

Berücksichtigung der Verschattung durch Attiken in der hygrothermischen Simulation

Ermittlung von Abminderungsfaktoren für die Verschattung

Arbeitsgruppe Verschattung im Rahmen der Bearbeitung des WTA-Merkblatts 6-8
Christian Bludau, Heiko Fechner, Dominik Noe, Oskar Pankratz, Johannes Tieben-Köttl, Benjamin Weiß

Stand: 22.04.2026

1 Einleitung

In hygrothermischen Simulationen haben Verschattungen durch Attikageschosse, überragende Nebenbebauungen, Bäume und Berge sowie durch Terrassenbeläge oder aufgeständerte Solarmodule o.ä. einen maßgeblichen Einfluss auf die Strahlungsgewinne der Oberfläche, welche für die Rücktrocknung nach innen relevant ist. Dieser ist insbesondere beim hygrothermischen Nachweis von nicht belüfteten Flachdachkonstruktionen zu berücksichtigen. In den letzten Jahren wurden diesbezüglich vereinfachte Ansätze aufgestellt ([1]; [2]; [3]), mit denen die Verschattungseinflüsse über Abminderungsfaktoren des Absorptions- und Emissionsgrades der Dachoberfläche berücksichtigt werden können. Hinsichtlich des Einflusses von Balkonbrüstungen, Attiken und kleineren Dachaufbauten liegen in der Fachliteratur wenige Untersuchungen vor, sodass nur vereinzelte Angaben [4] zur maximalen Höhe eines Beschattungselementes, ab welcher der Einfluss vernachlässigbar ist, vorliegen. Im Folgenden sollen höhen- und orientierungsabhängige Abminderungsfaktoren für die Verschattung vorgestellt werden, welche im Zuge der Überarbeitung des WTA-Merkblatts 6-8 [3] ermittelt wurden.

2 Vorgehen

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden zunächst standortspezifische Klimadateien generiert, welche unterschiedliche Verschattungssituationen infolge von Attiken für die Standorte Holzkirchen (D), Locarno (CH), Zwettl (AT) und Hamburg (D) berücksichtigen.

In einem ersten Schritt wird mittels Sondierungssimulationen untersucht, inwiefern sich variierende Attikahöhen sowie unterschiedliche geometrische Konstellationen auf den Feuchtegehalt der betrachteten Konstruktionsaufbauten auswirken. Auf Basis dieser Untersuchungen soll eine relevante Attikahöhe abgeleitet sowie der bestehende Ansatz [3] verifiziert werden.

Im zweiten Schritt wird anhand vertiefender Simulationen die maßgebliche Variantenkombination identifiziert. Hierbei werden Parameter wie Standort, Konstruktionsaufbau, Dachabdichtung sowie weitere Randbedingungen systematisch variiert und hinsichtlich ihres Einflusses auf das hygrothermische Verhalten bewertet.

Zur weiterführenden Analyse werden zweidimensionale numerische Simulationen der Attikasituation durchgeführt, welche die instationäre Temperaturverteilung unter Berücksichtigung der Längswärmeleitung innerhalb der Konstruktion abbilden. Auf dieser Grundlage wird die Lage des kritischen Bewertungspunktes bestimmt und validiert.

Abschließend werden aus den Simulationsergebnissen Abminderungsfaktoren für hygrothermische Berechnungsverfahren abgeleitet, mit denen der Einfluss der Attikaverschattung in vereinfachter Form über die Abminderung der kurzwelligen Absorption und langwelligen Emission der Dachoberfläche berücksichtigt werden kann.

3 Untersuchungen

3.1 Konstruktionsaufbauten

Die Berechnungen werden für jeweils eine repräsentative nicht belüftete Flachdachkonstruktion im Wohnungs- und Industriebau unter Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen durchgeführt. In beiden Fällen handelt es sich um ein Sparrendach mit Gefachdämmung zwischen der Tragkonstruktion und Überdämmung. Die Dachaufbauten werden im Folgenden näher beschrieben.

3.1.1 Wohnungsbau

Beim Dachaufbau für den Wohnungsbau handelt es sich um ein Nacktdach, welches von außen nach innen wie folgt aufgebaut ist:

- Bitumenabdichtung (s_d -Wert = 180 m)
- EPS -Wärmedämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,04 W/m·K) 12 cm
- Bauzeitabdichtung / Dampfbremse (s_d -Wert = 100 m)
- Weichholzschalung 2,4 cm
- Mineralfaserdämmung (WLF 0,035 W/(m·K)) 24 cm
- Feuchtevariable Dampfbremse
- Gipskartonplatte 1,25 cm

Der Konstruktionsaufbau des simulierten Flachdachaufbaus ist in Abbildung 1 dargestellt.

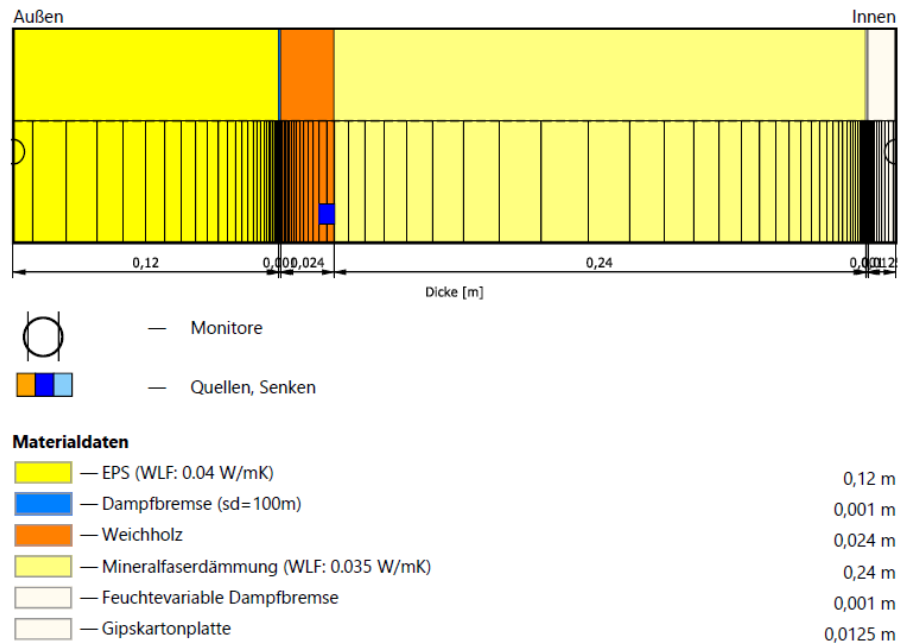


Abbildung 1: Darstellung des simulierten Dachaufbaus für den Wohnungsbau

Luftdichtheit und Infiltration

Beim Wohnungsbau wird von einer Luftdichtheit der Gebäudehülle von $q_{50} = 3,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ausgegangen. Diese berücksichtigt den konvektiven Feuchteeintrag durch unvermeidbare Fehlstellen in die Konstruktion nach DIN 68800-2:2022 [5] und DIN 4108-3:2024 [6]. Der konvektive Feuchteeintrag wird in den WUFI® Berechnungen über die Infiltrationsquelle in der Holzschalung abgebildet. Die Höhe des zusammenhängenden geheizten Luftraums beträgt 8 m.

Eine Übersicht aller Simulationsparameter ist in Tabelle 2 dargestellt.

3.1.2 Industriebau

Beim Dachaufbau für den Industriebau handelt es sich ebenfalls um ein Nacktdach, welches von außen nach innen wie folgt aufgebaut ist:

- Bitumenabdichtung (s_d -Wert = 180 m)
- EPS-Wärmedämmung (Wärmeleitfähigkeit 0,04 W/mK) 4 cm
- Bauzeitabdichtung / Dampfbremse (s_d -Wert = 100 m)
- OSB 3 - Bepankung 1,5 cm
- Mineralfaserdämmung (WLF 0,035 W/mK) 24 cm
- Feuchtevariable Dampfbremse
- Gipskartonplatte 1,25 cm

Der Konstruktionsaufbau des simulierten Flachdachaufbaus ist in Abbildung 2 dargestellt.

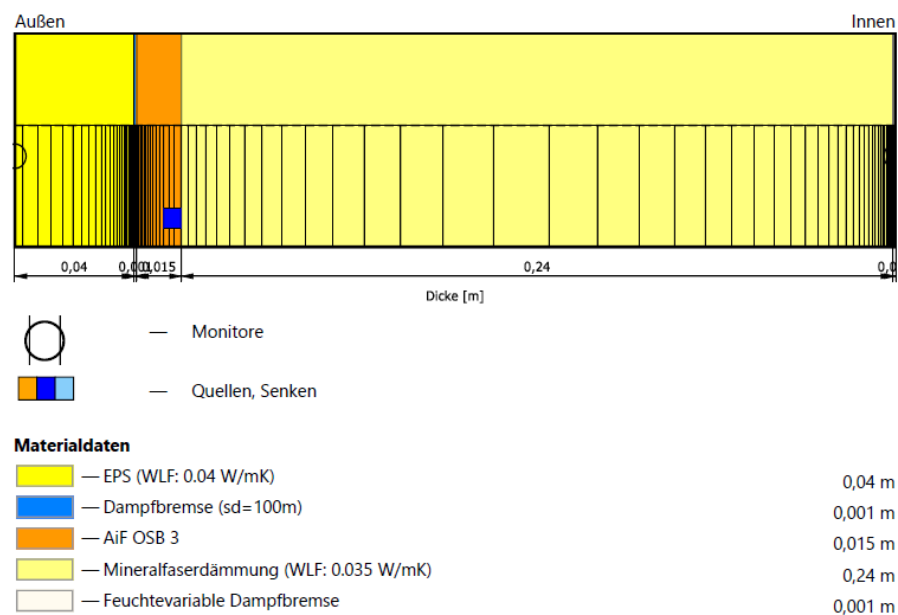


Abbildung 2: Darstellung des simulierten Dachaufbaus für den Industriebau.

Luftdichtheit und Infiltration

Beim Industriebau wird von einem hohen Vorfertigungsgrad ausgegangen und daher von einer besseren Luftdichtheit der Gebäudehülle von $q_{50} = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Die Höhe des zusammenhängenden geheizten Luftraums wird ebenfalls mit 8 m angenommen.

Eine Übersicht aller Simulationsparameter ist in Abschnitt 3.3 Tabelle 2 dargestellt.

3.1.3 Variationen

Im Rahmen der Untersuchungen werden auch verschiedene andere Variationen betrachtet. Diese dienen vorrangig der Verifikation, ob die betrachteten Situationen die maßgeblichen sind. Daher werden die Ergebnisse hier nicht explizit dargestellt. Folgende Variationen werden betrachtet:

- Gefach mit Holzfaserdämmung WLF 0,035 W/mK anstelle Mineralfaserdämmung
- Gefach mit Zellulosefaserdämmung WLF 0,037 W/mK anstelle Mineralfaserdämmung
- Industriebau ohne Überdämmung
- Wohnungsbau mit reduzierter Überdämmung (6 cm)

3.2 Standorte und Verschattung

Für die Untersuchungen werden die Standorte Holzkirchen (D), Hamburg (D), Locarno (CH) und Zwettl (AT) gewählt, um in den D-A-CH-Länder möglichst kritische Standorte zu evaluieren.

Es werden zwei verschiedene Verschattungssituationen untersucht. Im ersten Fall wird eine nach Südwest (SW) orientierte Attikaecke (Attiken zeigen nach Süden und Westen) betrachtet, wie in Abbildung 3 dargestellt und im zweiten Fall eine nach Süden (S) orientierte Attikaecke (Attiken im Südosten und Südwesten).

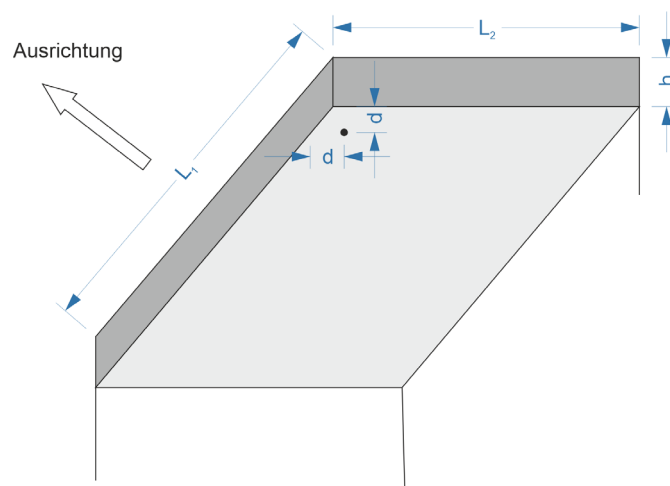


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Flachdachs mit Referenzpunkt in der SW-Ecke (siehe Anhang I).

Es werden Attikahöhen von 20 cm bis 120 cm untersucht. Als Referenzpunkt für die Verschattung wurde jeweils ein Punkt verwendet, der von beiden Attiken 20 cm entfernt ist. Zur Ermittlung geeigneter Abminderungsfaktoren werden die unverschatteten Klimadatenätze herangezogen und mit verschiedenen Abminderungsfaktoren beaufschlagt, um den Einfluss der Verschattungen vereinfacht abbilden zu können.

Für diese Verschattungssituationen werden mit Meteororm [8] verschattete Klimadaten für die Simulationen mit WUFI® erstellt. Die Software ermöglicht es, für beliebige Standorte generische Klimadatenätze über ein Jahr basierend auf langjährigen Messdaten zu erstellen, wobei auch eine Verschattung aufgrund einer Abdeckung des Horizonts berücksichtigt werden kann. Hierbei wird für den zu betrachtenden Punkt auf dem Flachdach zunächst die Horizontlinie bestimmt. Für jede Azimutrichtung wird aus Geometrie (Attikahöhe, Abstand, Länge und Ausrichtung) der zugehörige Höhenwinkel der Attika ermittelt. Diese Horizontlinie kann dann in Meteororm [8] in die Strahlungsermittlung einbezogen werden. Die direkte Strahlung wird dann über den Höhenwinkel mit dem aktuellen Sonnenstand verglichen (Sonne höher \Rightarrow keine Verschattung). Zur Ermittlung der diffusen Strahlung wird aus der projizierten Horizontlinie ein Gesichtsfeldfaktor als Anteil des sichtbaren Himmels berechnet und der diffuse Strahlungsanteil entsprechend abgemindert. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Verschattungshorizont für eine nach Südwesten orientierte Ecke mit einer 60 cm hohen Attika inklusive des Verlaufes der Sonne am Standort Hamburg. Der Horizont wird über Azimut (Orientierung) und Höhenwinkel der schattengebenden Kante angegeben, wobei Süd als 0° (mittig im Diagramm dargestellt) definiert wird.

Eine Zusammenfassung der untersuchten Parameter ist in Tabelle 1 dargestellt.

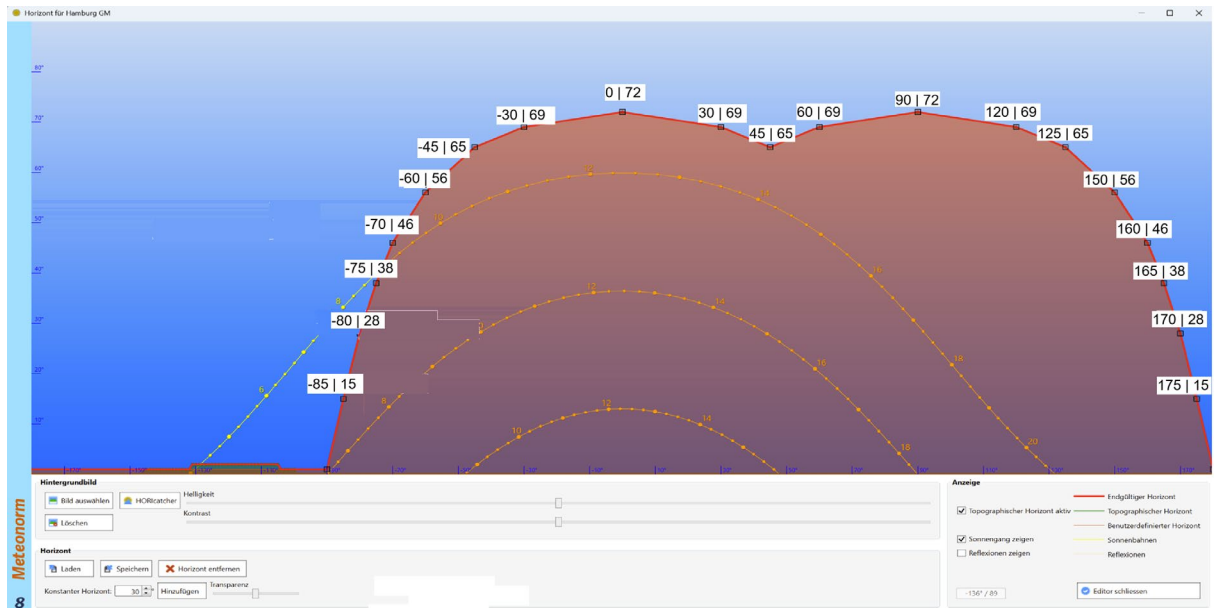


Abbildung 4: Horizontverschattung für eine 60 cm hohe SW Attika mit je 20 cm Abstand. Der Verlauf der Sonne ist für den Standort Hamburg dargestellt. Bildquelle: Meteonorm [8].

Tabelle 1: Zusammenfassung der untersuchten Parameter

Parameter	Variation
Gebäude	Wohnungsbau (Infiltration: 3,0 m ³ /m ² h; Höhe 8 m) Industriebau (Infiltration: 1,5 m ³ /m ² h; Höhe 8 m)
Strahlungsparameter Dachbahn	Hell (a = 0,4) und dunkel (a = 0,8); ε = 0,9
Attikasituationen	Nach Südwesten orientierte Attikaecke; nachfolgend Südwest-Attika genannt Nach Süd orientierte Attikaecke; nachfolgend Südattika genannt
Attikahöhen	20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm
Standorte	Holzkirchen (D), Hamburg (D), Locarno (CH), Zwettl (AT)

3.3 Simulationsparameter

Die für die Parameterstudie angesetzten Randbedingungen und Simulationsparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Simulationsparameter

Außenoberfläche		
Außenklima	Hamburg (D), Holzkirchen (D), Locarno (CH), Zwettl (AT), mit/ohne Horizontverschattung	
Orientierung	---	
Neigung	0° *)	
Wärmeübergangskoeffizient (außen):	19 W/m ²	
Oberflächen-s _d -Wert	180 m (Bitumenabdichtung, zweilagig)	
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	0,4 – helle Oberfläche 0,8 – dunkle Oberfläche	
Langwellige Strahlungsemissionszahl	0,9	
Strahlungsbedingte Unterkühlung	erforderlich	
Regenparameter	keine Berücksichtigung des Regens	
Innenoberfläche		
Innenraumklima	Wohnbau	Bemessungsklima (normale Feuchtelast + 5%) nach [6] abgeleitet vom jeweiligen Außenklima
	Industriebau	Bemessungsklima (niedrige Feuchtelast) nach [6] abgeleitet vom Außenklima
Wärmeübergangskoeffizient (innen)	8 W/m ² K [7]	
Sonstiges		
Infiltrationsquelle	Innere 5 mm der Weichholzschalung bzw. der OSB-3 Bepankung Wohnungsbau: q ₅₀ = 3 m ³ /m ² h Industriebau: q ₅₀ = 1,5 m ³ /m ² h Höhe: 8 m	
Anfangsfeuchte	Ausgleichsfeuchte bei 80 %	
Berechnungszeitraum	5 Jahre	
Berechnungsbeginn	1. Oktober	

*) Anm.: Die Dachneigungen von 0° wird in den Berechnungen stellvertretend für gering geneigte Dächer angesetzt, dies hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Strahlungsgewinne. Aus konstruktiven Gründen ist das 0°-Dach in der Praxis zu vermeiden.

3.4 WUFI Parameterstudie

3.4.1 Sondierungssimulationen

Im ersten Schritt wird ermittelt, wie sich unterschiedliche Attikahöhen und Konstellationen (einseitige Verschattung / zweiseitige Verschattung bzw. Ecksituation) auf den Feuchtegehalt der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Konstruktionen für den Standort Holzkirchen auswirken. Dazu wurden die gemäß Abschnitt 3.2 erzeugten Klimadateien für die unterschiedlichen Verschattungssituationen herangezogen. Die Ergebnisse wurden gegenübergestellt und mit jenen der unverschatteten Variante sowie der Variante mit bestehenden Abminderungsfaktoren für vertikale Verschattungselemente gemäß [3] abgeglichen. So kann beurteilt werden, ab welcher Höhe eine Verschattung durch umlaufende Attiken als relevant einzustufen ist. Des Weiteren kann die „Worst-Case-Situation“ bestimmt und gleichzeitig beurteilt werden, ob diese durch den bestehenden Ansatz [3] abgedeckt werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 bis Abbildung 12 dargestellt.

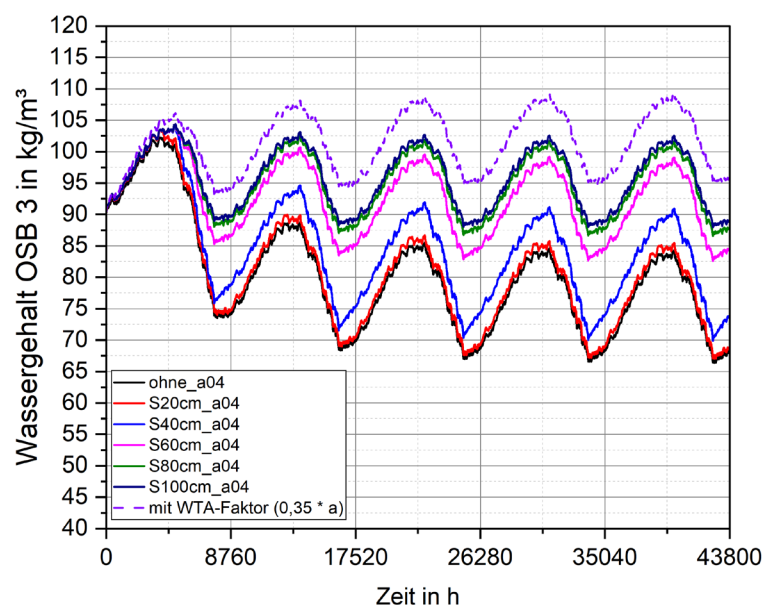


Abbildung 5: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Industriebau mit Südattika und heller Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäss [3].

Industriebau

In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die Ergebnisse für den unmittelbaren Dachbereich einer Südattika mit unterschiedlichen Höhen jeweils für eine solare Absorptionszahl der Dachabdichtung von $a = 0,4$ (helle Oberfläche) und $a = 0,8$ (dunkle Oberfläche) dargestellt. Es können folgende Schlussfolgerungen daraus abgeleitet werden:

- Zwischen einer Attikahöhe von 80 cm und 100 cm besteht nur ein geringer Unterschied
- Der bestehende Abminderungsfaktor gemäß [3] deckt ein einseitiges, südlich liegendes Verschattungselement auf der sicheren Seite liegend ab

Eine Attikahöhe von 40 cm hat einen deutlichen Einfluss auf den Feuchtegehalt der OSB-3 Beplankung, erst bei einer Höhe von weniger als 20 cm ist die Differenz zur unverschatteten Variante nicht mehr maßgebend.

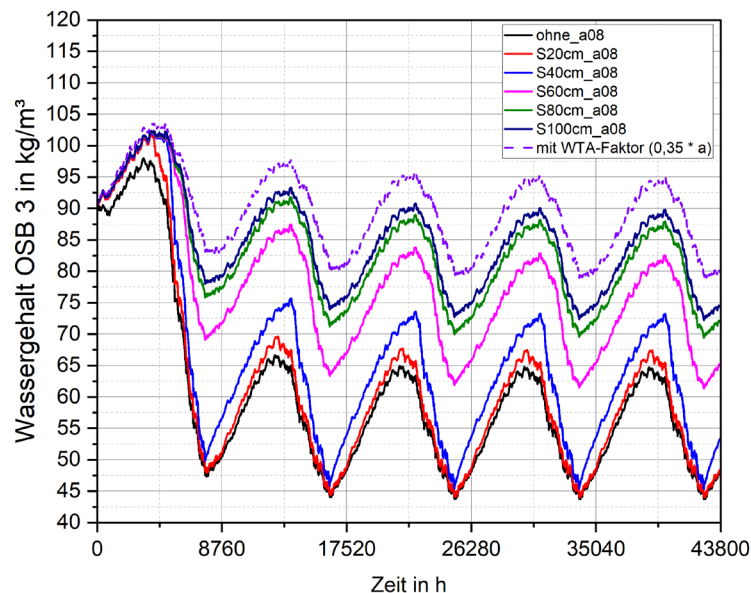


Abbildung 6: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Industriebau mit Südattika und dunkler Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäß [3].

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die Ergebnisse für den unmittelbaren Eckbereich zwischen einer südlich und östlich (SO) sowie einer südlich und westlich (SW) liegenden Attika mit unterschiedlichen Höhen jeweils für eine solare Absorptionszahl der Dachabdichtung $a = 0,4$ und $a = 0,8$ dargestellt. Es können folgende Schlussfolgerungen daraus abgeleitet werden:

- Der Eckbereich ist aus feuchtetechnischer Sicht kritischer und somit für die Bemessung maßgebend

- Der bestehende Abminderungsfaktor gemäß [3] deckt die Situation am zugrundeliegenden Standort gerade noch ab; für eine Absorption der Dachabdichtung von $a = 0,8$ liegt der Feuchtegehalt bereits geringfügig unterhalb jener Kurve mit explizit simuliertem Verschattungshorizont.
- Bei einer Höhe von 20 cm liegen die Ergebnisse nur geringfügig über der unverschatteten Variante

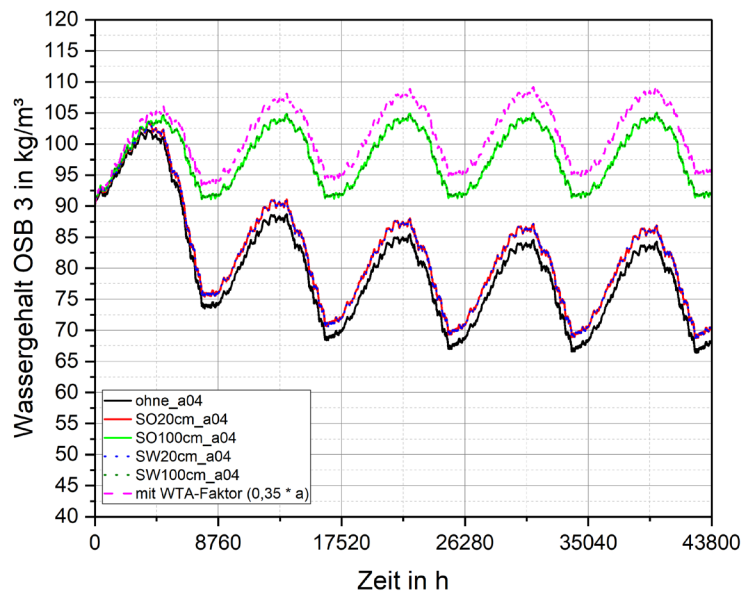


Abbildung 7: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Industriebau mit Südost- und Südwestattika und heller Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäß [3].

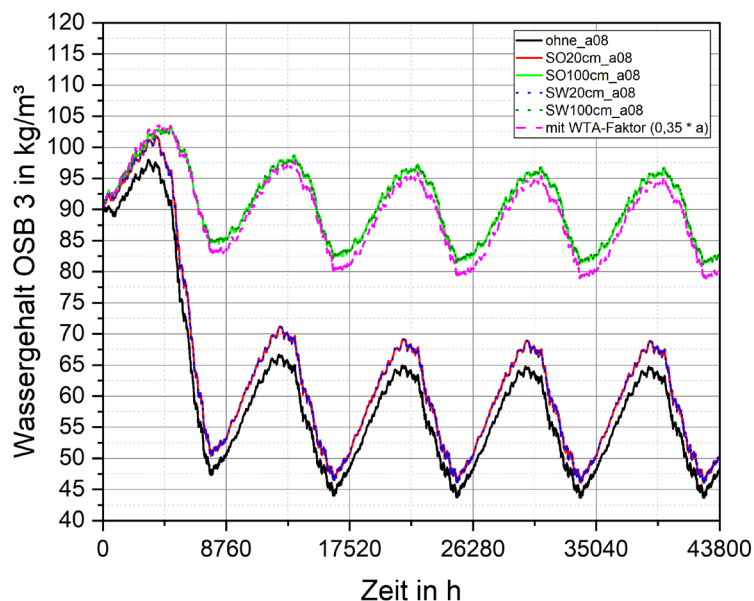


Abbildung 8: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Industriebau mit Südost- und Südwestattika und heller Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäß [3].

In allen Fällen zeigen sich Varianten mit höherer Absorptionszahl erwartungsgemäß deutlich sensitiver auf die Verschattungssituation durch Attiken.

Wohnbau

In Abbildung 9 bis Abbildung 12 sind analog zu den oben beschriebenen Industriebauvarianten die Ergebnisse für die Wohnbauvarianten dargelegt. Insgesamt lassen sich aus diesen Ergebnissen dieselben Erkenntnisse gewinnen, wie für den Industriebau beschrieben.

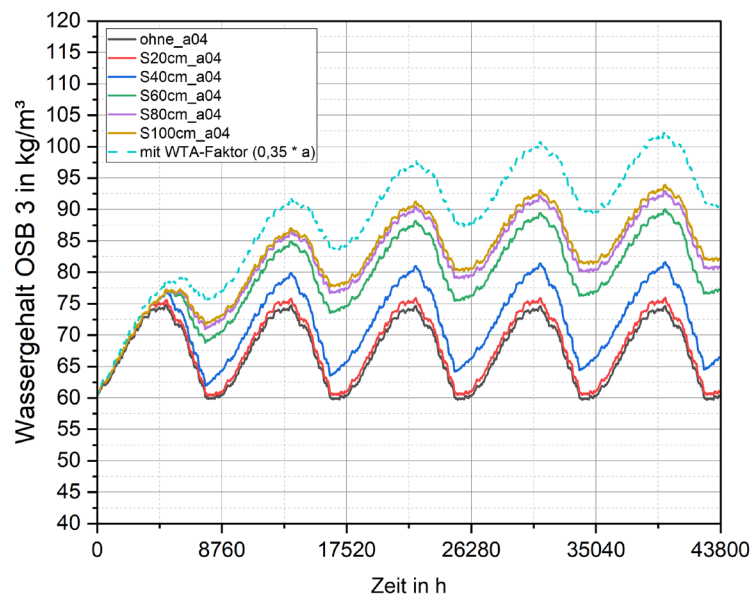


Abbildung 9: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Wohnbau mit Südattika und heller Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäß [3].

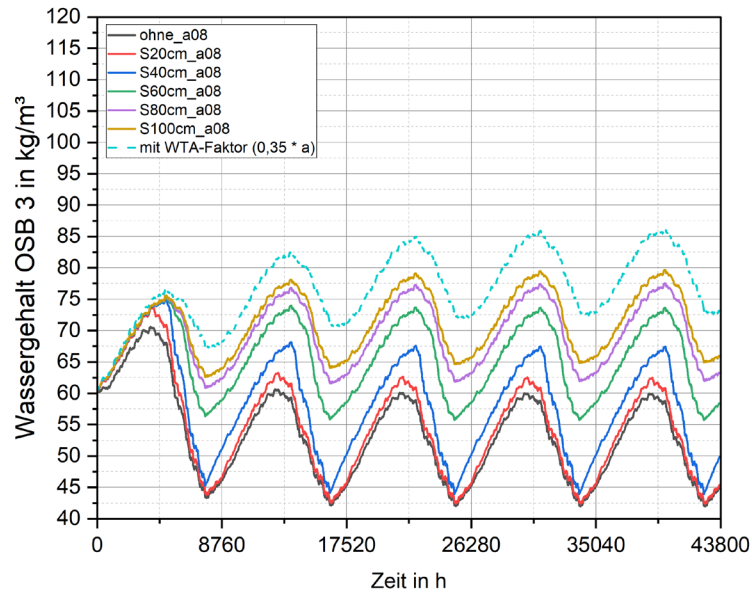


Abbildung 10: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Wohnbau mit Südattika und dunkler Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäß [3].

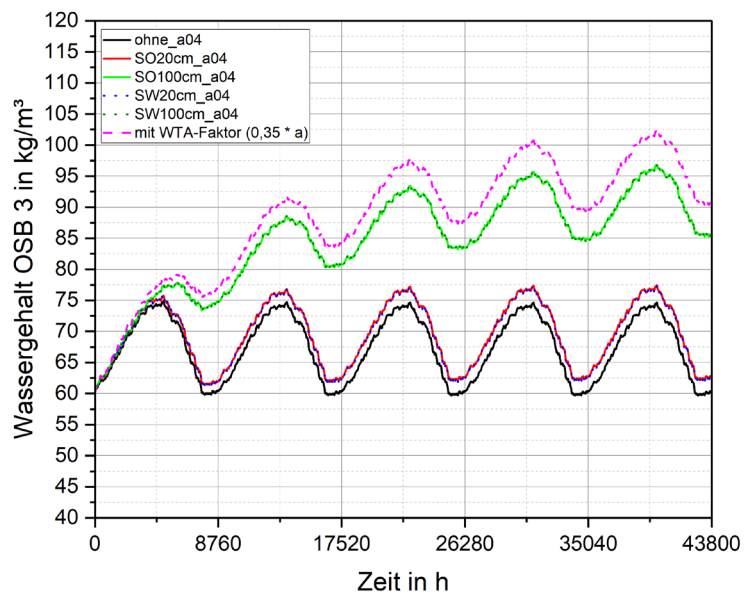


Abbildung 11: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Wohnbau mit Südost- und Südwestattika und heller Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäß [3].

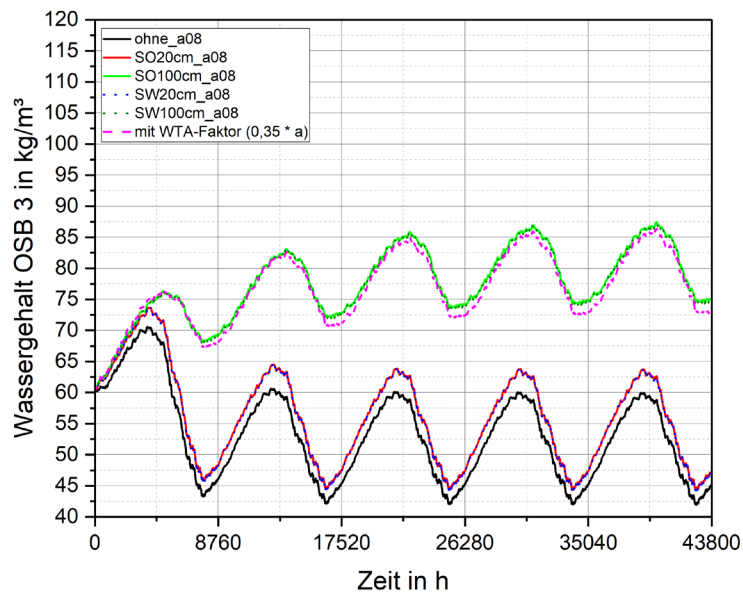


Abbildung 12: Wassergehalt der OSB-3 Beplankung für den Wohnbau mit Südost- und Südwestattika und dunkle Oberfläche für unterschiedliche Attikahöhen am Standort Holzkirchen (D) inkl. Vergleich mit bestehendem Abminderungsfaktor gemäss [3].

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Sondierungssimulationen wurden die Rahmenbedingungen und Varianten für 3.4.2 nachfolgenden, weiterführenden Simulationen festgelegt.

3.4.2 Weiterführende Simulationen

Aus den Ergebnissen der Sondierungssimulationen der Südwestattika kann geschlossen werden, dass eine Attikahöhe von 40 cm noch zu einem relevant höheren Wassergehalt in der Außenbeplankung der zugrundeliegenden Aufbauten führt und somit aus bemessungstechnischer Sicht nicht vernachlässigt werden kann. Infolgedessen werden deshalb Simulationen für Attikahöhen von 30 cm und 40 cm durchgeführt und mit den vereinfachten Simulationen mittels Abminderungsfaktoren abgeglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.

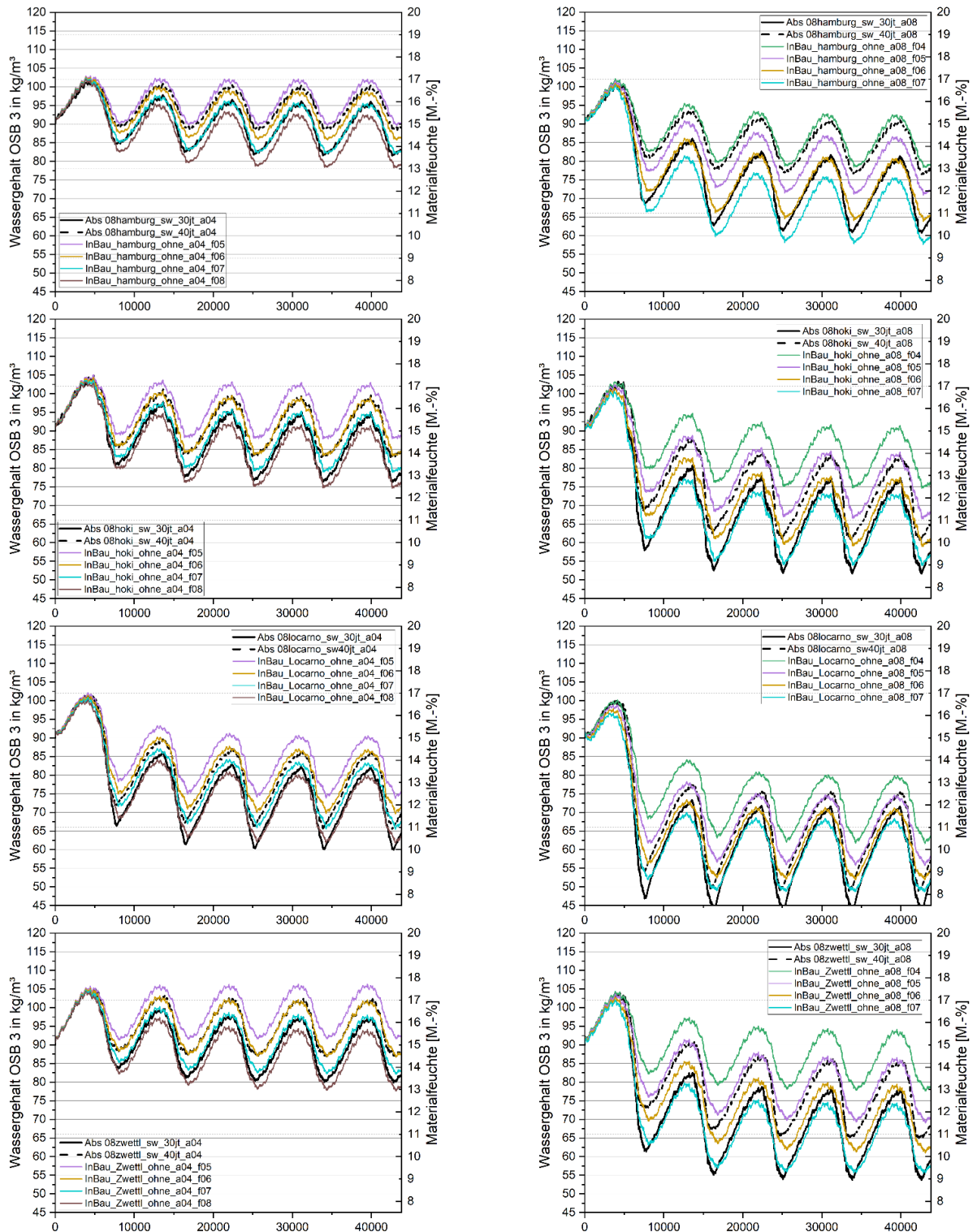


Abbildung 13: Industriebau. Wassergehalt in der Außenbeplankung bei den mittels Horizontlinie simulierten Südwesteckvarianten mit unterschiedlichen Attikahöhen ($h=30$ cm und $h=40$ cm) und Absorptionszahlen der Dachabdichtung (Links: $a_{\text{Abdichtung}} = 0,4$. Rechts: $a_{\text{Abdichtung}} = 0,8$). Vergleich mit Varianten ohne Horizontlinie, bei denen vereinfacht die Absorptionszahl entsprechend unterschiedlicher Abminderungsfaktoren ($f = 0,4 / 0,5 / 0,6 / 0,7 / 0,8$) reduziert wurde ($a = a_{\text{Abdichtung}} * f$).

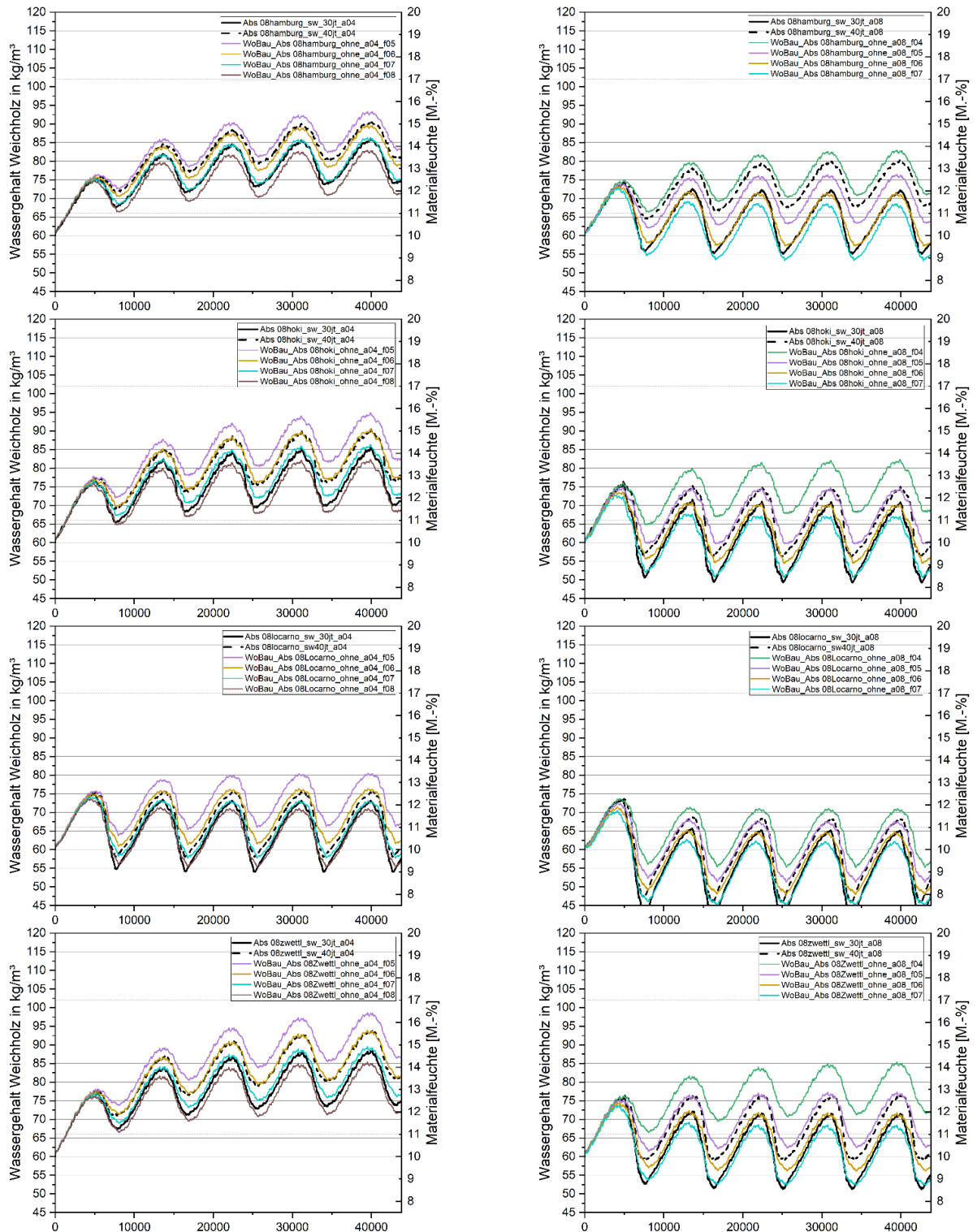


Abbildung 14: Wohnbau. Wassergehalt in der Außenbeplankung bei den mittels Horizontlinie simulierten Südwesteckvarianten mit unterschiedlichen Attikahöhen ($h=30$ cm und $h=40$ cm) und Absorptionszahlen der Dachabdichtung (Links: $a_{\text{Abdichtung}} = 0,4$. Rechts: $a_{\text{Abdichtung}} = 0,8$). Vergleich mit Varianten ohne Horizontlinie, bei denen vereinfacht die Absorptionszahl entsprechend unterschiedlicher Abminderungsfaktoren ($f = 0,4 / 0,5 / 0,6 / 0,7 / 0,8$) reduziert wurde ($a = a_{\text{Abdichtung}} * f$).

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass für die auf der sicheren Seite liegenden, vereinfachten Abbildung der Verschattungssituation in der Attikaecke jene Varianten mit einer höheren solaren Absorptionszahl ($a = 0,8$) maßgebend sind, da hier höhere Abminderungsfaktoren notwendig sind, um die zugrundeliegenden Wassergehalte bei expliziter Horizontsimulation geeignet abbilden zu können. Für die Varianten mit $a = 0,8$ sind für die Standorte Holzkirchen (D), Locarno (CH) und Zwettl (AT) in Abhängigkeit der Attikahöhe folgende Abminderungsfaktoren erforderlich:

- 30 cm: 0,6
- 40 cm: 0,5

Für den Standort Hamburg (D) können folgende Abminderungsfaktoren abgeleitet werden:

- 30 cm: 0,6
- 40 cm: 0,4

Aus den weiterführenden Simulationen kann abgeleitet werden, dass der Standort Hamburg mit einer Absorptionszahl von $a = 0,8$ der Dachabdichtung von den hier untersuchten Standort- und Absorptionszahlkombinationen für die vorliegende Problemstellung maßgebend ist. Der Konstruktionsaufbau (Industriebau, Wohnbau) hat dabei nur einen geringen Einfluss, wobei die abgeleiteten Faktoren für den Wohnungsbau etwas weniger auf der sicheren Seite liegen. Die finalen Simulationen zur Ermittlung geeigneter Abminderungsfaktoren zur vereinfachten Abbildung von Attikaecken in hygrothermischen Simulationen von Flachdächern werden deshalb mit der oben beschriebenen, maßgeblichen Variantenkombination für den Wohnungsbau durchgeführt (siehe Abschnitt 3.4.3).

3.4.3 Finale Simulationen

Die Ergebnisse der abschließenden Simulationen zur Festlegung der vereinfachten Abminderungsfaktoren sind in Abbildung 15 bis Abbildung 18 dargestellt. Im ersten Schritt wird sichergestellt, dass die zwei als kritisch anzusehenden Ausrichtungen (SW-Ecke und S-Ecke, siehe Abschnitt 3.2) aus feuchtetechnischer Sicht in etwa auf gleichem Niveau liegen. Im Hinblick auf die Ergebnisse in Abbildung 15 kann diese Annahme bestätigt werden, da der Verlauf des Wassergehalts bei beiden Varianten in etwa identisch ist.

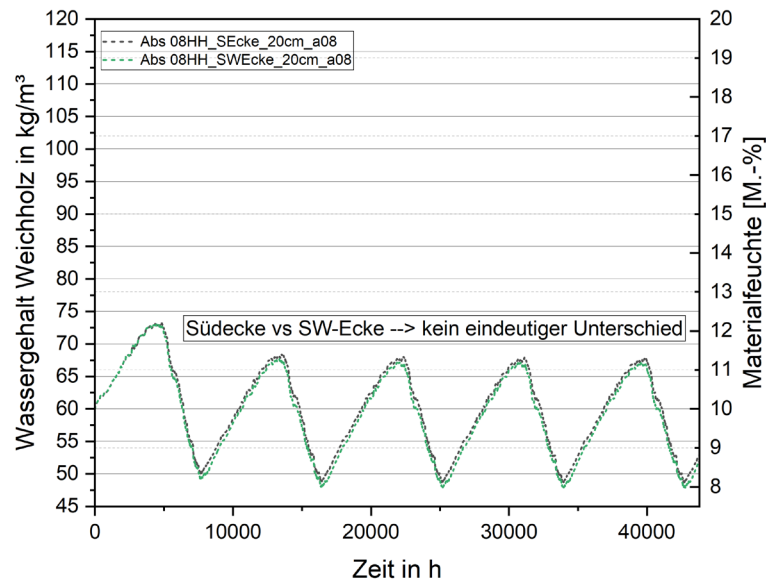


Abbildung 15: Wohnbau. Wassergehalt Außenbeplankung. Vergleich zwischen Süd- und Südwestecke. 20 cm Höhe mit dunkler Oberfläche.

Die Ergebnisse in Abbildung 16 zeigen, dass der Wassergehaltsverlauf in der Außenbeplankung bei der mittels Horizontlinie modellierten Süd-Ecken-Variante (60 cm Attikahöhe) vom Niveau her zwischen jenem bei den Simulationsvarianten mit vereinfacht reduzierter Absorptionszahl liegt. Daraus ergibt sich, dass ein geeigneter Abminderungsfaktor für eine 60 cm hohe Attika zwischen 0,25 ($a_{\text{Abdichtung}} = 0,2$ anstatt 0,8 der ursprünglichen Oberfläche) und 0,38 ($a_{\text{Abdichtung}}=0,3$ anstatt 0,8 der ursprünglichen Oberfläche) liegen sollte. Auf Basis dieses Ergebnisses wird dieser mit einem Wert von 0,35 (siehe Tabelle 3) vorgeschlagen.

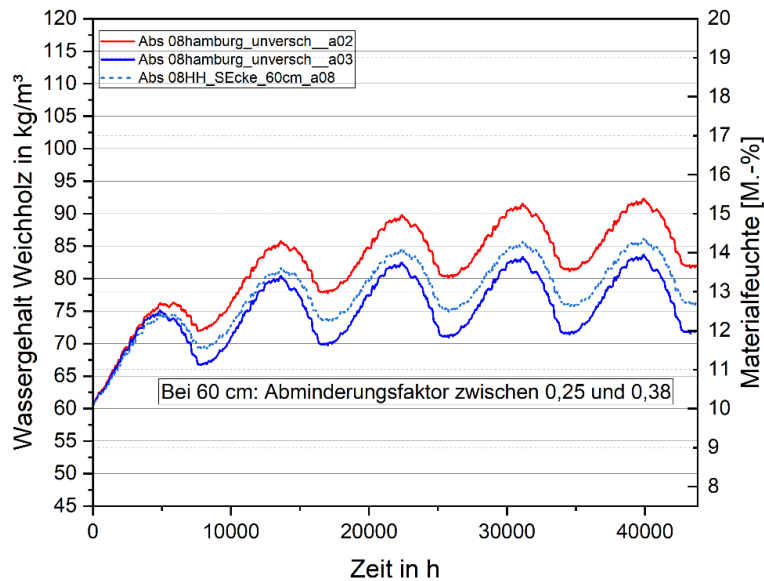


Abbildung 16: Wohnbau. Wassergehalt Außenbeplankung. Vergleich zwischen der mittels Horizontlinie simulierten Südecke (Attikahöhe = 60 cm, $a_{\text{Abdichtung}} = 0,8$) und zweier Varianten ohne Horizontlinie, bei denen vereinfacht die Absorptionszahl reduziert wurde ($a_{\text{Abdichtung}} = 0,3$ und $0,2$).

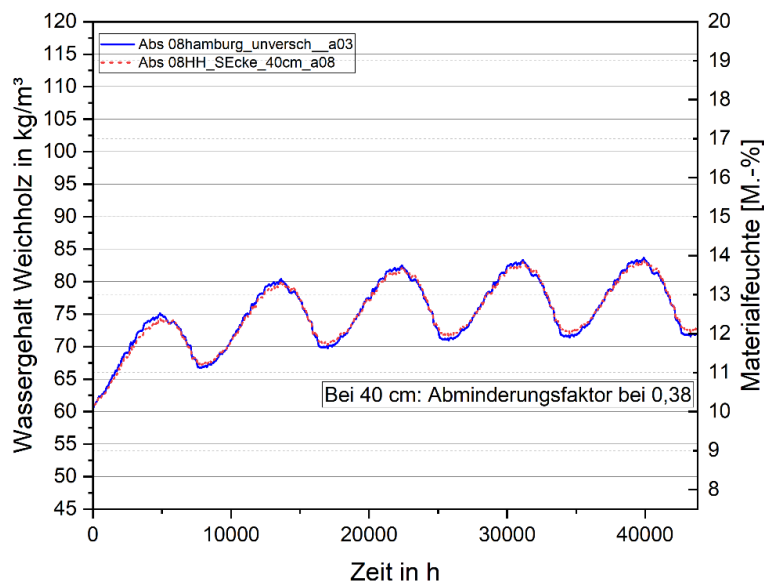


Abbildung 17: Wohnbau. Wassergehalt Außenbeplankung. Vergleich zwischen der mittels Horizontlinie simulierten Südecke (Attikahöhe = 40 cm, $a_{\text{Abdichtung}} = 0,8$) und einer Variante ohne Horizontlinie, bei der vereinfacht die Absorptionszahl reduziert wurde ($a_{\text{Abdichtung}} = 0,3$).

In Abbildung 17 ist der Vergleich für eine Attikahöhe von 40 cm zu sehen. Zur auf der sicheren Seite liegenden Simulation des Wassergehaltverlaufs der Variante mit Horizontlinie ist in diesem Fall die Absorptionszahl auf $a = 0,3$ zu reduzieren, was einem Abminderungsfaktor von 0,38 entspricht. Auf dieser Basis wird für den Attikahöhenbereich (h) $40 \text{ cm} \leq h < 60 \text{ cm}$ ein Abminderungsfaktor von 0,4 vorgeschlagen (siehe Tabelle 3).

Bei einer Attikahöhe von 20 cm (Abbildung 18) lässt sich der Wassergehalt durch Reduktion der Absorptionszahl a auf einen Wert von 0,6 vereinfacht abbilden. Der daraus resultierende Abminderungsfaktor beträgt 0,75. Für den Attikahöhenbereich (h) $20 \text{ cm} \leq h < 40 \text{ cm}$ wird auf dieser Basis ein gerundeter Abminderungsfaktor von 0,8 vorgeschlagen (siehe Tabelle 3).

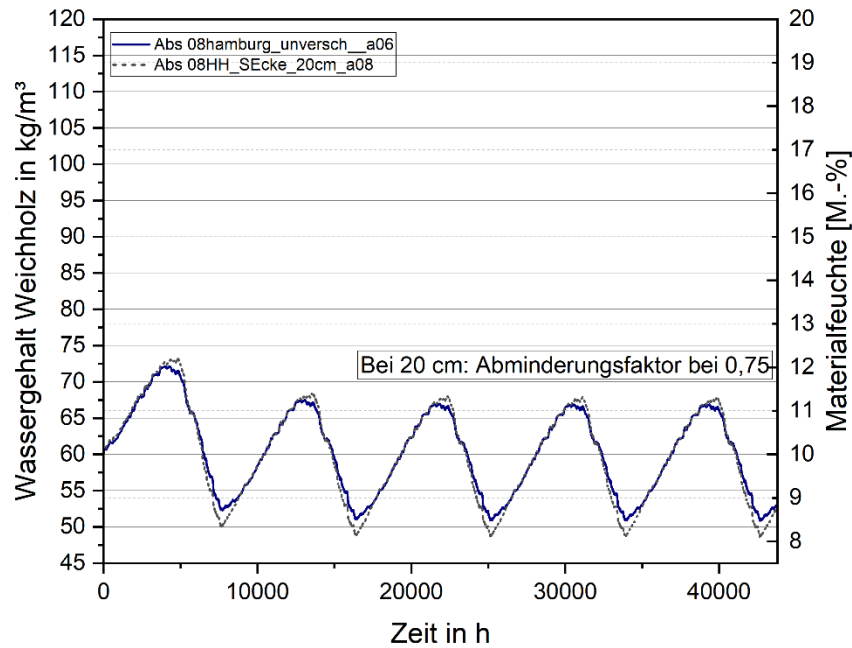


Abbildung 18: Wohnbau. Wassergehalt Außenbeplankung. Vergleich zwischen der mittels Horizontlinie simulierten Südecke (Attikahöhe = 20 cm, $a_{\text{Abdichtung}} = 0,8$) und einer Variante ohne Horizontlinie, bei der vereinfacht die Absorptionszahl reduziert wurde ($a_{\text{Abdichtung}} = 0,6$).

3.5 Zweidimensionale Simulation der Attikasituation

Darüber hinaus werden mehrere 2D-Simulationen von Attika-Varianten durchgeführt. Hierbei werden zwei Attikahöhen von 40 cm und 1 m betrachtet. Abbildung 19 zeigt beispielhaft eine 40 cm Attika. Als Klima wurde das Testreferenzjahr von Hamburg verwendet. Um die Verschattung korrekt abbilden zu können, wurden die Globalstrahlungswerte von 10 cm breiten Abschnitten auf dem Dach vorberechnet und als Klimadaten angesetzt. Die Verschattung wurde dabei direkt auf Stundenbasis berücksichtigt. Abbildung 20 zeigt die Verteilung der Randbedingungen als farbige gekennzeichnete Abschnitte auf der Dachoberfläche.

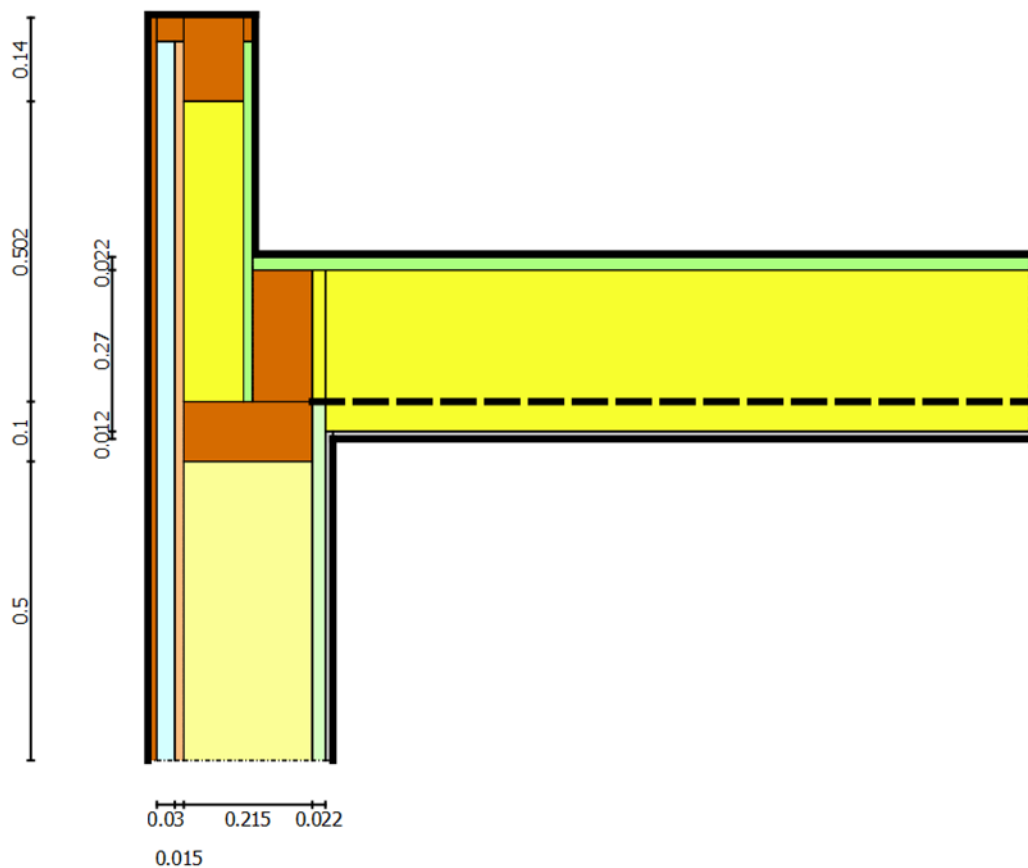


Abbildung 19: Darstellung des Querschnittes für die Berechnung einer 40 cm Attika inkl. Bemaßung.

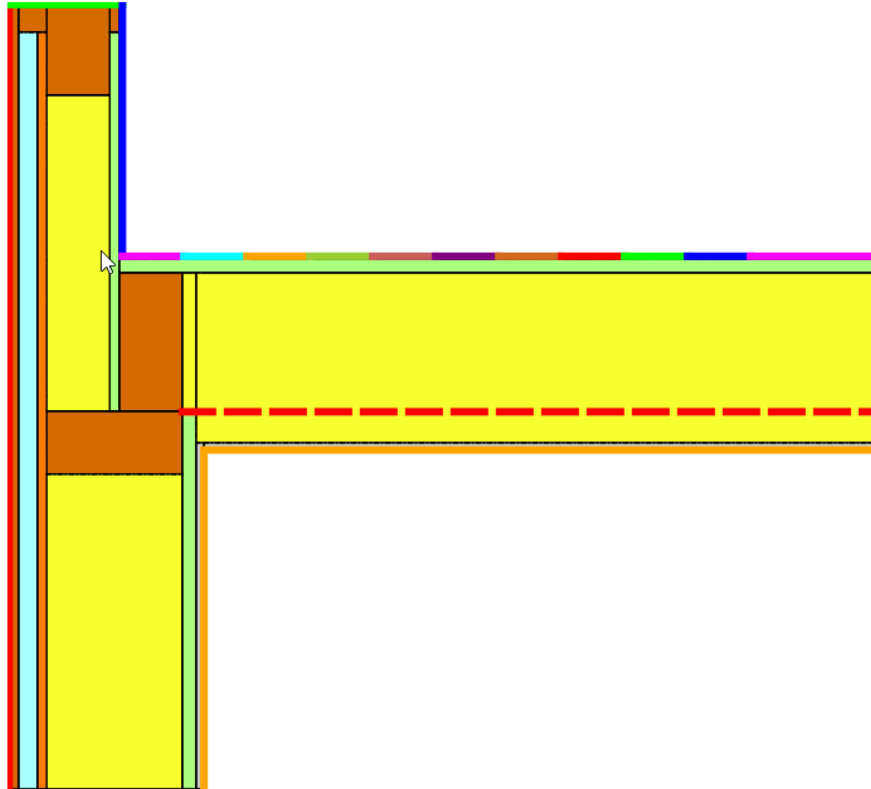


Abbildung 20: Darstellung der verwendeten Randbedingungen bei Betrachtung einer 40 cm Attika (farbige Bereiche).

Die Temperaturverteilung in der Konstruktion ist in Abbildung 21 beispielhaft für den 20. Juni dargestellt. Die Oberflächentemperatur auf der Dachabdichtung erreicht partiell über 50°C. Die blauen Flächen entsprechen einer Temperatur von 20°C.

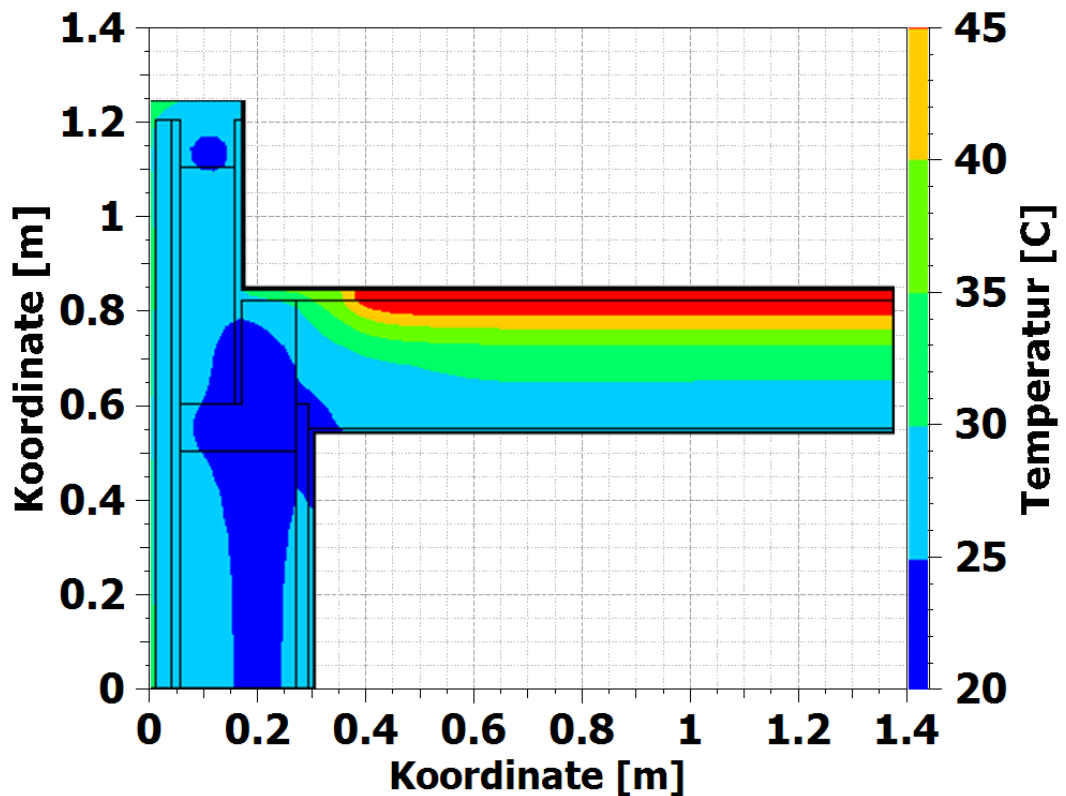


Abbildung 21: Temperaturverteilung bei einer 40 cm Attika am 20.Juni

Ziel dieser Untersuchungen ist es, die dynamische Verteilung der Oberflächentemperatur unter Berücksichtigung der Längswärmeleitung in der Konstruktion zu ermitteln. Weiterhin soll überprüft werden, dass der gewählte Punkt mit jeweils 20 cm Abstand zur Attika als kritischer Punkt für die Bewertung und Verschattungsberechnung heranziehbar ist. Die folgende Darstellung zeigt die Oberflächentemperatur auf der Dachabdichtung am 20. Juni um 12:00 Uhr und um 16:00 Uhr für eine 40 cm hohe Attika. In der Grafik stellt die senkrechte blaue Linie die dachseitige Begrenzung der Attika dar. Die rote senkrechte Linie markiert den 20 cm entfernten Abstand. Es zeigt sich deutlich, dass ab dem gewählten Abstand von 20 cm die Temperatur deutlich ansteigt.

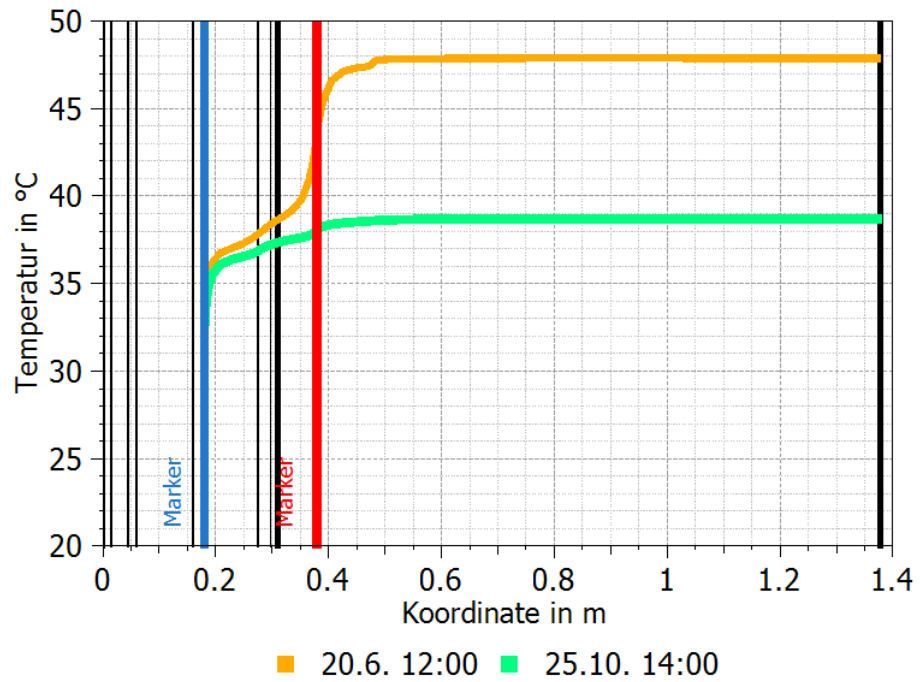


Abbildung 22: Oberflächentemperatur auf der Dachabdichtung bei einer 40cm hohen Attika am 20. Juni um 12:00 Uhr und um 16:00 Uhr.

Zum Vergleich wird in Abbildung 23 die Oberflächentemperatur im Herbst (25. Oktober) dargestellt. Die Verschiebung des Temperaturmaximums ist aufgrund der flacheren Sonnenhöhe deutlich zu erkennen.

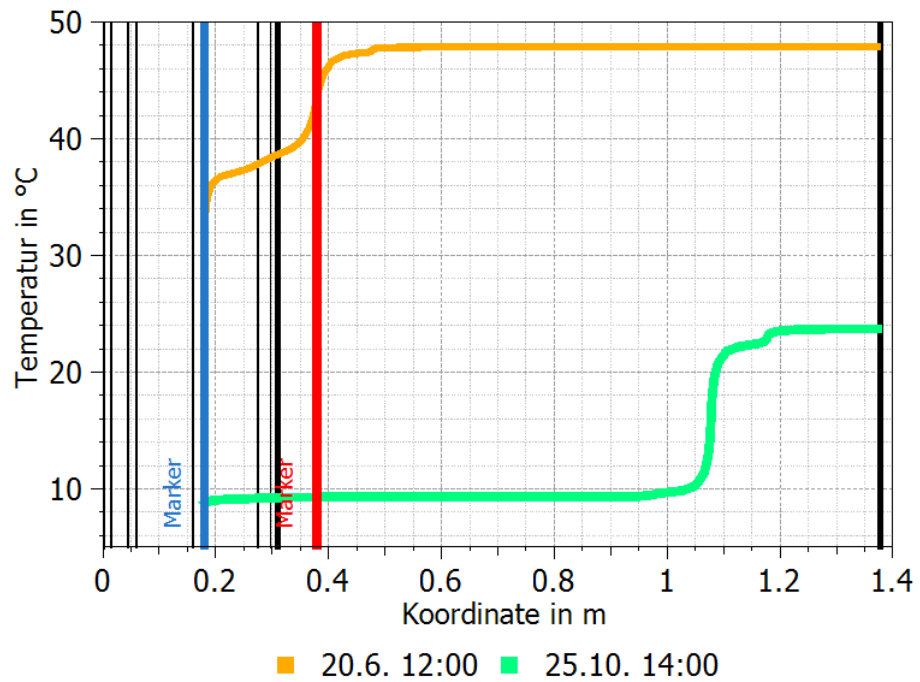


Abbildung 23: Oberflächentemperatur auf der Dachabdichtung bei einer 40 cm hohen Attika am 20. Juni und am 25. Oktober um 12:00 Uhr und um 14:00 Uhr.

4 Abminderungsfaktoren

Aus den unter Abschnitt 3.3 durchgeführten Simulationen werden die in Tabelle 3 zusammengefassten Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung der Verschattung durch Attiken verschiedener Höhe ermittelt.

Tabelle 3: Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung der Verschattung auf Flachdächern durch Attiken in Abhängigkeit der Attikahöhe.

Attikahöhe	Effektiver kurzwelliger Absorptionsgrad (a_e)	Effektiver langwelliger Emissionsgrad (ϵ_e)
< 20 cm	1,00 · $a_{\text{Abdichtung}}$	1,00 · $\epsilon_{\text{Abdichtung}}$
ab 20 cm	0,80 · $a_{\text{Abdichtung}}$	
ab 30 cm	0,60 · $a_{\text{Abdichtung}}$	
ab 40 cm	0,40 · $a_{\text{Abdichtung}}$	
≥ 60 cm	0,35 · $a_{\text{Abdichtung}}$	

Aufgrund des markanten Einflusses der Verschattung durch Attiken auf die Strahlungsgewinne und die damit zusammenhängende Rücktrocknung nach innen, ist diese in der hygrothermischen Simulation zu berücksichtigen. Die oben angegebenen Werte basieren auf der kritischsten Ecksituation am kritischsten Standort (Hamburg).

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wird dargelegt, wie Attiken verschiedener Höhe die Strahlungsgewinne auf Flachdächern beeinflussen. Die Verschattung durch Attiken reduziert die kurzwellige Absorption und wirkt sich dadurch auf die Rücktrocknung und den Feuchtegehalt der Dachkonstruktion aus. Um diesen Einfluss zu erfassen, werden für mehrere Standorte Klimadateien mit verschatteter Strahlung erstellt und sowohl einseitige als auch zweiseitige Attikasituationen mit unterschiedlichen Höhen simuliert. Auf Basis der durchgeführten Simulationen werden Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung dieses Effekts in hygrothermischen Simulationen ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verschattung schon bei geringeren Attikahöhen ab etwa zwanzig Zentimetern Auswirkungen auf den Feuchtegehalt der betrachteten Bauteile hat, bei höheren Attiken fällt der Einfluss deutlich stärker aus. Die kritischen Positionen sind hierbei die Attikaecken. Der Einfluss zeigt sich bei Oberflächen mit hohem kurzwelligem Absorptionsgrad deutlicher als bei hellen Oberflächen, die generell geringere Strahlungsgewinne aufweisen.

Durch den rechnerischen Vergleich expliziter Verschattungssimulationen mit vereinfachten Ansätzen kann gezeigt werden, dass sich der Verschattungseinfluss zuverlässig über Abminderungsfaktoren der kurzwelligen Strahlungsabsorption in Abhängigkeit der Attikahöhe abbilden lässt.

Insgesamt wird deutlich, dass die Verschattung durch Attiken ein zentraler Parameter bei der feuchtetechnischen Bewertung und Bemessung nicht hinterlüfteter Flachdachkonstruktionen ist und in der Simulation berücksichtigt werden muss.

6 Ausblick

Für zukünftige Untersuchungen sollte der Einfluss weiterer partieller Verschattungselemente stärker in den Fokus rücken, da technische Anlagen häufig auf dem Dach aufgestellt werden. Insbesondere Lüftungstechnische Anlagen wie Lüftungsgeräte, Leitungsführungen, Aggregate der Gebäudetechnik oder komplexe Installationsgruppen erzeugen stark heterogene und zeitlich variierende Verschattungssituationen, die sich von den vorliegend betrachteten Verschattungen durch Attiken unterscheiden. Diese Aufbauten können lokal zu erheblich reduzierten Strahlungsgewinnen und damit zu kritischeren Feuchtebedingungen führen, deren Auswirkung bislang kaum untersucht wurde. Eine Berücksichtigung in der hygrothermischen Simulation ist somit vorderhand schwierig.

7 Autoren

Christian Bludau, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen, Deutschland

Heiko Fechner, TU Dresden, Dresden, Deutschland

Dominik Noe, Saint-Gobain ISOVER G+H AG, Ladenburg, Deutschland

Oskar Pankratz, Ingenieurbüro für Bauphysik, Haidershofen

Johannes Tieben-Köttl, Holzforschung Austria, Wien, Österreich

Benjamin Weiß, Martinelli + Menti AG, Luzern, Schweiz

8 Literatur

[1]	Bludau, Ch.: Spezielle Randbedingungen für die hygrothermische Simulation von Flachdächern in Holzbauweise. Dissertation Uni Stuttgart. Forschungsergebnisse aus der Bauphysik, Band 47. Fraunhofer Verlag, Stuttgart 2021. ISBN: 978-3-8396-1751-9. https://doi.org/10.24406/publica-fhg-283733
[2]	Bludau, Ch., Kölsch, Ph.: Verschattung von Holzflachdächern - Holz-Flachdächer: Neue Forschungsergebnisse zu Dachterrassen und Verschattung durch PV-Module. 5. Internationaler Holz[Bau]Physik-Kongress 20.–21.03.2014, Leipzig. https://wufi.de/literatur/Bludau,%20K%C3%B6lsch%202014%20-%20Verschattung%20von%20Holzflachd%C3%A4chern.pdf
[3]	WTA Merkblatt 6-8:2016-08: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2016.
[4]	Teibinger, M., & Nusser, B. (2010). Planungsbroschüre: Flachgeneigte Dächer in Holz [Broschüre]. Holzforschung Austria (HFA-Schriftenreihe, 29).
[5]	DIN 68800-2:2022 - Holzschutz Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Beuth Verlag Berlin
[6]	DIN EN 15026:2023: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2023. Beuth Verlag Berlin
[7]	DIN 4108-3:2024: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Beuth-Verlag, Berlin
[8]	Meteotest AG. (2023). <i>Meteonorm</i> (Version 8.2) [Software]. https://meteonorm.com

Anhang I: Verschattungsberechnung eines Flachdachs mit einer oder zwei Attiken

Verschattungsberechnung eines Flachdaches mit einer oder zwei Attikas

Heiko Fechner

20. März 2026

Im folgenden werden Algorithmen vorgestellt die es erlauben die Verschattung für direkte und diffuse Strahlung von ausgewählten Punkten eines Flachdaches mit einer oder zwei Attikas zu berechnen.

1 Horizontlinie

Zuerst sollen die Horizontlinien für beide Verschattungstypen berechnet werden. Sie dienen dann als Basis für die Verschattungsberechnung. Hierzu wird für jede Ausrichtung ϕ bei einem vorgegebenen Raster ϕ_{raster} der Höhenwinkel ψ berechnet. Dieser ergibt sich aus dem Winkel vom Beobachtungspunkt zur Oberkante der jeweiligen Attika oder ist 0 falls bei dieser Ausrichtung keine Attika vorhanden ist.

Zur Vereinfachung der Berechnung werden zwei lokale Ausrichtungssysteme eingeführt. Die angegebene Ausrichtung ϕ entspricht zuerst der Himmelsrichtung. Hierbei ist Nord mit 0 Deg angesetzt. Die Drehrichtung ist positiv über Ost (90 Deg). Das erste lokal Koordinatensystem definiert die Ausrichtung der ersten Attika mit $\phi' = 0$. Die Drehrichtung bleibt gleich. Das zweite Koordinatensystem definiert abschnittsweise lokale Winkel ϕ'' . Die Drehrichtung kann hier variieren.

1.1 Eine Attika

Der ausgewählte Punkt für eine Attika befindet sich in deren Mitte in einem definierten Abstand.

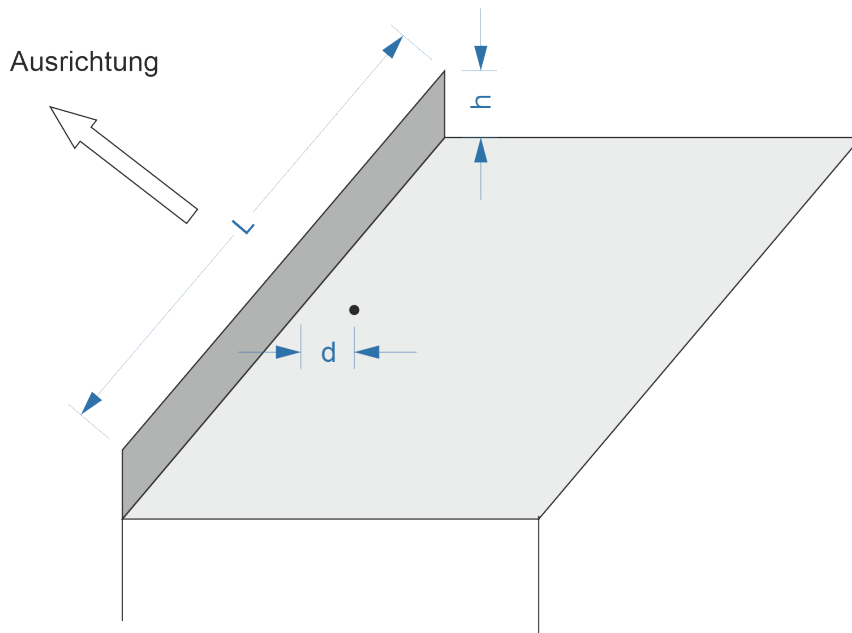


Abbildung 1: Flachdach mit einer Attika

Das Bild oben zeigt die Position der Attika auf dem Flachdach mit den benötigten Parametern.

L - Länge der Attika in m

d - Abstand des Beobachtungspunktes von der Attika in m

h - Höhe der Attika

δ - Ausrichtung - Himmelsrichtung in welche die Attika zeigt

Hier werden zwei lokale Winkelsysteme verwendet welche von der Mitte der Attika zu beiden Seiten laufen. Da der Ausgangspunkt in der Mitte der Attika ist gibt es nur einen Endwinkel. Zuerst folgt hier die Berechnung des ersten lokalen Systems:

$$\phi' = \phi - \delta$$

$$\phi' = \begin{cases} \phi' < 0 & \phi' + 2\pi \\ \text{sonst} & \phi' \end{cases}$$

Mit dem Endwinkel:

$$\phi'_e = \arctan 2(2 * d, L)$$

ergibt sich die Umrechnung in die zweite Koordinatenebene:

$$\phi'' = \begin{cases} \phi' < \pi & \phi' \\ \text{sonst} & 2 \cdot \pi - \phi' \end{cases}$$

Die Definition von atan2 ist hier wie folgt:

$$\arctan 2(x, y)$$

Jetzt kann man den Höhenwinkel berechnen:

$$\psi = \begin{cases} \phi'' < \phi'_e & \arctan \left(\frac{h}{d} \cdot \cos(\phi'') \right) \\ \text{sonst} & 0 \end{cases}$$

1.2 Zwei Attikas

Die zwei Attikas sind in einem rechten Winkel zueinander angeordnet. Beide Attikas haben die gleiche Höhe können aber unterschiedliche Längen haben. Die erste Attika definiert die Ausrichtung. Der Beobachtungspunkt liegt im Abstand d zu beiden Attikas im Winkel.

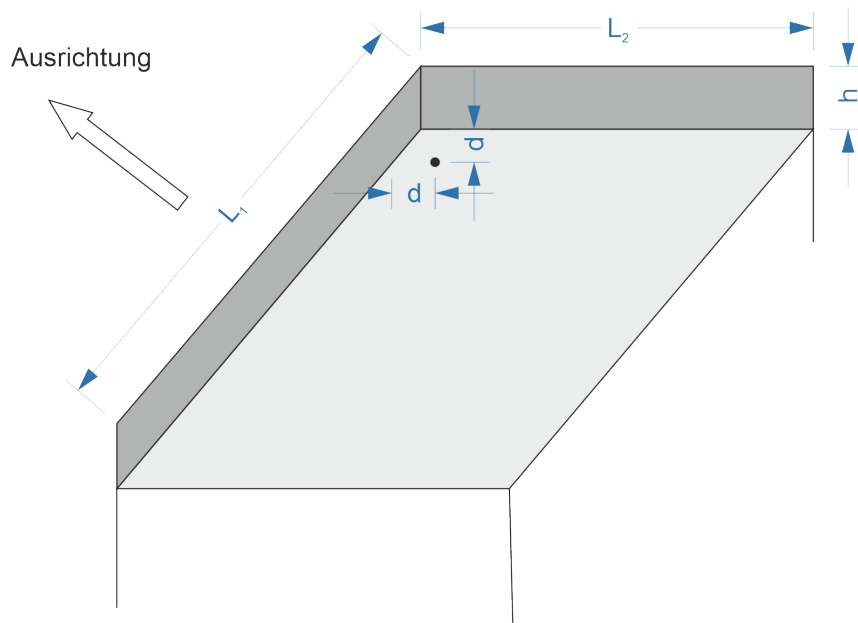


Abbildung 2: Flachdach mit zwei Attikas

Das Bild oben zeigt die beschriebene Verhältnisse mit den Parametern. Hierbei entstehen 5 Abschnitte für das zweite Bezugssystem, je zwei für die beiden Attikas und einer für den Rest des Gebietes. Dadurch werden 4 Endwinkel benötigt.

$$\begin{aligned}\phi'_{e1} &= \frac{\pi}{4} \\ \phi'_{e2} &= \frac{\pi}{2} \\ \phi'_{e3} &= \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{L_2}{d} - 1\right) \\ \phi'_{e4} &= 2 \cdot \pi - \arctan\left(\frac{L_1}{d} - 1\right)\end{aligned}$$

Das erste lokale System ergibt sich wie bei der Variante mit einer Attika:

$$\phi' = \phi - \delta$$

$$\phi' = \begin{cases} \phi' < 0 & \phi' + 2\pi \\ \text{sonst} & \phi' \end{cases}$$

Das zweite lokal System definiert die 5 Unterabschnitte:

$$\phi'' = \begin{cases} \phi' < \phi'_{e1} & \phi' \\ \phi' < \phi'_{e2} & \frac{\pi}{2} - \phi' \\ \phi' < \phi'_{e3} & \phi' - \frac{\pi}{2} \\ \phi' < \phi'_{e4} & \phi' \\ \text{sonst} & 2 \cdot \pi - \phi' \end{cases}$$

Jetzt kann der Höhenwinkel berechnet werden. Hierbei gilt es zu beachten, dass im Bereich zwischen ϕ'_{e3} und ϕ'_{e4} der Höhenwinkel 0 ist da sich in diesem Abschnitt keine Attika befindet.

$$\psi = \begin{cases} \phi'' < \phi'_{3e} \cup \phi'' > \phi'_{e4} & \arctan\left(\frac{h}{d} \cdot \cos(\phi'')\right) \\ \text{sonst} & 0 \end{cases}$$

2 Direkte Verschattung

Zur Berechnung ob die direkte Solarstrahlung den Beobachtungspunkt erreichen kann, muss man lediglich für den gewählten Standort und die Zeit den Höhenwinkel und den Azimuth der Sonne ausrechnen. Dann vergleicht man ob der Höhenwinkel der Sonne größer ist als der Höhenwinkel der Verschattungsberechnung für den Azimuthwinkel. Wenn das der Fall ist, ist der Punkt nicht verschattet. Negative Sonnenhöhenwinkel können dabei vernachlässigt werden (Nacht).

Die Sonnenstandsrechnung erfolgt in drei Abschnitten:

Berechnung der wahren Sonnenzeit

Berechnung Azimuth - a

Berechnung Höhenwinkel - h

Folgende Angaben sind dafür erforderlich:

Längengrad - φ

Breitengrad - λ

Zeitzone - t_{zone}

2.1 Wahre Sonnenzeit

Diese Berechnung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst erfolgt die Korrektur zur Berücksichtigung der Zeitzone und des Abstandes des Ortes vom dazugehörigen Längengrad. Danach wird die Abweichung infolge der Exzentrizität der Erdumlaufbahn einberechnet.

Bei den nachfolgenden Berechnungen sind die Koordinaten in Deg angegeben.

Standardlängengrad:

$$\varphi_{st} = t_{zone} \cdot 15$$

Abweichung Längengrad vom Standardlängengrad

$$\Delta\varphi_{st} = \varphi_{st} - \varphi$$

Spezieller Test für Zeitzone von 12h und -12h

$$\Delta\varphi_{st} = \begin{cases} \Delta\varphi_{st} \geq 345 & \Delta\varphi_{st} - 360 \\ \Delta\varphi_{st} \leq -345 & \Delta\varphi_{st} + 360 \end{cases}$$

Korrektur der Zeit in s (4 Grad sind eine Minute)

$$t_{corr} = t - 4 \cdot 60 \cdot \Delta\varphi_{st}$$

Test auf Jahreslängenüberschreitung und Korrektur mit $t_{yea,sec} = 365 \cdot 24 \cdot 3600$

$$t_{corr,2} = \begin{cases} t_{corr} < 0 & t_{corr} + t_{year,sec} \\ t_{corr} > t_{year,sec} & t_{corr} - t_{year,sec} \\ sonst & t_{corr} \end{cases}$$

Damit ist die Korrektur des Längengrades erfolgt. Jetzt folgt noch die Korrektur zur Berücksichtigung der Exzentrizität des Erdbits um die Sonne (siehe Kologiru - Solar Engineering, ch. 2.1.1).

Umrechnung der Zeit in Tage

$$t_d = \frac{t_{corr,2}}{24 \cdot 3600}$$

Berechnung des Korrekturterms

$$B = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(t_d - 81)}{365}$$

$$e_{corr} = (9,87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B)) \cdot 60$$

Jetzt Korrektur der Zeit

$$t_{corr,3} = t_{corr,2} + e_{corr}$$

Nachfolgend ein weiterer Test auf Überschreitung der Jahreslänge

$$t_{corr,4} = \begin{cases} t_{corr} < 0 & t_{corr,3} + t_{year,sec} \\ t_{corr,3} > t_{year,sec} & t_{corr,3} - t_{year,sec} \\ sonst & t_{corr,3} \end{cases}$$

2.2 Sonnenhöhenwinkel und Azimuth

Mit der jetzt vollständig korrigierten Zeit erfolgt die weitere Berechnung der Sonnenwinkel. Zuerst werden ein paar Hilfsgrößen bestimmt.

Zeit in Tagen

$$t_d = \frac{t_{corr,2}}{24 \cdot 3600}$$

Stunde des Tages in Tagen

$$t_{d,h} = t_d - \text{int}(t_d)$$

Die Funktion $\text{int}()$ dient dem Abrunden. Jetzt die Deklination

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{(t_d + 284)}{365}\right)$$

Nun der Stundenwinkel

$$\beta_h = 2 \cdot \pi \cdot (t_{d,h} - 0,5)$$

Damit kann man nun den Sonnenhöhenwinkel bestimmen:

$$\sin(h) = \sin(\lambda) \cdot \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\beta_h)$$

Zum Schluß folgt noch die Berechnung des Sonnenazimuths

$$\tan_{a,x} = \sin(\lambda) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t_d) \cdot \cos(\delta) + \sin(\delta) \cdot \cos(\lambda)$$

$$\tan_{a,y} = \sin(2 \cdot \pi \cdot t_d) \cdot \cos(\delta)$$

$$a = \arctan 2(\tan_{a,x}, \tan_{a,y})$$

Korrektur falls der Azimuth negativ ist

$$a = \begin{cases} a < 0 & a + 2 \cdot \pi \end{cases}$$

3 Diffuse Verschattung

Zur Berechnung der diffusen Verschattung kann man vereinfacht den Sky View Factor berechnen. Das ist der Anteil des sichtbaren Himmels vom Beobachtungspunkt aus gesehen. Dabei wird eine gleichmäßige Verteilung der Strahlung über die Himmelskuppel angenommen. Hierbei wird die Horizontlinie auf die Himmelskuppel projiziert. Dann rastert man die gesamte Himmelskuppel in Teilabschnitte. Jeder Teilabschnitt wird dabei durch ein sphärisches Dreieck (Kugeldreieck) representiert. Bei jedem Teildreieck kann man auf basis der Horizontlinie bestimmen wieviel davon freier Himmel ist. Diese Anteile werden dann aufsummiert und durch die gesamte Kuppelfläche geteilt.

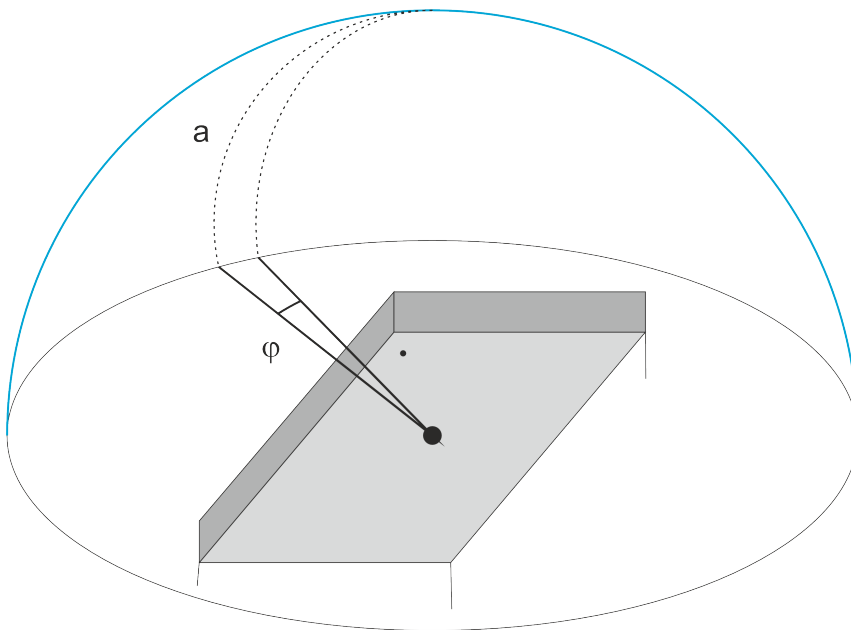


Abbildung 3: Darstellung der Himmelskuppel über dem Flachdach mit Teildreieck

Das Bild zeigt die Himmelskuppel mit einem Abschnittsdreieck. Die Rasterung des Kreises erfolgt in Abschnitten von ϕ_{raster} . Es ergeben sich gleichschenklige sphärische Dreiecke mit der Länge a . Wenn man für die Himmelskuppel eine Einheitskugel annimmt ergibt sich die Gesamtfläche eines solchen Dreieckes zu:

$$A_{d,full} = \phi_{raster}$$

Für die Fläche des oberen Teildreieckes bei einer Verschattung mit dem Höhenwinkel ψ ergibt sich folgender Ansatz:

$$a = \pi/2 - \psi$$

$$\cos(c) = \begin{cases} \psi == 0 & \cos(\phi_{raster}) \\ sonst & \cos^2(a) + \sin^2(a) \cdot \cos(\phi_{raster}) \end{cases}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{\sin(a) \cdot \sin(\phi_{raster})}{\sqrt{1 - \cos^2(c)}}$$

$$A_d = 2 \cdot \alpha + \phi_{raster} - \pi$$

Der Anteil des sichtbaren Himmels entspricht dann dem Verhältnis von sichtbarer Fläche zu gesamter Fläche:

$$f = \frac{A_d}{A_{d,full}}$$

Die Summe aller Anteile im Vollkreis dividiert durch deren Anzahl ergibt dann den Sky View Factor.