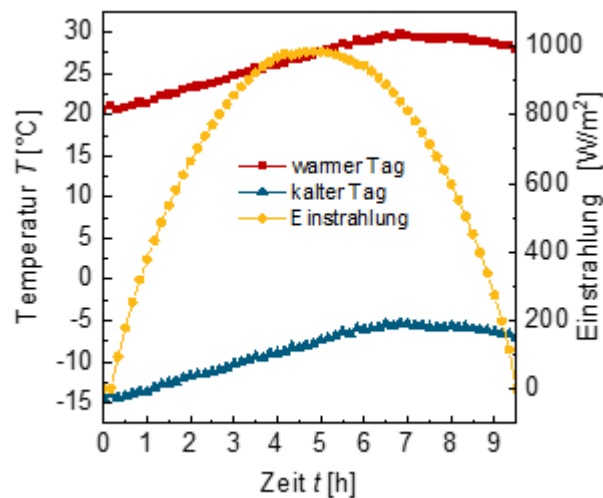


Abbildung 12-8: Zeitlicher Verlauf der meteorologischen Daten des ausgewählten repräsentativen warmen und kalten Tages.

13 Parameterstudien für BIPV-Module mittels der Methode der Finiten Elemente

In diesem Kapitel werden die in Abschnitt 6.2.6 definierten Parameter mit dem in Abschnitt 12.2 beschriebenen transienten FEM-Modell untersucht, diese sind:

1. Umgebungsbedingung (max. Einstrahlung und Temperatur mit Süd-Orientierung)
2. Rahmen
3. Betriebsbedingung (MPP und OC)
4. Belegungsgrad mit Solarzellen
5. Randabstand der Zellen zur Modulkante
6. Glasdicke
7. Verschattung
8. Unterschied von kristallinem Silizium zu Dünnschicht
9. Weitere allgemeine Modellierungsparameter

Betrachtet wird jeweils die Temperatur T und die erste Hauptspannung σ_1 (Zugspannung) im Vorderseitenglas des Moduls. Die Werte im Rückseitenglas weichen davon nur leicht ab.

13.1 Analysen zu den meteorologischen Umgebungsbedingungen

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 11.2 wurden hier exemplarisch die Temperaturverteilung und daraus resultierende mechanische Spannung für einen warmen Tag mit Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C sowie einen kalten Tag mit Temperaturen zwischen -10 °C und +5 °C (siehe Abbildung 12-8) untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13-1 gezeigt. Die maximale Einstrahlung beträgt dabei jeweils 1.000 W/m² und die Module sind nach Süden orientiert.

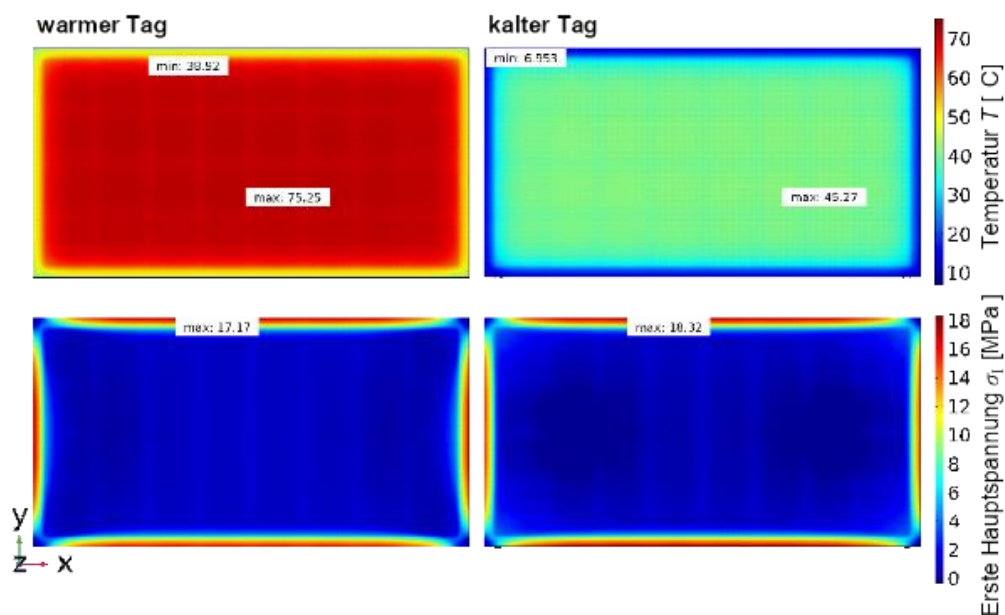


Abbildung 13-1: Temperatur (oben) und daraus resultierende mechanische Spannung (unten) jeweils im Vorderseitenglas an einem warmen (links) und kalten Tag (rechts).

Die Temperaturdifferenz zwischen maximaler und minimaler Temperatur ist am kalten Tag mit 38 K im Vergleich zum warmen Tag 2 K größer, was sich auch in der leicht höheren Maximalspannung von 18,3 MPa im Vorderseitenglas widerspiegelt.

Zusammenfassend werden kalte Tage mit hoher Einstrahlung als die kritischsten Umgebungsbedingungen identifiziert, sodass alle weiteren FE-Untersuchungen mit diesen Bedingungen durchgeführt werden.

Zudem wurde der Einfluss des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten auf der Rückseite des Moduls untersucht. Sprich, wie gut die Wärmeableitung in Richtung der Fassade ist. Es wurden Werte zwischen $2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und $8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ betrachtet. Abbildung 13-2 zeigt die Abhängigkeit der maximalen ersten Hauptspannung im Vorderseitenglas für den kalten und warmen Tag. Der kalte Tag hat dabei eine stärkere Abhängigkeit und es zeigt sich, dass eine hohe Konvektion auf der Modulrückseite die mechanische Spannung im Glas reduziert.

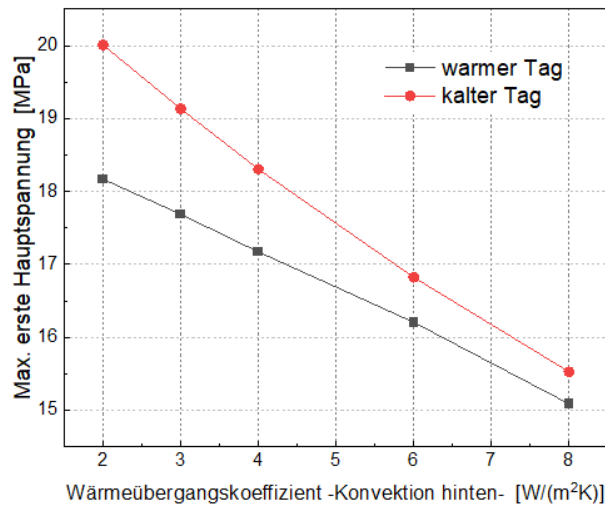


Abbildung 13-2: Maximale erste Hauptspannung im Vorderseitenglas bei Variation des Wärmeübergangskoeffizienten auf der Modulrückseite für den kalten und warmen Tag.

Zuletzt wurde der Fall einer plötzlich einfallenden Einstrahlung an einem kalten Tag betrachtet. Dies soll einen bewölkten Vormittag abbilden und dann eine recht schnelle Aufklärung des Himmels. Abbildung 13-3 zeigt, dass die maximale Hauptspannung sich nur unwesentlich unterscheidet, somit ist im Wesentlichen die maximale Einstrahlung sowie die Außenlufttemperatur für die Höhe der mechanischen Spannung verantwortlich.

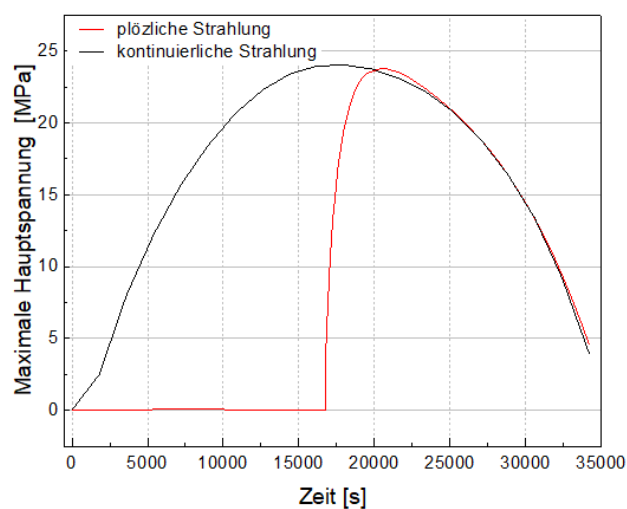


Abbildung 13-3: Maximale Hauptspannung im Vorderseitenglas bei kontinuierlicher und plötzlich auftretender Einstrahlung an einem kalten Tag.

13.2 Analysen zum Rahmen

Zur Untersuchung des Einflusses des Modulrahmens wurden drei Varianten simuliert:

1. Mit Rahmen und Absorption in der Klebefuge
2. Mit Rahmen ohne Absorption in der Klebefuge
3. Ohne Rahmen

Abbildung 13-4 zeigt die resultierende Temperaturverteilung im Modulquerschnitt an der Position des Rahmens und die dazugehörige maximale erste Hauptspannung (Zugspannung). Es zeigt sich, dass der Rahmen einen signifikanten Einfluss auf die Temperatur und die daraus resultierende Spannung hat. Einerseits sorgt die hohe Absorption in der Klebefuge für eine Erwärmung des Moduls und Rahmens, weswegen sich in der Simulation mit Rahmen und Absorption in der Klebefuge eine höhere Randtemperatur einstellt. Andererseits trägt die gute Wärmeleitung des Aluminiumrahmens zu einer besseren Wärmeabgabe an die Umgebung bei, was wiederum zu einer niedrigeren Randtemperatur im Vergleich zu einem rahmenlosen Modul führt. Entsprechend hat das rahmenlose Modul eine mechanische Spannung zwischen den gerahmten Modulen mit und ohne Absorption in der Klebefuge. Eine hohe Absorption in der Klebefuge ist vorteilhaft, um die mechanischen Spannungen im Glas zu reduzieren. Dies kann z. B. durch schwarze Klebstoffe erreicht werden.

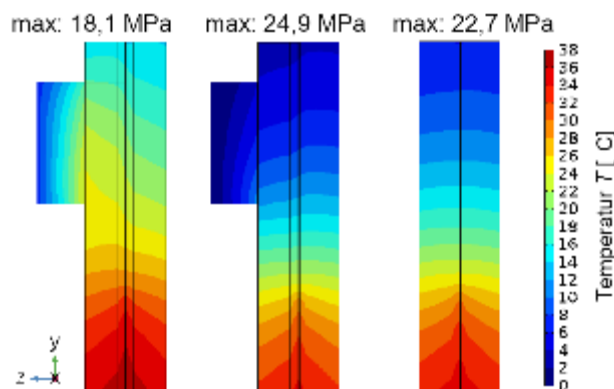


Abbildung 13-4: Temperaturverteilung im Modulquerschnitt an der Position des Rahmens für Simulationen mit Rahmen und Absorption in der Klebefuge (links) mit Rahmen ohne Absorption in der Klebefuge (Mitte) und ohne Rahmen (rechts). Die resultierende maximale mechanische Spannung an der Glaskante ist oben angegeben.

13.3 Analysen zu den Betriebsbedingungen

Um den Einfluss der Betriebsbedingung zu untersuchen, wurde die Absorption der Solarzelle angepasst. Für die Leerlaufspannung wurde angenommen, dass 95 % der einfallenden Strahlung absorbiert wird. Im Falle des maximalen Arbeitspunktes, wurde die Absorption um die Effizienz der Solarzelle von 22 % reduziert, wodurch sich eine Absorption von 73 % ergibt. Abbildung 13-5 zeigt, dass die geringere Absorption der Solarzelle im MPP zu einer ca. 10 K höheren Temperatur im Bereich der Solarzellen führt, während die Temperatur am Modulrand so gut wie unverändert bleibt. Dadurch ergibt sich eine ca. 4,5 MPa höhere Spannung im Glas.

Zusammenfassend ergeben sich im Leerlaufbetrieb (OC) tendenziell höhere Spannungen als im Betriebszustand als der „maximale Arbeitspunkt (MPP)“.

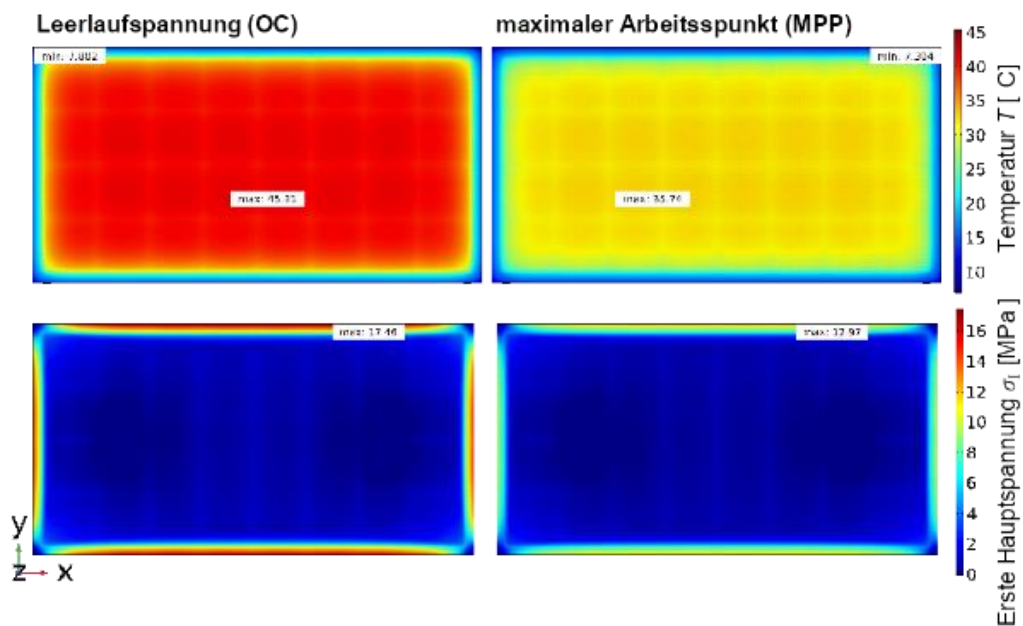


Abbildung 13-5: Temperatur (oben) und daraus resultierende mechanische Spannung (unten) jeweils im Vorderseitenglas in Leerlaufspannung (links) und maximalem Arbeitspunkt (rechts).

13.4 Analysen zum Solarzellen-Belegungsgrad

Es wurden drei verschiedene Belegungsgrade untersucht:

1. Vollbelegt: 4 × 8 Solarzellen
2. Teilbelegt: 3 × 7 Solarzellen
3. Schwach belegt: 2 × 6 Solarzellen

Abbildung 13-6 zeigt die simulierte Temperatur und mechanische Spannung. Auf Grund der stärkeren Wärmeerzeugung, weist das vollbelegte PV-Modul mit 45,8 °C die höchste Maximaltemperatur auf. Der Unterschied zwischen teilbelegten und schwach belegten Modulen ist mit 40,7 °C und 40,2 °C nicht signifikant. Dadurch zeigt sich, dass schon eine leichte Vergrößerung des Zellabstandes die Temperatur der Solarzelle um bis zu 5 K reduziert werden kann. Deutlich stärker wirkt sich der Belegungsgrad auf die Minimaltemperatur aus, diese sinkt von 8,7 °C bei Vollbelegung auf -6,8 °C bei schwacher Belegung. Damit erhöht sich der Temperaturunterschied signifikant von 37 K auf 47 K. Allerdings wird der Temperaturgradient durch geringere Belegung abgeschwächt, weswegen die höchste Maximalspannung mit 16,9 MPa (am Glasrand) in vollbelegten Modulen auftritt.

In der Zusammenfassung führen voll belegte PV-Module zu höheren thermisch induzierten Spannungen.

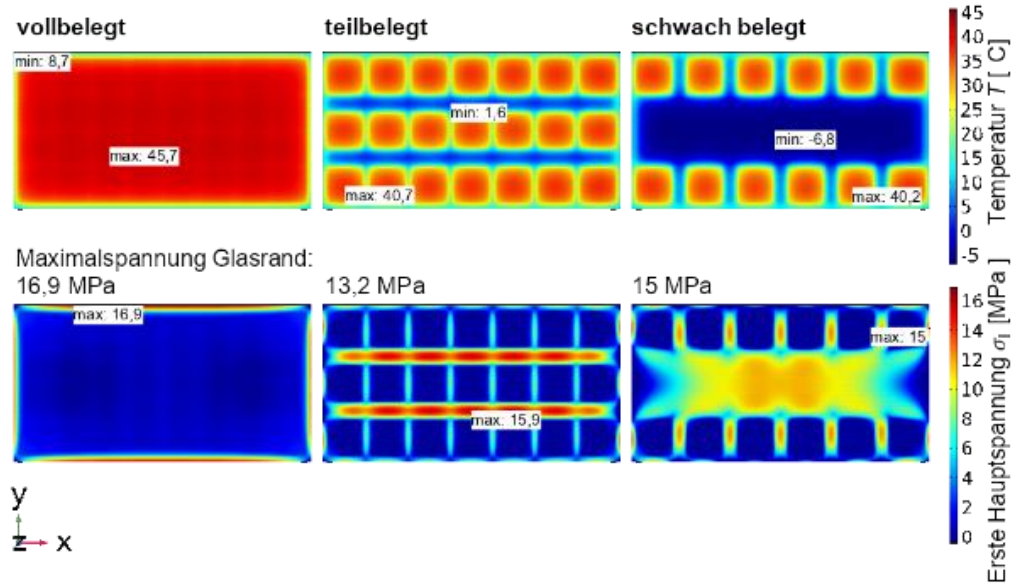


Abbildung 13-6: Temperatur (oben) und daraus resultierende mechanische Spannung (unten) jeweils im Vorderseitenglas für vollbelegte (links) teilbelegte (Mitte) und schwach belegte (rechts) PV-Module. Zusätzlich zu den Maximalwerten ist die Maximalspannung am Glasrand angegeben.

13.5 Analysen zum Randabstand der Zellen zur Modulkante

Es wurde ein normaler Randabstand (lange Seite: 28,8 mm, kurze Seite: 18,8 mm) und ein sehr großer Randabstand (lange Seite: 108,9 mm, kurze Seite: 99,9 mm) untersucht. Abbildung 13-7 zeigt, dass sich die Maximaltemperatur nicht signifikant ändert, während die Minimaltemperatur bei großem Randabstand von 8,7 $^{\circ}\text{C}$ auf -2 $^{\circ}\text{C}$ abfällt. Somit erhöht sich die Temperaturdifferenz von 37 K auf 47,6 K. Die resultierende Spannung erhöht sich von 16,9 MPa auf 20,6 MPa, wobei die maximale Spannung am Glasrand 17,5 MPa beträgt. Generell hat der Randabstand einen geringen Einfluss auf die thermisch induzierten Spannungen.

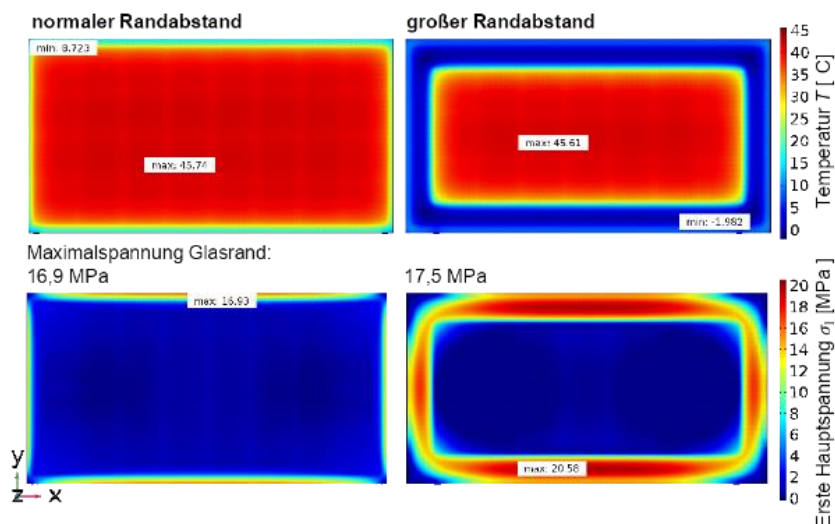


Abbildung 13-7: Temperatur (oben) und daraus resultierende mechanische Spannung (unten) jeweils im Vorderseitenglas für normalen (links) und großen (rechts) Randabstand. Zusätzlich zu den Maximalwerten ist die Maximalspannung am Glasrand angegeben.

13.6 Analysen zur Glasdicke

Die Glasscheibendicke wurde in 2 mm Schritten zwischen 2 mm und 10 mm variiert. Dabei hatten die Vorder- und Rückseite die gleiche Dicke. Abbildung 13-8 zeigt, dass die Glasdicke nur einen leichten Einfluss auf die maximale mechanische Spannung im Glas hat. Für 10 mm Glas reduziert sich die Spannung

um 0,6 MPa im Vergleich zu 2 mm. Auf Grund der größeren thermischen Masse, verschiebt sich der Zeitpunkt der Maximalspannung um ca. eine halbe Stunde. Folglich bietet eine höhere Glasscheibendicke keinen signifikanten Vorteil zur Reduzierung thermisch induzierter Spannungen.

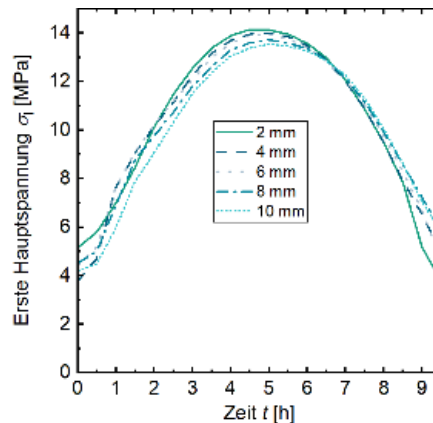


Abbildung 13-8: Erste Hauptspannung im Glas im Tagesverlauf für verschiedene Glasscheibendicken.

13.7 Analysen zur Verschattung

Es wurden verschiedene Verschattungsszenarien untersucht, die in Abschnitt 11.3.1 als bedeutsam identifiziert wurden: Eine horizontale und vertikale Teilverschattung mit je 5 %, 10 % und 50 % Anteil der Glasfläche und ein Doppeldiagonalschatten, welcher in der Mitte der kurzen Modulkante zusammenführt. Die Verschattungsintensität betrug 100 % (d. h. vollständige Verschattung ohne Einstrahlungsanteile).

Zuerst wird auf die horizontale und vertikale Teilverschattung eingegangen, die simulierten Temperaturen sind in Abbildung 13-9 gezeigt. Die Maximaltemperatur ändert sich dabei nur bei 50 % horizontale Teilverschattung von 45,3 °C auf 44,6 °C. Die Minimaltemperatur ist jedoch stark von der Schattenbreite abhängig und befindet sich zwischen -0,6 °C für 5 % horizontale Teilverschattung und -8,0 °C für 50 % vertikale Verschattung. Die daraus resultierende mechanische Spannung ist in Abbildung 13-10 gezeigt. Alle Teilverschattungen führen im Vergleich zu unverschatteten PV-Modulen zu signifikant höheren Maximalspannungen, welche alle am Glasrand auftreten. Die Werte liegen zwischen 21,1 MPa (10 % horizontal und 5 % vertikal) und 25,3 MPa (50 % vertikal). Es gibt keine klare Korrelation zwischen Schattengröße und Spannung.

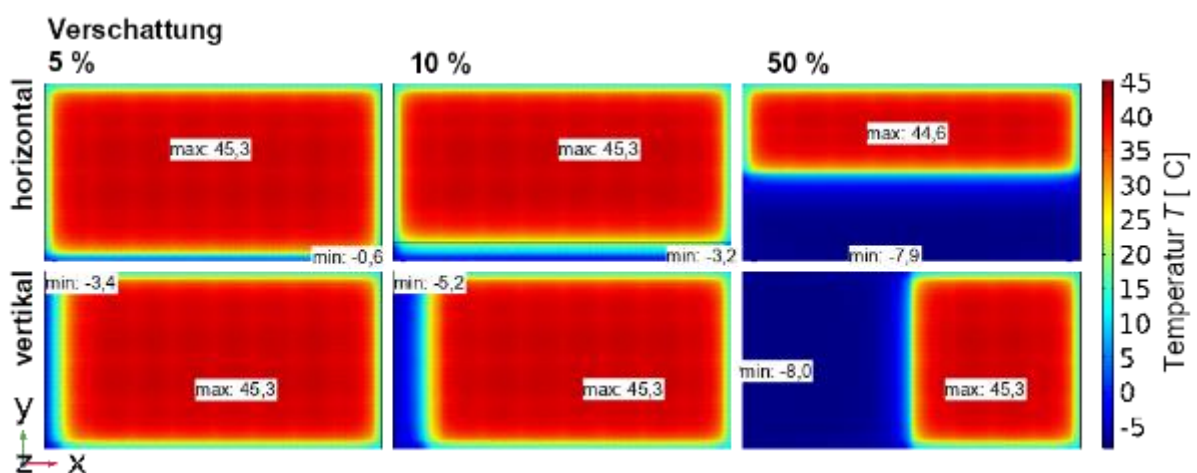


Abbildung 13-9: Temperatur im Vorderseitenglas für verschiedene Verschattungen: oben: horizontaler Schatten; unten: vertikaler Schatten mit jeweils verschiedenen Verschattungsanteilen: 5 % (links) 10 % (Mitte) und 50 % (rechts).

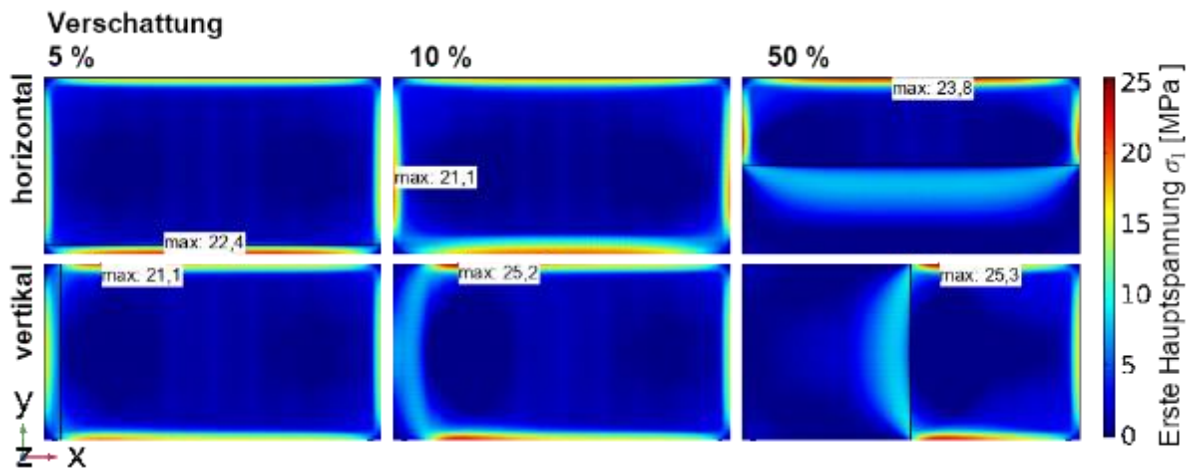


Abbildung 13-10: Mechanische Spannung im Vorderseitenglas für verschiedene Verschattungen: oben: horizontaler Schatten; unten: vertikaler Schatten mit jeweils verschiedenen Verschattungsanteilen: 5 % (links) 10 % (Mitte) und 50 % (rechts).

Als zweites wird der Doppeldiagonalschatten betrachtet. Dieser geht jeweils von der Mitte der langen Modulkante und führt in der Mitte der kurzen Modulkante zusammen. Abbildung 13-11 zeigt die simulierte Temperatur und resultierende mechanische Spannung. Die Maximaltemperatur beträgt ebenfalls 45,3 °C bei -7,4 °C Minimaltemperatur. Auf Grund des sehr großen Temperaturgradienten an der Spitze des Schattens, wird mit 32,4 MPa hier die höchste Maximalspannung erreicht. Verglichen mit dem unverschatteten PV-Modul ist die Spannung fast doppelt so hoch, somit beeinflussen derartige Verschattungen thermisch induzierte Spannungen signifikant.

Im realen Einbaufall ist die thermisch induzierte Spannung mit der aus den anderen Einwirkungen erzeugten Glasspannungen zu überlagern. Diese Beanspruchung kann z. B. aus Windlast, Schneelast, Eigengewicht oder durch unplanmäßige Montagefehler resultieren. Es ist dabei anzunehmen, dass sich Wind durch die verstärkte Konvektion und den damit verbundenen Kühleffekt tendenziell reduzierend auf die thermisch induzierte Spannung auswirkt.

Bei Schnee hingegen ist zwischen einer Vollbedeckung und Teilbedeckung zu unterscheiden. Bei Vollbedeckung entstehen keine Spannungen durch die Verschattung und es wirken nur die mechanischen Lasten. Bei Teilbedeckung stellt der Schnee eine Verschattung (und gleichzeitig Abkühlung des Moduls) dar, weswegen sich hier die thermisch induzierte mit der Schneelast induzierten Spannung überlagert. Gleiches gilt für die Spannung auf Grund des Eigengewichts (mit unter Zugbeanspruchung stehenden Glaskanten) und etwaige Montagefehler in Kombination mit der thermisch induzierten Spannung. Hierdurch könnte sich ein höheres Glasbruchrisiko ergeben. Diese Szenarien konnten im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht untersucht werden.

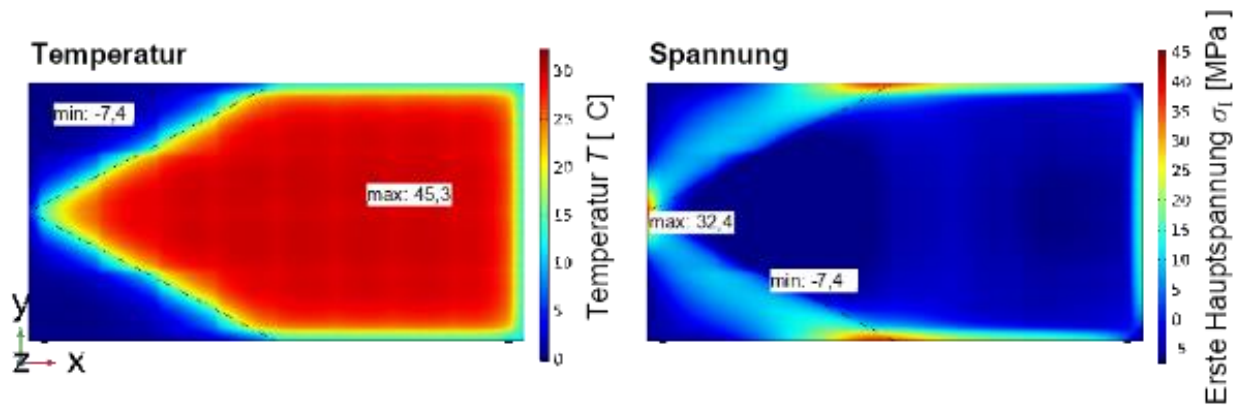


Abbildung 13-11: Temperatur (links) und daraus resultierende mechanische Spannung (rechts) jeweils im Vorderseitenglas für einen Doppeldiagonalschatten.

13.8 Analysen zum Unterschied von kristallinem Silizium zu Dünnschicht

Zur Simulation eines Dünnschicht PV-Moduls, wurden die Solarzellen entfernt und durch eine absorbierende auf der sonnenabgewandten Seite des Vorderseitenglases positionierte Absorberschicht ersetzt. Da die Simulation im OC durchgeführt wurde hatten die unterschiedlichen Moduleffizienzen keinen Einfluss.

Abbildung 13-12 zeigt, dass auf Grund der geringeren Absorberschichtdicke und damit geringeren thermischen Masse, die Maximaltemperatur im Dünnschichtmodul knapp 1 K niedriger ist. Da allerdings auch die Randtemperatur leicht niedriger ist sowie der Gradient von maximaler zu minimaler Temperatur größer, weist das Dünnschichtmodul eine 1,5 MPa höhere Maximalspannung auf. Folglich liegen unter Voraussetzung gleicher Einwirkungsbedingungen die thermisch induzierten Glasspannungen bei Dünnschicht-Modulen leicht höher im Vergleich zu Modulen mit kristallinen Silicium-Zellen.

Zu beachten ist dabei weiter, dass bei Dünnschicht-Modulen infolge des Produktionsprozesses als Rückseitenglas in der Regel Floatglas zum Einsatz kommt. Hingegen werden bei kristallinen Silicium-Modulen üblicherweise thermisch vorgespannte bzw. thermisch behandelte Deckgläser eingesetzt.

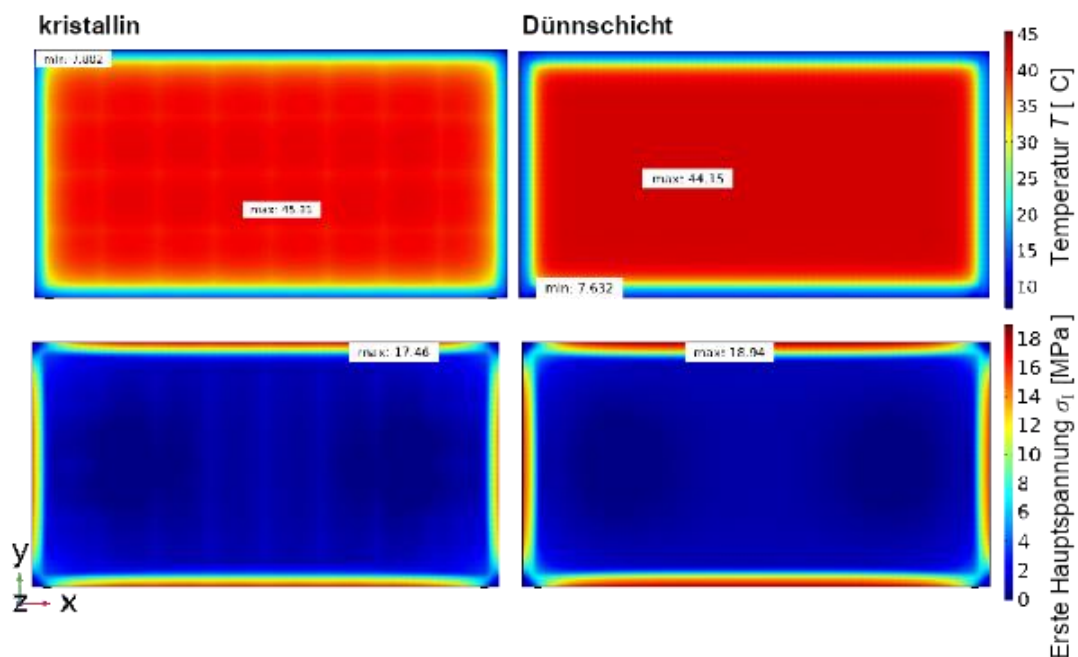


Abbildung 13-12: Temperatur (oben) und daraus resultierende mechanische Spannung (unten) jeweils im Vorderseitenglas für ein kristallines PV-Modul (links) und ein Dünnschicht PV-Modul (rechts).

13.9 Analyse weiterer allgemeiner Modellierungsparameter

Es wurde untersucht, inwieweit sich eine transiente von einer stationären Berechnung unterscheidet. Abbildung 13-13 zeigt, dass eine stationäre Simulation zu einer leichten zeitlichen Verschiebung der Spannungskurve führt, wohingegen das Maximum der Kurve minimal beeinflusst wird. Daher eignen sich stationäre Simulationen für eine Betrachtung der maximal auftretenden Spannungen.

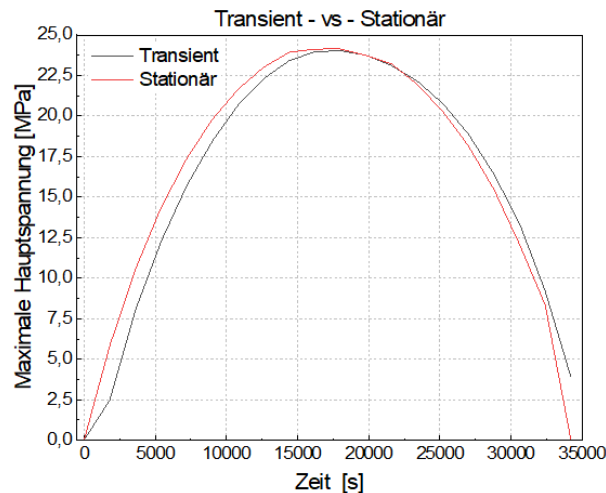


Abbildung 13-13: Maximale Hauptspannung im Vorderseitenglas für eine transiente und stationäre Simulation.

Zuletzt wurde der Einfluss des sogenannten Kamineffektes untersucht. Dieser tritt bei einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade im Spalt zwischen den vorgehängten BIPV-Modulen und der Fassade auf. Hier kommt es von unten nach oben zu einer graduellen Erwärmung der Luft im Spalt. Der Einfluss auf die mechanische Spannung in den BIPV-Modulen wurde anhand von den in Messdaten aus dem Projekt „Multielement 2“ [44] untersucht. In diesem Projekt wurde eine 8 m hohe Testfassade mit vorgehängten hinterlüfteten BIPV-Modulen ausgestattet und die Temperaturen an verschiedenen Höhen gemessen.

In Abbildung 13-14 sind die für die FEM-Simulation verwendeten Werte gezeigt. Der Höhenunterschied zwischen „unten“ und „oben“ beträgt dabei ca. 6 m.

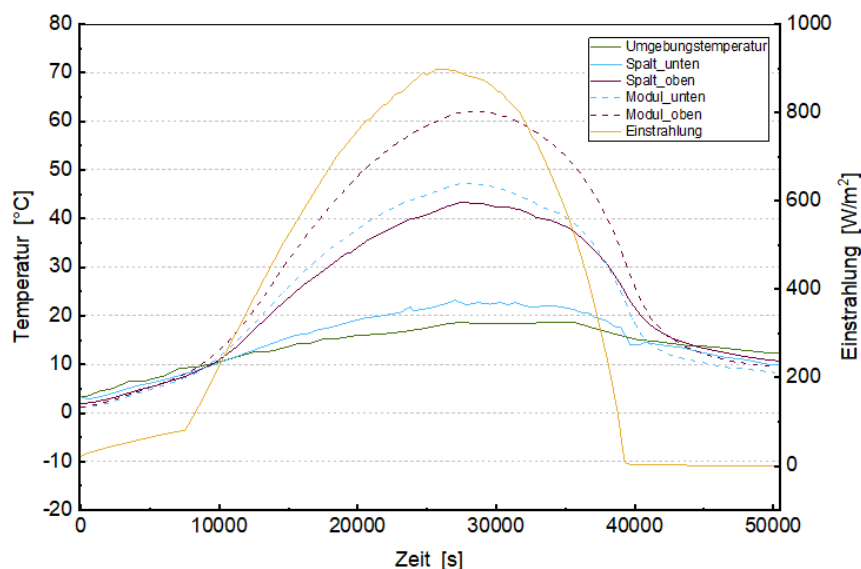


Abbildung 13-14: Eingabekurven zur Untersuchung des Kamineffektes. Unten und oben bezieht sich auf die Position des BIPV-Moduls an der 8 m hohen Testfassade.

Die höhere Temperatur des Spalts am oberen Ende der VHF führt zu einer ca. 8 K höheren Maximaltemperatur des oberen Moduls im Vergleich zum unteren, wie in Abbildung 13-15 zu sehen ist. Gleichzeitig erhöht sich die Minimaltemperatur nur um ca. 3 K, was zu einer 2,5 MPa höheren Maximalspannung im oberen Modul führt. Dies ist auch in dem in Abbildung 13-16 gezeigten Tagesverlauf der Temperatur und mechanischen Spannung ersichtlich.

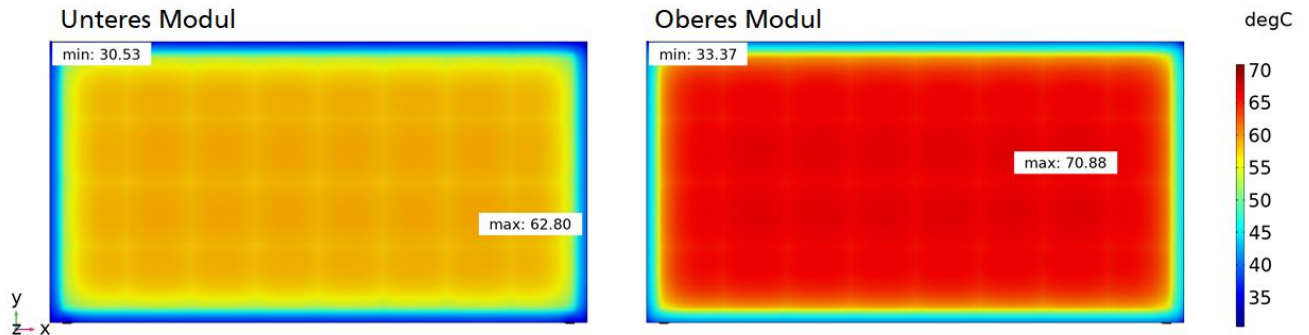


Abbildung 13-15: Temperaturverteilung des unteren und oberen Moduls and einer VHF zum Zeitpunkt des Tagesmaximums.

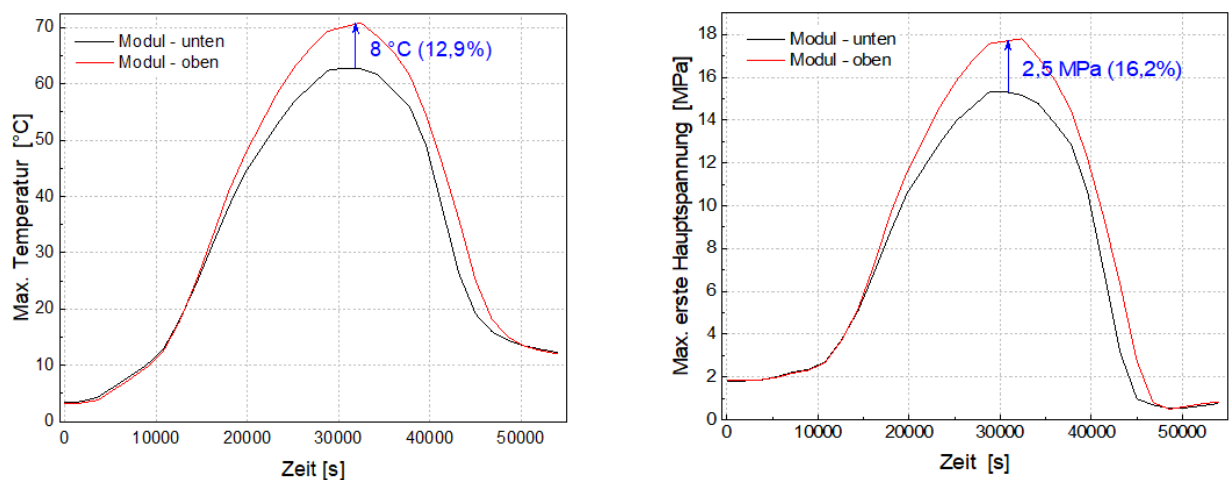


Abbildung 13-16: Maximale Temperatur (links) und maximale erste Hauptspannung (rechts) im Vorderseitenglas für ein BIPV-Modul unten und oben an einer VHF.

13.10 Zusammenfassung

Es wurde sowohl ein sehr detailliertes thermomechanisches 3D FE-Modelle eines (rahmengelagerten) Glas-Glas-BIPV-Moduls in einer vorgehängten hinterlüfteten Fassadenverkleidung als auch ein vereinfachtes 2D FE-Modell entwickelt. Das 3D Modell wurde erfolgreich validiert mit einer guten Übereinstimmung zu den experimentellen Daten (vgl. Abschnitt 9.6). Die durchgeführten Variationen haben ergeben, dass Teilverschattungen eine z. T. erhebliche Erhöhung der thermisch induzierten Spannung zur Folge haben können und daher bei der Planung einer PV-Anlage gesondert beachtet werden sollten, insbesondere falls kein thermisch vorgespanntes Glas zum Einsatz kommt. Die weiteren Ergebnisse sind:

1. Kalte Tage mit hoher Einstrahlung induzieren im Jahresverlauf die höchsten thermisch induzierten mechanischen Spannungen.
2. Der Leerlaufbetrieb (OC) führt zu einer höheren Spannung als der Betrieb im maximalen Arbeitspunkt (MPP).

-
3. Verschattungen haben einen signifikanten Einfluss auf die thermisch induzierte Spannung. Insbesondere doppeldiagonale Schatten können die resultierenden Spannungen sogar verdoppeln.
 4. Voll belegte PV-Module haben leicht höhere Spannungen als teilbelegte.
 5. Der Randabstand von Solarzellen- zu Glaskante hat einen sehr geringen Einfluss auf die Maximalspannung an der Glaskante.
 6. Die Dicke der Glasscheibe hat einen minimalen Einfluss.
 7. Dünnschicht PV-Module haben eine leicht höhere mechanische Spannung als kristalline PV-Module.
 8. Ein Rahmenkleber mit hoher Absorption reduziert die thermisch induzierte Spannung im Glas.

14 Berechnungsverfahren für Verglasungen

14.1 Einleitung

Basierend auf den Untersuchungen der vorangegangenen Abschnitte wurden als zentraler Bestandteil des Forschungsprojekts verschiedene Berechnungsverfahren zur Ermittlung der thermisch induzierten Spannungen für Verglasungen entwickelt. Hierbei wurden durch die Kombination relevanter Einflussgrößen (siehe hierzu Abschnitt 6.1.5 und Abschnitt 11) sogenannte Worst-Case-Szenarien erarbeitet. Im Folgenden werden die Grundzüge der Berechnungsverfahren kurz vorgestellt. Eine detaillierte Ausführung der Berechnungsverfahren ist im Normentwurf für Verglasungen in Abschnitt 16 enthalten.

Die Berechnungsverfahren variieren hinsichtlich der räumlichen Dimension (ein-, zwei-, dreidimensional) sowie der Zeitabhängigkeit (stationär und transient) und liefern unterschiedliche Ergebnisse, die jedoch weitestgehend in der gleichen Größenordnung liegen, wie sich in Abschnitt 17.8 zeigt.

Für das ein- und zweidimensionale Berechnungsverfahren wurden, basierend auf der französischen Norm NF DTU 39 P3 die folgenden sogenannten Temperaturzonen (kurz Zonen) definiert:

- Zone 1 beschreibt die Temperatur der Glaskante (im Rahmen) im verschatteten Bereich der Verglasung.
- Zone 2 beschreibt die Temperatur der zentral gelegenen Glasmitte im unverschatteten Bereich der Verglasung.
- Zone 3 beschreibt die Temperatur der zentral gelegenen Glasmitte im verschatteten Bereich der Verglasung.
- Zone 4 (in NF DTU 39 P3 nicht enthalten und neu definiert) beschreibt die Temperatur der Glaskante (im Rahmen) im unverschatteten Bereich der Verglasung.

In Abbildung 14-1 sind die Temperaturzonen illustriert.

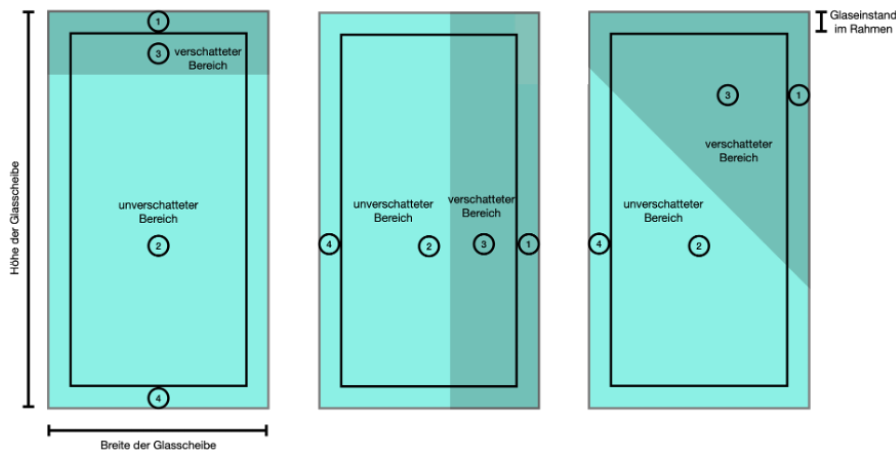


Abbildung 14-1: Exemplarische Darstellung der Temperaturzonen an drei Teilverschattungsszenarien (links: horizontale Teilverschattung, Mitte: vertikale Teilverschattung, rechts: diagonale Teilverschattung).

Falls die Berechnung räumlich eindimensional durchgeführt wird, so werden nur drei Temperaturzonen (siehe Abschnitt 16.6) definiert. Eindimensional bedeutet hierbei, dass die Temperaturberechnung den Isolierglasaufbau berücksichtigt, jedoch die Wärmeleitung zwischen angrenzenden Zonen vernachlässigt. Im nächsten Schritt der 1D Berechnung werden die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen den Zonen ausgewertet. Die darauffolgende Spannungsberechnung erfolgt am mechanischen eindimensionalen Modell eines Dehnstabes basierend auf der zuvor ermittelten maximalen Temperaturdifferenz.

Falls die Berechnung zweidimensional mit Hilfe von FE-Modellen durchgeführt wird, so werden insgesamt vier Temperaturzonen (siehe Abschnitt 16.6) benötigt, wodurch die Temperaturverteilung in der

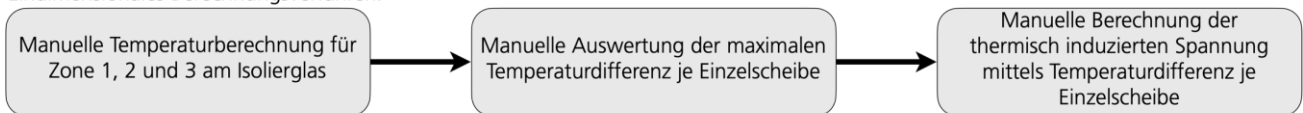
Einzelscheibe besser erfasst werden kann. Die Zweidimensionalität des Berechnungsmodells meint hier, dass ein horizontaler Schnitt durch die Verglasung gelegt wird (siehe Abbildung 16-2 und Abbildung 16-3) und dieser Schnitt in einem numerischen Modell berechnet wird. Durch diese Art der Modellierung ermöglicht es - im Vergleich zur eindimensionalen Berechnung - die Wärmeleitung zwischen den angrenzenden Zonen 1 und 3 und zwischen Zonen 2 und 4 korrekt zu berücksichtigen. Mit Hilfe eines zweidimensionalen numerischen Modells können die konstruktiven Details des Rahmens und des zweistufigen Randverbunds und deren Einfluss auf die Temperaturverhältnisse im Glas berücksichtigt werden. Nachdem die Temperaturberechnung durchgeführt wurde, werden im nächsten Schritt die Temperaturen der einzelnen Zonen 1 bis 4 ausgewertet und auf ein mechanisches zweidimensionales Modell übertragen. Die darauffolgende Spannungsberechnung erfolgt dann am mechanischen zweidimensionalen FE-Modell einer Scheibe, welche die zonenweise konstante Temperaturverteilung in der Ebene der Einzelscheibe erfasst.

Die dreidimensionalen numerischen Berechnungsverfahren basieren darauf, dass das in den Gläsern berechnete Temperaturfeld direkt auf das mechanische FE-Modell übertragen wird, weswegen für diese Verfahren die Auswertung der Temperaturen der Zonen 1 bis 4 überflüssig ist. Die konstruktiven Details des Rahmens und des zweistufigen Randverbunds können wie bei der zweidimensionalen Berechnung berücksichtigt werden. Gegenüber der zweidimensionalen Berechnung können z. B. aber auch verschiedene Verschattungsgeometrien sowie Glasgeometrien (z. B. runde Verglasungen) modelliert werden.

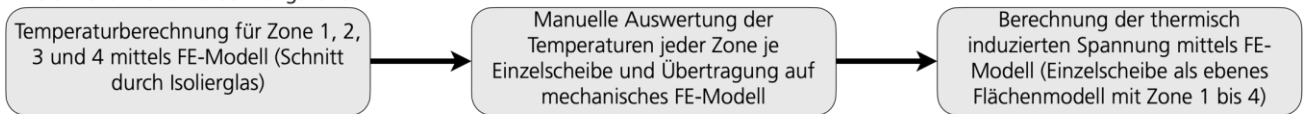
In Abbildung 14-2 sind die Abläufe der verschiedenen Berechnungsverfahren nochmals vereinfacht zusammengefasst dargestellt, wobei die Unterscheidung zwischen den stationären und transienten Berechnungen nicht enthalten ist.

Unter dem Begriff stationär ist zu verstehen, dass die Berechnung zeitunabhängig erfolgt und somit die Wärmekapazität, Dichte und Dicke der Konstruktionsbestandteile keinen Einfluss auf die Temperaturverteilung in den Bauteilen hat. Im Gegensatz dazu ist unter dem Begriff transient zu verstehen, dass die Berechnung zeitabhängig erfolgt und die eben genannten Materialeigenschaften die Temperaturverteilung in den Bauteilen entsprechend beeinflussen.

Eindimensionales Berechnungsverfahren:



Zweidimensionales Berechnungsverfahren:



Dreidimensionales Berechnungsverfahren:

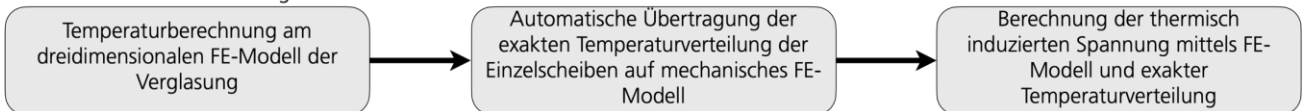


Abbildung 14-2: Zusammengefasste Darstellung der Abläufe der einzelnen Berechnungsverfahren. Die Unterscheidung zwischen stationär und transient ist hier nicht dargestellt.

In Tabelle 14-1 ist eine Übersicht zu den Berechnungsverfahren gegeben.

Tabelle 14-1: Übersicht zu den Berechnungsverfahren.

stationär	transient
1D	1D (nur Zone 2 und 3, siehe dazu Abschnitt 16.10.3)*
2D	2D
3D	3D

*Mit Hilfe des entwickelten vereinfachten eindimensionalen Berechnungsverfahrens kann die Temperatur in Zone 1 nicht transient berechnet werden.

14.2 Randbedingungen und Annahmen für die Berechnung

Im Folgenden werden die - für die Berechnungsverfahren verwendeten - Randbedingungen und Annahmen, welche für alle Verfahren identisch sind, dargelegt.

Für den äußeren Wärmeübergangskoeffizienten wird ein kombinierter Wärmeübergangskoeffizient (Superposition von Konvektion und Wärmestrahlung) verwendet. Die Größe des Werts wurde basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 11.2.3 im Projekt gemeinsam auf $10,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ festgelegt. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient ist auf allen äußeren Oberflächen konstant anzusetzen.

Für den inneren Wärmeübergangskoeffizienten wird ein kombinierter Wärmeübergangskoeffizient (Superposition von Konvektion und Wärmestrahlung) verwendet. Die Größe des Werts wurde basierend auf der EN 673 im Projekt gemeinsam auf $7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ festgelegt. Der innere Wärmeübergangskoeffizient ist auf allen inneren Oberflächen konstant anzusetzen.

Im Scheibenzwischenraum erfolgt die Wärmeübertragung basierend auf den Projektergebnissen (siehe Abschnitte 10.3 und 10.7) eindimensional mittels Konvektion des Füllgases und einer linearisierten Wärmestrahlung. Der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient wird temperaturabhängig gemäß EN 673 [21] berechnet. Infolge der Temperaturabhängigkeit ist eine iterative Berechnung erforderlich. Im Fall von zwei- und dreidimensionalen Berechnungen wird ebenfalls eine eindimensionale Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum angenommen. Dabei wird für die iterative Berechnung der Ort zur Auswertung der Glasoberflächentemperaturen (Oberflächen zum Scheibenzwischenraum hin orientiert) weit entfernt vom Rahmen betrachtet. Die Auswertung ist getrennt für Zonen 2 und 3 durchzuführen. Üblicherweise bewegt sich der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient im SZR in einem Wertebereich von $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bis $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

In der Temperaturberechnung wird eine Verschattung berücksichtigt (Zonen 1 und 3). Innerhalb dieser Zonen beträgt die Einstrahlungsintensität 10 % der solaren Einstrahlungsintensität, basierend auf den Angaben der NF DTU 39 P3 [39]. Die solare und diffuse Einstrahlungsintensität wirkt senkrecht auf die Verglasung. Die Rahmenleibungen und Oberflächen des Randverbundes gelten als vollständig verschattet und erhalten keine Einstrahlung, was zu thermisch induzierten Spannungen führt, die auf der sicheren Seite liegen, wie die Ergebnisse aus Abschnitt 11.1 zeigen.

Im Falle einer transienten Berechnung wird basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 11.1.4 eine Zeitschrittweite von 10 Minuten verwendet. Es wird nur der Zeitraum berechnet, in welchem solare Einstrahlung auf die Verglasung einwirkt. Bei transienten Berechnungen ist eine stationäre Berechnung zur Ermittlung der Anfangstemperaturen erforderlich.

Bei stationären Berechnungen ist in Bezug zu den meteorologischen Daten (solare Einstrahlung und Außenlufttemperatur) ein warmer und kalter Tag (vgl. Anhang A4 und Anhang A5) für die Ermittlung der thermisch induzierten Spannungen zu betrachten. Im Allgemeinen ist bei stationären Berechnungen zu beachten, dass diese zeitunabhängig sind und somit für die meteorologischen Daten jeweils nur Einzelwerte benötigt werden.

Im Fall von transienten Berechnungen werden ein warmer und kalter Tag sowie ergänzend ein warmer und kalter Übergangstag betrachtet. Bei transienten Berechnungen ist im Allgemeinen zu beachten, dass diese zeitabhängig sind und somit für die meteorologischen Daten Zeitreihen benötigt werden. Hierfür wurden

normierte Einstrahlungsprofile für den warmen und kalten sowie einen Übergangstag erstellt (vgl. Abschnitt 7.10 und Anhang A6). Diese Profile werden, um zeitlich veränderliche Einstrahlungskurven zu erhalten, mit den Einzelwerten aus Anhang A4 und Anhang A5 multipliziert. In Bezug zur Außenlufttemperatur wird ein sinusförmiger Ansatz für den Verlauf der Tagestemperatur verwendet. In Abschnitt 16.7.5 beschreibt Gleichung (16-2) den verwendeten Ansatz.

Alle Materialeigenschaften von Festkörpern sind zeit- und temperaturunabhängig.

Die Berechnung der Spannungen erfolgt auf Basis des linearen Elastizitätsgesetzes mit kleinen Verformungen.

Weitere Annahmen und Randbedingungen, die spezifisch für das jeweilige Berechnungsverfahren sind, werden in Abschnitt 16 beschrieben.

14.3 Vereinfachte 1D Temperatur- und Spannungsberechnung

Die Verglasung wird gemäß NF DTU 39 P3 [39] in drei Temperaturzonen (Zone 1, 2 und 3) eingeteilt. Diese Zonen sind in Abbildung 16-1 dargestellt. Die Temperaturberechnung erfolgt getrennt für jede Zone. Die anschließende Spannungsberechnung wird getrennt für jede Einzelscheibe des Mehrscheiben-Isolierglasaufbaus durchgeführt. Für die Temperatur- und die anschließende Spannungsberechnung werden verschiedene Annahmen getroffen, die im Folgenden aufgelistet sind.

Für die *Temperaturberechnung* werden die folgenden Annahmen getroffen:

1. Keine Wärmeleitung zwischen den Temperaturzonen jeder Einzelscheibe.

Die jeweilige Zone, für die die Temperatur eindimensional berechnet wird, befindet sich jeweils weit entfernt von den anderen Zonen. Somit sind störende Einflüsse (Temperaturen aus den angrenzenden Zonen) über die Distanz abgeklungen.

2. Die Wärmeleitung über die Glasdicke wird für alle Temperaturzonen aufgrund des geringen Temperaturgradienten über die Dicke der einzelnen Gläser vernachlässigt.

Der Temperaturgradient über die Glasdicke jedes Glases der Isolierglaseinheit ist sehr gering (in der Regel 1 K bis 3 K). Dadurch verschwindet dieser Anteil in der Wärmebilanzgleichung nahezu vollständig.

Im Fall einer transienten Berechnung ergibt sich der Vorteil, dass die Ortsabhängigkeit der Temperatur verschwindet und sich somit die Berechnungen stark vereinfachen. In einer stationären Berechnung könnte die Wärmeleitung über die Glasdicke berücksichtigt werden, wobei, basierend auf den im Forschungsprojekt ermittelten Ergebnissen, nahezu identische Temperaturen resultieren. Im Sinne der Vereinheitlichung der Wärmebilanzgleichungen (stationär und transient) wird die Wärmeleitung über die Glasdicke auch bei den stationären Berechnungen vernachlässigt.

3. Die Wärmeübertragung über den Scheibenzwischenraum in den Zonen 2 und 3 erfolgt temperaturabhängig gemäß EN 673. Die direkte solare Einstrahlung wird in der Zone 2 und die diffuse solare Einstrahlung in der Zone 3 berücksichtigt. Die Absorptionsgrade der Gläser können mit Hilfe von EN 410 und EN 52022-3 ermittelt werden.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt (siehe Abschnitt 11.4.7) haben gezeigt, dass die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum temperaturabhängig erfolgen sollte, da sonst für die mittleren Scheiben (ab Dreifach-Isolierglas) stark konservative Ergebnisse hinsichtlich der thermisch induzierten Spannungen resultieren.

4. Im Glaskantenbereich (Zone 1) werden Einflüsse infolge des Rahmens und des Scheibenzwischenraums sowie der Sekundärdichtung des Randverbundes vernachlässigt. Die Temperaturberechnung erfolgt in Zone 1 immer stationär. In Zone 1 wird keine diffuse Einstrahlung berücksichtigt.

Die Temperaturberechnung in der Zone 1 (Glaskante im Rahmen im verschatteten Bereich der Verglasung) stellt eine besondere Aufgabe dar, da sich hier bedingt durch die Rahmengeometrie (z. B. einfache Holzrahmenquerschnitte, sowie komplexe und stark aufgelöste Aluminium- und Kunststoffrahmenquerschnitte) und den angrenzenden Scheibenzwischenraum im Vergleich zu den

Zonen 2 und 3 ein zweidimensionaler (in Eckbereichen der Verglasung sogar dreidimensional) Wärmestrom einstellt, wie zwei- bzw. dreidimensionale Simulationen gezeigt haben.

Eine Vereinfachung auf eine eindimensionale Berechnung unter Berücksichtigung des Rahmens und des Isolierglases inkl. Randverbund ist - bedingt durch den zweidimensionalen Wärmestrom im Glaskantenbereich - nicht möglich. Aus diesem Grund wurde beschlossen, dass der Rahmen, der Scheibenzwischenraum und die Dicke der Gläser (analog zu den Zonen 2 und 3) im Glaskantenbereich in der Temperaturberechnung der Zone 1 vernachlässigt wird und - konstruktiv betrachtet - lediglich der Abstandhalter des Randverbundes in die Temperaturberechnung berücksichtigt.

Eine transiente Temperaturberechnung ist in Zone 1 nicht möglich, da hier die Wärmeübertragung nur über Wärmeleitung erfolgt und somit eine Ortsabhängigkeit enthalten ist, welche bereits für die Zonen 2 und 3 ausgeschlossen wurde. Somit wird die Temperatur in Zone 1 stets stationär berechnet. Falls in Zone 2 und 3 eine transiente Berechnung durchgeführt wird, so kann in Zone 1 eine quasi transiente Berechnung durchgeführt werden, indem für jede Außenlufttemperatur (über den Tag hinweg sinusförmig angesetzt) eine stationäre Berechnung durchgeführt wird.

Für die *Spannungsberechnung* werden die folgenden Annahmen getroffen:

1. Die Spannungen im Glas werden mit Hilfe des linearen Elastizitätsgesetzes berechnet.
Das Materialverhalten von Glas (üblich im Bauwesen: Kalk-Natronsilicatglas gemäß EN 572-1[19], aber auch Borosilicatglas gemäß EN 1748-1-1[16]) lässt sich in den für Fassadenverglasungen relevanten Temperaturbereichen linear-elastisch mit Hilfe des *Hooke'schen* Gesetzes modellieren.
2. Das mechanische Modell zur Spannungsberechnung stellt ein beidseitig in seiner Ausdehnung behinderter Dehnstab dar.
Um die thermisch induzierten Spannungen infolge der Temperaturunterschiede im Glas vereinfacht eindimensional berechnen zu können, wird das mechanische Modell des Dehnstabs verwendet. Die Berechnung der thermischen Spannungen erfolgt dabei über den Ansatz, dass die Gesamtdehnung des Stabes (Summe aus mechanischer und thermischer Dehnung) gleich null ist. Für weiterführende Erläuterungen wird z. B. auf [46] verwiesen.

Die eindimensionale Temperaturberechnung in den ungestörten, weit vom Rahmen entfernten Zonen 2 (unverschattete Glasmitte) und 3 (verschattete Glasmitte) erfolgt analytisch über die Wärmebilanzgleichungen analog zur NF DTU 39 P3 [39]. Die Gleichungen hierzu lassen sich in Abschnitt 16 finden.

Sind die Temperaturen aus den jeweiligen Zonen bekannt, so werden, im Falle der stationären Berechnung, die Temperaturdifferenzen zwischen den Zonen berechnet und mit Hilfe der größten Differenz schließlich die thermisch induzierte Spannung berechnet.

Im transienten Fall wird für jeden Zeitschritt die Temperaturdifferenz zwischen den Zonen ermittelt, die maximal resultierende Differenz über alle Zeitschritte ausgewertet und schließlich für die Spannungsberechnung herangezogen.

Die Details zu den eindimensionalen Berechnungsverfahren werden im Vorschlag zum Normentwurf in Abschnitt 16.10 beschrieben.

14.4 2D Temperatur- und Spannungsberechnung mit Hilfe der FEM

Die Verglasung wird in vier Temperaturzonen, wie in Abbildung 16-1 dargestellt, eingeteilt. Die Temperaturberechnung erfolgt an zweidimensionalen numerischen Modellen, welche einen Schnitt durch die Verglasung darstellen und alle konstruktiven Elemente der Verglasung (z. B. Rahmen) und die Verschattung enthalten. Der Randverbund wird als 2-box-Modell nach [52] abgebildet. Für die Definition der Teilverschattung, die weiteren Randbedingungen und die Schnittführung durch die Verglasung wird auf Abschnitt 16.11 und Abbildung 16-2 verwiesen.

Die Spannungsberechnung erfolgt nach der Temperaturberechnung ebenfalls zweidimensional getrennt für jede Einzelscheibe des Isolierglases. Die Übertragung der ermittelten Temperaturen auf das mechanische Modell kann unterschiedlich exakt erfolgen (z. B. mit einer konstanten Temperaturverteilung in jeder Zone,

woraus Temperatursprünge zwischen den einzelnen Zonen resultieren; oder z. B. mit einer Übertragung der gesamten Temperaturverteilung, woraus kontinuierliche Temperaturverläufe zwischen den Zonen entstehen). Die einfachste Variante der Übertragung der Temperaturen auf das mechanische Modell stellt dabei der Ansatz der konstanten Zonentemperaturen dar, welcher in den Abschnitten 16 und 17 genauer beschrieben wird.

Für die Temperatur- und die anschließende Spannungsberechnung werden verschiedene Annahmen getroffen, die im Folgenden kurz aufgelistet werden.

Für die *Temperaturberechnung* werden die folgenden Annahmen getroffen:

1. Die Wärmeleitung zwischen den Temperaturzonen jeder Einzelscheibe wird berücksichtigt.
Durch die zweidimensionale Modellierung wird die Wärmeleitung zwischen den Zonen 1 und 3 sowie 2 und 4 berücksichtigt.
2. Die Wärmeleitung über die Glasdicke wird für alle Temperaturzonen berücksichtigt.
Die Wärmeleitung über die Glasdicke wird somit auch in Zone 1 und 4 (inhomogener Wärmestrom infolge inhomogenen thermischen Systems: Übergang von Rahmen zu Isolierglas).
3. Die Wärmeübertragung über den Scheibenzwischenraum in den Zonen 2 und 3 (vgl. Abbildung 16-1) erfolgt temperaturabhängig gemäß EN 673. Die direkte solare Einstrahlung wird in der Zone 2 und die diffuse solare Einstrahlung in der Zone 3 berücksichtigt. Die Absorptionsgrade der Gläser können mit Hilfe von EN 410 und EN 52022-3 ermittelt werden.
Analog zum eindimensionalen Berechnungsverfahren.
4. Im Glaskantenbereich (Zone 1 und Zone 4) werden Einflüsse infolge des Rahmens und des Scheibenzwischenraums sowie der Sekundärdichtung des Randverbundes berücksichtigt. Die Temperaturberechnung in den Zonen 1 und 4 kann stationär oder transient erfolgen. In Zone 1 wird die diffuse solare Einstrahlung und in Zone 4 die direkte solare Einstrahlung berücksichtigt.
Die zweidimensionale Modellierung ermöglicht es, den inhomogenen Wärmestrom im Glaskantenbereich zu erfassen. Zusätzlich kann die solare und diffuse Einstrahlung (Berücksichtigung der Rahmenfarbe) auf das Modell aufgebracht werden, welche ebenfalls die Glaskantentemperaturen beeinflussen.

Für die *Spannungsberechnung* werden die folgenden Annahmen getroffen:

1. Die Spannungen im Glas werden mit Hilfe des linearen Elastizitätsgesetzes berechnet.
Analog zum eindimensionalen Berechnungsverfahren.
2. Das mechanische Modell zur Spannungsberechnung stellt eine „Scheibe“ (vgl. [47]) im ebenen Spannungszustand dar. Hierbei werden die Steifigkeiten des Rahmens und des Randverbunds vernachlässigt. Jede Glasscheibe wird gesondert als Ebene und nicht im Querschnitt modelliert. Das Glas kann sich in der Ebene entsprechend frei ausdehnen. Falls Symmetrien vorhanden sind, so können diese ausgenutzt werden, um das Modell zu vereinfachen bzw. den Rechenaufwand zu reduzieren.
Um die thermisch induzierten Spannungen infolge der Temperaturunterschiede im Glas zweidimensional berechnen zu können, wird das mechanische Modell der Scheibe im ebenen Spannungszustand verwendet. Für weiterführende Erläuterungen wird auf die einschlägige Literatur [47] verwiesen.

14.5 3D Temperatur- und Spannungsberechnung mit Hilfe der FEM

Die Verglasung wird als dreidimensionales numerisches Modell mit Hilfe von Volumenkörpern abgebildet.

Analog zum zweidimensionalen Berechnungsverfahren können im Modell alle konstruktiven Elemente der Verglasung (z. B. Rahmen) und der Verschattung abgebildet werden. Der Randverbund wird als 2-box-Modell [52] modelliert. Für die Definition der Verschattung und der weiteren Randbedingungen wird auf Abschnitt 16.12.1, Abbildung 16-4 und Abbildung 16-5 verwiesen.

Die Spannungsberechnung im Glas erfolgt über ein mechanisches Platten-/Scheibenmodell, welches die direkte Übertragung der Temperatur an jeder Stelle im Glas ermöglicht. Dadurch ergibt sich analog zum zweidimensionalen Berechnungsverfahren (bei der direkten Übertragung der Temperaturen) ein kontinuierlicher Temperaturverlauf im Glas zwischen den einzelnen Temperaturzonen. Durch die Dreidimensionalität des Modells können die Auswirkungen der Temperaturbeanspruchung am besten wiedergegeben werden.

Für die Temperatur- und die anschließende Spannungsberechnung werden verschiedene Annahmen getroffen, die im Folgenden kurz aufgelistet werden.

Für die *Temperaturberechnung* werden die folgenden Annahmen getroffen:

1. Die Wärmeleitung zwischen den Temperaturzonen jeder Einzelscheibe wird berücksichtigt.
Durch die dreidimensionale Modellierung wird die Wärmeleitung zwischen allen Zonen und insbesondere in den Ecken (z. B. hervorgerufen durch die Ecke der Verglasung oder besondere Schattengeometrien) exakt berücksichtigt.
2. Die Wärmeleitung über die Glasdicke wird für alle Temperaturzonen berücksichtigt.
Analog zum zweidimensionalen Berechnungsverfahren.
3. Die Wärmeübertragung über den Scheibenzwischenraum in den Zonen 2 und 3 (vgl. Abbildung 16-1) erfolgt temperaturabhängig gemäß EN 673. Die direkte solare Einstrahlung wird in der Zone 2 und die diffuse solare Einstrahlung in der Zone 3 berücksichtigt. Die Absorptionsgrade der Gläser können mit Hilfe von EN 410 und EN 52022-3 ermittelt werden.
Analog zum eindimensionalen Berechnungsverfahren.
4. Im Glaskantenbereich (Zone 1 und Zone 4) werden Einflüsse durch den Rahmen und den Scheibenzwischenraum sowie der Einfluss des zweistufigen Isolierglas-Randverbundes berücksichtigt. Die Temperaturberechnung in den Zonen 1 und 4 kann stationär oder transient erfolgen. In Zone 1 wird die diffuse solare Einstrahlung und in Zone 4 die direkte solare Einstrahlung berücksichtigt.
Analog zum zweidimensionalen Berechnungsverfahren.

Für die *Spannungsberechnung* werden die folgenden Annahmen getroffen:

1. Die Spannungen im Glas werden mit Hilfe des linearen Elastizitätsgesetzes berechnet.
Analog zum eindimensionalen Berechnungsverfahren.
2. Das mechanische Modell zur Spannungsberechnung stellt eine Scheibe im ebenen Spannungszustand dar. Hierbei werden die Steifigkeiten des Rahmens und des Isolierglas-Randverbundes vernachlässigt. Jede Glasscheibe wird gesondert als Ebene und nicht im Querschnitt modelliert. Das Glas kann sich in der Ebene entsprechend frei ausdehnen. Falls Symmetrien vorhanden sind, so können diese genutzt werden, um das Modell zu vereinfachen bzw. den Rechenaufwand zu reduzieren.
Analog zum zweidimensionalen Berechnungsverfahren.

15 Berechnungsverfahren für BIPV-Module

15.1 Allgemeines zur Modellierung

Für die Erarbeitung eines standardisierten Berechnungsverfahrens wird das 3D FEM-Modell, welches in Abschnitt 12.2 beschrieben wurde, vereinfacht, um Rechenkapazitäten einzusparen und eine breite Anwendung zu ermöglichen. Hierfür werden aus den in Abschnitt 13 untersuchten Einflüssen die Kombination mit dem größten Einfluss auf thermisch induzierten Spannungen bei Glas-Glas-Modulen gewählt: Ein rahmenloses teilbelegtes PV-Modul mit einem Doppeldiagonalschatten, wie schematisch in Abbildung 15-1 gezeigt.

Als Vereinfachung wird ein 2D Ansatz gewählt. Die Grundidee dabei ist es, das PV-Modul als Glasscheibe mit der Gesamtdicke des PV-Moduls abzubilden. Die Glasscheibe hat die Materialeigenschaften des verwendeten Glases, mit an den Positionen der Solarzellen sowie im verschatteten Bereich angepassten Absorptionskoeffizienten. Diese (Punkte 1 bis 3) sind in Abbildung 15-1 gezeigt. Zudem werden kombinierte Wärmeübergangskoeffizienten verwendet: $10,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für die BIPV-Moduloberflächen und $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für die Modulränder. Als Außenlufttemperatur wird konstant -10 °C gewählt. Als Vergleich wird das in Abschnitt 12.2 beschriebene 3D FEM-Modell herangezogen. Hierfür werden die physikalischen Randbedingungen leicht verändert und die gleichen vereinfachten Randbedingungen des 2D Modells verwendet. Mechanisch wird das Modul an einem Eckpunkt fest gelagert und an dem benachbarten Eckpunkt entlang der langen Kante wird ein Gleitlager angebracht.

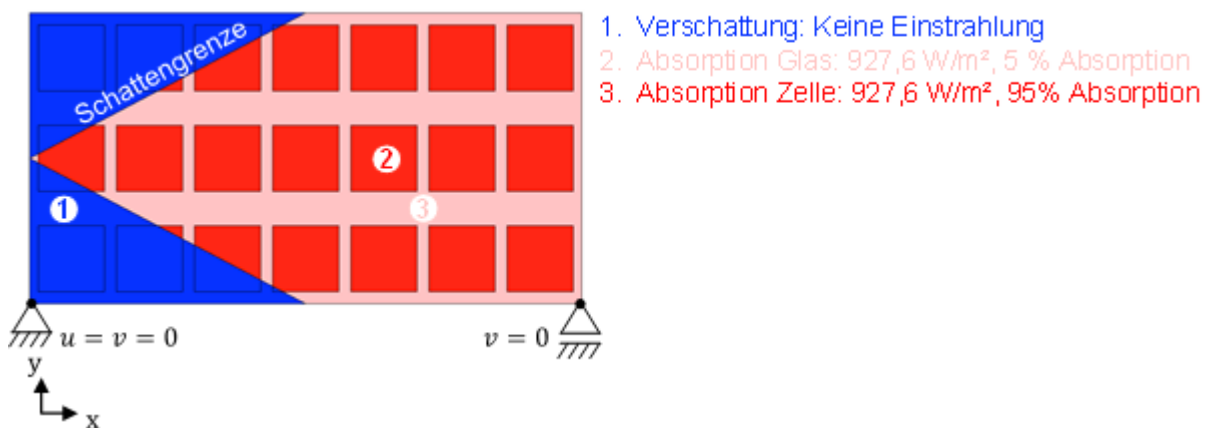


Abbildung 15-1: Schematische Skizze des vereinfachten FE-Modells mit Einteilung der verschiedenen Absorptions- und Einstrahlungszonen sowie der mechanischen Randbedingungen.

15.2 Angaben zur Geometrie

Es erfolgt die Abbildung einer Platte mit den Kantenlängen des BIPV-Moduls. Als Dicke ist die Gesamtdicke des BIPV-Moduls anzusetzen.

Die Schattengeometrie und die Solarzellen müssen als eigene Bereiche abgebildet werden.

15.3 Angaben zum Netz

Die Eignung des Netzes muss durch eine Netzsensitivitätsstudie überprüft werden.

15.4 Angaben zu den Randbedingungen

Vorzugsweise werden meteorologische Daten des geplanten Installationsstandortes gewählt, z. B. auf Grundlage der Daten in Anhang A4 und Anhang A5. Alternativ oder, falls keine Daten verfügbar sind, können die im Folgenden genannten Werte herangezogen werden.

Thermisch:

Außenlufttemperatur: -10 °C

Die Einstrahlung und Absorption werden in die drei Bereiche unterteilt, siehe Abbildung 15-1:

1. Verschattung: Keine Einstrahlung
2. Absorption Glas: 1.000 W/m^2 mit 5 % Absorption
3. Absorption Solarzelle: 1.000 W/m^2 mit 95 % Absorption

Es werden kombinierte Wärmeübergangskoeffizienten verwendet:

1. BIPV-Moduloberfläche: $10,5\text{ W/(m}^2\text{ K)}$
2. BIPV-Modulränder (Kanten der 2D Glasscheibe): $4\text{ W/(m}^2\text{ K)}$

Mechanisch

Es wird der Ebene Spannungszustand verwendet.

Bei einem Eckpunkt wird die Verschiebung in beide Raumrichtungen unterdrückt. Bei dem benachbarten Eckpunkt entlang der langen Kante wird die Verschiebung in Richtung der kurzen Kante unterdrückt, siehe Abbildung 15-1. Im Falle eines quadratischen BIPV-Moduls wird der benachbarte Eckpunkt im Uhrzeigersinn gewählt und die Verschiebung senkrecht zu der durch die beiden Eckpunkte laufenden Geraden unterdrückt.

16 Vorschlag für einen Normentwurf für Verglasungen

16.1 Einleitung

Basierend auf den Forschungsergebnissen der vorherigen Abschnitte wird im Folgenden ein Vorschlag zum Normentwurf für die Berechnung thermisch induzierter Spannungen von Verglasungen vorgestellt. Die erarbeiteten Berechnungsverfahren sind bereits durch die aktive Mitarbeit im Normungsgremium der CEN/TC 129/WG 8 und CEN/TC 250/SC 11/WG 1 eingeflossen. Die im Folgenden dargestellte Struktur orientiert sich an der Gliederung bereits eingeführter Normen.

16.2 Anwendungsbereich

Der vorliegende Normentwurf stellt Berechnungsverfahren für die Ermittlung von thermisch induzierten Spannungen in rechteckigen Fenster- und Fassadenverglasungen, hervorgerufen durch ungleichmäßige Erwärmung in der Glasebene bereit. Der Anwendungsbereich der Berechnungsverfahren wird auf Vertikalverglasungen mit Mehrscheibenisolierverglasung ohne Verschattungs- oder Sichtschutzelemente im Scheibenzwischenraum definiert.

16.3 Normative Verweise

Die folgenden normativen Verweise können ggf. z. B. in der CEN/TS 19100-1 ergänzt werden.

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 410, Glas im Bauwesen — Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen

EN 572-1, Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften

EN 673, Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren

EN 1279-1, Glas im Bauwesen – Mehrscheiben-Isolierverglasung - Teil 1: Allgemeines, Systembeschreibung, Austauschregeln, Toleranzen und visuelle Qualität

EN 1748-1-1, Glas im Bauwesen - Spezielle Basiserzeugnisse — Borosilicatgläser - Teil 1-1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften

EN 1863-1, Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung

EN 1990:2002, Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung

EN 12150-1, Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung

ISO 6946, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation method

ISO 10456, Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values

ISO 52022-3, Energy performance of buildings – Thermal, solar and daylight properties of building components and elements – Part 3: Detailed calculation method of the solar and daylight characteristics for solar protection devices combined with glazing

16.4 Begriffe

Die folgenden Begriffe können ggf. z. B. in der CEN/TS 19100-1 ergänzt werden.

16.4.1 Stationäre Berechnung

Die Wärmekapazität, Dichte und Dicke der Konstruktionsbestandteile wird während der Berechnung der Temperaturverteilung in den Bauteilen vernachlässigt.

16.4.2 Transiente Berechnung

Die Wärmekapazität, Dichte und Dicke der Konstruktionsbestandteile wird während der Berechnung der Temperaturverteilung in den Bauteilen berücksichtigt. Bevor eine transiente Berechnung durchgeführt werden kann, muss mit Hilfe einer stationären Berechnung die Anfangstemperaturverteilung in den Bauteilen ermittelt werden.

16.4.3 Teilverschattung

Bezieht sich auf einen Schatten, der z. B. von der Konstruktion selbst (z. B. Fensterleibung oder Dachüberstand) oder von der Umgebung resultiert. In verschatteten Bereichen wirken 10 % der solaren Einstrahlungsintensität.

16.4.4 Solare Einstrahlungsintensität

Text entnommen aus EN ISO 52022-3: Strahlung im gesamten Solarspektrum oder einem beliebigen Teil davon, bestehend aus ultravioletter, sichtbarer und naher Infrarotstrahlung im Wellenlängenbereich von 0,3 μm bis 2,5 μm .

ANMERKUNG: Manchmal auch als kurzwellige Strahlung bezeichnet, siehe ISO 9488.

16.4.5 Albedo durch Umgebung

Beschreibt den zusätzlichen Anteil der Solarstrahlung, der vom Boden und der Umgebung reflektiert wird. Die Albedo hängt von der Oberflächenrauigkeit und der Farbe der Oberflächen der Umgebung ab.

16.4.6 Wärmestrahlung

Text entnommen aus EN ISO 52022-3: Strahlung, die im Wellenlängenbereich 3 μm bis 100 μm von einer beliebigen Oberfläche genau oder annähernd bei Umgebungstemperatur abgegeben wird

ANMERKUNG 1: Die Definition weicht von der Definition in ISO 9288 ab.

ANMERKUNG 2: Manchmal auch als langwellige Strahlung bezeichnet, siehe ISO 9488.

16.4.7 Radiativer Wärmeübergangskoeffizient

Koeffizient zur Berechnung der Energiegewinne und -verluste durch langwellige Wärmestrahlung (auch Temperaturstrahlung genannt).

16.4.8 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Koeffizient zur Berechnung der Energiegewinne und -verluste durch Konvektion. Es kann sich dabei um eine natürliche oder erzwungene Konvektion handeln. Für die thermischen Berechnungen innerhalb dieser Norm ist die Unterscheidung jedoch nicht relevant, da lediglich das Resultat hieraus: die Größe des Wärmeübergangskoeffizienten, entscheidend ist.

16.4.9 Kombiniertes Wärmeübergangskoeffizient

Koeffizient zur Berechnung der Gewinne und Verluste durch langwellige Strahlung und Konvektion (Superposition). Im Folgenden wird immer der kombinierten Wärmeübergangskoeffizient verwendet.

16.4.10 Temperaturzonen

Für die ein- und zweidimensionalen Berechnungen werden vier Temperaturzonen definiert. Die Temperaturzonen sind in Abbildung 16-1 dargestellt.

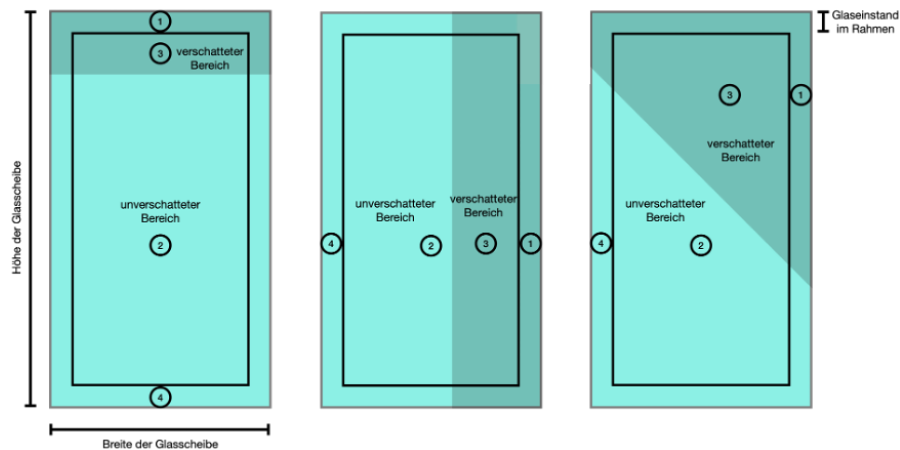


Abbildung 16-1: Exemplarische Darstellung der Temperaturzonen an drei Teilverschattungsszenarien (links: horizontale Teilverschattung, Mitte: vertikale Teilverschattung, rechts: diagonale Teilverschattung).

16.4.11 Temperaturzone 1

Die Temperaturzone 1 oder auch kurz Zone 1 beschreibt die Temperatur der Glaskante (im Rahmen) im verschatteten Bereich der Verglasung.

16.4.12 Temperaturzone 2

Die Temperaturzone 2 oder auch kurz Zone 2 beschreibt die Temperatur der zentral gelegenen Glasmitte im unverschatteten Bereich der Verglasung.

16.4.13 Temperaturzone 3

Die Temperaturzone 3 oder auch kurz Zone 3 beschreibt die Temperatur der zentral gelegenen Glasmitte im verschatteten Bereich der Verglasung.

16.4.14 Temperaturzone 4

Die Temperaturzone 4 oder auch kurz Zone 4 beschreibt die Temperatur der Glaskante (im Rahmen) im unverschatteten Bereich der Verglasung.

16.4.15 Kalter Tag

Der kalte Tag stellt die maßgebende meteorologische Situation, unter der Annahme einer konstanten Innenraumtemperatur von 20 °C, für die Mittel- (nur bei Dreifach-Isolierglas) und die Innenscheibe dar. Die Situation des kalten Tages ist im Fall einer stationären und transienten Berechnung zu berücksichtigen.

16.4.16 Warmer Tag

Der warme Tag stellt die maßgebende meteorologische Situation, unter der Annahme einer konstanten Innenraumtemperatur von 20 °C, für die Mittel- (nur bei Dreifach-Isolierglas) und die Außenscheibe dar. Die Situation des warmen Tages ist im Fall einer stationären und transienten Berechnung zu berücksichtigen.

16.4.17 Kalter Übergangstag

Der kalte Übergangstag stellt die maßgebende meteorologische Situation, unter der Annahme einer konstanten Innenraumtemperatur von 20 °C, für die Mittel- (nur bei Dreifach-Isolierglas) und die Innenscheibe dar. Die Situation des kalten Übergangstages ist nur im Fall einer transienten Berechnung zu berücksichtigen.

16.4.18 Warmer Übergangstag

Der warme Tag stellt die maßgebende meteorologische Situation, unter der Annahme einer konstanten Innenraumtemperatur von 20 °C, für die Mittel- (nur bei Dreifach-Isolierglas) und die Außenscheibe dar. Die Situation des warmen Übergangstages ist nur im Fall einer transienten Berechnung zu berücksichtigen.

16.5 Symbole

16.5.1 Lateinische Großbuchstaben

E	Elastizitätsmodul des Glases
$I_{max.}$	Maximale solare Einstrahlungsintensität in unverschatteten Bereichen der Verglasung
$I_{max.,corrected}$	Maximale solare Einstrahlungsintensität inkl. Höhenkorrektur
I_{diffus}	Diffuse solare Einstrahlungsintensität in verschatteten Bereichen der Verglasung
$T_{ext.}$	Außenlufttemperatur
$T_{ext.,corrected}$	Außenlufttemperatur inkl. Höhenkorrektur
$T_{int.}$	Innenraumlufthtemperatur
$T_{max.}$	Maximale Außenlufttemperatur
$T_{min.}$	Minimale Außenlufttemperatur
$T_{ext.}(t)$	Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Tageszeit für transiente Berechnungen
$T_{1,i}$	Glastemperatur in der Zone 1 der i -ten Glasscheibe
$T_{2,i}$	Glastemperatur in der Zone 2 der i -ten Glasscheibe
$T_{3,i}$	Glastemperatur in der Zone 3 der i -ten Glasscheibe
$T_{4,i}$	Glastemperatur in der Zone 4 der i -ten Glasscheibe
$\Delta T_{Zonen,i}$	Temperaturunterschied zwischen den Zonen der i -ten Glasscheibe

16.5.2 Lateinische Kleinbuchstaben

$c_{p,i}$	Spezifische Wärmekapazität der i -ten Glasscheibe
d_i	Nennstärke der i -ten monolithischen Glasscheibe Bei Verbundglas sind die Glas- und Foliendicken zu einer monolithischen Scheibe zu summieren.
d_j	Nennbreite des j -ten Scheibenzwischenraums
i	Zählvariable der Einzelgläser von Verglasungen, Die Glasscheibe mit $i = 1$ entspricht der Außenscheibe. Der Index i steigt zum Innenraum hin an.
j	Zählvariable der Scheibenzwischenräume von Verglasungen, Der Scheibenzwischenraum mit $j = 1$ entspricht dem Ersten von Außen aus gezählt (analog zur Zählvariable i). Der Index i steigt zum Innenraum hin an.
$h_{ext.}$	Äußerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient (Superposition von Wärmestrahlung der äußeren Umgebung und äußeren Konvektion)
$h_{int.}$	Innerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient (Superposition von Wärmestrahlung der inneren Umgebung und inneren Konvektion)
$h_{s,j}$	Kombinierter Wärmeübergangskoeffizient des j -ten Scheibenzwischenraums und anderer Hohlräume
t	Zeit
t_0	Ausgangszeitpunkt/Anfangszeitpunkt für transiente (instationäre) Berechnung
dt	Zeitinkrement

dT Temperaturinkrement

16.5.3 Griechische Kleinbuchstaben

$\alpha_{e,i}$	Direkter Strahlungsabsorptionsgrad der i -ten Glasscheibe Bei Verbundglas wird für das laminierte Glaspaket ein resultierender Absorptionsgrad ermittelt.
α_T	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
λ	Wärmeleitfähigkeit
$\sigma_{T,i}$	Thermisch induzierte Glasspannung
ρ_i	Dichte des Materials der i -ten Glasscheibe

16.6 Allgemeines

Für die Berechnung der thermisch induzierten Spannungen mit den ein- (ohne Zone 4), zwei- und dreidimensionalen Verfahren werden für die Verglasung vier Temperaturzonen definiert (vgl. Abbildung 16-1). In den Berechnungen ist eine Teilverschattung zu berücksichtigen. Beispiele sind in Abbildung 16-1 dargestellt.

Die thermisch stationären Berechnungen sind für einen warmen und einen kalten Tag durchzuführen.

Die thermisch transienten (instationären) Berechnungen sind für einen warmen, einen kalten und zwei Übergangstage mit einer Zeitschrittweite von 10 Minuten durchzuführen. Als Eingangsgrößen der transienten Berechnung dienen Anfangstemperaturen (Zeitpunkt t_0 vor Sonnenaufgang). Diese Anfangstemperaturen können mit Hilfe einer stationären Berechnung ermittelt werden. Die transienten Berechnungen können auf den Zeitraum von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang (siehe Zeitreihen in Anhang A6) reduziert werden.

Die thermischen und mechanischen Materialeigenschaften von Festkörpern sind zeit- und temperaturunabhängig.

Die Berechnung der Spannungen erfolgt auf Basis des linearen Elastizitätsgesetzes mit kleinen Verformungen.

16.7 Randbedingungen auf der Außenseite der Verglasung

16.7.1 Kombiniertes Wärmeübergangskoeffizient

Der äußere kombinierte (Superposition von Konvektion und Wärmestrahlung) Wärmeübergangskoeffizient h_{ext} ist durch die nationalen Normungsgremien zu definieren. Falls keine Vorgaben im jeweiligen Land vorliegen, so kann der äußere Wärmeübergangskoeffizient zu konstant $10,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (auch für transiente Berechnungen) gesetzt werden.

16.7.2 Maximale solare Einstrahlungsintensität in Temperaturzonen 2 und 4

Die für die Berechnung anzunehmende maximale solare Einstrahlungsintensität I_{max} , in Abhängigkeit der Fassadenorientierung, ist durch die nationalen Normungsgremien festzulegen.

Für die Breitengrade von 46° bis $56,5^\circ$ und Längengrade von 4° bis $17,5^\circ$ der nördlichen Hemisphäre (Rasterpunkte) sind Einstrahlungsintensitäten I_{max} in Abhängigkeit der Fassadenorientierung für den warmen Tag im Anhang A4 und den kalten Tag im Anhang A5 gegeben, welche für stationäre Berechnungen verwendet werden können.

Im Fall einer transienten Berechnung sind im Anhang A6 Einheitsstrahlungskurven für den Standort Deutschland angegeben. Für alle Rasterpunkte zwischen den Breitengraden von 46° bis $56,5^\circ$ und Längengraden von 4° bis $17,5^\circ$ der nördlichen Hemisphäre können diese Kurven als unveränderlich angenommen werden.

ANMERKUNG 1: Die Sonnenganglinie (Variation der Einstrahlung über den Tag) wird für alle Standorte innerhalb der angegebenen Breiten- und Längengrade vereinheitlicht.

ANMERKUNG 2: Die maximale solare Einstrahlungsintensität wurde modellbasiert (Annahme eines wolkenlosen Himmels) ermittelt, berücksichtigt eine Albedo von 20 % und beinhaltet außerdem die Trübung der Atmosphäre. Außerdem ist die jeweilige geodätische Höhe des Rasterpunktes berücksichtigt.

Die Einheitsstrahlungskurven werden für transiente Berechnungen mit den maximalen solaren Einstrahlungsintensitäten I_{\max} aus Anhang A4 bzw. Anhang A5 multipliziert, um eine zeitlich variable Einstrahlungskurve $I_{\max}(t)$ zu erhalten.

16.7.3 Diffuse solare Einstrahlungsintensität in Temperaturzonen 1 und 3

In den verschatteten Bereichen der Verglasung ist eine sogenannte diffuse solare Einstrahlung I_{diffus} anzunehmen. Die diffuse Einstrahlungsintensität ist durch die nationalen Normungsgremien festzulegen. Falls keine diffuse Einstrahlungsintensität vorgegeben wird, so kann darf angenommen werden, dass in den verschatteten Bereichen 10 % der maximalen solaren Einstrahlung I_{\max} auf die Verglasung eintreffen.

16.7.4 Höhenkorrektur der maximalen solaren und diffusen Einstrahlungsintensität

Um die maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} auf andere Höhenlagen (im Vergleich zu Anhang A3) extrapolieren zu können, kann Gleichung (16-1) verwendet werden.

$$I_{\max, \text{corrected}} = I_{\max} + a \cdot (h - h_{\text{geodät.}}) \quad (16-1)$$

Dabei sind:

- $I_{\max, \text{corrected}}$ = maximale solare Einstrahlung inkl. Höhenkorrektur
- I_{\max} = maximale solare Einstrahlung des Gitterpunktes, entnommen aus Anhang A4 oder Anhang A5
- $a = 0,055 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ m})$
- h = tatsächliche Ortshöhe
- $h_{\text{geodät.}}$ = zugehörige geodätische Höhe des Gitterpunktes aus Anhang A3

ANMERKUNG: Die Höhenkorrektur ist bis zu maximal 2000 m Höhendifferenz anwendbar.

16.7.5 Außenlufttemperatur

Die für die Berechnung anzunehmende Außenlufttemperatur $T_{\text{ext.}}$ in Abhängigkeit der Fassadenorientierung, ist als zur Einstrahlungsintensität I_{\max} (vgl. Abschnitt 16.7.2) zugehörige Größe durch die nationalen Normungsgremien festzulegen.

Für die Breitengrade von 46° bis 56,5° und Längengrade von 4° bis 17,5° der nördlichen Hemisphäre (Rasterpunkte) sind Außenlufttemperaturen T_{ext} in Abhängigkeit der Fassadenorientierung für den warmen Tag im Anhang A4 und den kalten Tag im Anhang A5 gegeben, welche für stationäre Berechnungen verwendet werden können.

Im Fall einer transienten Berechnung wird der Tagestemperaturverlauf $T_{\text{ext.}}(t)$ benötigt. Hierfür wird ein sinusförmiger Ansatz verwendet. Die Schwankung der Tagestemperatur wird dabei mit 20 K angenommen und kann durch die nationalen Normungsgremien angepasst werden. Es wird zudem angenommen, dass die Tagestieftemperatur morgens 5:00 Uhr und die Tageshöchsttemperatur um 17:00 Uhr erreicht wird. Mit Gleichung (16-2) kann der zeitliche Verlauf der Außenlufttemperatur berechnet werden.

$$T_{\text{ext.}}(t) = 10 \text{ °C} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{12\text{h}} \cdot (t - 11\text{h})\right) + T_{\text{min.}} + 10 \text{ °C} \quad (16-2)$$

Dabei sind:

- für den warmen Tag $T_{\text{ext.}}(5\text{h}) = T_{\text{min.}} = T_{\text{ext.}} - 20 \text{ K}$; $T_{\text{ext.}}$ aus Anhang A4
- für den kalten Tag $T_{\text{ext.}}(5\text{h}) = T_{\text{min.}} = T_{\text{ext.}}$ aus Anhang A5

16.7.6 Höhenkorrektur der Außenlufttemperatur

Um die Außenlufttemperatur $T_{\text{ext.}}$ auf andere Höhenlagen (im Vergleich zu Anhang A3) extrapolieren zu können, kann Gleichung (16-3) verwendet werden.

$$T_{\text{ext.,corrected}} = T_{\text{ext.}} + E \cdot \frac{6,5}{1000} \quad (16-3)$$

Dabei sind:

- $T_{\text{ext.,corrected}}$ = Außenlufttemperatur inkl. Höhenkorrektur
- $T_{\text{ext.}}$ = Außenlufttemperatur des Gitterpunkts, entnommen aus Anhang A4 oder Anhang A5
- E = Höhe relativ zur Höhe des Gitterpunkts aus Anhang A3

16.8 Verglasungsspezifische Randbedingungen

16.8.1 Wärmetransport im Scheibenzwischenraum und anderen unbelüfteten Hohlräumen

Der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient $h_{s,j}$ der Scheibenzwischenräume (Superposition von Konvektion und Wärmestrahlung in den Temperaturzonen 2 bzw. 3) von Isoliergläsern und anderen unbelüfteten Hohlräumen außerhalb des Rahmens darf mit Hilfe der EN 673 eindimensional berechnet werden. Mit Hilfe von Konvektionsrandbedingungen auf den Glasoberflächen bzw. Hohlraumoberflächen und dem kombinierten Wärmeübergangskoeffizient $h_{s,j}$, kann die Wärmeübertragung über den Scheibenzwischenraum bzw. andere Hohlräume berechnet werden. Die Eindimensionalität der Wärmeübertragung in den Scheibenzwischenräumen und anderen unbelüftete Hohlräumen ist für die Verfahren in Abschnitt 16.10, 16.11 und 16.12 gültig.

Hierbei sind jedoch hinsichtlich der Temperaturen (absolute mittlere Temperatur des Scheibenzwischenraums $T_{m,k}$, Temperaturdifferenz zwischen den Grenzflächen des Scheibenzwischenraums ΔT), entgegen der normativen Vorgaben in der EN 673, die tatsächlich eintretenden Oberflächentemperaturen der Verglasung bzw. der Hohlräume zur Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur und zu verwenden, da der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient $h_{s,j}$ von den Oberflächentemperaturen der Glasoberflächen, welche zum Scheibenzwischenraum hin orientiert sind, bzw. der Hohlräume, abhängt.

Die Ermittlung der tatsächlich eintretenden Oberflächentemperaturen erfolgt iterativ, da die Oberflächentemperaturen zunächst unbekannt sind. Für die initiale Temperaturberechnung können die Oberflächentemperaturen in Anlehnung an die herrschenden Umgebungsbedingungen (Außenluft- und Innenraumlufttemperatur) gewählt werden. Im darauffolgenden Iterationsschritt werden die Oberflächentemperaturen der initialen Berechnung ausgewertet und für die Randbedingung der gegenüberliegenden Oberfläche verwendet und der Wärmeübergangskoeffizient $h_{s,j}$ basierend auf den ermittelten Oberflächentemperaturen neu berechnet. Diese Vorgehensweise wird so lange wiederholt, bis sich die Oberflächentemperaturen nur noch um 0,1 K ändern.

ANMERKUNG 1: Die eindimensionale Wärmeübertragung in den Zonen 2 und 3 unterstellt, dass diese beiden Temperaturzonen sich nicht gegenseitig beeinflussen. Es wird angenommen, dass dies gegeben ist, wenn die minimale Kantenlänge der Gläser 0,5 m beträgt.

ANMERKUNG 2: Die unbelüfteten Hohlräume können z. B. enthalten sein bei: Kastenfenstern, Doppelfassaden und anderen Verglasungen.

16.8.2 Direkter Strahlungsabsorptionsgrad

Der direkte Strahlungsabsorptionsgrad $\alpha_{e,j}$ jeder Glasscheibe der Isolierglaseinheit sind mit Hilfe von EN 410 bzw. EN ISO 52022-3 wellenlängenabhängig zu berechnen. Hierbei können auch Verschattungs- und Sichtschutzelemente außerhalb der Scheibenzwischenräume berücksichtigt werden.

Im Fall von Verbundglas ist für das laminierte Glaspaket ein resultierender direkter Strahlungsabsorptionsgrad zu berechnen.

16.9 Randbedingungen auf der Innenseite der Verglasung

16.9.1 Kombiniertes Wärmeübergangskoeffizient

Der innere kombinierte (Superposition von Konvektion und Wärmestrahlung) Wärmeübergangskoeffizient $h_{\text{int.}}$ ist durch die nationalen Normungsgremien zu definieren. Falls keine Vorgaben im jeweiligen Land

vorliegen, so kann der innere Wärmeübergangskoeffizient zu konstant 7,7 W/m² K (auch für transiente Berechnungen) gesetzt werden.

16.9.2 Innenraumlufttemperatur

Die Innenraumlufttemperatur T_{int} ist durch die nationalen Normungsgremien zu definieren. Falls keine Vorgaben im jeweiligen Land vorliegen, so kann die Innenraumlufttemperatur zu 20 °C konstant für stationäre und transiente Berechnungen für den kalten, warmen Tag und die Übergangstage angenommen werden.

ANMERKUNG: Anhaltswerte für die Innenraumlufttemperaturen für verschiedene Gebäudetypen können Anhang A7 entnommen werden.

16.10 Vereinfachte eindimensionale Temperatur- und Spannungsberechnung

16.10.1 Allgemeines

Für die vereinfachte eindimensionale Temperatur- und Spannungsberechnung werden die folgenden Annahmen getätigt.

- Die Verglasung ist rechteckig und hat eine minimale Kantenabmessung (Breite/Höhe) von 0,5 m.
- Die Wärmeleitung zwischen den Temperaturzonen innerhalb jeder Scheibe wird vernachlässigt.
- Die Wärmeleitung über die Dicke der Gläser wird für alle Temperaturzonen, aufgrund des geringen Temperaturgradienten über die Dicke der einzelnen Gläser, vernachlässigt.
- Die Wärmeübertragung über den Scheibenzwischenraum in den Zonen 2 und 3 erfolgt temperaturabhängig mit Hilfe von Konvektionsrandbedingungen mit kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten nach Abschnitt 16.8.1. Die direkte solare (Zone 2) und diffuse solare (Zone 3) Einstrahlung wird jeweils berücksichtigt.
- Im Glaskantenbereich (Zone 1) werden Einflüsse infolge des Rahmens und des Scheibenzwischenraums sowie der Sekundärdichtung des Randverbundes vernachlässigt. Berücksichtigt wird dabei lediglich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Abstandhalters (Ermittelt mit Hilfe eines sogenannten 2-box-Modells).
- Die Temperaturberechnung erfolgt in Zone 1 immer stationär. In Zone 1 wird keine diffuse Einstrahlung berücksichtigt.
- Die Temperatur der Zone 4 kann mit dem eindimensionalen Verfahren nicht berechnet werden.
- Das mechanische Modell zur Spannungsberechnung stellt einen beidseitig in seiner Ausdehnung behinderten Dehnstab dar.

ANMERKUNG 1: Die minimale Kantenabmessung des Glases von 0,5 m unterstellt, dass die Zonen 2 und 3 sich nicht gegenseitig beeinflussen.

ANMERKUNG 2: Das Verfahren orientiert sich an den Vorgaben der französischen Norm NF DTU 39 P3.

16.10.2 Stationäre Temperaturberechnung

Temperaturzone 1

Die Temperatur in der Zone 1 kann mit den Gleichungen (16-4) und (16-5) für ein Zweifach-Isolierglas berechnet werden.

$$T_{1,1} = \frac{\lambda \cdot (T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}}) + T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot d}{\lambda \cdot (h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}}) + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot d} \quad (16-4)$$

$$T_{1,2} = \frac{\lambda \cdot (T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}}) + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot d}{\lambda \cdot (h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}}) + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot d} \quad (16-5)$$

Die Temperatur in der Zone 1 kann mit den Gleichungen (16-6) bis (16-8) für ein Dreifach-Isolierglas berechnet werden.

$$T_{1,1} = \frac{T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}} + T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right)}{h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}} + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right)} \quad (16-6)$$

$$T_{1,2} = \frac{T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}} + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot \left(T_{\text{int.}} \cdot \frac{d_1}{\lambda_1} + T_{\text{ext.}} \cdot \frac{d_2}{\lambda_2} \right)}{h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}} + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right)} \quad (16-7)$$

$$T_{1,3} = \frac{T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right)}{h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}} + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right)} \quad (16-8)$$

In den Gleichungen (16-4) bis (16-8) sind:

- $h_{\text{ext.}}$ = äußerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient
- $h_{\text{int.}}$ = innerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient
- d_j = Breite des j -ten Scheibenzwischenraums
- $T_{\text{ext.}}$ = Außenlufttemperatur, ggf. mit Höhenkorrektur
- $T_{\text{int.}}$ = Innenraumtemperatur
- λ_j = Wärmeleitfähigkeit des Abstandhalters (2-box-Modell) ohne Sekundärdichtung des j -ten Scheibenzwischenraums

Für detaillierte Berechnungen wird auf die Abschnitte 16.11 und 16.12 verwiesen.

Temperaturzone 2 und Temperaturzone 3

Die Temperatur in den Zonen 2 und 3 kann mit den Gleichungen (16-9) und (16-10) für ein Zweifach-Isolierglas berechnet werden.

$$T_{2/3,1} = \frac{h_s \cdot [T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}} + I(\alpha_{e,1} + \alpha_{e,2}) + T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}}] + h_{\text{int.}} \cdot (T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + I \cdot \alpha_{e,1})}{h_s \cdot (h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}}) + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}}} \quad (16-9)$$

$$T_{2/3,2} = \frac{h_s \cdot [T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}} + I(\alpha_{e,1} + \alpha_{e,2}) + T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}}] + h_{\text{ext.}} \cdot (T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}} + I \cdot \alpha_{e,2})}{h_s \cdot (h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}}) + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}}} \quad (16-10)$$

Die Temperatur in den Zonen 2 und 3 kann mit den Gleichungen (16-11) bis (16-13) für ein Dreifach-Isolierglas berechnet werden.

$$T_{2/3,1} = \frac{h_{s,1} \cdot h_{s,2} \cdot [I \cdot (\alpha_{e,1} + \alpha_{e,2} + \alpha_{e,3}) + T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}}] + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot T_{\text{ext.}} \cdot (h_{s,1} + h_{s,2}) + I \cdot h_{\text{int.}} \cdot [h_{s,1} \cdot \alpha_{e,2} + \alpha_{e,1} \cdot (h_{s,1} + h_{s,2})]}{h_{s,1} \cdot h_{s,2} \cdot (h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}}) + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot (h_{s,1} + h_{s,2})} \quad (16-11)$$

$$T_{2/3,2} = \frac{h_{s,1} \cdot h_{s,2} \cdot [I \cdot (\alpha_{e,1} + \alpha_{e,2} + \alpha_{e,3}) + T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}}] + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot (I \cdot \alpha_{e,2} + T_{\text{ext.}} \cdot h_{s,1} + T_{\text{int.}} \cdot h_{s,2}) + I \cdot [h_{s,1} \cdot h_{\text{int.}} \cdot (\alpha_{e,1} + \alpha_{e,2}) + h_{s,2} \cdot h_{\text{ext.}} \cdot (\alpha_{e,2} + \alpha_{e,3})]}{h_{s,1} \cdot h_{s,2} \cdot (h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}}) + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot (h_{s,1} + h_{s,2})} \quad (16-12)$$

$$T_{2/3,3} = \frac{h_{s,1} \cdot h_{s,2} \cdot [I \cdot (\alpha_{e,1} + \alpha_{e,2} + \alpha_{e,3}) + T_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{ext.}} + T_{\text{int.}} \cdot h_{\text{int.}}] + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot T_{\text{int.}} \cdot (h_{s,1} + h_{s,2}) + I \cdot h_{\text{ext.}} \cdot [h_{s,2} \cdot \alpha_{e,2} + \alpha_{e,3} \cdot (h_{s,1} + h_{s,2})]}{h_{s,1} \cdot h_{s,2} \cdot (h_{\text{ext.}} + h_{\text{int.}}) + h_{\text{ext.}} \cdot h_{\text{int.}} \cdot (h_{s,1} + h_{s,2})} \quad (16-13)$$

In den Gleichungen (16-9) bis (16-13) sind:

- $h_{\text{ext.}}$ = äußerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient
- $h_{\text{int.}}$ = innerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient
- h_s = temperaturabhängiger kombinierter Wärmeübergangskoeffizient des Scheibenzwischenraums

- $h_{s,j}$ = temperaturabhängiger kombinierter Wärmeübergangskoeffizient des j -ten Scheibenzwischenraums
- I = maximale solare bzw. diffuse solare Einstrahlungsintensität, ggf. mit Höhenkorrektur
- $T_{\text{ext.}}$ = Außenlufttemperatur, ggf. mit Höhenkorrektur
- $T_{\text{int.}}$ = Innenraumtemperatur
- $\alpha_{e,i}$ = direkter Strahlungsabsorptionsgrad des i -ten Glases

16.10.3 Transiente (instationäre) Temperaturberechnung

Die Lösung der Gleichungen (16-14) bis (16-18) kann numerisch mit Hilfe des expliziten oder impliziten finiten Differenzenverfahrens (Vorwärtsverfahren) erfolgen.

Temperaturzone 1

Die Berechnung der Temperaturzone 1 erfolgt analog zu Abschnitt 16.10.2.

Für detaillierte Berechnungen wird auf die Abschnitte 16.11 und 16.12 verwiesen.

Temperaturzone 2 und Temperaturzone 3 (initialer Zustand zum Zeitpunkt t_0)

Um die Temperaturen der Zonen 2 und 3 zeitlich veränderlich berechnen zu können, muss zunächst der initiale Temperaturzustand der Gläser (auch Anfangs- bzw. Ausgangstemperatur) zum Zeitpunkt t_0 ermittelt werden. Der Zeitpunkt t_0 sei der Zeitpunkt, zu welchem noch keine solare und diffuse Einstrahlung ($I = 0$) auf die Verglasung einwirkt. Der initiale Temperaturzustand wird stationär berechnet. Hierfür können die Gleichungen (16-9) bis (16-13) in Abschnitt 16.10.2 verwendet werden, wobei $I = 0$ gesetzt wird.

Temperaturzone 2 und Temperaturzone 3 (zeitlich veränderlich nach t_0)

Für ein Zweifach-Isolierglas können die Temperaturen in den Zonen 2 und 3 über die Lösung des Gleichungssystems, bestehend aus den Gleichungen (16-14) und (16-15), berechnet werden.

$$\rho_1 \cdot c_{p,1} \cdot d_1 \cdot \frac{dT_{2/3,1}(t)}{dt} = h_{\text{ext.}} \cdot [T_{\text{ext.}}(t) - T_{2/3,1}(t)] + h_s(t) \cdot [T_{2/3,2}(t) - T_{2/3,1}(t)] + I(t) \cdot \alpha_{e,1} \quad (16-14)$$

$$\rho_2 \cdot c_{p,2} \cdot d_2 \cdot \frac{dT_{2/3,2}(t)}{dt} = h_{\text{int.}} \cdot [T_{\text{int.}}(t) - T_{2/3,2}(t)] + h_s(t) \cdot [T_{2/3,1}(t) - T_{2/3,2}(t)] + I(t) \cdot \alpha_{e,2} \quad (16-15)$$

Für ein Dreifach-Isolierglas können die Temperaturen in den Zonen 2 und 3 über die Lösung des Gleichungssystems, bestehend aus den Gleichungen (16-16) bis (16-18), berechnet werden.

$$\rho_1 \cdot c_{p,1} \cdot d_1 \cdot \frac{dT_{2/3,1}(t)}{dt} = h_{\text{ext.}} \cdot [T_{\text{ext.}}(t) - T_{2/3,1}(t)] + h_{s,1}(t) \cdot [T_{2/3,2}(t) - T_{2/3,1}(t)] + I(t) \cdot \alpha_{e,1} \quad (16-16)$$

$$\rho_2 \cdot c_{p,2} \cdot d_2 \cdot \frac{dT_{2/3,2}(t)}{dt} = h_{s,1}(t) \cdot [T_{2/3,1}(t) - T_{2/3,2}(t)] + h_{s,2}(t) \cdot [T_{2/3,3}(t) - T_{2/3,2}(t)] + I(t) \cdot \alpha_{e,2} \quad (16-17)$$

$$\rho_3 \cdot c_{p,3} \cdot d_3 \cdot \frac{dT_{2/3,3}(t)}{dt} = h_{\text{int.}} \cdot [T_{\text{int.}} - T_{2/3,3}(t)] + h_{s,2}(t) \cdot [T_{2/3,2}(t) - T_{2/3,3}(t)] + I(t) \cdot \alpha_{e,3} \quad (16-18)$$

In den Gleichungen (16-14) bis (16-18) sind:

- $h_{\text{ext.}}$ = äußerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient
- $h_{\text{int.}}$ = innerer kombinierter Wärmeübergangskoeffizient
- h_s = temperaturabhängiger kombinierter Wärmeübergangskoeffizient des Scheibenzwischenraums

- $h_{s,j}$ = temperaturabhängiger kombinierter Wärmeübergangskoeffizient des j -ten Scheibenzwischenraums
- I = maximale solare bzw. diffuse solare Einstrahlungsintensität, ggf. mit Höhenkorrektur
- $T_{\text{ext.}}$ = Außenlufttemperatur, ggf. mit Höhenkorrektur
- $T_{\text{int.}}$ = Innenraumtemperatur
- $\alpha_{e,i}$ = Direkter Strahlungsabsorptionsgrad des i -ten Glases
- ρ_i = Dichte des i -ten Glases
- $c_{p,i}$ = Spezifische Wärmekapazität des i -ten Glases
- d_i = Nenndicke des i -ten Glases
- $dT_{2/3,i}$ = inkrementelle Änderung der Temperatur des i -ten Glases in der Zone 2 bzw. Zone 3
- dt = Zeitinkrement

16.10.4 Berechnung der maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Zonen

Die maximale Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Zonen},i}$ zwischen den Zonen 1, 2 und 3 wird für jede Glasscheibe i getrennt mit Gleichung (16-19) ermittelt.

$$\Delta T_{\text{Zonen},i} = \max(|T_{1,i}(t) - T_{2,i}(t)|, |T_{2,i}(t) - T_{3,i}(t)|) \quad (16-19)$$

Im Fall einer stationären Berechnung ist in Gleichung (16-19) die Zeitabhängigkeit t zu vernachlässigen. Im Fall einer transienten Berechnung ist die größte Temperaturdifferenz über alle Zeitpunkte t als maßgebender Analysezeitpunkt zu betrachten.

16.10.5 Berechnung der thermisch induzierten Spannung (ohne Teilsicherheitsbeiwerte)

Die thermisch induzierte Spannung $\sigma_{T,i}$ jeder Glasscheibe wird mit Gleichung (16-20) ermittelt.

$$\sigma_{T,i} = E \cdot \alpha_T \cdot \Delta T_{\text{Zonen},i} \quad (16-20)$$

16.11 Zweidimensionale Temperatur- und Spannungsberechnung mit der FEM

16.11.1 Allgemeines

Die Zweidimensionalität des Berechnungsmodells soll es ermöglichen die Wärmeleitung zwischen den angrenzenden Temperaturzonen 1 und 3 und zwischen Temperaturzonen 2 und 4 korrekt zu berücksichtigen. Mit Hilfe eines zweidimensionalen Flächenmodells können die konstruktiven Details des Rahmens und des Abstandhalters und deren Einfluss auf die Temperaturverhältnisse im Glas berücksichtigt werden.

Für die zweidimensionalen Temperaturberechnungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode werden die folgenden Annahmen getätigt.

- Die Verglasung ist rechteckig.
- Es wird ein Schnitt durch die Verglasung betrachtet, der alle vier Temperaturzonen und die Verglasungskonstruktion hinsichtlich ihrer Querschnittsgeometrie (Isolierglasaufbau, Rahmen, Abstandhalter, verschattete und unverschattete Bereiche) erfasst. In Abbildung 16-2 ist exemplarisch die Schnittführung in der Ansicht dargestellt. In Abbildung 16-3 ist eine Dreifach-Isolierverglasung mit Rahmen im Schnitt dargestellt.
- Beträgt die minimale Kantenabmessung der Gläser 1 m, können auch andere Glasgeometrien vereinfacht durch einen Schnitt abgebildet werden. Die korrekte Glasgeometrie muss dann im mechanischen Modell erfasst werden.
- Die Verglasung wird zweidimensional mit Hilfe von Flächen im Querschnitt abgebildet.
- Die konvektive Wärmeübertragung mit kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten über den Scheibenzwischenraum erfolgt eindimensional temperaturabhängig analog zu Abschnitt 16.10.2

(stationär) bzw. 16.10.3 (transient/instationär) und ist für Gläser mit einer minimalen Kantenlänge von 0,5 m zulässig.

- Die Temperaturberechnung in den Zonen 2 und 3 erfolgt eindimensional.
- Die direkte solare (Temperaturzone 2 und 4 - unverschattete Bereiche) und diffuse solare (Temperaturzone 1 und 3 - verschattete Bereiche) Einstrahlung wird in der jeweiligen Temperaturzone berücksichtigt. Hierbei wird die direkte Absorption des Rahmens in Abhängigkeit seiner Farbe und Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt.
- Der Randverbund des Isolierglases wird Hilfe eines 2-box-Modells abgebildet.
- Der Wärmetransport in den Ecken der Verglasung wird vernachlässigt.
- Die Wärmeleitung zwischen den Temperaturzonen 1 und 4 wird vernachlässigt.
- Eventuell vorhandene Hohlkammern/Luftkammern im Rahmen werden vereinfacht als luftbefüllte Bereiche betrachtet, in denen die Wärmeübertragung lediglich über Wärmeleitung erfolgt.
- Die Verglasungsklötze werden vernachlässigt.
- Die solare und diffuse Einstrahlung ist auf die Oberflächen aufzubringen, die in die zu untersuchende Fassadenorientierung zeigen. Alle anderen Oberflächen, die eine andere Orientierung aufweisen, erhalten keine solare oder diffuse Einstrahlung.
- Die Außenluft- und Innenraumtemperaturen werden mit Hilfe von Konvektionsrandbedingungen und den zugehörigen kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten auf alle äußeren bzw. inneren Oberflächen angesetzt.
- Im Scheibenzwischenraum werden die Randbedingungen Konvektion und Wärmestrahlung zu einer Konvektionsrandbedingung je Glasoberfläche zusammengefasst (Linearisierung der Wärmestrahlung).
- Am Übergang von Rahmen zu Wandkonstruktion wird eine adiabatische Randbedingung verwendet, vgl. EN 10077.
- Es ist eine, hinsichtlich Geometrie und Intensität, zeitlich unveränderliche Teilverschattung der Verglasung zu berücksichtigen. Die Geometrie der Verschattung ist durch die nationalen Normungsgremien zu definieren. Falls keine Vorgaben in einem Land existieren, so kann eine horizontale oder vertikale Teilverschattung (üblicherweise die maßgebende Geometrie zum Zeitpunkt der maximalen solaren Einstrahlung, abhängig von der Orientierung der Verglasung) angesetzt werden. Die Abmessung a_{Schatten} der Teilverschattung kann vereinfacht zu 10 % der längeren Glasabmessung angesetzt werden, wobei diese Länge ab der Glaskante zu zählen ist (siehe Abbildung 16-4 und Abbildung 16-5). Für die Abmessung a_{Schatten} sind jedoch mindestens 200 mm anzusetzen (für kleinere Verglasungen mit einer Höhe/Breite von weniger als 2000 mm). Falls andere Schattengeometrien, basierend auf einer Schattenwurfanalyse, maßgebend sind, so sind diese entsprechend zu verwenden.

Für die zweidimensionalen Spannungsberechnungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode werden die folgenden Annahmen getätigt.

- Der Zeitpunkt der maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Zonen gilt als der maßgebende Zeitpunkt für die Berechnung der thermisch induzierten Spannungen.
- Der Rahmen, die Verglasungsklötze und der Randverbund werden vernachlässigt.
- Jedes Glas bzw. Verbundglas des Isolierglasaufbaus ist getrennt zu modellieren.
- Basierend auf den Abmessungen der Gläser (Höhe und Breite) ist ein Flächenmodell zu erzeugen.
- Um die Temperaturen aus der thermischen Berechnung auf das mechanische Modell zu übertragen, wird wie folgt vorgegangen: Innerhalb des mechanischen Flächenmodells werden die einzelnen Temperaturzonen (1 bis 4) abgebildet. Hierbei ist die Schattengeometrie zu berücksichtigen. Aus dem thermischen Modell werden die Temperaturen der einzelnen Temperaturzonen ausgewertet und im Anschluss vereinfacht als über die Fläche, innerhalb der Temperaturzonen konstante Temperaturen auf das mechanische Modell übertragen.

- Die mechanischen Randbedingungen in der Glasebene sind derart zu wählen, dass die thermischen Dehnungen des Glases nicht verhindert werden.

ANMERKUNG: Diagonal verlaufende Schatten sind gesondert zu analysieren, da durch die diagonal verlaufende Schattengrenze eine spitzwinklige Schattengeometrie entsteht, die zu Spannungsüberhöhungen führen kann. In diesen Bereichen ist zu überprüfen, ob der Ansatz einer 10 % diffusen Einstrahlung bzw. der Ansatz einer Schattengrenze (Wechsel von Zone 2 zu Zone 3) generell gerechtfertigt und ob an diesen Stellen ein kontinuierlicher Übergang zu modellieren ist.

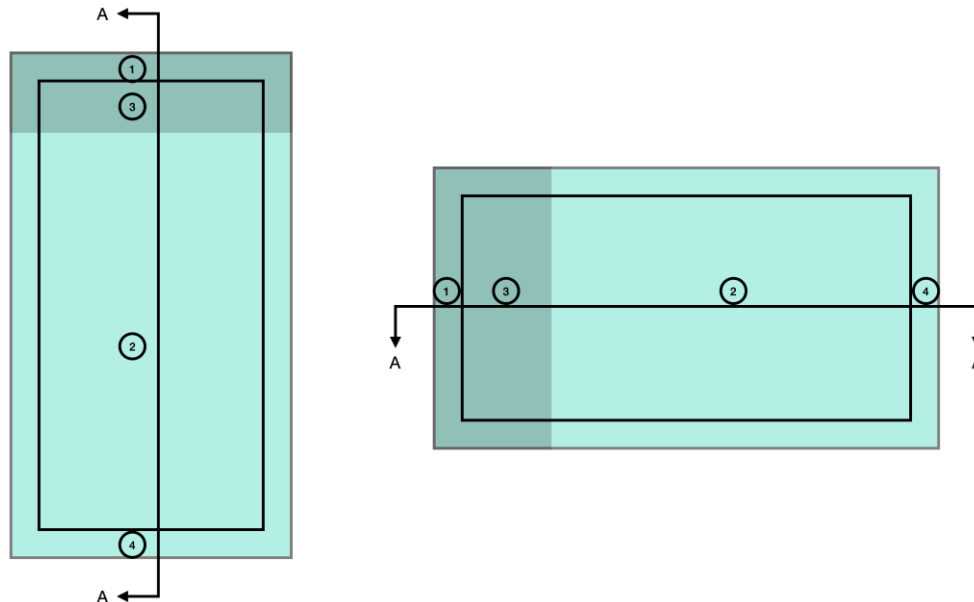


Abbildung 16-2: Exemplarische Schnitfführung bei vertikaler und horizontaler Teilverschattung inkl. Temperaturzonen.

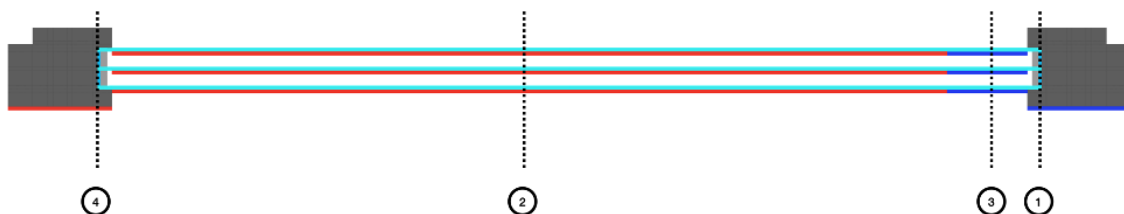


Abbildung 16-3: Exemplarischer Schnitt durch eine Dreifach-Isolierverglasung, inkl. Temperaturzonen. Verglasungsklötze, Luftspalte und Dichtungen sind nicht dargestellt. Der Abstandhalter ist vereinfacht dargestellt.

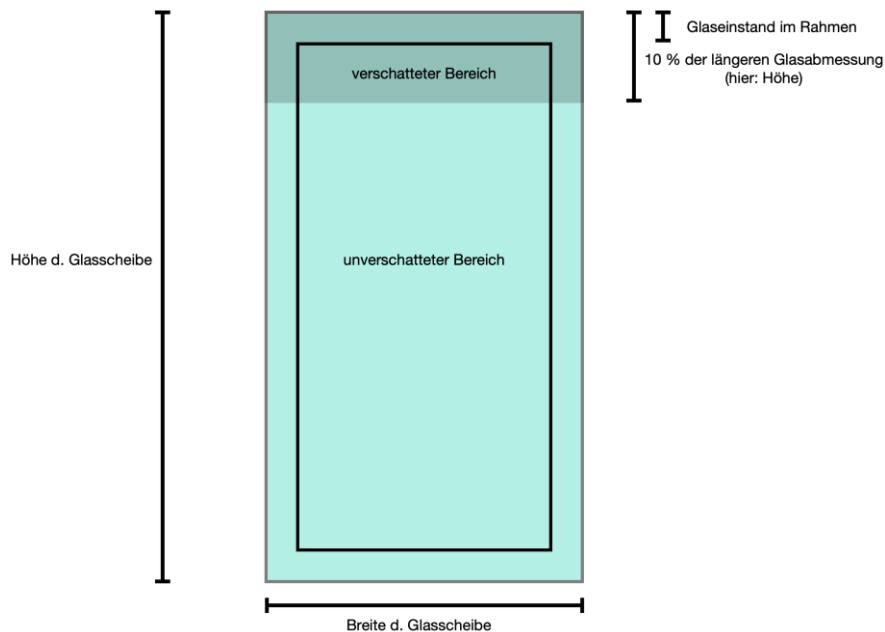


Abbildung 16-4: Exemplarische Darstellung der Schattengeometrie bei horizontaler Teilverschattung.

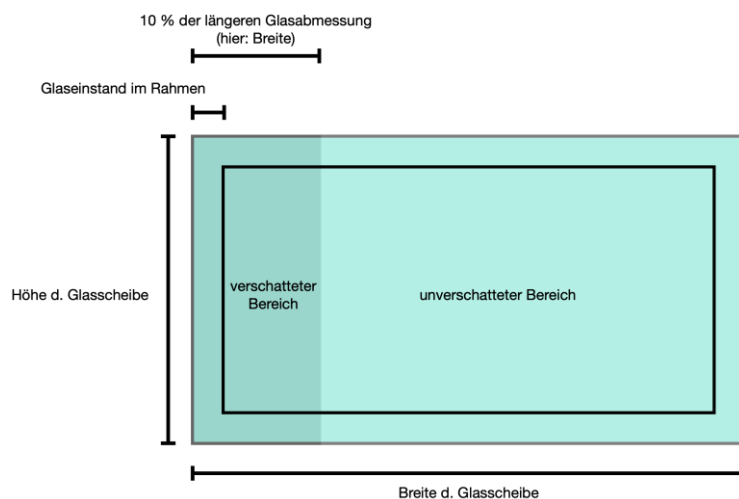


Abbildung 16-5: Exemplarische Darstellung der Schattengeometrie bei vertikaler Teilverschattung.

16.11.2 Stationäre Temperaturberechnung

Temperaturzone 1 und Temperaturzone 4

Die Temperaturen in den Zonen 1 und 4 werden mit Hilfe eines numerischen zweidimensionalen Flächenmodells ermittelt. Hierbei sind die Ergebnisse aus der eindimensionalen Berechnung der Temperaturzone 2 und 3 (Randbedingungen zur Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum) des nachfolgenden Abschnitts zu verwenden.

Temperaturzone 2 und Temperaturzone 3

Die Temperaturen in den Zonen 2 und 3 werden mit Hilfe der Gleichungen (16-9) bis (16-13) eindimensional berechnet. Die Ergebnisse werden zur Berechnung der Temperaturen in den Zonen 1 und 4 im zweidimensionalen Flächenmodell benötigt.

Auswertung der Temperaturen in den Zonen 1 und 4

Die Auswertung der Temperaturen in den Zonen 1 und 4 erfolgt an der Glaskante auf der halben Glasdicke. In Abbildung 16-6 ist der Ort der Auswertung dargestellt.

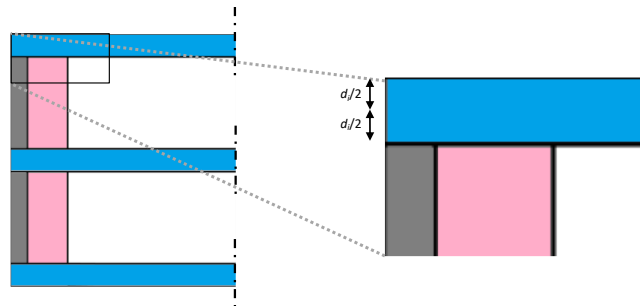


Abbildung 16-6: Ort der Auswertung der Temperaturen in Temperaturzonen 1 und 4.

16.11.3 Transiente (instationäre) Temperaturberechnung

Temperaturzone 1 und Temperaturzone 4

Die Temperaturen in den Zonen 1 und 4 werden mit Hilfe des zweidimensionalen Flächenmodells für alle Zeitschritte t inkl. vorheriger initialer Temperaturzustandsberechnung (initialer Temperaturzustand von Temperaturzone 1 und 4) zum Zeitpunkt t_0 ermittelt. Hierbei sind die Ergebnisse aus der eindimensionalen Berechnung der Temperaturzone 2 und 3 (Randbedingungen zur Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum) des nachfolgenden Abschnitts zu verwenden.

Temperaturzone 2 und Temperaturzone 3

Die Temperaturen in den Zonen 2 und 3 werden mit Hilfe der Gleichungen (16-14) bis (16-18) eindimensional für alle Zeitschritte t inkl. initialem Temperaturzustand zum Zeitpunkt t_0 berechnet. Die Ergebnisse werden zur Berechnung der Temperaturen in den Zonen 1 und 4 im zweidimensionalen Flächenmodell benötigt.

Auswertung der Temperaturen in den Zonen 1 und 4

Die Auswertung der Temperaturen in den Zonen 1 und 4 erfolgt für jeden Zeitschritt analog zu Abschnitt 16.11.2.

Berechnung der maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Zonen

Die maximale Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Zonen},i}$ zwischen den Zonen 1, 2 und 3 wird für jede Glasscheibe i getrennt mit Hilfe von Gleichung (16-19) ermittelt. Anhand der maximalen Temperaturdifferenz ergibt sich der Zeitpunkt $t_{\text{krit},i}$ der größten thermisch induzierten Spannung $\sigma_{T,i}$ und damit die auf das mechanische Modell zu übertragenden Temperaturen aus den jeweiligen Zonen 1 bis 4.

ANMERKUNG: Die Temperaturzone 4 muss nicht betrachtet werden, da diese bei der Berechnung der Temperaturdifferenzen nicht maßgebend wird.

16.11.4 Berechnung der thermisch induzierten Spannung (ohne Teilsicherheitsbeiwerte)

Die Berechnung der thermisch induzierten Spannung $\sigma_{T,i}$ jeder Glasscheibe erfolgt auf Basis eines zweidimensionalen Flächenmodells, welches die Breite und die Höhe des Glases (Ansichtsgeometrie) beinhaltet. Hierbei sind die Temperaturzonen innerhalb des Flächenmodells zu modellieren, um die Temperaturen innerhalb der einzelnen Zonen, als über die Fläche konstante Beanspruchungsgröße, im Modell eingeben zu können.

Dabei wird die im zweidimensionalen thermischen Modell ermittelte kontinuierliche Temperaturverteilung im Glas, insbesondere die Übergänge zwischen den Temperaturzonen, vernachlässigt.

16.12 Dreidimensionale Temperatur- und Spannungsberechnung mit der FEM

16.12.1 Allgemeines

Die Dreidimensionalität des Berechnungsmodells soll es ermöglichen die Wärmeleitung zwischen verschatteten und unverschatteten Bereichen der Verglasung korrekt zu berücksichtigen. Mit Hilfe eines dreidimensionalen Volumenkörpermodells können zusätzlich zum zweidimensionalen Flächenmodell (siehe Abschnitt 16.11) verschiedene Verglasungsgeometrien (z. B. dreieckige Verglasungen) und Schattengeometrien (z. B. diagonal verlaufende Teilverschattung), sowie andere konstruktive Randbedingungen, die die Temperaturverteilung im Glas beeinflussen, berücksichtigt werden.

Für die dreidimensionalen Temperaturberechnungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode werden die folgenden Annahmen getätigt.

- Die Verglasung wird hinsichtlich ihrer Geometrie (Isolierglasaufbau, Rahmen, Abstandhalter, verschattete und unverschattete Bereiche) vollständig erfasst.
- Die Wärmeübertragung über den Scheibenzwischenraum in den Zonen 2 und 3 erfolgt eindimensional temperaturabhängig analog zu Abschnitt 16.10.2 (stationär) bzw. 16.10.3 (transient/instationär).
- Die Temperaturberechnung in den Temperaturzonen 2 und 3 erfolgt eindimensional.
- Die direkte solare (Temperaturzone 2 und 4 - unverschattete Bereiche) und diffuse solare (Temperaturzone 1 und 3 - verschattete Bereiche) Einstrahlung wird in der jeweiligen Temperaturzone berücksichtigt. Hierbei wird die direkte Absorption des Rahmens in Abhängigkeit seiner Farbe und Oberflächenbeschaffenheit berücksichtigt.
- Der Randverbund eines Isolierglases wird Hilfe eines 2-box-Modells abgebildet.
- Der Wärmetransport in den Ecken der Verglasung wird berücksichtigt.
- Eventuell vorhandene Hohlkammern/Luftkammern im Rahmen werden vereinfacht als luftbefüllte Bereiche betrachtet, in denen die Wärmeübertragung lediglich über Wärmeleitung erfolgt.
- Die Verglasungsklötze werden vernachlässigt.
- Die solare und diffuse Einstrahlung in den Temperaturzonen ist auf die Oberflächen aufzubringen, deren Flächennormale in die zu untersuchende Fassadenorientierung zeigt. Alle anderen Oberflächen, die eine andere Orientierung aufweisen, erhalten keine solare oder diffuse Einstrahlung.
- Die Außenluft- und Innenraumtemperatur werden mit Hilfe von Konvektionsrandbedingungen und den zugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten auf alle äußeren bzw. inneren Oberflächen angesetzt.
- Im Scheibenzwischenraum werden die Randbedingungen Konvektion und Wärmestrahlung zu einer Konvektionsrandbedingung je Glasoberfläche zusammengefasst (Linearisierung der Wärmestrahlung).
- Es ist eine, hinsichtlich Geometrie und Intensität, zeitlich unveränderliche Teilverschattung der Verglasung zu berücksichtigen. Die Geometrie der Verschattung ist durch die nationalen Normungsgremien zu definieren. Falls keine Vorgaben in einem Land existieren, so kann eine horizontale oder vertikale Teilverschattung (üblicherweise die maßgebende Geometrie zum Zeitpunkt der maximalen solaren Einstrahlung, abhängig von der Orientierung der Verglasung) angesetzt werden. Die Abmessung a_{Schatten} der Teilverschattung kann vereinfacht zu 10 % der längeren Glasabmessung angesetzt werden, wobei diese Länge ab der Glaskante zu zählen ist (siehe auch Abbildung 16-4 und Abbildung 16-5). Für die Abmessung a_{Schatten} sind jedoch mindestens 200 mm anzusetzen (für kleinere Verglasungen mit einer Höhe/Breite von weniger als 2000 mm). Falls andere Schattengeometrien, basierend auf einer Schattenwurfanalyse, maßgebend sind, so sind diese entsprechend zu verwenden.

Für die zwei-/dreidimensionalen Spannungsberechnungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode werden die folgenden Annahmen getätigt.

- Der Rahmen, die Verglasungsklötze und der Randverbund werden vernachlässigt.

-
- Jedes Glas bzw. Verbundglas des Isolierglasaufbaus ist getrennt zu modellieren.
 - Basierend auf den Abmessungen der Gläser (Höhe und Breite) kann ein Flächenmodell zu erzeugt werden. Es dürfen auch Volumenkörpermodelle verwendet werden.
 - Die/das in der Temperaturberechnung ermittelte Temperaturverteilung/Temperaturfeld jeder Glasscheibe ist auf das mechanische Volumen-/Flächenmodell ohne weitere Vereinfachungen (z. B. Temperaturzonen) zu übertragen.
 - Die mechanischen Randbedingungen in der Glasebene sind derart zu wählen, dass die thermischen Dehnungen des Glases nicht verhindert werden.

16.12.2 Stationäre Temperaturberechnung

Temperaturzone 1 und Temperaturzone 4

Die Temperaturen in den Zonen 1 und 4 werden mit Hilfe eines dreidimensionalen Volumenkörpermodells ermittelt. Hierbei sind die Ergebnisse aus der eindimensionalen Berechnung der Temperaturzone 2 und 3 (Randbedingungen zur Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum) des nachfolgenden Abschnitts zu verwenden.

Temperaturzone 2 und Temperaturzone 3

Die Temperaturen in den Zonen 2 und 3 werden mit Hilfe der Gleichungen (16-9) bis (16-13) eindimensional berechnet. Die Ergebnisse werden zur Berechnung der Temperaturen in den Zonen 1 und 4 im dreidimensionalen Volumenkörpermodell benötigt.

16.12.3 Transiente (instationäre) Temperaturberechnung

Temperaturzone 1 und Temperaturzone 4

Die Temperaturen in den Zonen 1 und 4 werden mit Hilfe eines dreidimensionalen Volumenkörpermodells für alle Zeitschritte t inkl. vorheriger initialer Temperaturzustandsberechnung (initialer Temperaturzustand von Temperaturzone 1 und 4) zum Zeitpunkt t_0 ermittelt. Hierbei sind die Ergebnisse aus der eindimensionalen Berechnung der Temperaturzone 2 und 3 (Randbedingungen zur Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum) des nachfolgenden Abschnitts zu verwenden.

Temperaturzone 2 und Temperaturzone 3

Die Temperaturen in den Zonen 2 und 3 werden mit Hilfe der Gleichungen (16-14) bis (16-18) eindimensional für alle Zeitschritte t inkl. initialem Temperaturzustand zum Zeitpunkt t_0 berechnet. Die Ergebnisse werden zur Berechnung der Temperaturen in den Temperaturzonen 1 und 4 im dreidimensionalen Volumenkörpermodell benötigt.

16.12.4 Berechnung der thermisch induzierten Spannung (ohne Teilsicherheitsbeiwerte)

Die Berechnung der thermisch induzierten Spannung $\sigma_{T,i}$ jeder Glasscheibe erfolgt auf Basis eines zwei-/dreidimensionalen numerischen Modells (Flächen oder Volumenkörper). Hierbei wird die/das vollständige Temperaturverteilung/Temperaturfeld (keine Temperaturzonen) als Beanspruchung auf das mechanische Modell übertragen. Im Fall einer transienten Temperaturberechnung werden alle Zeitschritte im mechanischen Modell berücksichtigt.

17 Berechnungen für eine beispielhafte Verglasung

Die im Projekt entwickelten Berechnungsverfahren werden im Folgenden exemplarisch für eine ausgewählte Verglasung angewandt. Die Vorgehensweise wird dabei detailliert beschrieben, um eine Anwendung der Verfahren allgemein und im Rahmen des Abschnitts 16 vorgestellten Normentwurfs zu erleichtern.

17.1 Methodik, Konzept und Ziel

Ziel ist es die Vorgehensweise der entwickelten Berechnungsverfahren anhand eines Beispiels vorzustellen und im Anschluss die mit den verschiedenen Verfahren ermittelten Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Dabei wird zunächst in Abschnitt 17.2 die ausgewählte Verglasung mit seinen thermischen und mechanischen Eigenschaften beschrieben. Anschließend werden in Abschnitt 17.3 die meteorologischen Eingangsdaten für die stationären und transienten Berechnungen ermittelt. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 17.4, 17.5, 17.6 die Temperaturen und die daraus resultierenden thermisch induzierten Spannungen ohne Teilsicherheitsbeiwerte - hierfür wäre eine statistische Auswertung der meteorologischen Daten hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit der verwendeten Wetterszenarien erforderlich - mit Hilfe der stationären 1D, 2D und 3D Berechnungsverfahren ermittelt. In Abschnitt 17.7 erfolgt die Berechnung der Temperaturen und Spannungen dreidimensional und transient. Abschließend werden in Abschnitt 17.8 die mit den verschiedenen Berechnungsverfahren ermittelten thermisch induzierten Spannungen miteinander verglichen.

17.2 Ausgewählte Verglasung

Untersucht wird im Folgenden ein Dreifach-Wärmedämmglas mit einer low-e Beschichtung (iplus 1.1 von AGC Interpane) auf Position 3 und 5. Die Glasdicke der Einzelscheiben (Planibel Clearlite von AGC Interpane) beträgt jeweils 4 mm. Der Scheibenzwischenraum wird jeweils mit 16 mm Breite angenommen und ist mit einem üblichen Argon-Luft-Gemisch (Mischungsverhältnis: 90 % Argon, 10 % Luft) befüllt.

Vor bzw. hinter der Isolierglaseinheit sind keine Sonnenschutz- oder Sichtschutzelemente installiert. Weitere konstruktive Randbedingungen, wie z. B. eine abgehängte Decke oder ähnliches, sind nicht vorhanden.

Das Isolierglas ist allseitig in einem Holzrahmen (Holzrahmen gem. ift-Richtlinie WA-08/1, Bild A1 [35]) mit heller Farbe eingefasst. Der Glaseinstand in den Rahmen beträgt 15 mm.

Die direkten Strahlungsabsorptionsgrade je Glasscheibe wurden mit Hilfe der Software WinSLT (Berechnung gemäß EN 410 [17] bzw. EN ISO 52022-3 [23]) der Firma Sommer Informatik GmbH berechnet.

Die ermittelten direkten Strahlungsabsorptionsgrade betragen:

- Außenscheibe $\alpha_{e1} = 0,0741$
- Mittelscheibe $\alpha_{e2} = 0,0857$
- Innenscheibe $\alpha_{e3} = 0,0464$
- Rahmen $\alpha_{\text{Rahmen}} = 0,2$

In Tabelle 17-1 sind alle weiteren für die folgenden Berechnungen und Simulationen erforderlichen thermischen Materialeigenschaften aufgeführt.

Tabelle 17-1: Thermische Materialeigenschaften. Die zwei mit Asterisk gekennzeichneten Werte wurden über eine Mittelwertberechnung der Querschnittanteile ermittelt.

Material	Dichte ρ [kg/m]	Isotrope thermische Leitfähigkeit λ [W/(m K)]	Spezifische Wärmekapazität c_p [J/(kg K)]
Holz [22]	500	0,13	1600
Ethylen-Propylen-Dien-Monomer [22]	1150	0,25	1000
Kalk-Natronsilicatglas [18]	2500	1,00	720
Polysulfid [22]	1700	0,40	1000
Warme Kante Abstandhalter (λ : 2-box Modell; ρ und c_p : gemittelt)	1079*	0,28 [5]	992*
Zusammensetzung des Abstandhalters:			
Polyvinylchlorid (PVC) [22]	1390	0,17	900
Edelstahl, austenitisch oder austenitisch-ferritisch [22]	7900	17,00	500
Silicagel (Trockenmittel) [22]	720	0,13	1000
Butylkautschuk (Isobutenkautschuk), hart/heiß geschmolzen [22]	1200	0,24	1400

In Tabelle 17-2 sind die mechanischen Materialeigenschaften für Glas angegeben.

Tabelle 17-2: Mechanische Materialeigenschaften gemäß [19].

Material	Elastizitätsmodul E [MPa]	Querdehnzahl ν [-]	Thermischer Ausdehnungskoeffizient α_T [1/K]
Kalk-Natronsilicatglas	70000	0,2	$9 \cdot 10^{-6}$

Mit Hilfe der ein-, zwei- und dreidimensionalen Berechnungsverfahren, welche für den Normentwurf entwickelt (vgl. Abschnitt 14 und 16) wurden, erfolgte für den Standort Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) der Technischen Universität Darmstadt für alle acht Fassadenorientierungen (Nord bis Nord-West in 45°-Schritten) die Berechnung der thermisch induzierten Spannungen für alle drei Einzelscheiben des betrachteten Dreifach-Isolierglases (Wärmedämmglas).

Für das eindimensionale Berechnungsverfahren wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die diffuse Strahlung im verschatteten Bereich der Verglasung wird für die Berechnung in der Temperaturzone 1 vernachlässigt.
- Der Rahmen wird vernachlässigt.

Für das zwei- und dreidimensionale Berechnungsverfahren wurden folgende Annahmen getroffen:

- Für den Rahmen wurde ein Absorptionsgrad von 20 % angenommen.
- 2D: Für den Rahmen wurde der Rahmen in Abbildung 10-2 links (original) verwendet.
- 3D: Für den Rahmen wurde der Rahmen in Abbildung 10-2 rechts (thermisch äquivalent) verwendet.
- Der Glaseinstand in den Rahmen wurde mit 15 mm angenommen.
- Der Abstandhalter wurde mit Hilfe des 2-box-Modells [52] abgebildet.

- Die Verglasung (Abmessung des Glases ohne Rahmen) betrug: Höhe 2 m und Breite 1 m.
- Es wurde eine horizontale Teilverschattung der Verglasung in den Berechnungen verwendet. Die Länge der Verschattung betrug 0,2 m (10 % der längeren Glasabmessung).
- Für das zweidimensionale Berechnungsverfahren wurde ein Schnitt senkrecht zur Schattengrenze durch die Verglasung modelliert.
- Beim dreidimensionalen Berechnungsverfahren wurde die Symmetrie des Systems ausgenutzt.

17.3 Meteorologische Eingangsdaten für den Standort ISM+D

Für den Standort des Institutsgebäudes des ISM+D wurden der Längengrad zu 8,68 und Breitengrad zu 49,86 mit Hilfe von openstreetmap (<https://www.openstreetmap.de>) ermittelt.

Die Innenraumlufttemperatur wurde mit 20 °C für alle Orientierungen und beide Tage (warm und kalt) angenommen. Die Wärmeübergangskoeffizienten für die äußeren und inneren Oberflächen wurden entsprechend Abschnitt 16.7.1 und 16.9.1 gewählt.

17.3.1 Stationäre Berechnung – Kalte Tage

Mit Hilfe der linearen Interpolation wurden für jede Fassadenorientierung die für den Standort gültigen maximalen solaren Einstrahlungsintensitäten I_{max} und die zugehörigen Außenlufttemperaturen T_{ext} für stationäre Berechnungen an den kalten Tagen, basierend auf den Tabellen in Anhang A5, ermittelt. In Tabelle 17-3 sind die interpolierten Daten dargestellt.

Tabelle 17-3: Interpolierte meteorologische Daten für stationäre Berechnungen der kalten Tage.

Orientierung	Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{max} [W/m ²]	Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]
Nord	278,2	7,4
Nord-Ost	669,2	2,2
Ost	870,2	-0,2
Süd-Ost	927,6	-9,7
Süd	946,6	-12,5
Süd-West	927,7	-7,3
West	872,9	4,6
Nord-West	667,1	6,0

17.3.2 Stationäre Berechnung – Warme Tage

Mit Hilfe der linearen Interpolation wurden für jede Fassadenorientierung die für den Standort gültigen maximalen solaren Einstrahlungsintensitäten I_{max} und die zugehörigen Außenlufttemperaturen T_{ext} für stationäre Berechnungen an den warmen Tagen, basierend auf den Tabellen in Anhang A4, ermittelt. In Tabelle 17-4 sind die interpolierten Daten dargestellt.

Tabelle 17-4: Interpolierte meteorologische Daten für stationäre Berechnungen der warmen Tage.

Orientierung	Maximale solare Einstrahlungsintensität $I_{\max.}$ [W/m ²]	Außenlufttemperatur $T_{\text{ext.}}$ [°C]
Nord	272,1	37,1
Nord-Ost	674,1	29,3
Ost	840,4	33,0
Süd-Ost	896,5	24,3
Süd	906,9	24,9
Süd-West	927,5	20,3
West	840,8	36,5
Nord-West	672,3	37,4

17.3.3 Transiente Berechnung – Alle Situationen

Für die transienten Berechnungen wurden für den kalten Tag, den warmen Tag, den kalten Übergangstag und den warmen Übergangstag die zeitlich veränderlichen meteorologischen Eingangsdaten $I(t)$ und $T_{\text{ext.}}(t)$ für jede Fassadenorientierung mit Hilfe der maximalen solaren Einstrahlungsintensitäten $I_{\max.}$ und den zugehörigen Außenlufttemperaturen $T_{\text{ext.}}$ aus der Tabelle 17-3 und Tabelle 17-4 berechnet. Die zeitlich veränderlichen solaren Einstrahlungsintensitäten $I(t)$ werden exemplarisch für die Süd-Ost-Orientierung wie folgt berechnet: Die zeitlich veränderlichen Verläufe (kalter Tag und Übergangstag) der normierten solaren Einstrahlung der Süd-Ost-Orientierung (siehe Anhang A6.4) wurden mit der maximalen solaren Einstrahlungsintensität von $I_{\max.} = 927,6 \text{ W/m}^2$ aus Tabelle 17-3 multipliziert. Daraus resultierten schließlich die zeitlich veränderlichen solaren Einstrahlungsintensitätskurven für den kalten Tag und den kalten Übergangstag. Die zeitlich veränderlichen Verläufe (warmer Tag und Übergangstag) der normierten solaren Einstrahlung der Süd-Ost-Orientierung (siehe Anhang A6.4) wurden mit der maximalen solaren Einstrahlungsintensität von $I_{\max.} = 896,5 \text{ W/m}^2$ aus Tabelle 17-4 multipliziert. Daraus resultierten schließlich die zeitlich veränderlichen solaren Einstrahlungsintensitätskurven für den warmen Tag und den warmen Übergangstag.

Die zugehörigen zeitlich veränderlichen Außenlufttemperaturen $T_{\text{ext.}}(t)$ wurden mit Hilfe von Gleichung (16-2) ermittelt. Hierbei gilt, dass die resultierenden zeitlich veränderlichen Außenlufttemperaturen $T_{\text{ext.}}(t)$ für den kalten Tag und den kalten Übergangstag identisch sind. Das Gleiche gilt für den warmen Tag und den warmen Übergangstag. In Tabelle 17-5 sind die exemplarischen, resultierenden zeitlich veränderlichen meteorologischen Eingangsdaten für die transiente Berechnung für die Süd-Ost-Orientierung dargestellt. Hierbei stellen blau gefärbte Zellen den jeweiligen Anfangszeitpunkt der Berechnungen und gelbe gefärbte Zellen den Endzeitpunkt dar. In Abbildung 17-1 sind die Daten aus Tabelle 17-5 grafisch aufbereitet. Für alle anderen Orientierungen wurde identisch vorgegangen.

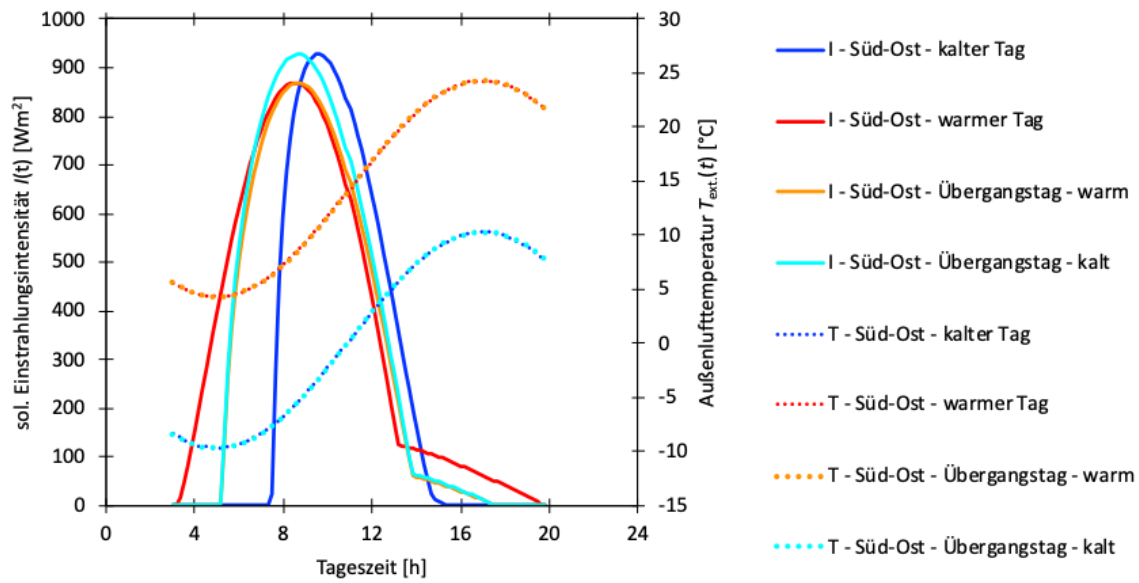


Abbildung 17-1: Exemplarische, zeitlich veränderliche meteorologische Eingangsdaten für die transienten Berechnungen für eine Süd-Ost-Orientierung.

Tabelle 17-5: Exemplarische, zeitlich veränderliche meteorologische Eingangsdaten für die transienten Berechnungen für eine Süd-Ost-Orientierung für den kalten Tag. Die blauen und gelben Zellen grenzen den Zeitraum der numerischen Simulation ein.

Zeile	Zeit t [h]	Normierte Einstrahlungsintensität am kalten Tag I/I_{\max} [-]	Zeitlich veränderliche Einstrahlungsintensität am kalten Tag $I(t) = I/I_{\max} * 927,6$ W/m^2 [W/m^2]	Temperaturverlauf am kalten Tag $T_{\text{ext.}}(t)$ [°C]
1	7,33	0	0,0	-7,892
2	7,50	0,025	23,2	-7,634
3	7,67	0,295	273,3	-7,360
4	7,83	0,506	469,6	-7,073
5	8,00	0,645	598,1	-6,771
6	8,17	0,742	688,7	-6,456
7	8,33	0,815	755,7	-6,128
8	8,50	0,869	806,3	-5,788
9	8,67	0,911	845,0	-5,436
10	8,83	0,943	874,4	-5,073
11	9,00	0,966	896,3	-4,700
12	9,17	0,983	911,7	-4,317
13	9,33	0,994	921,7	-3,926
14	9,50	0,999	926,8	-3,527
15	9,67	1,000	927,6	-3,120
16	9,83	0,997	924,4	-2,707
17	10,00	0,989	917,7	-2,288
18	10,17	0,978	907,6	-1,864
19	10,33	0,964	894,3	-1,436
20	10,50	0,947	878,2	-1,005
21	10,67	0,926	859,4	-0,572
22	10,83	0,903	838,1	-0,136
23	11,00	0,878	814,3	0,300
24	11,17	0,850	788,4	0,736
25	11,33	0,820	760,4	1,172
26	11,50	0,788	730,5	1,605
27	11,67	0,753	698,8	2,036
28	11,83	0,717	665,6	2,464
29	12,00	0,680	630,8	2,888
30	12,17	0,641	594,7	3,307
31	12,33	0,601	557,4	3,720
32	12,50	0,560	519,1	4,127
33	12,67	0,517	480,0	4,526
34	12,83	0,474	440,1	4,917
35	13,00	0,431	399,7	5,300
36	13,17	0,387	359,0	5,673
37	13,33	0,343	318,2	6,036
38	13,50	0,299	277,4	6,388
39	13,67	0,256	237,0	6,728
40	13,83	0,213	197,2	7,056
41	14,00	0,171	158,4	7,371
42	14,17	0,130	121,0	7,673
43	14,33	0,092	85,5	7,960
44	14,50	0,057	52,7	8,234
45	14,67	0,026	23,8	8,492
46	14,83	0,013	11,7	8,734
47	15,00	0,009	8,7	8,960
48	15,17	0,005	4,7	9,170
49	15,33	0,000	0,1	9,363
50	15,50	0	0,0	9,539

17.4 Vereinfachte stationäre 1D Temperatur- und Spannungsberechnung

Mit Hilfe der Gleichungen aus Abschnitt 16.10.2 wurden für die in Abschnitt 17.2 beschriebene Isolierglaseinheit und die in Abschnitt 17.3.1 und 17.3.2 ermittelten meteorologischen Daten zunächst die Temperaturen in den einzelnen Zonen 1, 2 und 3 und anschließend basierend auf der Temperaturdifferenz zwischen den Zonen die thermisch induzierten Spannungen ohne Teilsicherheitsbeiwerte (vgl. Abschnitt 17.1) berechnet.

17.4.1 Berechnung der Temperaturen in Zone 1

Mit Hilfe der Gleichungen (16-6) bis (16-8) wurden die Temperaturen der Gläser in Zone 1 (vgl. Abbildung 16-1) berechnet. In der Tabelle 17-6 und in der Tabelle 17-7 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 17-6: Kalte Tage - Temperaturen in Zone 1.

Orientierung	Temperatur $T_{1,1}$ Außenscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,2}$ Mittelscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	10,9	13,1	15,2
Nord-Ost	7,2	10,2	13,2
Ost	5,5	8,9	12,3
Süd-Ost	-1,4	3,6	8,6
Süd	-3,4	2,1	7,6
Süd-West	0,4	5,0	9,6
West	8,9	11,5	14,1
Nord-West	9,9	12,3	14,6

Tabelle 17-7: Warme Tage - Temperaturen in Zone 1.

Orientierung	Temperatur $T_{1,1}$ Außenscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,2}$ Mittelscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	32,3	29,4	26,5
Nord-Ost	26,7	25,1	23,6
Ost	29,4	27,2	25
Süd-Ost	23,1	22,4	21,6
Süd	23,5	22,7	21,9
Süd-West	20,2	20,2	20,1
West	31,9	29,1	26,3
Nord-West	32,5	29,6	26,7

17.4.2 Berechnung der Temperaturen in Zone 2

Mit Hilfe der Gleichungen (16-11) bis (16-13) wurden die Temperaturen der Gläser in Zone 2 (vgl. Abbildung 16-1) berechnet. In der Tabelle 17-8 und in der Tabelle 17-9 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 17-8: Kalte Tage - Temperaturen in Zone 2.

Orientierung	Temperatur $T_{2,1}$ Außenscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,2,1}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{2,2}$ Mittelscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,2,2}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{2,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	11,2	1,38	25,5	1,31	22,2
Nord-Ost	11,0	1,68	36,7	1,33	25,9
Ost	11,2	1,78	42,0	1,39	27,8
Süd-Ost	3,1	1,86	38,1	1,33	27,4
Süd	0,7	1,88	37,0	1,33	27,4
Süd-West	5,3	1,85	39,7	1,33	27,7
West	15,6	1,75	44,8	1,45	28,4
Nord-West	14,5	1,65	38,9	1,34	26,2

Tabelle 17-9: Warme Tage - Temperaturen in Zone 2.

Orientierung	Temperatur $T_{2,1}$ Außenscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,2,1}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{2,2}$ Mittelscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,2,2}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{2,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	39,1	1,35	40,0	1,43	24,5
Nord-Ost	36,1	1,42	51,2	1,61	28,8
Ost	41,3	1,48	58,4	1,72	31,1
Süd-Ost	34,0	1,60	55,8	1,67	30,8
Süd	34,6	1,60	56,5	1,68	31,0
Süd-West	30,6	1,65	54,8	1,65	30,7
West	44,6	1,44	60,0	1,74	31,5
Nord-West	43,6	1,37	54,8	1,67	29,5

17.4.3 Berechnung der Temperaturen in Zone 3

Mit Hilfe der Gleichungen (16-11) bis (16-13) wurden die Temperaturen der Gläser in Zone 3 (vgl. Abbildung 16-1) berechnet. In der Tabelle 17-10 und in der Tabelle 17-11 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 17-10: Kalte Tage - Temperaturen in Zone 3.

Orientierung	Temperatur $T_{3,1}$ Außenscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,3,1}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{3,2}$ Mittelscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,3,2}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{3,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	8,4	1,29	14,8	1,30	19,4
Nord-Ost	3,9	1,28	14,0	1,30	19,5
Ost	1,9	1,29	13,6	1,30	19,5
Süd-Ost	-7,0	1,41	8,3	1,29	18,8
Süd	-9,6	1,44	6,7	1,30	18,6
Süd-West	-4,7	1,38	9,7	1,29	19,0
West	6,4	1,29	16,1	1,30	19,9
Nord-West	7,5	1,29	15,9	1,30	19,7

Tabelle 17-11: Warme Tage - Temperaturen in Zone 3.

Orientierung	Temperatur $T_{3,1}$ Außenscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,3,1}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{3,2}$ Mittelscheibe [°C]	Komb. Wärme- übergangs- koeffizient $h_{s,3,2}$ [W/(m ² K)]	Temperatur $T_{3,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	36,5	1,33	30,0	1,32	21,6
Nord-Ost	29,5	1,32	27,7	1,31	21,5
Ost	33,2	1,33	30,3	1,32	21,9
Süd-Ost	25,1	1,31	26,1	1,31	21,4
Süd	25,6	1,32	26,5	1,31	21,4
Süd-West	21,3	1,31	24,2	1,31	21,1
West	36,5	1,33	32,1	1,32	22,2
Nord-West	37,2	1,33	31,9	1,32	22,1

17.4.4 Berechnung der maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Zonen

In Tabelle 17-12 wurden die Temperaturdifferenzen über alle Orientierungen für den kalten Tag (Temperaturen aus Tabelle 17-6, Tabelle 17-8 und Tabelle 17-10) mit Hilfe von Gleichung (16-19) unter Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit berechnet.

Tabelle 17-12: Berechnung der Temperaturdifferenzen für die kalten Tage.

Orientierung	$T_{1,i} - T_{2,i}$ [K]			$T_{2,i} - T_{3,i}$ [K]		
	ΔT_{12} Außenscheibe [K]	ΔT_{12} Mittelscheibe [K]	ΔT_{12} Innenscheibe [K]	ΔT_{23} Außenscheibe [K]	ΔT_{23} Mittelscheibe [K]	ΔT_{23} Innenscheibe [K]
Nord	0,3	12,4	7,0	2,8	10,7	2,8
Nord-Ost	3,8	26,5	12,7	7,1	22,7	6,4
Ost	5,7	33,1	15,5	9,3	28,4	8,3
Süd-Ost	4,5	34,5	18,8	10,1	29,8	8,6
Süd	4,1	34,9	19,8	10,3	30,3	8,8
Süd-West	4,9	34,7	18,1	10,0	30,0	8,7
West	6,7	33,3	14,3	9,2	28,7	8,5
Nord-West	4,6	26,6	11,6	7,0	23,0	6,5

Die maximalen Temperaturdifferenzen für den kalten Tag ergeben sich über die Auswertung von Tabelle 17-12 und sind in Tabelle 17-13 dokumentiert.

Tabelle 17-13: Auswertung der maximalen Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{Zonen},i}$ für die kalten Tage.

Orientierung	$\Delta T_{\text{Zonen},1}$	$\Delta T_{\text{Zonen},2}$	$\Delta T_{\text{Zonen},3}$
	Außenscheibe [K]	Mittelscheibe [K]	Innenscheibe [K]
Nord	2,8	12,4	7,0
Nord-Ost	7,1	26,5	12,7
Ost	9,3	33,1	15,5
Süd-Ost	10,1	34,5	18,8
Süd	10,3	34,9	19,8
Süd-West	10,0	34,7	18,1
West	9,2	33,3	14,3
Nord-West	7,0	26,6	11,6

In Tabelle 17-14 wurden die Temperaturdifferenzen über alle Orientierungen für den warmen Tag (Temperaturen aus Tabelle 17-7, Tabelle 17-9 und Tabelle 17-11 und) mit Hilfe von Gleichung (16-19) unter Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit berechnet.

Tabelle 17-14: Berechnung der Temperaturdifferenzen für die warmen Tage.

Orientierung	$T_{1,i} - T_{2,i}$ [K]			$T_{2,i} - T_{3,i}$ [K]		
	ΔT_{12}	ΔT_{12}	ΔT_{12}	ΔT_{23}	ΔT_{23}	ΔT_{23}
	Außenscheibe [K]	Mittelscheibe [K]	Innenscheibe [K]	Außenscheibe [K]	Mittelscheibe [K]	Innenscheibe [K]
Nord	6,8	10,6	2,0	2,6	10,0	2,9
Nord-Ost	9,4	26,1	5,2	6,6	23,5	7,3
Ost	11,9	31,2	6,1	8,1	28,1	9,2
Süd-Ost	10,9	33,4	9,2	8,9	29,7	9,4
Süd	11,1	33,8	9,1	9,0	30,0	9,6
Süd-West	10,4	34,6	10,6	9,3	30,6	9,6
West	12,7	30,9	5,2	8,1	27,9	9,3
Nord-West	11,1	25,2	2,8	6,4	22,9	7,4

Die maximalen Temperaturdifferenzen für den warmen Tag ergeben sich über die Auswertung von Tabelle 17-14 und sind in Tabelle 17-15 dokumentiert.

Tabelle 17-15: Auswertung der maximalen Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{Zonen},i}$ für die warmen Tage.

Orientierung	$\Delta T_{\text{Zonen},1}$	$\Delta T_{\text{Zonen},2}$	$\Delta T_{\text{Zonen},3}$
	Außenscheibe [K]	Mittelscheibe [K]	Innenscheibe [K]
Nord	6,8	10,6	2,9
Nord-Ost	9,4	26,1	7,3
Ost	11,9	31,2	9,2
Süd-Ost	10,9	33,4	9,4
Süd	11,1	33,8	9,6
Süd-West	10,4	34,6	10,6
West	12,7	30,9	9,3
Nord-West	11,1	25,2	7,4

17.4.5 Berechnung der thermisch induzierten Spannung

Mit Hilfe von Gleichung (16-20) und den in Tabelle 17-13 ermittelten maximalen Temperaturdifferenzen $\Delta T_{Zonen,i}$ wurden die thermisch induzierten Spannungen $\sigma_{T,i}$ für den kalten Tag ermittelt und in Tabelle 17-16 dokumentiert.

Tabelle 17-16: Thermisch induzierte Spannungen für die kalten Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	1,8	7,8	4,4
Nord-Ost	4,5	16,7	8,0
Ost	5,9	20,9	9,8
Süd-Ost	6,4	21,7	11,8
Süd	6,5	22,0	12,5
Süd-West	6,3	21,9	11,4
West	5,8	21,0	9,0
Nord-West	4,4	16,8	7,3

Mit Hilfe von Gleichung (16-20) und den in Tabelle 17-15 ermittelten maximalen Temperaturdifferenzen $\Delta T_{Zonen,i}$ wurden die thermisch induzierten Spannungen $\sigma_{T,i}$ für den warmen Tag ermittelt und in Tabelle 17-17 dokumentiert.

Tabelle 17-17: Thermisch induzierte Spannungen für die warmen Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	4,3	6,7	1,8
Nord-Ost	5,9	16,4	4,6
Ost	7,5	19,7	5,8
Süd-Ost	6,9	21,0	5,9
Süd	7,0	21,3	6,0
Süd-West	6,6	21,8	6,7
West	8,0	19,5	5,9
Nord-West	7,0	15,9	4,7

17.5 Stationäre 2D Temperatur- und Spannungsberechnung

Für die in Abschnitt 17.2 beschriebene Isolierglaseinheit und die in Abschnitt 17.3.1 und 17.3.2 ermittelten meteorologischen Daten wurden zunächst die Temperaturen in den Zonen 1 und 4 (vgl. Abbildung 16-1) mit Hilfe eines zweidimensionalen numerischen Modells in ANSYS berechnet. Anschließend wurden die Temperaturen zonenweise manuell ausgewertet (vgl. Abschnitt 16.11) und auf ein mechanisches zweidimensionales Flächenmodell im Berechnungsprogramm RFEM der Firma Dlubal - in der Bauingenieurpraxis oft angewandt - zonenweise konstant übertragen. Dort wurden die thermisch induzierten Spannungen ohne Teilsicherheitsbeiwerte (vgl. Abschnitt 17.1) berechnet.

Die Temperaturen der Zone 2 und 3 (vgl. Abbildung 16-1) konnten, basierend auf der Größe der Isolierglaseinheit ($B/H = 2 \text{ m} / 1 \text{ m}$) und der damit verbundenen Größe dieser Zonen, nach wie vor eindimensional mit Hilfe der Gleichungen aus Abschnitt 16.10.2 berechnet werden. Die Temperaturberechnung in der Zone 2 und 3 wurde bereits in Abschnitt 17.4 durchgeführt, weswegen die dort ermittelten Temperaturwerte für diese Zonen in der zweidimensionalen Berechnung übernommen wurden. Die berechneten Temperaturen der Zonen 2 und 3 und die zugehörigen kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{s,j}$ wurden im numerischen Modell verwendet. Dadurch musste die iterative Berechnung der Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum nicht erneut durchgeführt werden.

Für die Einfassung des Isolierglases wurde die exakte Geometrie des Holzrahmens, wie sie in Abbildung 10-2 links dargestellt ist, verwendet.

Für die Verschattung wurde eine horizontale Teilverschattung von 10 % der längeren Glasabmessung ($B/H = 2 \text{ m} / 1 \text{ m}$) verwendet, welche in Abbildung 17-2 links dargestellt ist. Zur Erzeugung des numerischen Modells wurde schließlich, sodass alle vier Temperaturzonen abgedeckt sind, ein vertikaler Schnitt durch die Verglasung gezogen, welcher in Abbildung 17-2 rechts dargestellt ist.

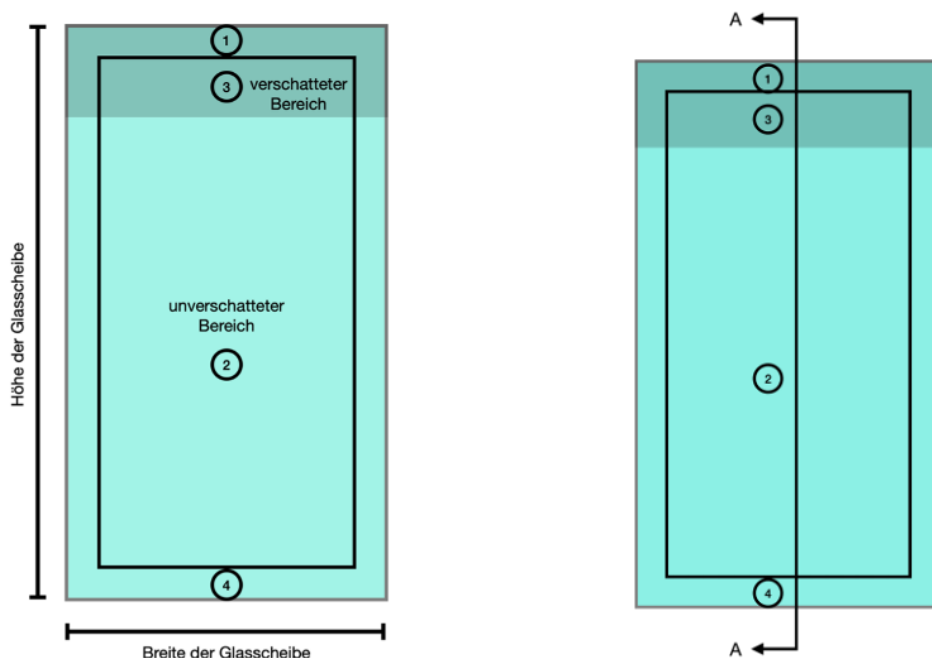


Abbildung 17-2: Darstellung der Teilverschattung (links) und Schnitfführung durch die Verglasung (rechts).

Das numerische Modell ergibt sich schließlich aus dem Schnitt A-A in Abbildung 17-2 rechts und ist in Abbildung 17-3 dargestellt, wobei die roten Linien die warmen Temperaturzonen 2 und 4 darstellen und die blauen Linien die kühleren Temperaturzonen 1 und 3 repräsentieren.

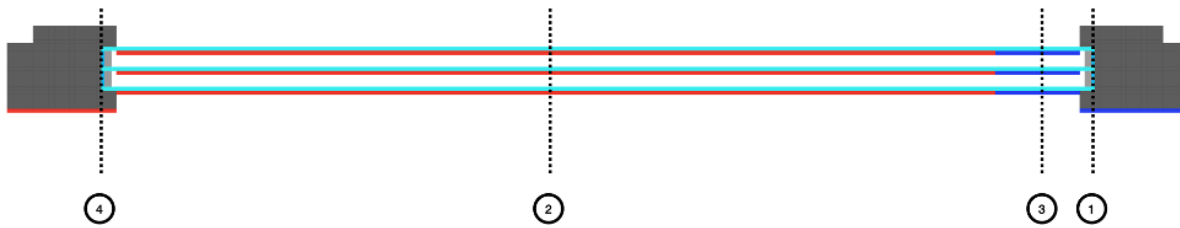


Abbildung 17-3: Darstellung des numerischen Modells im Schnitt A-A inkl. Zuordnung der Temperaturzonen.

Die Vernetzung des Rahmens, Abstandhalter, Polysulfid- und EPDM-Dichtung wurde mit 1 mm Elementgröße realisiert. Die einzelnen Glasscheiben wurden über die Dicke mit vier Elementen modelliert.

Die solare Einstrahlung wurde auf alle - in Fassadenorientierung hin ausgerichteten - Oberflächen (Rahmen und Glas) als Wärmestromdichte-Randbedingung (die roten und blauen Linien in Abbildung 17-3 verdeutlichen dies) aufgebracht. Dabei wurde die solare Einstrahlung vorher mit den jeweils zugehörigen Absorptionsgraden multipliziert (z. B. kalter Tag, Süd-West-Orientierung: $I_{\max.} = 927,7 \text{ W/m}^2$, absorbierte Wärmestromdichte auf der Außenscheibe $I_{\max.,1} = I_{\max.} \cdot \alpha_{e1} = 927,7 \text{ W/m}^2 \cdot 0,0741 \approx 68,7 \text{ W/m}^2$ usw.).

Auf allen äußeren Oberflächen/Linien (Rahmen und Pos. 1 des Dreifach-Isolierglases) wurde im numerischen Modell eine Konvektionsrandbedingung mit dem kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten von $10,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ aufgebracht (gemäß Abschnitt 16.7). Als Umgebungstemperatur für diese Randbedingung wurde jeweils T_{ext} . (abhängig von der betrachteten meteorologischen Situation) angesetzt.

Auf allen inneren Oberflächen/Linien (Rahmen und Pos. 6 des Dreifach-Isolierglases) wurde im numerischen Modell eine Konvektionsrandbedingung mit dem kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten von $7,7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ aufgebracht (gemäß Abschnitt 16.7). Als Umgebungstemperatur wurde für diese Randbedingung gemäß Abschnitt 16.7 die Temperatur T_{int} . mit 20 °C angesetzt.

Auf den Positionen 2 und 3 bzw. 4 und 5 - hierbei ist zwischen den Zonen 2 und 3 zu unterscheiden - wurden Konvektionsrandbedingungen aufgebracht (Vorgehensweise vgl. Abschnitt 10.3). Diesen Konvektionsrandbedingungen wurden als Umgebungstemperatur die jeweils berechneten Temperaturen der gegenüberliegenden Position zugeordnet (Ergebnisse aus eindimensionaler Temperaturberechnung in Abschnitt 17.4.2 und 17.4.3). Für die Konvektionsrandbedingungen wurde der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient $h_{s,2/3,j}$ ($2/3$ steht im Index dabei zur Unterscheidung zwischen Zone 2 und Zone 3) des jeweiligen j -ten Scheibenzwischenraums verwendet. Insgesamt wurden im hier vorliegenden Fall eines Dreifach-Isolierglases sechs Konvektionsrandbedingungen für die Wärmeübertragung im Scheibenzwischenraum benötigt.

An den linken und rechten Rändern (senkrecht zur betrachteten Fassadenausrichtung) des Rahmens wurde eine adiabate Randbedingung (d. h. kein Wärmestrom) angesetzt.

17.5.1 Ergebnisse der Temperaturen in Zone 1

Mit Hilfe des numerischen ANSYS-Modells wurden die Temperaturen in Zone 1 berechnet und ausgewertet, wie in Abschnitt 16.11.2 beschrieben. In Tabelle 17-18 und in Tabelle 17-19 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 17-18: Kalte Tage - Temperaturen in Zone 1.

Orientierung	Temperatur $T_{1,1}$ Außenscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,2}$ Mittelscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	10,8	14,0	16,9
Nord-Ost	7,4	12,1	16,0
Ost	5,8	11,2	15,6
Süd-Ost	-1,4	6,2	13,0
Süd	-3,5	4,7	12,2
Süd-West	0,5	7,5	13,6
West	9,5	13,7	16,9
Nord-West	10,3	14,0	17,0

Tabelle 17-19: Warme Tage - Temperaturen in Zone 1.

Orientierung	Temperatur $T_{1,1}$ Außenscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,2}$ Mittelscheibe [°C]	Temperatur $T_{1,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	33,5	29,3	25,0
Nord-Ost	28,1	26,0	23,3
Ost	31,1	28,2	24,5
Süd-Ost	24,6	23,8	22,2
Süd	25,1	24,2	22,4
Süd-West	21,6	21,8	21,2
West	33,8	30,0	25,5
Nord-West	34,3	30,2	25,5

17.5.2 Ergebnisse der Temperaturen in Zone 4

Mit Hilfe des numerischen ANSYS-Modells wurden die Temperaturen in Zone 4 berechnet und ausgewertet, wie in Abschnitt 16.11.2 beschrieben. In Tabelle 17-20 und in Tabelle 17-20 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 17-20: Kalte Tage - Temperaturen in Zone 4.

Orientierung	Temperatur $T_{4,1}$ Außenscheibe [°C]	Temperatur $T_{4,2}$ Mittelscheibe [°C]	Temperatur $T_{4,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	14,1	18,0	19,5
Nord-Ost	15,3	21,1	22,0
Ost	16,1	22,8	23,2
Süd-Ost	9,5	18,5	21,0
Süd	7,6	17,2	20,4
Süd-West	11,4	19,8	21,7
West	19,8	25,4	24,7
Nord-West	18,2	23,1	23,0

Tabelle 17-21: Warme Tage - Temperaturen in Zone 4.

Orientierung	Temperatur $T_{4,1}$ Außenscheibe [°C]	Temperatur $T_{4,2}$ Mittelscheibe [°C]	Temperatur $T_{4,3}$ Innenscheibe [°C]
Nord	36,7	33,2	27,5
Nord-Ost	35,9	35,4	29,6
Ost	40,9	39,7	32,4
Süd-Ost	35,0	36,0	30,5
Süd	35,6	36,5	30,8
Süd-West	32,4	34,4	29,7
West	43,5	41,4	33,3
Nord-West	42,0	39,4	31,8

17.5.3 Berechnung der thermisch induzierten Spannung

Die thermisch induzierten Spannungen in den einzelnen Gläsern wurden mit Hilfe der Vorgaben in Abschnitt 16.11.4 an einem zweidimensionalen numerischen Flächenmodell im Berechnungsprogramm RFEM ermittelt. In Abbildung 17-4, Abbildung 17-5 und Abbildung 17-6 ist die Modellbildung gegeben. Zwischen den sichtbaren Linien des Modells werden sogenannte Schalenelemente zur Abbildung des Glases verwendet. Die Vernetzung im Glaskantenbereich (Zone 1 und Zone 4) wurde mit 0,5 cm Elementkantenlänge definiert (siehe Abbildung 17-6).

In Z-Richtung

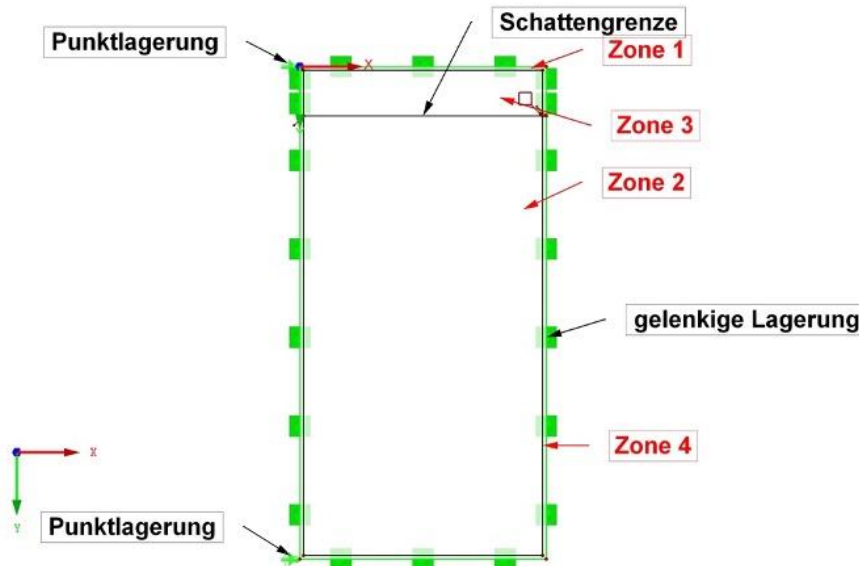
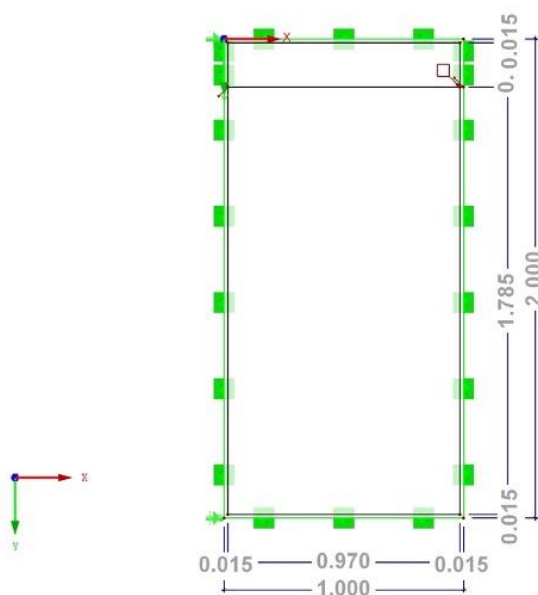


Abbildung 17-4: Darstellung des numerischen mechanischen Flächenmodells inkl. Zuordnung der Temperaturzonen in RFEM.



In Z-Richtung

Abbildung 17-5: Darstellung des numerischen mechanischen Flächenmodells mit Abmessungen in RFEM.

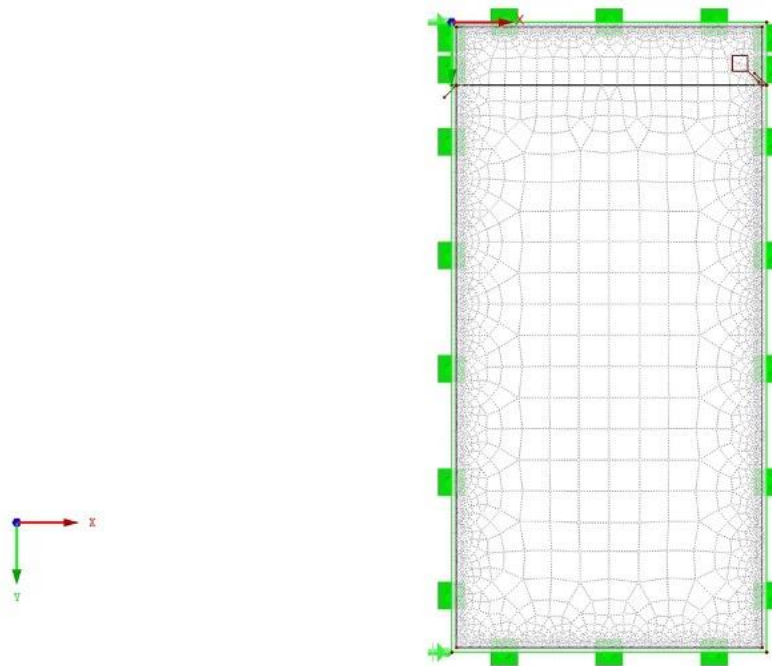


Abbildung 17-6: Darstellung des numerischen mechanischen Flächenmodells inkl. Vernetzung in RFEM.

In Abbildung 17-7 ist exemplarisch die Temperaturbeanspruchung des Glases für die Nord-Orientierung am kalten Tag dargestellt. Dabei wurden die Glastemperaturen wie folgt übertragen:

- $T_{1,2} = 14,0 \text{ °C}$, entnommen aus Tabelle 17-18
- $T_{2,2} = 25,5 \text{ °C}$, entnommen aus Tabelle 17-8
- $T_{3,2} = 14,8 \text{ °C}$, entnommen aus Tabelle 17-10 (Im Modell wurden $15,2 \text{ °C}$ angesetzt, da diese Temperatur exakt der im numerischen thermischen Modell entspricht und daher zweidimensional ermittelt wurde. Hier lässt sich erkennen, dass bei einer Schattenabmessung von 20 cm gerade noch eine geringe gegenseitige Beeinflussung der Temperaturzonen 2 und 3 gegeben ist.)
- $T_{4,2} = 18,0 \text{ °C}$, entnommen aus Tabelle 17-20

LF2 : NORD - Mittelscheibe - kalter Tag

In Z-Richtung

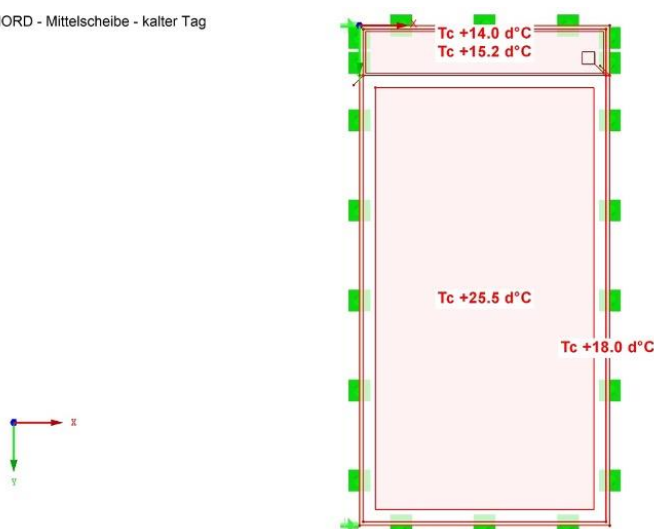


Abbildung 17-7: Darstellung des numerischen mechanischen Flächenmodells inkl. aufgebrachtener Temperaturbeanspruchung (zonenweise konstante Temperaturen) in RFEM.

In Abbildung 17-8 sind exemplarisch die thermisch induzierten Spannungen (zugehörige Temperaturverteilung in Abbildung 17-7) dargestellt.

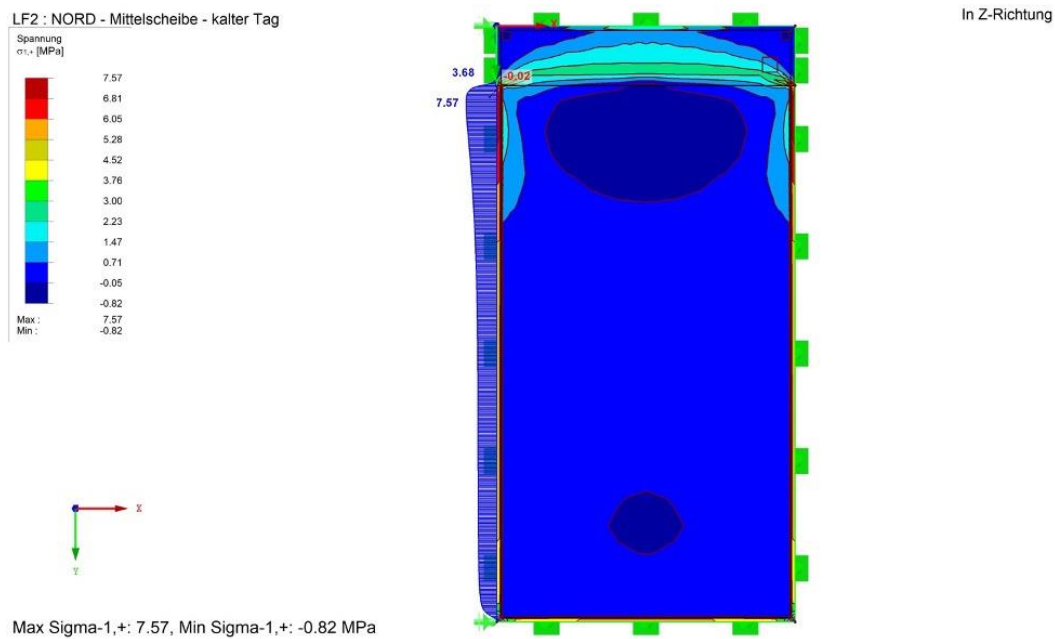


Abbildung 17-8: Darstellung des numerischen mechanischen Flächenmodells inkl. der thermisch induzierten Spannungsverteilung und Ergebnisdarstellung entlang einer Kante in RFEM.

Die eben beschriebene Vorgehensweise wurde für alle Orientierungen und beide (warmer und kalter) Tage sowie die Außen-, Mittel- und Innenscheibe verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17-22 und Tabelle 17-23 dargestellt.

Tabelle 17-22: Thermisch induzierte Spannungen für die kalten Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	1,0	7,6	2,8
Nord-Ost	2,4	16,1	4,9
Ost	3,1	20,0	6,0
Süd-Ost	3,4	20,7	7,2
Süd	3,5	20,9	7,6
Süd-West	3,4	20,9	7,0
West	3,1	20,2	5,5
Nord-West	2,4	16,3	4,4

Tabelle 17-23: Thermisch induzierte Spannungen für die warmen Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	2,8	7,1	1,1
Nord-Ost	3,3	16,5	2,5
Ost	4,2	19,5	3,2
Süd-Ost	3,7	20,9	3,8
Süd	3,7	20,9	3,7
Süd-West	3,3	21,3	4,3
West	4,6	19,5	3,3
Nord-West	4,1	16,1	2,6

17.6 Stationäre 3D Temperatur- und Spannungsberechnung

Für die in Abschnitt 17.2 beschriebene Isolierglaseinheit und die in Abschnitt 17.3.1 und 17.3.2 ermittelten meteorologischen Daten wurde in ANSYS ein dreidimensionales Volumenkörpermodell erzeugt, mit welchem in einem ersten Schritt die sich im Glas einstellenden Temperaturen ermittelt wurden. Anschließend wurden die Temperaturfelder (exakte Temperaturverteilung ohne zonenweise Auswertung, vgl. 16.11) direkt auf das mechanische Modell innerhalb in ANSYS übertragen und die thermisch induzierten Spannungen ohne Teilsicherheitsbeiwerte (siehe Abschnitt 17.1) berechnet. Das mechanische Modell stellte dabei einen Extrakt des thermischen Modells dar. Das mechanische Modell wurde in Abschnitt 10.6 bereits beschrieben.

Die Temperaturen der Zone 2 und 3 (vgl. Abbildung 16-1) konnten, basierend auf der Größe der Isolierglaseinheit ($B/H = 2 \text{ m} / 1 \text{ m}$) und damit der Größe der Zonen 2 und 3 nach wie vor eindimensional mit Hilfe der Gleichungen aus Gleichungen aus Abschnitt 16.10.2 berechnet werden (die Berechnung wurde bereits in Abschnitt 17.4 durchgeführt, weswegen die dort ermittelten Temperaturwerte für die Zonen 2 und 3 sowie die zugehörigen kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{s,2/3,j}$ übernommen werden konnten).

Für die Einfassung des Isolierglases wurde der thermisch äquivalente Holzrahmen, wie er in Abbildung 10-2 recht dargestellt ist, verwendet.

Für die Verschattung wurde eine horizontale Teilverschattung von 10 % der längeren Glasabmessung ($B/H = 2 \text{ m} / 1 \text{ m}$) verwendet, welche in Abbildung 17-2 links und im FE-Modell in Abbildung 17-9 dargestellt ist. Für das numerische dreidimensionale Modell wurde die Symmetrie ausgenutzt, was in Abbildung 17-9 isometrisch dargestellt ist. In Abbildung 17-10 ist eine vergrößerte Darstellung des Rahmenbereichs gegeben.

Geometrie
19.09.2022 16:39

- EPDM
- Glas
- Holz
- Polysulfid
- WE-AH

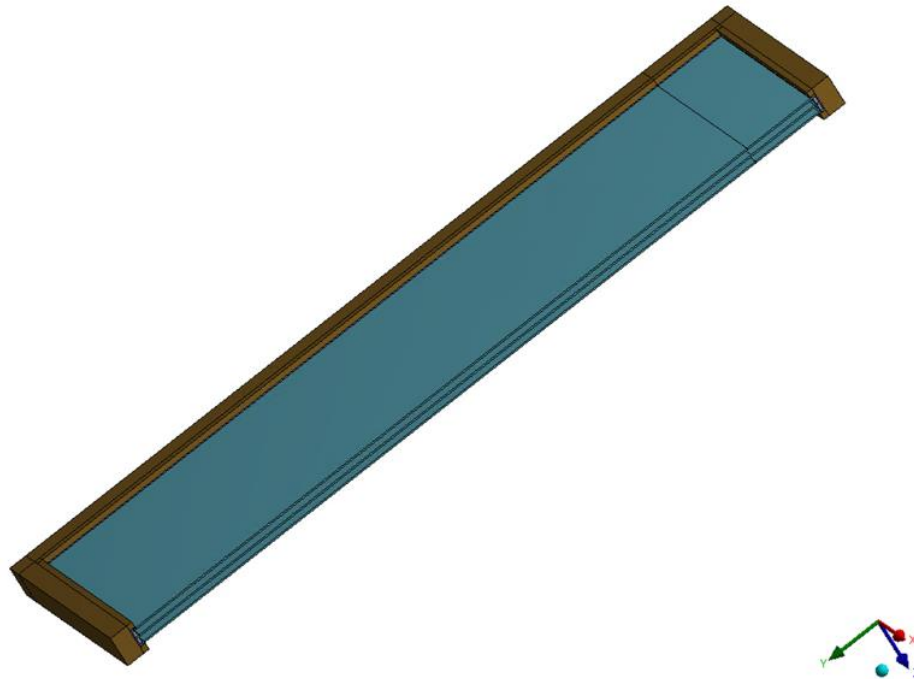


Abbildung 17-9: Isometrische Darstellung des dreidimensionalen Modells zur Temperaturberechnung inkl. ausgenutzter Symmetrie in ANSYS.

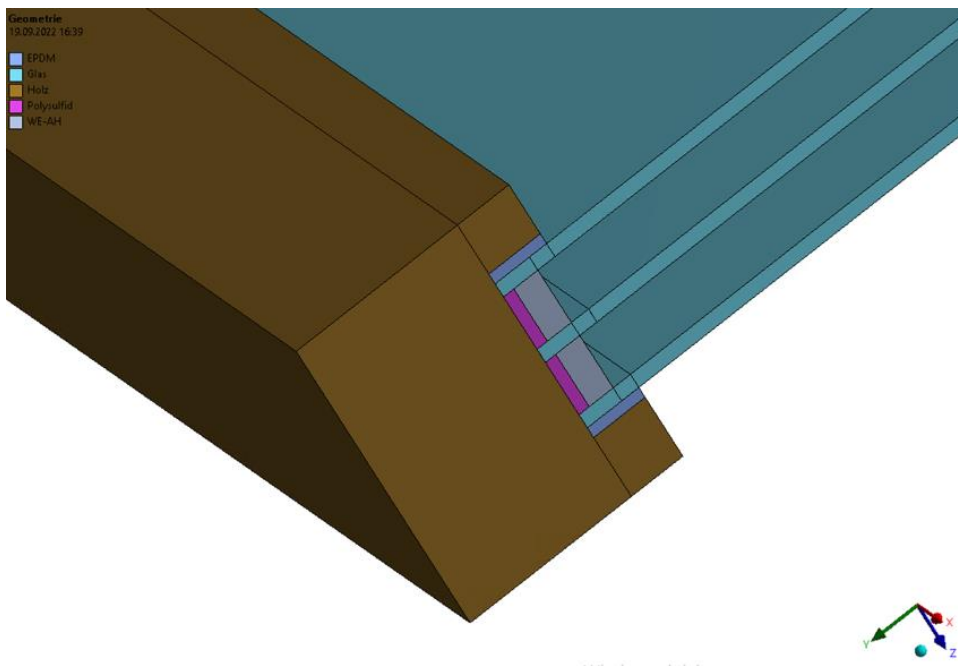


Abbildung 17-10: Isometrische Darstellung des dreidimensionalen Modells zur Temperaturberechnung im Rahmenbereich in ANSYS.

In Abbildung 17-11 und Abbildung 17-12 ist das vernetzte numerische Modell für die Temperaturberechnung dargestellt.

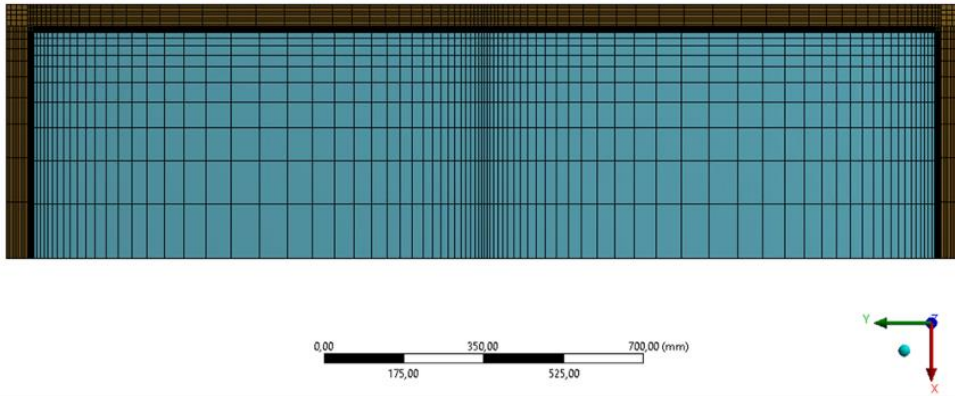


Abbildung 17-11: Darstellung des vernetzten dreidimensionalen Modells zur Temperaturberechnung in der Projektion in ANSYS.

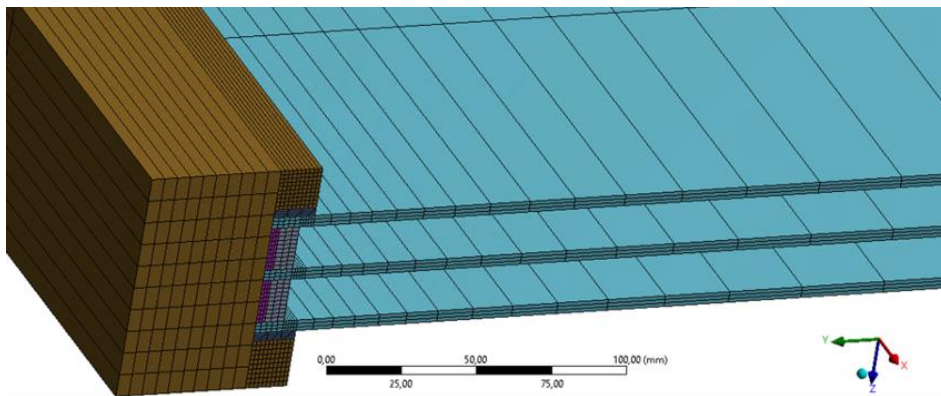


Abbildung 17-12: Darstellung des vernetzten dreidimensionalen Modells zur Temperaturberechnung in isometrischer Ansicht im Rahmenbereich in ANSYS.

In Abbildung 17-13 ist das vernetzte Modell für die Spannungsberechnung gegeben. Hierbei lässt sich erkennen, dass die Volumenkörper: Rahmen, Abstandhalter sowie das Polysulfid (Sekundärdichtung) und EPDM-Dichtung aus dem Modell ausgeschlossen werden. Die Vernetzung des numerischen Modells wird derart gesteuert, dass sich in allen Übergangsbereichen (z. B. Übergang von Zone 2 zu Zone 3 im Glas) die Vernetzung verdichtet.

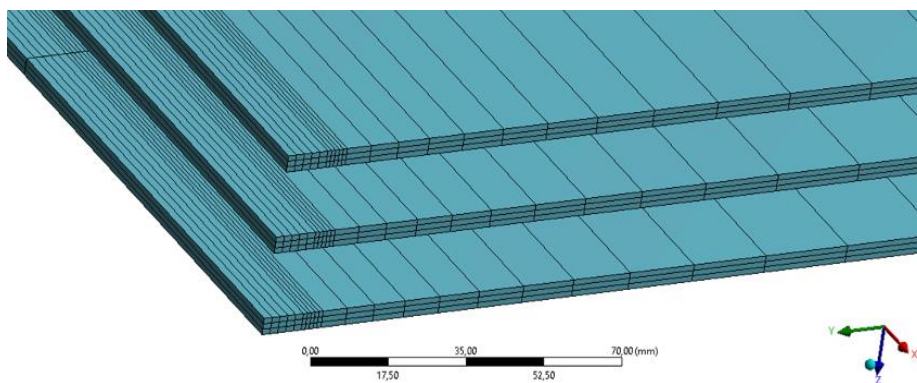


Abbildung 17-13: Darstellung des vernetzten dreidimensionalen Modells zur Spannungsberechnung in isometrischer Ansicht in ANSYS.

Die solare Einstrahlung und alle weiteren Randbedingungen (Konvektion und adiabate Randbedingungen) wurden analog zu Abschnitt 17.5 auf das Modell aufgebracht.

17.6.1 Berechnung der thermisch induzierten Spannung

Die thermisch induzierten Spannungen in den Einzelscheiben wurden mit Hilfe der Vorgaben in Abschnitt 16.12.4 an dem zuvor beschriebenen mechanischen Volumenkörpermodell in ANSYS ohne Teilsicherheitsbeiwerte (vgl. Abschnitt 17.1) ermittelt.

In Abbildung 17-14 ist exemplarisch die Temperaturverteilung/das Temperaturfeld der Mittelscheibe für die Nord-Orientierung am kalten Tag (vgl. auch Abschnitt 17.5.3 und Abbildung 17-7) dargestellt. Die Temperaturverteilung/das Temperaturfeld im Glas wurde im nächsten Berechnungsschritt direkt auf das mechanische Modell übertragen, ohne dass eine Auswertung über Temperaturzonen erfolgte.

In Abbildung 17-15 sind die aus dem Temperaturfeld (Abbildung 17-14) resultierenden thermisch induzierten Spannungen exemplarisch für die Nord-Orientierung dargestellt.

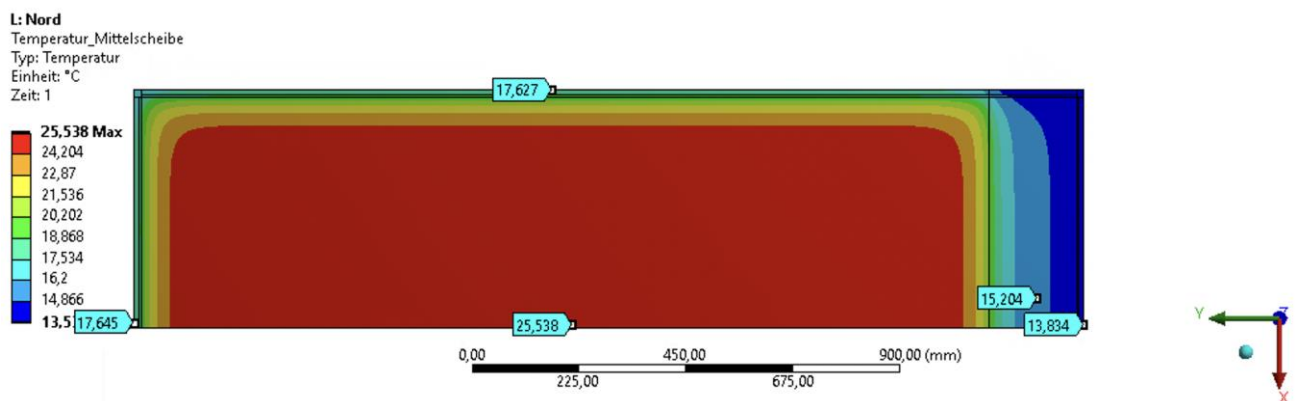


Abbildung 17-14: Temperaturverteilung/Temperaturfeld der Mittelscheibe für die Nord-Orientierung in ANSYS.

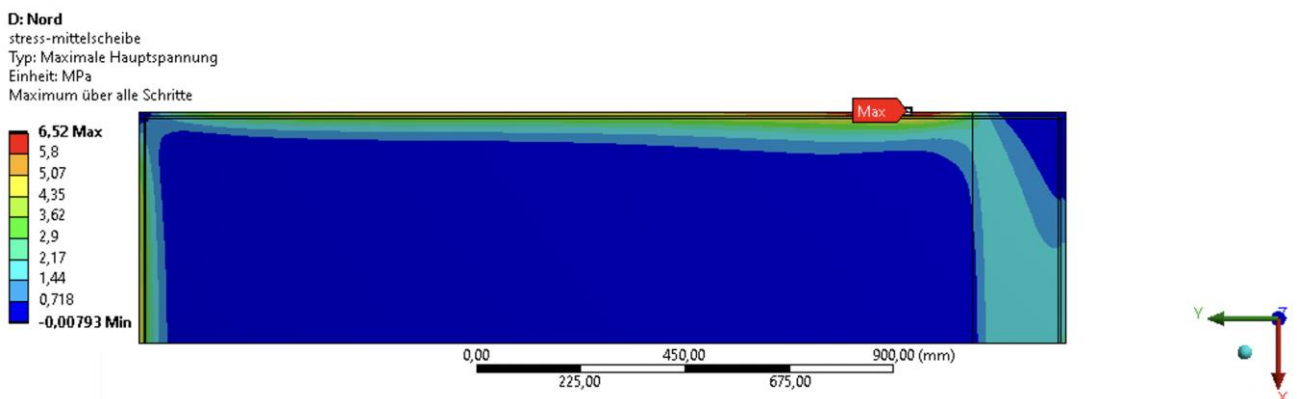


Abbildung 17-15: Thermisch induzierte Spannungen der Mittelscheibe resultierend aus Temperaturfeld in Abbildung 17-14 in ANSYS.

Die eben beschriebene Vorgehensweise wurde für alle Orientierungen und beide (warmer und kalter) Tage sowie die Außen-, Mittel- und Innenscheibe durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17-24 und Tabelle 17-25 dargestellt, wobei in ANSYS die maximale Glaskantenspannung (vgl. exemplarisch den mit „Max“ gekennzeichneten Höchstwert der Spannungen in Abbildung 17-15) ausgewertet wurde.

Tabelle 17-24: Thermisch induzierte Spannungen für die kalten Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	0,3	6,5	2,7
Nord-Ost	0,5	13,8	4,7
Ost	0,6	17,2	5,8
Süd-Ost	0,9	17,9	7,1
Süd	0,9	18,1	7,5
Süd-West	0,8	18,0	6,8
West	1,0	17,3	5,3
Nord-West	0,5	14,0	4,3

Tabelle 17-25: Thermisch induzierte Spannungen für die warmen Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	1,3	6,1	0,2
Nord-Ost	2,8	14,1	2,0
Ost	3,6	16,8	2,4
Süd-Ost	2,8	17,8	3,5
Süd	2,9	18,0	3,5
Süd-West	2,5	18,3	4,0
West	4,0	16,8	2,1
Nord-West	3,7	13,8	1,1

17.7 Transiente 3D Temperatur- und Spannungsberechnung

Für die in Abschnitt 17.2 beschriebene Isolierglaseinheit und die in Abschnitt 17.3.3 ermittelten meteorologischen Daten wurde das zuvor in Abschnitt 17.6 beschriebene FE-Modell in ANSYS von stationär auf transient umgestellt. Die Zeitschrittweite wurde gemäß Abschnitt 11.1.4 zu 10 Minuten gewählt. Anschließend wurden die thermisch induzierten Spannungen mit Hilfe des mechanischen Modells berechnet.

Im ersten Schritt erfolgte mit Hilfe einer stationären Berechnung die Ermittlung der initialen Temperaturverteilung vor Sonnenaufgang (vgl. Abschnitt 10.4). Im nächsten Schritt wurde die stationär ermittelte Temperaturverteilung auf das transiente Modell als Starttemperaturverteilung übertragen. Anschließend wurden mit Hilfe der zeitlich veränderlichen meteorologischen Daten die über den Tag variierenden Temperaturfelder der Einzelscheiben berechnet (vgl. Abschnitt 10.5). Im nächsten Schritt wurden die zeitlich veränderlichen Temperaturfelder (exakte Temperaturverteilung ohne zonenweise Auswertung, vgl. Abschnitt 10.6 und Abschnitt 16.12) direkt auf das mechanische Modell übertragen und die thermisch induzierten Spannungen ohne Teilsicherheitsbeiwerte (siehe Abschnitt 17.1) berechnet. In Abbildung 10-1 wurde der Berechnungsablauf bereits dargestellt.

Die Temperaturen in den Zonen 2 und 3 wurden zunächst eindimensional mit Hilfe der Gleichungen aus Abschnitt 16.10.2 (stationär für Ausgangszustand) und Abschnitt 16.10.3 (transient) ermittelt. Das Aufbringen der Randbedingungen erfolgte wie zuvor in den Abschnitten 17.5 und 17.6 beschrieben.

17.7.1 Berechnung der thermisch induzierten Spannung

Die thermisch induzierten Spannungen in den einzelnen Gläsern wurden wie in Abschnitt 16.12.4 beschrieben ermittelt, wobei hier die Auswertung der maximalen Spannung zusätzlich über die Zeit durchgeführt wurde. In Tabelle 17-26, Tabelle 17-27, Tabelle 17-28 und Tabelle 17-29 sind die maximalen Spannungen dokumentiert.

Tabelle 17-26: Thermisch induzierte Spannungen für die kalten Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	1,7	6,7	2,3
Nord-Ost	2,3	14,7	4,6
Ost	2,0	16,4	6,2
Süd-Ost	1,7	18,5	7,6
Süd	1,9	19,2	7,6
Süd-West	2,7	19,0	6,4
West	4,0	17,7	4,7
Nord-West	2,7	14,6	4,2

Tabelle 17-27: Thermisch induzierte Spannungen für die warmen Tage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	3,0	5,8	1,5
Nord-Ost	1,8	14,1	4,4
Ost	2,4	17,2	4,8
Süd-Ost	2,2	17,8	5,7
Süd	3,3	18,7	5,4
Süd-West	3,5	19,1	5,4
West	5,0	17,3	2,9
Nord-West	4,5	13,9	1,7

Tabelle 17-28: Thermisch induzierte Spannungen für die kalten Übergangstage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	1,8	6,9	2,3
Nord-Ost	0,9	12,7	5,3
Ost	1,6	17,4	6,5
Süd-Ost	1,3	18,6	7,7
Süd	1,8	19,2	7,5
Süd-West	2,7	19,1	6,2
West	3,9	18,1	4,5
Nord-West	3,4	13,9	3,0

Tabelle 17-29: Thermisch induzierte Spannungen für die warmen Übergangstage.

Orientierung	$\sigma_{T,1}$ Außenscheibe [MPa]	$\sigma_{T,2}$ Mittelscheibe [MPa]	$\sigma_{T,3}$ Innenscheibe [MPa]
Nord	3,0	6,7	1,2
Nord-Ost	1,7	13,0	4,5
Ost	2,7	17,1	5,0
Süd-Ost	2,3	17,9	5,8
Süd	3,2	18,7	5,5
Süd-West	3,4	19,1	5,5
West	5,0	17,3	3,1
Nord-West	5,3	14,8	2,6

17.8 Vergleich der Berechnungsverfahren

Abschließend werden die ermittelten thermisch induzierten Spannungen, welche mit den stationären 1D, 2D und 3D sowie dem transienten 3D Berechnungsverfahren ermittelt wurden, verglichen.

17.8.1 Kalte Tage und kalte Übergangstage (stationär und transient)

In Abbildung 17-16, Abbildung 17-17 und Abbildung 17-18 sind die Ergebnisse der stationären und transienten Berechnung der thermisch induzierten Spannungen im Glas für die ein-, zwei- und dreidimensionalen Verfahren für den kalten Tag (stationär und transient) und den kalten Übergangstag (nur transient) gegenübergestellt.

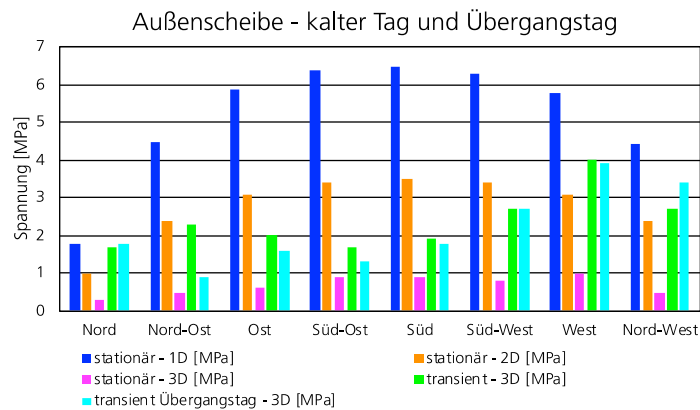


Abbildung 17-16: Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den kalten Tag (stationär und transient) und den kalten Übergangstag (nur transient) für die Außenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

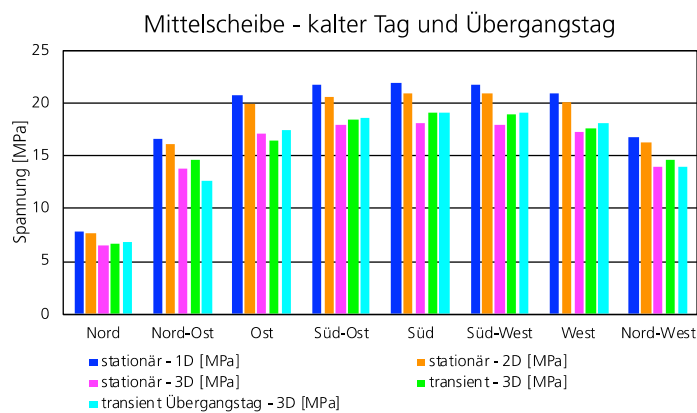


Abbildung 17-17: Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den kalten Tag (stationär und transient) und den kalten Übergangstag (nur transient) für die Mittelscheibe des Dreifach-Isolierglases.

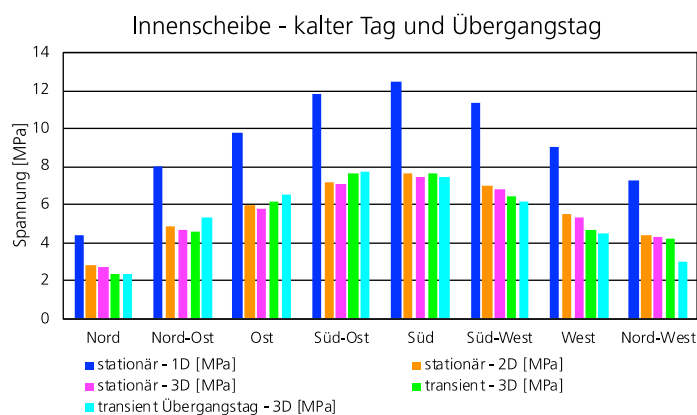


Abbildung 17-18: Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den kalten Tag (stationär und transient) und den kalten Übergangstag (nur transient) für die Innenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

17.8.2 Warme Tage und warme Übergangstage (stationär und transient)

In Abbildung 17-19, Abbildung 17-20 und Abbildung 17-21 sind die Ergebnisse der stationären und transienten Berechnung der thermisch induzierten Spannungen im Glas für die ein-, zwei- und dreidimensionalen Verfahren für den warmen Tag (stationär und transient) und den warmen Übergangstag (nur transient) gegenübergestellt.

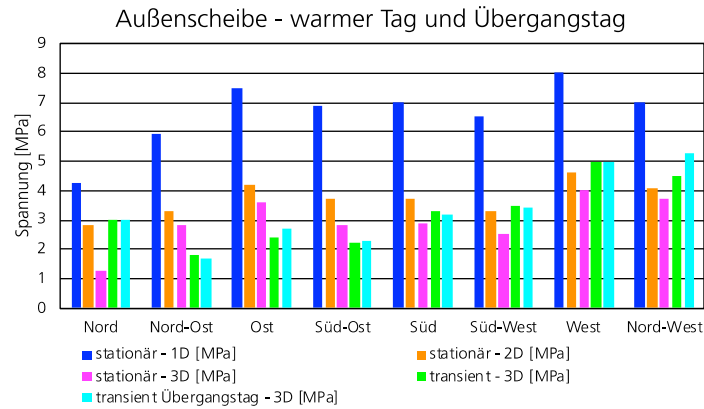


Abbildung 17-19: Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den warmen Tag (stationär und transient) und den warmen Übergangstag (nur transient) für die Außenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

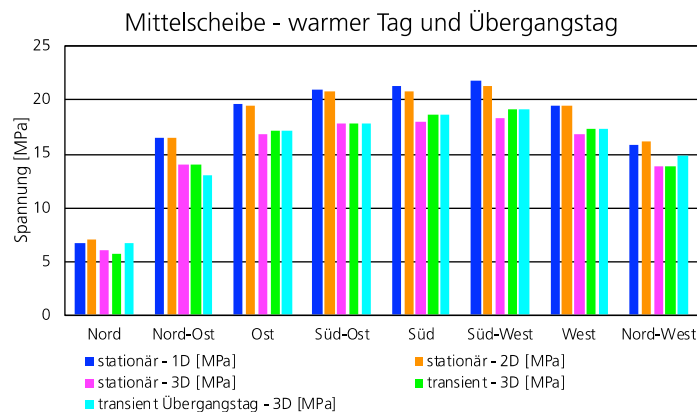


Abbildung 17-20: Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den warmen Tag (stationär und transient) und den warmen Übergangstag (nur transient) für die Mittelscheibe des Dreifach-Isolierglases.

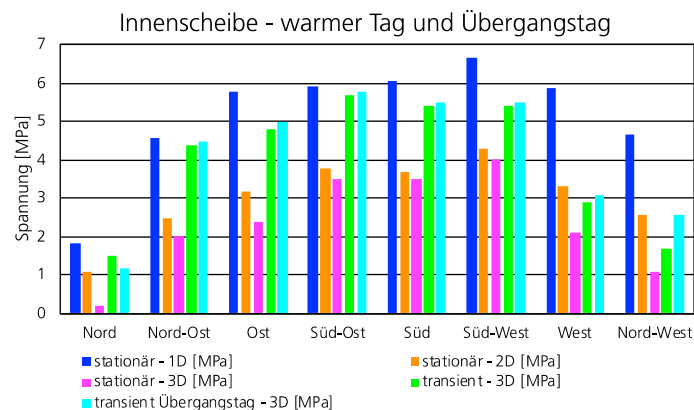


Abbildung 17-21: Vergleich der thermisch induzierten Spannungen für den warmen Tag (stationär und transient) und den warmen Übergangstag (nur transient) für die Innenscheibe des Dreifach-Isolierglases.

17.8.3 Zusammenfassung

Die Berechnungsergebnisse in den Abschnitten 17.8.1 und 17.8.2 zeigen, dass die Anwendung der eindimensionalen stationären Temperatur- und Spannungsberechnung aus Abschnitt 16.10 für alle Fassadenorientierungen und meteorologischen Situationen zu höheren Spannungen führt. Bei der Mittelscheibe (vgl. Abbildung 17-17 und Abbildung 17-20) ergeben sich nur geringfügig höhere Spannungen infolge der eindimensionalen Berechnung.

Um die Spannungen, ermittelt mit den Berechnungsverfahren, hinsichtlich ihrer räumlichen Dimensionalität vergleichen zu können, dürfen in der Abbildung 17-16 bis Abbildung 17-21 nur die stationären Berechnungen (Farben: blau, orange und pink) betrachtet werden. Es zeigt sich hier, dass wenn die räumliche Dimensionalität steigt, die resultierenden thermisch induzierten Spannungen sinken, was sich dadurch begründen lässt, dass die Temperaturverteilung im Glas genauer abgebildet - 1D: Dehnstab mit Temperatur (siehe Abschnitt 14.3), 2D: Scheibe mit abschnittsweise konstanten Temperaturen (siehe Abschnitt 14.4), 3D: exakte Erfassung der Temperaturverteilung (siehe Abschnitt 14.5) - wird.

Der Vergleich zwischen der stationären und transienten Berechnung kann nur für das dreidimensionale Berechnungsverfahren (Farben: pink und grün) durchgeführt werden, da nur hierfür die transienten Berechnungen erfolgten. Es zeigt sich beim Vergleich dieser Ergebnisse, dass das stationäre dreidimensionale Berechnungsverfahren nicht immer die höheren Ergebnisse liefert (in 24 % aller betrachteten Daten liefert die stationäre Berechnung die größeren Spannungen, während in 76 % der betrachteten Daten die transiente Berechnung die größeren Spannungen liefert).

Der Vergleich zwischen den stationär und transient ermittelten Berechnungsergebnissen (Farben: pink und grün) ist jedoch problematisch, da zum Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Spannungen in der transienten Berechnung andere Außenlufttemperaturen gelten als in der stationären Berechnung. Der Grund hierfür liegt in der Annahme eines sinusförmigen Tagestemperaturverlaufs (siehe Abschnitt 16.7.5) in den transienten Berechnungen. Bzgl. des Temperaturverlaufs wird hier unterstellt, dass die minimale Tagestemperatur um 5 Uhr morgens und die maximale Tagestemperatur nachmittags um 17 Uhr erreicht wird. Hieraus resultiert schließlich, dass zum Zeitpunkt der maximalen solaren Einstrahlungsintensität nicht zwangsläufig die ehemals zugehörige Außenlufttemperatur zugeordnet wird.

Die Vorteile der stationären Berechnung liegen darin, dass der Berechnungsaufwand im Falle einer eindimensionalen Berechnung sehr gering ist. Der Aufwand steigt entsprechend über die räumliche Dimension hin an. Im Vergleich zur transienten Berechnung können mit geringem Aufwand verschiedene Parameter (z. B. Anordnung von Wärmeschutzschichten) variiert, beurteilt und die zu untersuchende Verglasung ggf. angepasst werden. Die stationär ermittelten Ergebnisse sind im Vergleich zur transienten Berechnung ausreichend genau, wie die Ergebnisse aus Abschnitt 11.1.2 gezeigt haben.

Sind genauere Ergebnisse erforderlich, so ist es vorteilhaft auf eine zweidimensionale Berechnung, welche üblicherweise softwaregestützt erfolgt, durchzuführen. Hierbei können die Geometrie sowie die Materialien des Rahmens und des Randverbundes und damit einhergehend die Wärmeleitung im Glaskantenbereich sehr gut abgebildet werden. Gleichzeitig ist ein höherer Rechenaufwand einzukalkulieren.

18 Vorschlag für einen Normentwurf für BIPV-Module (EN 50583 / IEC 62093)

18.1 Anwendungsbereich

Der vorliegende Normentwurf stellt drei alternative Verfahren vor, wie die für eine CE-Kennzeichnung erforderlichen Werte einer „Declaration of Performance“ (Leistungserklärung) ermittelt werden können. Diese Verfahren sollen bei Genehmigung durch das als CENELEC TC 82 Normengremium als Annex in EN 50583-1 „Photovoltaics in buildings -modules“ [18] Eingang finden.

Da [18] in Englisch formuliert wurde, ist der nachstehende Vorschlag ebenfalls in Englisch ausgearbeitet.

18.2 Normentext

Anmerkung: Der nachfolgende Text ist in seiner Gesamtheit ein Zitat des zur Normung eingereichten Textvorschlages. Die Nummerierung und Struktur des Textes orientierten sich daher nicht an der Nummerierung und Struktur dieses Gesamtberichts.

Die in dem zitierten Text enthaltene Referenz auf einen „Annex ABC“ bezieht sich auf einen weiteren Annex im Standard EN 50583 und nicht auf diesen Gesamtbericht.

Beginn des zitierten Textvorschlages zur Normung (kursive Darstellung):

“Partial shading endurance test (pset)”

Purpose

Photovoltaic modules (PV-modules) that are intended for the integration into buildings – conventionally referred to as “Building integrated Photovoltaic modules” (BIPV-modules) often are much more likely to be shaded than in standard Photovoltaic applications.

The risk of shading induced glass breakage is not sufficiently covered by the hot spot test IEC 61215-2 - MQT 09) which is why the following partial shading endurance test is intended to be included in the test scenario für BIPV modules.

Shading effect

Inhomogeneous irradiation in the solar active area – conventional referred to as shading or partial shading – of PV-modules result in local differences in expansion of the glass compound. The shaded – thus cooler areas – expand less than the hotter area facing high irradiance. The different elongation induced by the temperature difference causes a local tensile stress that might result in glass breakage. The reason for glass breakage is therefore not the magnitude the temperature itself but the local temperature difference dT/dx caused by the inhomogeneous irradiance.

Procedure

The declaration of performance (dop) can be carried out in the following three different ways

- by declaration (I.)*
- by calculation (II.)*
- by testing (III.)*

I. “DOP by declaration concerning pset”

The manufacturer of the BIPV-modules declares that each of the glass sheets utilized in the BIPV-module are exclusively made from either

EN 12150-2: Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate safety glass or

*EN 14179-1: Glass in building - Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass
or*

EN 1863-2: *Glass in building - Heat strengthened soda lime silicate glass*”.

The respective glass panes are required to carry a signature as defined in product standards stated above identifying and outlining their glass type.

The manufacturer furthermore declares that during the manufacturing process of the BIPV-modules no temperature above 250 °C has been reached which could possibly result in a reduction of the characteristic bending strength.

Note to entry: an exemplary declaration of conformity can be found in the annex ABC.

II. “Declaration of Performance for partial shading endurance by simplified thermomechanical calculation”

The DOP-pse by simplified thermomechanical calculation describes the photovoltaic module as a 2D plate which has material properties of glass but locally different absorption coefficients to account for the absorption of the solar cells. The 2D plate is described by three areas (see. figure 1) in which

area 1 represents the area of the PV module that is covered by a shadow

The shaded area shall be divided into 2 triangular areas with the corner points in
the center-point of the glass edge on the long side

the center-point of the glass edge on the short side

the corner point of the glass

The two shaded triangular areas shall meet at the center-point of the glass edge on the short side as illustrated in figure 1.

area 2 represents the area of the module not covered by solar cells

area 3 represents the area of the module covered by solar cells

The model must be created with suitable FEM software. Ideally, this software can couple a thermal with a mechanical model. Alternatively, the temperature distribution can first be determined in a thermal simulation and then transferred to a mechanical simulation. It is important that the temperature gradients are transferred properly so that no temperature steps with infinite temperature gradients occur which would lead to excessive stress exaggeration.

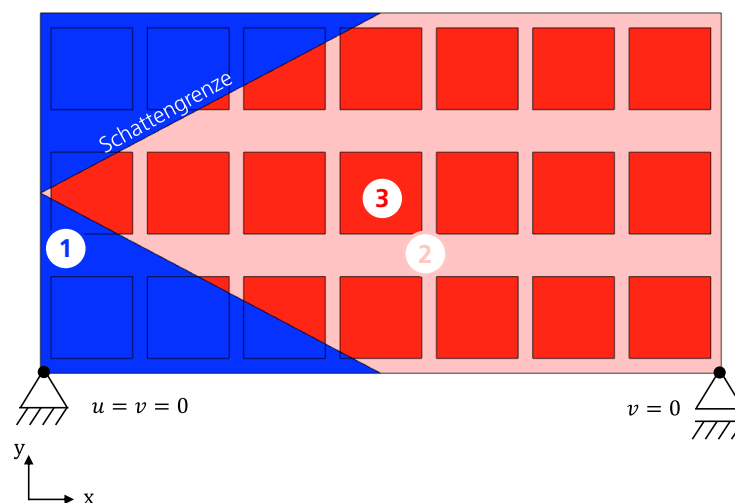


Figure 1: Geometry to be mapped with the three absorption zones in the thermal model and the boundary conditions in the mechanical model.

In the following, the needed steps to setup the FEM model are given:

1. Model description
 - a. Geometry
the PV module is described as plate with the edge lengths of the BIPV module. The total thickness of the BIPV module should be used as the thickness of the plate.
The shadow geometry and the solar cells must be mapped as separate areas.
 - b. Mesh
the suitability of the mesh must be checked by means of a mesh sensitivity study.
 - c. Thermal boundary conditions
Ambient temperature is kept constant at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Combined effective heat transfer coefficients are used:
 glass-surface: $10.5\text{ Watt}/(\text{m}^2\text{K})$
 glass-edges: $4\text{ Watt}/(\text{m}^2\text{K})$
 - d. Boundary conditions for irradiance
 Area 1: no irradiance
 Area 2: $1000\text{ Watt}/\text{m}^2$ irradiance
 Area 3: $1000\text{ Watt}/\text{m}^2$ irradiance
 - e. Boundary conditions for absorption
 Area 2: 5 % absorption
 Area 3: 95 % absorption
 - f. Mechanical condition
A planar stress approach should be used.
The displacement in both spatial directions is suppressed for one vertex. The neighboring vertex along the long edge is suppressed from moving towards the short edge, see Figure 1.
2. Documentation of results

The determined values of the maximum temperature and the first principal stress and in addition, the values at the shadow boundaries should be stated in the documentation.

III. DOP by testing

Purpose

...

Apparatus

The apparatus used for carrying out the partial shading endurance test consists of the following five major components:

- climatic chamber (1)
- light source(s) (2)
- shading source (3)
- mounting device(s) (4)
- measuring equipment (5)

Image 2 and 3 show the principle arrangement of these components in top and plan view.

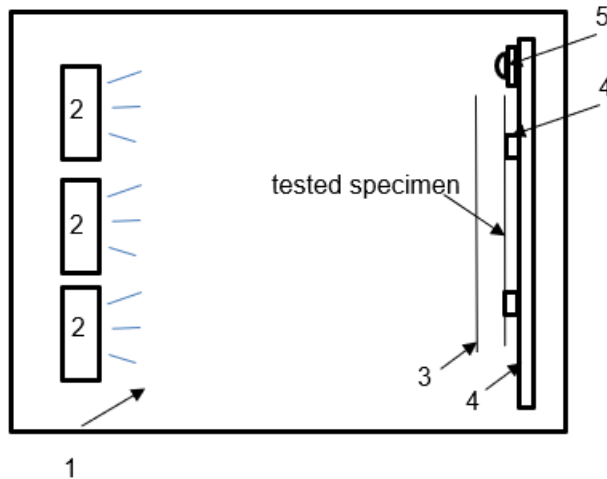


Image 2: top view of the principle arrangement of climatic chamber, light and shading source, mounting structure, measuring equipment and test specimen.

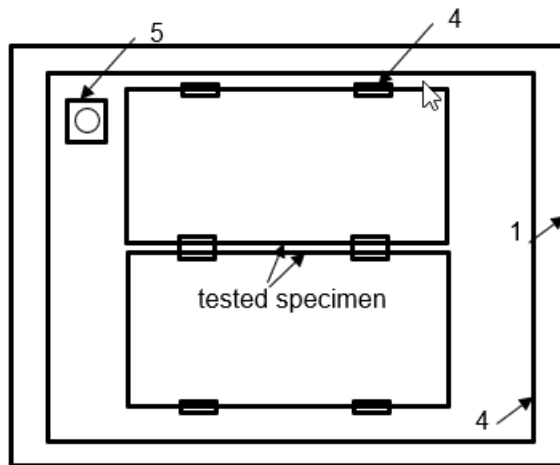


Image 3: plan view of the principle arrangement of climatic chamber, mounting device(s), measuring equipment and test specimen.

The climatic chamber

The climatic chamber shall be equipped so it can provide

- a continuous ambient temperature of -20 to $+45^{\circ}\text{C}$
- a continuous air flow in front of the test specimen that results in a heat transfer of $\alpha = 12 \text{ W/m}^2\text{K}$
- a continuous air flow in the rear of the test specimen that results in a heat transfer of $\alpha = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$

The light source

The light source shall provide a steady state irradiance of 1000 W/m^2 in the plane of the modules to be tested. The deviation in homogeneity of the irradiance shall be less than 10 %. The light spectrum shall be conformed to AM 1,5 (IEC 904)

The shading source

The shading source shall be made of mat stainless steel.

The mounting device

The mounting device shall be made from materials – e.g., wood, stone, metal - that can withstand the high irradiance without deformation. The mounting device is required to bear the weight of the two specimens.

It furthermore is required to serve as support structure for the mounting clamps, rigs or bars that are used to mount the pv modules onto support structures.

The measuring equipment

The measuring equipment shall consist of:

- irradiance sensor mounted in the plane of tested pv modules
- a minimum of six temperature sensors to be installed on the rear of the tested pv modules
- a minimum two temperature sensors to verify continuous ambient temperature in the chamber
- two wind sensors to be installed in front and the rear at the bottom of tested pv modules

Initial inspection

The two specimens shall be inspected visually from their front and their rear for damages of the glass surface and the glass edge. Defects that are determined shall be documented by photograph and their location shall be noted. The observations found shall be compared to the module specification provided by the manufacturer. Only module that show defects within the module specification shall be tested.

Procedure

1. The two specimens to be tested are on their rear surface equipped with six sensors for temperature measurement. The location of the sensors is as indicated in the image 4:
 - in the center of the pv module
 - in the middle of the triangular shaped shaded areas (top area for the upper pv-module and bottom area for the lower pv-module)
 - in the plane where the two shading areas meet, cm from the glass edge.
2. Two test specimens are mounted on top of each other onto the mounting devices of the test chamber following the mounting instructions of the manufacturer.
3. The two test specimens are electrically not connected thus they are operated in Open circuit conditions.
4. The shading sources are installed such they cause a double-diagonal-shadow on each of the pv-modules (see image 4) to be tested. The corners of the shaded areas are defined by the glass corner, the middle of the longer glass edge and the middle of the shorter glass. The size of each triangular shadow is then 1/8th of the pv-module size.

The resulting angle of the double-diagonal-shadow on the shorter glass edge therefor depends on the length to width ration of the tested pv-module.

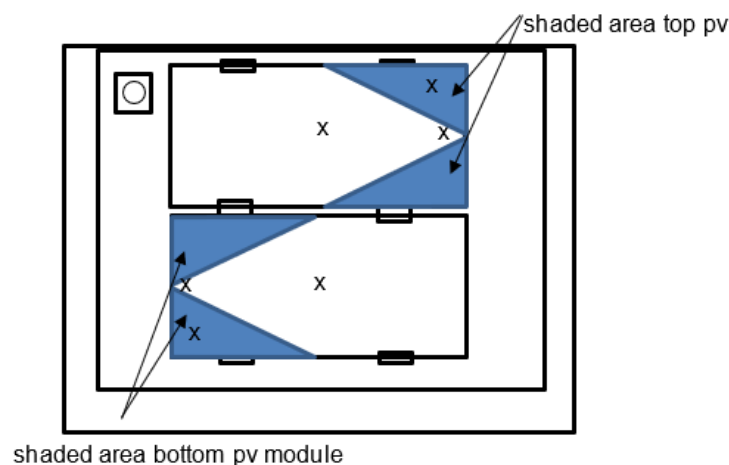


Image 4: plan view of the principle arrangement of climatic chamber, mounting device(s), measuring equipment and test specimen.

-
5. *The climatic chamber is cooled down to -15 C until the temperature of the pv-modules reach -15 ± 0,5 C – measured in the centre of the glass.*
 6. *The light source is turned on. The duration of the light exposition is determined by the temperature measured in the middle of the upper glass unit. The holding time will start when the change of temperature is smaller than 1K within a period of 5 minutes.*
 7. *The illumination duration is terminated by shutting of the light source 30 minutes after the holding temperature is reached.*
 8. *The test procedure is finished after the tested specimen reach their initial temperature ± 1,0 C*

Final inspection

The two specimens shall be inspected visually from their front and their rear for damages of the glass surface and the glass edge. Defects that are determined shall be documented by photograph and their location shall be noted. The observations found shall be compared to the defect determined in the initial inspection.

Requirements

Pass criteria: None of the tested specimen shall show either a glass breakage or an increase of the initially found defects.

Documentation

The documentation of this test procedure shall contain the following.

- *Name of the institute that carries out the test.*
- *Name of the person that carries out the test.*
- *Module type*
- *Date and time the modules where tested*
- *serial numbers of the modules tested*
- *temperature profiles obtained during the testing sequence.*
- *images and location of the defects determined during initial inspection (if found)*
- *images and location of the defects determined during final inspection (if found)*

Ende des zitierten Textvorschlages zur Normung.

19 Berechnungen für ein beispielhaftes BIPV-Modul

Das entwickelte Berechnungsverfahren (siehe Abschnitt 15) wurde beispielhaft auf eine Süd-Ost Fassade am Standort des ISM+D der TU Darmstadt angewandt und mit dem in Abschnitt 12.2 beschriebenen 3D-FEM-Modell abgeglichen. Dabei wird eine Kombination aus teilbelegtem PV-Modul (Abschnitt 13.4) mit einem Doppeldiagonalschatten (Abschnitt 13.7) gewählt. Das Einstrahlungs-Außenlufttemperaturpaar für einen kalten Tag wurde dabei per Interpolation aus den meteorologischen Daten im Anhang A5.4 ermittelt und beträgt $927,6 \text{ W/m}^2$ Einstrahlung bei $-9,7 \text{ °C}$ Außenlufttemperatur.

Abbildung 19-1 stellt vergleichend die transienten Simulationsergebnisse für die Temperatur und die daraus resultierenden mechanischen Spannungen einer 2D Simulation und einer 3D Simulation dar. Da in der 2D Simulation die Wärme homogen im hochabsorbierenden Glaskörper selbst erzeugt wird, anstatt von den Solarzellen zum Glas geleitet zu werden, existiert innerhalb des Glaskörpers kein Temperaturgefälle zwischen absorbierender Solarzelle und der Glasoberfläche. Diese weist damit ein höheres Temperaturniveau gegenüber der 3D Simulation auf. Insbesondere die Maximaltemperatur ist mit $46,5 \text{ °C}$ um $5,1 \text{ K}$ höher. Die qualitative Verteilung stimmt sehr gut überein. Auch bei der Spannung stimmt die qualitative Verteilung sehr gut überein und das höhere Temperaturniveau führt zu höheren mechanischen Spannungen. Das 2D FE-Modell hat mit $34,7 \text{ MPa}$ eine $5,5 \text{ MPa}$ höhere Spannung als das 3D FE-Modell. Somit bietet das vereinfachte 2D FE-Modell die Möglichkeit, thermisch induzierte mechanische Spannungen in Glas-Glas-Modulen schnell ($<1 \text{ min}$ anstatt $\sim 2 \text{ h}$) und für die hier betrachteten Fällen auf der sicheren Seite abzuschätzen.

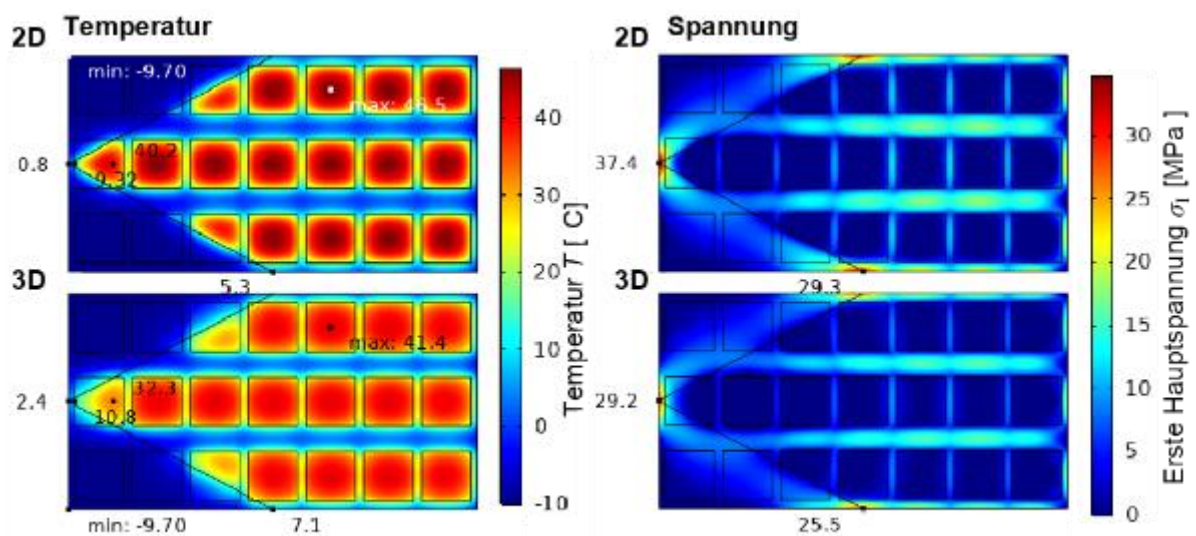


Abbildung 19-1: Vergleich des vereinfachten 2D FE-Modells (oben) mit dem 3D FE-Modell (unten). Jeweils für Temperatur (links) und mechanische Spannung (rechts). Die Werte an charakteristischen Stellen sind markiert.

20 Optionale Verwertung der Projektergebnisse in einer Berechnungssoftware

20.1 Aktuelle Situation

Im Folgenden werden anhand dem Projektkonsortium von der Fa. Sommer Informatik GmbH präsentierten Folien (Foliengliederung Teil A) erläutert, welche derzeitige Softwarelösungen kommerziell verfügbar sind und wie der Berechnungsablauf aussehen könnte, temperaturabhängige Berechnungen für Glasoberflächen in Mehrscheiben-Isoliergläsern durchzuführen.

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Straße 5 • 63026 Rosenheim




Teil A

Temperaturabhängige Berechnung des SZR mit WinIso® bzw. WinIso2D

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 3

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Straße 5 • 63026 Rosenheim



Gliederung

Teil A – Temperaturabhängige Berechnung des SZR mit WinIso® bzw. WinIso2D

1. Aktueller Stand
2. Berechnung mit aktueller Version
3. Implementierung der temperaturabhängigen Berechnung

Teil B – Konzept Berechnungsverfahren Thermobruch

1. Erfassung der Eingabeparameter
2. Ermittlung Absorptionsgrade (WinSLT®)

2

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Straße 5 • 63026 Rosenheim



A.1 Aktueller Stand


Die Berechnung von Isolierglasscheiben in WinIso® bzw. WinIso2D (im folgenden Text „WinIso“ genannt) ergibt im Vergleich zu WinSLT® deutlich höhere Temperaturen in Glasmitte.

Gründe

- WinIso ist vornehmlich eine Software zur Ermittlung des Rahmen -U- Wertes U_f nach 10077-2 mit den Referenz-Randbedingungen
- WinIso benutzt die Referenzbedingungen der EN 673
- WinSLT® berücksichtigt die Temperaturabhängigkeit des Wärmedurchgangs im SZR

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 4

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Straße 5 • 63026 Rosenheim




A.2 Berechnung mit aktueller Version

Mit der aktuellen Version WinIso kann die Temperaturabhängigkeit wie folgt berücksichtigt werden:


1. **WinIso**
 - Eingabe Modell
 - SZR füllen mit Norm -Ug-Wert
 - Temperaturen berechnen
2. **WinSLT**
 - Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit mit maximaler Gastemperatur aus WinIso
3. **WinIso**
 - SZR entsprechend berechneter äquivalenter WLF füllen
 - Neue Berechnung WinIso

Zwei bis drei Iterationen sollten ausreichen.



info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 5


Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Straße 5 • 63026 Rosenheim



A.3 Implementierung der temperaturabhängigen Berechnung

Mögliche Implementierung der Temperaturabhängigkeit in WinIso®:

- Neues Material Gas EN 673 temperaturabhängig



➤ Ermittlung von T_m aus angrenzenden Oberflächen
z.B. Mittelwert aus kleinster und größter Temperatur

- Iterationsverfahren (drei Iterationen sollten ausreichen)

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 6

20.2 Neue Ansätze

Im Folgenden werden anhand dem Projektkonsortium von der Fa. Sommer Informatik GmbH präsentierten Folien (Foliengliederung Teil B) erläutert, welches Konzept für zukünftigen Softwarelösungen besteht, temperaturabhängige Berechnungen für Glasoberflächen in Mehrscheiben-Isoliergläsern durchzuführen. Darüber hinaus wird dargestellt, wie anhand der ermittelten Temperaturen die thermisch induzierte Spannungsverteilung für Glasflächen berechnet wird. Implementiert in das Berechnungsprogramm werden dabei meteorologischen Daten für Deutschland, die in diesem Forschungsprojekt ermittelt wurden.

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Str. 5 * 83026 Rosenheim

Teil B

Konzept Berechnungsverfahren Thermobruch

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 7

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Str. 5 * 83026 Rosenheim

Gliederung

Teil A – Temperaturabhängige Berechnung des SZR mit WinIso® bzw. WinIso2D

1. Aktueller Stand
2. Berechnung mit aktueller Version
3. Implementierung der temperaturabhängigen Berechnung

Teil B – Konzept Berechnungsverfahren Thermobruch

1. Erfassung der Eingabeparameter
2. Ermittlung Absorptionsgrade (WinSLT®)
3. Berechnung Temperaturverteilung (WinIso3D)
4. Resultierende Spannungen (GLASGLOBAL® FEM)

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 2

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Str. 5 * 83026 Rosenheim

B.1 Erfassung der Eingabeparameter

a) Klima und Orientierung

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 8

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Str. 5 * 83026 Rosenheim

B.1 Erfassung der Eingabeparameter

b) Rahmen

- Uf-Wert aus WinIso®
- Vorgefertigte Rechenmodelle mit Standardrahmen Holz, Holz/Alu, PVC und Aluminium

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 9

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Str. 5 * 83026 Rosenheim

B.1 Erfassung der Eingabeparameter

c) Glasaufbau und Geometrie

- Gläser, Beschichtungen, Scheibenzwischenräume
- Breite und Höhe

Nr.	BE	Bezeichnung	Dicke (mm)
1	PLANCLEAR	[Folart]	4,00
2	ECLAZ	(m=1%)	12,00
3	90% Argon		4,00
4	PLANCLEAR	[Folart]	12,00
5	90% Argon		12,00
6	PLANTHERM ONE	(m=1%)	4,00
7	PLANCLEAR	[Folart]	4,00

h = 1500
b = 1000
Breite: 2000 mm
Höhe: 1500 mm

info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 10

Sommer Informatik GmbH
Sepp-Heindl-Str. 5 * 83026 Rosenheim

B.2 Ermittlung Absorptionsgrade (WinSLT®)

Mit WinSLT® werden die Absorptionsgrade der einzelnen Scheiben ermittelt:

Schichtaufbau (von außen nach innen)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7
mm	4,00	12,00	4,00	12,00	12,00	4,00	36,00
DE	1	2	3	4	5	6	7

Transmission, Reflexion, Absorption

$P_v = 0,24$ (Lichtreflexionsgrad außen)
 $P_m = 0,25$ (Lichtreflexionsgrad innen)
 $P_{0e} = 0,37$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad außen)
 $P_{0i} = 0,42$ (direkter Strahlungsreflexionsgrad innen)
 $\alpha_{0e} = 0,13$; $\alpha_3 = 0,05$; $\alpha_5 = 0,05$ (direkter Strahlungsabsorptionsgrad)

$T_{UV} = 0,21$ (ultravioletter Transmissionsgrad)
 $T_v = 0,67$ (Lichttransmissionsgrad)
 $T_g = 0,40$ (direkter Strahlungstransmissionsgrad)
 $R_g = 97$ (allgemeiner Farbwiedergabedex)

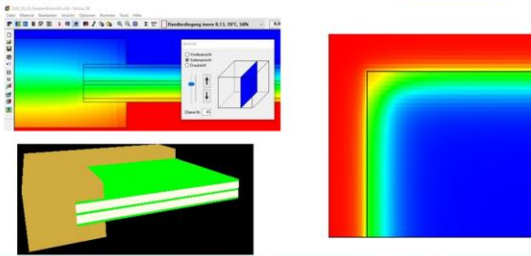
info@sommer-informatik.de * www.sommer-informatik.de 11

B.3 Berechnung Temperaturverteilung (WinIso3D)

Aus allen Eingabeparametern wird automatisch ein Rechenmodell in WinIso3D erzeugt und gerechnet.

➤ Ergebnis: Temperaturfeld je Glasscheibe

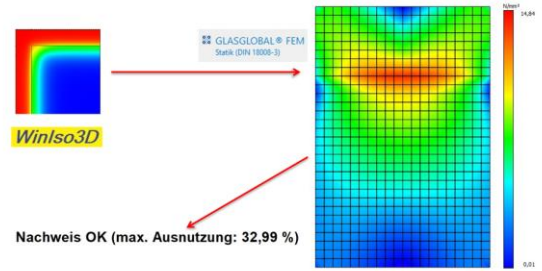
WinIso3D



B.4 Resultierende Spannungen (GLASGLOBAL® FEM)

Ansatz der Temperaturfelder aus WinIso3D als Last in GLASGLOBAL® FEM

➤ Thermisch induzierte Spannungen je Glasscheibe



21 Verwertung der meteorologischen Daten

21.1 Verwertung für die Normung

Die im Projekt erarbeiteten Daten sollen insbesondere für die Normung (siehe Abschnitte 16 und 18) genutzt werden. Vor diesem Hintergrund erfolgte die Aufbereitung der Daten mit dem Ziel, die Ergebnisse in einfacher Form und für alle kostenfrei zugänglich zu machen.

Diese Ergebnisse sind in diesem Bericht veröffentlicht und damit frei zugänglich verfügbar:

Kritische Wertepaare für jeden Rasterpunkt (Tabellen in Anhang A4 und Anhang A5)

- Tagesgänge, die skaliert werden können (Wertepaare im .csv- oder .xlsx-Format): Uhrzeit/Strahlung (Anhang A6)
- Vereinfachte Formel für Höhenkorrektur Strahlung (Abschnitt 7.9.1)
- Vereinfachte Formel für Höhenkorrektur Temperatur (Abschnitt 7.9.2)

Sie stehen damit bereits jetzt der Verwertung von Anwendern aus Industrie und Forschung zur Verfügung.

21.2 Optionale Verwertungsmöglichkeiten

Die im Projekt erarbeiteten Daten und Berechnungsvorschriften sind auch für detaillierte Analysen von thermischen Beanspruchungen wertvoll, z. B. für standortspezifische Simulationen thermischer Lasten auf Isoliergläsern verschiedener Ausrichtungen auf Basis der erarbeiteten Zeitreihen mit hoher Einstrahlung sowie hoher bzw. niedriger Temperatur.

Dazu ist eine automatisierte Auswertung der meteorologischen Daten mit einer entsprechenden Software unter Nutzung der in Abschnitt 7 beschriebenen Eingangsdaten erforderlich. Ebenso ist eine Bereitstellung der Daten für die Normung in elektronischer Form wünschenswert. Vor diesem Hintergrund sind im Folgenden drei weitere Möglichkeiten der Verwertung der meteorologischen Daten skizziert.

21.2.1 Möglichkeit 1: Definition/Beschreibung „Meteorologische Daten“

Die öffentlich verfügbaren Eingangsdaten und Berechnungsvorschriften zur Erstellung von Extremwertzeitreihen sind in Abschnitt 7 ausführlich beschrieben, die entsprechende Information zur Bestimmung der „kritischen“ Strahlungs-Temperatur-Wertepaare finden sich in Abschnitt 7 und Abschnitt 11. Damit können von Anwendern mit den nötigen Kompetenzen (u. a. in Programmierung), z. B. Ingenieurbüros, selbst entsprechende Zeitreihen und kritische Wertepaare erzeugt werden.

Die Eingangsdaten und Berechnungsvorschriften umfassen u. a.:

- 1) Eingangsdaten: CAMS/EAC4 Aerosole/Wasserdampf (AOD/WV)-Daten, ERA5 Reanalyse Daten, Höheninformation auf Gitter EAC4 Daten (öffentlich abrufbar)
- 2) Zur Validierung: DWD-Messwerte (öffentlich abrufbar)
- 3) Modellierung:
 - a. Umrechnung der solaren Einstrahlungsdaten auf geneigte Fläche mit Perez-Modellen: Beschreibung des Modellierungswegs mit Verweis auf die entsprechenden Publikationen und PVLIB Code in Abschnitt 7
 - b. Clearsky Strahlung mit niedriger Trübung (AOD/WV)
 - c. Beschreibung des Lösungswegs mit genutztem Clearsky-Modell und Aufbereitung der Aerosol- und Wasserdampfdaten in Abschnitt 7 (Die Aufbereitung der AOD/WV Daten ist vergleichsweise aufwendig)
 - i. Alternative: Möglicher Link zu z. B. Sommer Informatik GmbH (Übergabe der Wertepaare mit AOD/WV, damit kann z. B. die Sommer Informatik GmbH Zeitreihen berechnen)
 - d. Generierung von Temperatur Maximal- und Minimalwerten pro Stunde des Jahres aus 11 Jahren (2010-2020).

-
- e. Auswahl der kritischen Situationen an Gitterpunkten mit dem in den Abschnitten 7 und 11 beschriebenen Lösungsweg:
 - i. Modellierung verschiedener Optionen: Unterschiedlich von ISM+D betrachtete Absorptionsoptionen 1 bis 4: Modellierungsweg (Berechnungsverfahren 2D, 3D)
 - ii. Daten-Fit für verschiedene Optionen (unterschiedliche Absorptionsoptionen 1 bis 4)
 - iii. Umsetzung: Anwenden auf die meteorologischen Zeitreihen (erzeugt mit den Schritten a, b, c)

21.2.2 Möglichkeit 2: Direkte Implementierung in vorhandene Berechnungssoftware

Eine weitere Verwertungsmöglichkeit stellt die direkte Implementierung in eine vorhandene Berechnungssoftware der Sommer Informatik GmbH dar. Damit könnten die Projektergebnisse für Endnutzer einfach und komfortabel zugänglich gemacht werden.

Schnittstellen und Berechnungsschritte:

1. Eingangswerte (technischen Kenndaten der Glasaufbauten, Standort) können eingegeben werden
2. Prozessierung in Berechnungssoftware
 - a. Meteorologische Daten
 - i. Option 1: Unentgeltliche Nutzung der für die Normung veröffentlichten Daten als Datenbanklösung (Implementierung durch z. B. Sommer Informatik)
 - ii. Option 2: Bereitstellung von Zeitreihendaten (Gemeinsame Verwertung von Fraunhofer ISE und Sommer Informatik)
 - b. 1D-Berechnung (vgl. Abschnitt 20.1)
3. Ausgabe: Thermisch induzierte Beanspruchungen, evtl. ergänzt durch standortspezifische meteorologische Daten

21.2.3 Möglichkeit 3: Stand-Alone Programmmodul (kl. Weblösung) „Meteorologische Daten“

Auch die direkte Verwertung der meteorologischen Daten als klassische Weblösung durch z. B. Sommer Informatik stellt eine interessante Möglichkeit dar. Damit könnten die meteorologischen Daten für verschiedene Anwendungen bereitgestellt werden.

Schnittstellen und Berechnungsschritte:

1. Eingangswerte (Standort) können eingegeben werden
2. Prozessierung in Berechnungssoftware
 - a. Meteorologische Daten: Prozessierung von Zeitreihendaten (Gemeinsame Verwertung von Fraunhofer ISE und z. B. Sommer Informatik)
3. Ausgabe: Standortspezifische meteorologische Zeitreihen mit Extremwerten von Strahlung- und Außenlufttemperatur

21.3 Konzept für eine meteorologische Datenbank

Im Folgenden ist das Konzept für eine Datenbank-Nutzung der meteorologischen Daten stichpunktartig beschrieben. Neben den Eingabedaten zur Festlegung der Berechnungssituation, orientiert am konkreten Objekt, werden über verschiedene Zwischenschritte (als hinterlegte Daten) die Ausgabedaten generiert. Die Ausgabedaten bestehen bei stationären Berechnungen aus einzelnen Datenpunkten für die solare Einstrahlung und Außenlufttemperatur, bei transienten Berechnungen aus Zeitreihen für die eben genannten Werte. Diese können dann für die in den Abschnitten 14 und Abschnitt 15 beschriebenen Berechnungsverfahren verwendet werden.

1. Eingabedaten

- Fassadenorientierung/Himmelsrichtung
- Längen- und Breitengrad
 - ODER: Postleitzahl, welche in gemittelte Längen- und Breitengrade umgerechnet wird
- Einbauhöhe Verglasung/BIPV-Modul am Objekt
- Angabe stationäre oder transiente Berechnung
- Warmer Tag, kalter Tag, warmer Übergangstag, kalter Übergangstag

2. Zwischenschritt (hinterlegte Daten)

- Aerosol-/Wasserdampfwerte (monatsabhängig)
- In Vorausschau: Strahlungserhöhung, Temperaturreduzierung
- Ortshöhe (ü.N.N.)

3. Ausgabedaten

- Optionen: wie für Normung (siehe Abschnitt 21.1) oder Zeitreihen mit Extremwerten
- Standortspezifische, himmelrichtungsbezogene solare Einstrahlung
- Standortspezifische Außenlufttemperatur

22 Literaturverzeichnis

- [1] ANSYS Mechanical APDL Element Reference (2011). Version 14
- [2] ANSYS® Academic Research Mechanical (2020). Version R1
- [3] Beinert, A., Mahfoudi, A., Ensslen, F., Erban, C. (2023). Thermomechanische Bewertung von BIPV-Modulen mittels FEM-Simulation, 38. PV-Symposium/BIPV-Forum, Kloster Banz, Bad Staffelstein
- [4] Beinert, A., Mahfoudi, A., Ensslen, F., Erban, C. (2023), Assessment of thermally induced stress in BIPV Modules using FEM simulations, Abstract eingereicht bei der EUPVSEC 2023, September 2023 in Portugal
- [5] Bundesverband Flachglas e.V. (2021). Datenblatt Psi-Werte Fenster auf Basis messtechnischer Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter. Nr. W16 – Änderungsindex 4-06/2021
- [6] Bundesverband Flachglas e.V. (2022). Kompass „Warme Kante“ für Fenster und Fassaden. BF-Merkblatt 004/2008 – Änderungsindex 5 – Mai 2022
- [7] CNR-DT 210 (2013). Guide for the Design, Construction and Control of Buildings with Structural Glass Elements. NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF ITALY. CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction <https://www.cnr.it/en/node/3843>
- [8] Deutscher Wetterdienst (2021). Climate-Data-Center (CDC). https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/
- [9] DIN 18008-1:2020-05, Glass in building – Design and construction rules – Part 1: Terms and general bases. Beuth-Verlag
- [10] DIN V 18599-10:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Beuth-Verlag
- [11] Döring, T. (2021). Numerische Simulation der thermisch induzierten Spannungen von Fassadenverglasungen. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt, ISM+D (unveröffentlicht)
- [12] Ehrhardt, N. (2022). Numerische Simulation der thermisch induzierten Spannungen eines Dreifachisoliertes mit beweglichem Schatten. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt, ISM+D (unveröffentlicht)
- [13] EN 12150-1:2020, Glass in building – Thermally toughened soda lime silicate safety glass – Part 1: Definition and description. Beuth-Verlag
- [14] EN 13363-2:2005, Solar protection devices combined with glazing - Calculation of total solar energy transmittance and light transmittance - Part 2: Detailed calculation method. Beuth-Verlag
- [15] EN 14179-1:2016, Glass in building – Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass – Part 1: Definition and description. Beuth-Verlag
- [16] EN 1748-1-1:2004-01, Glass in building - Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-1: Definitions and general physical and mechanical properties. Beuth-Verlag
- [17] EN 410:2011-04, Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing. Beuth-Verlag
- [18] EN 50583-1:2016, Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules. Beuth-Verlag
- [19] EN 572-1:2016-06, Glass in building – Basic soda-lime silicate glass products – Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties. Beuth-Verlag
- [20] EN 572-2:2016-06, Glass in building – Basic soda-lime silicate glass products – Part 2: Float glass. Beuth-Verlag

-
- [21] EN 673:2011-04, Glass in building – Determination of thermal transmittance (U value) – Calculation method. Beuth-Verlag
- [22] EN ISO 10456:2010-05, Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Beuth-Verlag
- [23] EN ISO 52022-3:2017-03, Energy performance of buildings - Thermal, solar and daylight properties of building components and elements - Part 3: Detailed calculation method of the solar and daylight characteristics for solar protection devices combined with glazing. Beuth-Verlag
- [24] EN ISO 6946:2018-03, Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods. Beuth-Verlag
- [25] Ensslen, F., Schwind, G., Schneider, J., Beinert, A., Mahfoudi, A., Lorenz, E., Herzberg, W., Elstner, M., Polakova, M., Schäfer, S., Erban, C., Röhner, J., Sommer, R. (2022, June). Joint research project (in progress): Draft standard for determining the thermal stress of glass and glass-glass PV modules (BIPV) in the construction industry. Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 8). <https://doi.org/10.47982/cgc.8.433>
- [26] Feldmeier, F. (2013). Bauphysik – Wärmeschutz Teil 2. Vorlesungsskript FH Rosenheim (unveröffentlicht)
- [27] Flachglas Schweiz AG (2021). Thermische Beanspruchung von Glas. https://storage.googleapis.com/flachglas-group-backend/PI_018_Thermische_Beanspruchung_von_Glas_e64b26133b/PI_018_Thermische_Beanspruchung_von_Glas_e64b26133b.pdf
- [28] Glass & Glazing Association of Australia (2015). AGGA Technical fact sheet, Thermal Stress Glass Breakage. <https://www.festivalglass.com.au/wp-content/uploads/2015/08/Thermal-Stress-Glass-Breakage-factsheet.pdf>
- [29] Glunz, S., Würfel, U. (2010). Vorlesungsskript „Limitation of Solar Cell Performance – Spectral and Current Losses. Masterstudie Fraunhofer ISE (unveröffentlicht)
- [30] Gschwind, B., et al. (2019). Improving the McClear model estimating the downwelling solar radiation at ground level in cloud free conditions – McClear-V3., Meteorol. Z., <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0946>
- [31] Halwachs, M., et. al. (2019). Statistical evaluation of PV system performance and failure data. Renewable Energy Vol. 139, Seiten 1040-1060
- [32] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)
- [33] Holmgren, W.F., Hansen, C.W., Mikofski, M.A. (2018). pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. Journal of Open-Source Software, 3(29), 884
- [34] IEC 63092-1:2020, Photovoltaics in buildings - Part 1: Requirements for building-integrated photovoltaic modules. Beuth-Verlag
- [35] ift-Richtlinie WA-08/3 – Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter Teil 1, Ermittlung des repräsentativen psi-Wertes für Fensterrahmenprofile (2008). ift Rosenheim
- [36] Ineichen, P. (2008). A broadband simplified version of the Solis clear sky model. Solar Energy, 82, 758-762
- [37] Inness, A., Ades, M., Agusti-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., Suttie, M., (2019). The CAMS

- reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 6, 3515--3556, <https://acp.copernicus.org/articles/19/3515/2019/>
- [38] Lefèvre, M. et al (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *AMT*, 6, 2403-2418, <https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013>
- [39] NF DTU 39 P3 (2006). *Travaux de bâtiment - Travaux de vitrerie-miroiterie - Partie 3: Mémento calculs des contraintes thermiques.*
- [40] ONR CEN/TS 19100-1:2021. *Design of glass structures - Part 1: Basis of design and materials.* <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/news/cents-191002021-design-glass-structures>
- [41] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44 (5), 271-289
- [42] Polakova, M.; Schäfer, S.; Elstner, M (2018). *Thermal Glass Stress Analysis – Design Considerations. Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 6)*, <https://doi.org/10.7480/cgc.6.2193>
- [43] Qu, Z. et al. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method, *Meteorol. Z.*, 26, 33-57, <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0781>
- [44] Roos, M. et al. (2016). *MULTIELEMENT II Abschlussbericht – PV-Elemente für energieproduzierende Fassaden – Verbesserung der bautechnischen und baurechtlichen Rahmenbedingungen.* Fraunhofer IWES, <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/2015/multielement-ii.html>
- [45] Schneider, J., Kuntsche, J., Schula, S., Schneider, F., Wörner, J.-D. (2016). *Glasbau: Grundlagen, Bemessung, Konstruktion.* Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
- [46] Schnell, W., Gross, D., & Hauger, W. (2013). *Technische Mechanik: Band 2: Elastostatik (Vol. 216).* Springer-Verlag
- [47] Schnell, W., Gross, D., Hauger, W., & Wriggers, P. (2013). *Technische Mechanik: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden.* Springer-Verlag
- [48] Schwind, G., Paschke, F., & Schneider, J. (2022). *Case Studies on the Thermally Induced Stresses in Insulating Glass Units via Numerical Calculation. Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 8).* <https://doi.org/10.47982/cgc.8.388>
- [49] Schwind, G., Paschke, F., Schneider, J., Seel, M. (2023). *Numerische Studien zur Glaskantentemperatur im verschatteten Bereich von Isoliergläsern.* *Glasbau 2023*, TU Dresden
- [50] Schwind, G., Schneider, J.: *Thermisch induzierte Spannungen in Isolierverglasungen.* Fachvortrag im Rahmen der Tagung: *Glas im konstruktiven Ingenieurbau 18* in München. <http://www.labor.sl.hm.edu/lsl/programm-glas-im-konstruktiven-ingenieurbau-2023>
- [51] Sengupta, M., Habte, A., Wilbert, S., Gueymard, C., Remund, J. (2021). *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Third Edition.*
- [52] Svendsen, S., Laustsen, J. B., Kragh, J. (2005). *Linear thermal transmittance of the assembly of the glazing and the frame in windows. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, pp. 995-1002, ISSN: 9979-9174-5-8, Reykjavik, Iceland
- [53] Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion (2016). *Thermische Beanspruchung von Glas im Bauwesen – Ermittlung der thermisch induzierten Beanspruchung ausgewählter Fassadenverglasungen Stufe 1: Problemstellung verdeutlichen.* Interner Projektbericht (unveröffentlicht)
- [54] Verband Fenster + Fassade e.V. (2012). *Thermische Beanspruchung von Gläsern in Fenstern und Fassaden.*
- [55] Wagner, E. (2020). *Glasschäden Oberflächenbeschädigungen, Glasbrüche in Theorie und Praxis.* Fraunhofer IRB Verlag

Anhang A1 Übersicht der Einflussgrößen bei Verglasungen

In Abschnitt 4.2 wurden einige Einflussgrößen hinsichtlich thermisch induzierter Spannungen und deren Zusammenhänge bei Verglasungen bereits angesprochen. In der folgenden Abbildung A-A sind in einer Übersicht weitere Einflussfaktoren dargestellt.

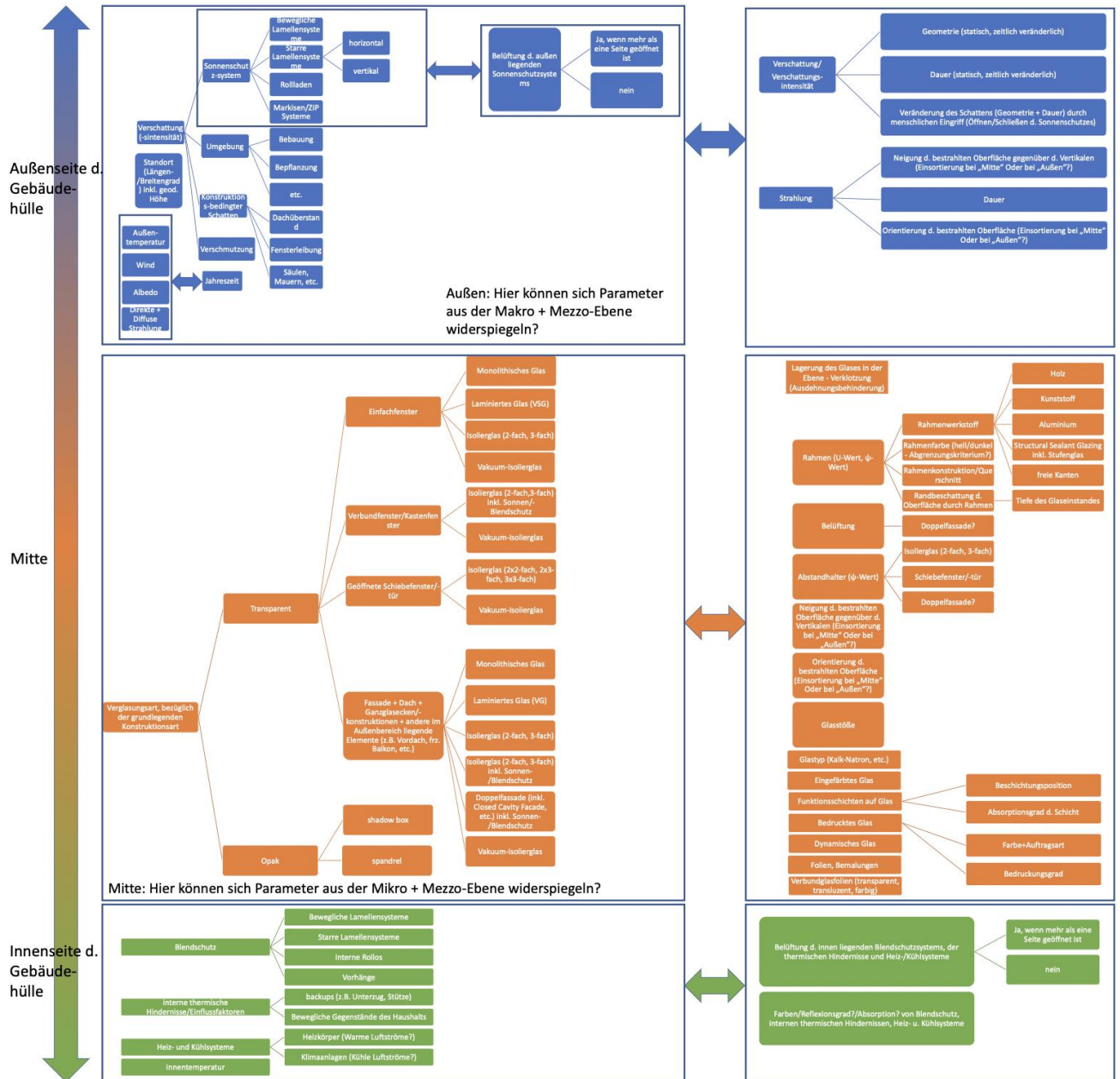


Abbildung A-A: Clusterung (Außen, Mitte, Innen; Makro, Meso, Mikro) der Einflussgrößen auf thermisch induzierten Glasbruch bei Verglasungen.

Anhang A2 Übersicht der Einflussgrößen bei BIPV-Modulen

In Abschnitt 4.4 wurden einige Einflussgrößen hinsichtlich thermisch induzierter Spannungen und deren Zusammenhänge bei BIPV-Modulen bereits angesprochen. In der folgenden Abbildung A-B sind in einer Übersicht weitere Einflussfaktoren dargestellt.

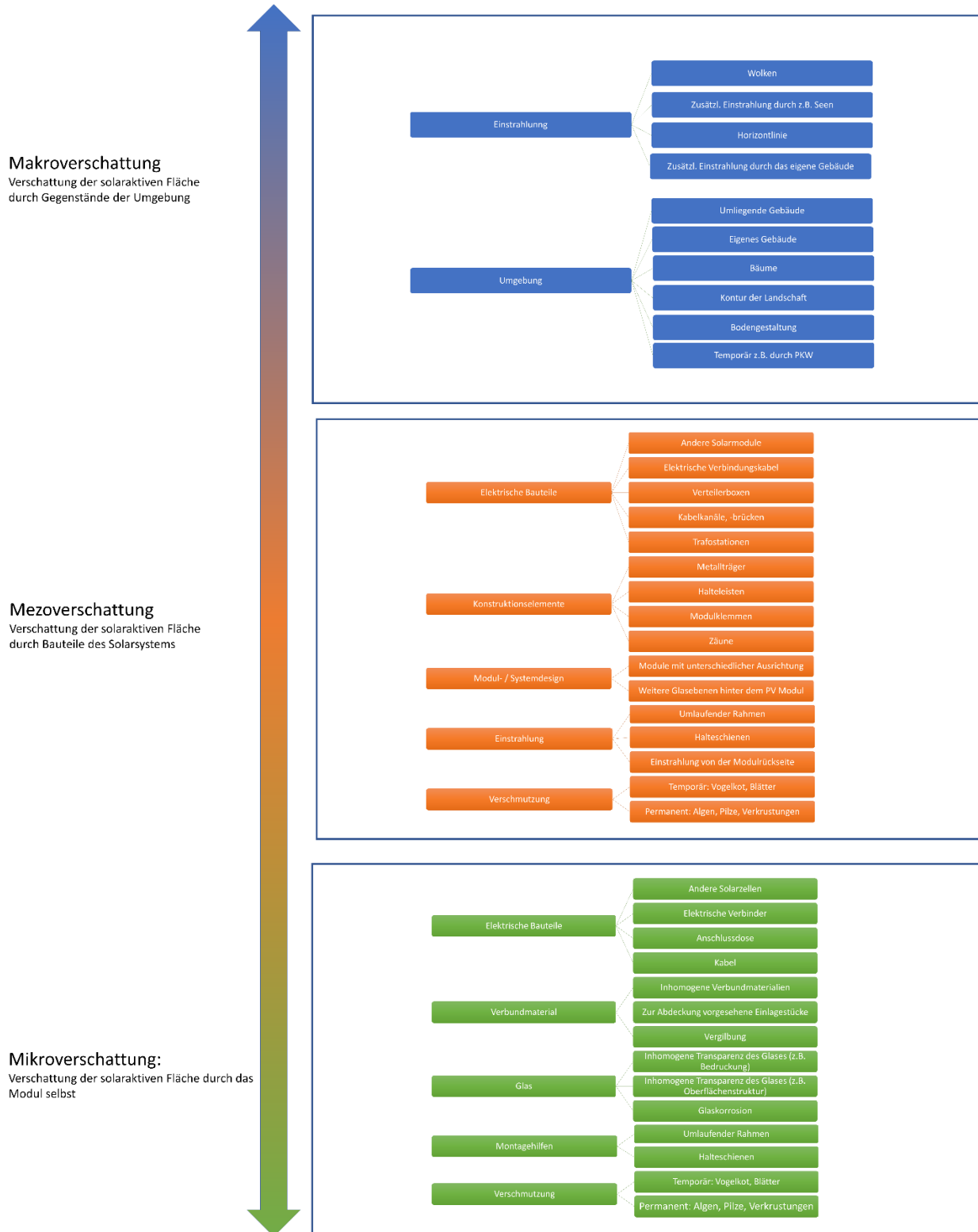


Abbildung A-B: Clusterung (Außen, Mitte, Innen; Makro, Meso, Mikro) der Einflussgrößen auf thermisch induzierten Glasbruch bei BIPV-Modulen.

Anhang A3 Geodätische Höhen ü.N.N. der Gitternetzpunkte

In der folgenden Tabelle sind die geodätischen Höhen ü.N.N. der Daten aus Anhang A4 und Anhang A5 dargestellt. Diese geodätischen Höhen können für die Höhenkorrektur (solare Einstrahlungsintensität und Außenlufttemperatur) als Eingangsgrößen verwendet werden.

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	-0.1	-0.8	2.4	0.4	1.2	4.9	15.3	30.7	25.1	12.7	3.3	39.1	78.9	126.6	121.3	93.6	68.0	21.6	2.7
55.75	0.9	-1.3	0.6	-0.1	-0.3	6.8	17.1	30.6	25.1	14.8	6.6	14.2	41.8	51.7	42.7	29.2	5.8	7.6	0.9
55.00	0.9	-0.7	-0.9	-1.6	-1.0	2.9	9.6	18.9	18.7	8.3	4.5	9.0	11.2	14.1	8.0	-5.7	9.6	24.1	34.0
54.25	1.5	0.5	-0.1	0.5	1.0	-0.8	4.4	13.2	16.4	21.0	19.0	19.8	19.4	14.4	7.0	23.7	44.1	81.1	93.5
53.50	-0.4	-1.7	-1.7	0.8	4.4	4.4	13.3	23.7	32.2	34.1	36.7	36.7	42.7	37.4	39.6	56.7	79.4	110.4	105.7
52.75	0.3	2.5	6.2	12.6	16.9	34.8	46.3	61.2	72.2	69.1	66.9	54.6	57.7	53.3	57.6	60.5	81.1	93.0	94.1
52.00	-0.8	2.2	8.0	13.8	61.7	89.8	157.2	179.1	192.7	185.9	133.9	90.0	72.2	73.3	103.5	113.8	99.8	98.9	106.9
51.25	19.3	47.2	64.7	93.7	140.4	214.1	279.0	301.3	312.5	308.5	260.2	242.5	243.0	251.3	273.6	274.8	264.2	202.2	182.2
50.50	117.3	166.5	251.5	303.0	299.9	344.7	298.1	301.8	349.9	365.5	422.3	444.7	426.0	405.1	313.4	303.6	394.7	366.1	301.6
49.75	151.5	209.3	290.7	345.8	339.9	284.5	238.8	279.5	340.6	393.8	452.8	512.3	506.8	501.9	441.4	422.6	468.9	441.1	381.0
49.00	142.6	195.0	244.5	292.8	310.9	280.5	353.7	428.0	439.6	465.3	421.6	449.4	515.0	538.1	581.1	564.2	396.9	330.3	331.6
48.25	206.6	247.6	307.4	397.7	440.8	441.5	511.0	578.5	617.7	628.3	587.6	565.2	602.5	603.1	636.7	570.4	405.1	236.5	209.4
47.50	277.1	320.6	368.6	446.1	594.0	654.2	773.7	884.5	1135.9	1213.6	1214.4	1223.7	1173.9	1160.8	936.7	789.7	498.1	298.7	167.1
46.75	333.2	341.6	394.7	757.2	990.3	1270.0	1317.1	1477.4	1695.2	1715.8	1627.6	1368.7	1268.5	1125.7	911.2	666.2	408.6	244.5	167.0
46.00	464.6	399.5	643.8	1043.6	1492.0	1599.6	1079.6	1080.4	1156.2	1193.3	957.5	712.6	572.4	466.2	587.0	442.9	290.4	145.9	163.4

Anhang A4 Meteorologische Daten - warme Tage

Anhang A4.1 Nord – Azimut = 0°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	315.4	316.5	316.6	318.2	319.2	321.8	324.4	320.4	326.8	323.5	324.3	323.6	324.7	320.2	319.5	318.4	319.6	319.1	322.4
55.75	310.1	309.9	309.6	312.0	313.6	314.4	316.2	318.0	324.5	321.1	322.0	320.3	322.1	315.9	317.8	319.1	315.2	313.9	315.6
55.00	306.8	306.2	304.8	305.9	307.7	309.2	309.8	311.3	311.2	311.0	313.8	313.8	309.4	314.6	311.4	311.3	311.6	310.2	311.3
54.25	303.0	301.3	301.8	302.0	303.5	302.0	304.4	304.0	303.6	305.4	306.3	307.2	308.4	303.0	302.4	305.1	306.6	307.6	309.9
53.50	299.1	298.6	298.6	298.7	297.7	297.3	297.4	299.1	298.3	289.0	288.6	290.2	294.0	293.7	295.1	295.6	297.8	298.3	299.0
52.75	296.3	294.6	293.8	292.6	292.1	292.6	292.8	291.9	291.2	282.3	281.0	285.5	286.7	286.5	285.1	286.2	288.1	288.1	289.4
52.00	284.3	281.6	286.5	287.3	288.0	288.2	288.4	289.1	279.4	277.3	280.0	279.8	280.7	281.2	282.4	283.8	281.5	281.9	280.7
51.25	275.8	276.8	278.0	282.8	283.3	284.7	287.3	276.2	276.8	281.6	280.0	279.6	279.2	279.4	280.8	282.4	281.0	281.5	281.3
50.50	275.0	274.5	280.8	279.7	283.7	283.7	280.4	278.9	278.7	275.9	278.6	284.1	281.9	277.5	274.5	278.2	278.8	279.1	277.7
49.75	273.8	275.3	279.8	278.4	278.5	279.1	270.7	271.0	272.5	279.1	284.9	286.2	282.8	282.9	280.9	278.6	277.5	276.2	274.5
49.00	275.1	277.1	279.1	281.7	275.0	271.1	269.5	277.0	280.4	281.8	280.9	280.9	280.7	279.6	281.8	275.4	272.2	266.9	267.7
48.25	278.8	279.4	282.1	281.9	273.7	269.9	279.8	280.4	280.5	279.2	279.4	277.1	274.8	277.0	277.6	273.8	269.7	262.5	264.7
47.50	279.4	282.4	276.6	277.1	284.1	285.4	287.7	288.5	296.6	296.8	294.3	294.2	290.6	286.8	287.0	278.9	272.5	262.8	259.3
46.75	281.8	279.8	277.7	289.5	295.3	294.9	294.5	299.3	301.5	301.4	297.5	295.2	292.3	288.4	283.5	279.0	270.4	260.9	268.7
46.00	284.3	281.0	284.0	287.8	298.9	294.6	286.5	288.4	287.9	286.2	277.5	271.2	268.6	270.0	275.2	273.3	268.7	261.5	266.5

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	18.2	18.5	19.0	19.5	20.4	21.8	25.5	28.2	26.0	23.4	22.1	23.8	26.5	28.0	29.0	27.7	25.9	22.5	21.8
55.75	18.6	18.8	19.3	19.9	20.4	21.5	26.2	27.0	24.1	23.2	25.6	25.9	26.3	28.5	25.1	22.7	22.0	22.0	22.2
55.00	19.1	19.4	19.9	20.4	21.0	21.7	25.5	29.1	25.7	23.9	24.8	23.0	22.5	21.7	22.9	22.8	22.9	23.2	25.6
54.25	19.4	19.6	20.0	20.0	20.5	21.1	25.2	31.3	30.1	27.1	26.6	27.0	28.4	29.1	26.4	29.0	30.5	32.5	33.1
53.50	19.9	21.0	23.8	27.2	29.8	30.4	30.2	32.4	32.4	35.5	34.7	33.8	34.0	35.7	35.4	34.8	34.5	35.1	35.0
52.75	21.6	26.2	29.5	33.1	34.8	34.9	33.9	32.8	33.0	36.5	36.8	36.4	36.7	37.0	37.0	36.9	36.9	37.1	36.3
52.00	29.8	32.5	32.9	34.2	35.4	35.2	33.8	31.6	34.0	35.3	35.3	36.8	37.9	37.5	37.6	37.8	37.9	37.4	37.1
51.25	34.1	34.4	34.7	34.3	34.9	33.3	30.9	33.4	34.9	34.3	35.9	36.6	36.5	35.9	35.8	34.6	35.1	36.3	36.8
50.50	33.6	33.3	33.1	32.2	33.0	33.3	33.3	32.7	33.8	34.7	34.7	33.8	33.4	36.4	36.5	34.7	32.5	32.1	33.2
49.75	34.3	33.8	32.7	34.0	33.9	34.2	38.1	36.6	35.6	34.8	34.2	34.1	34.2	34.1	33.9	33.5	32.3	31.5	31.2
49.00	35.7	35.5	34.2	35.6	36.3	39.0	37.7	35.1	33.5	34.3	34.5	34.7	33.2	31.9	32.7	32.9	33.2	35.6	35.1
48.25	36.5	36.1	35.4	35.2	35.5	37.5	32.6	32.5	33.1	33.5	33.4	34.0	34.5	34.7	34.5	33.9	33.7	35.8	36.7
47.50	36.9	36.2	37.5	36.4	33.6	34.0	33.4	32.3	30.6	29.3	29.8	30.0	29.9	30.1	29.0	29.4	30.2	35.0	36.3
46.75	38.2	37.8	37.4	32.6	32.1	29.0	27.1	27.5	24.7	23.8	28.0	26.1	27.9	29.1	30.4	30.7	33.3	34.6	33.8
46.00	38.0	37.4	35.5	32.1	26.5	24.2	31.9	32.4	27.1	26.3	30.6	32.3	33.4	31.5	31.6	32.6	33.5	34.8	34.5

Anhang A4.2 Nord-Ost – Azimut = 45°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	686.8	686.3	687.1	690.2	689.6	689.2	702.7	701.3	701.1	702.2	702.3	694.1	694.0	694.5	702.2	704.4	705.3	704.9	702.3
55.75	683.6	684.1	684.6	685.6	687.4	686.5	697.5	697.8	699.8	687.5	689.8	692.7	693.6	693.2	695.7	698.4	694.7	696.4	699.9
55.00	684.8	684.3	681.5	684.2	683.1	686.2	685.4	678.5	684.9	688.0	688.6	689.9	687.7	691.1	701.1	703.6	697.4	696.9	699.8
54.25	686.2	679.9	680.0	679.2	683.6	678.3	685.1	682.1	684.2	683.0	686.7	687.1	685.3	688.8	686.2	690.5	691.9	693.8	696.8
53.50	686.3	680.4	680.2	683.6	682.3	677.1	677.4	678.5	682.8	681.6	682.1	680.9	680.7	682.8	681.9	685.0	684.6	686.7	685.4
52.75	686.1	681.8	683.8	680.6	678.3	674.3	675.7	675.0	677.5	679.0	674.7	675.0	675.8	676.5	676.0	677.0	680.0	679.3	681.2
52.00	671.6	676.1	676.6	677.2	679.5	675.4	674.0	677.7	678.9	674.6	670.0	670.1	672.0	672.3	674.9	676.9	673.6	674.2	677.0
51.25	664.9	665.7	673.1	674.9	675.3	674.4	680.0	676.9	670.8	677.3	673.9	673.7	673.7	675.2	676.5	674.1	672.6	672.2	671.9
50.50	667.4	667.6	673.2	676.1	674.7	677.6	675.4	673.4	676.6	672.9	681.2	680.8	677.6	675.8	671.8	675.4	676.2	676.9	670.9
49.75	669.7	676.2	680.0	680.1	681.8	673.8	674.9	670.8	672.3	677.8	681.3	684.5	679.9	677.4	675.3	672.5	671.2	675.7	673.1
49.00	672.4	680.0	679.8	682.7	679.5	672.8	672.8	672.3	676.2	683.8	682.9	680.2	681.9	680.4	680.3	675.5	667.3	665.9	671.7
48.25	677.1	676.7	684.6	683.7	682.8	675.3	684.6	686.2	686.8	685.1	682.0	681.9	678.0	682.6	678.6	678.1	669.1	661.7	668.1
47.50	683.8	688.4	683.0	684.5	691.4	694.0	700.9	698.7	717.4	719.6	715.2	709.4	703.8	710.8	703.2	682.4	670.4	665.2	665.7
46.75	689.5	686.9	688.5	704.7	714.8	715.7	714.7	722.1	729.2	726.9	724.1	715.9	711.1	704.5	695.1	680.0	674.9	669.4	672.1
46.00	699.8	693.9	696.8	706.5	726.0	723.1	704.1	707.6	706.8	703.9	689.0	677.6	673.8	675.8	689.1	679.3	673.5	671.2	671.7

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	18.3	18.6	19.0	19.3	19.5	20.5	21.4	23.3	22.6	20.1	19.7	21.6	25.0	25.9	24.1	24.3	23.5	18.2	18.9
55.75	18.2	18.5	19.1	19.6	19.7	20.0	21.4	23.7	22.1	22.4	24.2	25.1	26.5	25.7	20.8	17.7	18.9	19.0	19.1
55.00	18.0	18.3	18.8	19.5	19.9	19.9	22.5	27.3	24.6	22.5	22.9	22.9	20.5	19.9	18.6	18.6	18.6	19.7	21.4
54.25	18.4	19.3	19.9	19.9	19.1	20.6	22.0	26.6	26.0	25.0	24.2	25.6	27.8	25.0	22.2	24.8	26.6	28.5	29.2
53.50	18.4	20.6	21.1	21.5	22.8	25.4	25.9	27.2	27.5	28.2	28.1	28.3	28.4	29.7	29.3	29.0	29.1	29.8	29.9
52.75	19.8	22.0	25.1	26.5	26.8	29.0	29.5	29.1	29.1	29.6	29.5	30.2	30.4	30.5	30.6	30.9	30.6	30.5	30.0
52.00	25.9	26.2	28.6	29.7	29.1	29.8	30.1	27.5	28.0	28.3	29.8	31.4	31.9	30.8	31.3	32.0	31.8	31.2	30.0
51.25	29.1	28.8	29.1	30.0	29.1	28.4	26.3	27.1	28.6	28.4	30.7	31.0	30.6	29.8	29.0	29.0	29.8	30.3	30.6
50.50	28.5	28.6	29.2	27.8	28.6	27.6	27.9	27.6	27.3	28.5	28.3	28.6	28.3	28.8	28.1	27.2	26.5	27.2	28.7
49.75	29.1	27.9	27.5	27.0	27.1	28.9	29.7	29.1	28.9	28.4	28.2	27.7	27.6	28.8	29.1	29.8	28.7	26.5	27.6
49.00	30.1	29.5	28.9	29.5	29.3	30.2	29.8	29.5	29.1	27.4	27.8	28.2	27.5	26.8	28.3	28.7	28.3	29.3	29.1
48.25	30.2	29.9	28.5	28.6	27.8	29.5	26.7	26.5	26.4	26.6	26.9	27.2	28.0	28.0	28.2	27.5	29.1	30.2	30.6
47.50	30.0	29.3	29.9	29.6	27.3	26.7	26.4	26.6	24.9	23.6	23.8	25.0	25.1	23.5	24.0	27.1	29.6	31.5	30.1
46.75	29.7	30.0	30.1	27.4	26.1	24.1	22.7	22.6	21.0	20.5	23.0	22.0	23.2	24.4	25.6	28.4	28.6	29.7	29.6
46.00	27.9	29.4	29.2	27.4	23.1	20.5	26.1	26.5	23.9	23.9	25.0	27.1	29.3	28.1	25.9	27.5	28.8	29.6	30.6

Anhang A4.3 Ost – Azimut = 90°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	834.7	833.7	862.8	866.7	870.6	873.6	867.9	873.5	855.8	855.4	851.0	851.4	874.7	877.6	878.9	882.1	881.6	840.4	839.3
55.75	831.8	830.9	862.8	863.4	866.8	869.3	871.5	870.6	872.0	849.7	850.9	849.5	853.0	852.5	854.3	847.8	839.9	839.9	840.1
55.00	832.1	830.5	860.3	867.7	869.3	868.5	867.6	875.9	843.7	877.0	875.1	849.3	874.6	873.0	841.4	845.1	848.0	847.7	838.8
54.25	831.3	830.1	863.6	864.8	868.4	869.1	861.6	876.3	840.6	842.0	843.1	858.5	860.5	847.2	873.1	865.7	867.6	868.3	875.8
53.50	829.7	830.0	860.5	873.1	872.8	875.4	858.2	859.2	837.7	838.5	858.4	852.6	851.9	856.5	841.6	860.4	861.4	862.4	863.9
52.75	859.0	857.6	857.8	857.5	858.3	858.7	858.2	857.8	858.9	855.9	844.8	845.1	847.6	833.7	833.2	834.7	836.8	847.7	847.5
52.00	853.9	852.2	852.9	834.4	854.5	833.3	833.0	858.2	832.7	830.3	826.6	840.9	829.7	830.1	832.1	835.2	831.3	831.7	865.9
51.25	821.1	822.3	824.8	825.8	824.6	825.8	876.4	875.4	872.1	871.8	832.1	831.1	831.1	832.5	833.8	865.0	866.4	864.7	865.0
50.50	824.8	826.8	831.3	833.6	832.3	833.4	830.9	873.0	874.3	875.0	877.1	878.6	868.2	862.5	823.8	863.2	869.3	870.1	868.5
49.75	831.1	830.3	834.4	836.9	836.7	834.5	830.3	872.0	876.3	875.7	882.3	846.6	881.3	877.6	875.4	871.1	874.1	873.6	871.5
49.00	836.5	837.3	838.0	837.9	833.4	834.3	876.0	881.9	883.7	884.8	882.2	881.8	883.4	881.6	883.0	881.3	873.0	870.7	872.3
48.25	840.0	840.1	842.0	841.5	879.7	878.7	880.4	883.1	884.7	887.8	882.3	881.5	883.3	884.2	882.3	880.1	869.6	862.8	867.4
47.50	843.4	846.2	847.1	847.5	881.3	885.7	890.8	890.6	870.2	878.0	875.3	891.9	889.3	896.2	893.6	885.7	872.4	865.1	866.0
46.75	846.3	845.7	848.0	858.5	865.3	868.4	867.6	872.3	867.3	866.8	862.1	867.0	863.3	861.0	851.4	880.6	867.0	864.1	868.4
46.00	852.4	850.7	856.8	852.0	870.6	867.6	857.5	860.0	859.4	856.9	889.6	888.7	887.5	885.9	842.4	836.7	866.2	864.0	866.0

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	21.6	21.5	16.0	17.3	18.5	19.7	23.3	23.3	26.9	22.6	22.7	24.8	24.6	25.2	24.3	23.7	19.8	24.9	24.9
55.75	21.9	21.8	15.6	17.0	17.9	19.1	23.5	25.5	23.3	24.2	26.1	27.7	28.7	28.4	22.1	22.3	24.6	25.0	25.3
55.00	22.3	22.3	16.1	16.4	16.2	18.4	22.3	23.6	27.5	18.0	19.5	24.2	16.5	16.9	23.9	22.8	23.5	24.3	26.3
54.25	22.9	22.9	15.6	16.4	16.4	16.4	21.3	23.6	29.9	27.9	26.8	25.6	27.4	27.1	19.8	24.2	25.6	27.1	27.0
53.50	22.9	23.7	19.1	18.5	20.6	21.7	25.4	27.6	32.3	32.5	27.9	29.2	29.3	29.9	32.3	28.4	28.8	28.5	28.6
52.75	17.7	21.6	24.1	27.6	28.2	29.0	28.8	28.9	29.3	29.2	31.0	31.5	31.0	34.0	34.0	34.0	33.6	31.4	31.1
52.00	23.6	26.1	27.2	32.5	29.4	33.8	33.8	27.4	33.0	33.1	33.6	31.6	35.2	34.4	34.7	35.3	35.3	34.6	27.1
51.25	33.4	34.6	34.9	34.7	35.0	33.7	22.1	22.9	23.7	24.4	33.5	33.9	33.6	32.9	32.4	26.1	26.6	27.2	28.0
50.50	33.9	33.7	34.6	34.0	34.7	34.7	34.5	24.0	24.4	24.4	24.7	25.0	24.4	26.7	34.7	25.9	25.1	25.7	26.9
49.75	36.2	34.9	33.5	34.0	33.4	34.0	35.6	25.6	26.0	26.0	24.9	32.8	24.2	25.3	25.7	25.8	25.1	25.7	26.8
49.00	37.7	37.7	36.1	35.9	34.8	33.9	26.3	25.9	25.3	24.7	24.8	25.4	25.0	24.7	26.0	25.1	26.7	29.0	28.8
48.25	37.0	36.9	35.6	34.9	24.5	24.2	24.3	25.0	25.7	26.2	26.5	26.3	26.1	26.2	26.2	25.3	27.3	29.3	30.1
47.50	35.6	35.1	35.5	34.5	24.6	23.4	24.6	24.4	28.2	26.0	26.3	22.7	22.6	20.6	21.7	22.9	24.8	28.6	29.4
46.75	33.2	33.6	33.2	29.8	29.4	26.9	25.1	25.3	23.8	23.5	27.3	26.2	27.3	30.3	31.7	24.5	27.5	28.5	28.5
46.00	32.2	33.2	33.3	30.8	25.5	21.7	28.7	29.7	26.7	26.7	22.4	20.8	25.7	23.8	33.6	34.3	27.5	28.8	29.5

Anhang A4.4 Süd-Ost – Azimut = 135°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	918.8	921.0	924.5	929.9	932.9	881.1	878.9	929.5	933.5	940.8	935.7	941.4	888.5	938.5	938.4	938.2	938.4	891.1	945.3
55.75	911.6	916.9	922.9	928.3	931.9	934.4	872.3	924.4	924.1	937.1	928.1	928.3	935.5	935.0	892.4	892.2	890.7	891.7	886.2
55.00	870.7	917.8	922.0	923.3	925.3	931.2	864.6	922.2	920.0	933.3	937.2	883.4	884.9	886.7	886.9	888.6	888.0	886.9	886.4
54.25	872.3	919.3	921.6	922.6	925.4	926.1	927.9	913.3	916.0	929.2	931.7	879.1	919.2	880.6	882.1	885.0	886.0	933.0	931.2
53.50	873.9	918.9	918.0	919.9	920.1	922.6	921.9	915.5	883.7	885.9	872.2	927.5	918.3	919.9	879.6	923.7	925.6	887.0	885.4
52.75	870.7	873.7	873.0	873.4	910.7	873.4	884.7	874.3	874.5	889.1	889.8	890.8	917.0	919.2	921.1	878.0	881.4	924.6	924.0
52.00	868.9	913.6	912.9	913.2	878.7	889.5	875.2	894.3	873.1	916.1	873.8	925.4	926.8	913.9	917.1	922.4	878.0	878.3	921.2
51.25	927.7	928.9	871.5	872.5	881.0	880.1	900.0	900.0	901.3	899.5	872.5	873.5	922.2	921.6	921.7	921.3	922.6	920.0	920.1
50.50	875.2	875.8	877.8	929.7	926.0	929.7	897.1	897.8	929.3	903.2	905.1	927.9	924.9	924.8	877.7	916.2	921.1	924.2	921.4
49.75	930.9	862.5	867.5	926.3	927.9	925.4	894.3	903.0	929.6	922.4	922.2	924.3	926.4	926.5	924.6	926.2	928.1	925.7	891.5
49.00	862.3	867.3	924.4	925.8	928.7	926.9	928.9	931.2	929.2	921.1	917.4	918.6	920.9	920.8	927.8	926.9	926.0	925.5	927.2
48.25	869.8	922.1	925.8	936.4	937.7	899.2	924.4	937.8	942.9	942.8	939.7	939.5	939.5	938.5	941.9	925.8	924.7	920.0	923.0
47.50	868.8	873.6	876.0	936.3	942.3	944.2	949.5	954.0	935.5	934.2	966.4	968.0	938.0	938.6	930.7	923.8	938.2	930.0	930.9
46.75	866.9	898.1	902.0	952.1	962.1	969.3	941.5	945.2	957.6	958.7	954.8	946.4	944.9	963.8	956.1	947.0	935.2	931.6	931.1
46.00	906.8	901.2	909.8	931.4	951.5	955.9	956.8	931.3	929.4	931.4	949.9	947.0	945.5	944.9	945.7	937.0	903.0	903.5	905.2

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	8.7	8.6	8.5	8.4	8.2	21.1	25.4	17.5	15.6	11.0	9.9	9.0	25.3	16.9	16.0	15.1	13.4	19.0	6.7
55.75	9.4	9.1	8.3	8.2	8.5	8.4	25.8	18.4	15.9	10.6	14.2	14.9	14.9	15.7	20.8	20.2	20.4	20.8	21.0
55.00	18.2	8.5	8.5	8.8	8.7	8.4	24.6	19.0	15.1	11.0	10.5	21.9	21.7	21.7	21.5	21.9	22.3	23.0	24.5
54.25	18.9	9.2	9.4	9.4	9.4	9.4	10.6	19.8	19.0	13.5	12.3	24.7	18.6	24.7	23.3	25.8	26.8	19.1	19.8
53.50	21.3	10.0	11.2	13.2	14.7	15.7	15.8	19.0	25.8	25.6	28.2	15.9	18.6	19.5	28.4	20.5	20.4	28.9	28.7
52.75	22.6	25.2	27.0	29.8	19.8	30.5	26.2	31.2	31.5	26.3	25.5	24.7	19.0	19.2	19.7	29.9	29.8	20.3	20.4
52.00	27.0	19.5	21.0	21.5	29.7	26.9	31.4	24.8	29.6	20.8	30.5	20.4	20.6	22.4	21.0	20.4	30.3	30.0	21.9
51.25	18.9	19.4	32.2	32.0	30.0	28.9	23.1	23.7	23.8	24.1	30.6	30.6	20.1	20.6	19.9	19.7	20.6	21.1	21.5
50.50	31.3	32.0	32.0	17.1	17.6	17.2	24.0	23.2	16.8	22.8	22.7	17.9	16.8	19.3	28.7	19.2	18.1	18.5	19.6
49.75	17.6	32.0	31.3	17.3	17.1	17.9	24.8	23.1	17.6	19.5	19.1	18.5	18.1	18.9	19.4	19.4	18.7	17.2	23.7
49.00	32.9	32.4	19.5	19.1	18.6	18.6	18.7	18.8	18.0	19.7	19.9	19.7	18.5	18.3	18.9	18.7	17.5	18.5	18.2
48.25	31.9	21.0	19.5	17.1	16.5	24.2	17.4	15.0	15.7	16.8	17.6	17.8	16.9	16.6	15.8	18.4	19.0	19.7	19.4
47.50	32.5	30.4	31.4	17.2	15.8	16.1	15.7	14.9	20.8	21.0	13.6	13.4	19.5	18.8	19.6	21.0	17.6	20.1	19.4
46.75	32.4	24.5	24.8	15.0	14.6	11.4	15.6	16.3	15.1	14.6	17.4	16.3	17.3	13.8	15.5	17.8	19.6	19.4	18.2
46.00	24.7	23.7	23.3	21.7	17.3	14.2	16.1	21.3	18.2	18.3	14.8	16.2	18.9	16.8	16.8	18.4	25.1	25.0	25.5

Anhang A4.5 Süd – Azimut = 180°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	938.9	943.7	947.8	948.9	951.6	952.7	915.0	917.4	951.6	957.1	951.9	920.2	923.8	925.6	956.5	956.4	961.3	958.9	956.8
55.75	899.2	938.1	939.4	939.4	941.7	941.3	915.7	918.0	919.3	916.6	915.6	918.2	950.6	951.4	958.2	925.0	923.1	924.5	920.3
55.00	899.8	899.3	933.5	934.5	907.8	910.0	909.5	914.4	913.2	914.5	914.9	915.7	920.8	922.0	922.1	920.5	920.3	919.0	918.8
54.25	901.6	898.6	899.1	900.2	903.0	910.6	908.5	908.9	909.7	911.2	910.4	910.9	911.6	913.1	916.5	918.2	917.9	922.1	919.2
53.50	933.7	936.1	903.4	905.3	907.2	909.1	910.1	909.2	908.6	910.1	910.6	910.8	911.2	911.4	914.1	916.4	920.0	922.2	922.6
52.75	937.7	897.5	901.1	900.4	903.4	903.7	906.6	906.5	906.9	910.2	910.7	911.5	911.1	911.4	914.4	915.8	917.2	919.2	921.0
52.00	894.7	933.6	896.6	898.7	903.2	907.9	910.4	911.8	912.1	910.8	908.0	906.7	905.5	906.4	910.4	913.4	914.6	914.5	915.3
51.25	896.6	898.4	896.4	899.2	904.5	909.8	917.6	913.3	914.4	912.9	910.6	922.7	926.1	923.8	925.5	918.0	919.2	917.9	916.8
50.50	930.2	932.2	937.2	940.1	939.4	910.1	907.8	908.0	926.0	912.7	929.3	935.7	915.0	925.0	922.4	923.6	922.1	921.4	918.8
49.75	941.4	933.1	937.5	938.3	938.7	947.8	901.8	922.6	931.5	936.0	935.5	937.7	932.1	931.3	931.3	928.3	929.2	925.3	923.2
49.00	940.2	944.0	933.9	949.6	950.1	950.7	929.0	933.6	934.2	930.8	931.2	932.9	936.7	952.4	939.3	963.4	956.7	919.5	922.0
48.25	948.5	928.7	930.9	934.4	956.1	923.7	936.1	930.5	933.6	934.2	932.0	950.6	953.4	949.4	951.2	963.6	957.1	914.2	915.9
47.50	928.7	931.9	933.0	935.3	941.1	931.4	935.6	954.3	966.4	971.4	971.2	977.9	980.7	979.9	972.4	959.2	943.2	934.7	914.2
46.75	930.7	954.5	933.2	950.5	963.0	969.5	971.7	975.8	988.6	989.8	986.9	977.9	976.5	972.7	963.4	951.7	938.0	933.0	914.4
46.00	958.9	952.3	963.5	958.9	978.3	986.3	967.2	966.9	966.1	967.5	956.1	951.7	950.1	946.3	944.9	963.3	956.0	951.5	952.4

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	8.9	8.6	8.8	9.0	9.4	9.4	19.3	21.8	14.2	10.0	9.8	17.8	20.8	21.2	14.3	13.4	10.9	7.6	6.7
55.75	16.6	8.5	9.2	9.6	9.9	9.8	19.3	22.2	20.8	18.1	20.1	20.2	14.5	14.6	8.9	15.0	15.1	15.0	14.6
55.00	16.8	16.9	10.0	10.2	16.7	16.5	18.6	23.3	20.9	18.3	19.0	18.1	16.2	16.1	15.6	16.5	17.0	17.5	18.5
54.25	16.8	17.8	18.1	18.4	18.5	17.3	19.2	24.7	24.3	22.0	21.1	21.9	23.5	19.6	17.8	19.8	20.7	21.6	21.6
53.50	10.8	10.8	19.4	21.6	23.1	24.3	23.9	26.1	26.7	26.4	25.6	24.5	24.2	24.3	23.3	23.1	22.2	22.7	22.3
52.75	11.2	21.3	22.5	26.1	27.1	27.4	27.0	26.9	27.1	26.9	26.2	25.4	25.0	24.1	23.8	24.3	23.5	23.5	23.4
52.00	22.9	17.0	26.0	26.5	27.4	27.5	26.6	25.6	25.6	25.1	25.5	25.4	25.4	24.1	24.3	24.9	24.4	24.4	24.4
51.25	24.3	24.8	26.4	27.0	26.4	24.7	23.1	24.6	24.7	25.0	25.5	22.2	20.8	21.0	20.4	22.8	24.1	24.4	23.8
50.50	17.5	18.6	19.5	18.7	18.6	24.4	25.0	24.1	20.3	23.6	20.3	19.1	21.8	19.8	20.0	19.2	19.8	21.3	22.8
49.75	15.4	17.9	18.2	17.6	17.8	15.2	25.9	21.9	20.3	19.8	19.9	19.7	19.7	20.1	19.9	19.5	19.5	20.4	22.0
49.00	17.0	16.4	19.0	15.5	16.0	16.0	21.4	21.3	19.8	21.1	21.3	21.3	19.6	15.5	19.8	13.5	14.8	23.2	23.8
48.25	17.6	21.3	20.4	20.1	15.1	22.1	18.9	20.9	20.8	21.6	22.2	18.8	18.0	19.3	18.7	14.0	16.4	24.4	25.3
47.50	21.3	20.9	20.7	20.6	19.3	22.1	22.2	17.7	18.2	17.0	16.9	15.5	14.9	14.0	14.8	17.3	19.9	21.3	25.3
46.75	21.5	15.4	20.5	17.7	17.0	16.1	14.3	15.0	12.0	12.3	15.5	13.8	14.9	16.7	18.5	20.7	21.7	21.2	24.2
46.00	16.8	16.6	15.0	18.4	15.4	12.3	18.4	18.5	16.3	15.8	17.5	18.1	19.8	19.1	19.9	14.7	16.5	16.5	16.9

Anhang A4.6 Süd-West – Azimut = 225°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	918.7	921.3	924.6	929.9	933.4	881.4	877.9	929.3	933.3	936.0	940.9	941.5	932.1	938.4	938.0	938.2	938.3	891.2	887.0
55.75	911.5	916.8	923.1	928.2	932.0	934.5	872.8	924.2	923.9	937.1	928.0	928.1	934.5	934.9	936.7	892.3	890.7	891.8	886.3
55.00	915.2	917.9	921.8	923.2	925.4	931.1	865.1	922.1	930.8	933.3	937.3	937.1	885.0	886.8	887.0	888.8	888.0	887.0	886.5
54.25	917.2	919.5	921.7	922.5	925.5	926.1	927.8	913.1	928.7	929.2	931.8	930.8	932.7	880.7	882.2	929.2	930.8	932.8	930.9
53.50	874.0	919.0	918.0	919.9	920.1	922.5	921.8	922.0	922.5	871.0	925.2	927.5	929.2	919.8	921.7	923.6	925.5	887.1	929.2
52.75	869.5	873.7	873.4	873.7	921.4	873.7	922.7	874.5	874.4	889.0	921.6	919.1	921.2	919.3	920.8	921.1	924.3	924.5	923.7
52.00	869.1	869.8	870.8	871.2	872.9	923.6	874.7	914.4	874.6	911.2	874.2	923.2	926.1	912.6	916.9	918.7	922.9	917.1	920.9
51.25	927.6	928.6	929.4	872.9	874.9	880.3	900.2	899.8	901.2	926.6	924.8	923.2	923.1	921.5	921.6	921.3	922.6	919.9	923.1
50.50	875.1	876.5	925.1	929.9	925.9	929.3	929.8	928.7	928.9	928.7	928.2	928.8	924.7	924.8	879.7	915.9	921.2	924.3	921.2
49.75	929.3	863.0	867.6	926.3	927.8	925.0	926.7	928.5	929.3	929.6	928.6	930.3	926.1	926.6	924.6	925.7	928.0	925.9	921.2
49.00	862.7	865.9	923.9	925.8	928.5	926.6	928.8	931.1	929.0	927.4	923.1	918.5	920.7	920.5	927.7	926.7	929.5	925.5	927.1
48.25	918.5	921.9	933.3	936.5	937.7	924.7	924.2	925.5	943.2	943.0	939.6	939.7	939.8	940.2	941.9	939.4	931.6	920.0	922.9
47.50	918.8	933.1	874.6	936.5	927.1	944.3	949.6	954.3	935.4	939.9	966.6	968.0	966.7	938.5	930.9	923.8	938.4	930.2	930.8
46.75	921.2	933.0	921.4	951.2	962.1	969.2	941.3	947.2	957.5	959.5	956.6	946.4	944.9	963.5	956.2	946.8	935.3	931.7	930.9
46.00	938.4	931.0	942.3	962.3	953.2	956.0	957.0	954.8	956.5	959.0	949.9	947.0	945.3	945.1	944.6	936.8	927.8	926.4	924.9

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	8.6	8.5	8.4	8.4	8.7	21.5	26.7	19.3	16.6	12.9	9.5	10.0	16.7	17.9	17.4	16.9	14.7	19.8	19.9
55.75	9.4	9.1	8.7	9.1	9.3	9.0	26.4	19.7	16.8	11.2	15.4	15.8	15.8	17.0	12.5	20.8	21.0	21.5	21.7
55.00	8.9	9.1	9.5	9.9	10.0	9.7	25.2	20.0	14.0	11.9	11.7	11.4	21.7	21.8	21.8	22.4	22.8	23.5	24.7
54.25	9.6	10.1	10.7	11.2	11.4	11.4	12.9	20.9	17.5	14.9	13.8	14.9	16.3	24.7	23.5	16.7	18.0	19.7	20.2
53.50	21.8	11.5	13.3	15.3	16.7	17.6	17.7	19.3	18.8	30.3	18.4	17.7	17.5	20.1	20.1	21.3	21.0	29.0	19.5
52.75	23.5	25.9	27.9	31.0	19.5	31.7	21.0	32.0	32.1	27.0	19.7	19.7	19.4	20.3	20.8	21.0	21.2	21.0	21.0
52.00	28.2	30.2	31.4	31.7	31.9	21.0	32.0	22.1	30.6	22.1	31.3	21.7	21.9	23.4	21.7	21.9	21.3	22.0	22.2
51.25	20.0	20.9	21.6	33.4	32.7	30.3	24.0	24.9	25.0	19.5	20.4	21.0	20.9	21.5	21.1	20.5	21.2	22.0	21.6
50.50	32.3	33.0	19.9	19.1	19.9	19.9	19.7	18.9	18.9	18.8	19.2	19.2	17.6	20.5	29.4	20.2	18.9	19.3	20.4
49.75	19.3	33.4	32.6	19.7	19.4	20.3	20.7	19.8	19.9	20.0	19.6	18.7	19.2	20.0	20.8	20.8	20.0	18.5	18.3
49.00	34.4	34.2	21.7	21.4	20.9	21.0	20.8	20.9	20.1	20.2	20.0	21.1	19.7	19.1	20.3	20.0	17.3	18.9	18.8
48.25	23.8	23.1	20.4	19.9	18.5	20.9	19.1	19.3	16.7	17.3	18.1	18.8	18.8	18.1	17.6	17.1	18.4	20.9	20.4
47.50	23.4	20.6	32.8	19.7	21.1	17.9	17.8	16.6	21.0	20.1	13.8	14.1	13.7	19.4	20.2	21.6	17.8	20.7	20.3
46.75	22.5	19.4	21.7	16.8	15.3	12.7	16.1	16.5	15.3	14.8	17.7	16.6	17.6	14.8	16.9	19.6	21.8	21.4	19.8
46.00	19.4	19.1	18.3	16.3	17.3	14.8	16.8	17.0	12.9	13.0	15.5	16.6	19.0	17.2	18.3	20.1	21.0	21.2	22.4

Anhang A4.7 West – Azimut = 270°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	834.5	860.7	862.6	866.8	870.3	873.1	876.3	873.3	853.8	844.0	838.0	850.5	874.7	876.0	876.9	880.1	858.8	839.2	840.2
55.75	831.6	830.4	857.3	861.8	864.4	869.0	882.7	870.5	873.8	837.8	850.3	849.3	850.4	850.3	852.1	853.8	837.7	839.4	840.0
55.00	832.0	830.1	853.1	861.7	862.9	869.1	868.2	881.7	873.0	876.6	874.9	846.5	847.9	847.8	849.4	844.7	848.4	848.0	839.7
54.25	831.2	858.5	860.8	872.5	863.5	862.9	862.9	862.6	867.8	868.3	869.9	842.4	843.2	844.2	873.2	867.9	865.9	873.7	875.9
53.50	858.1	859.9	860.5	862.8	872.7	861.4	857.8	859.0	859.0	836.6	838.1	839.1	837.3	837.3	838.4	838.8	842.0	855.5	856.9
52.75	858.9	857.4	857.6	869.4	858.1	858.6	857.9	857.5	858.6	832.1	830.1	830.7	832.0	831.6	830.0	868.3	833.5	834.2	847.9
52.00	826.0	823.2	823.5	824.2	824.5	854.3	856.4	831.9	832.7	830.3	864.2	826.6	828.5	828.6	832.0	834.9	831.1	831.5	830.6
51.25	820.8	822.2	823.9	824.7	824.5	854.4	860.3	873.6	833.4	871.9	870.3	868.4	868.0	831.1	832.4	865.3	866.5	864.6	866.7
50.50	824.5	826.8	830.9	833.1	832.3	833.3	830.4	874.2	875.8	876.5	877.5	878.6	873.9	831.6	865.3	865.1	872.0	871.8	870.1
49.75	830.9	830.4	834.1	836.4	836.7	834.3	829.8	875.7	878.9	880.2	882.6	886.0	881.6	877.9	875.3	873.3	881.5	875.6	872.0
49.00	836.2	837.4	837.8	837.4	834.9	834.5	880.4	882.1	883.5	884.9	882.5	882.0	883.3	882.5	882.8	880.9	881.8	871.6	872.8
48.25	839.8	840.2	841.8	841.1	839.2	878.6	880.6	883.2	884.3	887.8	882.6	881.3	883.7	885.1	882.9	886.4	878.7	825.4	867.0
47.50	843.2	846.2	847.0	847.3	848.2	885.6	891.2	890.6	877.2	867.3	864.9	863.0	888.9	896.4	893.4	889.3	881.6	863.7	864.6
46.75	846.1	882.7	847.8	858.5	865.2	865.4	867.1	868.4	867.1	867.1	898.6	866.4	863.6	860.9	851.5	840.0	828.4	866.4	866.6
46.00	852.4	851.0	856.2	852.1	870.7	899.8	857.5	860.3	858.9	857.0	890.4	888.2	887.2	885.8	841.1	836.8	878.1	866.6	865.6

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	21.4	15.6	16.8	18.3	19.5	20.9	22.6	24.9	28.2	26.5	25.8	25.6	25.5	26.2	24.8	23.4	25.5	25.5	24.9
55.75	21.9	21.8	17.4	18.2	19.3	20.2	22.9	26.9	24.3	27.0	27.5	29.6	30.9	29.4	25.1	22.7	25.1	25.6	25.5
55.00	22.5	22.5	17.7	17.7	19.1	19.8	23.5	23.9	22.5	19.6	20.7	26.7	24.2	23.6	22.9	24.2	24.5	24.6	27.0
54.25	23.0	17.1	17.1	14.7	17.9	19.5	23.7	28.7	26.0	23.2	24.0	30.5	33.2	30.0	20.9	25.3	27.3	27.5	28.5
53.50	17.7	19.1	21.4	23.0	23.3	27.7	29.0	31.2	30.6	35.5	35.2	34.9	34.7	36.1	35.6	35.2	34.8	32.7	32.6
52.75	19.1	24.3	27.1	28.1	30.9	31.9	32.0	31.8	32.0	37.3	36.8	36.7	37.1	37.2	37.1	29.1	37.1	37.2	33.8
52.00	33.3	37.2	39.1	39.3	39.2	33.0	31.7	35.7	36.5	36.1	28.2	37.2	38.1	37.5	37.6	37.9	38.1	37.9	37.9
51.25	38.3	39.5	40.9	40.3	39.0	31.1	29.6	26.6	35.9	27.6	28.2	29.3	29.2	36.1	35.8	28.1	28.4	29.2	29.5
50.50	38.4	37.2	38.1	37.1	38.1	37.6	37.6	27.9	28.3	28.7	28.8	28.0	25.9	36.4	28.6	27.1	26.2	26.9	27.9
49.75	40.7	38.9	37.3	37.5	36.8	37.5	39.0	29.2	29.4	29.9	29.3	28.3	27.6	27.5	28.1	27.2	25.3	26.8	28.0
49.00	41.9	41.5	39.7	39.4	38.5	39.0	30.2	30.1	29.3	30.0	29.9	29.5	28.6	27.0	27.7	26.7	26.5	30.1	30.0
48.25	40.9	40.6	39.4	38.6	36.8	29.1	27.4	28.0	29.3	29.9	30.4	30.7	30.0	29.4	28.4	26.0	27.0	38.7	31.1
47.50	39.6	39.3	39.9	38.6	36.1	27.6	27.8	26.5	28.6	29.8	30.6	31.4	25.5	23.7	22.3	23.8	24.8	30.3	30.9
46.75	38.4	30.1	38.0	34.0	32.2	29.7	27.7	27.9	25.5	24.7	21.8	27.3	29.4	31.9	34.0	35.3	38.7	29.5	30.5
46.00	38.2	37.7	38.2	35.3	27.9	17.4	32.3	32.8	28.9	28.0	23.0	21.5	26.8	25.9	35.8	37.5	27.8	30.0	31.0

Anhang A4.8 Nord-West – Azimut = 315°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	687.9	689.2	688.1	689.5	694.0	691.8	702.8	698.6	690.4	699.5	700.2	697.6	690.2	691.0	702.4	704.9	705.4	704.7	706.6
55.75	685.0	684.0	685.4	687.7	689.3	690.0	690.7	697.0	701.0	699.9	701.0	688.8	688.5	688.3	691.2	693.4	689.3	690.3	693.0
55.00	685.6	683.0	682.5	684.1	685.0	686.1	686.2	679.2	689.5	688.3	690.7	683.2	684.8	685.6	687.5	704.9	687.1	699.6	692.3
54.25	684.1	683.7	683.0	682.4	679.3	684.4	685.9	684.6	677.7	683.5	683.2	681.3	681.1	680.9	683.6	683.7	685.8	687.8	690.6
53.50	679.9	683.7	683.2	684.1	681.7	680.7	682.1	684.0	672.0	672.7	679.0	680.0	677.3	678.4	679.4	679.5	682.4	681.8	681.4
52.75	685.4	680.6	681.7	679.5	679.3	679.8	679.9	669.5	668.6	674.3	671.5	671.3	672.3	672.0	670.5	671.3	673.8	673.9	679.4
52.00	674.8	670.2	675.3	676.4	677.9	677.7	670.2	669.2	669.7	667.2	667.2	666.2	668.6	672.2	674.5	677.2	673.4	673.9	672.3
51.25	666.4	667.4	668.7	674.2	674.2	676.3	672.4	670.0	670.1	670.4	672.2	671.1	670.7	671.5	676.1	673.8	672.2	671.7	671.6
50.50	669.1	670.2	672.8	675.0	675.0	678.3	673.4	671.1	670.4	671.4	675.2	680.2	677.6	675.1	671.5	671.4	672.5	673.6	670.7
49.75	671.9	673.7	674.3	675.8	673.4	671.9	673.1	669.5	672.4	673.6	682.4	683.2	680.4	679.2	679.1	676.4	674.1	672.6	673.5
49.00	675.9	678.9	676.1	675.1	673.1	671.3	671.7	680.3	676.3	681.6	678.4	681.9	680.4	680.8	682.0	681.2	670.0	662.9	671.8
48.25	678.5	678.8	684.5	678.7	675.1	672.1	685.1	687.0	687.6	685.5	682.6	678.0	679.8	679.0	684.0	673.7	666.9	658.9	662.5
47.50	683.6	688.2	683.4	683.5	685.2	693.6	701.3	699.3	717.5	713.6	709.9	709.8	700.1	712.1	701.6	688.7	676.6	668.3	657.4
46.75	691.5	688.3	687.9	705.0	714.9	715.2	715.1	722.4	728.5	727.3	724.3	716.2	710.6	704.2	694.6	685.4	676.1	670.4	672.2
46.00	699.6	694.3	696.9	706.1	726.1	722.7	704.3	707.8	706.8	703.8	688.9	677.4	674.7	673.4	689.0	678.4	675.1	663.2	670.9

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	18.1	18.5	19.0	19.5	19.7	21.7	24.2	27.2	27.8	22.9	21.4	23.1	29.7	30.3	27.3	27.0	25.5	20.5	19.5
55.75	18.5	18.7	19.2	19.8	20.2	21.5	26.5	26.9	24.5	22.1	24.7	28.9	30.9	29.4	25.1	22.7	22.0	22.0	22.2
55.00	19.0	19.3	19.8	20.3	21.0	21.7	25.5	31.0	25.7	23.9	24.8	26.2	24.2	23.6	22.9	19.2	22.9	21.0	25.6
54.25	19.4	19.6	19.9	19.9	21.5	20.9	25.2	31.4	31.2	27.1	27.8	30.4	33.2	30.0	26.4	29.2	30.7	32.6	33.2
53.50	20.5	21.1	23.8	27.2	29.8	30.4	30.3	32.5	35.5	35.5	34.9	34.9	34.7	36.1	35.6	35.2	34.8	35.2	35.2
52.75	21.6	27.4	29.9	34.0	35.1	35.0	33.9	36.4	37.3	36.7	36.5	36.7	37.1	37.2	37.1	37.1	37.1	37.2	35.5
52.00	29.8	32.5	33.3	34.8	35.8	35.2	35.5	35.7	36.5	36.1	35.5	37.2	38.1	36.9	37.6	37.9	38.1	37.9	37.9
51.25	34.1	34.4	35.6	34.8	35.0	33.3	33.5	35.2	35.9	35.4	36.2	36.8	36.6	36.1	35.3	35.1	35.6	36.5	36.8
50.50	33.6	33.8	34.1	33.0	34.5	33.4	35.7	35.1	35.1	34.9	34.7	33.9	33.4	36.0	36.4	34.7	32.5	32.1	33.4
49.75	34.6	34.0	33.6	34.4	34.7	36.7	38.1	36.6	35.6	36.0	34.5	34.3	34.2	34.1	33.9	33.5	32.3	31.6	31.6
49.00	36.0	36.2	34.8	37.3	38.5	39.0	37.7	35.0	34.8	34.4	34.6	34.8	33.2	31.9	32.7	31.6	33.3	35.7	34.2
48.25	36.5	36.3	35.5	36.6	36.8	37.5	32.3	32.7	32.8	33.2	33.5	34.1	33.9	34.8	33.9	34.1	34.6	35.9	36.7
47.50	37.2	36.6	37.5	37.4	35.9	34.1	33.1	32.3	30.2	29.8	30.6	30.7	31.5	28.6	29.3	29.4	30.8	34.0	36.6
46.75	38.4	38.2	38.0	32.6	32.2	29.7	27.7	27.9	25.5	24.7	29.2	27.2	29.3	31.1	31.4	31.6	33.5	33.7	33.8
46.00	38.2	37.7	37.1	35.3	27.9	24.9	32.3	32.8	28.6	27.2	30.9	32.5	35.0	33.2	32.2	33.7	34.3	35.9	35.2

Anhang A5 Meteorologische Daten - kalte Tage

Anhang A5.1 Nord – Azimut = 0°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	317.2	319.2	319.6	322.5	324.8	326.9	328.4	326.6	330.5	326.2	325.1	324.7	320.4	321.3	323.0	324.8	325.5	323.7	326.2
55.75	311.4	311.8	313.4	317.3	318.0	319.5	321.1	323.1	324.5	325.2	325.2	324.3	322.2	320.9	324.8	320.4	316.1	317.5	320.3
55.00	309.9	309.5	308.6	310.9	311.7	313.1	313.7	315.0	313.9	314.4	317.8	316.6	317.3	319.0	321.2	319.4	316.3	316.5	317.8
54.25	305.3	304.3	304.4	304.9	306.8	305.1	305.7	305.7	305.6	307.3	308.5	308.3	301.6	310.8	312.6	314.7	314.3	309.2	309.6
53.50	301.7	301.2	300.4	300.7	299.3	298.8	299.9	301.4	300.3	299.9	299.6	300.3	299.7	295.6	304.0	306.3	305.1	305.3	307.8
52.75	297.5	294.3	295.1	294.1	293.6	294.7	295.0	293.9	292.6	294.9	290.0	290.8	292.1	293.3	294.0	296.0	297.2	297.5	297.3
52.00	289.3	286.9	287.4	288.0	288.8	288.7	289.0	289.6	290.5	286.7	284.0	284.9	285.5	286.1	280.2	291.2	287.5	288.4	287.7
51.25	280.0	280.5	281.2	282.6	282.9	284.9	288.9	285.6	283.2	284.3	283.2	283.0	276.3	276.7	277.3	276.4	284.0	283.8	284.2
50.50	278.7	269.9	281.7	283.4	283.3	283.3	280.1	280.0	282.0	282.6	284.0	283.2	274.9	274.1	272.4	272.3	273.0	274.0	272.2
49.75	276.0	279.5	281.5	282.0	282.0	279.1	278.1	277.2	279.5	281.3	284.9	280.2	276.7	275.9	274.5	271.4	271.1	270.5	276.9
49.00	276.9	280.1	279.3	282.4	279.9	278.6	278.2	280.3	281.3	281.8	280.9	280.9	281.2	273.0	274.6	271.8	266.2	270.9	272.7
48.25	279.2	279.7	282.7	282.6	281.6	279.6	281.5	282.1	282.2	281.2	278.8	278.5	277.1	273.7	273.2	268.9	263.0	260.2	269.5
47.50	280.3	283.3	280.6	282.2	285.1	286.6	288.8	290.5	299.2	300.1	297.2	297.0	293.4	289.8	281.7	273.9	265.2	260.5	259.9
46.75	282.5	280.0	282.1	290.1	295.4	292.4	293.1	295.6	302.4	302.6	300.5	297.7	295.0	287.7	282.6	278.6	266.5	259.0	261.4
46.00	284.0	281.1	284.0	295.2	299.1	298.7	285.2	287.8	287.3	264.2	277.7	271.9	268.6	272.0	278.2	273.3	268.7	267.0	266.6

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	9.6	9.5	9.5	9.5	9.6	9.8	7.8	6.3	7.8	8.6	10.0	10.5	6.9	6.1	7.0	6.8	7.1	7.5	7.4
55.75	9.6	9.6	9.6	9.8	9.9	10.2	8.1	5.6	6.5	9.1	9.7	8.6	7.0	6.5	9.4	9.8	8.1	8.1	8.1
55.00	10.3	10.3	10.3	10.4	10.4	10.7	9.1	5.3	8.0	9.2	9.9	9.6	10.0	10.0	10.3	10.1	10.0	10.5	10.2
54.25	10.6	10.5	10.6	10.8	10.8	11.2	10.0	5.8	6.7	8.4	9.5	8.8	5.7	10.1	11.2	9.5	8.1	6.5	5.7
53.50	10.4	10.6	10.3	9.3	8.0	7.2	8.5	7.3	6.1	5.5	5.1	5.4	6.9	5.9	8.3	7.5	7.0	6.6	6.9
52.75	10.5	10.1	9.2	4.5	5.0	5.1	5.4	5.5	4.9	4.8	5.5	6.0	6.4	7.4	7.4	7.4	7.6	7.5	7.7
52.00	9.6	6.6	5.3	5.8	4.8	4.5	4.3	5.0	4.4	4.3	6.0	6.8	6.7	7.4	5.3	7.6	8.1	8.0	7.9
51.25	6.6	6.3	6.3	6.6	6.3	4.8	4.4	5.0	4.8	5.1	6.5	7.4	4.6	4.1	4.1	4.2	7.5	8.2	8.6
50.50	5.8	3.7	5.1	5.1	6.3	5.7	6.3	6.5	5.7	5.8	5.8	5.5	2.8	3.6	3.9	3.2	3.2	4.6	6.4
49.75	5.9	5.6	5.5	5.7	5.4	6.8	7.8	7.0	6.6	6.7	6.6	4.5	3.6	3.8	3.4	3.0	3.6	4.8	7.7
49.00	6.7	6.6	6.1	6.9	7.1	8.1	7.9	6.8	6.0	6.2	6.4	7.1	6.6	3.3	3.4	3.2	4.3	8.7	8.5
48.25	7.0	6.9	6.4	6.6	6.4	8.1	5.4	5.3	5.4	6.0	7.5	8.6	8.0	5.8	4.5	4.0	4.9	7.1	9.6
47.50	6.3	6.4	7.7	7.3	6.8	6.7	6.9	7.1	4.5	3.1	3.6	3.8	3.8	2.5	1.5	2.2	3.9	7.2	8.2
46.75	7.4	8.2	8.3	6.5	6.2	2.2	-0.2	-1.9	-3.5	-3.4	1.7	0.8	2.8	3.2	4.3	7.1	8.1	7.9	8.6
46.00	6.6	8.4	7.8	4.7	-1.6	-3.8	5.2	5.8	1.1	-4.0	4.6	8.1	10.5	9.0	7.5	8.3	9.1	10.3	10.3

Anhang A5.2 Nord-Ost – Azimut = 45°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	691.1	692.5	694.3	696.8	694.2	697.9	702.6	704.4	699.8	702.7	699.6	698.3	694.7	697.6	699.5	704.2	705.1	704.7	707.1
55.75	688.6	690.2	691.1	694.0	689.0	692.5	689.2	699.8	701.8	702.8	694.7	701.7	701.8	699.7	694.3	696.1	696.9	701.2	705.1
55.00	690.8	689.2	684.1	692.3	690.7	690.0	689.7	693.9	690.3	690.2	694.1	694.4	695.7	696.9	701.6	705.0	687.1	693.3	696.1
54.25	686.3	687.9	686.0	688.0	675.7	674.8	686.5	689.8	689.1	687.4	686.8	688.2	689.6	690.0	691.6	700.1	701.0	691.7	694.0
53.50	682.4	684.8	688.5	686.4	673.4	682.1	679.6	683.2	684.0	686.1	685.9	684.8	683.1	687.4	680.8	680.4	681.5	682.4	684.6
52.75	684.5	685.6	683.8	682.9	676.4	678.5	679.1	682.2	675.5	682.2	677.3	677.3	679.2	678.4	679.8	675.8	682.6	675.7	682.2
52.00	680.2	676.1	672.7	671.6	675.3	676.5	680.5	681.6	681.9	667.4	663.8	673.4	673.0	673.6	675.4	678.7	674.0	679.5	674.4
51.25	668.5	663.7	673.2	665.7	666.5	671.9	684.4	664.1	662.4	677.3	674.8	675.9	674.2	676.0	677.3	675.6	673.6	672.4	673.9
50.50	671.8	667.0	670.9	668.6	669.1	673.9	668.7	661.0	661.9	677.6	676.3	678.8	676.4	675.8	672.7	673.5	675.4	675.7	673.2
49.75	664.4	668.0	668.6	669.6	670.6	668.6	670.4	667.0	664.7	671.9	679.6	684.6	680.0	678.0	676.7	676.4	675.9	673.6	650.0
49.00	664.4	668.3	667.5	670.6	670.0	670.3	672.0	675.0	675.4	675.5	672.5	679.2	680.0	680.8	680.7	677.1	670.9	650.7	653.8
48.25	668.1	670.2	676.3	677.9	679.1	672.6	675.1	676.4	682.8	683.3	678.1	676.9	678.6	682.6	682.1	678.7	669.5	663.8	651.0
47.50	676.9	682.5	679.6	679.2	692.1	693.3	690.8	701.8	717.8	708.4	712.0	711.2	707.7	689.2	700.9	686.8	676.1	648.1	649.0
46.75	687.1	681.7	683.5	697.1	705.6	695.6	702.3	712.2	721.6	724.9	720.1	707.7	707.7	711.5	702.1	684.9	673.6	667.7	670.0
46.00	691.7	689.2	690.5	707.5	726.0	707.4	687.8	709.0	703.4	703.4	682.4	673.2	669.1	673.8	680.7	679.3	671.2	668.9	670.8

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	9.4	9.4	9.5	10.1	8.4	8.6	7.8	6.3	6.3	8.6	8.2	7.9	4.3	3.3	4.4	5.6	6.3	7.5	7.4
55.75	9.6	9.6	9.6	9.8	8.4	8.9	5.4	5.6	6.5	9.1	7.3	8.8	7.0	6.5	6.6	7.4	7.3	8.1	8.1
55.00	10.3	9.6	8.7	10.8	10.0	8.9	8.5	5.3	7.1	8.0	8.3	8.1	8.3	8.3	10.3	10.1	7.0	8.6	8.2
54.25	9.7	9.8	9.9	10.1	6.6	6.5	9.1	5.8	6.7	7.0	7.9	7.1	5.7	8.1	8.8	9.5	8.1	4.8	3.9
53.50	8.8	9.1	10.3	9.3	4.7	6.4	6.3	5.7	5.0	5.5	5.1	5.4	5.4	5.9	5.6	4.0	3.8	3.6	3.4
52.75	9.5	10.1	9.2	4.4	2.9	3.0	3.8	4.7	2.4	4.8	5.5	6.0	6.0	6.2	6.6	4.2	6.3	4.0	6.2
52.00	8.8	6.6	3.7	3.3	3.2	3.3	4.3	5.0	4.4	1.7	2.5	5.7	5.1	5.2	5.3	5.6	6.4	8.1	6.6
51.25	5.8	3.5	5.1	2.5	2.4	2.4	4.4	0.0	0.3	3.7	4.8	5.5	4.6	4.1	4.1	4.2	5.1	6.0	6.8
50.50	3.6	1.7	1.4	0.8	1.2	1.7	2.5	0.1	-0.9	3.6	4.2	4.4	2.8	3.6	3.9	3.2	3.2	4.6	6.4
49.75	0.9	0.8	0.8	1.7	1.3	1.7	2.3	2.2	0.4	3.1	4.4	4.5	3.6	3.8	3.4	3.0	3.6	4.8	0.1
49.00	1.0	1.0	1.3	2.2	2.9	3.1	2.5	1.7	1.7	2.7	3.0	5.7	5.0	3.3	3.4	3.2	4.3	1.8	1.3
48.25	2.2	1.8	1.5	2.1	2.1	3.3	0.4	0.4	3.5	3.6	4.9	5.1	5.8	5.8	4.5	4.0	4.9	7.1	2.4
47.50	2.7	2.2	3.2	3.5	5.6	5.2	2.5	5.2	3.0	-0.7	0.2	0.5	1.0	-7.1	1.5	2.2	3.9	1.5	2.1
46.75	3.8	4.1	4.8	2.5	2.0	-6.9	-7.6	-4.9	-8.4	-7.3	-3.0	-5.1	-1.8	3.2	4.3	6.1	7.4	7.9	8.6
46.00	4.4	4.1	3.4	1.4	-1.6	-10.5	-3.5	3.9	-3.1	-4.0	-0.2	4.0	6.7	6.2	5.4	8.3	8.5	8.0	8.3

Anhang A5.3 Ost – Azimut = 90°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	872.7	874.7	876.9	880.8	882.1	871.6	870.5	866.4	872.1	871.5	869.7	869.2	873.9	875.4	879.5	882.2	882.0	881.0	879.9
55.75	869.8	873.6	875.7	877.8	878.8	873.7	870.3	872.0	870.5	869.9	866.8	868.8	869.0	873.1	876.2	878.6	879.7	875.6	877.5
55.00	869.4	872.0	872.2	877.8	878.9	882.6	871.4	873.1	871.3	873.1	874.1	867.3	875.0	870.5	875.2	870.6	866.8	872.9	870.1
54.25	871.2	873.7	875.5	874.1	878.9	878.6	869.5	866.0	869.6	880.2	871.9	879.8	870.0	880.4	866.3	871.7	871.1	881.1	882.1
53.50	871.0	870.2	871.7	874.0	872.3	873.1	869.7	866.5	870.8	872.0	872.7	871.5	872.3	865.3	867.2	819.6	821.2	821.2	879.5
52.75	869.5	867.5	866.8	865.2	861.0	861.1	860.9	860.2	863.4	863.4	868.9	862.5	864.1	869.8	867.1	869.4	816.0	816.3	815.7
52.00	855.8	854.9	854.0	854.0	854.8	863.4	870.3	872.2	861.6	862.3	860.1	859.2	858.5	860.3	865.5	867.4	867.3	810.7	816.4
51.25	849.9	849.9	851.3	854.0	857.6	861.7	867.9	875.4	866.0	866.9	866.7	865.3	866.0	865.9	866.4	867.1	872.1	872.4	860.0
50.50	852.7	856.0	868.0	869.3	865.1	869.1	870.4	869.9	872.1	872.7	874.6	876.7	873.3	870.6	868.7	861.0	877.6	879.2	878.4
49.75	862.6	865.3	869.8	874.2	871.1	870.1	869.2	873.5	876.0	878.7	881.7	886.4	882.8	881.4	879.8	878.5	882.3	883.0	881.7
49.00	860.0	862.6	870.2	875.4	876.0	881.4	878.8	880.5	883.9	885.7	883.0	883.1	885.3	885.6	886.0	884.4	881.9	880.0	880.3
48.25	870.9	873.1	881.6	884.9	885.9	878.5	880.8	884.8	886.7	889.2	884.5	883.0	885.5	886.7	883.1	886.4	880.0	873.8	875.9
47.50	871.4	873.0	875.7	886.2	887.6	885.0	889.8	896.9	891.2	896.2	893.7	893.5	889.9	872.9	895.5	888.8	882.3	876.1	875.4
46.75	873.2	871.8	884.8	880.9	886.7	893.8	898.5	902.7	911.3	913.5	911.6	899.9	891.8	876.1	876.3	885.0	878.7	877.2	870.9
46.00	880.4	873.9	890.6	889.7	904.4	907.4	886.5	889.7	872.0	876.1	877.7	890.8	887.5	885.9	887.7	851.2	879.6	873.1	866.1

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	4.8	4.7	4.6	5.6	5.3	2.8	1.1	0.0	1.2	2.9	2.6	1.5	0.7	0.0	1.9	2.0	2.4	2.6	2.3
55.75	4.1	4.9	4.6	5.6	5.3	2.9	2.1	0.8	1.1	2.1	1.4	0.9	-0.3	0.2	1.8	2.9	2.7	2.9	2.8
55.00	4.3	4.9	4.7	4.6	5.5	5.6	2.3	1.5	2.3	2.6	3.0	2.2	3.6	2.4	4.1	3.0	1.8	3.1	1.3
54.25	4.2	4.2	5.0	4.0	4.9	5.3	2.2	0.2	1.3	4.6	2.4	4.8	2.1	5.0	1.9	2.5	2.0	3.6	2.5
53.50	4.5	4.3	4.2	3.8	2.3	1.6	1.8	0.3	1.4	1.0	0.6	0.8	1.5	0.0	0.6	-14.5	-13.7	-14.4	2.6
52.75	5.1	4.7	3.9	0.4	-0.7	-0.7	-0.1	0.0	-0.5	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	1.3	-0.4	1.4	-14.9	-16.0	-16.0
52.00	3.6	1.2	0.1	-0.8	-1.0	1.7	2.6	2.0	-1.3	-1.8	-0.9	-0.2	-0.1	0.2	0.1	0.0	0.2	-15.6	-16.9
51.25	0.8	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-1.2	-2.0	1.3	-1.2	-1.1	-0.1	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-0.2	0.6	-1.8
50.50	-0.9	-1.2	0.1	-1.2	-1.0	-1.3	-0.6	-2.2	-5.1	-5.6	-3.8	-2.1	-2.4	-0.8	-0.2	-3.2	-1.7	-1.7	0.7
49.75	0.9	0.3	-0.5	-0.9	-0.9	-0.5	0.1	-0.5	-1.2	-1.0	-1.5	-0.2	-0.4	-0.7	-0.7	-0.6	-1.0	-0.4	-0.6
49.00	-1.3	-1.3	-0.6	-0.6	-0.7	1.5	-0.6	-0.9	0.1	0.6	0.9	0.4	-1.0	-3.6	0.8	0.5	1.7	2.3	1.6
48.25	-1.5	-1.5	0.7	0.8	0.4	-0.2	-2.5	-2.5	-0.5	0.6	-0.4	0.3	0.7	1.7	0.7	-0.1	0.5	2.0	2.4
47.50	-1.9	-1.8	0.6	1.6	0.5	-0.9	-1.0	0.3	-6.8	-11.1	-10.4	-10.1	-9.1	-11.9	-4.4	-3.2	-1.0	1.9	2.3
46.75	-1.0	-0.5	2.6	-1.1	-1.9	-7.5	-12.5	-15.6	-15.0	-11.5	-6.8	-9.1	-7.2	-8.3	-4.9	-1.5	2.2	2.5	2.1
46.00	-1.1	-0.1	2.6	-3.3	-14.0	-13.2	-6.6	-4.9	-13.7	-13.0	-5.6	2.2	3.8	1.3	0.6	-6.6	1.7	2.1	0.6

Anhang A5.4 Süd-Ost – Azimut = 135°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	918.5	920.8	923.9	929.2	931.7	935.3	930.5	929.5	928.6	938.4	939.5	939.7	943.5	943.1	945.5	942.4	938.6	942.5	942.4
55.75	911.0	919.1	922.5	925.5	929.9	932.4	931.8	935.7	935.9	938.0	936.8	936.3	939.8	934.1	934.2	942.1	942.2	940.8	945.6
55.00	912.3	914.7	919.9	921.1	923.6	930.5	927.9	934.0	929.6	932.1	935.9	936.0	939.1	939.3	942.7	943.2	944.3	942.8	942.2
54.25	915.6	918.1	920.5	922.1	924.9	926.3	918.5	921.5	924.4	929.9	933.4	932.6	934.6	937.7	921.7	919.6	938.9	939.8	921.8
53.50	917.0	920.6	912.7	914.7	915.1	917.7	912.1	911.1	920.3	911.6	913.0	913.9	915.5	913.6	914.9	915.5	934.2	934.9	933.0
52.75	912.3	912.1	913.2	913.5	915.4	912.6	913.3	911.2	910.8	917.8	915.3	913.4	912.2	913.5	916.1	907.3	906.3	908.1	908.9
52.00	924.7	912.5	913.5	913.2	916.0	918.9	922.5	917.1	919.0	915.9	916.0	913.6	916.3	915.4	893.3	911.0	910.5	913.6	912.2
51.25	931.7	931.5	914.8	918.9	919.2	921.2	923.8	924.3	923.7	924.3	922.1	920.4	919.3	918.1	919.6	898.6	900.5	911.2	921.2
50.50	935.8	918.4	923.5	926.8	925.8	928.5	928.9	928.2	928.9	929.4	909.8	930.7	925.0	923.1	902.6	919.4	927.7	925.5	922.5
49.75	918.1	920.3	927.8	928.7	929.2	927.0	926.2	931.3	929.8	934.8	915.4	935.1	931.8	931.4	911.4	930.3	933.0	930.1	926.9
49.00	919.7	924.2	928.0	930.7	932.5	931.6	934.6	937.9	921.8	923.0	920.7	922.8	937.6	937.4	928.6	926.5	931.1	928.6	929.8
48.25	928.2	929.3	933.4	936.5	937.9	934.8	926.6	929.5	936.0	935.0	931.5	931.1	932.0	932.0	934.3	931.4	929.7	925.5	927.5
47.50	929.6	933.2	934.1	936.1	923.4	938.4	943.9	952.6	951.7	955.8	952.3	954.7	966.2	964.7	957.1	951.0	939.0	930.2	930.9
46.75	935.3	933.0	935.2	951.0	947.4	955.5	966.3	967.9	977.2	981.1	968.4	969.6	967.5	964.7	957.3	947.0	935.2	931.2	931.1
46.00	934.1	930.4	939.7	949.9	968.4	973.6	945.8	943.9	947.8	950.4	941.4	937.9	945.1	944.8	945.7	936.8	922.8	918.7	920.1

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	-1.0	-1.4	-1.9	-2.4	-3.0	-3.6	-8.3	-10.0	-8.6	-4.2	-4.3	-5.5	-7.9	-7.4	-6.2	-6.4	-6.4	-3.8	-4.1
55.75	-1.6	-1.0	-1.6	-2.6	-3.1	-3.6	-4.9	-6.1	-4.4	-3.5	-5.0	-5.6	-6.1	-8.1	-6.1	-3.2	-3.3	-3.5	-3.8
55.00	-1.5	-1.8	-2.3	-2.6	-3.0	-3.4	-4.1	-4.9	-4.5	-4.4	-4.7	-4.4	-3.2	-2.5	-2.2	-2.5	-2.7	-3.0	-3.4
54.25	-1.3	-1.6	-2.0	-2.3	-2.5	-2.9	-7.0	-8.5	-9.1	-5.2	-4.7	-7.6	-8.3	-5.2	-7.5	-10.4	-7.7	-9.8	-14.2
53.50	-0.9	-1.3	-4.4	-5.8	-7.0	-7.7	-9.9	-11.2	-11.2	-14.0	-12.4	-12.9	-13.2	-12.2	-11.7	-12.3	-9.2	-9.9	-10.4
52.75	-3.7	-5.5	-7.1	-8.4	-8.7	-10.1	-10.6	-11.0	-11.5	-10.6	-10.4	-10.6	-11.2	-11.0	-11.1	-14.4	-15.3	-15.6	-15.7
52.00	-1.3	-6.1	-6.6	-7.0	-7.6	-8.2	-9.1	-10.8	-11.4	-12.2	-10.8	-10.7	-10.8	-11.0	-17.8	-13.8	-14.9	-15.2	-14.8
51.25	-2.5	-2.1	-8.3	-7.3	-8.0	-10.6	-12.4	-11.5	-12.1	-12.6	-11.8	-11.4	-11.5	-11.5	-11.7	-19.5	-18.4	-13.3	-11.6
50.50	-3.5	-9.6	-9.5	-11.5	-10.2	-10.8	-10.6	-11.1	-12.7	-13.5	-19.9	-13.9	-14.6	-13.0	-17.6	-13.3	-14.6	-13.8	-12.6
49.75	-8.1	-9.0	-10.3	-10.1	-10.3	-9.9	-9.2	-10.5	-11.2	-11.6	-19.1	-13.9	-13.6	-13.0	-21.5	-13.3	-13.5	-14.0	-14.1
49.00	-8.4	-8.5	-9.2	-9.0	-9.2	-9.2	-10.2	-10.7	-18.5	-18.2	-18.8	-15.7	-14.0	-15.6	-20.5	-18.4	-13.0	-11.6	-11.4
48.25	-8.5	-8.8	-9.6	-9.5	-10.8	-10.0	-18.3	-16.5	-16.3	-18.0	-17.3	-15.6	-14.9	-15.3	-16.8	-16.2	-16.0	-10.2	-9.5
47.50	-9.6	-9.8	-8.8	-8.9	-17.6	-13.8	-12.9	-13.0	-21.9	-23.4	-21.7	-21.9	-17.4	-17.3	-17.0	-16.4	-14.2	-10.7	-9.4
46.75	-9.6	-9.2	-8.0	-10.9	-16.6	-21.3	-20.6	-23.1	-24.2	-23.3	-21.1	-18.7	-18.5	-17.6	-15.6	-14.9	-12.4	-11.0	-9.4
46.00	-10.8	-9.1	-9.6	-19.8	-27.0	-28.0	-17.6	-17.8	-25.2	-23.8	-18.4	-14.4	-7.5	-11.5	-12.0	-12.9	-14.9	-14.0	-14.0

Anhang A5.5 Süd – Azimut = 180°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50	
56.50	940.1	943.8	948.6	951.7	955.2	957.2	956.6	956.7	953.3	957.3	958.8	960.0	961.2	963.0	962.4	961.9	961.4	960.1	958.4	
55.75	935.4	938.8	942.3	945.5	948.6	949.5	949.8	951.4	952.3	952.2	954.1	954.1	956.7	958.8	958.2	958.5	958.5	956.9	957.3	
55.00	933.1	935.4	938.4	939.7	941.1	945.1	944.6	947.4	945.9	946.6	949.8	948.5	950.2	952.3	953.2	952.3	952.7	950.8	951.6	
54.25	933.5	935.6	936.8	938.0	940.2	940.8	943.1	941.5	943.0	943.4	946.1	930.3	932.0	948.2	945.7	948.2	949.7	932.7	932.9	
53.50	933.3	936.4	936.2	938.0	938.2	940.3	939.4	938.8	938.7	938.9	931.6	931.1	931.9	928.8	929.0	929.8	932.1	934.9	934.5	
52.75	931.7	932.7	934.4	932.0	937.0	936.7	937.5	935.9	930.7	930.1	933.4	932.9	931.6	929.4	930.0	930.2	931.8	934.3	936.6	
52.00	930.7	931.0	932.3	931.7	933.2	936.9	940.7	937.9	942.4	936.7	935.1	934.2	933.1	932.2	932.3	933.3	930.6	933.3	935.3	
51.25	931.7	931.8	933.6	937.4	938.9	942.9	944.4	946.4	946.1	946.9	943.7	942.6	942.0	939.5	941.6	940.5	940.6	939.8	944.1	
50.50	931.8	936.5	945.7	947.8	946.7	948.7	947.7	948.3	950.3	952.0	953.7	955.3	947.9	944.9	942.7	942.0	951.3	949.2	946.9	
49.75	937.9	940.2	949.3	949.6	949.5	947.3	944.5	952.1	950.8	957.9	956.4	960.4	956.6	956.1	953.3	953.4	956.9	954.0	953.0	
49.00	940.5	944.0	946.7	950.3	950.7	950.4	953.8	958.5	958.1	958.7	957.3	959.5	962.5	963.4	964.9	964.2	957.3	952.3	954.1	
48.25	950.7	949.8	952.9	956.5	958.2	955.5	958.7	962.2	967.0	966.2	963.8	963.2	963.7	964.0	966.6	964.2	957.6	950.1	948.2	
47.50	951.1	954.5	956.1	957.2	963.8	966.1	971.5	976.7	987.9	991.1	988.7	990.6	988.7	988.0	980.8	975.7	964.8	954.8	954.4	
46.75	956.1	954.2	955.6	972.2	981.2	987.9	990.2	994.1	1005.3	1005.3	999.2	999.2	991.9	990.2	986.1	980.6	971.9	962.4	956.7	953.0
46.00	958.0	951.8	963.0	981.6	996.1	999.2	978.3	978.2	977.7	987.4	974.1	971.0	969.4	966.2	967.2	962.5	955.1	949.9	950.8	

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	-2.7	-3.1	-3.5	-4.0	-4.6	-5.0	-6.3	-7.2	-7.7	-5.9	-5.5	-6.0	-7.7	-8.9	-8.5	-7.8	-7.0	-5.8	-6.3
55.75	-2.4	-2.8	-3.3	-3.8	-4.3	-4.7	-5.9	-7.2	-6.1	-5.1	-6.1	-6.5	-7.6	-7.5	-4.9	-4.7	-5.2	-5.9	-6.3
55.00	-2.2	-2.7	-3.2	-3.6	-4.1	-4.7	-5.8	-7.0	-5.9	-5.0	-4.9	-5.4	-5.1	-5.1	-5.8	-6.5	-7.0	-7.4	-7.5
54.25	-2.9	-3.3	-3.8	-4.4	-4.9	-5.8	-7.1	-8.1	-8.1	-7.5	-7.6	-13.5	-13.0	-7.5	-8.3	-8.9	-9.9	-16.7	-17.6
53.50	-3.9	-4.5	-5.4	-6.3	-7.3	-7.9	-8.4	-8.9	-10.3	-10.7	-14.5	-16.3	-15.9	-16.6	-16.9	-17.5	-16.2	-15.9	-15.8
52.75	-5.3	-7.6	-9.0	-9.9	-8.2	-8.7	-9.1	-9.4	-11.9	-12.7	-14.3	-15.8	-16.2	-16.3	-16.1	-15.9	-15.5	-15.4	-15.6
52.00	-8.5	-10.1	-10.5	-10.4	-10.9	-11.4	-11.9	-12.6	-13.0	-14.1	-14.6	-16.4	-15.3	-15.5	-15.3	-15.3	-15.2	-15.1	-15.1
51.25	-9.2	-9.7	-10.5	-10.2	-10.6	-12.7	-14.6	-13.6	-14.1	-14.3	-15.5	-15.8	-14.7	-15.0	-15.2	-15.8	-15.7	-14.9	-14.7
50.50	-10.4	-11.1	-11.1	-12.6	-12.3	-12.6	-13.0	-13.6	-14.6	-15.5	-17.2	-15.5	-16.2	-14.8	-13.9	-14.1	-14.9	-15.5	-14.8
49.75	-9.7	-10.5	-10.6	-11.8	-13.0	-13.0	-12.2	-13.0	-13.3	-13.5	-15.2	-15.0	-14.0	-14.0	-14.4	-13.0	-14.2	-14.5	-15.3
49.00	-8.0	-8.9	-10.7	-11.3	-11.7	-11.9	-12.4	-12.7	-14.1	-13.9	-13.8	-12.6	-12.9	-14.9	-14.9	-13.6	-12.3	-11.6	-12.3
48.25	-8.5	-9.3	-10.5	-10.6	-12.3	-11.4	-15.2	-14.2	-13.7	-13.3	-12.7	-11.8	-11.3	-11.8	-12.8	-14.4	-12.5	-11.0	-11.9
47.50	-9.3	-9.4	-8.7	-9.3	-12.9	-13.1	-12.5	-13.7	-16.2	-18.6	-18.2	-17.9	-17.4	-17.3	-15.8	-14.6	-12.9	-11.0	-9.8
46.75	-8.6	-8.3	-8.3	-11.4	-13.7	-17.2	-19.4	-20.8	-21.6	-21.5	-18.1	-18.4	-15.6	-13.8	-11.6	-11.1	-9.8	-10.4	-11.0
46.00	-9.3	-8.4	-9.3	-13.5	-20.5	-23.3	-14.4	-14.9	-19.6	-16.3	-12.7	-8.5	-4.1	-8.3	-10.5	-9.4	-9.7	-10.5	-10.8

Anhang A5.6 Süd-West – Azimut = 225°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	918.4	921.0	924.0	929.3	932.1	935.5	936.1	937.6	936.7	938.6	938.9	940.0	941.6	945.6	945.4	945.9	946.2	942.8	942.8
55.75	911.3	915.9	919.6	925.8	930.3	932.6	931.9	933.7	934.1	935.5	937.1	936.6	942.3	939.6	942.0	942.4	942.6	941.1	945.9
55.00	912.6	915.1	920.0	921.4	924.1	930.8	928.0	932.0	929.9	932.3	936.2	936.3	940.5	940.9	942.6	943.2	944.3	942.7	942.4
54.25	916.0	918.5	920.7	922.3	925.3	927.3	913.9	911.6	929.1	930.3	921.1	919.9	922.1	924.0	922.1	923.7	925.5	926.3	926.0
53.50	905.9	909.3	909.2	911.1	911.0	913.5	912.6	911.6	911.4	912.0	913.7	914.1	915.8	914.3	929.5	930.1	932.4	923.7	922.3
52.75	910.3	910.1	911.5	911.5	913.1	912.7	913.9	911.7	910.9	911.3	913.2	911.2	911.5	911.0	913.4	912.8	917.5	919.1	919.2
52.00	909.6	910.7	911.9	911.9	914.1	917.1	920.7	917.5	919.2	916.3	914.2	911.2	914.1	912.1	913.2	907.6	910.4	909.7	918.7
51.25	931.3	931.5	930.8	915.8	919.5	921.6	923.9	924.5	924.0	924.5	922.4	920.7	919.5	918.4	919.9	918.4	919.1	917.3	921.4
50.50	933.1	918.4	923.1	926.8	926.1	929.0	929.0	928.4	929.4	929.6	930.0	931.1	925.4	924.2	920.4	919.7	927.7	925.0	922.2
49.75	918.2	920.0	927.5	928.0	928.8	926.7	926.2	931.4	930.4	935.0	932.2	935.5	932.1	931.3	928.9	930.8	933.0	930.2	927.3
49.00	919.2	924.1	927.7	930.3	932.3	931.5	934.3	937.7	936.6	936.1	932.1	934.4	937.6	937.5	938.9	937.5	931.0	928.4	930.2
48.25	928.1	929.2	933.3	936.5	937.7	934.9	936.4	938.2	942.7	942.8	939.8	939.8	939.9	940.3	942.0	939.6	932.2	925.5	927.6
47.50	929.8	933.1	934.3	936.5	942.1	938.7	944.2	949.8	965.1	968.5	965.8	966.8	966.1	964.9	957.1	950.8	939.1	930.2	931.0
46.75	935.8	933.0	935.2	951.2	961.2	968.5	969.4	973.0	981.4	981.1	978.0	970.0	968.2	965.2	958.1	947.6	936.3	932.1	931.2
46.00	933.1	930.6	937.5	953.3	971.2	979.9	956.0	944.6	948.0	959.0	950.4	946.6	945.1	945.2	946.4	937.7	928.7	927.0	923.0

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	-0.9	-1.1	-1.5	-1.9	-2.2	-2.5	-2.6	-3.0	-3.4	-3.7	-3.8	-3.4	-3.1	-3.0	-3.1	-3.2	-2.8	-3.8	-4.0
55.75	-1.6	-1.9	-2.1	-2.4	-2.6	-2.6	-2.8	-3.2	-3.3	-3.3	-2.9	-2.7	-2.2	-3.7	-3.0	-3.0	-3.3	-3.5	-3.8
55.00	-1.5	-1.8	-2.3	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.8	-3.0	-2.8	-2.6	-2.6	-2.3	-2.0	-2.1	-2.3	-2.6	-2.9	-3.2
54.25	-1.3	-1.6	-2.0	-2.2	-2.1	-2.0	-6.7	-7.6	-3.6	-3.0	-6.5	-7.3	-7.5	-6.7	-7.0	-7.9	-8.5	-9.3	-9.8
53.50	-4.0	-4.5	-5.4	-6.3	-7.0	-7.4	-7.8	-8.1	-9.4	-9.8	-9.0	-9.4	-9.6	-8.7	-4.6	-5.0	-5.6	-8.9	-9.2
52.75	-4.2	-5.4	-6.4	-7.1	-7.6	-7.9	-8.3	-8.5	-9.0	-8.7	-8.4	-8.4	-8.6	-8.9	-8.7	-8.8	-8.8	-9.1	-9.3
52.00	-3.7	-4.4	-5.1	-5.7	-6.4	-7.1	-8.3	-9.6	-9.8	-10.3	-9.1	-8.5	-8.4	-8.2	-8.2	-10.2	-10.9	-10.8	-8.6
51.25	-2.5	-1.0	0.2	-4.7	-5.8	-8.4	-10.7	-10.1	-10.4	-10.7	-9.5	-8.7	-8.5	-8.4	-8.5	-8.9	-9.2	-8.5	-8.6
50.50	-1.5	-4.7	-5.8	-8.0	-6.9	-7.7	-8.0	-8.7	-10.1	-10.6	-10.7	-10.5	-11.2	-9.1	-8.2	-10.0	-12.0	-11.7	-10.5
49.75	-4.5	-5.3	-6.9	-7.3	-8.0	-7.9	-6.9	-7.8	-8.2	-8.4	-9.3	-10.6	-10.7	-10.3	-10.3	-10.9	-11.3	-12.1	-12.3
49.00	-4.2	-4.9	-6.1	-6.4	-6.9	-7.0	-7.7	-8.3	-9.3	-9.4	-9.7	-9.0	-10.6	-12.9	-11.8	-11.9	-10.6	-9.3	-8.9
48.25	-4.0	-5.0	-6.0	-6.1	-7.7	-6.9	-10.6	-10.8	-10.7	-10.3	-9.9	-9.4	-8.7	-9.6	-10.6	-11.6	-9.9	-8.2	-6.7
47.50	-5.0	-5.3	-4.8	-5.4	-7.3	-9.3	-9.9	-11.4	-12.2	-14.7	-14.4	-14.0	-14.6	-15.0	-14.8	-13.1	-11.3	-9.2	-7.0
46.75	-4.4	-4.3	-4.3	-8.1	-9.6	-13.7	-17.0	-17.3	-18.9	-19.2	-14.8	-15.9	-14.4	-12.6	-11.3	-10.1	-8.3	-8.4	-7.2
46.00	-7.1	-4.4	-6.2	-11.4	-17.4	-18.4	-10.5	-12.7	-17.0	-13.9	-10.5	-7.6	-3.7	-8.1	-9.3	-8.5	-8.5	-7.9	-9.8

Anhang A5.7 West – Azimut = 270°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	872.3	874.7	877.0	880.4	882.2	874.6	874.2	874.8	870.3	869.6	871.6	876.3	870.7	875.3	875.3	876.5	882.4	881.8	880.5
55.75	870.0	873.5	875.6	878.3	881.5	871.1	873.9	868.1	872.9	870.8	870.6	874.2	869.6	873.0	873.4	878.9	879.7	875.8	877.8
55.00	869.4	872.8	872.7	877.8	879.2	882.6	880.5	874.4	873.4	873.0	881.2	875.8	868.0	870.7	872.9	869.9	875.3	873.1	872.8
54.25	871.4	873.8	875.9	874.5	879.1	878.9	878.9	878.1	879.1	870.3	880.1	878.7	880.8	881.1	871.7	878.8	878.9	879.9	881.1
53.50	871.5	870.7	871.9	874.3	872.2	872.8	870.0	870.3	871.4	872.5	873.3	872.3	872.0	876.7	868.1	869.1	869.1	869.4	875.0
52.75	869.8	868.7	867.8	867.0	866.3	866.3	865.9	866.0	869.7	867.2	870.2	865.9	866.2	870.4	867.3	868.9	870.3	870.3	872.8
52.00	860.2	859.7	860.0	860.3	861.2	862.9	866.4	868.1	866.8	866.4	864.0	862.1	860.5	860.8	862.7	867.9	863.6	867.0	870.4
51.25	857.9	859.9	862.1	859.5	862.8	867.2	873.3	872.4	870.5	871.6	870.6	868.4	867.1	861.3	863.2	867.5	872.2	872.6	862.1
50.50	861.7	866.4	867.2	868.9	869.1	873.0	873.9	873.1	872.1	872.6	874.2	876.6	873.5	870.7	868.6	869.2	878.0	879.5	870.9
49.75	863.8	864.9	869.6	874.4	874.0	872.8	871.9	875.3	878.7	878.7	880.6	886.4	882.9	881.6	879.9	879.2	882.3	883.7	882.5
49.00	864.9	868.5	872.5	876.9	878.1	877.4	879.0	881.0	881.8	885.9	883.2	883.3	884.1	882.5	883.7	881.7	882.4	880.5	881.0
48.25	871.1	875.2	879.9	882.6	883.9	876.1	880.9	884.6	885.2	888.8	884.4	881.3	885.8	885.1	882.9	873.9	880.0	873.5	876.0
47.50	882.8	885.8	884.7	883.9	885.6	883.6	890.0	895.0	891.0	896.2	894.1	893.6	889.8	890.8	881.1	889.3	882.9	876.5	876.1
46.75	872.8	882.7	886.4	891.4	887.0	893.5	898.2	902.8	911.0	913.7	911.8	900.1	891.3	888.7	877.0	885.9	880.4	877.7	871.0
46.00	878.5	875.7	893.0	890.3	905.8	909.2	890.2	889.0	888.3	889.1	896.2	888.2	887.2	887.2	888.6	879.1	871.5	871.3	870.0

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	5.5	5.2	4.9	6.0	5.9	2.8	4.2	3.8	3.4	2.6	2.2	3.8	2.6	2.9	2.8	2.5	3.4	3.6	3.0
55.75	3.8	5.2	5.0	4.9	6.5	3.1	2.8	2.7	3.4	3.6	3.5	3.6	2.4	3.5	3.4	4.5	4.0	3.4	3.1
55.00	4.0	4.3	4.3	5.1	5.0	6.3	6.6	4.0	4.7	4.5	7.8	6.3	3.5	3.4	4.0	3.1	4.2	3.8	2.7
54.25	4.0	4.8	5.4	4.5	5.5	6.1	6.5	6.2	6.7	4.5	6.9	6.5	6.4	6.6	4.3	5.8	5.3	4.4	3.6
53.50	4.4	4.9	5.4	5.1	4.5	4.2	3.9	3.3	4.2	3.9	4.5	4.6	4.6	6.6	4.2	3.6	3.1	2.4	3.6
52.75	5.5	5.8	5.7	4.5	4.1	3.6	3.5	4.1	3.9	3.9	4.9	5.1	5.3	5.5	4.7	3.9	3.8	4.1	4.6
52.00	5.9	5.8	5.7	5.2	4.7	4.5	3.4	3.2	3.4	3.7	5.1	5.0	4.4	3.9	4.1	5.5	4.0	4.9	5.2
51.25	6.5	5.8	5.9	5.2	4.6	3.0	2.5	3.3	3.3	3.6	4.5	4.4	4.1	2.7	2.6	4.0	4.1	4.3	1.3
50.50	4.9	4.8	3.2	2.0	3.3	3.3	4.2	3.6	1.9	1.5	0.7	0.6	0.4	3.0	3.7	2.8	1.1	0.5	1.0
49.75	4.0	3.5	2.3	2.8	2.8	3.8	5.0	3.9	3.9	3.1	1.6	3.2	1.5	2.0	2.6	2.3	1.4	1.9	1.3
49.00	4.2	4.1	3.3	3.6	4.0	3.6	3.0	2.9	2.3	3.4	3.6	3.0	3.3	1.1	2.3	2.5	3.3	4.0	3.4
48.25	3.5	2.9	2.2	2.0	1.0	2.0	1.2	1.0	1.8	2.3	2.4	2.4	3.0	2.5	2.3	-0.3	0.4	1.3	2.2
47.50	1.9	6.2	3.2	2.5	1.1	1.7	2.3	2.7	-1.8	-3.4	-2.6	-3.1	-3.3	-4.3	-3.8	-1.7	-0.5	1.3	1.6
46.75	4.2	6.7	3.2	4.9	1.6	-2.9	-5.8	-6.4	-8.2	-7.7	-3.5	-5.5	-4.6	-2.6	-0.9	-0.3	3.5	1.9	1.7
46.00	3.5	3.8	5.5	2.4	-3.7	-7.0	1.8	1.0	-0.3	-0.6	0.2	3.7	5.4	1.7	0.1	0.6	1.8	2.3	1.7

Anhang A5.8 Nord-West – Azimut = 315°

Maximale solare Einstrahlungsintensität I_{\max} [W/m²]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	690.9	693.4	693.4	695.9	694.0	697.3	701.4	704.4	699.8	697.8	699.3	698.2	697.4	699.8	701.9	704.5	702.9	702.0	702.3
55.75	686.5	688.6	689.8	694.5	691.2	692.4	694.5	700.4	702.1	702.4	694.8	692.6	694.0	693.4	694.6	695.8	697.6	695.0	705.3
55.00	690.6	688.9	690.8	689.9	692.1	690.7	689.9	691.8	689.5	689.2	696.1	696.1	696.3	699.1	701.6	704.7	697.6	699.6	701.5
54.25	688.0	690.1	685.8	685.0	690.6	687.3	687.5	686.3	685.8	686.2	686.8	689.3	686.9	689.1	691.2	692.1	692.5	696.0	691.9
53.50	689.3	684.8	683.9	684.4	685.9	685.2	684.9	685.6	683.6	675.3	684.9	684.3	678.4	682.7	683.9	684.0	685.6	686.4	693.7
52.75	683.9	683.9	682.8	682.0	680.2	683.9	682.6	680.2	682.9	681.0	676.2	676.1	676.4	678.2	678.0	679.9	682.3	682.4	686.3
52.00	677.6	675.9	677.0	677.5	679.3	678.4	678.9	682.9	681.2	676.9	666.9	672.5	671.7	672.3	675.1	676.9	673.5	674.2	674.1
51.25	668.7	669.8	672.6	674.5	676.6	667.4	673.9	671.3	667.6	676.3	672.0	672.3	673.3	670.6	670.5	677.3	674.0	672.3	673.3
50.50	663.5	665.5	670.3	678.7	667.1	669.2	670.1	668.3	668.9	676.8	677.5	677.5	676.0	675.0	663.5	663.1	675.2	675.9	672.5
49.75	664.6	675.7	667.9	669.9	669.7	668.1	666.9	666.1	670.8	672.8	677.0	679.6	673.4	670.7	670.6	675.2	675.8	674.2	672.1
49.00	663.0	665.9	666.8	670.4	669.4	669.8	671.4	676.2	676.4	677.1	674.1	674.4	674.5	671.3	679.6	678.2	669.9	667.0	671.2
48.25	669.6	670.5	676.9	676.8	677.5	671.5	677.1	678.3	685.3	685.3	680.4	678.5	679.9	681.9	680.7	675.6	669.3	663.1	667.6
47.50	677.6	682.7	680.1	679.0	681.8	682.0	689.5	701.6	716.6	704.6	715.7	715.5	702.0	706.3	694.9	681.9	670.9	663.6	663.8
46.75	686.2	682.3	683.1	697.1	705.0	711.6	708.9	711.9	717.0	715.3	714.6	706.5	706.3	698.1	694.3	677.0	666.3	663.2	668.4
46.00	689.7	688.2	691.8	707.5	714.0	718.6	705.8	708.9	702.9	702.7	688.3	670.5	668.8	667.5	680.3	670.2	673.9	663.6	665.6

Zugehörige Außenlufttemperatur T_{ext} [°C]

Breitengrad\Längengrad	4.00	4.75	5.50	6.25	7.00	7.75	8.50	9.25	10.00	10.75	11.50	12.25	13.00	13.75	14.50	15.25	16.00	16.75	17.50
56.50	9.7	9.6	9.7	9.7	8.9	9.0	10.2	10.0	10.3	9.7	9.9	9.8	8.1	7.6	8.0	8.9	9.2	8.0	7.6
55.75	9.4	9.7	10.1	10.1	9.5	9.3	9.2	10.1	10.8	12.4	9.8	9.4	9.2	9.2	9.1	8.1	7.7	7.8	9.7
55.00	10.5	10.1	10.5	9.5	10.4	9.7	10.0	9.7	10.2	10.8	12.0	11.7	11.0	11.2	12.2	10.6	10.5	10.7	11.0
54.25	10.3	11.0	9.6	10.1	11.5	10.1	10.7	10.6	10.5	10.9	11.2	11.9	10.4	10.1	9.8	9.6	9.3	9.9	8.3
53.50	11.3	10.1	10.2	10.4	10.3	10.1	10.2	10.0	10.3	8.6	10.9	11.1	9.5	9.1	9.9	10.0	10.4	10.3	11.5
52.75	10.4	10.3	10.1	9.2	9.0	8.5	8.6	8.7	8.9	9.2	9.3	9.5	10.0	10.4	10.8	11.1	11.8	12.0	12.4
52.00	10.2	9.4	8.4	8.4	8.4	8.0	8.3	9.4	8.6	8.6	7.5	10.0	10.4	10.7	10.9	11.1	11.4	10.9	11.1
51.25	9.4	9.2	8.9	8.5	8.5	5.0	4.9	5.2	4.7	8.6	9.0	9.2	9.3	8.6	8.6	10.7	9.5	10.3	10.6
50.50	6.8	6.2	5.4	6.6	5.0	5.3	5.8	5.0	4.6	7.7	7.1	6.9	6.2	7.9	6.5	6.1	7.8	8.2	9.1
49.75	6.7	8.6	5.0	5.3	4.8	5.4	6.1	5.9	6.1	6.1	4.9	4.4	4.7	4.9	5.7	7.8	7.7	8.3	8.8
49.00	6.5	6.7	5.8	5.9	5.7	6.0	6.4	6.3	4.8	5.1	5.3	5.5	4.6	3.6	7.3	7.2	8.7	10.2	10.4
48.25	7.1	7.2	6.4	6.4	4.4	6.5	5.1	5.2	6.8	6.6	6.7	7.1	7.5	7.6	7.5	7.3	9.0	10.3	10.8
47.50	6.8	6.7	7.2	7.2	5.2	5.8	5.3	7.5	5.1	0.5	3.6	3.3	1.2	2.2	2.5	3.9	6.9	10.3	11.0
46.75	8.0	8.6	8.2	5.4	4.6	1.2	-2.1	-2.8	-4.6	-3.7	0.2	-1.6	-0.2	1.9	6.0	7.6	9.8	10.4	11.0
46.00	8.3	9.1	8.8	4.7	-1.3	-3.8	6.0	7.8	0.5	2.4	4.2	5.5	8.2	6.3	9.3	10.2	12.5	11.1	11.0

Anhang A6 Normierte Strahlungsprofile für transiente Berechnungen

Anhang A6.1 Nord – Azimut = 0°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0.003	0	0
03:20:00	0.154	0	0
03:30:00	0.429	0	0
03:40:00	0.639	0	0
03:50:00	0.786	0	0
04:00:00	0.885	0	0
04:10:00	0.949	0	0
04:20:00	0.985	0	0
04:30:00	0.999	0	0
04:40:00	0.996	0	0
04:50:00	0.978	0	0
05:00:00	0.948	0	0
05:10:00	0.909	0.014	0
05:20:00	0.861	0.084	0
05:30:00	0.806	0.129	0
05:40:00	0.744	0.172	0
05:50:00	0.678	0.213	0
06:00:00	0.608	0.252	0
06:10:00	0.534	0.290	0
06:20:00	0.457	0.327	0
06:30:00	0.377	0.364	0
06:40:00	0.296	0.401	0
06:50:00	0.231	0.437	0
07:00:00	0.241	0.472	0
07:10:00	0.250	0.508	0
07:20:00	0.259	0.542	0
07:30:00	0.267	0.576	0.037
07:40:00	0.276	0.608	0.162
07:50:00	0.284	0.641	0.247
08:00:00	0.292	0.672	0.318
08:10:00	0.300	0.702	0.382
08:20:00	0.307	0.731	0.441
08:30:00	0.315	0.758	0.498
08:40:00	0.322	0.785	0.551
08:50:00	0.328	0.810	0.602
09:00:00	0.335	0.834	0.650
09:10:00	0.341	0.856	0.696
09:20:00	0.346	0.877	0.738
09:30:00	0.351	0.897	0.778
09:40:00	0.356	0.915	0.815
09:50:00	0.361	0.931	0.848
10:00:00	0.365	0.946	0.879
10:10:00	0.368	0.959	0.906
10:20:00	0.371	0.970	0.930
10:30:00	0.374	0.979	0.950
10:40:00	0.376	0.987	0.967
10:50:00	0.378	0.993	0.981
11:00:00	0.380	0.997	0.991
11:10:00	0.381	0.999	0.997
11:20:00	0.381	1.000	1.000

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	0.381	0.999	0.999
11:40:00	0.381	0.996	0.995
11:50:00	0.380	0.991	0.987
12:00:00	0.379	0.984	0.976
12:10:00	0.377	0.975	0.961
12:20:00	0.375	0.965	0.942
12:30:00	0.372	0.953	0.920
12:40:00	0.369	0.940	0.895
12:50:00	0.366	0.924	0.866
13:00:00	0.362	0.907	0.835
13:10:00	0.358	0.889	0.800
13:20:00	0.353	0.868	0.762
13:30:00	0.348	0.847	0.721
13:40:00	0.342	0.824	0.677
13:50:00	0.337	0.799	0.630
14:00:00	0.330	0.773	0.581
14:10:00	0.324	0.746	0.529
14:20:00	0.317	0.718	0.474
14:30:00	0.310	0.689	0.417
14:40:00	0.303	0.658	0.355
14:50:00	0.295	0.626	0.289
15:00:00	0.287	0.594	0.214
15:10:00	0.279	0.561	0.115
15:20:00	0.270	0.527	0.004
15:30:00	0.262	0.492	0
15:40:00	0.253	0.457	0
15:50:00	0.244	0.421	0
16:00:00	0.235	0.384	0
16:10:00	0.228	0.347	0
16:20:00	0.219	0.310	0
16:30:00	0.209	0.272	0
16:40:00	0.200	0.234	0
16:50:00	0.191	0.194	0
17:00:00	0.182	0.153	0
17:10:00	0.172	0.106	0
17:20:00	0.162	0.056	0
17:30:00	0.152	0	0
17:40:00	0.142	0	0
17:50:00	0.132	0	0
18:00:00	0.122	0	0
18:10:00	0.112	0	0
18:20:00	0.102	0	0
18:30:00	0.092	0	0
18:40:00	0.082	0	0
18:50:00	0.072	0	0
19:00:00	0.062	0	0
19:10:00	0.052	0	0
19:20:00	0.042	0	0
19:30:00	0.032	0	0
19:40:00	0.022	0	0
19:50:00	0.012	0	0

Anhang A6.2 Nord-Ost – Azimut = 45°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0.001	0	0
03:20:00	0.099	0	0
03:30:00	0.289	0	0
03:40:00	0.448	0	0
03:50:00	0.574	0	0
04:00:00	0.674	0	0
04:10:00	0.754	0	0
04:20:00	0.818	0	0
04:30:00	0.869	0	0
04:40:00	0.910	0	0
04:50:00	0.942	0	0
05:00:00	0.966	0	0
05:10:00	0.983	0.014	0
05:20:00	0.994	0.327	0
05:30:00	1.000	0.618	0
05:40:00	1.000	0.791	0
05:50:00	0.996	0.896	0
06:00:00	0.987	0.957	0
06:10:00	0.975	0.989	0
06:20:00	0.959	1.000	0
06:30:00	0.939	0.994	0
06:40:00	0.917	0.975	0
06:50:00	0.891	0.945	0
07:00:00	0.862	0.906	0
07:10:00	0.831	0.860	0
07:20:00	0.798	0.806	0
07:30:00	0.762	0.747	0.096
07:40:00	0.725	0.682	0.167
07:50:00	0.685	0.613	0.239
08:00:00	0.644	0.541	0.310
08:10:00	0.601	0.464	0.382
08:20:00	0.557	0.385	0.441
08:30:00	0.511	0.303	0.498
08:40:00	0.465	0.219	0.551
08:50:00	0.417	0.152	0.602
09:00:00	0.369	0.157	0.650
09:10:00	0.320	0.161	0.696
09:20:00	0.271	0.165	0.738
09:30:00	0.221	0.169	0.778
09:40:00	0.172	0.172	0.815
09:50:00	0.151	0.175	0.848
10:00:00	0.153	0.178	0.879
10:10:00	0.154	0.180	0.906
10:20:00	0.156	0.182	0.930
10:30:00	0.157	0.184	0.950
10:40:00	0.158	0.186	0.967
10:50:00	0.159	0.187	0.981
11:00:00	0.159	0.188	0.991
11:10:00	0.160	0.188	0.997
11:20:00	0.160	0.188	1.000

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	0.160	0.188	0.999
11:40:00	0.160	0.187	0.995
11:50:00	0.159	0.186	0.987
12:00:00	0.159	0.185	0.976
12:10:00	0.158	0.183	0.961
12:20:00	0.157	0.182	0.942
12:30:00	0.156	0.179	0.920
12:40:00	0.155	0.177	0.895
12:50:00	0.153	0.174	0.866
13:00:00	0.152	0.171	0.835
13:10:00	0.150	0.167	0.800
13:20:00	0.148	0.163	0.762
13:30:00	0.146	0.159	0.721
13:40:00	0.144	0.155	0.677
13:50:00	0.141	0.150	0.630
14:00:00	0.139	0.145	0.581
14:10:00	0.136	0.140	0.529
14:20:00	0.133	0.135	0.474
14:30:00	0.130	0.129	0.417
14:40:00	0.127	0.124	0.355
14:50:00	0.124	0.118	0.289
15:00:00	0.120	0.112	0.214
15:10:00	0.117	0.105	0.115
15:20:00	0.113	0.099	0.004
15:30:00	0.110	0.093	0
15:40:00	0.106	0.086	0
15:50:00	0.102	0.079	0
16:00:00	0.098	0.072	0
16:10:00	0.094	0.065	0
16:20:00	0.090	0.058	0
16:30:00	0.087	0.051	0
16:40:00	0.083	0.044	0
16:50:00	0.078	0.037	0
17:00:00	0.074	0.029	0
17:10:00	0.070	0.020	0
17:20:00	0.066	0.008	0
17:30:00	0.062	0	0
17:40:00	0.058	0	0
17:50:00	0.054	0	0
18:00:00	0.050	0	0
18:10:00	0.046	0	0
18:20:00	0.042	0	0
18:30:00	0.038	0	0
18:40:00	0.034	0	0
18:50:00	0.030	0	0
19:00:00	0.025	0	0
19:10:00	0.021	0	0
19:20:00	0.016	0	0
19:30:00	0.010	0	0
19:40:00	0.002	0	0
19:50:00	0	0	0

Anhang A6.3 Ost – Azimut = 90°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0.001	0	0
03:20:00	0.064	0	0
03:30:00	0.193	0	0
03:40:00	0.307	0	0
03:50:00	0.404	0	0
04:00:00	0.487	0	0
04:10:00	0.560	0	0
04:20:00	0.623	0	0
04:30:00	0.680	0	0
04:40:00	0.730	0	0
04:50:00	0.774	0	0
05:00:00	0.814	0	0
05:10:00	0.850	0.010	0
05:20:00	0.881	0.238	0
05:30:00	0.908	0.467	0
05:40:00	0.931	0.619	0
05:50:00	0.951	0.725	0
06:00:00	0.967	0.804	0
06:10:00	0.980	0.863	0
06:20:00	0.990	0.908	0
06:30:00	0.996	0.942	0
06:40:00	1.000	0.967	0
06:50:00	1.000	0.985	0
07:00:00	0.997	0.995	0
07:10:00	0.992	1.000	0
07:20:00	0.983	0.999	0
07:30:00	0.972	0.994	0.035
07:40:00	0.959	0.984	0.400
07:50:00	0.942	0.970	0.665
08:00:00	0.923	0.953	0.820
08:10:00	0.902	0.931	0.912
08:20:00	0.878	0.906	0.966
08:30:00	0.852	0.879	0.993
08:40:00	0.824	0.848	1.000
08:50:00	0.794	0.814	0.992
09:00:00	0.762	0.778	0.972
09:10:00	0.728	0.739	0.943
09:20:00	0.692	0.698	0.905
09:30:00	0.654	0.655	0.859
09:40:00	0.615	0.610	0.808
09:50:00	0.575	0.563	0.752
10:00:00	0.533	0.515	0.691
10:10:00	0.489	0.465	0.626
10:20:00	0.445	0.414	0.557
10:30:00	0.400	0.361	0.486
10:40:00	0.354	0.308	0.412
10:50:00	0.307	0.254	0.336
11:00:00	0.259	0.199	0.259
11:10:00	0.211	0.144	0.180
11:20:00	0.163	0.099	0.101

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	0.130	0.098	0.077
11:40:00	0.130	0.098	0.077
11:50:00	0.130	0.098	0.077
12:00:00	0.129	0.097	0.076
12:10:00	0.129	0.096	0.074
12:20:00	0.128	0.095	0.073
12:30:00	0.127	0.094	0.071
12:40:00	0.126	0.093	0.069
12:50:00	0.125	0.091	0.067
13:00:00	0.124	0.089	0.065
13:10:00	0.122	0.088	0.062
13:20:00	0.121	0.086	0.059
13:30:00	0.119	0.083	0.056
13:40:00	0.117	0.081	0.052
13:50:00	0.115	0.079	0.049
14:00:00	0.113	0.076	0.045
14:10:00	0.111	0.074	0.041
14:20:00	0.108	0.071	0.037
14:30:00	0.106	0.068	0.032
14:40:00	0.103	0.065	0.028
14:50:00	0.101	0.062	0.022
15:00:00	0.098	0.059	0.017
15:10:00	0.095	0.055	0.009
15:20:00	0.092	0.052	0.000
15:30:00	0.089	0.048	0
15:40:00	0.086	0.045	0
15:50:00	0.083	0.041	0
16:00:00	0.080	0.038	0
16:10:00	0.077	0.034	0
16:20:00	0.074	0.031	0
16:30:00	0.071	0.027	0
16:40:00	0.067	0.023	0
16:50:00	0.064	0.019	0
17:00:00	0.061	0.015	0
17:10:00	0.057	0.010	0
17:20:00	0.054	0.004	0
17:30:00	0.051	0	0
17:40:00	0.047	0	0
17:50:00	0.044	0	0
18:00:00	0.041	0	0
18:10:00	0.037	0	0
18:20:00	0.034	0	0
18:30:00	0.031	0	0
18:40:00	0.028	0	0
18:50:00	0.024	0	0
19:00:00	0.021	0	0
19:10:00	0.017	0	0
19:20:00	0.013	0	0
19:30:00	0.008	0	0
19:40:00	0.002	0	0
19:50:00	0	0	0

Anhang A6.4 Süd-Ost – Azimut = 135°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0.001	0	0
03:20:00	0.017	0	0
03:30:00	0.051	0	0
03:40:00	0.092	0	0
03:50:00	0.135	0	0
04:00:00	0.180	0	0
04:10:00	0.227	0	0
04:20:00	0.273	0	0
04:30:00	0.320	0	0
04:40:00	0.366	0	0
04:50:00	0.412	0	0
05:00:00	0.457	0	0
05:10:00	0.502	0.006	0
05:20:00	0.545	0.151	0
05:30:00	0.587	0.305	0
05:40:00	0.628	0.416	0
05:50:00	0.667	0.504	0
06:00:00	0.704	0.576	0
06:10:00	0.740	0.637	0
06:20:00	0.774	0.690	0
06:30:00	0.805	0.737	0
06:40:00	0.835	0.779	0
06:50:00	0.862	0.817	0
07:00:00	0.887	0.850	0
07:10:00	0.910	0.879	0
07:20:00	0.930	0.905	0
07:30:00	0.948	0.928	0.025
07:40:00	0.963	0.947	0.295
07:50:00	0.976	0.963	0.506
08:00:00	0.986	0.976	0.645
08:10:00	0.993	0.987	0.742
08:20:00	0.998	0.994	0.815
08:30:00	1.000	0.998	0.869
08:40:00	0.999	1.000	0.911
08:50:00	0.996	0.999	0.943
09:00:00	0.990	0.995	0.966
09:10:00	0.982	0.989	0.983
09:20:00	0.971	0.980	0.994
09:30:00	0.957	0.968	0.999
09:40:00	0.941	0.955	1.000
09:50:00	0.922	0.938	0.997
10:00:00	0.901	0.920	0.989
10:10:00	0.877	0.899	0.978
10:20:00	0.851	0.876	0.964
10:30:00	0.823	0.851	0.947
10:40:00	0.792	0.824	0.926
10:50:00	0.760	0.795	0.903
11:00:00	0.725	0.764	0.878
11:10:00	0.689	0.731	0.850
11:20:00	0.650	0.697	0.820

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	0.610	0.661	0.788
11:40:00	0.569	0.624	0.753
11:50:00	0.525	0.585	0.717
12:00:00	0.481	0.545	0.680
12:10:00	0.435	0.504	0.641
12:20:00	0.388	0.462	0.601
12:30:00	0.340	0.420	0.560
12:40:00	0.290	0.376	0.517
12:50:00	0.241	0.332	0.474
13:00:00	0.190	0.288	0.431
13:10:00	0.143	0.243	0.387
13:20:00	0.142	0.198	0.343
13:30:00	0.140	0.153	0.299
13:40:00	0.137	0.108	0.256
13:50:00	0.135	0.070	0.213
14:00:00	0.133	0.067	0.171
14:10:00	0.130	0.065	0.130
14:20:00	0.127	0.063	0.092
14:30:00	0.124	0.060	0.057
14:40:00	0.121	0.057	0.026
14:50:00	0.118	0.055	0.013
15:00:00	0.115	0.052	0.009
15:10:00	0.112	0.049	0.005
15:20:00	0.108	0.046	0.000
15:30:00	0.105	0.043	0
15:40:00	0.101	0.040	0
15:50:00	0.098	0.037	0
16:00:00	0.094	0.034	0
16:10:00	0.090	0.030	0
16:20:00	0.087	0.027	0
16:30:00	0.083	0.024	0
16:40:00	0.079	0.020	0
16:50:00	0.075	0.017	0
17:00:00	0.071	0.013	0
17:10:00	0.067	0.009	0
17:20:00	0.063	0.004	0
17:30:00	0.060	0	0
17:40:00	0.056	0	0
17:50:00	0.052	0	0
18:00:00	0.048	0	0
18:10:00	0.044	0	0
18:20:00	0.040	0	0
18:30:00	0.036	0	0
18:40:00	0.032	0	0
18:50:00	0.028	0	0
19:00:00	0.024	0	0
19:10:00	0.020	0	0
19:20:00	0.015	0	0
19:30:00	0.009	0	0
19:40:00	0.002	0	0
19:50:00	0	0	0

Anhang A6.5 Süd – Azimut = 180°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0.001	0	0
03:20:00	0.008	0	0
03:30:00	0.016	0	0
03:40:00	0.022	0	0
03:50:00	0.028	0	0
04:00:00	0.033	0	0
04:10:00	0.038	0	0
04:20:00	0.043	0	0
04:30:00	0.047	0	0
04:40:00	0.052	0	0
04:50:00	0.057	0	0
05:00:00	0.062	0	0
05:10:00	0.066	0.001	0
05:20:00	0.071	0.007	0
05:30:00	0.076	0.025	0
05:40:00	0.081	0.052	0
05:50:00	0.085	0.084	0
06:00:00	0.090	0.120	0
06:10:00	0.095	0.158	0
06:20:00	0.100	0.197	0
06:30:00	0.104	0.237	0
06:40:00	0.109	0.278	0
06:50:00	0.122	0.319	0
07:00:00	0.171	0.360	0
07:10:00	0.221	0.401	0
07:20:00	0.271	0.441	0
07:30:00	0.320	0.481	0.014
07:40:00	0.368	0.521	0.173
07:50:00	0.416	0.559	0.308
08:00:00	0.463	0.597	0.406
08:10:00	0.508	0.633	0.483
08:20:00	0.553	0.668	0.548
08:30:00	0.596	0.702	0.605
08:40:00	0.637	0.734	0.654
08:50:00	0.677	0.765	0.699
09:00:00	0.714	0.795	0.740
09:10:00	0.750	0.822	0.776
09:20:00	0.784	0.848	0.810
09:30:00	0.816	0.872	0.840
09:40:00	0.845	0.894	0.868
09:50:00	0.872	0.914	0.893
10:00:00	0.897	0.932	0.915
10:10:00	0.919	0.948	0.934
10:20:00	0.939	0.962	0.951
10:30:00	0.956	0.974	0.965
10:40:00	0.970	0.984	0.977
10:50:00	0.981	0.991	0.987
11:00:00	0.990	0.996	0.994
11:10:00	0.996	0.999	0.998
11:20:00	1.000	1.000	1.000

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	1.000	0.998	0.999
11:40:00	0.998	0.995	0.996
11:50:00	0.993	0.989	0.991
12:00:00	0.985	0.981	0.983
12:10:00	0.974	0.970	0.973
12:20:00	0.961	0.958	0.960
12:30:00	0.945	0.943	0.944
12:40:00	0.926	0.926	0.926
12:50:00	0.905	0.907	0.906
13:00:00	0.881	0.887	0.883
13:10:00	0.855	0.864	0.857
13:20:00	0.826	0.839	0.828
13:30:00	0.795	0.813	0.796
13:40:00	0.762	0.785	0.761
13:50:00	0.727	0.755	0.723
14:00:00	0.690	0.723	0.681
14:10:00	0.651	0.690	0.634
14:20:00	0.610	0.656	0.582
14:30:00	0.568	0.621	0.522
14:40:00	0.524	0.584	0.452
14:50:00	0.479	0.546	0.367
15:00:00	0.432	0.507	0.256
15:10:00	0.385	0.468	0.091
15:20:00	0.337	0.427	0.000
15:30:00	0.288	0.387	0
15:40:00	0.238	0.346	0
15:50:00	0.189	0.304	0
16:00:00	0.139	0.263	0
16:10:00	0.110	0.223	0
16:20:00	0.106	0.183	0
16:30:00	0.101	0.144	0
16:40:00	0.096	0.107	0
16:50:00	0.092	0.072	0
17:00:00	0.087	0.041	0
17:10:00	0.082	0.017	0
17:20:00	0.077	0.004	0
17:30:00	0.073	0	0
17:40:00	0.068	0	0
17:50:00	0.063	0	0
18:00:00	0.058	0	0
18:10:00	0.054	0	0
18:20:00	0.049	0	0
18:30:00	0.044	0	0
18:40:00	0.039	0	0
18:50:00	0.035	0	0
19:00:00	0.030	0	0
19:10:00	0.024	0	0
19:20:00	0.018	0	0
19:30:00	0.011	0	0
19:40:00	0.003	0	0
19:50:00	0	0	0

Anhang A6.6 Süd-West – Azimut = 225°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0.001	0	0
03:20:00	0.007	0	0
03:30:00	0.013	0	0
03:40:00	0.018	0	0
03:50:00	0.023	0	0
04:00:00	0.027	0	0
04:10:00	0.031	0	0
04:20:00	0.035	0	0
04:30:00	0.039	0	0
04:40:00	0.043	0	0
04:50:00	0.047	0	0
05:00:00	0.050	0	0
05:10:00	0.054	0.001	0
05:20:00	0.058	0.007	0
05:30:00	0.062	0.011	0
05:40:00	0.066	0.015	0
05:50:00	0.070	0.019	0
06:00:00	0.074	0.022	0
06:10:00	0.078	0.025	0
06:20:00	0.081	0.029	0
06:30:00	0.085	0.032	0
06:40:00	0.089	0.035	0
06:50:00	0.093	0.038	0
07:00:00	0.096	0.041	0
07:10:00	0.100	0.044	0
07:20:00	0.104	0.047	0
07:30:00	0.107	0.050	0.002
07:40:00	0.111	0.053	0.007
07:50:00	0.114	0.056	0.011
08:00:00	0.117	0.059	0.014
08:10:00	0.120	0.061	0.038
08:20:00	0.123	0.064	0.071
08:30:00	0.126	0.066	0.108
08:40:00	0.129	0.068	0.147
08:50:00	0.132	0.080	0.188
09:00:00	0.134	0.124	0.231
09:10:00	0.137	0.169	0.274
09:20:00	0.139	0.214	0.318
09:30:00	0.141	0.259	0.362
09:40:00	0.143	0.304	0.406
09:50:00	0.172	0.348	0.449
10:00:00	0.223	0.392	0.493
10:10:00	0.273	0.435	0.535
10:20:00	0.323	0.478	0.577
10:30:00	0.371	0.519	0.618
10:40:00	0.419	0.560	0.658
10:50:00	0.465	0.599	0.696
11:00:00	0.510	0.637	0.733
11:10:00	0.554	0.674	0.768
11:20:00	0.596	0.709	0.801

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	0.637	0.743	0.833
11:40:00	0.676	0.775	0.862
11:50:00	0.713	0.806	0.889
12:00:00	0.748	0.834	0.913
12:10:00	0.781	0.860	0.935
12:20:00	0.812	0.885	0.954
12:30:00	0.841	0.907	0.970
12:40:00	0.868	0.927	0.983
12:50:00	0.893	0.945	0.993
13:00:00	0.915	0.960	0.998
13:10:00	0.934	0.973	1.000
13:20:00	0.951	0.984	0.997
13:30:00	0.966	0.992	0.990
13:40:00	0.978	0.997	0.976
13:50:00	0.988	1.000	0.957
14:00:00	0.994	1.000	0.930
14:10:00	0.999	0.997	0.895
14:20:00	1.000	0.992	0.848
14:30:00	0.999	0.983	0.786
14:40:00	0.995	0.972	0.705
14:50:00	0.989	0.958	0.592
15:00:00	0.979	0.940	0.428
15:10:00	0.968	0.920	0.157
15:20:00	0.953	0.896	0
15:30:00	0.936	0.869	0
15:40:00	0.917	0.838	0
15:50:00	0.895	0.803	0
16:00:00	0.871	0.764	0
16:10:00	0.844	0.720	0
16:20:00	0.816	0.670	0
16:30:00	0.785	0.613	0
16:40:00	0.752	0.547	0
16:50:00	0.717	0.469	0
17:00:00	0.680	0.371	0
17:10:00	0.642	0.242	0
17:20:00	0.601	0.060	0
17:30:00	0.560	0	0
17:40:00	0.517	0	0
17:50:00	0.473	0	0
18:00:00	0.428	0	0
18:10:00	0.382	0	0
18:20:00	0.336	0	0
18:30:00	0.289	0	0
18:40:00	0.243	0	0
18:50:00	0.196	0	0
19:00:00	0.151	0	0
19:10:00	0.107	0	0
19:20:00	0.065	0	0
19:30:00	0.028	0	0
19:40:00	0.003	0	0
19:50:00	0	0	0

Anhang A6.7 West – Azimut = 270°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0	0	0
03:20:00	0.006	0	0
03:30:00	0.011	0	0
03:40:00	0.015	0	0
03:50:00	0.019	0	0
04:00:00	0.023	0	0
04:10:00	0.026	0	0
04:20:00	0.030	0	0
04:30:00	0.033	0	0
04:40:00	0.036	0	0
04:50:00	0.040	0	0
05:00:00	0.043	0	0
05:10:00	0.046	0.001	0
05:20:00	0.050	0.008	0
05:30:00	0.053	0.013	0
05:40:00	0.056	0.017	0
05:50:00	0.059	0.021	0
06:00:00	0.063	0.025	0
06:10:00	0.066	0.029	0
06:20:00	0.069	0.032	0
06:30:00	0.073	0.036	0
06:40:00	0.076	0.040	0
06:50:00	0.079	0.043	0
07:00:00	0.082	0.047	0
07:10:00	0.085	0.050	0
07:20:00	0.088	0.053	0
07:30:00	0.091	0.057	0.003
07:40:00	0.094	0.060	0.013
07:50:00	0.097	0.063	0.019
08:00:00	0.100	0.066	0.025
08:10:00	0.102	0.069	0.030
08:20:00	0.105	0.072	0.034
08:30:00	0.107	0.075	0.039
08:40:00	0.110	0.077	0.043
08:50:00	0.112	0.080	0.047
09:00:00	0.114	0.082	0.050
09:10:00	0.116	0.084	0.054
09:20:00	0.118	0.087	0.057
09:30:00	0.120	0.088	0.060
09:40:00	0.122	0.090	0.063
09:50:00	0.123	0.092	0.066
10:00:00	0.125	0.093	0.068
10:10:00	0.126	0.095	0.070
10:20:00	0.127	0.096	0.072
10:30:00	0.128	0.097	0.074
10:40:00	0.129	0.097	0.075
10:50:00	0.129	0.098	0.076
11:00:00	0.130	0.098	0.077
11:10:00	0.130	0.099	0.077
11:20:00	0.130	0.109	0.078

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	0.146	0.164	0.134
11:40:00	0.195	0.219	0.214
11:50:00	0.243	0.274	0.292
12:00:00	0.290	0.328	0.369
12:10:00	0.338	0.381	0.444
12:20:00	0.384	0.433	0.517
12:30:00	0.429	0.484	0.587
12:40:00	0.474	0.533	0.654
12:50:00	0.518	0.581	0.718
13:00:00	0.560	0.627	0.777
13:10:00	0.601	0.671	0.831
13:20:00	0.641	0.714	0.880
13:30:00	0.679	0.754	0.923
13:40:00	0.715	0.792	0.957
13:50:00	0.750	0.827	0.983
14:00:00	0.783	0.860	0.998
14:10:00	0.814	0.890	1.000
14:20:00	0.843	0.916	0.985
14:30:00	0.869	0.940	0.948
14:40:00	0.894	0.960	0.880
14:50:00	0.916	0.976	0.765
15:00:00	0.936	0.988	0.571
15:10:00	0.953	0.997	0.216
15:20:00	0.968	1.000	0.001
15:30:00	0.980	0.998	0
15:40:00	0.989	0.991	0
15:50:00	0.996	0.978	0
16:00:00	0.999	0.958	0
16:10:00	1.000	0.929	0
16:20:00	0.998	0.890	0
16:30:00	0.992	0.839	0
16:40:00	0.984	0.772	0
16:50:00	0.972	0.682	0
17:00:00	0.957	0.557	0
17:10:00	0.938	0.375	0
17:20:00	0.916	0.095	0
17:30:00	0.890	0	0
17:40:00	0.861	0	0
17:50:00	0.827	0	0
18:00:00	0.789	0	0
18:10:00	0.746	0	0
18:20:00	0.698	0	0
18:30:00	0.644	0	0
18:40:00	0.583	0	0
18:50:00	0.514	0	0
19:00:00	0.435	0	0
19:10:00	0.343	0	0
19:20:00	0.235	0	0
19:30:00	0.110	0	0
19:40:00	0.009	0	0
19:50:00	0	0	0

Anhang A6.8 Nord-West – Azimut = 315°

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
03:00:00	0	0	0
03:10:00	0.001	0	0
03:20:00	0.007	0	0
03:30:00	0.014	0	0
03:40:00	0.019	0	0
03:50:00	0.024	0	0
04:00:00	0.028	0	0
04:10:00	0.032	0	0
04:20:00	0.036	0	0
04:30:00	0.041	0	0
04:40:00	0.045	0	0
04:50:00	0.049	0	0
05:00:00	0.053	0	0
05:10:00	0.057	0.002	0
05:20:00	0.061	0.015	0
05:30:00	0.065	0.024	0
05:40:00	0.069	0.033	0
05:50:00	0.073	0.040	0
06:00:00	0.077	0.048	0
06:10:00	0.081	0.055	0
06:20:00	0.085	0.062	0
06:30:00	0.089	0.069	0
06:40:00	0.093	0.076	0
06:50:00	0.097	0.083	0
07:00:00	0.101	0.090	0
07:10:00	0.105	0.096	0
07:20:00	0.108	0.103	0
07:30:00	0.112	0.109	0.037
07:40:00	0.116	0.115	0.162
07:50:00	0.119	0.121	0.247
08:00:00	0.122	0.127	0.318
08:10:00	0.126	0.133	0.382
08:20:00	0.129	0.138	0.441
08:30:00	0.132	0.144	0.498
08:40:00	0.135	0.149	0.551
08:50:00	0.138	0.153	0.602
09:00:00	0.140	0.158	0.650
09:10:00	0.143	0.162	0.696
09:20:00	0.145	0.166	0.738
09:30:00	0.147	0.170	0.778
09:40:00	0.149	0.173	0.815
09:50:00	0.151	0.176	0.848
10:00:00	0.153	0.179	0.879
10:10:00	0.154	0.182	0.906
10:20:00	0.156	0.184	0.930
10:30:00	0.157	0.186	0.950
10:40:00	0.158	0.187	0.967
10:50:00	0.159	0.188	0.981
11:00:00	0.159	0.189	0.991
11:10:00	0.160	0.189	0.997
11:20:00	0.160	0.189	1.000

Zeit t [h]	warmer Tag I/I _{max} [-]	Übergangstag I/I _{max} [-]	kalter Tag I/I _{max} [-]
11:30:00	0.160	0.189	0.999
11:40:00	0.160	0.189	0.995
11:50:00	0.159	0.188	0.987
12:00:00	0.159	0.186	0.976
12:10:00	0.158	0.185	0.961
12:20:00	0.157	0.183	0.942
12:30:00	0.156	0.181	0.920
12:40:00	0.155	0.178	0.895
12:50:00	0.153	0.175	0.866
13:00:00	0.152	0.172	0.835
13:10:00	0.154	0.168	0.800
13:20:00	0.204	0.165	0.762
13:30:00	0.254	0.160	0.721
13:40:00	0.303	0.156	0.677
13:50:00	0.352	0.164	0.630
14:00:00	0.400	0.250	0.581
14:10:00	0.448	0.334	0.529
14:20:00	0.495	0.415	0.474
14:30:00	0.541	0.494	0.417
14:40:00	0.585	0.570	0.355
14:50:00	0.629	0.641	0.268
15:00:00	0.671	0.709	0.180
15:10:00	0.711	0.772	0.092
15:20:00	0.749	0.829	0.005
15:30:00	0.786	0.881	0
15:40:00	0.820	0.925	0
15:50:00	0.852	0.960	0
16:00:00	0.881	0.986	0
16:10:00	0.908	1.000	0
16:20:00	0.932	0.999	0
16:30:00	0.952	0.980	0
16:40:00	0.970	0.936	0
16:50:00	0.983	0.857	0
17:00:00	0.993	0.725	0
17:10:00	0.999	0.505	0
17:20:00	1.000	0.133	0
17:30:00	0.996	0	0
17:40:00	0.987	0	0
17:50:00	0.972	0	0
18:00:00	0.951	0	0
18:10:00	0.922	0	0
18:20:00	0.884	0	0
18:30:00	0.837	0	0
18:40:00	0.777	0	0
18:50:00	0.704	0	0
19:00:00	0.611	0	0
19:10:00	0.495	0	0
19:20:00	0.348	0	0
19:30:00	0.167	0	0
19:40:00	0.013	0	0
19:50:00	0	0	0

Anhang A7 Anhaltswerte für Innenraumlufttemperaturen

In Tabelle A-A sind für verschiedene Gebäudetypen Innenraumlufttemperaturen zusammengestellt, welche den Tabellen 4 und 5 DIN V 18599-10:2018-09 [10] entnommen wurden. Hierbei wurden die Minimal- und Maximaltemperaturen für den jeweiligen Heiz- bzw. Kühlfall berücksichtigt.

Tabelle A-A: Innenraumlufttemperaturen für verschiedene Gebäudetypen.

	Innenraumlufttemperatur	
	an kalten Tagen	an warmen Tagen
Wohn- und Bürogebäude, Bildungseinrichtungen, Handelseinrichtungen, Konferenzhallen, Restaurants	20°C	26°C
Krankenhäuser	22°C	26°C
Einkaufszentren, Sporthallen, Industriegebäude	18°C	26°C
Schwimmhallen	28°C	28°C

Anhang A8 Modellvalidierung anhand von Experimenten mit Isolierverglasungen

Anhang A8.1 Versuch 1

Für das Sonnenschutzglas mit oben liegender halbseitiger Teilverschattung (siehe auch Versuchsbeschreibung in Abschnitt 8.4.1 und Auswertung in Abschnitt 8.5.1), wurde mit Hilfe eines dreidimensionalen FE-Modells in ANSYS der transiente Temperaturverlauf bzw. die Temperaturentwicklung der Einzelscheiben des Sonnenschutzglases ermittelt. In Abbildung A-C sind die Ergebnisse dargestellt, wo sich eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und numerischer Simulation zeigt.

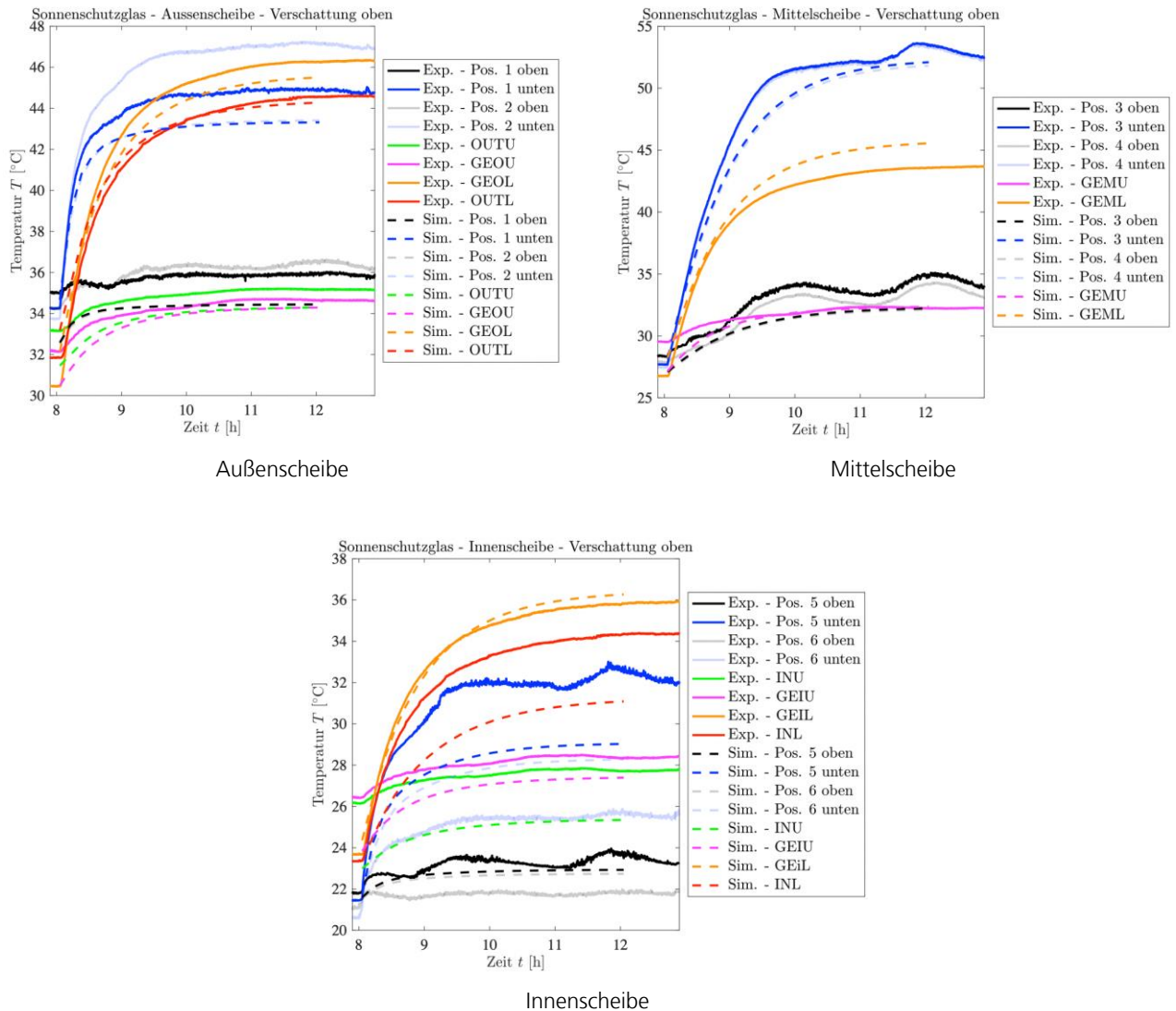


Abbildung A-C: Versuch 1 - Gegenüberstellung von Experiment und Simulation.

Anhang A8.2 Versuch 5

Für das Wärmedämmglas mit unten liegender halbseitiger Teilverschattung (siehe auch Versuchsbeschreibung in Abschnitt 8.4.2 und Auswertung in Abschnitt 8.5.5), schwarzer Folie über die obere Hälfte auf der Innenscheibe und flächig identischer Wärmedämmung hinter der Folie, wurde mit Hilfe eines dreidimensionalen FE-Modells in ANSYS der transiente Temperaturverlauf bzw. die Temperaturentwicklung in den Einzelscheiben des Wärmedämmglases ermittelt. In Abbildung A-D sind die Ergebnisse dargestellt, wo sich eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und numerischer Simulation zeigt.

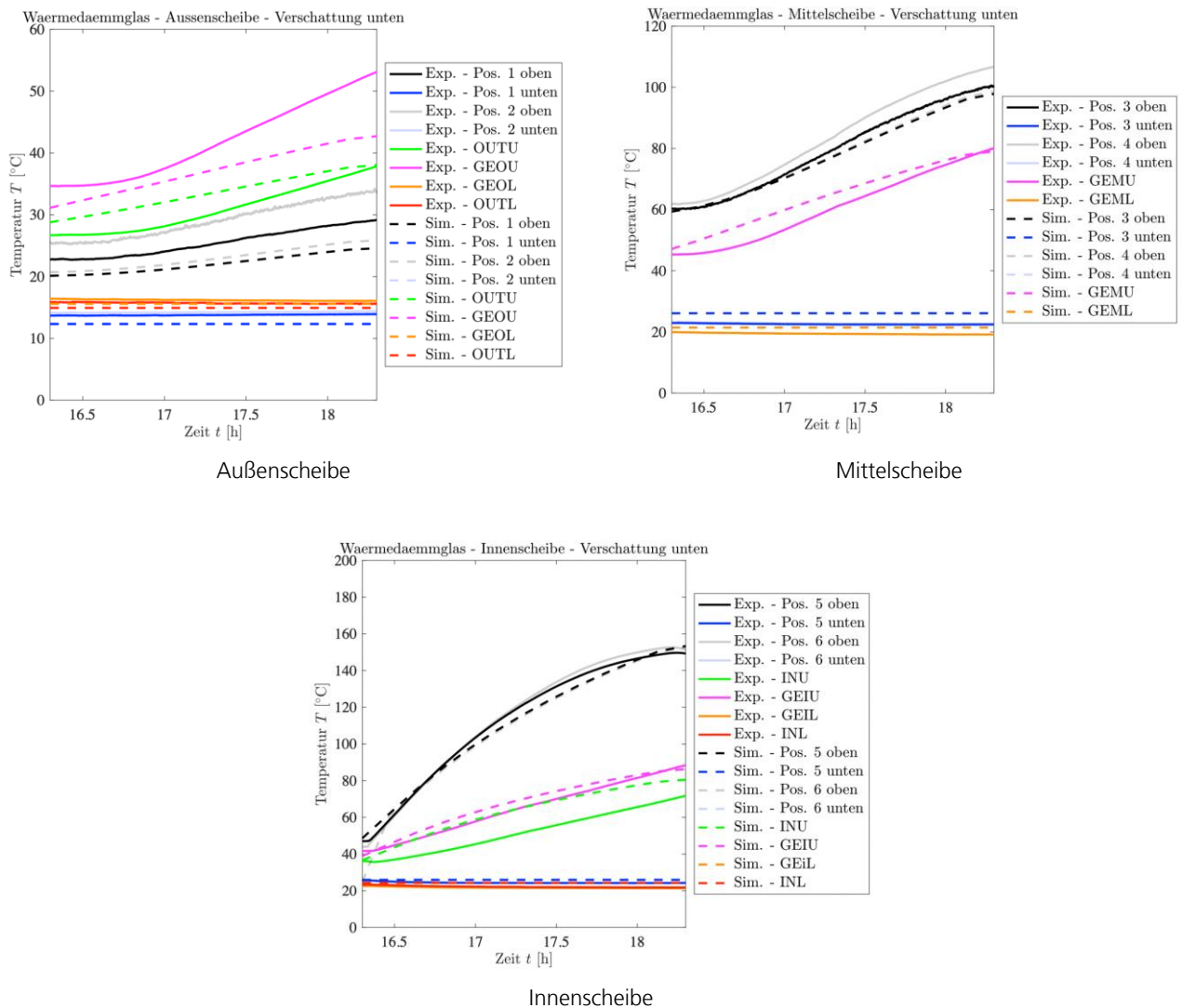


Abbildung A-D: Versuch 5 - Gegenüberstellung von Experiment und Simulation.

In Abbildung A-E ist das kritische Temperaturfeld, welches die maximale Glaskantenspannung von ca. 58 MPa (siehe Abbildung A-F) induziert dargestellt. Beim qualitativen Vergleich der Lage der maximalen Spannung mit dem Ort des Bruchsprungs (siehe Abbildung A-G) lässt sich eine gute Übereinstimmung feststellen.

C: iplus mit Daemnung - transient 3D

Temperatur_Innenscheibe

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 6900

Max: 153,32

Min: 22,942

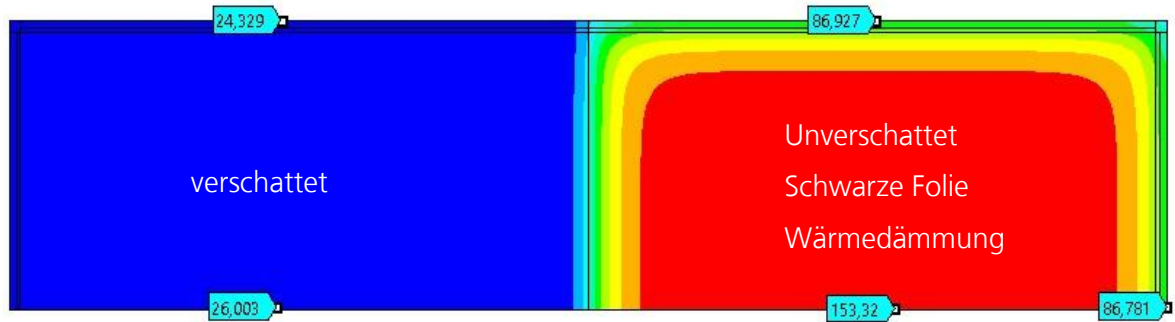
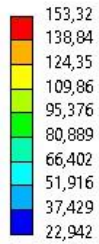


Abbildung A-E: Versuch 5 – Temperaturfeld der Innenscheibe aus numerischer Simulation mit ANSYS.

D: Spannungsberechnung 3D

max_spannung_innenscheibe_flaeche

Type: Maximum Principal Stress

Unit: MPa

Time: 6600

Max: 58,1

Min: -0,0755

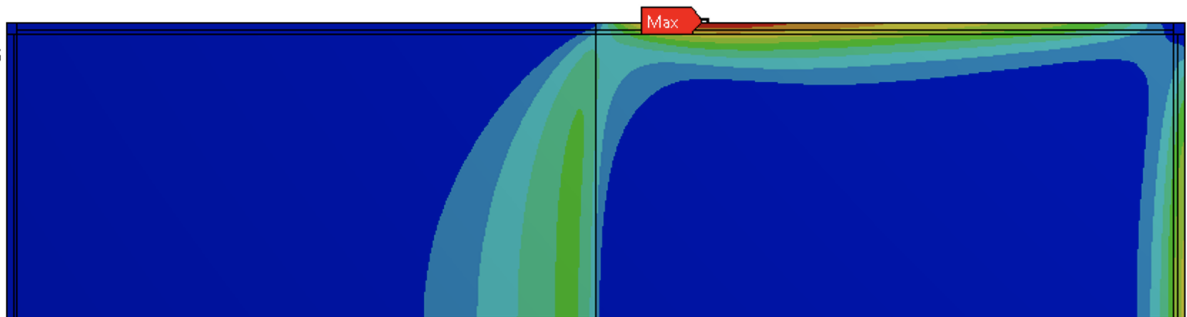
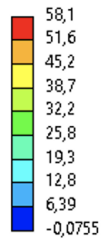


Abbildung A-F: Versuch 5 – Spannungsfeld der Innenscheibe aus numerischer Simulation mit ANSYS.

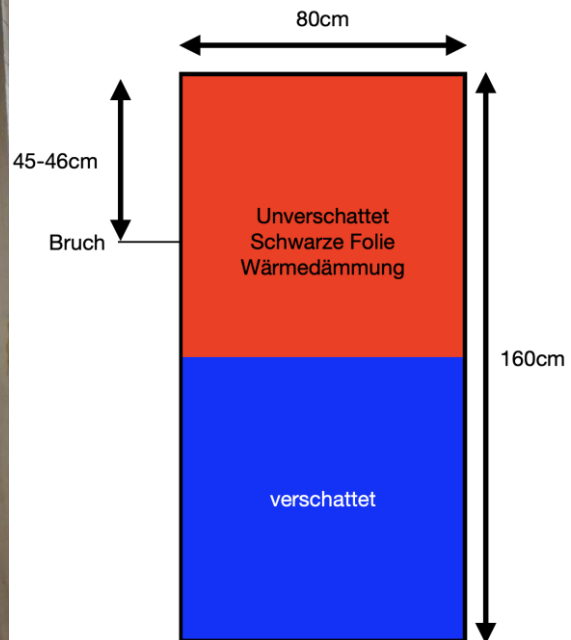


Abbildung A-G: Versuch 5 – Lage des Bruchsprungs der Innenscheibe.