

**Systematische rechnerische
Untersuchungen zur ergänzenden
Absicherung vereinfachter nati-
onaler Klima-Randbedingungen
bei der Übernahme des
Diffusionsnachweisverfahrens
gemäß EN ISO 13788 in die nationale
Feuchteschutznorm DIN 4108-3**

T 3288

T 3288

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2012

ISBN 978-3-8167-8856-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

<p><i>Prof. Dr.-Ing. Thomas Ackermann</i> <i>Fachhochschule Bielefeld</i></p>	<p><i>Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl</i> <i>Bauhaus-Universität Weimar</i></p>
---	---

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

**Systematische rechnerische Untersuchungen zur ergänzenden Absicherung
vereinfachter nationaler Klima-Randbedingungen
bei der Übernahme des Diffusionsnachweisverfahrens gemäß EN ISO 13788
in die nationale Feuchteschutznorm DIN 4108-3**

Durchführung der Untersuchungen im Auftrag des
Steinbeis-Transferzentrums Wasser und Infrastruktur, Minden

gefördert durch
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Geschäftszeichen
ZP 52-5-5.80-1215/06

Forschungsvorhaben

Systematische rechnerische Untersuchungen zur ergänzenden Absicherung vereinfachter nationaler Klima-Randbedingungen bei der Übernahme des Diffusionsnachweisverfahrens gemäß EN ISO 13788 in die nationale Feuchteschutznorm DIN 4108-3

Geschäftszeichen
ZP 52-5-5.80-1215/06

Forschende Stelle und Auftraggeber:

Steinbeis-Transferzentrum Wasser und Infrastruktur
Artilleriestraße 9
32427 Minden

Der Bericht umfasst: 95 Seiten Text
25 Bilder
5 Tabellen

Für die Bearbeitung:

Minden, den

Weimar, den

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ackermann

Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl

Dipl.-Ing. Michael Grafe

Inhalt

1. Einleitung und Aufgabenstellung
2. Zur Durchführung der Untersuchungen
 - 2.1 Untersuchungsschritte
 - 2.2 Alte und neue Blockklima-Randbedingungen
 - 2.3 Realklima-Randbedingungen
 - 2.4 Festlegung von Typkonstruktionen
3. Verallgemeinerte Grenzwertbetrachtungen
zur Diffusionsuntersuchung mit Blockklima-Randbedingungen
 - 3.1 Tauperiode
 - 3.2 Verdunstungsperiode
4. Exemplarische Berechnungen an Typkonstruktionen
 - 4.1 Diffusionsrechnungen mit alten und neuen Blockklima-Randbedingungen
 - 4.1.1 Tabellarische und graphische Darstellung der Temperatur- und Dampfdruckverteilung in den Typkonstruktionen
 - 4.1.2 Analyse der Ergebnisse
 - 4.2 "Euro-Glaser"-Berechnungen mit monatlichen Mittelwerten
 - 4.3 Simulationsrechnungen mit realen Klimadatensätzen
5. Bewertung der Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungen
6. Einschätzung der Tauglichkeit der neuen Blockklima-Randbedingungen
7. Vorschlag für eine künftige feuchtetechnische Bewertungsmethodik
in DIN 4108-3
8. Zusammenfassung
9. Literatur

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Für die Übernahme des Diffusionsnachweises gemäß EN ISO 13788 in die nationale Feuchteschutz-Norm DIN 4108-3 wird eine zulässige Vereinfachung vorgeschlagen, nach der ein so genanntes Blockklima – vom Prinzip her wie bisher gebräuchlich – für die Tau- und Verdunstungsperiode nach [4] in Ansatz gebracht wird. Diese neuen Randbedingungen unterscheiden sich jedoch von den bisher in DIN 4108-3 enthaltenen hinsichtlich

- Dauer der Tauperiode,
- Temperatur der Außenluft während der Tauperiode,
- Temperatur und relativer Luftfeuchte der Raum- und Außenluft während der Verdunstungsperiode sowie
- Temperatur im Tauwasserbereich während der Verdunstungsperiode.

Eine wesentliche Festlegung dabei ist, dass bei der Berechnung der Verdunstungsmasse nach dem vorgeschlagenen neuen Blockklima auch für Dächer die Temperaturen im Raum und im Tauwasserbereich gleich groß sind. Damit entfällt das bisherige Problem der möglichen Tauwasserbildung durch Umkehrdiffusion während der Verdunstungsperiode infolge des Temperaturgefälles von der Dachoberfläche außen zum Innenraum.

Die Änderung methodischer Parameter für ein Bewertungsverfahren, hier bezüglich der Diffusionssicherheit bzw. Tauwasserfreiheit von Bauteilen, macht zwangsläufig eine Untersuchung der Konsequenzen erforderlich. Daher soll zu den schon in [4] durchgeführten Berechnungen mit Hilfe eines erweiterten Spektrums von Konstruktionsbeispielen eine zusätzliche Absicherung hinsichtlich Tauglichkeit der neuen Normrandbedingungen hinsichtlich Ergebnis und Schärfe der Anforderung erfolgen.

Zudem sollen die exemplarischen Ergebnisse für die Tauwassersicherheit nach den neuen Diffusionsrandbedingungen ergänzend noch durch Simulationsberechnungen mit Hilfe des instationären Rechenprogramms WUFI und realen Klimadatensätzen gegengerechnet und eingeschätzt werden.

2. Zur Durchführung der Untersuchungen

Die Überprüfung der Tauglichkeit der neuen Blockklima-Randbedingungen soll in mehreren Schritten mit Hilfe vergleichender Untersuchungen nach verschiedenen Ansätzen geschehen. Die vorgesehenen Untersuchungsschritte, die zu betrachtenden alten und neuen Blockklima-Randbedingungen sowie die für WUFI-Berechnungen erforderlichen Realklima-Randbedingungen an deutlich unterschiedlichen Standorten werden nachfolgend festgelegt. Außerdem wird ein Satz von Typkonstruktionen als gemeinsame Referenz für die Vergleichsrechnungen zusammengestellt.

2.1 Untersuchungsschritte

Die Einschätzung der Eignung der neu in DIN 4108-3 zu übernehmenden Blockklima-Randbedingungen soll durch Gegenüberstellung prinzipieller Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungsschritten geschehen.

Schritt 1:

Eine vorgeschaltete theoretische Studie soll zunächst zeigen, wieweit abgeleitete Tauwasser- und Verdunstungspotentiale Hinweise darauf ermöglichen, ob die alten oder die neuen Randbedingungen zu weicheren oder schärferen Resultaten führen.

Schritt 2:

Vergleichende Diffusionsberechnungen nach dem Glaser-Verfahren an ausgewählten Typkonstruktionen mit alten und neuen Blockklima-Randbedingungen sollen gegebenenfalls charakteristische Diskrepanzen deutlich machen.

Schritt 3:

Da die ebenfalls gültige DIN EN ISO 13788 mit dem so genannten "Euro-Glaser-Verfahren" eine Methode für Diffusionsberechnungen auf Basis von Monatsmittelwerten für ein Standort-Klima bereitstellt, ist zu untersuchen, wie weit solche Ergebnisse von denen mit alten und neuen Blockklima-Berechnungen abweichen und ob auch hier gegebenenfalls charakteristische Diskrepanzen bestehen.

Schritt 4:

Für die ausgewählten Typkonstruktionen und für unterschiedliche Standorte sollen abschließend Simulationsrechnungen mit Realklima-Datensätzen auf Basis von Stundenmittelwerten durchgeführt und in die Vergleiche der reinen Diffusionsberechnungen einbezogen werden.

2.2 Alte und neue Blockklima-Randbedingungen

Die bisherigen und die im Zuge der Integration von DIN EN ISO 13788 vorgeschlagenen neuen Blockklima-Randbedingungen sind in Tabelle 1 gegenübergestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Blockklima-Randbedingungen für die Beurteilung der Tauwasserbildung im Innern von Bauteilen nach DIN 4108-3:2001-07 (alt) und nach Vorschlag in [4] (neu) sowie vereinfachter Vorschlag (neu) für die Verdunstungsperiode

	DIN 4108-3:2001-07 (alt)					vorgeschlagenes Blockklima (neu) sowie vereinfachter Vorschlag nur mit p -Werten in ()				
Klima	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Wasserdampfdruck	Dauer t in		Temperatur	Relative Luftfeuchte	Wasserdampfdruck	Dauer t in	
	θ in °C	φ in %	p in Pa	d	h	θ in °C	φ in %	p in Pa	d	h
	Tauperiode					Tauperiode von Dezember bis Februar				
	Wandbauteile und Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen, Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen									
Innenklima	20	50	1170	60	1440	20	50	1168	90	2160
Außenklima	-10	80	208			-5	80	321		
	Verdunstungsperiode					Verdunstungsperiode von Juni bis August				
	Wandbauteile, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen, Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen									
Innenklima	12	70	982	90	2160	18 (- ²)	60 (- ²)	1238 (1200)	90	2160
Außenklima	12	70	982			15 (- ²)	70 (- ²)	1193 (1200)		
Klima im Tauwasserbereich	12	100	1403			15 (- ²)	100 (- ²)	1704 (1700)		
	Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen									
Innenklima	12	70	982	90	2160	18 (- ²)	60 (- ²)	1238 (1200)	90	2160
Außenklima	12	70	982			15 (- ²)	70 (- ²)	1193 (1200)		
Klima im Tauwasserbereich ¹⁾	12	100	1403			18 (- ²)	100 (- ²)	2063 (2000)		

¹⁾ Alternativ für Verdunstung bei Dächern: Temperatur im Tauwasserbereich resultierend aus Temperaturverteilung mit äußerer Oberflächentemperatur von 20 °C

²⁾ Aus Gründen der Vereinfachung werden in der Verdunstungsperiode keine Werte für Temperaturen und Luftfeuchten beim Innen- und Außenklima sowie im Tauwasserbereich angegeben, sondern nur gerundete Wasserdampfdrücke

2.3 Realklima-Randbedingungen

Für die vergleichenden Simulationsrechnungen sind zunächst reale Klima-Randbedingungen an extrem unterschiedlichen Standorten festzulegen, mit Datensätzen aus Stundenmittelwerten. Für ebenfalls vorgesehene Berechnungen nach dem so genannten "Euro-Glaser-Verfahren" werden parallel dazu auf gleicher Ausgangsdatenbasis für die Standort auch die für dieses Verfahren notwendigen Monatsmittelwerte bestimmt.

Wahl der Referenz-Standorte

Die Auswahl von Referenz-Standorten orientiert sich daran, an welchem Standort hohe Unterschiede des Wasserdampfdruckes während der so genannten „kalten Jahreszeit“ zu einem großen Diffusionsstrom in ein Bauteil hinein und niedrige Dampfdruckdifferenzen während der „warmen Jahreszeit“ zu verminderter Austrocknung der Konstruktion führen. Da kein Standort beide Kriterien gleichzeitig erfüllen konnte, wird für die Darstellung einer verstärkten Auffeuchtung ein Referenzort mit sehr niedrigen Außenlufttemperaturen – dabei aber auch mit einer möglichst niedrigen relativen Luftfeuchte – und für die Darstellung einer verminderten Austrocknung ein Referenzort mit solchen klimatische Daten für Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchte ausgewählt, die zu vergleichsweise niedrigen Feuchteinträgen, aber auch zu geringeren Diffusionsströmen aus dem Bauteil heraus führen. Nach der Betrachtung der Temperatur- und Feuchteverläufe an verschiedenen Standorten in der Bundesrepublik Deutschland wurden für den kalt-trockenen Referenzort der Standort Hof und für den warm-feuchten Referenzort der Standort Karlsruhe gewählt.

Berechnungszeitraum

Die Frage nach dem erforderlichen Berechnungszeitraum für die Vergleichsrechnungen mit instationären Randbedingungen muss sich an der Einschwingzeit des Gesamtsystems orientieren. Die Einschwingzeit berücksichtigt die Phase, die ein Bauteil benötigt, um sich hinsichtlich der Temperatur- und Feuchteverteilungen von einer vorgegebenen Ausgangssituation auf zyklisch stabile Verhältnisse unter zeitlich veränderlichen, aber zyklisch wiederkehrenden Randbedingungen einzustellen. Dabei spielen die komplexen hygrischen und thermischen Transport- und Speichereigenschaften der beteiligten Ma-

terialien eine entscheidende Rolle. Erst wenn der so genannte eingeschwungene Zustand erreicht ist, können Aussagen zum Feuchteverhalten der Konstruktion insgesamt getroffen werden.

Da die festgelegten Typkonstruktionen neben „leichten“ Bauweisen auch Konstruktionen mit hohen spezifischen Wärme- und Feuchtespeicherkapazitäten, insgesamt also mit unterschiedlichen thermischen und hygrischen Trägheiten berücksichtigen, wird zur Abschätzung des Problems „auf der sicheren Seite“ ein Berechnungszeitraum von 20 Jahren angesetzt.

Außenklima

a) Datensätze auf Basis Stundenmittel für die WUFI-Simulationen

Um die Schwankungen der Außenlufttemperaturen und –feuchten bei der instationären Berechnung möglichst realitätsnah erfassen zu können, werden die Berechnungen jeweils unter Verwendung von Stundenmittelwerten für Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte durchgeführt. Regenereignisse werden nicht berücksichtigt, d.h. es liegt ein voll wirksamer Regenschutz bei den betrachteten Konstruktionen vor. Regen hat somit keinen Einfluss auf den Feuchtehaushalt. Exemplarisch sind in den Bildern 1 bis 4 die Lufttemperatur- und Luftfeuchteverläufe für beide Referenzstandorte Hof und Karlsruhe in der Zeit vom 1. Januar 1962 bis 31. Dezember 1963 dargestellt.

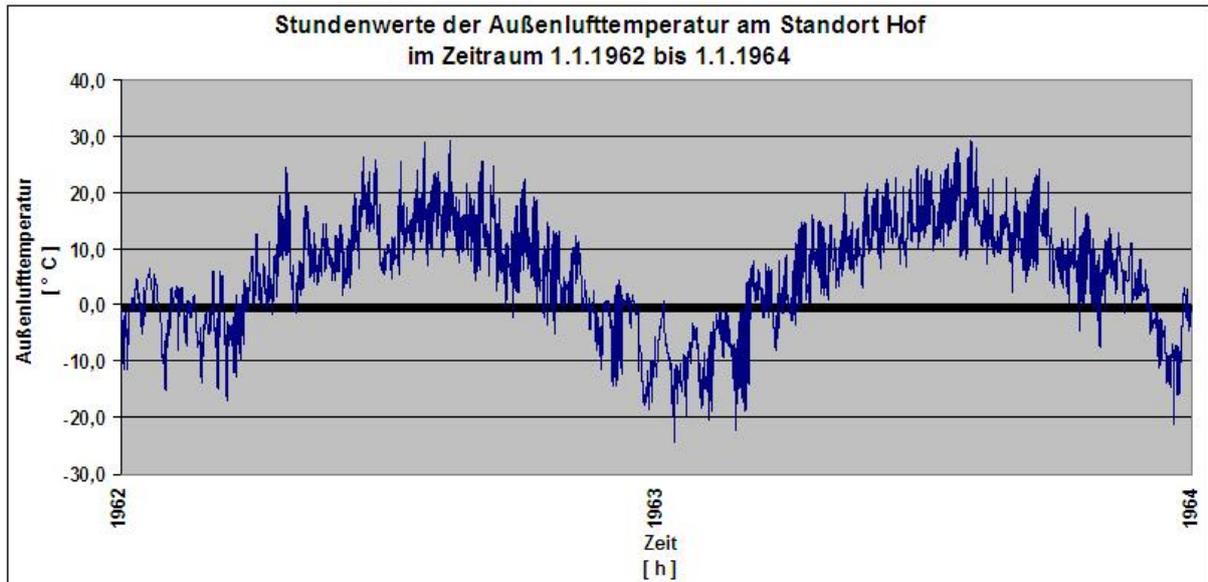


Bild 1: Stundenmittelwerte der Außenlufttemperatur am Standort Hof.

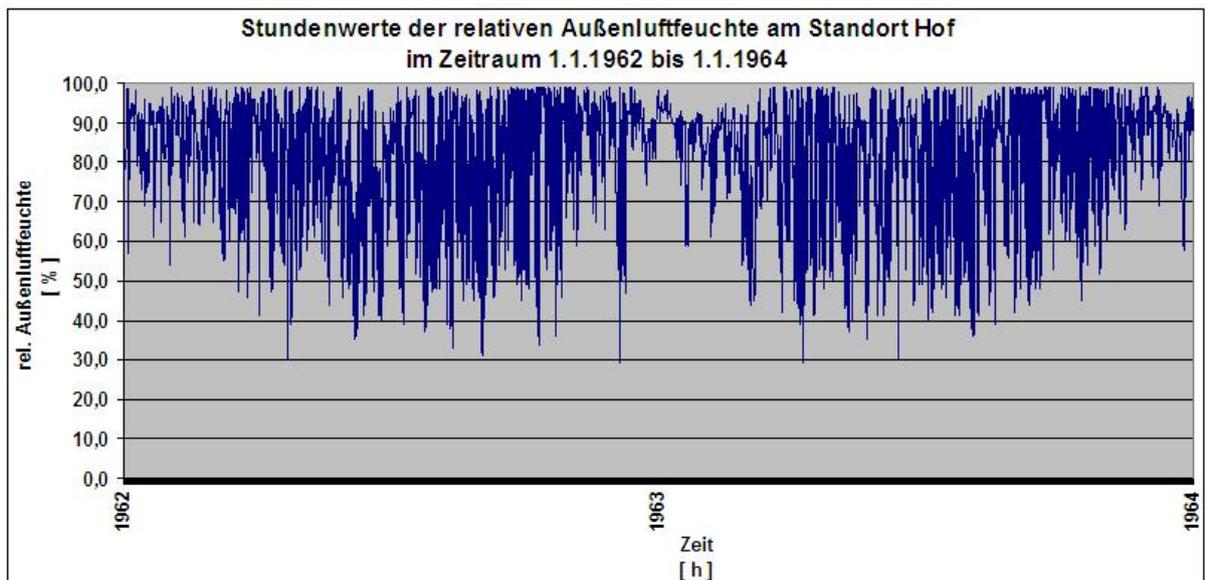


Bild 2: Stundenmittelwerte der relativen Außenluftfeuchte am Standort Hof.

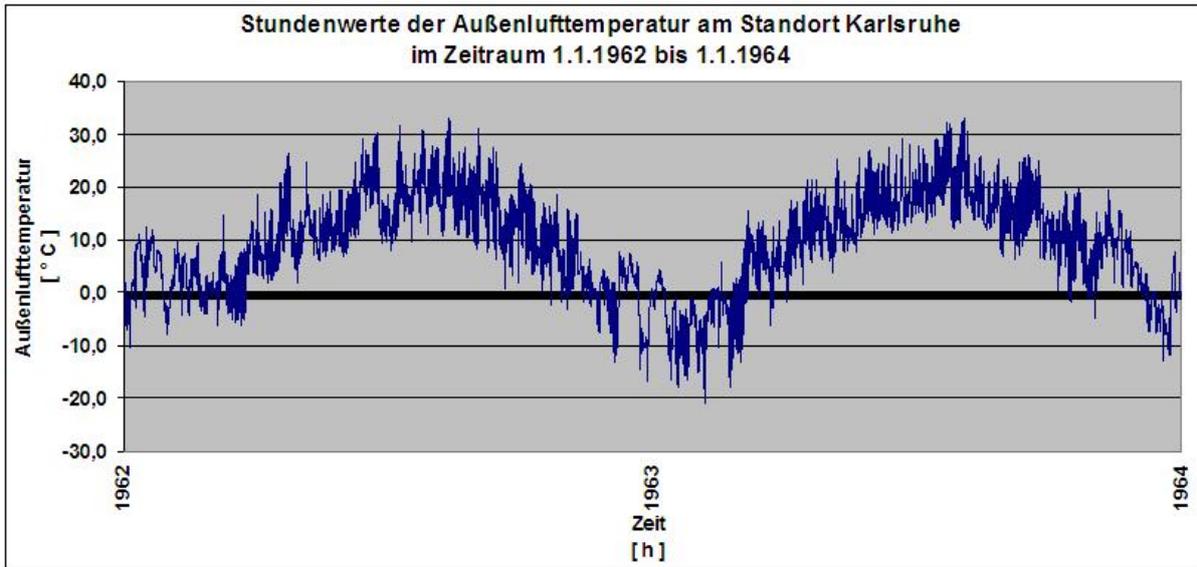


Bild 3: Stundenmittelwerte der Außenlufttemperatur am Standort Karlsruhe

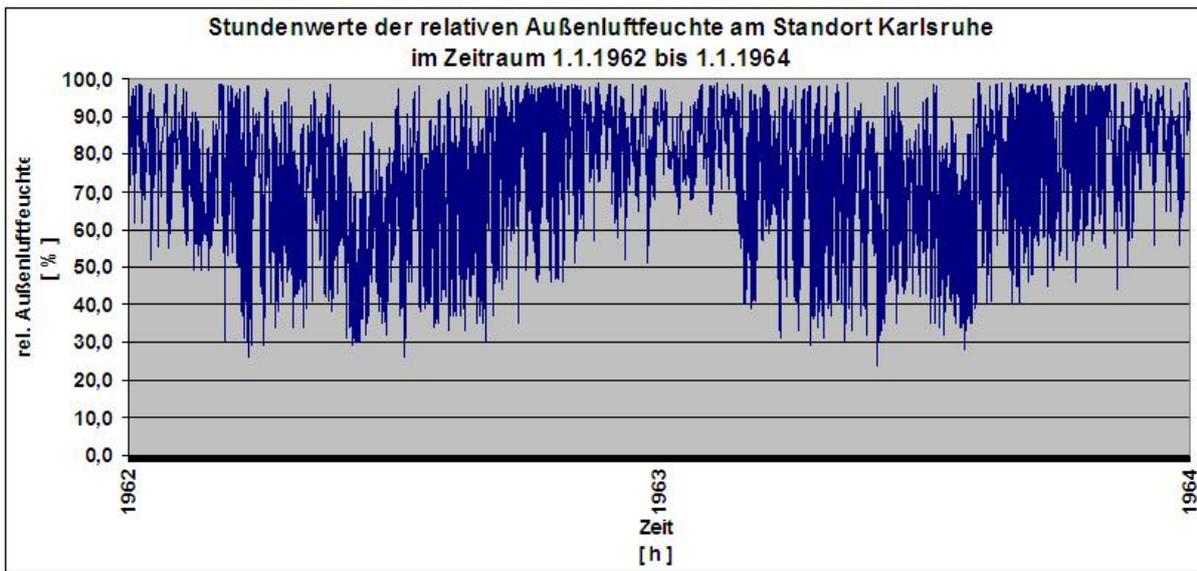


Bild 4: Stundenmittelwerte der relativen Außenluftfeuchte am Standort Karlsruhe

b) Datensätze auf Basis Monatsmittel für das "Euro-Glaser-Verfahren"

Das so genannte "Euro-Glaser-Verfahren nach DIN EN ISO 13788 ist vom Rechenverfahren her ebenfalls ein reines Diffusionsmodell. Es verwendet für stationäre monatliche Diffusionsberechnungen Monatsmittelwerte für Außenlufttemperatur und relative Außenluftfeuchte und wird bilanzierend über 12 Monate im Jahr, jeweils für stationäre Verhältnisse im Einzelmonat, durchgeführt. Speicher- und Kapillaritätseffekte werden wie beim Glaser-Verfahren nicht berücksichtigt. Die Monatsmittelwerte für die Klimarandbedingungen werden aus Realdaten bestimmt. Zu diesem Zweck können mit einem WUFI-Hilfsprogramm die vorhandenen Stundenwerte in Monatsmittelwerte umgerechnet werden (siehe Bilder 5 bis 8).

Damit ist zu untersuchen, wie weit eine Berechnung nach "Euro"-Glaser mit Monatsmittelwerten, die aus dem gleichen Datenstamm wie die Stundenmittelwerte am Referenzstandort hervor gehen, Abweichungen in den berechneten Feuchteverhältnissen im Vergleich zu der realitätsnahen Voll-Simulation mit WUFI bewirkt.

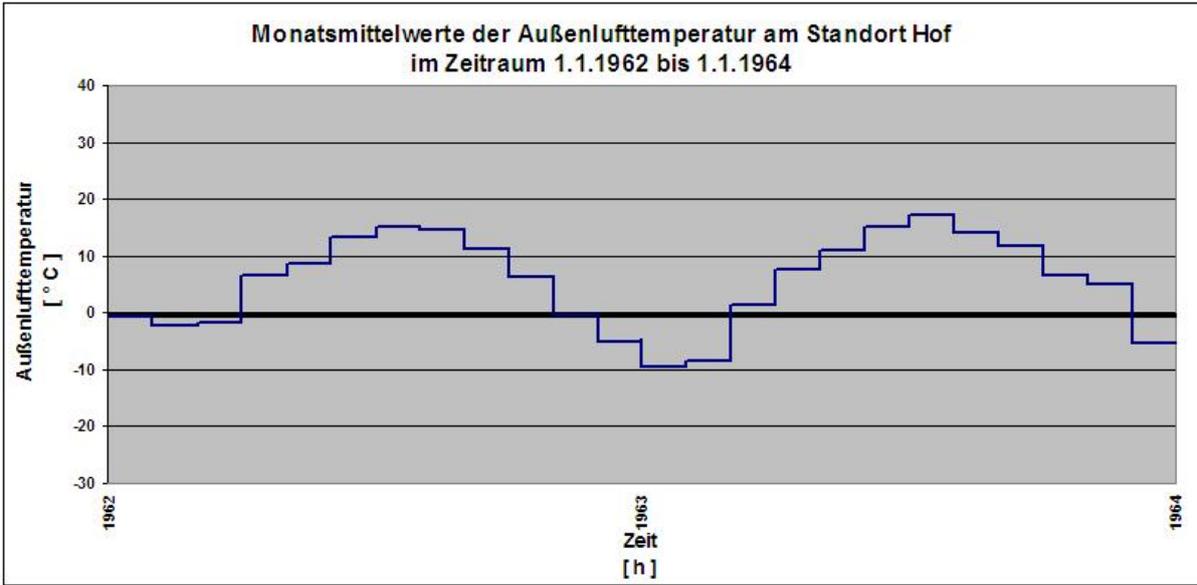


Bild 5: Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur am Standort Hof .

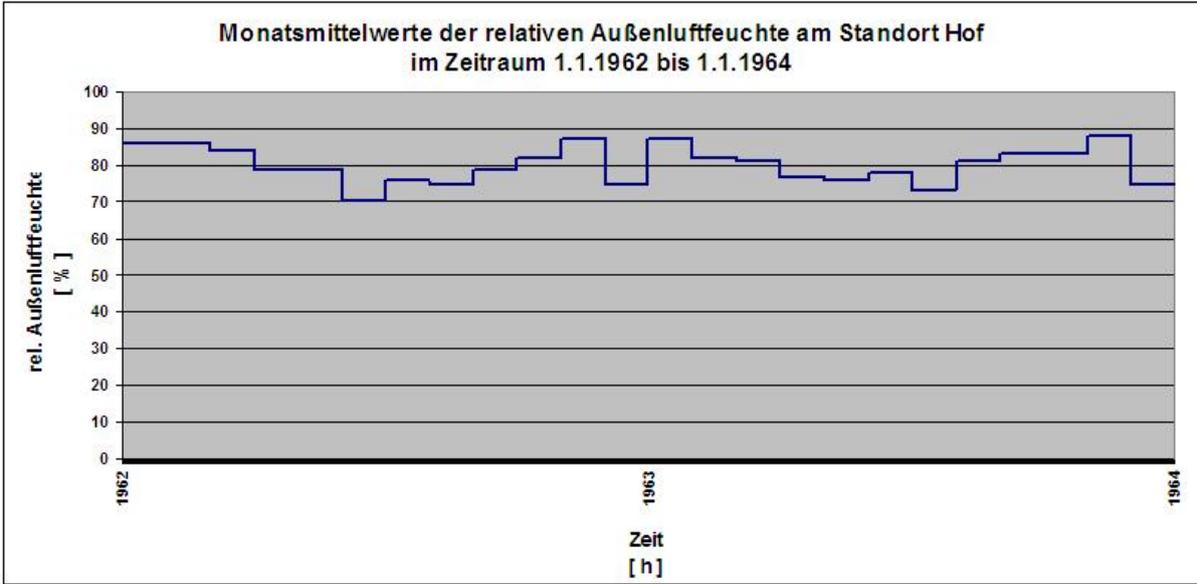


Bild 6: Monatsmittelwerte der relativen Außenluftfeuchte am Standort Hof.

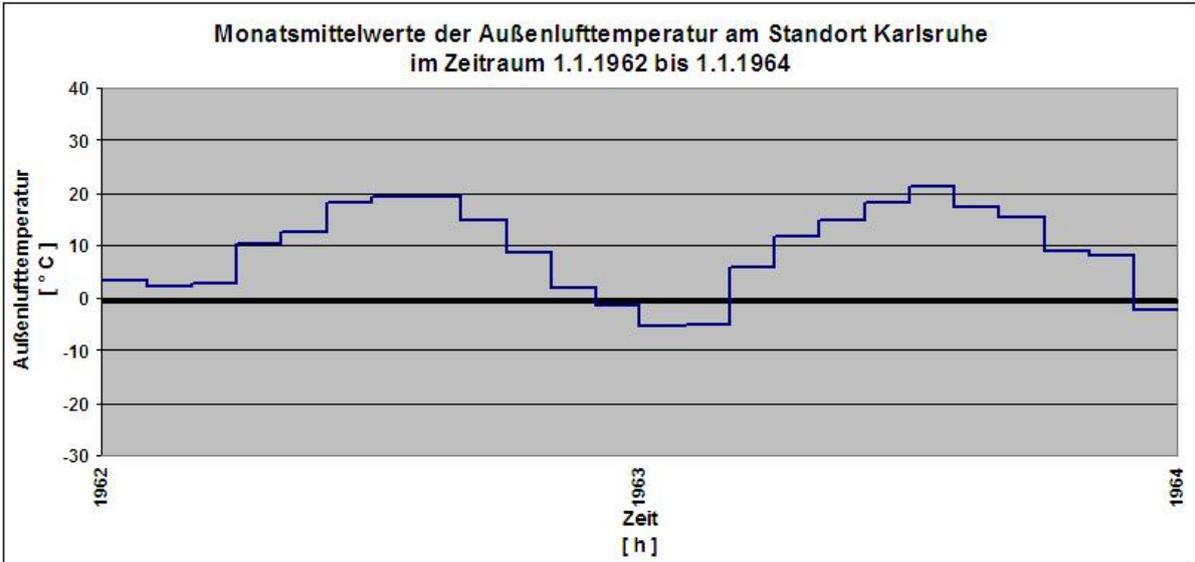


Bild 7: Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur am Standort Karlsruhe.

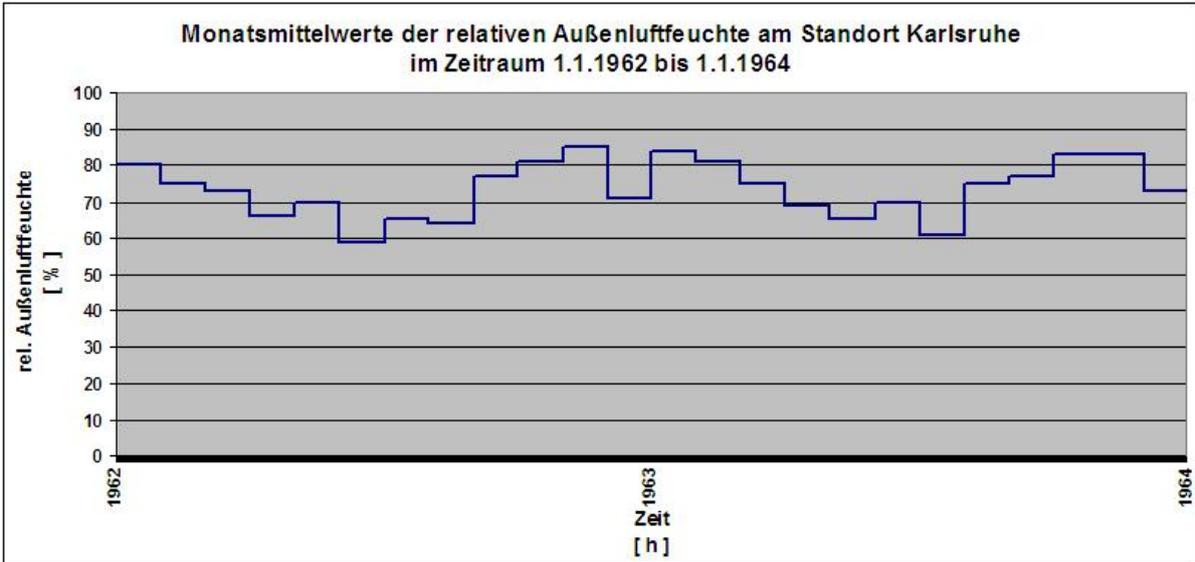


Bild 8: Monatsmittelwerte der relativen Außenluftfeuchte am Standort Karlsruhe.

Innenklima

Gemäß Ausarbeitungen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Holzkirchen [6], können die Jahrgänge für Raumlufthtemperatur und Raumlufffeuchte mit einem sinusförmigen Verlauf approximiert werden (siehe Bild 9), bei dem die Werte um einen Mittelwert mit einer Abweichung von $\pm 15\%$ schwanken (extrem, sichere Seite).

Für den "kalten" Standort Hof wird ein Innenklima mit einem Mittelwert von 45 % und einem Maximum von 60 % relativer Feuchte angesetzt, beim "feucht-warmen" Standort Karlsruhe liegt ein Mittelwert von 55 % und ein Maximum von 70 % zugrunde.

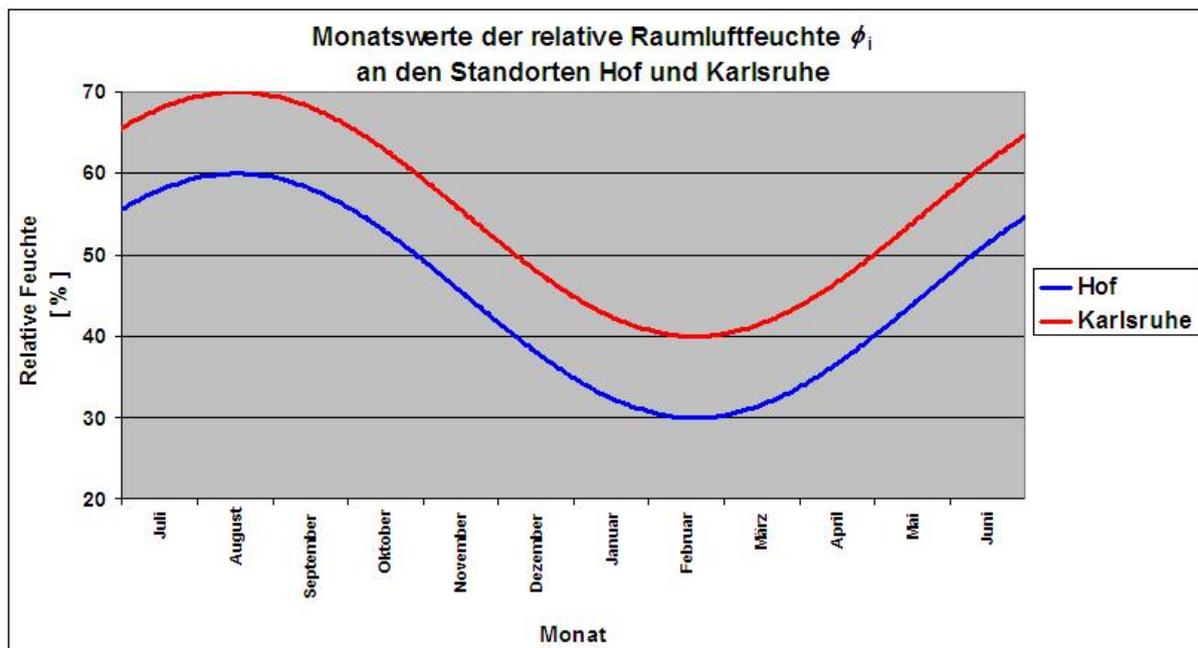


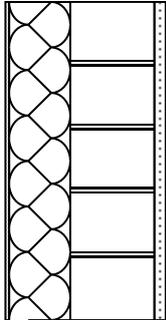
Bild 9: Zugrunde gelegte Jahrgänge der Monatsmittelwerte für die Raumlufffeuchte an den Standorten Hof und Karlsruhe

Für die Schwankungen der Raumlufftemperatur wird für beide Standorte näherungsweise ein analoger sinusförmiger Jahrgang mit $\theta_i = 21 \pm 1\text{ °C}$ angenommen, was jedoch für die Feuchtesimulationsberechnungen hier von untergeordneter Bedeutung ist.

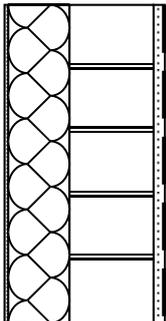
2.4 Festlegung von Typkonstruktionen

Um zu überprüfen, ob die bisherigen Beurteilungskriterien in DIN 4108-3 auch bei einer Berechnung mit den „neuen“ Blockklimadaten zu analogen Ergebnissen führen, wird eine Reihe von Typkonstruktionen aus dem Wand- und Dachbereich erstellt, die gemäß derzeitigem Erfahrungsstand entweder unproblematisch sind oder ein kritisches feuchtetechnisches Verhalten aufweisen können. Diese Überlegungen führen zu den folgenden Typkonstruktionen.

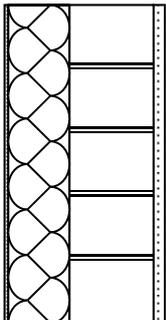
1. Einschalige Außenwand mit 4 cm Innendämmung und diffusionsoffenem Außenputz

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
Innenputz	0,015	35	0,7		0,5	
MF-Dämmung	0,04	1	0,04	60	0,04	
KS-Mauerwerk	0,24	25	0,99	1800	6,0	
Außenputz	0,02	10	1,0		0,2	

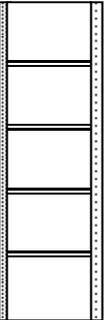
2. Einschalige Außenwand mit 4 cm Innendämmung und diffusionshemmender Außenschicht

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
Innenputz	0,015	35	0,7		0,5	
MF-Dämmung	0,04	1	0,04	60	0,04	
KS-Mauerwerk	0,24	25	0,99	1800	6,0	
diffusionshemmende Außenschicht	0,001	100000	1,0		100	

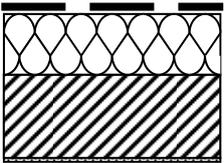
3. Einschalige Außenwand mit 10 cm Innendämmung und diffusionsoffenem Außenputz

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
Innenputz	0,01	10	0,7		0,1	
MF-Dämmung	0,10	1	0,04	60	0,1	
KS-Mauerwerk	0,24	25	0,99	1800	6,0	
Außenputz	0,02	10	1,0		0,2	

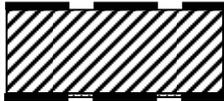
4. Monolithische Außenwand

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
Innenputz	0,01	10	0,7		0,1	
Porenbeton-Plansteine	0,30	5	0,15	450	1,5	
Außenputz	0,025	15	1,0	1800	0,38	

5. Beton-Flachdach ohne Dampfbremse, mit 16 cm Dämmung und Dachabdichtung

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
Innenputz	0,01	10	0,7		0,1	
Betontragschale	0,16	130	2,3	2300	20,8	
MF-Dämmung	0,16	1	0,04	60	0,16	
Dachabdichtung	0,02	75000	0,17		1500	

6. Porenbeton-Flachdach mit Dachabdichtung

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
Beschichtung	0,0005	200	0,2		0,1	
Porenbeton-Dachplatten	0,20	10	0,18	550	2,0	
Dachabdichtung	0,02	75000	0,17		1500	

7. Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 8 cm unter / 16 cm über PE-Dampfbremse

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
MF-Dämmung	0,08	1	0,035	60	0,08	
PE-Folie	0,0005	100000	0,23		50	
MF-Dämmung	0,16	1	0,04	60	0,16	
Diffusionsoffene Schicht	0,0005	1000	0,17		0,5	

8. Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 6 cm unter / 10 cm über PE-Dampfbremse

Bauteilschicht	Dicke d [m]	μ -Wert [-]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	s_d -Wert [m]	
MF-Dämmung	0,06	1	0,035	60	0,06	
PE-Folie	0,0005	100000	0,23		50	
MF-Dämmung	0,10	1	0,04	60	0,10	
Diffusionsoffene Schicht	0,0005	1000	0,17		0,5	

3. Verallgemeinerte Grenzwertbetrachtungen zur Norm-Diffusionsuntersuchung mit Blockklima-Randbedingungen

Formelzeichen und Einheiten

Bei den nachfolgenden Untersuchungen werden die nach DIN 4108-3 üblichen und allgemein bekannten Symbole, Einheiten und Definitionen verwendet. Es wird außerdem vorausgesetzt, dass die prinzipielle Methodik des Diffusionsnachweises nach DIN 4108-3 bekannt ist.

Grundsätzliche Anmerkungen

Bei dem in DIN 4108-3 implementierten Verfahren zur Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungsmassen handelt es sich um ein stationäres Verfahren, das ausschließlich Diffusionsvorgänge unter speziell vorgegebenen Temperatur- und Feuchterandbedingungen betrachtet. Dadurch ist es möglich, unabhängig von den thermischen und diffusionstechnischen Eigenschaften von Bauteilschichten Grenzwerte anzugeben, innerhalb derer Bauteile unter den verschiedenen Klimarandbedingungen den Anforderungen an einzuhaltende Tauwasser- und ausreichend große Verdunstungsmassen gerecht werden. Die zulässigen Grenzwerte für die Tauwassermassen bleiben dabei für die alten und die neuen Randbedingungen gleich.

Die im Sinne der Norm zulässige Tauwassermasse kann nur bei einem sehr starken Abfall des Sättigungsdampfdruckes über einen, der Innenoberfläche nahen, kleinen Bereich s_{di} überschritten werden. Die Ausdehnung dieses kritischen Bereiches wird in der vorliegenden Arbeit in Abhängigkeit von den normativen Randbedingungen dargestellt. Dabei soll eine im Sinne der Norm schädliche, zu große innenseitige Diffusionsstromdichte g_i durch Festlegen eines minimalen Sättigungsdampfdruckes $\min p_{sat}$ an der Stelle des Tauwasserausfalls vermieden werden. Bei Unterschreitung dieses Druckes würde die zulässige Tauwassermasse zwangsläufig überschritten. Weiterhin wird in DIN 4108-3 gefordert, dass ausgefallenes Tauwasser in der Verdunstungsperiode wieder vollständig aus dem Bauteil heraus diffundieren soll. Folglich werden die in Abhängigkeit von s_d maximal mögliche Tauwassermasse und die an gleicher Stelle mögliche Verdunstungsmasse für die alten und die neuen Randbedingungen ermittelt. Sowohl für die Tau- als auch für die Verdunstungsperiode werden kritische Fälle diskutiert.

3.1 Tauperiode

Die Tauwassermasse $m_{W,T}$ nach DIN 4108-3 wird berechnet, indem die Differenz der innen- und außenseitigen Diffusionsstromdichten g genau die Wasser(dampf)stromdichte abbildet, die über die Dauer der Tauperiode t_T im Bauteil als Tauwassermasse $m_{W,T}$ verbleibt (1).

Im Falle zweier Ebenen des Tauwasserausfalls führt die Addition der beiden Tauwassermassen zum gleichen Ergebnis (2) – (5).

$$m_{W,T} = t_T \cdot (g_i - g_e) \quad (1)$$

$$m_{W,T} = m_{W,T1} + m_{W,T2} \quad (2)$$

$$\text{mit } m_{W,T1} = t_T \cdot (g_i - g_z) \quad (3)$$

$$m_{W,T2} = t_T \cdot (g_z - g_e) \quad (4)$$

$$m_{W,T} = t_T \cdot (g_i - g_z + g_z - g_e) \quad (5)$$

Schließlich kann aus (1) und (6) nach Umformung und unter Ansatz der jeweils zulässigen Tauwassermasse $m_{W,T}$ folgende Beziehung zur Verdeutlichung der Einflüsse auf Diffusionsvorgänge im Bauteil angegeben werden (7).

$$g = \frac{\Delta p}{1,5 \cdot 10^6 \cdot s_d} \quad (6)$$

$$\text{const.} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot \text{zul } m_{W,T}}{t_T} \geq \frac{p_i - p_{sw,i}}{s_{di}} - \frac{p_{sw,e} - p_e}{s_{de}} \quad (7)$$

Dabei sind je nach in DIN 4108-3 beschriebenen Fall des Tauwasserausfalls $p_{sw,i} \geq p_{sw,e}$ und $s_{di} + s_{de} \leq s_d$. Die von der Norm abweichende Indizierung $p_{sw,i}$ und $p_{sw,e}$ anstelle $p_{sw,1}$ und $p_{sw,2}$ bzw. p_{sw} wird in diesem Bericht immer dann verwendet, wenn Zusammenhänge beschrieben werden, die für alle Fälle des Tauwasserausfalls gelten.

Betrachtet man zunächst Fall b – Tauwasserausfall in eine Ebene, so werden in (7) $p_{sw,i} = p_{sw,e} = p_{sw}$ und $s_{di} + s_{de} = s_d$. Unter Ansatz der normativen Randbedingungen für p_i , p_e , zulässig $m_{W,T}$ und t_T kann für beliebige Bauteile (in Abhängigkeit von s_d) ein Wert des minimalen Sättigungsdampfdruckes $\min p_{sat}$ an jeder beliebigen Stelle k für $s_{dk} < s_{dj}$

angegeben werden, für den sich die linke und rechte Seite von (7) gleichen. Bild 10 zeigt dazu schematisch den Verlauf von $\min p_{\text{sat}}$ für ein endliches s_d , der sich für $s_{di} \leq s_{dj}$ aus der Differenz $g_i - g_e$ ergibt. Die grau und schwarz dargestellten Dampfdruckverläufe lassen erkennen, dass die Differenz zwischen g_i und g_e und damit die Tauwassermasse für beide Beispiele gleich groß ist.

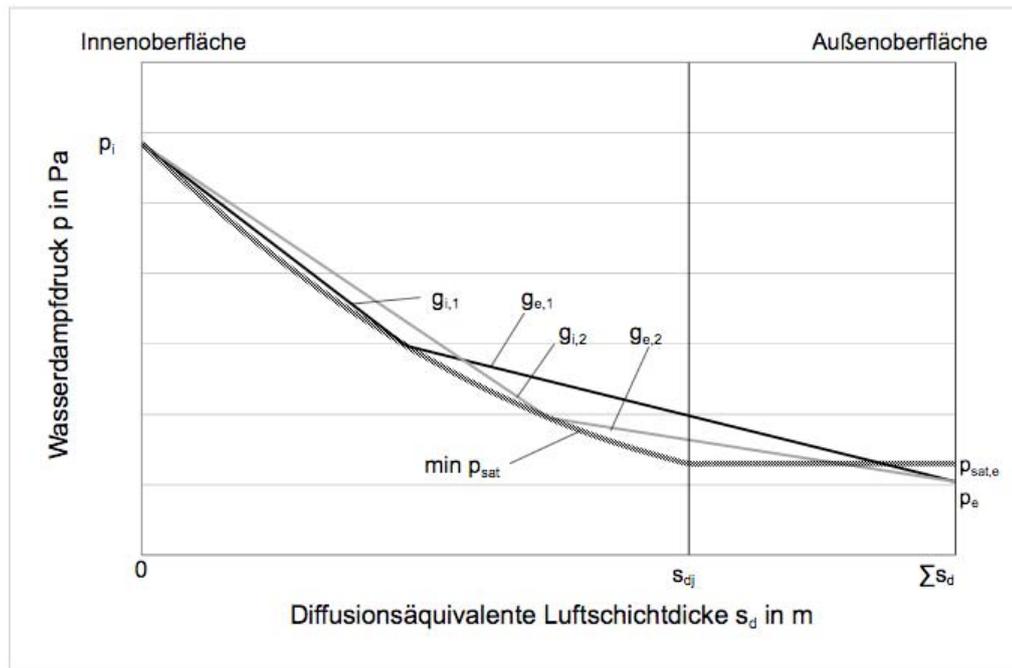


Bild 10: Schematischer Verlauf des minimalen Sättigungsdampfdruckes $\min p_{\text{sat}}$ für ein Bauteil mit endlichem s_d

Befindet sich die Stelle k (und damit die Ebene des Tauwasserausfalls) in der Nähe der Innenoberfläche, ist s_{di} also klein, so gibt $\min p_{\text{sat},k}$ den Wert an, für den die zulässige Tauwassermasse gerade noch eingehalten wird. Mit zunehmender Entfernung der Stelle k von der Innenoberfläche, also größer werdendem s_{di} , kann $\min p_{\text{sat},k}$ immer kleiner werden bis schließlich der im Bauteil kleinstmögliche Sättigungsdampfdruck $\min p_{\text{sat},k} = p_{\text{sat},se}$ und unter der theoretischen Annahme $\theta_{se} \rightarrow \theta_e$ $\min p_{\text{sat},k} = p_{\text{sat},e}$ erreicht wird. Diese Stelle soll im Folgenden j genannt werden.

Wandert die Stelle k über j hinaus, wird also $s_{di} > s_{dj}$, so kann selbst bei $s_{de} = \infty$ und damit $g_e = 0$ die zulässige Tauwassermasse nicht mehr erreicht werden. Für die An-

nahmen mit $p_{sw} = p_{sat,e}$ und $s_{de} = \infty$ kann aus (8) die theoretisch größtmögliche innen-seitige diffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s_{dj,\infty}$ bestimmt werden, bei der die zulässige Tauwassermasse am Ende der Tauperiode gerade noch erreicht wird. Die Werte für $s_{dj,\infty}$ für die zu untersuchenden Randbedingungen enthält Tabelle 2.

$$s_{dj,\infty} = \frac{(p_i - p_{sat,e}) \cdot t_T}{1,5 \cdot 10^6 \cdot \text{zul } m_{W,T}} \quad (8)$$

Tabelle 2: Werte für $s_{dj,\infty}$ bei verschiedenen Randbedingungen für Klima und Tauwassermasse

	$s_{dj,\infty}$ [m]	
	zul. $m_{W,T} = 1 \text{ kg/m}^2$	zul. $m_{W,T} = 0,5 \text{ kg/m}^2$
DIN 4108-3 (alt)	0,87	1,75
vorgeschlagene Klima-randbedingungen (neu)	1,10	2,21

Für praktisch vorkommende Bauteile mit endlichen s_d -Werten ergeben sich Werte der größtmöglichen innenseitigen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke $s_{dj,N}$ mit $s_{dj,N} < s_{dj,\infty}$. Allerdings liegen die Werte für $s_{dj,N}$ schon bei einem s_d von 10m nur noch einige Zentimeter unter $s_{dj,\infty}$. Somit kann $s_{dj,\infty}$ als Kenngröße bezüglich des Erreichens zulässiger Tauwassermassen zum Vergleich der alten und neuen Randbedingungen herangezogen werden. Der Wert von $s_{dj,N}$ errechnet sich nach (7) mit $p_{sw,i} = p_{sw,e} = p_{sat,e}$, $s_{di} = s_{dj}$ und $s_{de} = s_d - s_{dj}$ entsprechend (9). Den Zusammenhang zwischen $s_{dj,N}$ und s_d zeigt Bild 11.

$$s_{dj,N} = \frac{\text{const.} \cdot s_d + p_i - p_e}{2 \cdot \text{const.}} - \sqrt{\left(\frac{\text{const.} \cdot s_d + p_i - p_e}{2 \cdot \text{const.}} \right)^2 - \frac{(p_i - p_{sat,e}) \cdot s_d}{\text{const.}}} \quad (9)$$

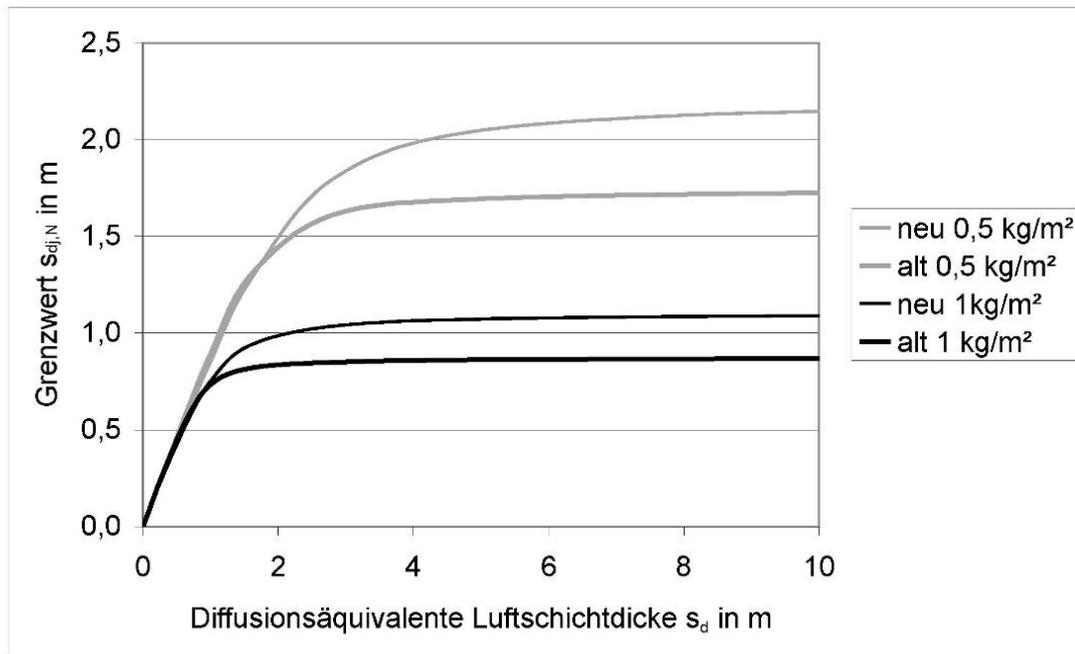


Bild 11: Einfluss der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke s_d des gesamten Bauteils auf den Grenzwert $s_{dj,N}$

Überträgt man nun die gefundenen Beziehungen zur Ermittlung des Verlaufs von $\min p_{\text{sat}}$ auf die anderen normativen Tauwasserfälle:

- Fall c - Tauwasserausfall in zwei Ebenen
- Fall d - Tauwasserausfall in einem Bereich,

so gelangt man zu der Erkenntnis, dass der für Fall b gefundene Verlauf von $\min p_{\text{sat}}$ bereits die kleinstmöglichen Sättigungsdampfdrücke $\min p_{\text{sat},k}$ für jede Stelle k mit $s_{dk} < s_{dj}$ in einem beliebigen Bauteil mit bekanntem s_d enthält. In (7) wird für die Fälle c und d $p_{\text{sw},i} = p_{\text{sw},1} > p_{\text{sw},2}$ und $s_{di} + s_{de} < s_d$ mit $g_i > g_z > g_e$, wobei g_z nach Fall d nicht explizit angegeben wird. Sollte $p_{\text{sw},1}$ nach Fall c oder d nun also einen Wert des für Fall b gefundenen Verlaufes von $\min p_{\text{sat}}$ an einer beliebigen Stelle k mit $s_{di} < s_{dj}$ annehmen, so würde für g_e in Fall c oder d wegen $g_z > g_e$ aus Fall b und damit die Differenz $g_i - g_e$ gegenüber Fall b ansteigen und die zur $m_{W,T}$ überschritten. Auch $p_{\text{sw},2,k}$ in Fall c oder d muss im Bereich $s_{di} + s_{dz} < s_{dj}$ größer als $\min p_{\text{sat},k}$ sein, da anderenfalls wegen $g_i > g_z$ die im Vergleich zu Fall b größer werdende innenseitige Diffusionsstromdichte g_i der

Fälle c und d wiederum zu einer unzulässig großen Tauwassermasse im Bauteilinneren führt. Es gilt also $p_{sw,1,k} > \min p_{sat,k}$ und $p_{sw,2,k} > \min p_{sat,k}$. Zusammenfassend ist also festzustellen, dass das Unterschreiten des für den Fall b ermittelten Verlaufes von $\min p_{sat}$ im Bereich $s_{dk} < s_{dj}$ in jedem Fall des Tauwasserausfalls zu einer Überschreitung der zulässigen Tauwassermasse führt.

Dementsprechend wird die Funktion $\min p_{sat}$ für Fall b (kritischer Fall) angegeben. Aus (7) wird mit $p_{sw,i} = p_{sw,e} = p_{sw} = \min p_{sat,k}$ und $s_{de} = s_d - s_{di}$ die Funktion des Verlaufes von

$$\min p_{sat} = \max \begin{cases} p_{sat,e} \\ p_{sat} = p_i + (p_e - p_i) \frac{s_{di}}{s_d} - \text{const.} \cdot s_{di} + \text{const.} \cdot \frac{s_{di}^2}{s_d} \end{cases} \quad (10).$$

Die Funktion von $\min p_{sat}$ verläuft im Bereich $0 \leq s_{di,k} \leq s_{dj}$

- linear abfallend für $s_{de} = \infty$ mit dem Anstieg $-\frac{p_i - p_{sat,e}}{s_{dj}}$
- parabelförmig abfallend für alle anderen $s_{de} > 0$.

Für alle $s_{di} > s_{dj}$ gilt $\min p_{sat} = p_{sat,e}$ für $\theta_{se} \rightarrow \theta_e$.

Die gefundene Darstellung besitzt Allgemeingültigkeit für alle Bauteile, deren Wärmedurchlasswiderstand R so groß ist, dass der Sättigungsdampfdruck an der Innenoberfläche $p_{sat,si}$ gleich oder größer ist als der ebenfalls aus den Randbedingungen hervorgehende Wasserdampfdruck an der Innenoberfläche $p_{si} = p_i$. Wird R so klein, dass $p_{sat,si} < p_i$ wird, fällt Tauwasser schon an der Innenoberfläche aus. Derlei Fälle werden hier nicht betrachtet. Auch Sprünge im Verlauf von $\min p_{sat}$ durch das mögliche Vorhandensein verschiedener zulässiger Tauwassermassen in einem Bauteil seien hier lediglich erwähnt.

Berechnungsergebnisse zum Verlauf des minimalen Sättigungsdampfdruckes

Die in Bild 12 angegebenen Verläufe der Funktionen von $\min p_{\text{sat}}$ gelten für die Klimarandbedingungen nach DIN 4108-3 und eine zulässige Tauwassermasse $m_{\text{W,T}} = 1 \text{ kg/m}^2$. Für diese Randbedingungen gilt nach (8) $s_{\text{dj},\infty} = 0,87 \text{ m}$. Fällt Tauwasser also erst bei einem $s_{\text{di}} > 0,87 \text{ m}$ aus, wird die zulässige Tauwassermasse keinesfalls überschritten.

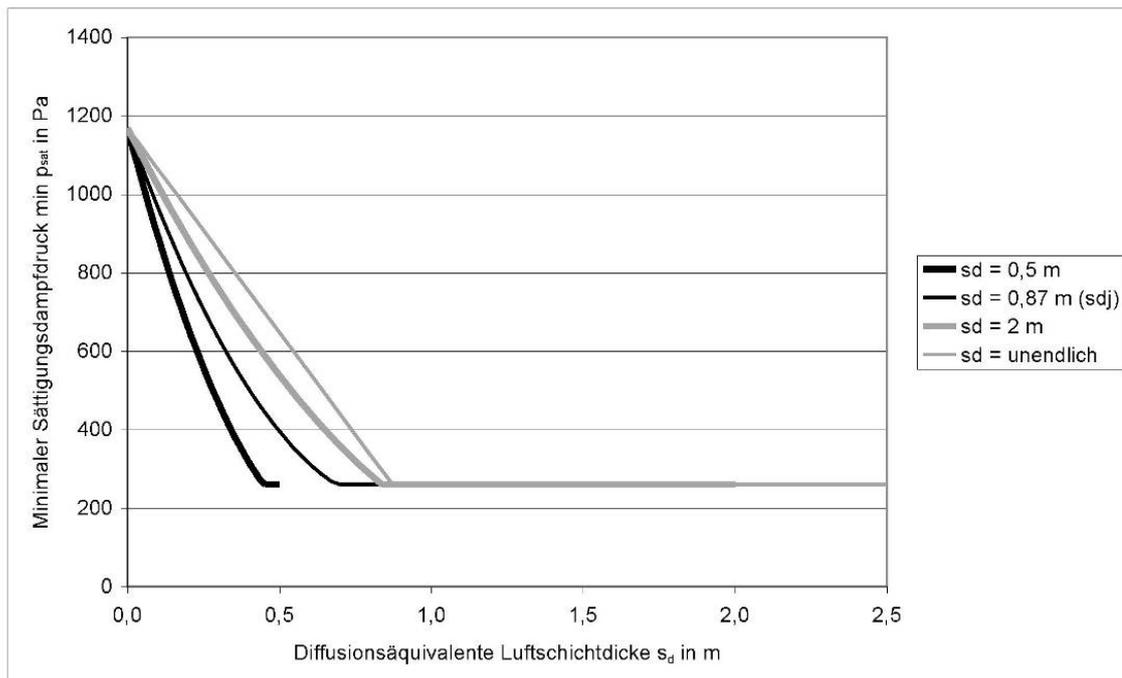


Bild 12: Verlauf des theoretisch minimalen Sättigungsdampfdruckes $\min p_{\text{sat}}$ für Bauteile mit verschieden großer diffusionsäquivalenter Luftschichtdicke (0,5 m, 0,87 m, 2 m, unendlich)

Die vier dargestellten Verläufe stehen exemplarisch für Bauteile mit unterschiedlichen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken. Wird s_d des Bauteils klein, so sinkt $\min p_{\text{sat}}$ aufgrund der kleiner werdenden außenseitigen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke und damit größer werdenden Diffusionsstromdichte g_e . Für größer werdende s_d ergibt

sich ein Verlauf von $\min p_{\text{sat}}$, der sich bei $s_d \rightarrow \infty$ der Geraden mit dem Anstieg

$$-\frac{p_i - p_{\text{sat,e}}}{s_{\text{dj}}} \text{ annähert.}$$

Bewertung von Bauteilen hinsichtlich der Einhaltung der zulässigen Tauwassermasse

Der Vergleich der Klimarandbedingungen nach DIN 4108-3 (alt) mit den vorgeschlagenen (neu) zeigt bei gleicher zulässiger Tauwassermasse bedingt durch Änderung des Dampfdruckunterschiedes $p_i - p_{\text{sat,e}}$ und die Änderung der Dauer der Tauperiode eine entsprechende Vergrößerung von $s_{\text{dj},\infty}$. Die Halbierung der zulässigen Tauwassermasse von 1 kg/m^2 auf $0,5 \text{ kg/m}^2$ hat selbstredend die Verdoppelung von $s_{\text{dj},\infty}$ zur Folge. Die Werte für $s_{\text{dj},\infty}$ sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Demnach ist es unter Ansatz der neuen Randbedingungen auch bei etwas größeren s_{dj} -Werten noch möglich, die zulässige Tauwassermasse zu überschreiten.

In den Bildern 13 bis 15 wird für Bauteile mit verschiedener diffusionsäquivalenter Luftschichtdicke

- $s_d = 0,5 \text{ m}$
- $s_d = 2 \text{ m}$
- $s_d = \infty$

und die verschiedenen Randbedingungen der Verlauf des minimalen Sättigungsdampfdruckes $\min p_{\text{sat}}$ dargestellt. Der Wert für $\min p_{\text{sat,k}} = p_{\text{sat,e}}$ steht als Grenzwert für die bereits erwähnte Annahme $\theta_{\text{se}} \rightarrow \theta_e$.

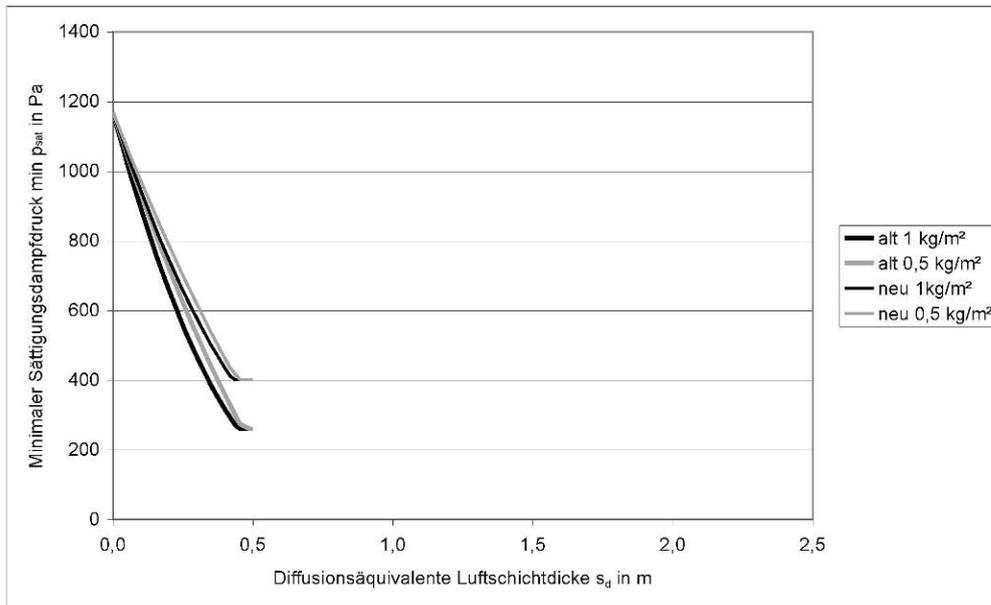


Bild 13: Verlauf des minimalen Sättigungsdampfdruckes für ein Bauteil mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke insgesamt $s_d = 0,5$ m für verschiedene Randbedingungen

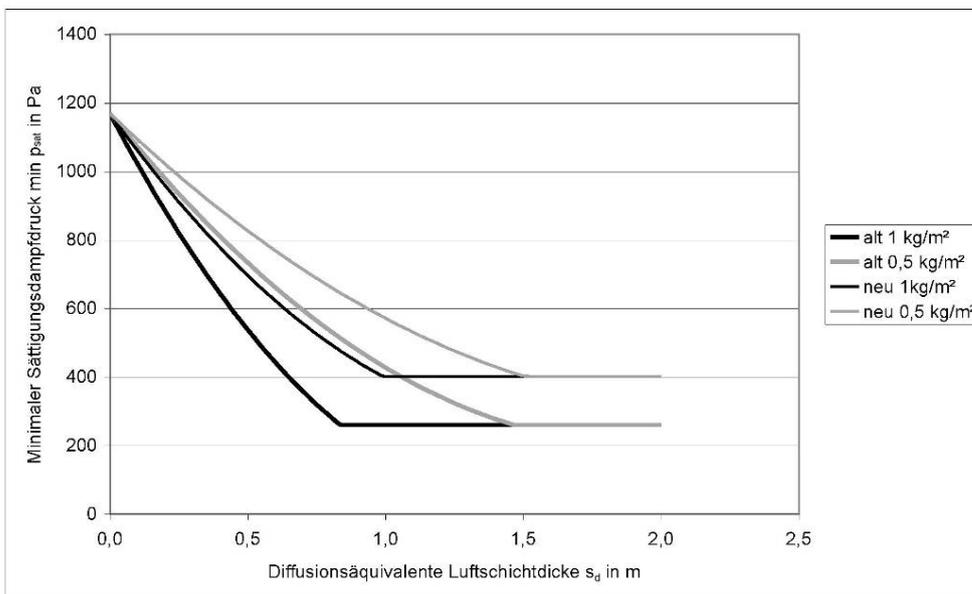


Bild 14: Verlauf des minimalen Sättigungsdampfdruckes für ein Bauteil mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke insgesamt $s_d = 2$ m für verschiedene Randbedingungen

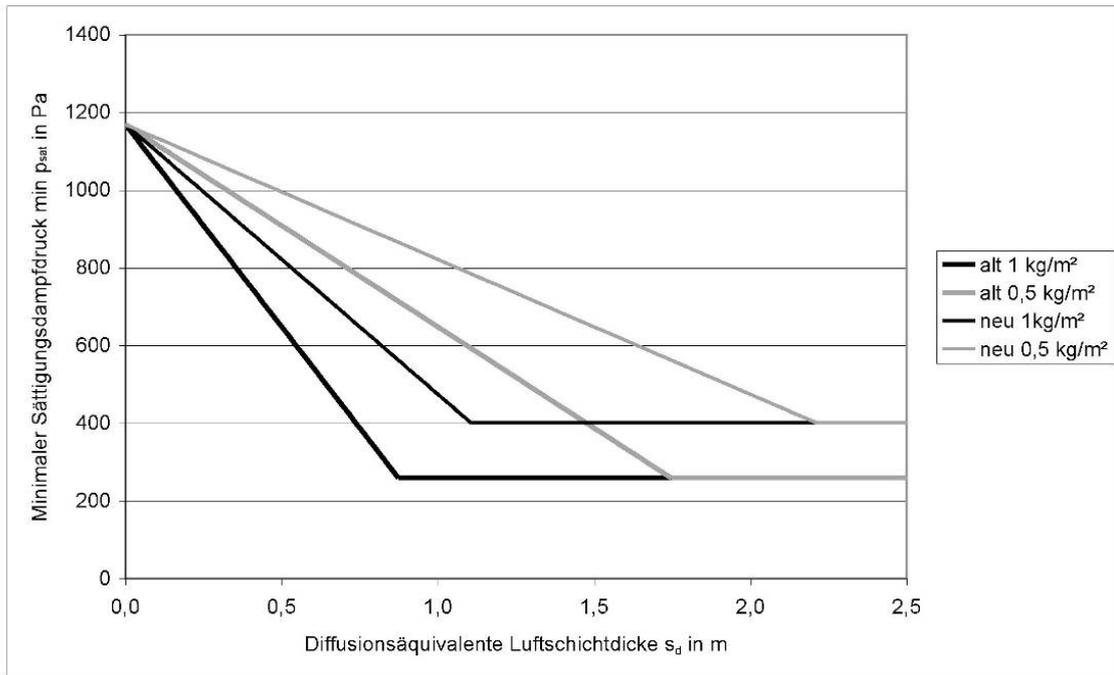


Bild 15: Verlauf des minimalen Sättigungsdampfdruckes für ein Bauteil mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke insgesamt $s_d \rightarrow \infty$ für verschiedene Randbedingungen

Da die gefundene Darstellung lediglich anzeigt, an welcher Stelle im Bauteil welcher minimale Sättigungsdampfdruck zulässig ist, jedoch keine Aussage zulässt, wie kritisch Bauteile nach neuen Randbedingungen bezogen auf die geltenden Randbedingungen gesehen werden, ist diese Lücke noch zu schließen. Dazu muss der Einfluss des von 30 K nach DIN 4108-3 auf 25 K nach den vorgeschlagenen Randbedingungen verringerten Temperaturunterschiedes zwischen Raum und Außenluft untersucht werden. Die Innentemperatur ist sowohl nach DIN 4108-3 als auch nach den vorgeschlagenen Randbedingungen $\theta_{i,alt} = \theta_{i,neu} = 20^\circ\text{C}$. Unter den stationären Randbedingungen ergibt sich also für das Verhältnis der Gesamttemperaturunterschiede

$$\frac{\theta_{i,neu} - \theta_{e,neu}}{\theta_{i,alt} - \theta_{e,alt}} = \frac{25 \text{ K}}{30 \text{ K}} = \frac{5}{6}$$

Genau in diesen Relationen verringert sich der Anstieg des Temperaturverlaufes im nachzuweisenden Bauteil. Damit ergibt sich die Temperatur an einer beliebigen Stelle des Bauteils nach den vorgeschlagenen Randbedingungen (neu) bezogen auf die aus DIN 4108-3 (alt) zu:

$$\theta_{k,neu} = \frac{\theta_i + 5 \cdot \theta_{k,alt}}{6} \quad (11)$$

Der Vergleich der Bauteilbewertung nach alten und neuen Randbedingungen soll durch Bildung der Verhältnismerte V_{minp} (12) und V_p (13) geführt werden.

$$V_{minp} = \frac{\min p_{sat,neu}}{\min p_{sat,alt}} \quad (12)$$

Gleichung (12) beschreibt die durch geänderte Randbedingungen hervorgehende relative Änderung des nach Gleichung (10) ermittelten minimalen Sättigungsdampfdruckes bei Einhaltung der zulässigen Tauwassermasse und bei $s_d > s_{dj}$ die Änderung von $p_{sat,e}$. Der Zusammenhang ist für Gesamt- s_d von 0,5 m, 2 m und $s_d = \infty$ für zul $m_{W,T} = 0,5$ und 1 kg/m^2 in Bild 16 dargestellt.

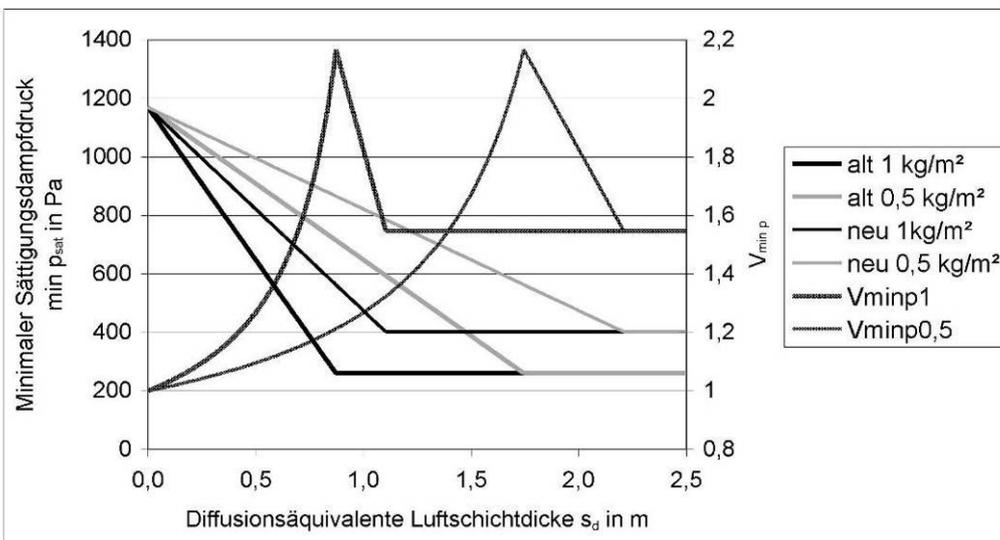
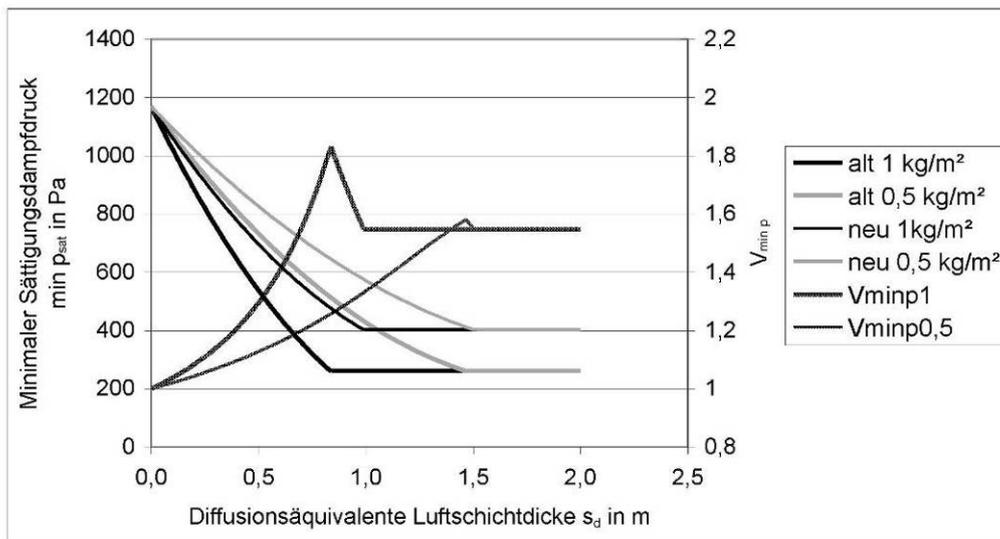
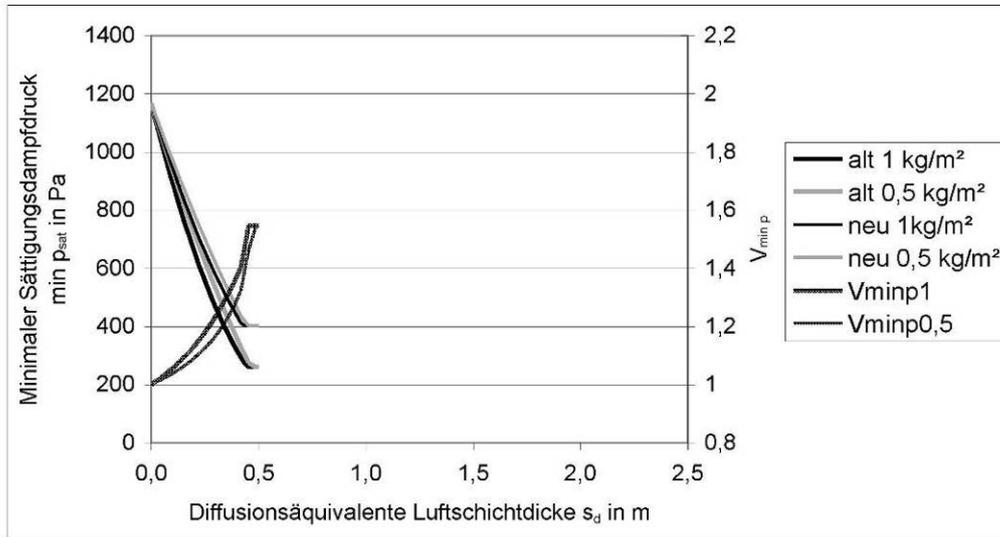


Bild 16: Minimale Sättigungsdampfdrücke und Verhältnis dieser Drücke nach alten und neuen Randbedingungen.

Oben: $s_d = 0,5$ m; Mitte: $s_d = 2$ m; Unten: $s_d = \infty$

$$V_p = \frac{p_{\text{sat}}(\theta_{k,\text{neu}})}{p_{\text{sat}}(\theta_{k,\text{alt}})} \quad (13)$$

Gleichung (13) gibt die relative Änderung des Sättigungsdampfdruckes an gleicher Stelle im Bauteil aufgrund der geänderten Temperaturrandbedingungen an (vgl. Bild 17).

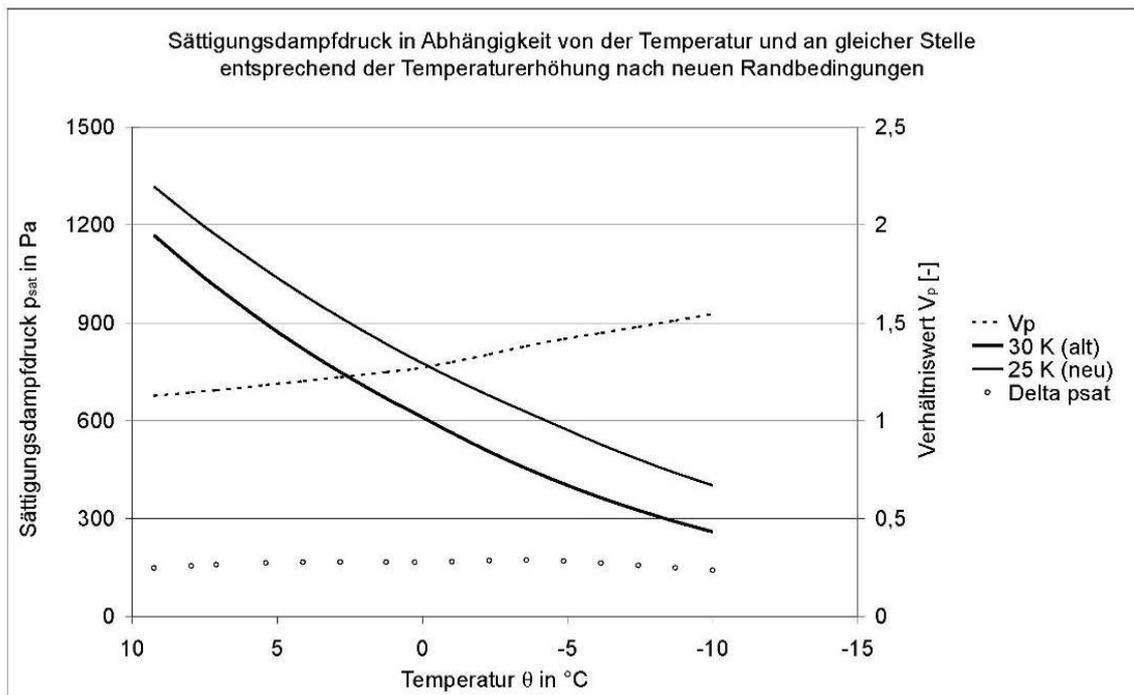


Bild 17: Auswirkungen der geänderten Temperaturrandbedingungen auf den Sättigungsdampfdruck

Dabei wird ausgehend von $\theta_{k,\text{alt}}(\min p_{\text{sat},k,\text{alt}})$ nach Gleichung (11) $\theta_{k,\text{neu}}$ bestimmt. Setzt man $V_{\min p}$ und V_p ins Verhältnis, vergleicht also, welche Veränderung $\min p_{\text{sat}}$ aufgrund der geänderten Randbedingungen erfährt bezogen auf die Veränderung, die sich nur aus dem veränderten Temperaturverlauf ergäbe, so erhält man ein Maß dafür, wie kritisch Tauwasserausfall im Bauteil an der Stelle k unter den neuen Randbedingungen hinsichtlich der zulässigen Tauwassermasse bezogen auf die alten Randbedingungen gesehen wird.

Führt $\frac{V_{\min p}}{V_p}$ an der Stelle k zu einem Ergebnis

- kleiner als 1, wird die Stelle als weniger kritisch
- gleich 1, wird die Stelle als gleich kritisch
- größer als 1, wird die Stelle kritischer

hinsichtlich der zulässigen Tauwassermasse bezogen auf die alten Randbedingungen betrachtet.

Für $s_{di} > s_{dj,neu}$ stellt sich der Verhältniswert $V_{\min p}/V_p$ zu 1 ein. Die zulässige Tauwassermasse wird weder nach neuen noch nach alten Randbedingungen erreicht. Die Konstruktionen sind in dieser Hinsicht gleichermaßen unkritisch. Gleichwohl fallen für so große s_{di} -Werte in Abhängigkeit von den Randbedingungen an der Stelle k verschieden große Tauwassermassen aus. In Bild 18 sind diese Zusammenhänge für Bauteile mit unterschiedlichen s_d -Werten angegeben.

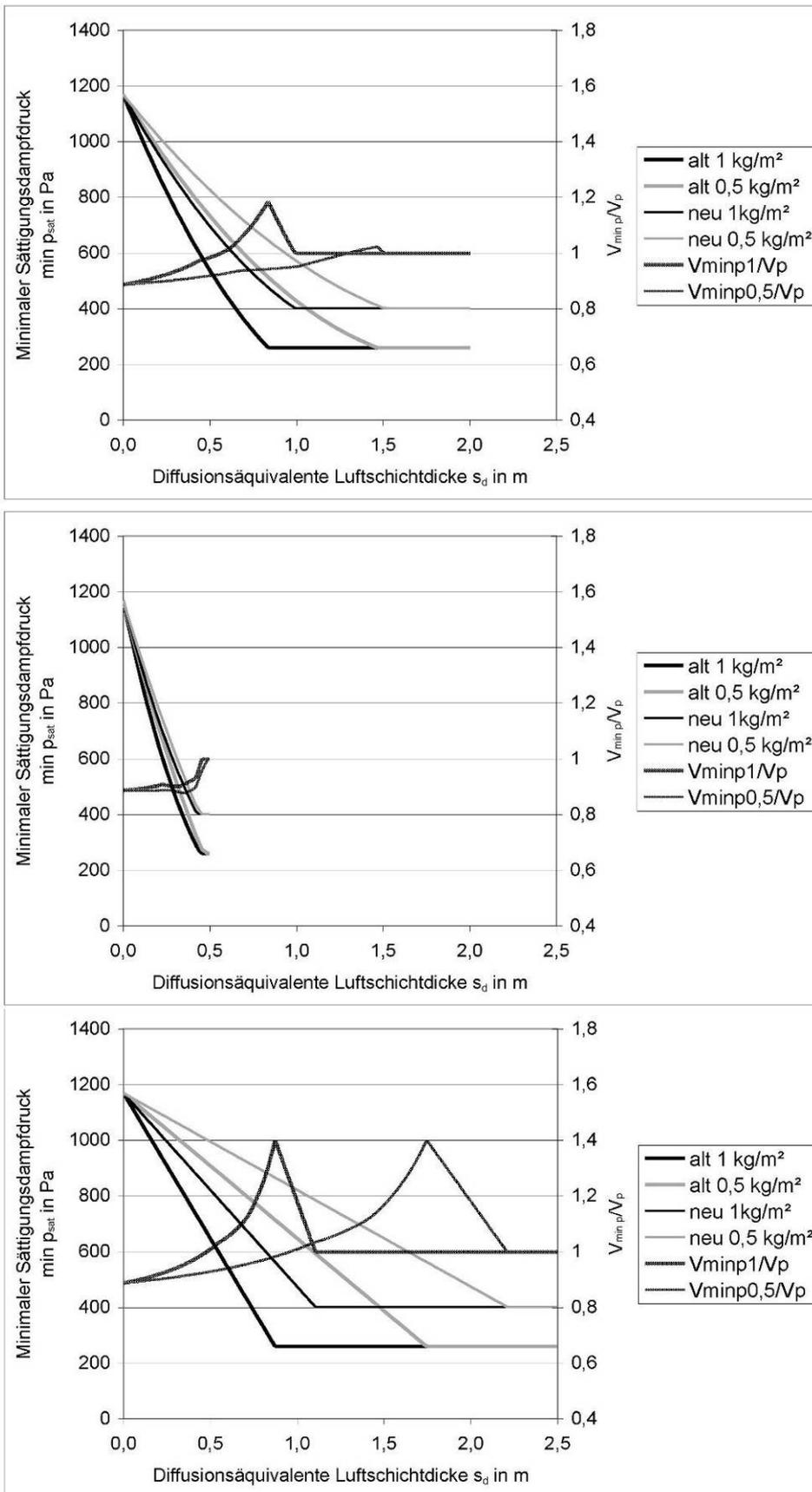


Bild 18: Minimale Sättigungsdampfdrücke und das Maß dafür, um wie viel kritischer Bauteile nach neuen Randbedingungen gesehen werden, deren Sättigungsdampfdruck nach alten Randbedingungen $\min p_{sat}$ gleicht.

Oben: $s_d = 0,5$ m; Mitte: $s_d = 2$ m; Unten: $s_d = \infty$

Bauteile mit sehr kleinen s_d -Werten (s. Beispiel mit $s_d = 0,5$ m) werden nach neuen Randbedingungen generell als weniger kritisch bewertet. Unabhängig von der Stelle des Tauwasserausfalls wird die Tauwassermasse nach neuen Randbedingungen für jedes Bauteil kleiner sein. Diese Aussage gilt für zul $m_{W,T} = 0,5$ kg/m² bis zu einem Gesamt- s_d des Bauteils von etwa 1,8 m, bei zul $m_{W,T} = 1$ kg/m² bis etwa 0,9 m. Steigt s_d des Bauteils weiter an (s. Beispiel mit $s_d = 2$ m), werden Konstruktionen bei Tauwasserausfall in einer schmalen, oberflächennahen Zone nach neuen Randbedingungen kritischer bewertet. Bei zul. $m_{W,T} = 0,5$ kg/m² erstreckt sich diese Zone im Extremfall (s. Beispiel mit $s_d = \infty$) von 1,0 bis 2,2 m, bei zul $m_{W,T} = 1$ kg/m² von 0,5 bis 1,1 m.

Bewerten von Bauteilen ohne Erreichen der zulässigen Tauwassermasse

Zunächst soll die maximal mögliche Tauwassermasse im Bauteil nun allerdings für $s_{di} > s_{dj}$ unter den verschiedenen Randbedingungen betrachtet werden. Anschließend werden Fälle diskutiert, bei denen der Sättigungsdampfdruck an der Stelle des Tauwasserausfalls nicht auf den Extremwert $p_{sat,e}$ abfällt und die Randbedingungen dahingehend verglichen.

Maximal mögliche Tauwassermasse an der Stelle k

In Bild 19 sind die maximal möglichen Tauwassermassen für Fall b – Tauwasserausfall in einer Ebene - dargestellt. Als theoretische Annahmen sollen $s_{de} = \infty$ und damit $g_e = 0$ bei $\theta_{se} \rightarrow \theta_e$ und damit $p_{sw} = p_{sat,e}$ gelten.

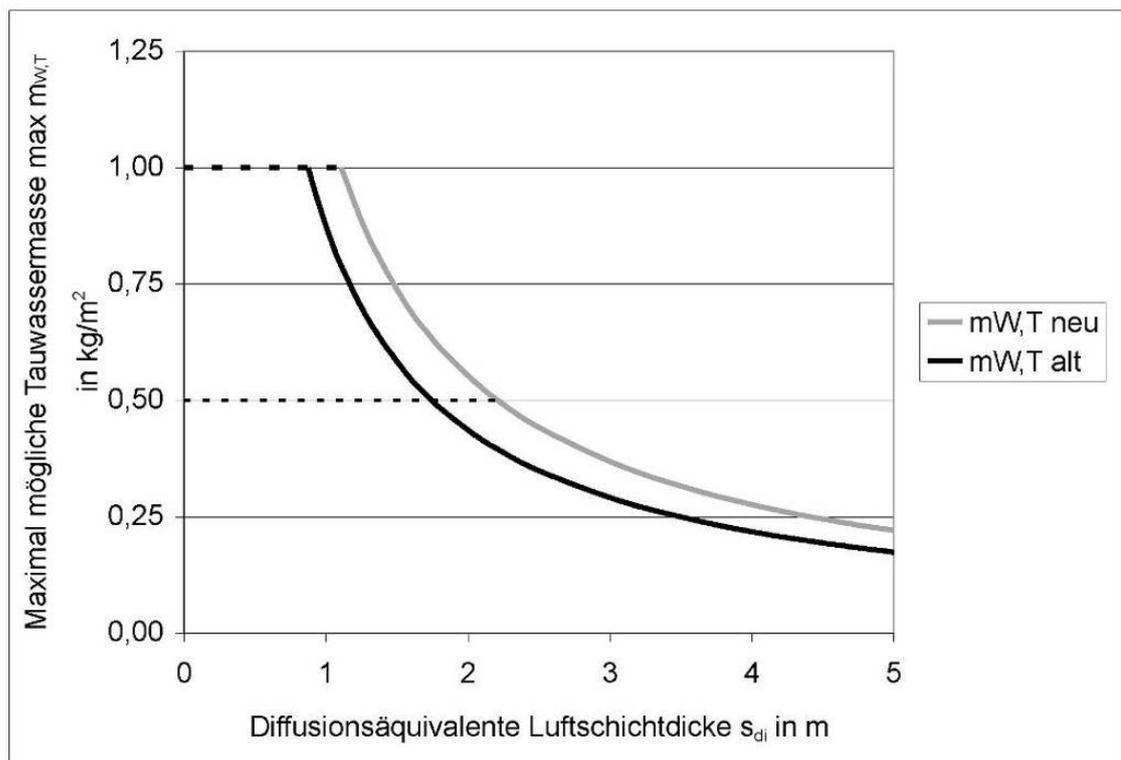


Bild 19: Maximal mögliche Tauwassermassen in Abhängigkeit von der Stelle des Tauwasserausfalls s_{di} für die alten und neuen Randbedingungen

An Stellen im Bauteil, an denen die im Sinne der Norm zulässigen Werte der Tauwassermasse zu $m_{W,T}$ weder nach alten noch nach neuen Randbedingungen erreicht werden, sich also die maximal mögliche Tauwassermasse unter obigen Annahmen einstellen kann, steigt für diesen Grenzfall die Tauwassermasse durch die geänderten Randbedingungen um etwa 27% an. Folglich wären Bauteile, deren p_{sw} in Ebene des Tauwasserausfalls auf $p_{sat,e}$ abfällt für $s_{di} > 0,87$ m bei zu $m_{W,T} = 1 \text{ kg/m}^2$ bzw. $s_{di} > 1,75$ m bei zu $m_{W,T} = 0,5 \text{ kg/m}^2$, nach neuen Randbedingungen als kritischer zu betrachten.

Tauwasserausfall ohne Erreichen der an der Stelle k maximal möglichen Tauwassermasse

In der Praxis sind viele Bauteile zu untersuchen, für die die obigen Annahmen zur Findung der maximal möglichen Tauwassermasse nicht zutreffend sind. Einerseits fällt Tauwasser oft an thermisch weiter innen liegenden Stellen aus ($p_{sw} \gg p_{sat,e}$), anderer-

seits nimmt s_{de} oft kleine Werte an, was zu einem signifikanten Diffusionsstrom aus einem Bauteil heraus führt.

Die Auswirkungen der schon beschriebenen Anhebung der Temperaturen und damit auch der Sättigungsdampfdrücke im Bauteilinneren und der Verlängerung der Dauer der Tauperiode nach den neuen Randbedingungen lassen sich durch einen Vergleich der ins Bauteil hineinströmenden Wassermassen nach alten und neuen Randbedingungen zeigen. Dazu wird ein Verhältnisswert $V_{mW,i}$ nach Gleichung (14) gebildet, der die relative Änderung der Wassermasse nach neuen (bezogen auf die alten) Randbedingungen angibt.

$$V_{mW,i} = \frac{(g_i \cdot t_T)_{neu}}{(g_i \cdot t_T)_{alt}} = \frac{[(p_i - p_{sw,i}) \cdot t_T]_{neu}}{[(p_i - p_{sw,i}) \cdot t_T]_{alt}} \quad (14)$$

Der Sättigungsdampfdruck $p_{sw,i,neu}$ wird für die nach Gleichung (11) berechnete Temperatur $\theta_{k,neu}$ ermittelt. Analog können die nach alten und neuen Randbedingungen aus dem Bauteil herausströmenden Wassermassen ins Verhältnis gesetzt werden, Verhältnisswert $V_{mW,e}$ nach Gleichung (15).

$$V_{mW,e} = \frac{(g_e \cdot t_T)_{neu}}{(g_e \cdot t_T)_{alt}} = \frac{[(p_{sw,e} - p_e) \cdot t_T]_{neu}}{[(p_{sw,e} - p_e) \cdot t_T]_{alt}} \quad (15)$$

Die Ermittlung von $p_{sw,e,neu}$ erfolgt analog nach Gleichung (11), es gilt je nach Fall des Tauwasserausfalls $p_i > p_{sw,i} \geq p_{sw,e} \geq p_{sat,e}$. Die relative Änderung der hinein und heraus diffundierenden Wassermassen ist durch die Verhältnisswerte $V_{mW,i}$ und $V_{mW,e}$ in Bild 20 dargestellt.

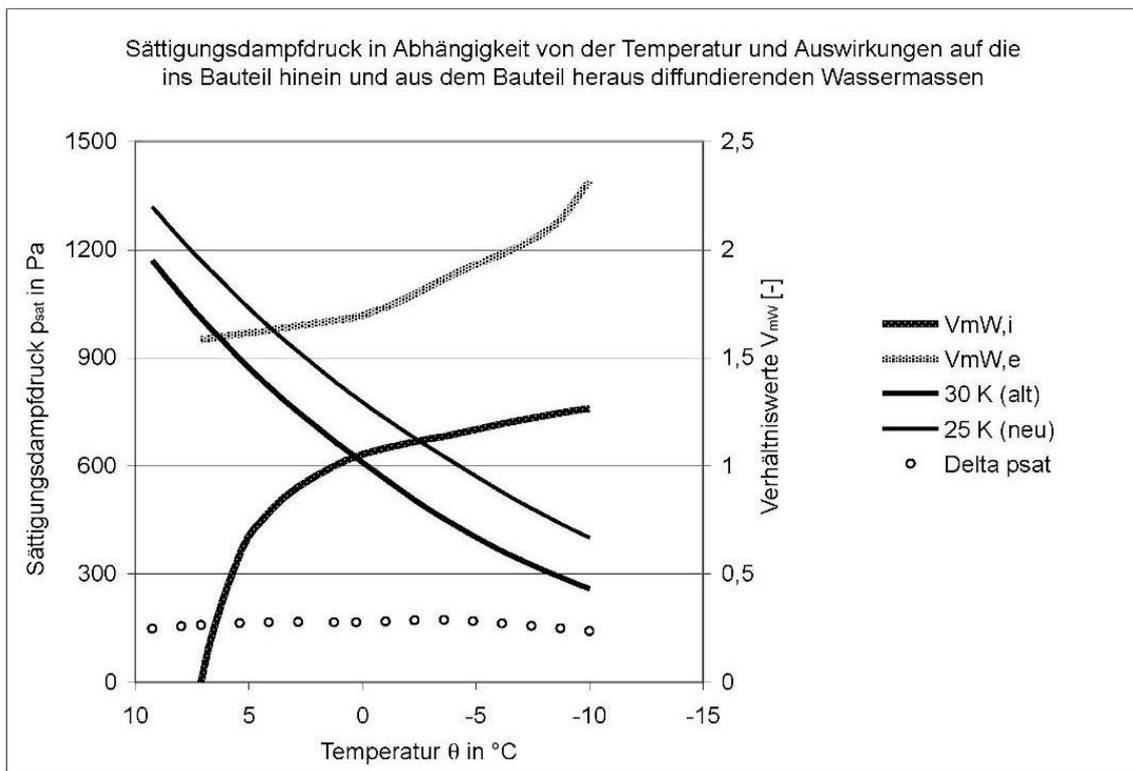


Bild 20: Änderung ein- und ausdiffundierender Wassermassen durch geänderte Randbedingungen

Verhältniszahlen $V_{mW,i} \leq 0$ zeigen, dass $p_{sw,i,neu} \geq p_i$ ist und damit an dieser Stelle kein Tauwasser ausfallen kann. Das bedeutet, dass nach neuen Randbedingungen s_{di} zumindest größer wird als nach alten Randbedingungen. Für Fall b wäre im gleichen Bauteil nach neuen Randbedingungen Tauwasserausfall ausgeschlossen. Für Verhältniszahlen $0 < V_{mW,i} \leq 1$ diffundiert nach neuen Randbedingungen weniger Wasser in das Bauteil hinein. Wegen $V_{mW,e} > 1$ (mit Werten 1,55 ... 2,31) kann weiterhin gesagt werden, dass für diese Fälle nach neuen Randbedingungen die Tauwassermasse kleiner wird.

Das gilt auch, wenn $p_{sw,e}$ so groß wird (Wegfall des Tauwasserausfalls an dieser Stelle), dass sich aus Fall c oder d nach alten Randbedingungen Fall b nach neuen Randbedingungen einstellt.

Verhältniszahlen $V_{mW,i} > 1$ bedeuten, dass bei Ansatz der neuen Randbedingungen im Verlauf der Tauperiode mehr Wasser ins Bauteil hineinströmt.

Dann ist es von den Größen s_{di} , s_{de} und ggf. $p_{sw,e}$ abhängig, ob ggf. auch unter Einstellen des Falles b, nach neuen Randbedingungen mehr Tauwasser anfällt als nach den alten.

Zusammenfassend kann gemäß Bild 20 gesagt werden, dass bei einem Abfall des Sättigungsdampfdrucks an der Stelle $s_d = s_{di}$ auf Werte $p_{sw,i,alt} < 669 \text{ Pa}$ ($\theta_{k,alt} < 1,25^\circ\text{C}$) die Tauwassermasse im Bauteil unter Ansatz der neuen Randbedingungen wegen $V_{mW,i} \geq 1$ steigen kann. Fällt der Sättigungsdampfdruck auf Werte $669 \text{ Pa} \leq p_{sw,i,alt} < 1010 \text{ Pa}$ ($1,25^\circ\text{C} \leq \theta_{k,alt} < 7,10^\circ\text{C}$) ab, so stellt sich nach neuen Randbedingungen wegen $0 \leq V_{mW,i} < 1$ weniger Tauwasser im Bauteil ein. Werte für $p_{sw,i} \geq 1010 \text{ Pa}$ ($\theta_{k,alt} \geq 7,10^\circ\text{C}$) haben zur Folge, dass nach neuen Randbedingungen an dieser Stelle wegen $V_{mW,i} \leq 0$ kein Tauwasser mehr ausfällt. Weiter ist es möglich, dass durch die Vergrößerung von $p_{sw,e}$ nach neuen Randbedingungen an dieser Stelle kein Tauwasser mehr ausfällt.

3.2 Verdunstungsperiode

Damit ein Bauteil im Sinne von DIN 4108-3 tauglich ist, muss während der Tauperiode ausgefallenes Tauwasser in der Verdunstungsperiode wieder vollständig aus dem Bauteil diffundieren. Diffusion erfolgt dann nach der bestehenden Norm von den Ebenen des Tauwasserausfalls bzw. von der Mitte des Bereichs des Tauwasserausfalls in Richtung der Bauteiloberflächen. In den nachfolgenden Betrachtungen soll untersucht werden, ob die vorgeschlagene Änderung der normativen Randbedingungen Bauteile kritischer erscheinen lässt als nach den bisher geltenden.

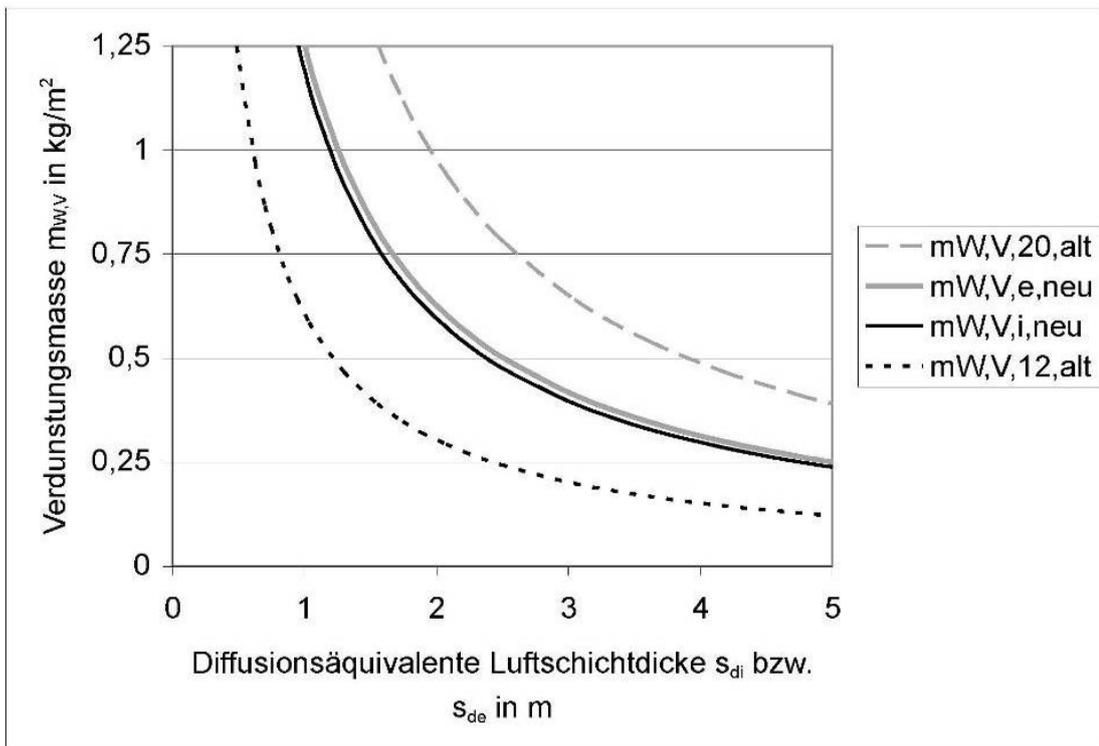
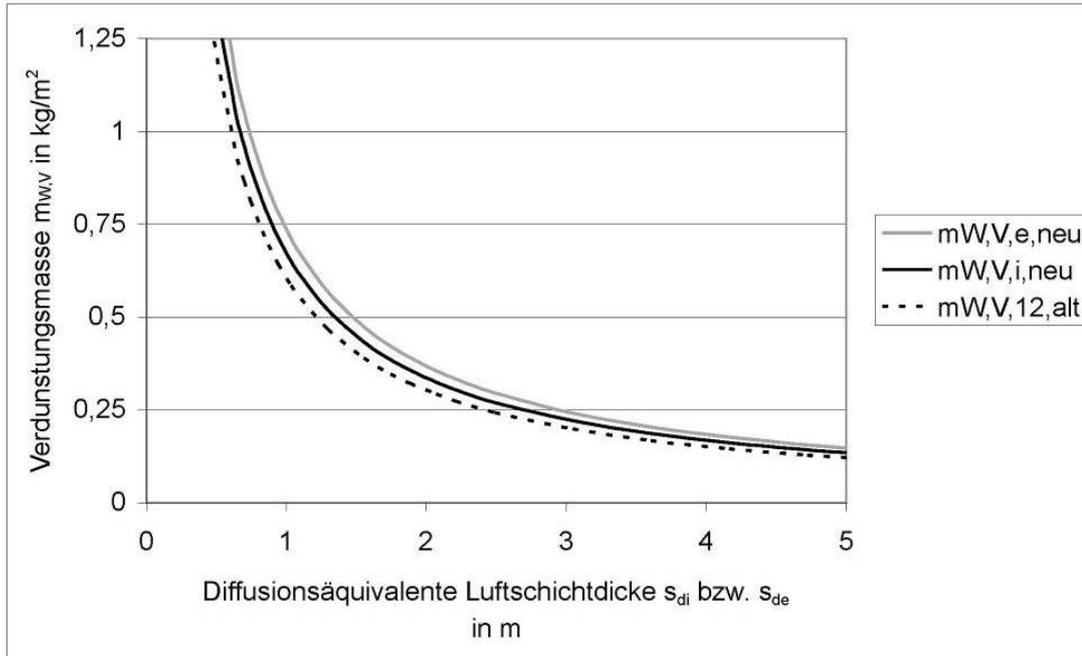


Bild 21: Verdunstungsmassen in Abhängigkeit von s_d zwischen der Stelle des Tauwasserausfalls und der Oberfläche für Wände (oben) und Dächer (unten).

Die Untersuchung erfolgt in der Weise, dass zunächst die für Wände bzw. Dächer mit den jeweils geltenden Randbedingungen der Tauperiode an der Stelle s_{dk} – bereits ermittelte – maximal mögliche Tauwassermasse $\max m_{W,T}(s_{dk})$ und die von dieser Stelle entsprechend den Randbedingungen der Verdunstungsperiode – noch zu ermittelnde – nach innen diffundierende Verdunstungsmasse $m_{W,V,i}(s_{dk})$ überlagert werden. Bild 21 zeigt nach alten und neuen Randbedingungen mögliche Verdunstungsmassen in Abhängigkeit von s_{di} bzw. s_{de} zwischen der Stelle mit Tauwasserausfall und der inneren bzw. äußeren Oberfläche. Für Wände ist nach alten Randbedingungen der Druckunterschied $p_{sw} - p_i = p_{sw} - p_e$. Deshalb sind die möglichen Verdunstungsmassen $m_{W,V,12,alt}$ nach innen und außen bei gleichem Abstand s_d zur jeweiligen Oberfläche gleich groß. Nach neuen Randbedingungen kann bei gleichem s_d sowohl nach innen $m_{W,V,i,neu}$ als auch nach außen $m_{W,V,e,neu}$ etwas mehr Wasser verdunsten.

Ist nach Überlagerung von $m_{W,T}$ und $m_{W,V,i}$ schon die gesamte Tauwassermasse aus dem Bauteil (nach innen) herausdiffundiert, gilt das Bauteil als unkritisch im Sinne der Norm. Andernfalls wird eine maximale außenseitige diffusionsäquivalente Luftschichtdicke $\max s_{de}$ (siehe Bild 22) ermittelt, bei der unter den jeweilig geltenden Randbedingungen der Verdunstungsperiode gerade noch das nicht nach innen transportierte Tauwasser in ausreichend großer Menge nach außen diffundieren kann mit $m_{W,V,e}(\max s_{de}) = \max m_{W,T}(s_{dk}) - m_{W,V,i}(s_{dk})$. Wird s_{de} eines vorhandenen Bauteils größer als $\max s_{de}$, so kann $\max m_{W,T}(s_{dk})$ während der Verdunstungsperiode nicht mehr vollständig aus dem Bauteil diffundieren. Für Dächer lässt sich nur ein Bereich der zu den Oberflächen hin diffundierenden Wassermassen $m_{W,V,12,alt} < \max m_{W,V,alt} < \max m_{W,V,20,alt}$ angeben, da der Sättigungsdampfdruck p_{sw} von der Temperaturverteilung im Bauteil abhängig ist. Die Verdunstungsmassen nach neuen Randbedingungen $m_{W,V,neu}$ können je nach Bauteil also kleiner oder größer sein als nach alten Randbedingungen.

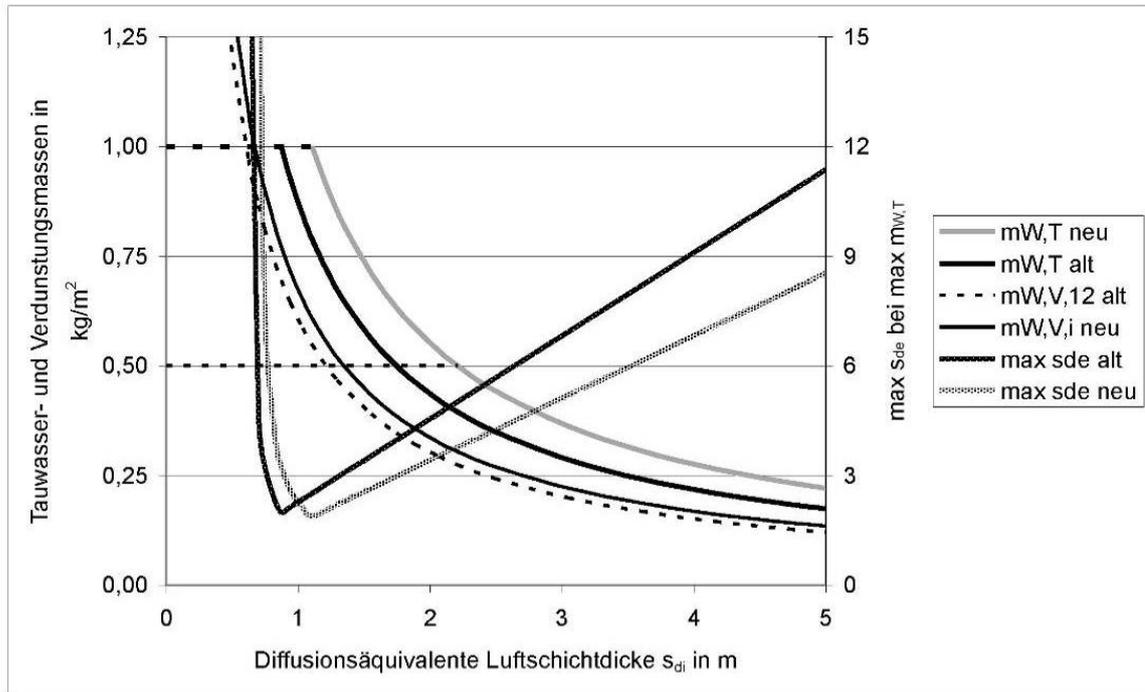


Bild 22: Höchstens zulässige außenseitige diffusionsäquivalente Luftschichtdicken $\max s_{de}$ bei $p_{sw} = p_{sat,e}$ für Wände nach alten und neuen Randbedingungen für $m_{W,T} = 1 \text{ kg/m}^2$

Analog dazu lassen sich für Tauwassermassen $m_{W,T}(s_{dk}) < \max m_{W,T}(s_{dk})$ Werte der maximal möglichen außenseitigen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke s_{de} bestimmen. Dahingehend werden Werte p_{sw} nach alten und neuen Randbedingungen verglichen, bei denen $m_{W,T}(s_{dk}) = m_{W,V,i}(s_{dk})$ wird und damit die Konstruktionen hinsichtlich Verdunstung generell unkritisch werden. Auch die Werte für $m_{W,T}$ werden wieder unter der Annahme $g_e = 0$ ermittelt. Die Betrachtungen werden wieder für Fall b – Tauwasserausfall in einer Ebene - angestellt.

Wände

Nach den neu vorgeschlagenen Randbedingungen kann etwas mehr Tauwasser während der Verdunstungsperiode aus dem Bauteil heraus nach innen diffundieren. Für Bauteile, deren $p_{sw} \rightarrow p_{sat,e}$ geht, bedeutet das dennoch eine Verschärfung der Anforderungen, da in der Tauperiode mehr Tauwasser ausfällt als nach alten Randbedingungen. Dementsprechend liegen die Werte für $\max s_{de}$ (zur Bestimmung von $m_{W,V,e}$) etwas unter denen nach alten Randbedingungen. Bild 22 zeigt diesen Zusammenhang auf. Am kritischsten wird der Tauwasserausfall für Wände nach alten und neuen Rand-

bedingungen bei einem $s_{di} \approx 1$ m für zul. $m_{W,T} = 1$ kg / m² und analog $s_{di} \approx 2$ m für zul. $m_{W,T} = 0,5$ kg / m² gesehen.

Steigt in der nachzuweisenden Wand p_{sw} an, so sinkt $m_{W,T}(s_{dk})$ ab (s. oben). Für $p_{sw} = 537$ Pa nach alten Randbedingungen ist für $s_{di} \geq s_{dj}$ $m_{W,T}(s_{dk}) = m_{W,V,i}$ und nach neuen Randbedingungen für $p_{sw} = 701$ Pa. Ausgefallenes Tauwasser kann dann allein durch Diffusion nach innen vollständig verdunsten, diese Bauteile werden also im Sinne der Norm als generell unkritisch betrachtet.

Da p_{sw} allein aufgrund der geänderten Temperaturreandbedingungen von 537 Pa ($\theta_{k,alt} = -1,58$ °C) auf 707 Pa ($\theta_{k,neu} = 2,02$ °C) ansteigen müsste, bleibt festzustellen, dass hinsichtlich Verdunstung quasi die gleichen Wände (mit an die neuen Temperaturreandbedingungen angepasstem p_{sw}) als generell unkritisch betrachtet werden.

Dächer

Nach alten Randbedingungen liegt die Temperatur in der Ebene des Tauwasserausfalls im Bereich 12 °C < θ_k < 20 °C. Dementsprechend lässt sich für jede Stelle $s_{dk} > s_{dj}$ nur ein Bereich der nach innen diffundierenden Verdunstungsmasse $m_{w,v,i}$ angeben (s. Bild 23). Für den Grenzwert $\theta_k = 12$ °C ergibt sich die geringste Druckdifferenz für $p_{sw} - p_i$ und damit die kleinste innenseitige Diffusionsstromdichte. Die Werte für $m_{w,v,i}$ und $\max s_{de}$ entsprechen denen für Wände nach alten Randbedingungen. Steigt θ_k auf Werte $\theta_k \geq 13,90$ °C ($p_{sw} = 1589$ Pa) an, gelten Dachkonstruktionen nach alten Randbedingungen als generell unkritisch, da die gesamte Tauwassermasse während der Verdunstungsperiode nach innen diffundieren kann.

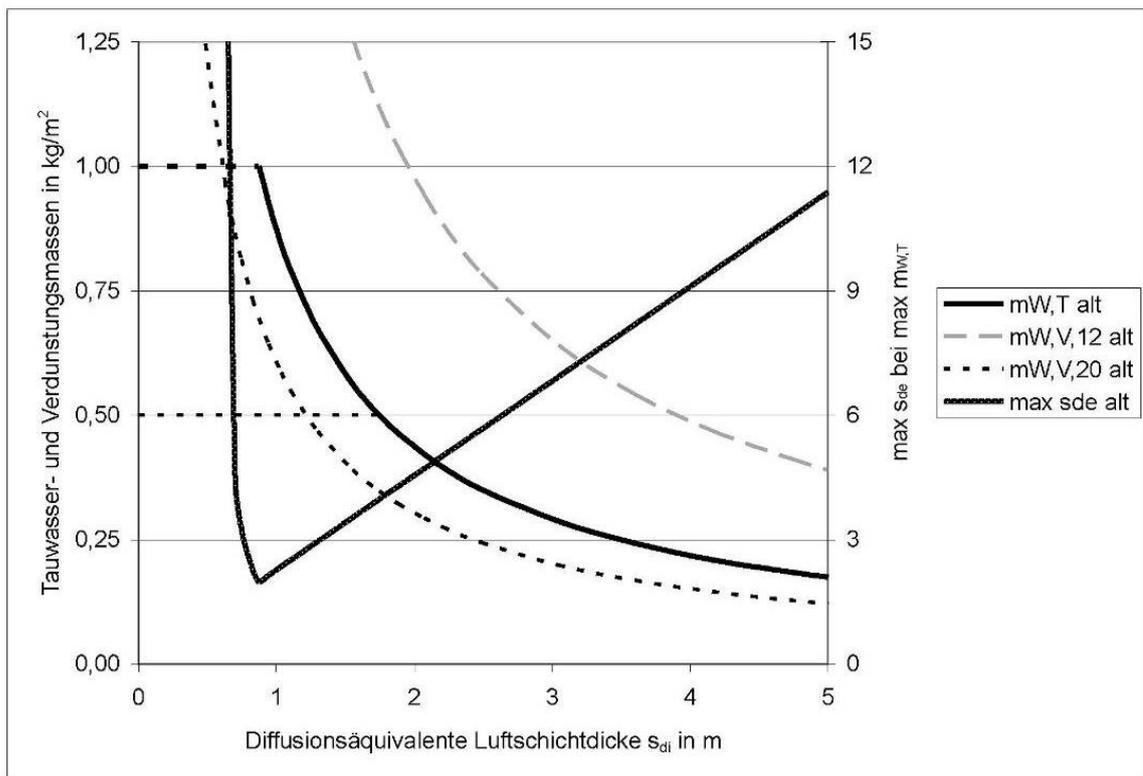


Bild 23: Spektrum der möglichen Verdunstungsmassen und die für 12°C höchstens zulässige außenseitige diffusionsäquivalente Luftschichtdicken $max\ s_{de}$ bei $p_{sw} = p_{sat,e}$ für Decken nach alten Randbedingungen für $zul\ m_{W,T} = 1\ kg/m^2$

In den neuen Randbedingungen wird vorgeschlagen, die Temperatur im Tauwasserbereich der Innentemperatur ($q_k = 18^\circ C$ mit $p_{sw} = 2063\ Pa$) gleichzusetzen. Da die Druckdifferenz $p_{sw} - p_i$ in der Verdunstungsperiode dann innen größer ist als in der Tauperiode $p_i - p_{sw}$ (bei $g_e \geq 0$, $t_T = t_V$, gleich bleibende s_{di}) und damit $m_{W,V,i} > max\ m_{W,T}$, kann gesagt werden, dass jedes Dach mit Tauwasserausfall in einer Ebene als unkritisch gesehen wird, sofern die zulässige Tauwassermasse nicht überschritten wird (siehe Bild 24).

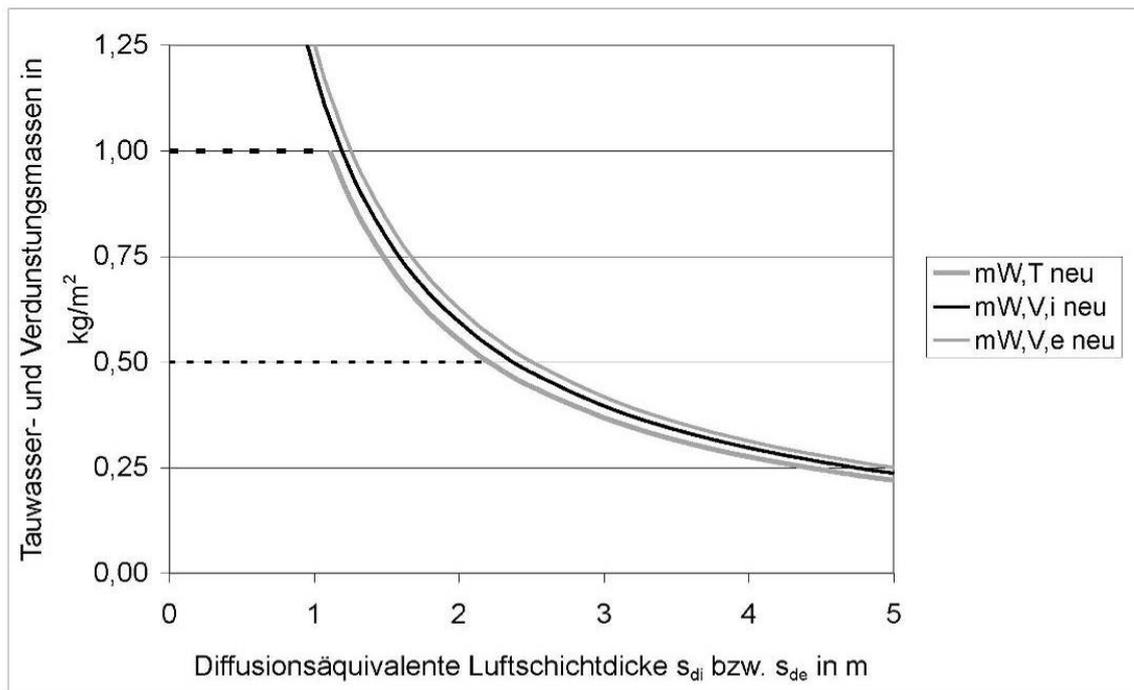


Bild 24: Nach innen und außen diffundierende Verdunstungsmassen bei $p_{sw} = p_{sat,e}$ für Decken nach neuen Randbedingungen

Fälle c und d des Tauwasserausfalls

Die für Fall b getroffenen Aussagen lassen sich prinzipiell auf die anderen Fälle des Tauwasserausfalls übertragen.

Fall c – Tauwasserausfall in zwei Ebenen

Die Sättigungsdampfdrücke $p_{sw,1}$ und $p_{sw,2}$ steigen, wie in Bild 17 und schematisch in Bild 25 dargestellt, um ca. 160 Pa an, p_e um 113 Pa. Damit wird nach neuen Randbedingungen g_i kleiner, g_z etwa in gleicher Größe und g_e größer als nach alten Randbedingungen. Die Tauwassermasse in der innen liegenden Ebene wird nach neuen Randbedingungen kleiner ab einer Temperatur von $\theta_{1,alt} = 1,25$ °C (s. Bild 20; nach Gleichung (11) ist $\theta_{1,neu} = 4,38$ °C) in der innen liegenden Ebene des Tauwasserausfalls.

Die Tauwassermasse in der außen liegenden Ebene des Tauwasserausfalls wird nach neuen Randbedingungen kleiner, da bei nahezu unverändertem g_z die nach außen diffundierende Wassermasse auf mehr als anderthalbfache ansteigt (s. Bild 20 mit $V_{mW,e} > 1,5$).

Da gleichzeitig die Verdunstungsmassen in Wänden nach innen und außen gegenüber den alten Randbedingungen ansteigen, kann gesagt werden, dass Wände, deren Temperatur in der innen liegenden Ebene des Tauwasserausfalls Werte nach alten Randbedingungen von 1,3 °C oder mehr annimmt, nach neuen Randbedingungen weniger kritisch betrachtet werden.

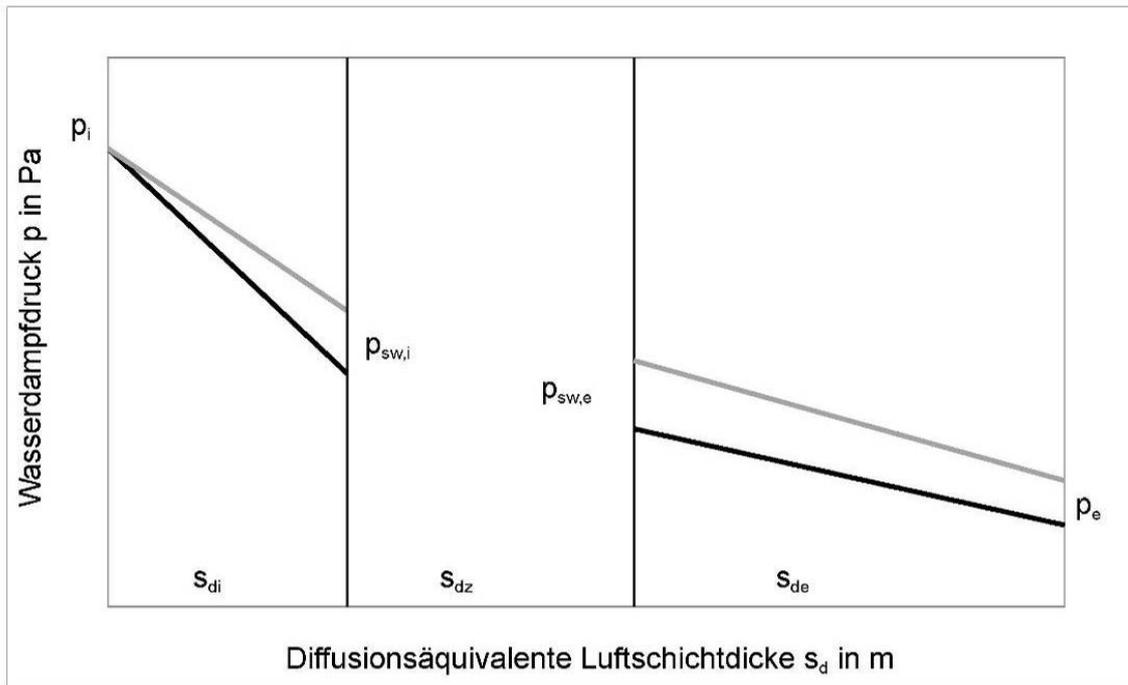


Bild 25: Schematische Darstellung der Dampfdruckverläufe für Tauwasserausfall in einer Ebene oder in einem Bereich bei verschiedenen Randbedingungen

In Analogie zur Betrachtung der Wände mit Tauwasserausfall in zwei Ebenen und der angegebenen kritischen Temperatur kann gesagt werden, dass Dächer nach neuen Randbedingungen dann eine größere Verdunstungsmasse aufweisen, wenn die Sättigungsdampfdrücke in den Ebenen des Tauwasserausfalls nach alten Randbedingungen $p_{sw,1} < 1808 \text{ Pa}$ (für 15,9 °C und Diffusion nach innen) und $p_{sw,2} < 1853 \text{ Pa}$ (für 16,3 °C und Diffusion nach außen) wären, die Ebenen des Tauwasserausfalls thermisch gesehen also nicht ganz außen liegen. In diesen Fällen wären Dächer unkritischer als nach alten Randbedingungen.

Fall d – Tauwasserausfall in einem Bereich

Die bereits getroffenen Aussagen zu den in das Bauteil hinein und aus dem Bauteil heraus diffundierenden Wassermassen gelten auch für Fall d. Ist $p_{\text{sw},1} > 669 \text{ Pa}$ (für $1,25 \text{ °C}$) nach alten Randbedingungen, fällt nach neuen Randbedingungen mit Sicherheit weniger Tauwasser aus. Wände sind dann wieder generell unkritischer als nach alten Randbedingungen, da gleichzeitig die nach neuen Randbedingungen von der Mitte des Bereichs des Tauwasserausfalls nach innen und nach außen verdunstenden Wassermassen größer sind (vgl. Bild 21 oben).

4. Exemplarische Berechnungen an Typkonstruktionen

Im Folgenden werden für die zugrunde gelegten Typkonstruktionen Ergebnisse aus stationären Diffusionsberechnungen mit alten und neuen Blockklima-Randbedingungen (Glaser-Verfahren) sowie mit Monatsmittelwerten (Euro-Glaser-Verfahren) und Ergebnisse aus instationären Simulationsrechnungen für dieselben Konstruktionen an unterschiedlichen Standorten vorgestellt.

4.1 Diffusionsrechnungen mit alten und neuen Blockklima-Randbedingungen

Mit Hilfe der in Abschnitt 2.4 entwickelten Typkonstruktionen für Wand- und Dachbauteile soll überprüft werden, ob diffusionstechnische Berechnungen mit "alten", "neuen" und "neuen vereinfachten" Blockklima-Randbedingungen (vgl. Tab. 1) zu den gleichen Beurteilungen hinsichtlich Tauwasserausfall und Verdunstungsverhalten für das Bauteil führen. Die Typkonstruktionen orientieren sich dabei zum einen an den Aufbauten, die nach DIN 4108-3:2001-07 als nicht nachweispflichtig gelten, also unkritisch sind. Zum anderen stellen sie Aufbauten dar, die nach heutigem Erkenntnisstand diffusionstechnisch als kritisch gelten. Damit soll gezeigt werden, ob ein kritisches oder unkritisches Verhalten mit den alten oder den neuen Randbedingungen in gleicher Weise festgestellt wird und demnach mit den bekannten Bewertungskriterien (nach 4108-3:2001-07) zu den gleichen Aussagen bezüglich Zulässigkeit oder Unzulässigkeit führt. Beabsichtigt war, dass dabei die Ergebnisse nach den neuen Randbedingungen tendenziell eher etwas schärfer ausfallen und somit Richtung sichere Seite tendieren sollten. Ergebnisse und Interpretationen werden nachfolgend angegeben.

4.1.1 Tabellarische und graphische Darstellungen der Temperatur- und Dampfdruckverteilungen in den Typkonstruktionen

Typkonstruktion 1

24 cm Kalksandsteinwand mit 4 cm Innendämmung

Spalte	1	2	4	5	6	7	Alte Randbedingungen	
							8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	20,0	2338
1	Innenputz	0,01429	35	0,50	0,7	0,020	17,3	1977
2	MF-Dämmung	0,04	1	0,04	0,04	1,000	16,9	1925
3	KS-Mauerwerk	0,24	25	6,00	0,99	0,242	-3,8	447
4	Mineral. Außenputz	0,02	10	0,20	1	0,020	-8,8	290
-	R_{se}					0,04	-9,2	280
			$\Sigma s_d =$	6,74	R_T	1,453	-10,0	260
						$m_{w,T} =$	1,247 kg/m ²	

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
20,0	2338
17,8	2034
17,4	1989
0,2	620
-4,0	439
-4,3	426
-5,0	402
$m_{w,T} =$	1,394 kg/m ²

Spalte	1	2	4	5	6	7	Alte Randbedingungen	
							8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	12,0	1404
1	Innenputz	0,01429	35	0,5	0,7	0,0204082	12,0	1404
2	MF-Dämmung	0,04	1	0,04	0,04	1	12,0	1404
3	KS-Mauerwerk	0,24	25	6	0,99	0,2424242	12,0	1404
4	Mineral. Außenputz	0,02	10	0,2	1	0,02	12,0	1404
-	R_{se}					0,04	12,0	1404
			$\Sigma s_d =$	6,74	R_T	1,453	12,0	1404
						$m_{w,V} =$	1,221 kg/m ²	

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
18,0	2064
17,7	2021
17,6	2014
15,0	1706
15,0	1706
15,0	1706
15,0	1706
15,0	1706
$m_{w,V} =$	1,366 kg/m ²

Die Berechnung mit den "neuen vereinfachten" Randbedingungen,

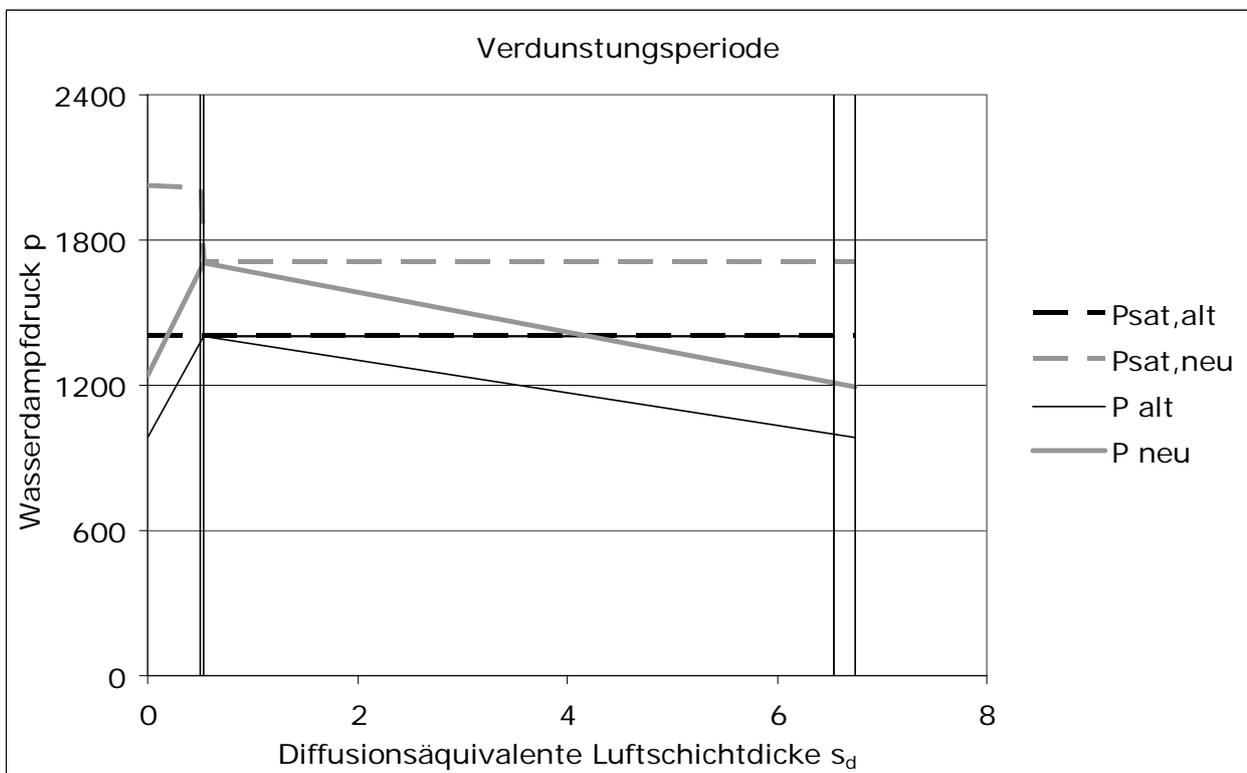
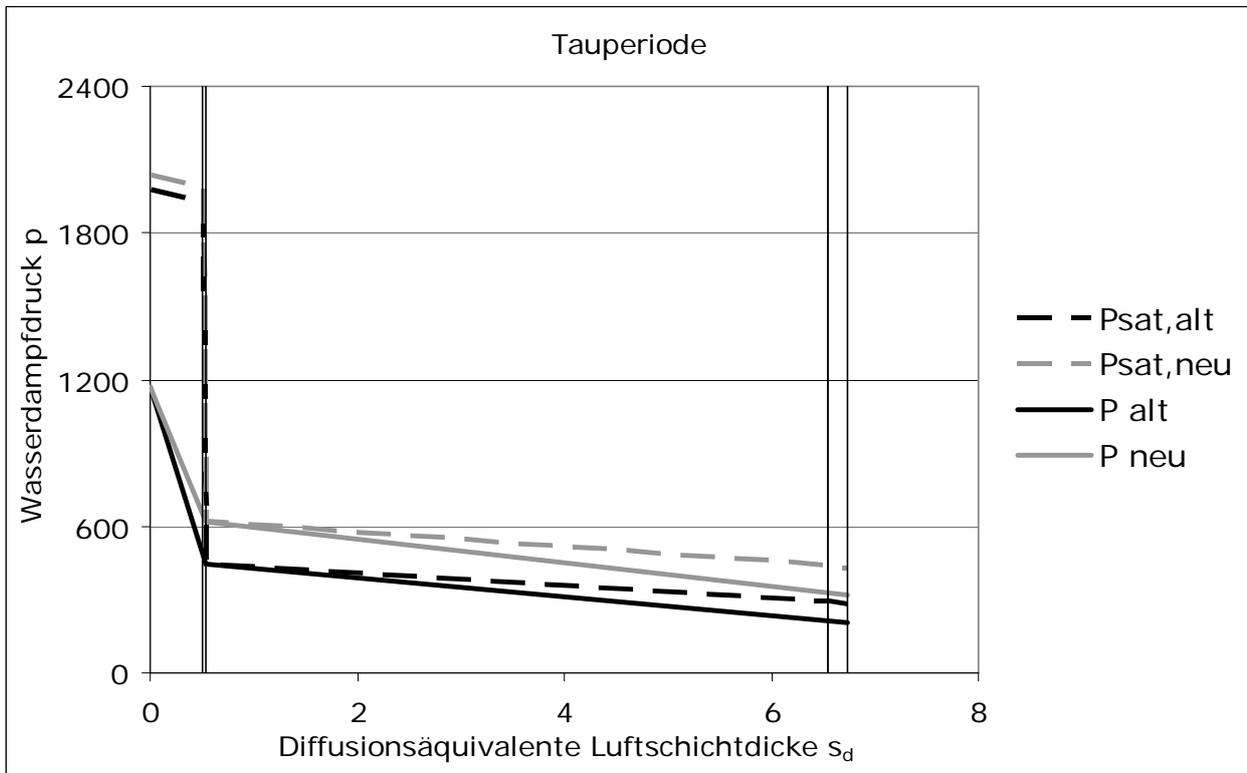
d. h. mit Wasserdampfteildrücken für die Verdunstungsperiode gerundet, vgl. Tab. 1, sowie mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$, generell für alle Bauteile gleich, ergibt:

$$m_T = 1,49 \text{ kg/m}^2$$

$$m_V = 1,50 \text{ kg/m}^2$$

Zu Typkonstruktion 1

24 cm Kalksandsteinwand mit 4 cm Innendämmung



Typkonstruktion 2

24 cm Kalksandsteinwand mit 4 cm Innendämmung und diffusionshemmendem Anstrich außen

Spalte	1	2	4	5	6	7	Alte Randbedingungen	
							8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	20,0	2338
1	Innenputz	0,01429	35	0,50	0,7	0,020	17,3	1973
2	MF-Dämmung	0,04	1	0,04	0,04	1,000	16,9	1920
3	KS-Mauerwerk	0,24	25	6,00	0,99	0,242	-4,1	435
4	Diffusionsh. Anstrich	0,001	100000	100,00	1	0,001	-9,1	280
-	R_{se}					0,04	-9,2	280
			$\Sigma s_d =$	106,54	R_T	1,434	-10,0	260
							$m_{w,T} =$	1,304 kg/m ²

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
20,0	2338
17,7	2030
17,4	1985
-0,1	609
-4,3	427
-4,3	427
-5,0	402
	$m_{w,T} =$
	1,491 kg/m ²

Spalte	1	2	4	5	6	7	Alte Randbedingungen	
							8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	12,0	1404
1	Innenputz	0,01429	35	0,5	0,7	0,020	12,0	1404
2	MF-Dämmung	0,04	1	0,04	0,04	1,000	12,0	1404
3	KS-Mauerwerk	0,24	25	6	0,99	0,242	12,0	1404
4	Diffusionsh. Anstrich	0,001	100000	100	1	0,001	12,0	1404
-	R_{se}					0,04	12,0	1404
			$\Sigma s_d =$	106,54	R_T	1,434	12,0	1404
							$m_{w,V} =$	0,177 kg/m ²

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
18,0	2064
17,7	2021
17,6	2014
15,0	1706
15,0	1706
15,0	1706
15,0	1706
	$m_{w,V} =$
	0,197 kg/m ²

Die Berechnung mit den "neuen vereinfachten" Randbedingungen,

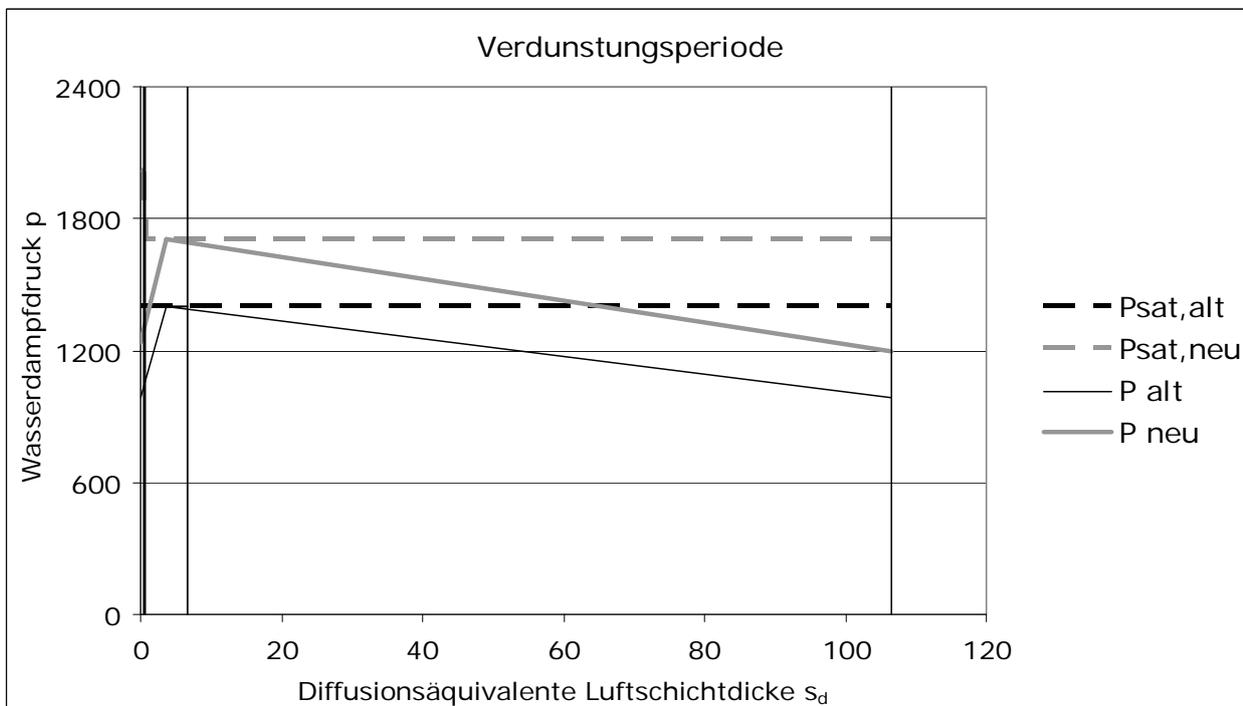
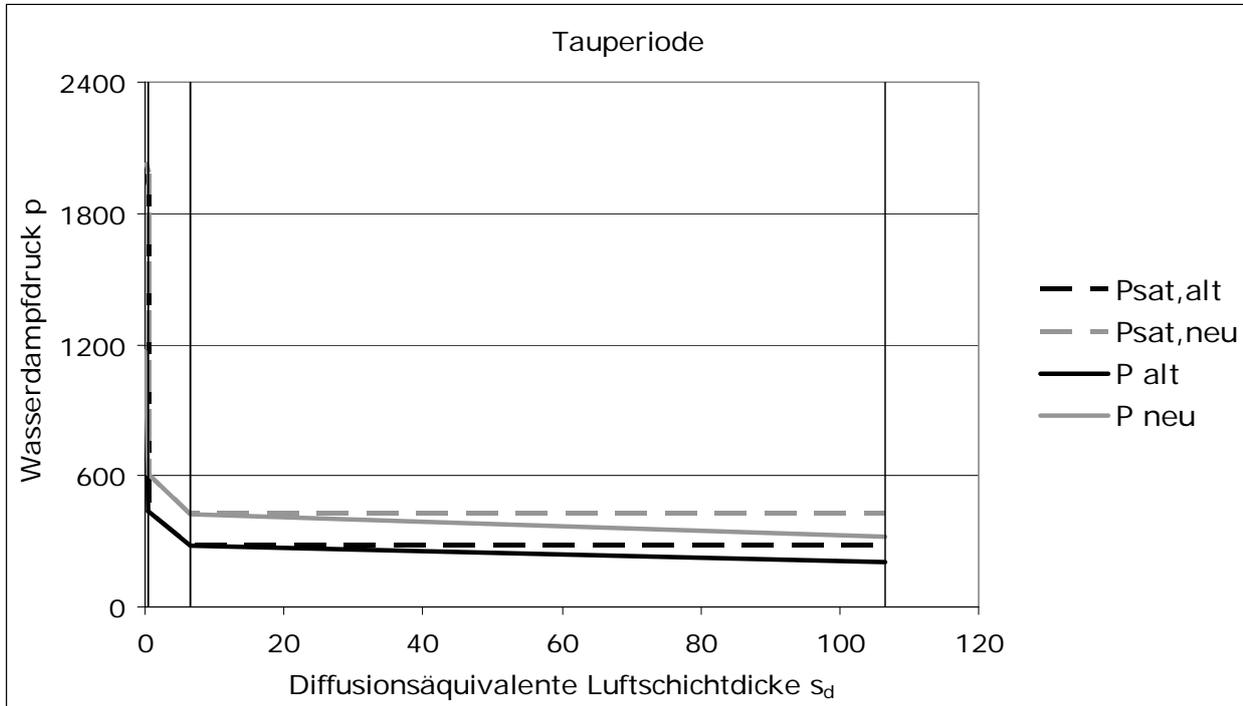
d. h. mit Wasserdampfteildrücken für die Verdunstungsperiode gerundet, vgl. Tab. 1, sowie mit $R_{si} = 0,25$ m²K/W und $R_{se} = 0,04$ m²K/W, generell für alle Bauteile gleich, ergibt:

$$m_T = 1,60 \text{ kg/m}^2$$

$$m_V = 0,23 \text{ kg/m}^2$$

Zu Typkonstruktion 2

24 cm Kalksandsteinwand mit 4 cm Innendämmung und diffusionshemmendem Anstrich außen



Typkonstruktion 3

24 cm Kalksandsteinwand mit 10 cm Innendämmung

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	20,0	2338
1	Innenputz	0,01	10	0,10	0,7	0,014	18,7	2154
2	MF-Dämmung	0,1	1	0,10	0,04	2,500	18,5	2134
3	KS-Mauerwerk	0,24	25	6,00	0,99	0,242	-6,9	341
4	Mineral. Außenputz	0,02	10	0,20	1	0,020	-9,4	274
-	R_{se}					0,04	-9,6	269
			$\Sigma s_d =$	6,40	R_T	2,947	-10,0	260
						$m_{w,T} =$	3,957	kg/m ²

		Neue Randbedingungen	
8	9	8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
20,0	2338	20,0	2338
18,9	2184	18,9	2184
18,8	2167	18,8	2167
-2,4	500	-2,4	500
-4,5	420	-4,5	420
-4,7	414	-4,7	414
-5,0	402	-5,0	402
		$m_{w,T} =$	4,778
			kg/m ²

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	12,0	1404
1	Innenputz	0,01	10	0,1	0,7	0,014	12,0	1404
2	MF-Dämmung	0,1	1	0,1	0,04	2,500	12,0	1404
3	KS-Mauerwerk	0,24	25	6	0,99	0,242	12,0	1404
4	Mineral. Außenputz	0,02	10	0,2	1	0,020	12,0	1404
-	R_{se}					0,04	12,0	1404
			$\Sigma s_d =$	6,40	R_T	2,947	12,0	1404
						$m_{w,V} =$	3,130	kg/m ²

		Neue Randbedingungen	
8	9	8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
18,0	2064	18,0	2064
17,9	2045	17,9	2045
17,8	2043	17,8	2043
15,0	1706	15,0	1706
15,0	1706	15,0	1706
15,0	1706	15,0	1706
15,0	1706	15,0	1706
		$m_{w,V} =$	3,486
			kg/m ²

Die Berechnung mit den "neuen vereinfachten" Randbedingungen,

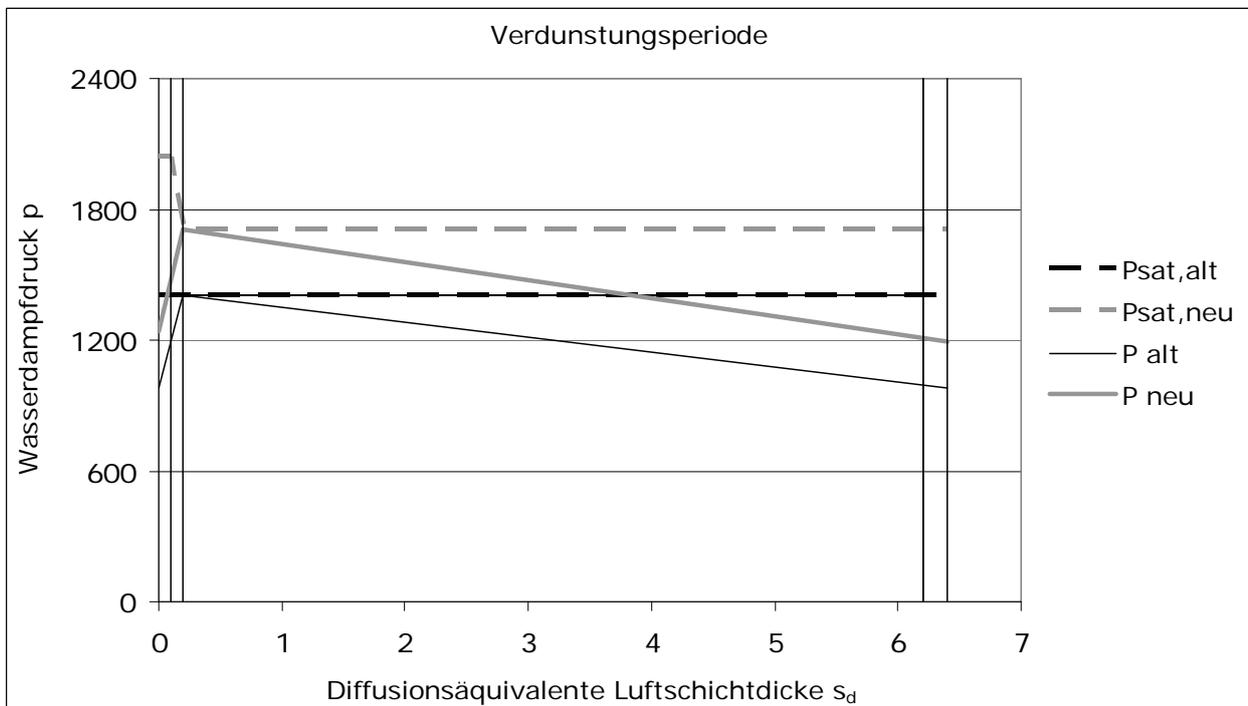
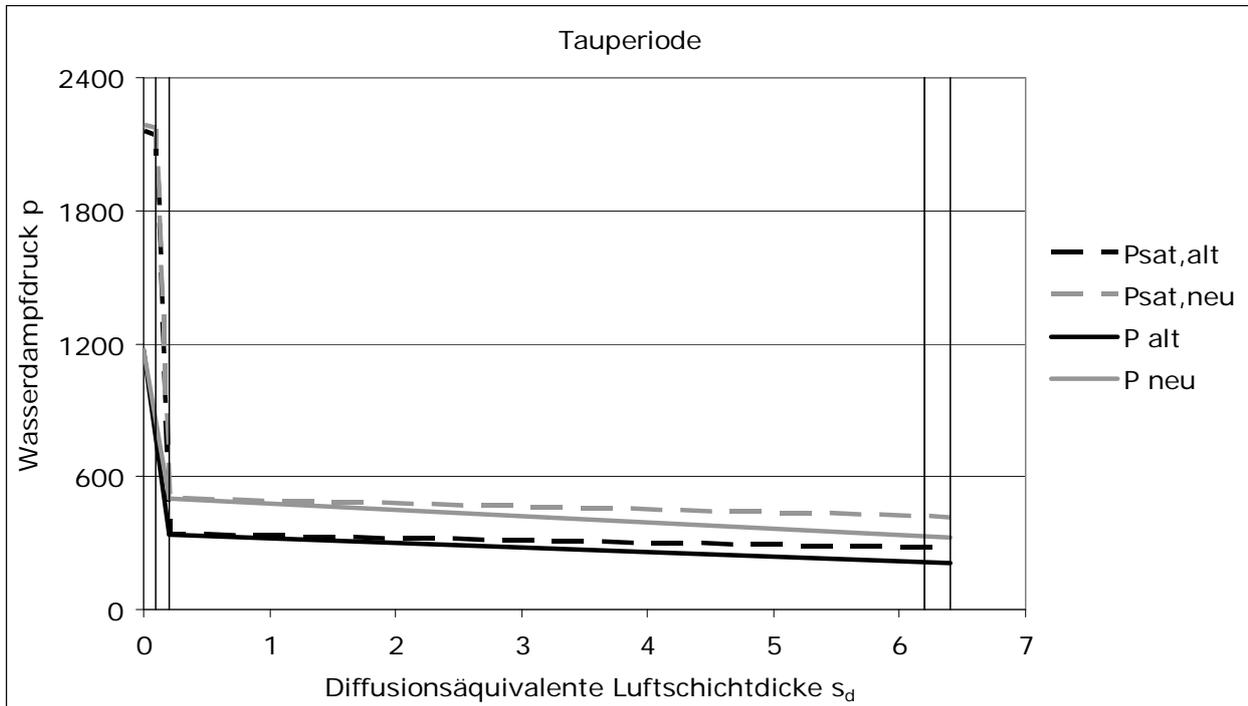
d. h. mit Wasserdampfteildrücken für die Verdunstungsperiode gerundet, vgl. Tab. 1, sowie mit $R_{si} = 0,25$ m²K/W und $R_{se} = 0,04$ m²K/W, generell für alle Bauteile gleich, ergibt:

$$m_T = 5,20 \text{ kg/m}^2$$

$$m_V = 4,01 \text{ kg/m}^2$$

Zu Typkonstruktion 3

24 cm Kalksandsteinwand mit 10 cm Innendämmung



Typkonstruktion 4

30 cm Porenbetonwand, beidseitig verputzt

Spalte	1	2	4	5	6	7	Alte Randbedingungen	
							8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	20,0	2338
1	Innenputz	0,01	10	0,10	0,7	0,014	18,2	2095
2	Porenbeton-Plansteine	0,3	5	1,50	0,15	2,000	18,0	2070
3	Außenputz	0,025	15	0,38	1	0,025	-9,1	281
-	R_{se}					0,04	-9,5	273
			$\Sigma s_d =$	1,98	R_T	2,209	-10,0	260
							$m_{w,T} =$	0,346 kg/m ²

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
20,0	2338
18,5	2134
18,4	2112
-4,3	428
-4,5	418
-5,0	402
	$m_{w,T} =$
	0,258 kg/m ²

Spalte	1	2	4	5	6	7	Alte Randbedingungen	
							8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,13	12,0	1404
1	Innenputz	0,01	10	0,1	0,7	0,014	12,0	1404
2	Porenbeton-Plansteine	0,3	5	1,5	0,15	2,000	12,0	1404
3	Außenputz	0,025	15	0,375	1	0,025	12,0	1404
-	R_{se}					0,04	12,0	1404
			$\Sigma s_d =$	1,98	R_T	2,209	12,0	1404
							$m_{w,V} =$	1,996 kg/m ²

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
18,0	2064
17,8	2041
17,8	2038
15,0	1706
15,0	1706
15,0	1706
	$m_{w,V} =$
	2,387 kg/m ²

Die Berechnung mit den "neuen vereinfachten" Randbedingungen,

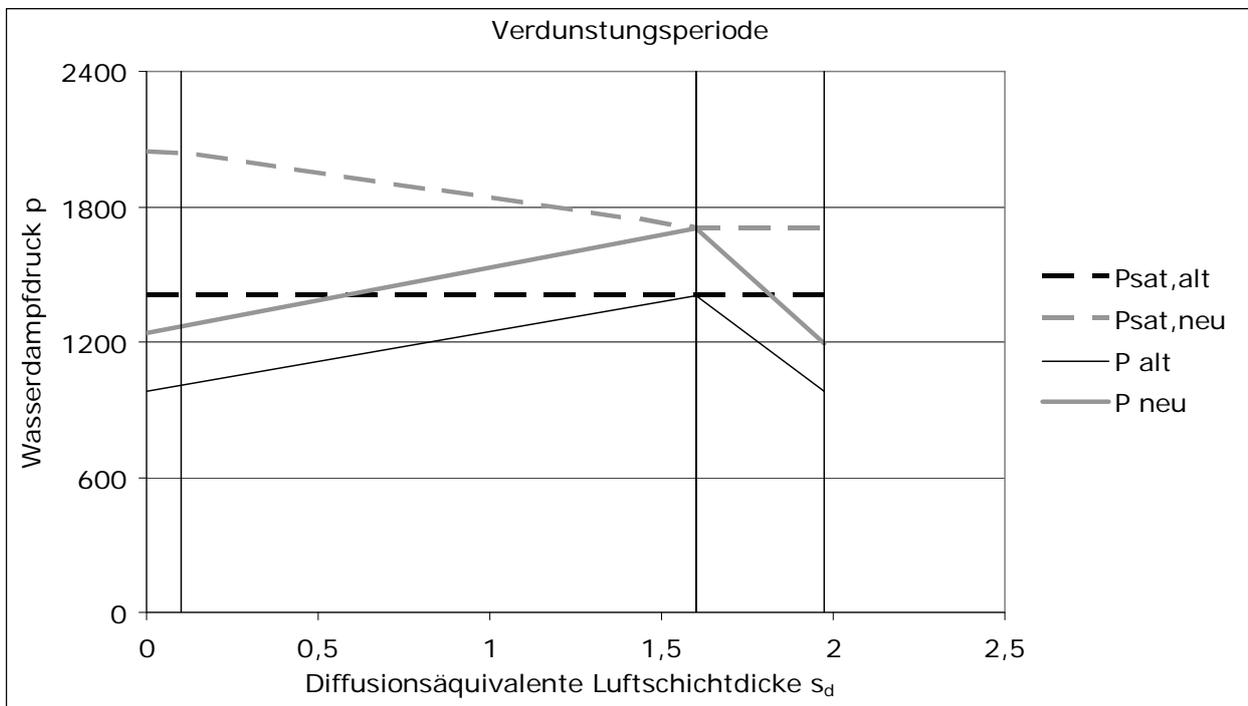
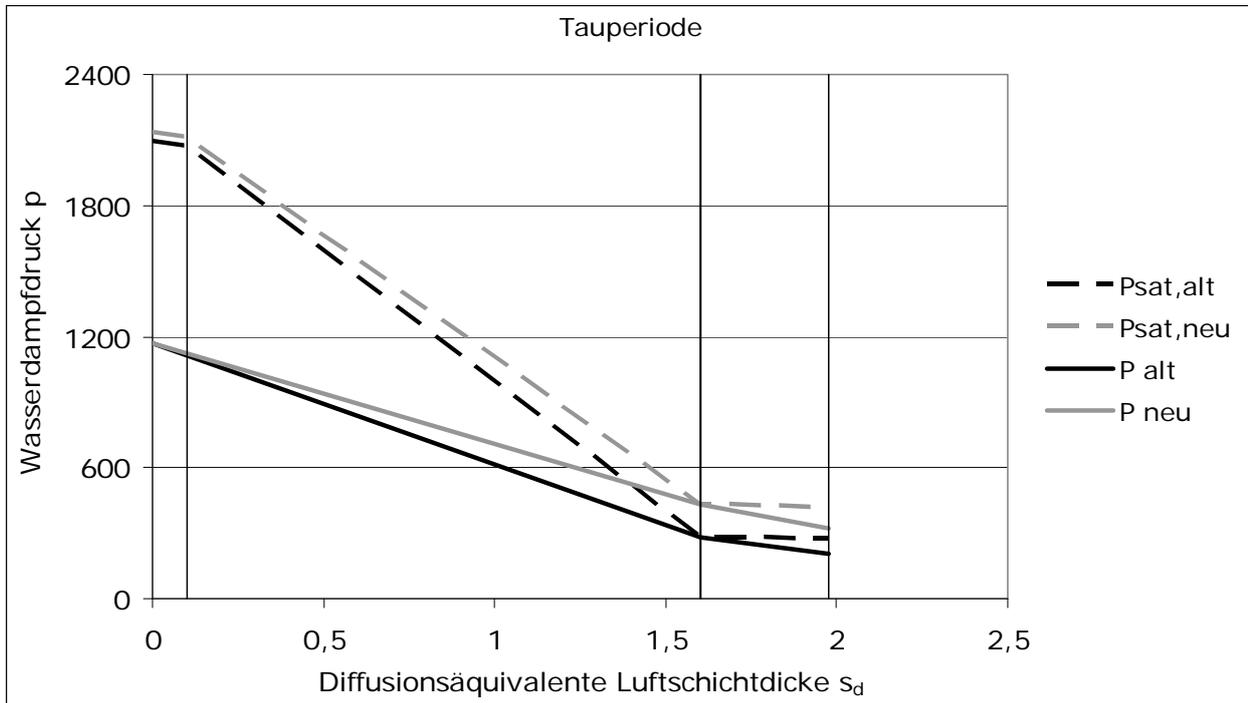
d. h. mit Wasserdampfteildrücken für die Verdunstungsperiode gerundet, vgl. Tab. 1, sowie mit $R_{si} = 0,25$ m²K/W und $R_{se} = 0,04$ m²K/W, generell für alle Bauteile gleich,

ergibt: $m_T = 0,29$ kg/m²

$m_V = 2,56$ kg/m²

Zu Typkonstruktion 4

30 cm Porenbetonwand, beidseitig verputzt



Typkonstruktion 5

Beton-Flachdach ohne Dampfbremse, mit 16 cm Dämmung und Dachabdichtung

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,10	20,0	2338
1	Innenputz	0,01	10	0,10	0,7	0,014	19,3	2240
2	Betontragschale	0,16	130	20,80	2,3	0,070	19,2	2226
3	MF-Dämmung	0,16	1	0,16	0,04	4,000	18,7	2161
4	Bitumenbahn	0,01875	80000	1500,00	0,17	0,110	-9,0	285
-	R_{se}					0,04	-9,7	266
			$\Sigma s_d =$	1521,06	R_T	4,334	-10,0	260
							$m_{wT} =$	0,040 kg/m ²

		Neue Randbedingungen	
8	9	8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
20,0	2338	20,0	2338
19,3	2240	19,4	2256
19,2	2226	19,3	2245
18,7	2161	18,9	2189
-9,0	285	-4,1	433
-9,7	266	-4,8	410
-10,0	260	-5,0	402
			$m_{wV} =$
			0,050 kg/m ²

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,10	12,0	1404
1	Innenputz	0,01	10	0,10	0,7	0,014	12,2	1421
2	Betontragschale	0,16	130	20,80	2,3	0,070	12,2	1423
3	MF-Dämmung	0,16	1	0,16	0,04	4,000	12,3	1435
4	Bitumenbahn	0,01875	80000	1500,00	0,17	0,110	19,7	2298
-	R_{se}					0,04	20,0	2338
			$\Sigma s_d =$	1521,06	R_T	4,334	12,0	1404
							$m_{wV} =$	0,091 kg/m ²

		Neue Randbedingungen	
8	9	8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
15,8	1796	15,0	1706
15,0	1706		
			$m_{wV} =$
			0,057 kg/m ²

Die Berechnung mit den "neuen vereinfachten" Randbedingungen,

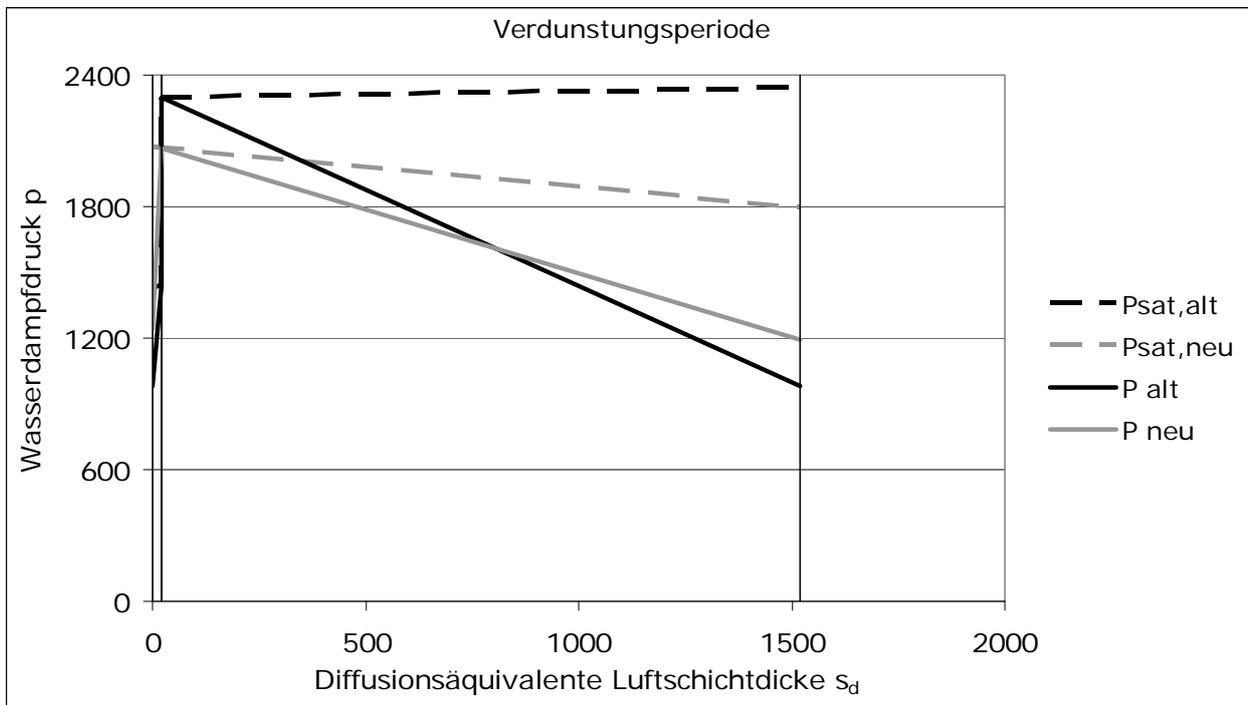
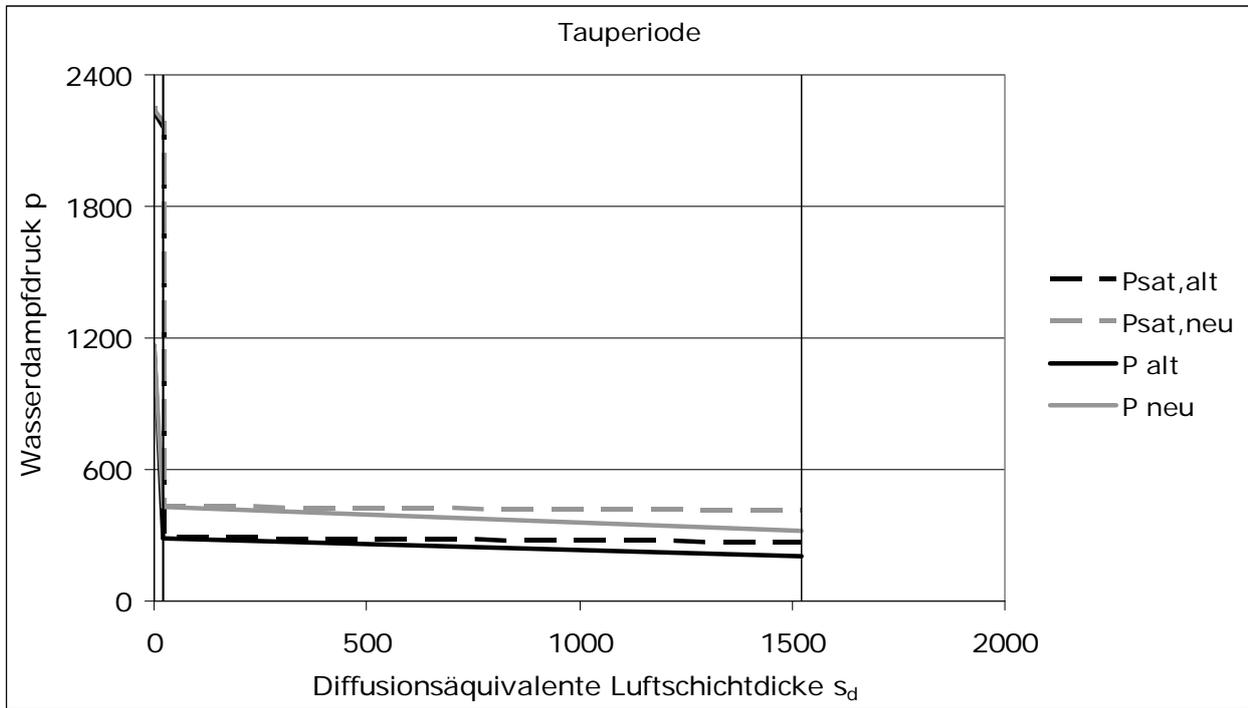
d. h. mit Wasserdampfteildrücken für die Verdunstungsperiode gerundet, vgl. Tab. 1, sowie mit $R_{si} = 0,25$ m²K/W und $R_{se} = 0,04$ m²K/W, generell für alle Bauteile gleich,

ergibt: $m_T = 0,05$ kg/m²

$m_V = 0,06$ kg/m²

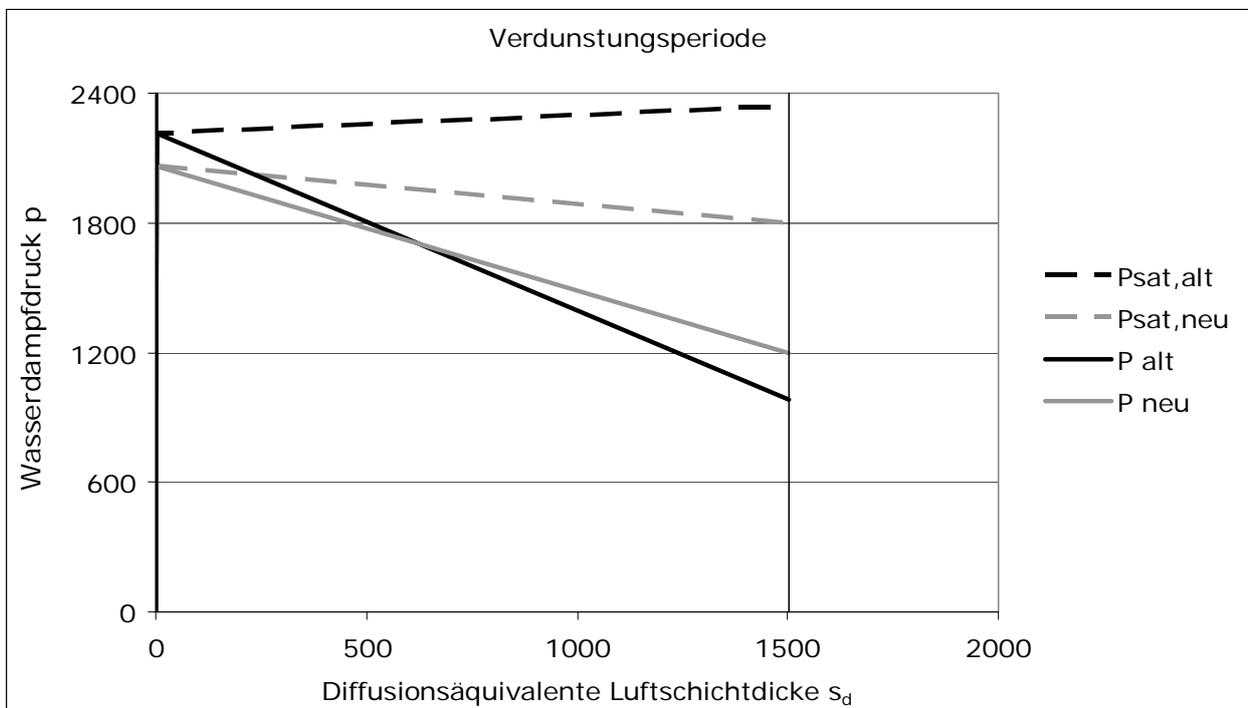
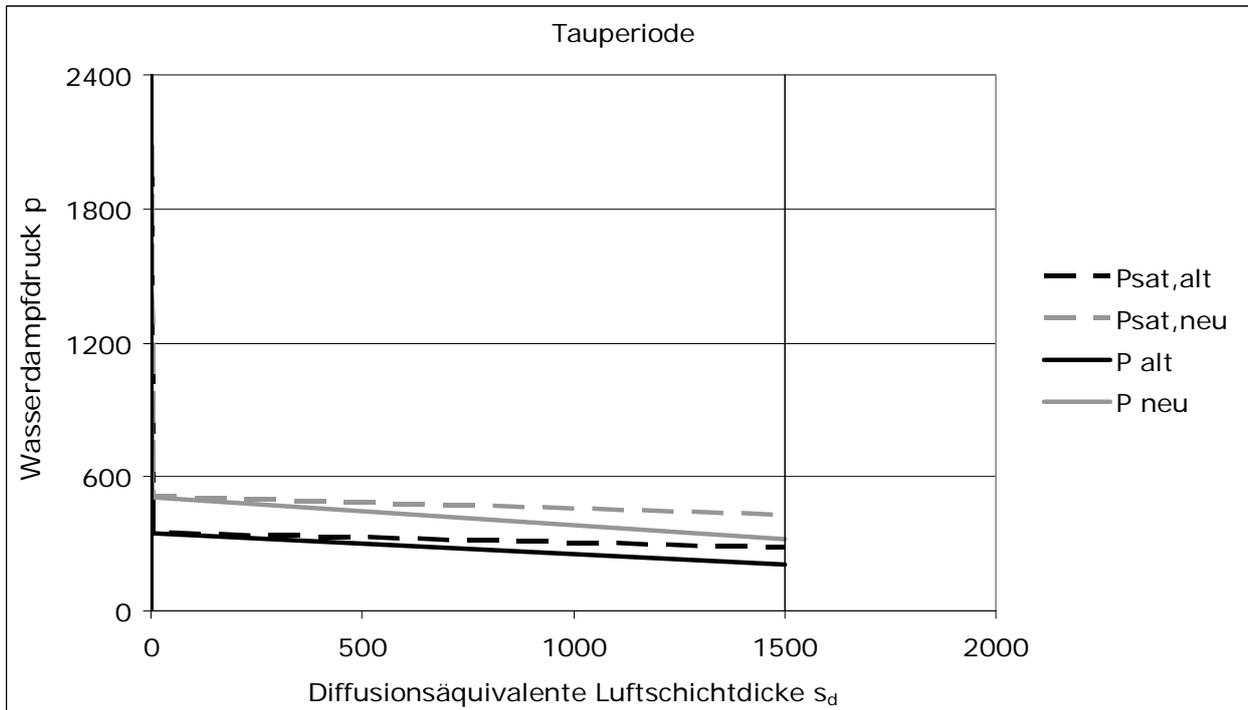
Zu Typkonstruktion 5

Beton-Flachdach ohne Dampfbremse, mit 16 cm Dämmung und Dachabdichtung



Zu Typkonstruktion 6

Porenbeton-Flachdach mit Dachabdichtung



Typkonstruktion 7

Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 8 cm unter / 16 cm über PE-Dampfbremse

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,10	20,0	2338
1	Gipskarton	0,0125	4	0,05	0,25	0,050	19,5	2272
2	Mineralfaserdämmung	0,08	1	0,08	0,035	2,286	19,3	2240
3	Alte Dampfbremse (PE)	0,0005	100000	50,00	0,23	0,002	8,7	1128
4	Zwischensparrendämmung	0,16	1	0,16	0,04	4,000	8,7	1127
5	Folie	0,00002	25000	0,50	0,17	0,000	-9,8	264
-	R_{se}					0,04	-9,8	264
			$\Sigma s_d =$	50,79	R_T	6,478	-10,0	260

$$m_{w,T} = 0,288 \text{ kg/m}^2$$

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
20,0	2338
19,6	2283
19,4	2256
10,6	1280
10,6	1279
-4,8	407
-4,8	407
-5,0	402

$$m_{w,T} = 0,000 \text{ kg/m}^2$$

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,10	12,0	1404
1	Gipskarton	0,0125	4	0,05	0,25	0,050	12,1	1415
2	Mineralfaserdämmung	0,08	1	0,08	0,035	2,286	12,2	1421
3	Alte Dampfbremse	0,0005	100000	50	0,23	0,002	15,0	1707
4	Zwischensparrendämmung	0,16	1	0,16	0,04	4,000	15,0	1707
5	Folie	0,00002	25000	0,5	0,17	0,000	20,0	2331
-	R_{se}					0,04	20,0	2338
			$\Sigma s_d =$	50,79	R_T	6,478	12,0	1404

$$m_{w,V} = 8,046 \text{ kg/m}^2$$

Neue Randbedingungen	
8	9
θ [°C]	p_{sat} [Pa]
18,0	2064
18,0	2064
18,0	2064
18,0	2064
18,0	2064
18,0	2064
18,0	2064
18,0	2064
15,0	1706

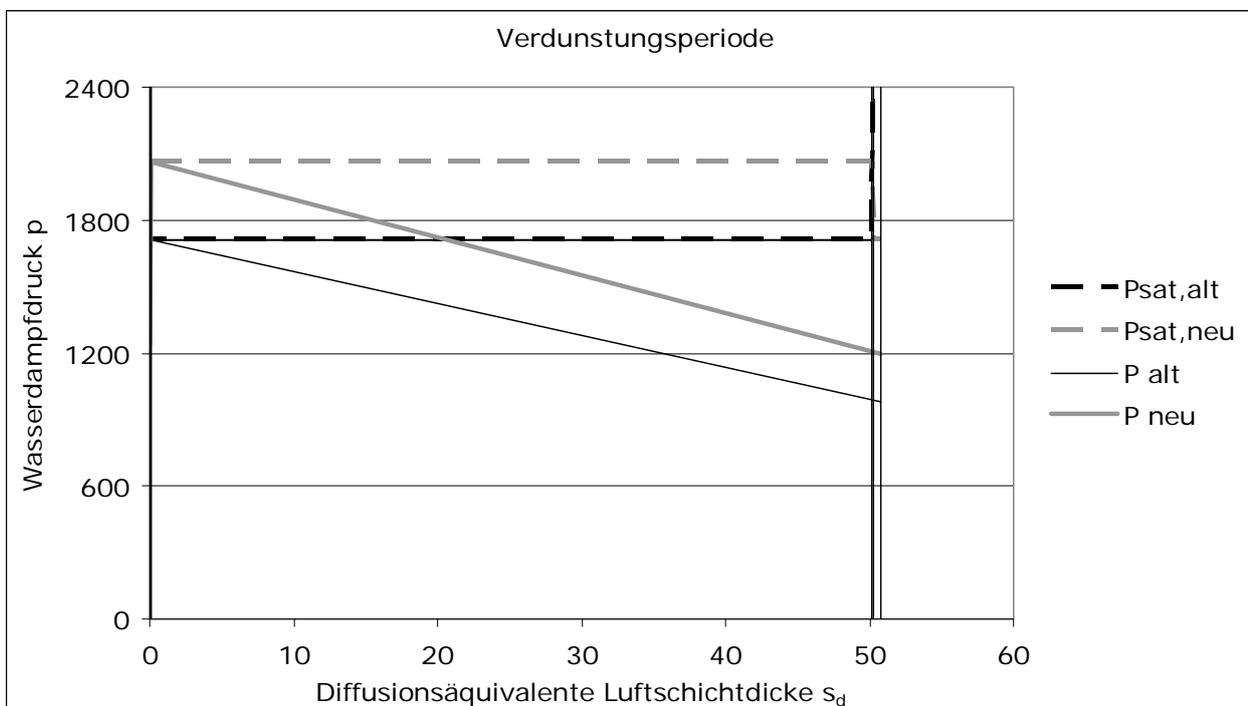
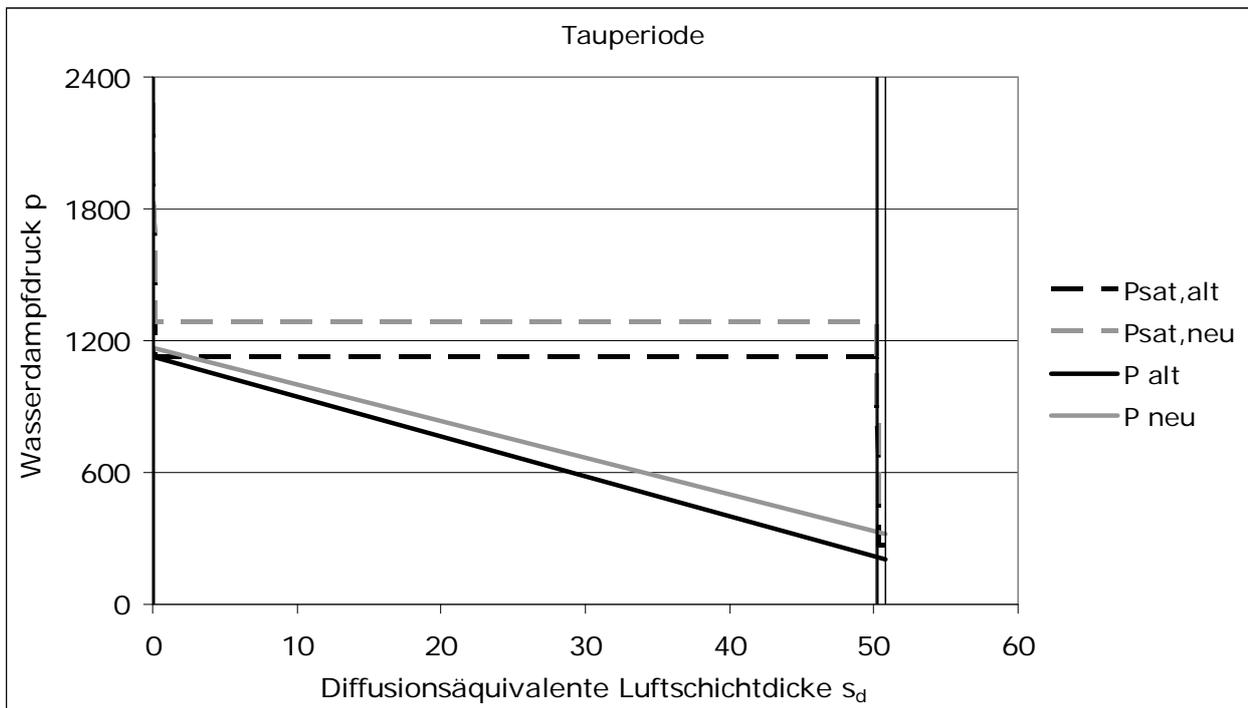
$$m_{w,V} = 10,835 \text{ kg/m}^2$$

Die Berechnung mit den "neuen vereinfachten" Randbedingungen,

d. h. mit Wasserdampfteildrücken für die Verdunstungsperiode gerundet, vgl. Tab. 1, sowie mit $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$, generell für alle Bauteile gleich, ergibt: **Kein Tauwasser**

Zu Typkonstruktion 7

Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 8 cm unter / 16 cm über PE-Dampfbremse



Typkonstruktion 8

Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 6 cm unter / 10 cm über PE-Dampfbremse

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,10	20,0	2338
1	Gipskarton	0,0125	4	0,05	0,25	0,050	19,3	2242
2	Mineralfaserdämmung	0,06	1	0,06	0,035	1,714	19,0	2195
3	Alte Dampfbremse (PE)	0,0005	100000	50,00	0,23	0,002	7,3	1024
4	Zwischensparrendämmung	0,1	1	0,10	0,04	2,500	7,3	1023
5	Folie	0,00002	25000	0,50	0,17	0,000	-9,7	266
-	R_{se}					0,04	-9,7	266
			$\Sigma s_d =$	50,71	R_T	4,407	-10,0	260
							$m_{v,T} =$	1,247 kg/m ²

		Neue Randbedingungen	
8	9	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
20,0	2338	20,0	2338
19,4	2257	19,4	2257
19,1	2218	19,1	2218
9,4	1183	9,4	1183
9,4	1182	9,4	1182
-4,8	410	-4,8	410
-4,8	410	-4,8	410
-5,0	402	-5,0	402
		$m_{v,T} =$	0,000 kg/m ²

							Alte Randbedingungen	
Spalte	1	2	4	5	6	7	8	9
Zeile	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
-	R_{si}					0,10	12,0	1404
1	Gipskarton	0,0125	4	0,05	0,25	0,050	12,2	1421
2	Mineralfaserdämmung	0,06	1	0,06	0,035	1,714	12,3	1429
3	Alte Dampfbremse	0,0005	100000	50	0,23	0,002	15,4	1749
4	Zwischensparrendämmung	0,1	1	0,1	0,04	2,500	15,4	1749
5	Folie	0,00002	25000	0,5	0,17	0,000	19,9	2328
-	R_{se}					0,04	20,0	2338
			$\Sigma s_d =$	50,71	R_T	4,407	12,0	1404
							$m_{v,V} =$	10,053 kg/m ²

		Neue Randbedingungen	
8	9	θ [°C]	p_{sat} [Pa]
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
18,0	2064	18,0	2064
15,0	1706	15,0	1706
		$m_{v,V} =$	10,835 kg/m ²

Die Berechnung mit den "neuen vereinfachten" Randbedingungen,

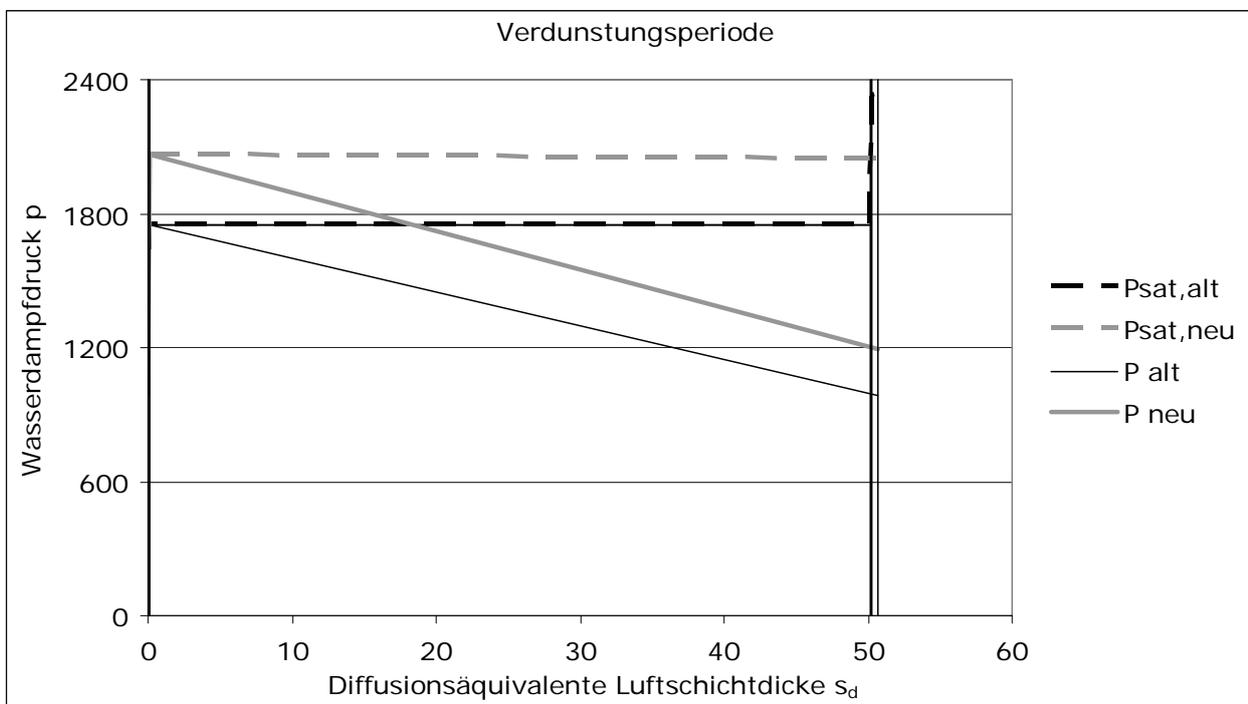
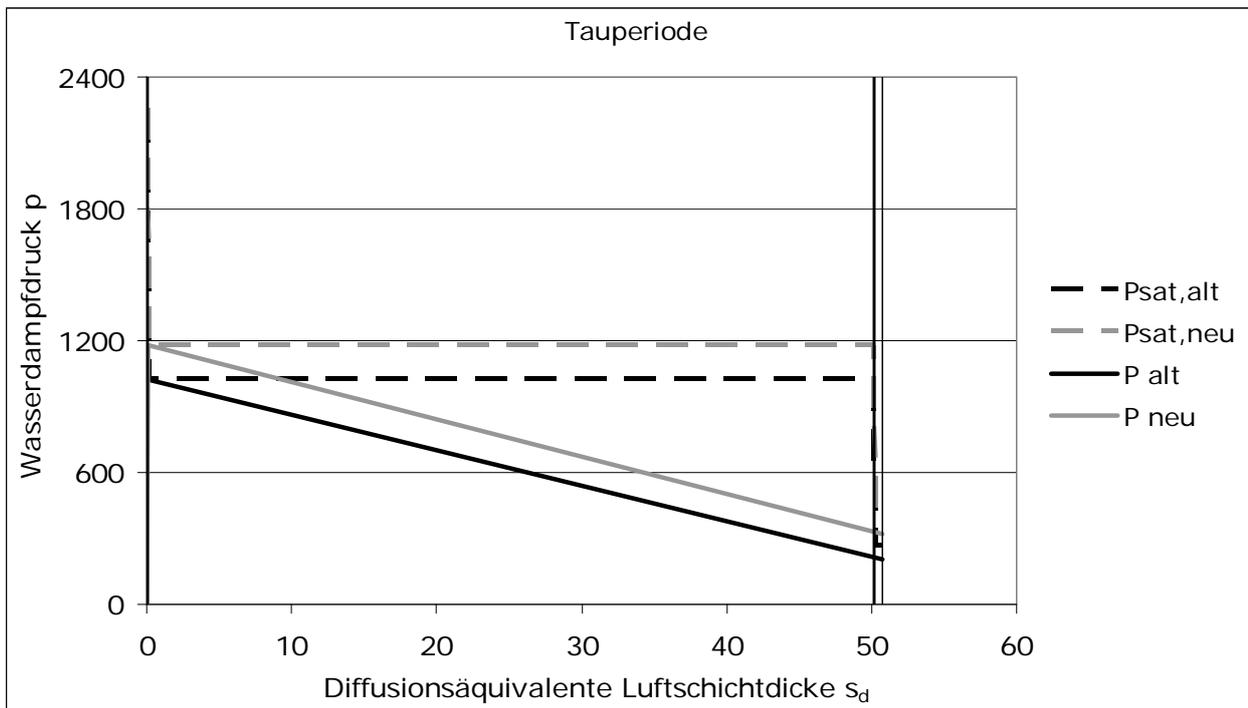
d. h. mit Wasserdampfteildrücken für die Verdunstungsperiode gerundet, vgl. Tab. 1, sowie mit $R_{si} = 0,25$ m²K/W und $R_{se} = 0,04$ m²K/W, generell für alle Bauteile gleich,

ergibt: $m_T = 0,30$ kg/m²

$m_V = 20,8$ kg/m²

Zu Typkonstruktion 8

Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 6 cm unter / 10 cm über PE-Dampfbremse



4.1.2 Analyse der Ergebnisse

Typkonstruktionen 1, 2 und 3

24 cm Kalksandsteinwand mit 4 cm Innendämmung (Typ 1) und Varianten mit diffusions-hemmendem Anstrich außen (Typ 2) bzw. 10 cm Innendämmung (Typ 3)

Nach alten wie nach neuen Randbedingungen fällt zuviel Tauwasser aus. Da die Ebene des Tauwasserausfalls jeweils nahe der Innenoberfläche liegt, nimmt die Tauwassermasse bei Vorhandensein eines außenseitigen diffusionshemmenden Anstriches nach alten (von 1,25 auf 1,30 kg/m²) wie nach neuen Randbedingungen (von 1,39 auf 1,49 bzw. von 1,49 auf 1,60 kg/m²) nur wenig zu. Allerdings stellt sich durch den Anstrich Tauwasserausfall in einem Bereich ein, was die rechnerische Verdunstungsmasse im Sommer wesentlich verringert. Für beide Konstruktionsvarianten nimmt die Verdunstungsmasse unter Ansatz der neuen Randbedingungen jeweils leicht zu. Die Variante ohne Anstrich trocknet weder nach alten noch nach neuen Randbedingungen vollständig aus, wobei die Verdunstungsmasse jeweils in der Größenordnung der zugehörigen Tauwassermasse liegt. Mit Anstrich sind beide Verdunstungsmassen viel zu gering.

Wird die Dicke der Innendämmung auf 10 cm vergrößert (ohne außenseitigen diffusionshemmenden Anstrich) und gleichzeitig ein noch diffusionsoffenerer Innenputz angebracht, so sinkt der Sättigungsdampfdruck außenseitig der Dämmung auf so kleine Werte, dass nach alten und nach neuen Randbedingungen unzulässig viel Tauwasser ausfällt.

Typkonstruktion 4

30 cm Porenbetonwand, beidseitig verputzt

Für ein Gesamt- s_d des Bauteils von 2 m liegt s_{dj} bei höchstens 1,5 m (nach neuen Randbedingungen und zul. $m_{W,T} = 0,5 \text{ kg/m}^2$). Da Tauwasser im vorliegenden Fall erst bei 1,6 m ausfällt, wird die zulässige Tauwassermasse in keinem Fall erreicht. Die berechneten Werte von 0,35 bzw. 0,26 und 0,29 kg/m² nach alten bzw. neuen Randbedingungen bestätigen dies.

Die Verdunstungsmasse ist nach neuen Randbedingungen etwa 20 bis 30 % größer als nach alten, was auf die größeren Druckunterschiede zwischen Tauwasserebene und den Oberflächen zurückzuführen ist.

Typkonstruktion 5

Beton-Flachdach ohne Dampfbremse, mit 16 cm Dämmung und Dachabdichtung

Aufgrund des hohen μ -Wertes für Beton und der außenseitigen Dämmung fällt der Sättigungsdampfdruck erst bei einem s_{di} von etwa 22 m auf sehr kleine Werte. Es stellt sich eine Ebene des Tauwasserausfalls ein, deren Lage sich weit außerhalb der hinsichtlich zulässiger Tauwassermasse von $0,5 \text{ kg/m}^2$ kritischen s_{di} -Werte von etwa 2,0 m befindet. Der Diffusionsstrom g_e wird bei $s_{de} = 1500 \text{ m}$ sehr klein. Deshalb liefert das in Bild 20 angegebene Verhältnis der in das Bauteil hineindiffundierenden Wassermassen von $1,25 \text{ kg/m}^2$ (bei $-9,0 \text{ °C}$ in der Ebene des Tauwasserausfalls nach alten Randbedingungen während der Tauperiode) näherungsweise auch die Größenordnungen, um die die Tauwassermasse nach neuen Randbedingungen ansteigt. Die Werte der Tauwassermasse liegen nach alten Randbedingungen bei $0,040 \text{ kg/m}^2$, nach neuen bei $0,050 \text{ kg/m}^2$ und bestätigen damit die Aussage zum Anstieg der Tauwassermasse. Während der Verdunstungsperiode wird auch bei diesem Flachdach die Verdunstungsmasse nach alten Randbedingungen aufgrund der hohen Temperatur in der Ebene des Tauwasserausfalls größer sein. Wie jedoch gezeigt wurde, kann nach neuen Randbedingungen die während der Tauperiode ausgefallene Tauwassermasse während der Verdunstungsperiode in jedem Fall vollständig nach innen diffundieren und damit das Bauteil vollständig austrocknen. Die Verdunstungsmasse nach innen ist dabei um theoretisch mindestens 8 % größer als die Tauwassermasse. Die vorhandene Verdunstungsmasse von $0,06 \text{ kg/m}^2$ ist etwas höher als dieser Mindestwert, was auf die geringfügige Verdunstung nach außen zurückzuführen ist. Die Verdunstungsmasse errechnet sich nach alten Randbedingungen wegen der erhöhten 20 °C – Oberflächenbedingung zu $0,091 \text{ kg/m}^2$. Das Bauteil ist also nach alten und neuen Randbedingungen unkritisch.

Typkonstruktion 6

Porenbeton-Flachdach mit Dachabdichtung

Das hier nachzuweisende Bauteil weist einen sehr großen Gesamt s_d -Wert auf. Tauwasser bildet sich auf der Außenseite der Porenbetonplatte unter der Dachhaut (bei $s_{di} = 2,10 \text{ m}$). Nach alten und nach neuen Randbedingungen liegen die Werte s_{dj} bei einer

zulässigen Tauwassermasse von $0,5 \text{ kg/m}^2$ bei $1,75 \text{ m}$ bzw. $2,21 \text{ m}$. Damit kann die zulässige Tauwassermasse nur nach neuen Randbedingungen überschritten werden. Die minimalen Sättigungsdampfdrücke von 260 Pa nach alten und etwa 440 Pa nach neuen Randbedingungen werden mit 347 Pa bzw. 508 Pa deutlich überschritten. Demnach erfüllt das Bauteil sowohl nach alten wie auch nach neuen Randbedingungen die Anforderung an die zulässige Tauwassermasse.

Für die Verdunstungsperiode wurde in den theoretischen Betrachtungen festgestellt, dass Dächer mit Temperaturen (während der Verdunstungsperiode nach alten Randbedingungen) in den Ebenen des Tauwasserausfalls von weniger als $15,9 \text{ °C}$ bzw. $16,3 \text{ °C}$ eine nach neuen Randbedingungen größere Verdunstungsmasse aufweisen. Im vorhandenen Beispiel liegt die Temperatur nach alten Randbedingungen in der Ebene des Tauwasserausfalls mit $19,1 \text{ °C}$ viel höher. Damit sind auch die Diffusionsströme nach innen und außen, respektive die Verdunstungsmassen nach alten Randbedingungen viel größer. Die berechneten Werte von $0,85 \text{ kg/m}^2$ nach alten und $0,57$ bzw. $0,59 \text{ kg/m}^2$ nach neuen Randbedingungen bestätigen wiederum die getroffenen Aussagen.

Das Porenbetonflachdach wird also nach neuen Randbedingungen sowohl in der Tau- als auch in der Verdunstungsperiode als kritischer eingestuft (Wegfall der 20 °C – Oberflächenbedingung). Die Verdunstungsmasse ist nach neuen Randbedingungen nur wenig größer als die Tauwassermasse.

Typkonstruktion 7

Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 8 cm unter / 16 cm über PE-Dampfbremse

Der Sättigungsdampfdruck an der Schichtgrenze zwischen nachträglich eingebauter unterseitiger Dämmung (mit einem Anteil am Wärmedurchlasswiderstand von 36%) und alter Dampfbremse sinkt bei $s_{di} = 0,13 \text{ m}$ auf 1128 Pa (für $8,7 \text{ °C}$) ab. Die Temperatur liegt oberhalb der $7,1 \text{ °C}$, die ja die Grenztemperatur bildeten, ab der nach der geänderten Außentemperatur nach neuen Randbedingungen kein Tauwasser mehr ausfallen kann (s. Bild 11). Für $s_{di} = 0,13 \text{ m}$ und zul. $m_{W,T} = 0,5 \text{ kg/m}^2$ liegt $\min p_{\text{sat}}$ nach alten Randbedingungen bei 1100 Pa . Die zulässige Tauwassermasse wird also nicht erreicht werden. Als Rechenergebnis werden $0,29 \text{ kg/m}^2$ ermittelt. Für die neuen Randbedingungen fällt, wie schon erwähnt, kein Tauwasser aus. Die Berechnung zum Verdunstungsfall (alt) liefert schließlich eine Verdunstungsmasse von $8,05 \text{ kg/m}^2$.

Noch größere Dämmschichtdicken einer nachträglichen Untersparrendämmung sind in der Praxis kaum zu erwarten. Deshalb soll noch eine (praxisnahe) Variante aufgezeigt werden, für die der Anteil des Wärmedurchlasswiderstandes unterhalb der alten Dampfsperre weiter ansteigt.

Typkonstruktion 8

Geneigtes Dach, unbelüftet, Dämmung 6 cm unter / 10 cm über PE-Dampfbremse

Der Anteil des Wärmedurchlasswiderstandes unterhalb der alten Dampfsperre liegt in diesem Beispiel bei 40 %. Die Temperatur in der Ebene des Tauwasserausfalls liegt jetzt bei 7,3°C (größer als der Grenzwert von 7,1°C). Folglich ist nach neuen Randbedingungen noch nicht mit Tauwasserausfall zu rechnen. Nach alten Randbedingungen wird jedoch die zulässige Tauwassermasse mit 1,25 kg/m² bereits überschritten! Die Verdunstungsmassen liegen nach alten Randbedingungen bei 10,1 kg/m² und nach neuen bei 10,8 kg/m², was hier aber weniger von Bedeutung ist.

Damit wird dieses Bauteil als einziges gänzlich verschieden bewertet.

Dies ist in der angehobenen Temperaturverteilung und damit im höheren Sättigungsdampfdruckniveau an der alten Dampfsperre begründet. Das heißt jedoch nicht, dass diese Konstruktionsvariante von bisher "völlig unzulässig" in der Bewertung nach neuen Randbedingungen nunmehr einfach so auf "unproblematisch" hochgestuft wird. Die realistischere Aussage scheint tatsächlich diejenige nach den neuen Randbedingungen zu sein, da dies in begleitend durchgeführten Simulationsrechnungen (siehe Abschnitt 4.3) ebenfalls so bestätigt wird. Bei diesem Konstruktionstyp sollten jedoch erweiterte Prüfkriterien, wie z.B. Risiko der Schimmelbildung, festgelegt werden.

Für dieses Beispiel wurden außerdem Tauwassermassen nach dem sogenannten Euro-Glaser-Verfahren nach EN ISO 13788 unter Ansatz der dort im Anhang C angegebenen Randbedingungen und monatlicher Klimadatensätze für Hof und Karlsruhe berechnet. Nach den Randbedingungen aus EN ISO 13788 käme es zu keinem Tauwasserausfall, wohingegen beim Klima Hof 1,02 kg/m² und beim Klima Karlsruhe 0,44 kg/m² Tauwasser ausfallen würden. Dies erlaubt allerdings auch keine definitive Aussage.

4.2 "Euro-Glaser" - Berechnungen mit monatlichen Mittelwerten

Tabelle 3: Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur und der Außenluftfeuchte für die Standorte Hof und Karlsruhe (besonders ungünstige Jahre: 1962 und 1963)

Monatsmittel Außenluft		Hof		Karlsruhe	
		Temperatur [° C]	rel. Feuchte [%]	Temperatur [° C]	rel. Feuchte [%]
1962	Januar	- 0,9	86	3,4	80
	Februar	- 2,4	86	2,2	75
	März	- 2,0	84	2,9	73
	April	6,4	79	10,4	66
	Mai	8,7	79	12,6	70
	Juni	13,3	70	17,9	59
	Juli	15,1	76	19,2	65
	August	14,6	75	19,2	64
	September	11,2	79	14,7	77
	Oktober	6,1	82	8,6	81
	November	- 0,5	87	1,9	85
	Dezember	- 5,3	75	- 1,4	71
1963	Januar	- 9,6	87	- 5,3	84
	Februar	- 8,4	82	- 5,0	81
	März	1,3	81	5,6	75
	April	7,5	77	11,7	69
	Mai	11,1	76	14,6	65
	Juni	15,3	78	18,3	70
	Juli	17,2	73	21,4	61
	August	14,1	81	17,3	75
	September	11,8	83	15,4	77
	Oktober	6,4	83	8,7	83
	November	4,8	88	8,1	83
	Dezember	- 5,4	75	- 2,3	73

Die folgenden Rechnungen stellen einen Vergleich verschiedener Ansätze zur Bestimmung von Tauwasserausfall dar:

- a) Glaser-Rechnung mit Block-Randbedingungen nach DIN 4108,
- b) Euro-Glaser-Rechnung für Beispiel-Randbedingungen nach DIN EN ISO 13788
- c) Euro-Glaser-Rechnung für Standort-Randbedingungen Hof
- d) Euro-Glaser-Rechnung für Standort-Randbedingungen Karlsruhe.

Die oben aufgeführten Berechnungsansätze und Standorte wurden exemplarisch auf die Typkonstruktion 8 angewendet.

Bauteil

Konstruktion: Steildach mit Zw.-sp.-dä. u. nachtr. Untersp.-dä. RB Euro-Glaser						
Gewerk, Bauteil: Steildach, Kombination aus Zwischen- und Untersparrendämmung						
Verwendung: Dachfläche (Steildach nichtbelüftet) (DIN 4108-6, Mehrzonen nach EN 83)						
Nr.	Schicht/Material (von innen nach außen)	Dicke [m]	λ [W/mK]	μ [-]	sd [m]	U-Wert relevant
1	DIN EN 12524 Gipskartonplatten 900	0,0125	0,25	4	0,05	ja
2	DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0338 Kategori	0,06	0,035	1	0,06	ja
3	polyethylene foil	0,0005	0,23	100000	50	ja
4	DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0385 Kategori	0,1	0,04	1	0,1	ja
5	Diffusionsoffene Folie	0,00002	0,2		0,5	ja

a) Block-Randbedingungen nach DIN 4108-3

Ergebnisse der letzten Rechnung

Glaser DIN 4108 Teil 3: Max. Wassergehalt [kg/m²]

Schicht/Material (von innen nach außen)	Schichtgrenze links	Schichtgrenze rechts	Innen
DIN EN 12524 Gipskartonplatten 900	----	----	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0338 Kat	1,3375	----	----
polyethylene foil	----	1,3375	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0385 Kat	----	----	----
Diffusionsoffene Folie	----	----	----

b) Euro-Glaser für Beispiel-Randbedingungen nach DIN EN ISO 13788

Glaser EN: Max. Wassergehalt [kg/m²]

Schicht/Material (von innen nach außen)	Schichtgrenze links	Schichtgrenze rechts	Innen
DIN EN 12524 Gipskartonplatten 900	----	----	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0338 Kat	----	----	----
polyethylene foil	----	----	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0385 Kat	----	----	----
Diffusionsoffene Folie	----	----	----

c) Euro-Glaser-Rechnung für Standort-Randbedingungen Hof

Ergebnisse der letzten Rechnung

Glaser EN: Max. Wassergehalt [kg/m²]

Schicht/Material (von innen nach außen)	Schichtgrenze links	Schichtgrenze rechts	Innen
DIN EN 12524 Gipskartonplatten 900	----	----	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0338 Kat	1,0216	----	----
polyethylene foil	----	1,0216	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0385 Kat	----	----	----
Diffusionsoffene Folie	----	----	----

d) Euro-Glaser-Rechnung für Standort-Randbedingungen Karlsruhe

Ergebnisse der letzten Rechnung

Glaser EN: Max. Wassergehalt [kg/m²]

Schicht/Material (von innen nach außen)	Schichtgrenze links	Schichtgrenze rechts	Innen
DIN EN 12524 Gipskartonplatten 900	----	----	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0338 Kat	0,4386	----	----
polyethylene foil	----	0,4386	----
DIN V 4108 5.1 Mineralwolle GW 0,0385 Kat	----	----	----
Diffusionsoffene Folie	----	----	----

Die Ergebnisse aus den vier Vergleichsrechnungen hinsichtlich Tauwasserakkumulation, Verdunstung, Standorteinflüsse sind mit den vorherigen Ergebnissen aus den Glaser-Berechnungen mit Blockklima-Randbedingungen (incl. Sicherheitspuffer) bezüglich einer allgemeingültigen Aussage kaum vergleichbar. Es kann danach auch nicht eindeutig auf eine Zulässigkeit oder Unzulässigkeit der betrachteten Konstruktion geschlossen werden. Hier ist der Klimadatensatz des gewählten Standortes maßgebend. Das wiederum hat den Ergebnis-Charakter einer Simulationsrechnung. Das zugrunde liegende Modell des "Euro-Glaser"-Verfahrens ist jedoch auch nur ein reines Diffusionsmodell, das stationär für wiederholte Monatsbilanzierungen angewandt wird, und den Anspruch einer realitätsnahen Simulation (wie z.B. bei WUFI oder DELPHIN) so nicht erfüllen kann. Es werden alle Temperaturschwankungen pro Monat unterdrückt, die ja bekanntlich einen deutlich nichtlinearen Einfluss auf den Sättigungsdampfdruck haben, so dass reine Monatsmitteltemperaturen bei üblichen Klimaverhältnissen für eine Feuchtebetrachtung wenig geeignet sind. Das Ausschalten von Feuchtespeichereffekten (Sorptions) in der Konstruktion und das - bei Leichtkonstruktionen manchmal vielleicht noch tolerierbare - Ausschalten von Flüssigtransporteffekten unterdrückt deren Einflüsse, was bei gewolltem Heranziehen eines realen monatlich veränderlichen Jahresganges für Temperatur und Luftfeuchte zu nicht kalkulierbaren Unsicherheiten führt.

Es stellt sich die Frage: Warum dann nicht gleich ein nach heutigem Standard durchaus gut handhabbares und verifiziertes echtes Simulationsverfahren einsetzen?

Genormte Leistungsspezifikationen und Qualitätsanforderungen für solche Verfahren liegen ja bereits vor (siehe DIN EN 15026).

4.3 Simulationsrechnungen mit realen Klimadatensätzen

Standortwahl für die Simulationsrechnungen

Um die diffusionstechnischen Untersuchungen mit den neuen Klimarandbedingungen an Typkonstruktionen zu validieren, erscheint es zweckmäßig, deren Ergebnisse auch unter Verwendung realer Datensätze für Außenlufttemperaturen und Luftfeuchten durch rechnerische Simulationen zu belegen. Eine solche Vorgehensweise setzt jedoch voraus, dass Datensätze für entsprechende Referenzklima-Standorte bzw. Klimaregionen mit Referenzstandorten zur Berechnung des Feuchteverhaltens in Bauteilen existieren. Da dies bislang in geeigneter Form nicht der Fall ist, wurde der Auswahl repräsentativer Daten folgende Überlegung zugrunde gelegt:

Die Wassermenge, die sich in einem Bauteil ansammelt bzw. verteilt, ist real auf drei Vorgänge zurückzuführen: Diffusion, Sorption und Kapillarität. Schließt man Regeneinwirkungen aus, so wird das Feuchtegeschehen im Bauteil durch die an den Oberflächen ein- und ausdiffundierenden Wasserdampfströme sowie durch die vorliegenden Stoffeigenschaften der Materialien im Bauteil bestimmt. Je intensiver die Unterschiede für ein- und ausdiffundierende Massenströme sind, umso intensiver können im Inneren des Bauteils Feuchteanreicherungen bzw. –bewegungen entsprechend den vorliegenden Eigenschaften stattfinden. Da die Dampfdruckdifferenz das treibende Potenzial für die Wasserdampfdiffusion darstellt, wobei der Dampfdruck durch Temperatur und relative Luftfeuchte bestimmt wird, geht man davon aus, dass die Differenz der Wasserdampfdrücke an den Bauteiloberflächen maßgebend für die Intensität des Feuchtegeschehens im Bauteil ist. D. h., je höher das Wasserdampfdruckgefälle zwischen innen und außen ist, umso größer ist der Wasserdampfstrom in ein Bauteil hinein bzw. durch es hindurch. Je kleiner die Differenz der Dampfdrücke ist, umso geringer ist die Wasserdampfbewegung. Extremale Standorte für die Simulationsrechnungen werden nach diesen Gesichtspunkten ausgewählt.

Umfang der Simulationsrechnungen

Zur Abschätzung der Plausibilität der Ergebnisse aus vereinfachten Diffusions-Untersuchungen bezüglich Tauwasserfreiheit in Bauteilen erfolgen Berechnungen der Temperatur- und Feuchteverteilungen in den acht Typkonstruktionen unter Verwendung des Software-Pakets WUFI, einem Rechenprogramm für instationäre Feuchtetransportvorgänge in mehrschichtigen Bauteilen. Wie schon in Abschnitt 2 dargelegt, werden damit

realitätsnah Vorgänge des Feuchtetransports und der Feuchtespeicherung in Bauteilen unter Berücksichtigung von Sorption, Diffusion und Kapillarität beschrieben.

Da das stationäre Glaser-Verfahren in der Berechnung so genannt Blockklima-Datensätze, also konstante Werte für Temperatur und Feuchte verwendet, war auch der Frage nachzugehen, wie weit die Ergebnisse aus instationären Berechnungen mit Stundenwerten zu Abweichungen führen und ob die letztlichen Beurteilungsaussagen in die gleiche Richtung gehen. Dabei werden die instationären Berechnungen jeweils über einen ausgewählten Zeitraum von 20 Jahren durchgeführt, um einen möglichst repräsentativen Zyklus je Standort voraussetzen zu können.

Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt eine Zusammenstellung der durchzuführenden Simulationsrechnungen für die acht Typkonstruktionen, für zwei typische Standorte, mit Stundenmittelwerten und zum Vergleich einmal mit konstanten Monats(mittel)werten, um eventuelle Auswirkungen bei unterdrückten stündlichen Änderungen der Randbedingungen zu sehen.

Tabelle 4: Zusammenstellung der WUFI - Berechnungsvarianten

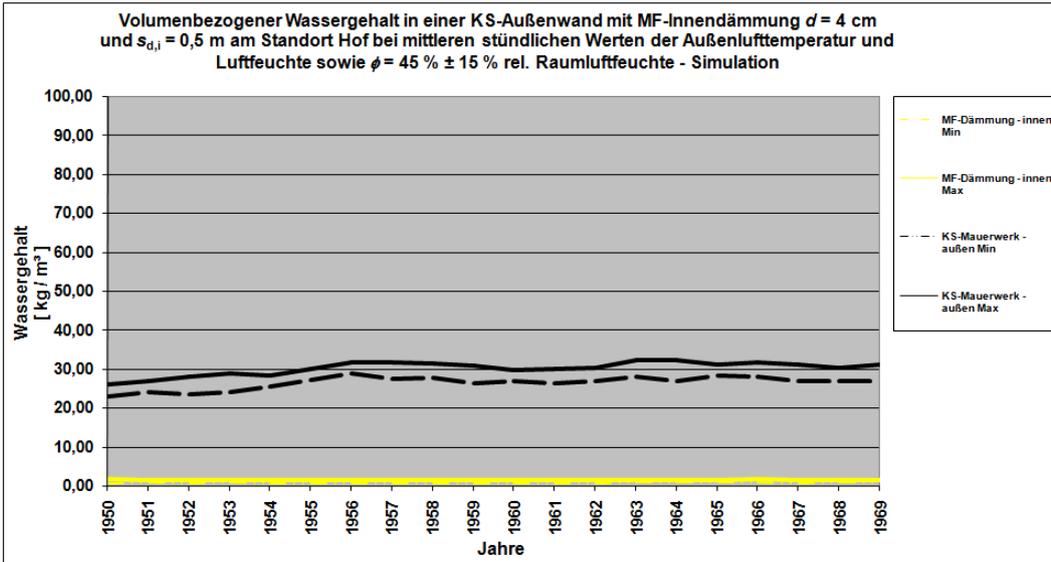
	Simulationsrechnungen (Sorption + Diffusion + Kapillarität)		
Außenklima (1950 – 1969)	Hof	Karlsruhe	
Innenklima (Sinus)	$\theta_i = 21 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Phi_i = 45 \pm 15 \text{ \% r.F.}$	$\theta_i = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ $\Phi_i = 45 \pm 15 \text{ \% r.F.}$	$\theta_i = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ $\Phi_i = 55 \pm 15 \text{ \% r.F.}$
Stundenmittel für Typ- konstruktion	1 , 2 , 3 (mit Profilen), 4 , 5 , 6 , 8	1 , 2 , 3 (mit Profilen), 4 , 5 , 6 ,	1 , 2 , 3 (mit Profilen), 4 , 5 , 6 , 7 , 8
Monatsmittel für Typ- konstruktion	1	1	1

Einordnung der Ergebnisse der Simulationsrechnungen

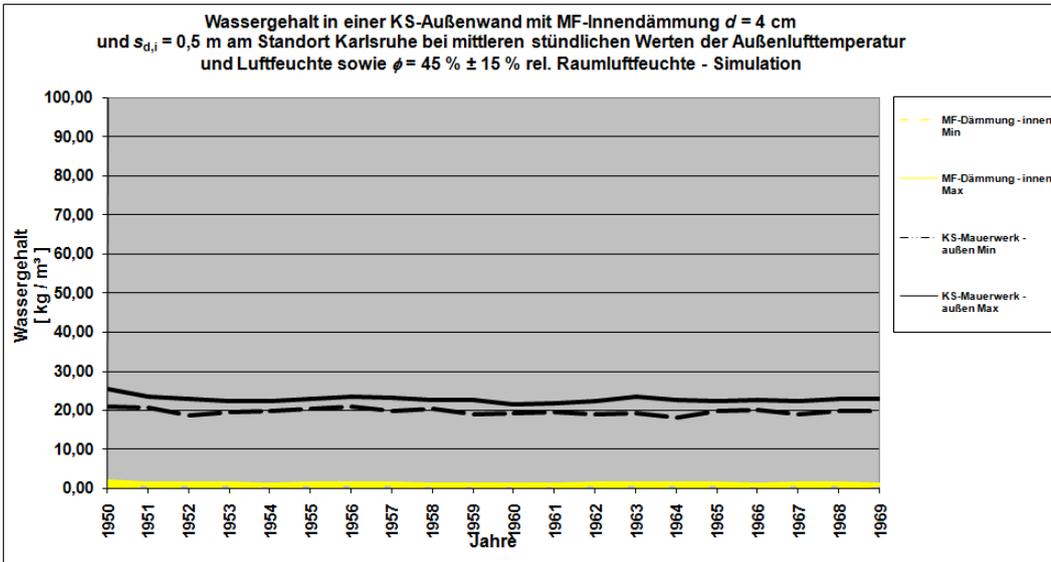
Um die Ergebnisse der Simulationsrechnungen analysieren zu können, ist zu bedenken, dass die dargestellten Wassergehalte in Bauteilen nicht auf ein vereinfachtes stationäres Modell nach Art des Glaser-Verfahrens zurückzuführen sind, sondern alle praxisrelevanten Mechanismen des Feuchtetransports und der Feuchteanlagerung instationär berücksichtigen.

Anhand der Typkonstruktion 1, einer massiven Kalksandsteinwand der Dicke $d = 0,24 \text{ m}$ mit zusätzlicher raumseitiger Wärmedämmschicht $d = 0,04 \text{ m}$ der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,04 \text{ W/(mK)}$, werden exemplarisch die Feuchteinträge in das Bauteil während der zwanzigjährigen Berechnungszeit auf der Basis von Monatsmitteln und Stundenmitteln dargestellt. Für alle anderen Konstruktionen erfolgten die Untersuchungen und die Darstellung der daraus resultierenden Ergebnisse unter Verwendung mittlerer stündlicher Werte.

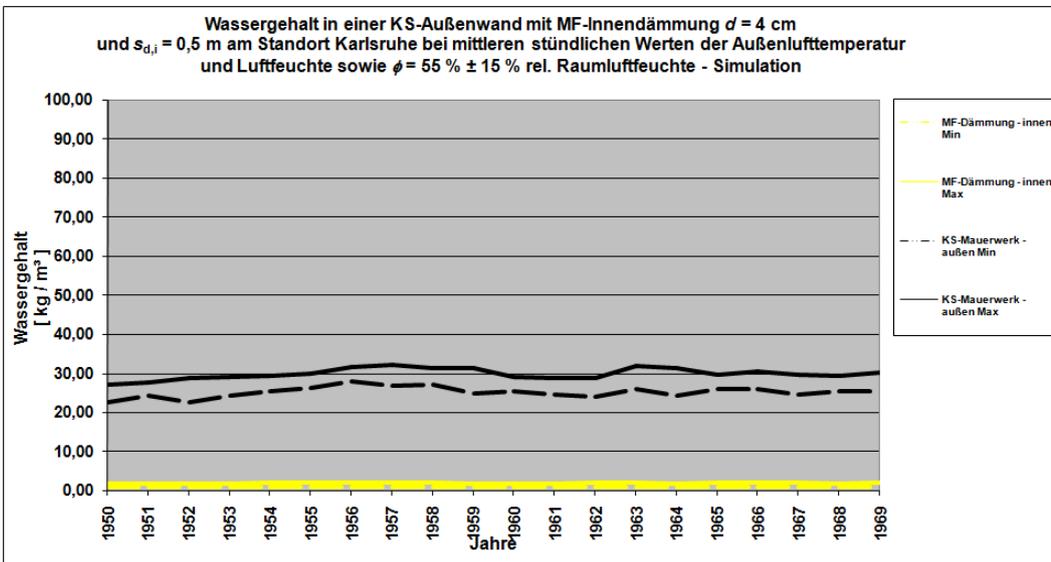
Typkonstruktion 1 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



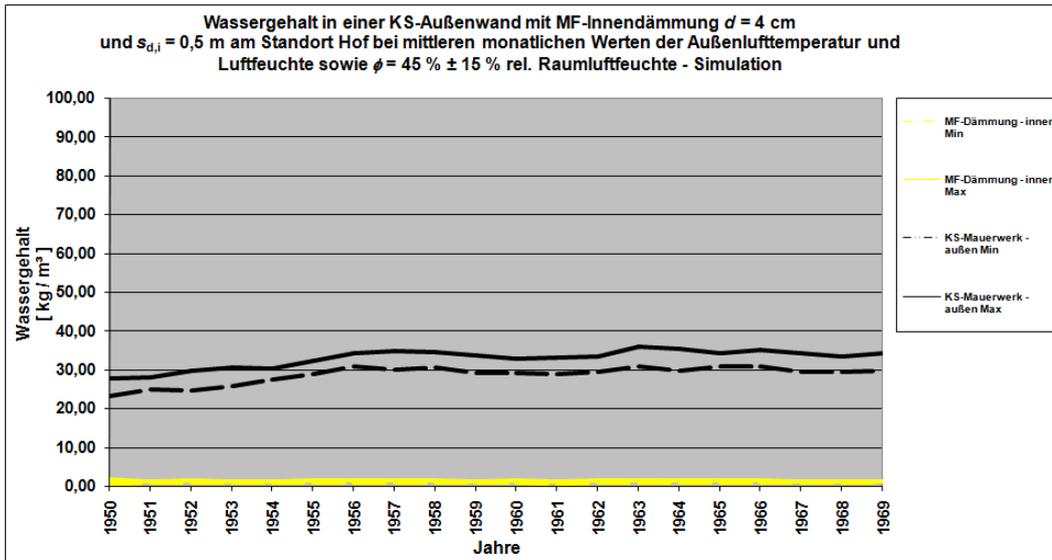
Typkonstruktion 1 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



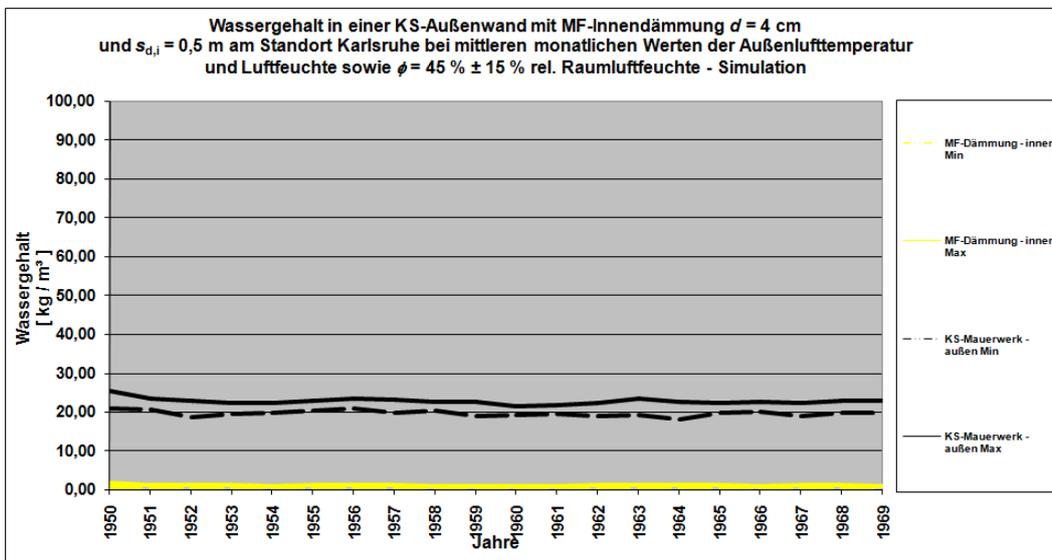
Typkonstruktion 1 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



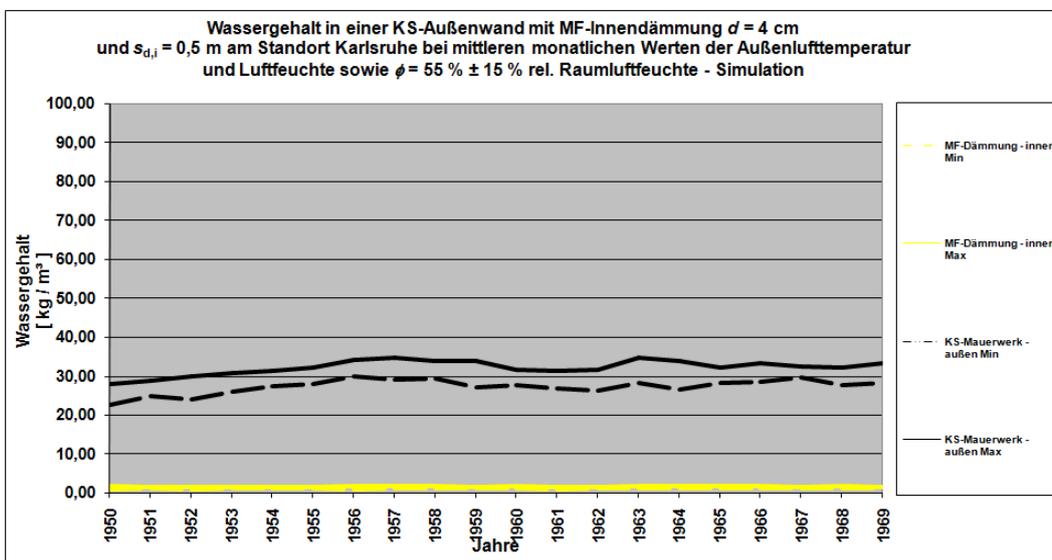
Typkonstruktion 1 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Monatsmittel)



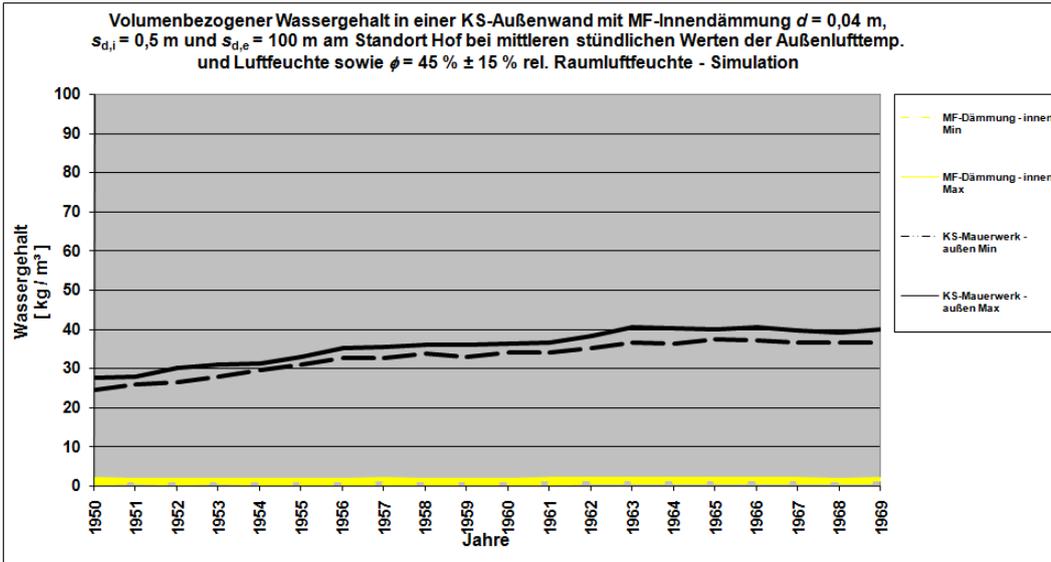
Typkonstruktion 1 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Monatsmittel)



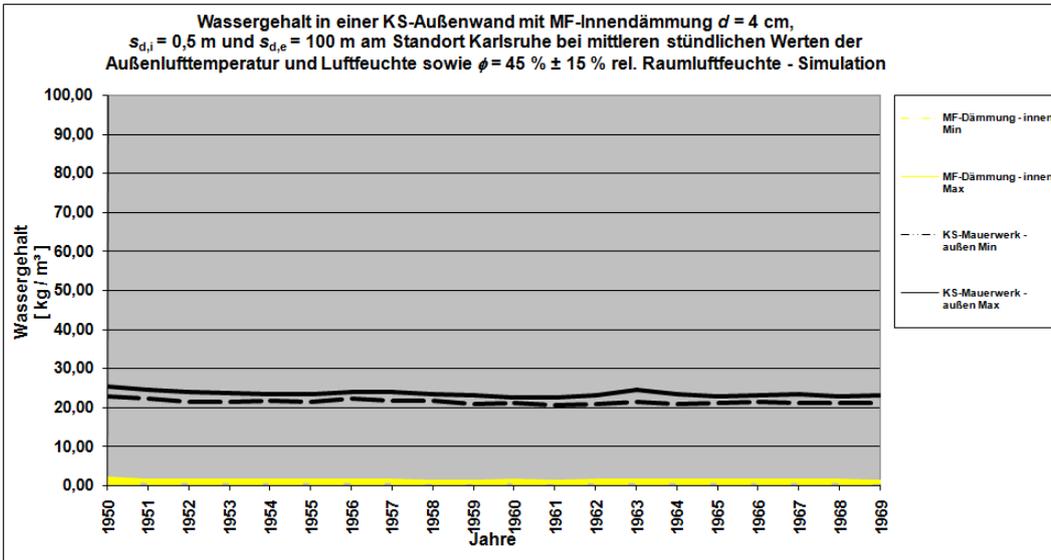
Typkonstruktion 1 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Monatsmittel)



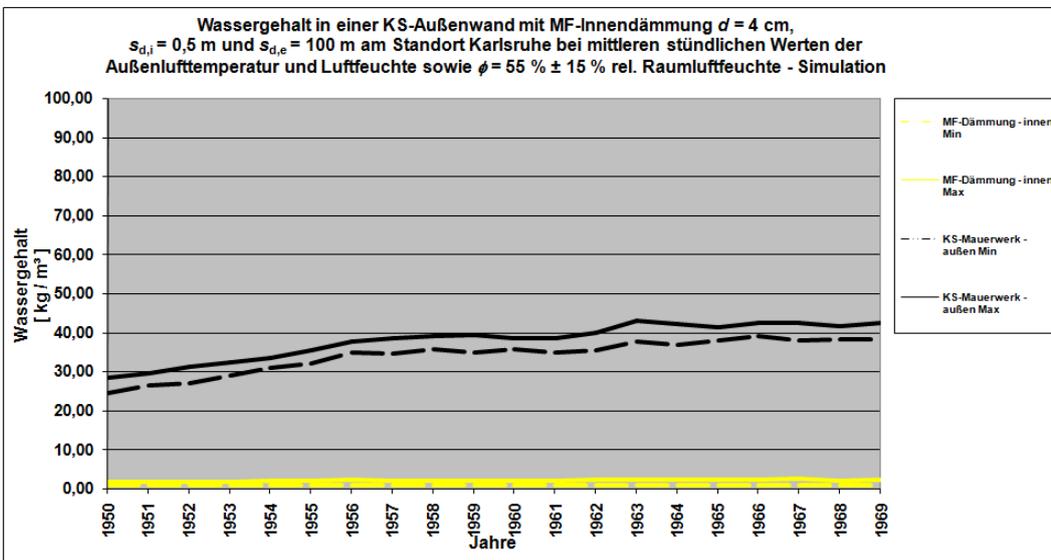
Typkonstruktion 2 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



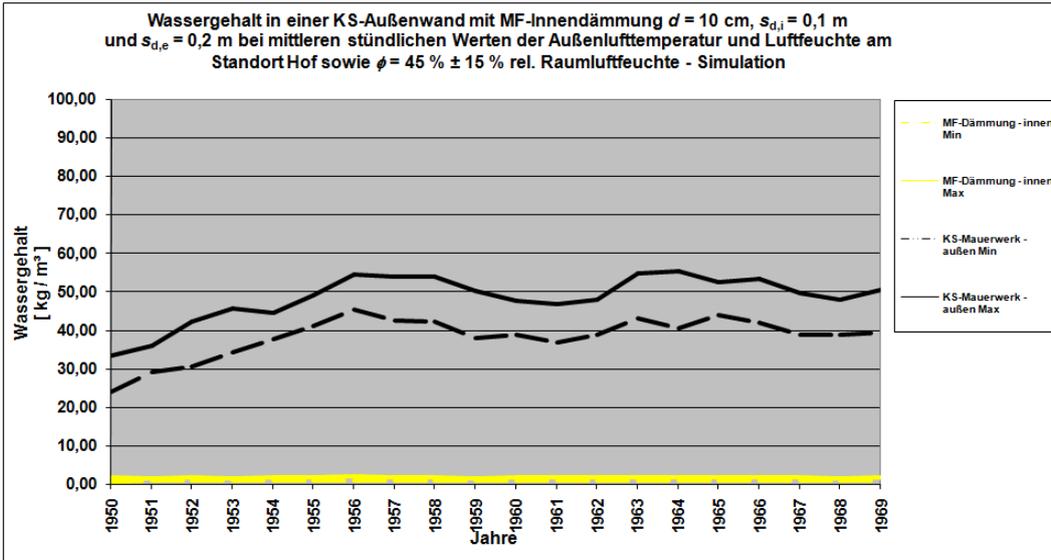
Typkonstruktion 2 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



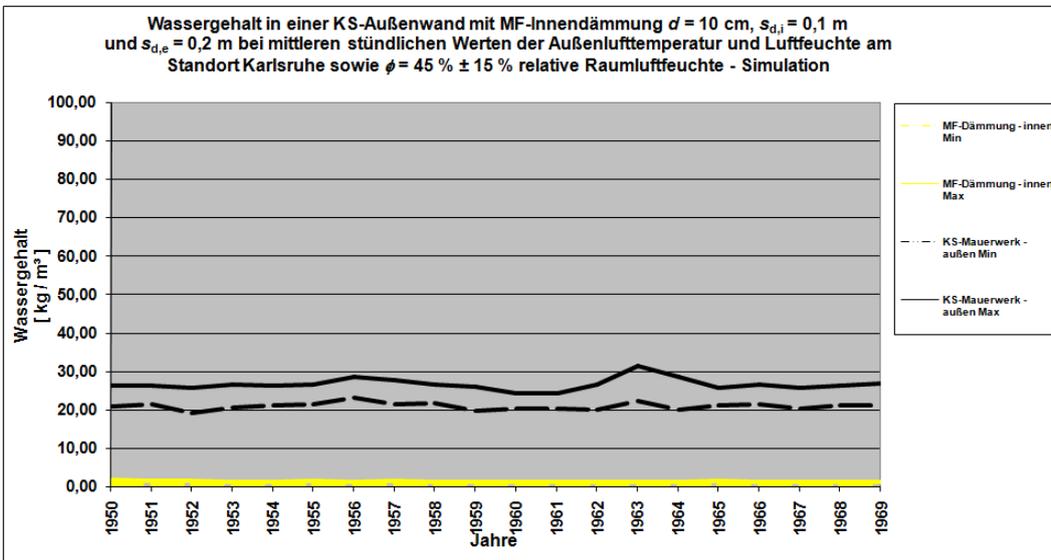
Typkonstruktion 2 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



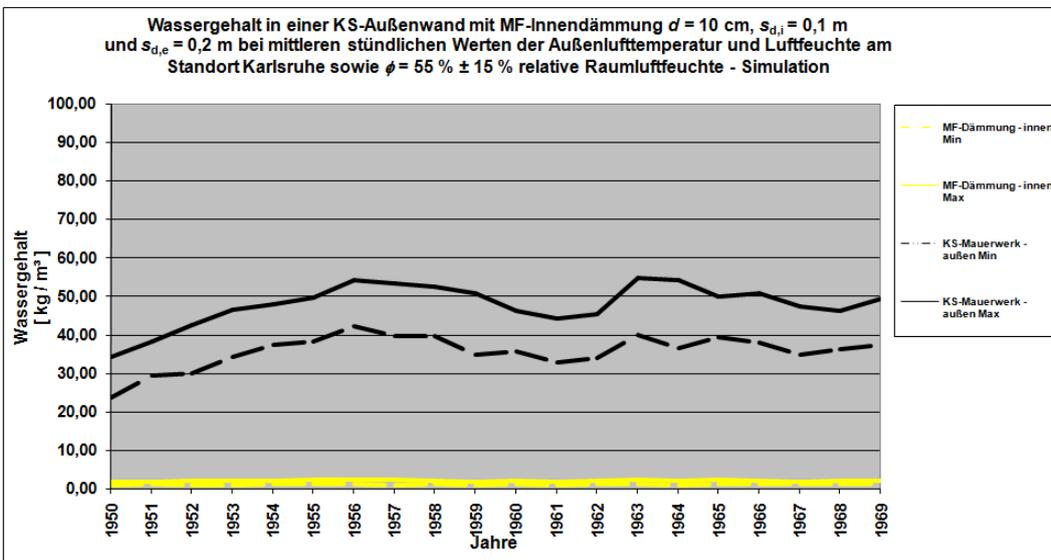
Typkonstruktion 3 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



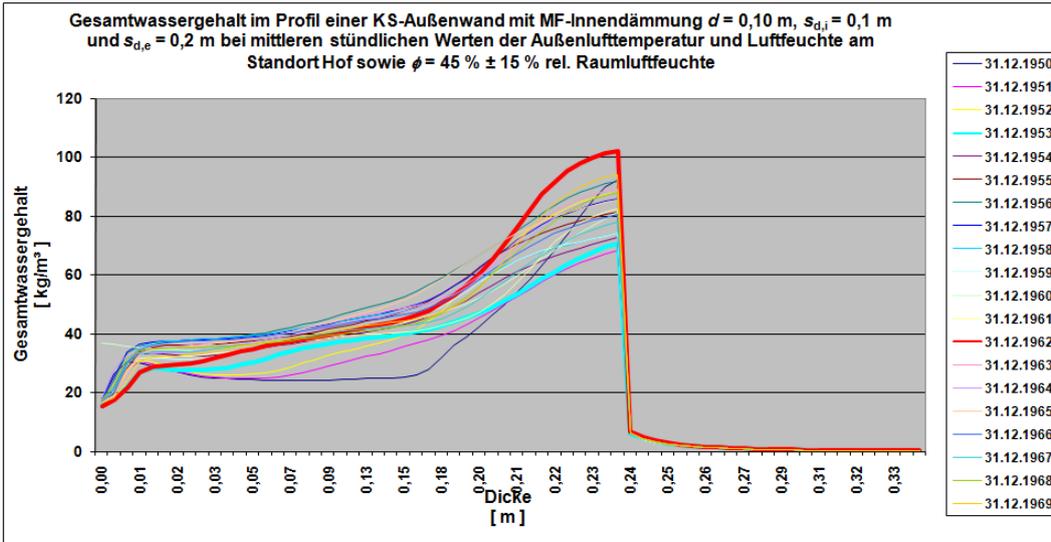
Typkonstruktion 3 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



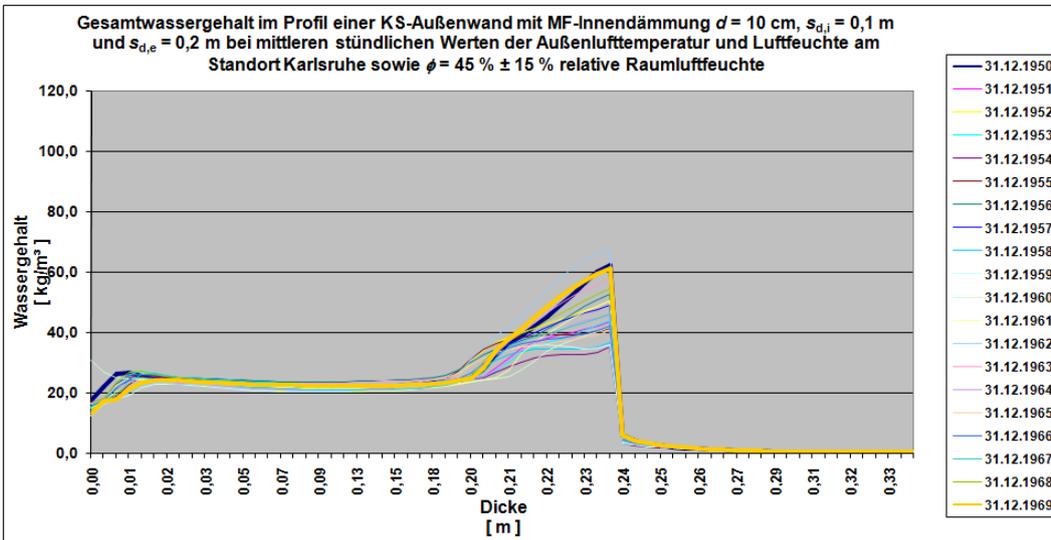
Typkonstruktion 3 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



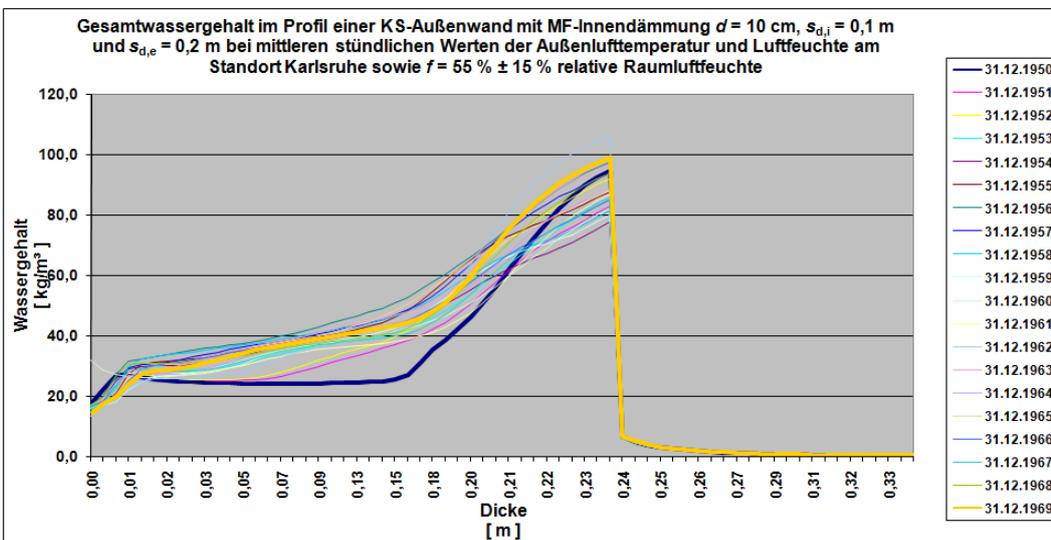
Typkonstruktion 3 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel, Profile)



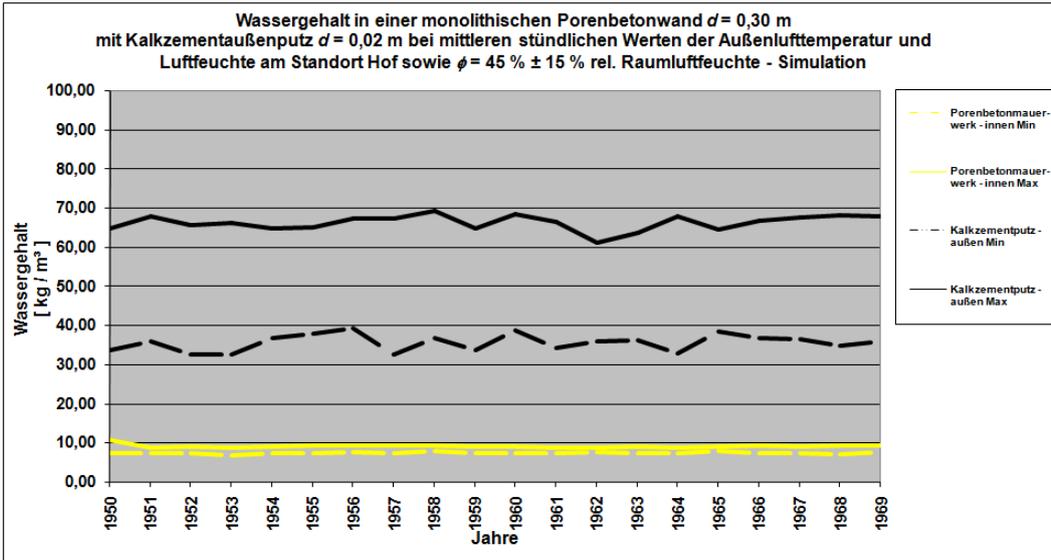
Typkonstruktion 3 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel, Profile)



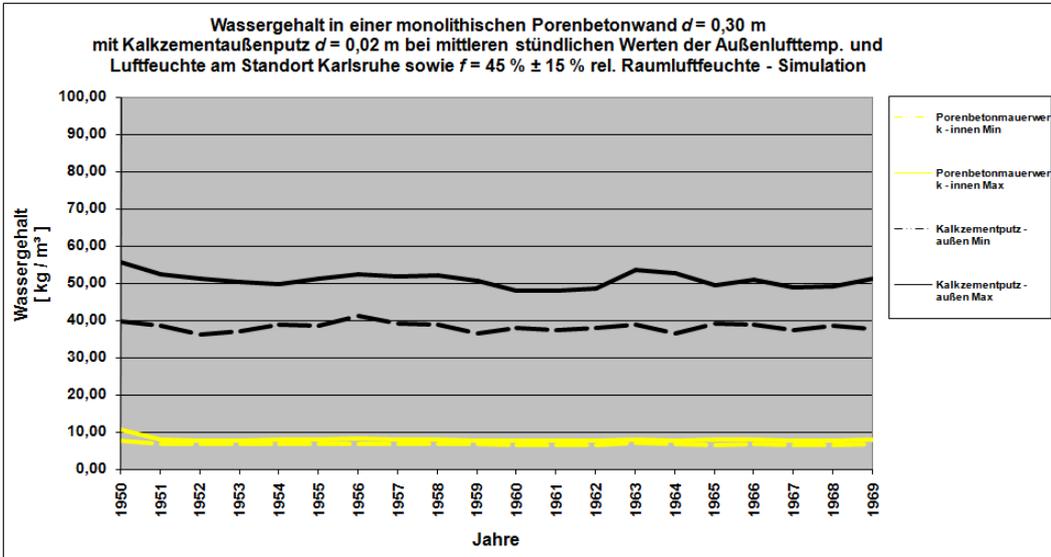
Typkonstruktion 3 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel, Profile)



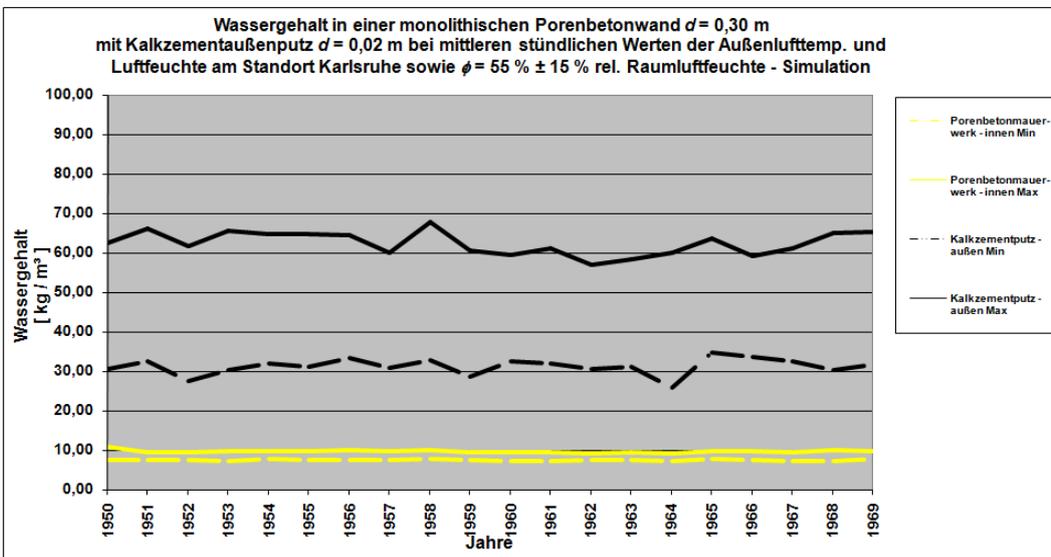
Typkonstruktion 4 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



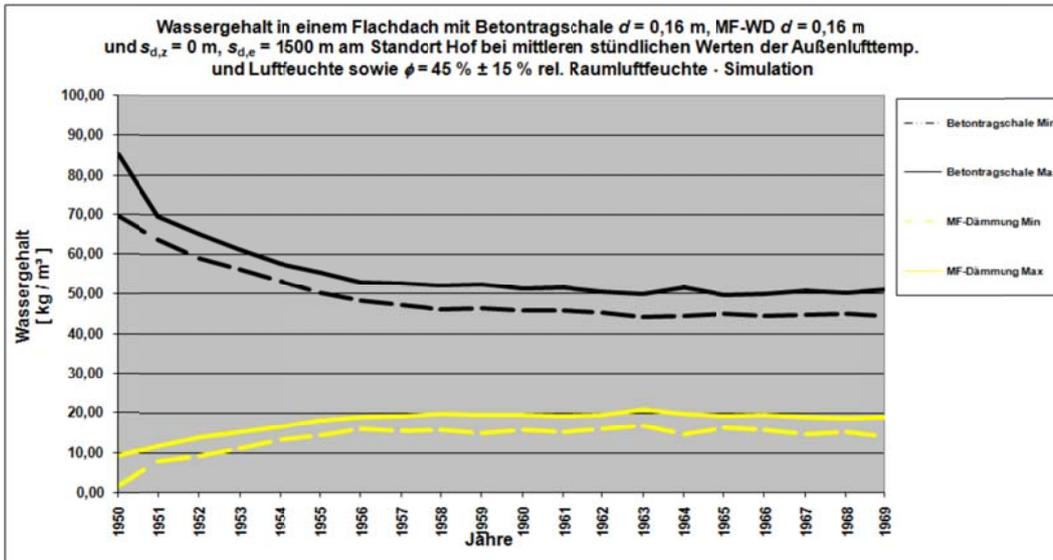
Typkonstruktion 4 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



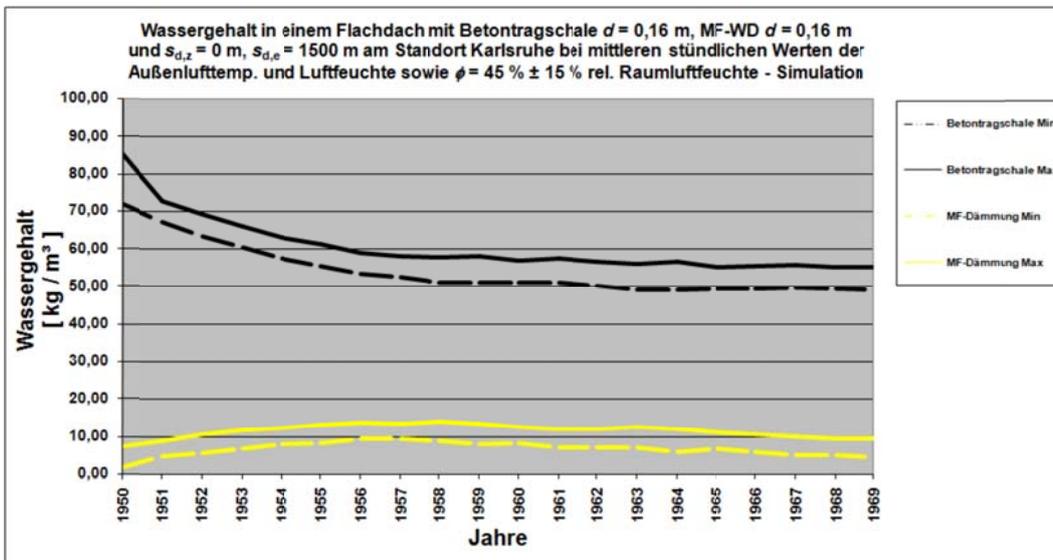
Typkonstruktion 4 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



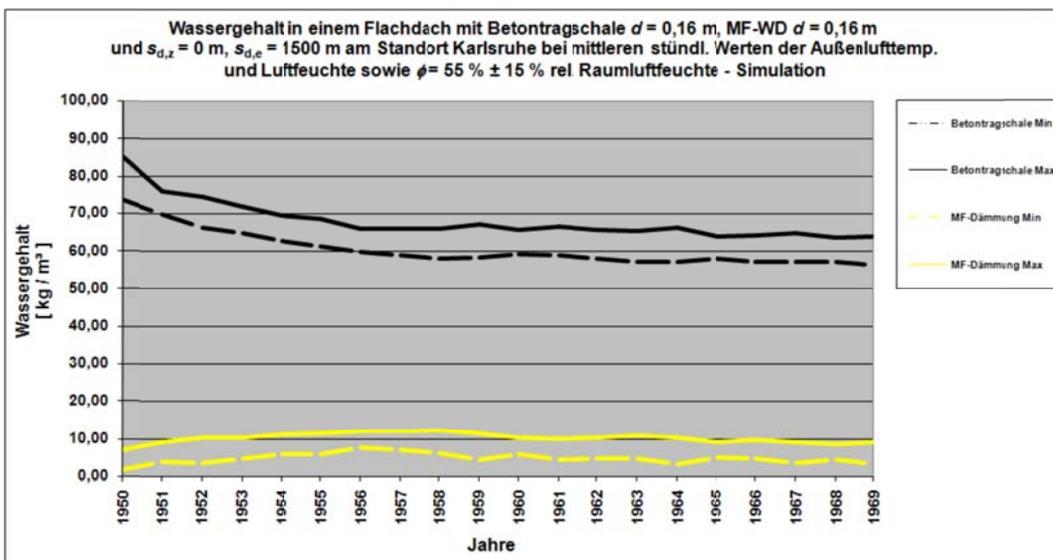
Typkonstruktion 5 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



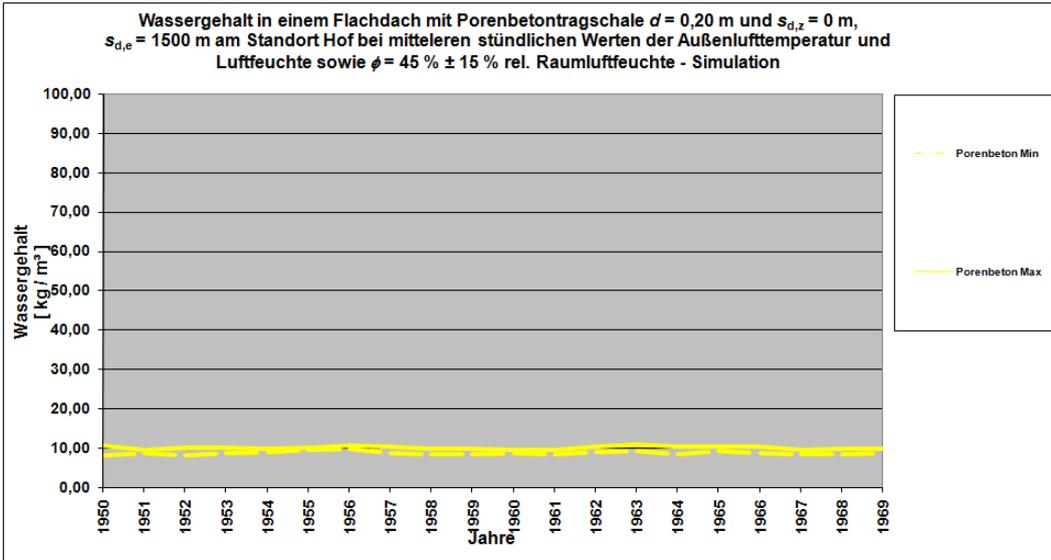
Typkonstruktion 5 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



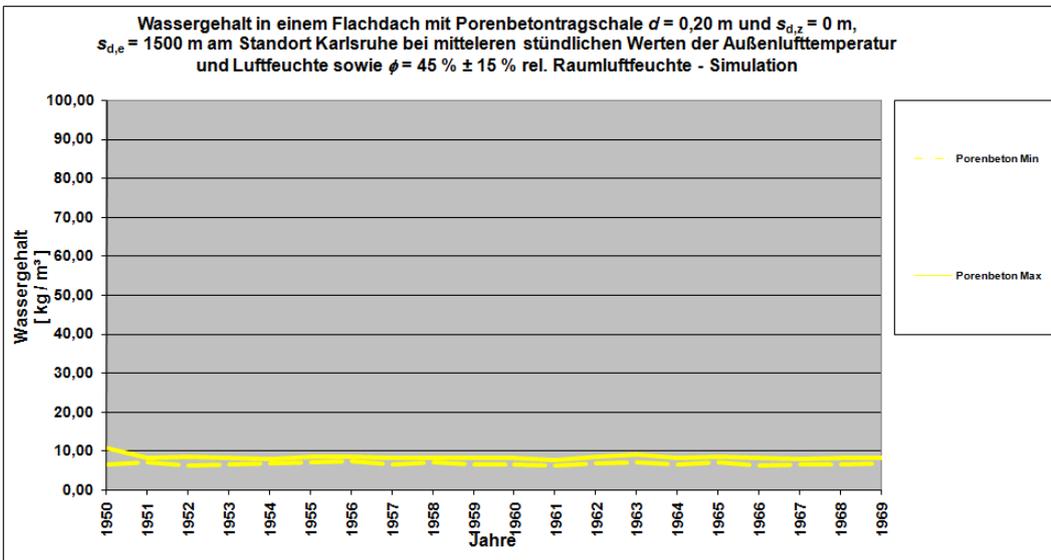
Typkonstruktion 5 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



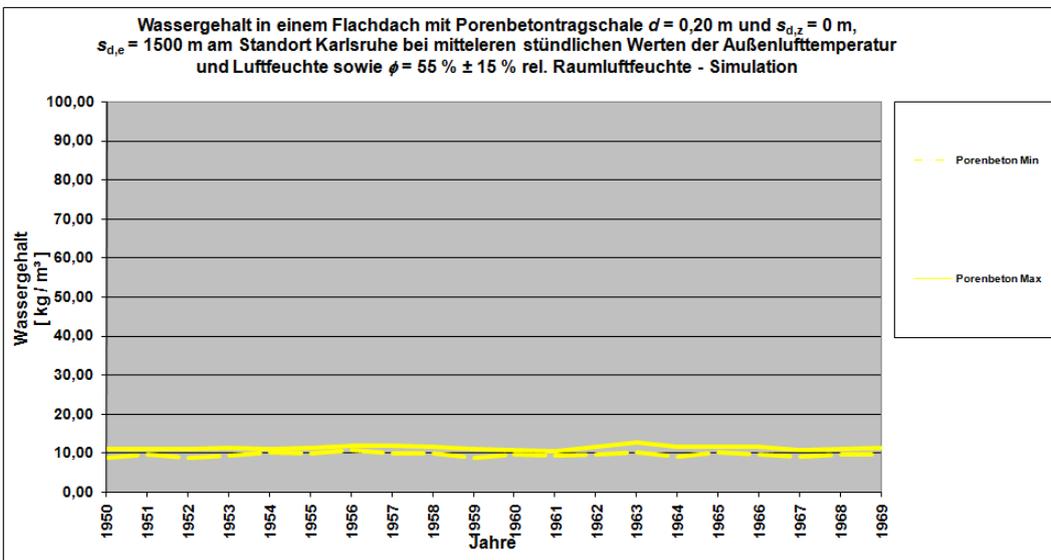
Typkonstruktion 6 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



Typkonstruktion 6 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



Typkonstruktion 6 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



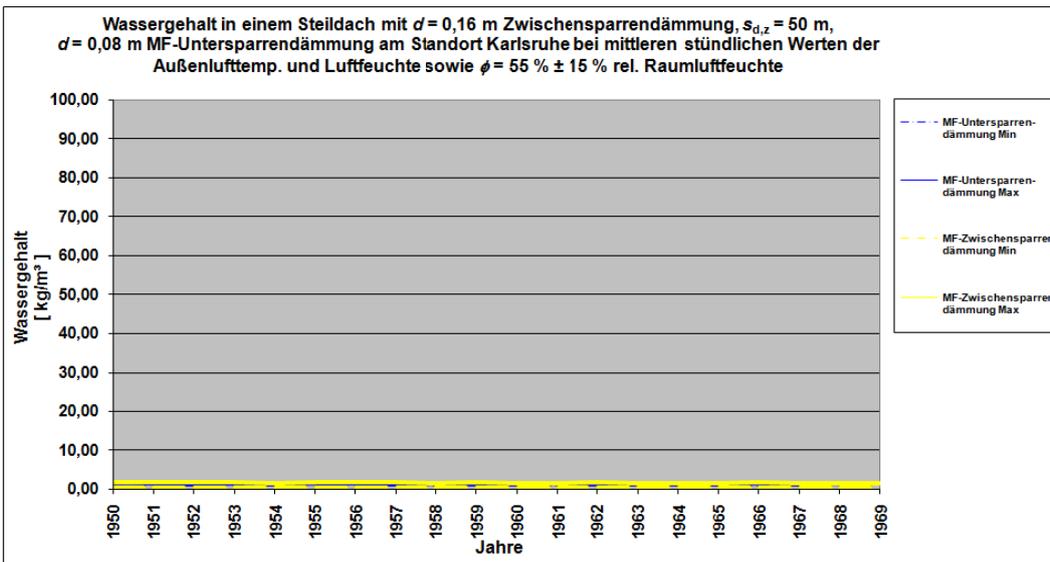
Typkonstruktion 7 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)

Die Zeitverläufe des Wassergehalts je Einzelschicht liegen bei dieser Randbedingung (Hof / 60%) im Feuchte-Level stets unterhalb der Verläufe für Karlsruhe / 70% (s. Diagramm unten) und sind deshalb nicht dargestellt.

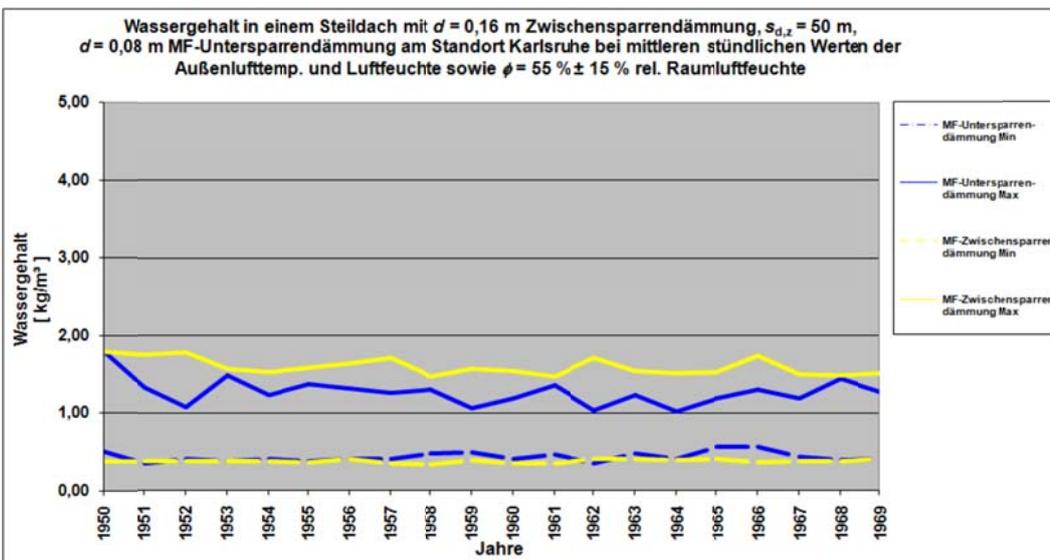
Typkonstruktion 7 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)

Die Zeitverläufe des Wassergehalts je Einzelschicht liegen bei dieser Randbedingung (Karlsruhe / 60%) im Feuchte-Level stets unterhalb der Verläufe für Karlsruhe / 70% (s. Diagramm unten) und sind deshalb nicht dargestellt.

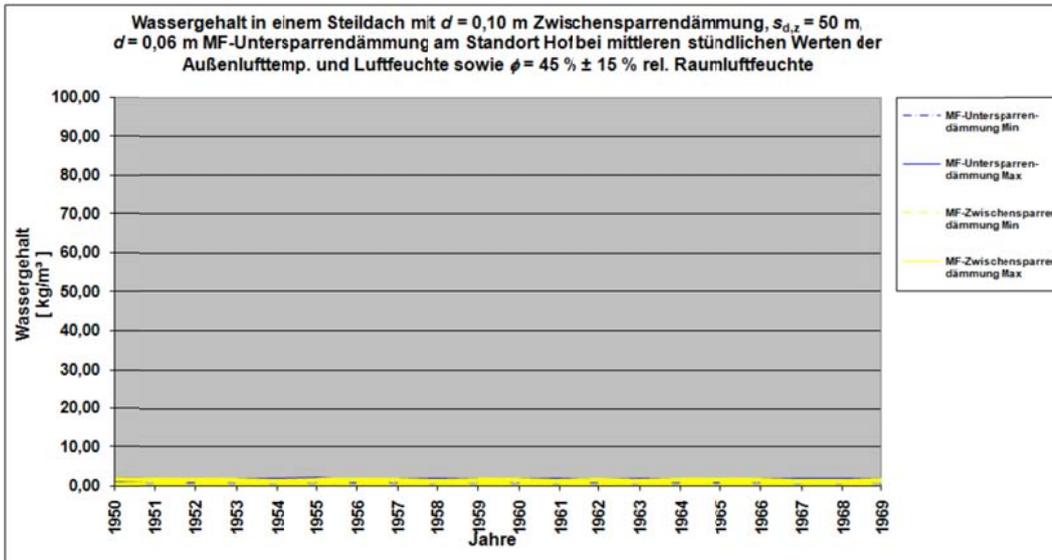
Typkonstruktion 7 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



Die vorhergehende Darstellung feiner aufgelöst:



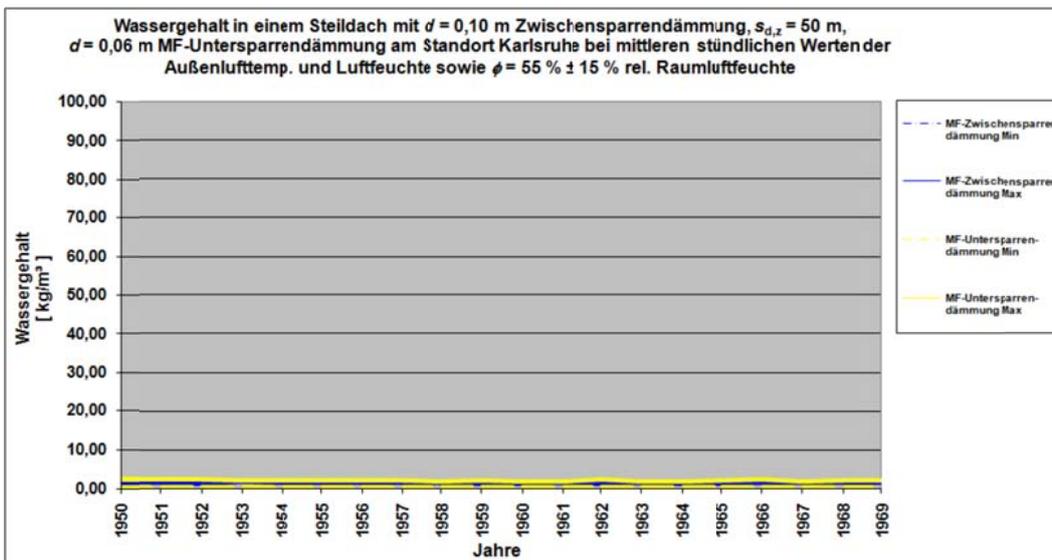
Typkonstruktion 8 Hof, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)



Typkonstruktion 8 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 60\%$ (Stundenmittel)

Die Zeitverläufe des Wassergehalts je Einzelschicht liegen bei dieser Randbedingung (Karlsruhe / 60%) im Feuchte-Level stets unterhalb der Verläufe für Karlsruhe / 70% (s. Diagramm unten) und sind deshalb nicht dargestellt.

Typkonstruktion 8 Karlsruhe, $\phi_{i, \max} = 70\%$ (Stundenmittel)



5. Bewertung der Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungen

a) Allgemeine Erkenntnisse aus den theoretischen Diffusionsbetrachtungen

Ziel der vergleichenden Betrachtungen zu den nach DIN 4108-3:2001-07 anzusetzenden (alten) und vorgeschlagenen (neuen) Randbedingungen war, grundsätzliche Aussagen zum Anforderungsniveau an Bauteile zu machen. Mit der Definition der neuen Randbedingungen war auch der Wunsch verbunden, das Niveau der Anforderungen an die Tauwasserfreiheit von Bauteilen in unterschiedlichen Konstruktionsarten im Vergleich zu den bisherigen Prüfbedingungen keinesfalls aufzuweichen, sondern tendenziell eher zu verschärfen.

Tauperiode

Unter Ansatz der neuen Randbedingungen für die Tauperiode ergeben sich einerseits höhere Sättigungsdampfdrücke an den Stellen des Tauwasserausfalls (eine oder zwei Ebenen bzw. ein Bereich), andererseits wird die Dauer der Tauperiode von 60 auf 90 Tage verlängert. Während ersteres entspannend auf die Tauwassermasse im Bauteil wirkt, folgt auf letzteres eine Verschärfung der Situation. Somit kann augenscheinlich keine generelle Aussage zu den Auswirkungen der veränderten Randbedingungen getroffen werden. Untersuchungen müssen also klären, welche der geänderten Annahmen wann dominant ist. Bild 20 zeigt, wann mit der Vergrößerung bzw. Verringerung der Tauwassermasse in Abhängigkeit von der Temperatur an der Stelle des Tauwasserausfalls zu rechnen ist. Mit $V_{mW,i}$ und $V_{mW,e}$ werden Verhältnismassewerte diffundierender Wassermassen (bei gleich bleibendem s_{di} bzw. s_{de}) angegeben. $V_{mW,e}$ ist immer größer als 1. Das bedeutet, dass nach neuen Randbedingungen während der Tauperiode mehr Wasser aus dem Bauteil heraus diffundiert als nach alten, was entspannend auf die im Bauteil verbleibende Tauwassermasse wirkt. $V_{mW,i}$ nimmt Werte zwischen 0 und 1,27 an. Werte kleiner 1 stehen für geringere, ins Bauteil hinein diffundierende Wassermassen. Folglich werden Bauteile, deren Sättigungsdampfdruck an der innen liegenden Stelle des Tauwasserausfalls nach alten Randbedingungen $p_{sw,i} > 1010 \text{ Pa}$ lag, nach neuen Randbedingungen generell weniger kritisch bewertet. Das kann auch zur Folge haben, dass ein nach alten Randbedingungen unzulässiger Aufbau nach neuen Randbedingungen zulässig ist. Besonders deutlich kommt diese Veränderung im Berechnungsbeispiel zu einem geneigten Dach mit 10 cm Zwischensparrendämmung und zusätzlich - von der (alten) Dampfbremse aus innen liegend - 6 cm Innendämmung zum Ausdruck (Typkonstruktion 8). Das Bauteil

weist nach alten Randbedingungen eine unzulässig hohe, nach neuen Randbedingungen keine bzw. nur eine geringe Tauwassermasse auf. Diese Erscheinung kann Bild 20 unmittelbar entnommen werden ($q_{k,alt} > 7,1 \text{ °C}$).

Weiterhin wurde untersucht, bis in welche Bauteiltiefe die für das Bauteil zulässige Tauwassermasse überhaupt erreicht werden kann und wiederum alte und neue Randbedingungen verglichen. Die maximale Bauteiltiefe $s_{dj,\infty}$ nimmt nach neuen Randbedingungen um ca. 26 % zu (siehe Tabelle 2). Um die maximale Bauteiltiefe herum bildet sich ein schmaler Bereich $0,5 \text{ m} \leq s_{di} \leq 1,1 \text{ m}$ für zul. $m_{W,T} = 1 \text{ kg/m}^2$ bzw. $1,0 \text{ m} \leq s_{di} \leq 2,2 \text{ m}$ für zul. $m_{W,T} = 0,5 \text{ kg/m}^2$, in dem Bauteile nach neuen Randbedingungen kritischer gesehen werden, wenn die Tauwassermasse an gleicher Stelle nach alten Randbedingungen (nahezu) erreicht wird (s. Bild 18 unten). Dies gilt allerdings nur für Bauteile mit ausreichend großem Gesamt- s_d . Ist Gesamt- s_d klein (s. Bild 18 oben und Mitte), ergibt sich generell eine Entschärfung der Tauwassersituation mit $V_{\min p}/V_p$ kleiner 1.

Bauteile werden nach den neuen Randbedingungen also nur in einem kleinen, der Innenoberfläche nahen s_d -Bereich kritischer gesehen als nach alten Randbedingungen, wenn dabei noch die Temperatur an der Stelle des Tauwasserausfalls klein genug wird ($< 1 \text{ °C}$ nach alten Randbedingungen) und der Gesamt- s_d ausreichend groß wird ($> 2 \text{ m}$). In davon deutlich abweichenden Fällen, insbesondere bei höherer Temperatur an der Stelle des Tauwasserausfalls, fällt nach neuen Randbedingungen weniger Tauwasser aus.

Verdunstungsperiode

Die Untersuchung der Verdunstungsmöglichkeiten nach den verschiedenen Randbedingungen wurde geführt, indem die maximal mögliche Tauwassermasse für beliebige Stellen des Tauwasserausfalls im Bauteil mit der Verdunstungsmasse von gleicher Stelle aus nach innen verglichen wurde (s. Bilder 22 bis 24). Während für Dächer nach den alten Randbedingungen – je nach der Temperatur an der Stelle des Tauwasserausfalls – das Tauwasser ganz oder teilweise nach innen diffundieren kann (s. Bild 23), ist die vollständige Austrocknung des Daches nach neuen Randbedingungen allein durch Diffusion nach innen garantiert (s. Bild 24). Wände können weder nach alten noch nach neuen Randbedingungen allein durch sommerliche Diffusion nach innen austrocknen, wenn die Temperatur an der Stelle des Tauwasserausfalls während der Tauperiode unter $-1,6 \text{ °C}$ nach den alten und $2,0 \text{ °C}$ nach den neuen Randbedingungen fällt. Nach den neuen Randbedingungen muss dann der Diffusionsdurchlasswiderstand nach außen (s. Bild 22 max. s_{de}) kleiner sein, um für ausreichend viel Tauwasser-Diffusion nach außen aus dem Bau-

teil zu ermöglichen. Die kritischsten Fälle ergeben sich für alte und neue Randbedingungen bei Tauwasserausfall mit s_{di} ca. 1 m und großer Tauwassermasse. Max. s_{de} darf dann jeweils nur 2 bis 3 m betragen.

b) Allgemeine Tendenzen aus den Diffusionsrechnungen

Generell lässt eine Auswertung der Ergebnisse aus den Berechnungen zur Tauwassermasse und der Verdunstungswassermasse für Diffusionsvorgänge nach dem Glaserverfahren mit den Randbedingungen nach DIN 4108-3:2001-07, den „neuen“ Randbedingungen und den „vereinfachten neuen“ Randbedingungen erkennen, dass bei Verwendung der modifizierten Klimadaten, die Anforderungen verschärft werden. Die ausfallenden Tauwassermassen nehmen von Glaser „alt“ zu Glaser „neu vereinfacht“ zu. Die verschiedenen Untersuchungen machten aber auch deutlich, dass sich die Einstufungen der Typkonstruktionen hinsichtlich zulässig oder nicht zulässig – unabhängig von den verwendeten Randbedingungen – bis auf einen Fall (Typkonstruktion 8) nicht ändern. Dieser Fall ist grenzwertig, was auch durch die Simulationsrechnung belegt wird, die ihn als noch unproblematisch ausweist. Die stationär ermittelte Tauwassermasse wird bestimmt durch ein starkes Temperaturgefälle raumseitig bis zur Dampfbremse kombiniert mit einem äußerst geringen Diffusionswiderstand. Für solche Konstruktionen, soweit überhaupt praxisgerecht, müssen zusätzliche Bedingungen, z.B. Schimmelrisiko oder s_d – Wert-Relationen, für eine Entscheidung über Zulässigkeit eingeführt werden.

c) Allgemeine Tendenzen aus den Simulationsrechnungen

Wie die Untersuchung der Typkonstruktionen zeigt, stellt sich bei allen Bauteilen nach der Einschwingphase ein fallender oder mindestens konstanter Feuchtegehalt ein. Die Verteilungen des Feuchtegehalts korrelieren dabei alle mit den Darstellungen zur Typkonstruktion 1. Diffusion und Sorption führen zu einem Wasserdampfstrom durch das Bauteil hindurch bzw. zu einer Feuchteanlagerung. Auch die Betrachtungen des Wassergehaltes als Profil über den Bauteilquerschnitt bzw. der zeitlichen Verteilung während der zwanzigjährigen Untersuchungsdauer zeigen einen volumenbezogenen Wassergehalt, der auch bei klimatischen Extremsituationen einen bestimmten Bereich nicht überschreitet. Die Typkonstruktionen können daher nach den Simulationen i.W. als unkritisch eingestuft werden.

Eine Ausnahme erkennt man tendenziell bei Typkonstruktion 2. Hier zeigt sich, über die Berechnungszeit von zwanzig Jahren gesehen, eine geringfügige kontinuierliche Zunahme des Wassergehalts im Bauteil.

Weiterhin ergeben die Untersuchungen, dass bei instationären Vorgängen, in Analogie zu den Analysen der Temperaturverteilung in Bauteilen, auch bei Betrachtungen der Feuchteverteilung Zeiträume von ca. 10 Jahren zugrunde gelegt werden sollten. Außerdem wird deutlich, dass nicht nur ein Referenzstandort für Klimadaten bei alle Konstruktionen (unterschiedliche thermische und feuchtetechnische Trägheiten) verwendet werden kann, sondern je nach Dynamik des Bauteils eine Repräsentanzstation für "trocken-kalt" und "feucht-warm" gewählt werden sollte. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass eine relative Feuchte in Innenräumen mit einem Scheitelwert der jährlichen Sinusverläufe von 60 % r.F. am feuchtwarmen Standort nicht ausreicht. Hier ist ein Maximalwert der relativen Raumlufffeuchte von 70 % zu empfehlen. Aus dieser Betrachtung heraus sollte auch bei einem künftigen Blockklima die relative Feuchte in Innenräumen während der so genannten Verdunstungsperiode mit 70 % angesetzt werden.

6. Einschätzung der Tauglichkeit der neuen Blockklima-Randbedingungen

Die Ergebnisse zur angefallenen Tauwassermasse und zur Verdunstungswassermasse beim Glaserverfahren (alt, neu, neu vereinfacht) bzw. zum Risiko einer kritischen Tauwassermasse bei Simulationen an den Standorten Hof und Karlsruhe sind für die acht untersuchten Typkonstruktionen in Tabelle 5 zusammengestellt.

Dabei wird deutlich, dass bei der Wahl der neuen (auch der vereinfachten) Randbedingungen zum Glaserverfahren das angestrebte Ziel einer leichten Verschärfung der Anforderungen bei gleichzeitigem Beibehalten von Konstruktionen, die nach der Berechnung von DIN 4108-3:32001-07 als unkritisch gelten, erreicht wurde. Diese Einschätzung gilt beim Glaserverfahren sowohl bei der Betrachtung einer kritischen Tauwassermasse, als auch bei der Untersuchung der Differenz bzw. des Quotienten aus Tauwassermasse und Verdunstungswassermasse. Bestätigt wird diese Einschätzung noch durch die Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen. Es zeigt sich, dass Konstruktionen die nach dem Glaserverfahren zulässig sind, auch bei einer Simulationsrechnung,

bei der sowohl Diffusion als auch Sorption und Kapillarität berücksichtigt wurden, als unkritisch gelten können. Der Vergleich des Glaser-Verfahrens mit der Simulation macht außerdem deutlich, dass die Periodenbilanz nach Glaser zu schärferen Ergebnissen, d. h. zu Resultaten auf der „sicheren Seite“ führt. So sind beispielsweise die Typkonstruktionen 1 und 2 bei Glaser nicht zulässig, können jedoch bei einer Simulation als unkritisch eingestuft werden.

Ein weiterer kritischer Aspekt bei der Untersuchung von Tauwasserausfall in Bauteilen konnte anhand der Typkonstruktion 5 deutlich gemacht werden. Bei diesem Bauteil zeigte sich, dass die ermittelte Tauwassermasse bzw. die Analyse, ob eine Konstruktion zulässig ist oder nicht, stark von der Ausgangsfeuchte im Beton und dessen Trocknungsverhalten abhängt.

Für die Werte-Angaben in Tabelle 5 gilt:

m_T Tauwassermasse in kg/m^2

m_V Verdunstungsmasse in kg/m^2

Tabelle 5: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

Typkonstruktion	Diffusion (DIN)				Simulation (WUFI)	
	Block-Klima				Hof	Karlsruhe
	a) alt b) neu c) neu vereinfacht				mit r. F. im Winter innen, max 60%	mit r. F. im Winter a) innen, max 60% b) innen, max 70%
	m_T	m_V	$m_V - m_T$	m_V/m_T	Beurteilung Feuchte Level	Beurteilung Feuchte Level
1 <u>Wand</u> 4 cm MF-Innendämmung 24 cm KS-Mauerwerk außen diffusionsoffen	1,25 1,39 1,49	1,22 1,37 1,50	-0,03 -0,02 +0,01	0,98 0,99 1,01	kein Akkumulieren; Feuchte-Level unproblematisch	a) kein Akkumulieren; Level unproblematisch b) kein Akkumulieren; Level unproblematisch
2 <u>Wand</u> 4 cm MF-Innendämmung 24 cm KS-Mauerwerk außen diffusionshemmend	1,30 1,49 1,60	0,18 0,20 0,23	-1,12 -1,29 -1,37	0,14 0,13 0,14	anfangs leichtes Ak- kumulieren; Feuchte-Level leicht erhöht, unproblematisch	a) kein Akkumulieren; Level unproblematisch b) anfangs leichtes Ak- kumulieren; Level leicht erhöht, unproblematisch
3 <u>Wand</u> 10 cm MF-Innendämmung 24 cm KS-Mauerwerk außen diffusionsoffen	3,96 4,78 5,20	3,13 3,49 4,01	-0,83 -1,29 -1,19	0,79 0,73 0,77	anfangs deutliches Ak- kumulieren; Feuchte-Level im Mauerwerk erhöht, grenzwertig	a) kein Akkumulieren; Level unproblematisch b) anfangs deutliches Akkumulieren; Level im Mauerwerk erhöht, grenzwertig
4 <u>Wand</u> 30 cm Porenbeton- Mauerwerk außen diffusionsoffen	0,35 0,26 0,29	2,0 2,39 2,56	+1,65 +2,13 +2,27	5,71 9,19 8,83	kein Akkumulieren; Feuchte-Level unproblematisch	a) kein Akkumulieren; Level unproblematisch b) kein Akkumulieren; Level unproblematisch
5 <u>Flachdach</u> 16 cm Beton, ohne Dampfbremse, 16 cm Dämmung, Abdichtung	0,04 0,05 0,05	0,09 0,06 0,06	+0,05 +0,01 +0,01	2,25 1,20 1,20	kein Akkumulieren; Feuchte-Level in der Dämmung erhöht, abhängig von Beton- trocknung	a) kein Akkumulieren; Level in der Dämmung erhöht, abhängig von Betontrocknung b) wie bei Fall a)
6 <u>Flachdach</u> 20 cm Porenbeton, Abdichtung	0,38 0,45 0,50	0,85 0,57 0,59	+0,47 +0,12 +0,09	2,24 1,27 1,18	kein Akkumulieren; Feuchte-Level unproblematisch	a) kein Akkumulieren; Level unproblematisch b) kein Akkumulieren; Level unproblematisch
7 <u>Geneigtes Dach</u> ¹⁾ 8 cm U.sparrendämm., PE-Folie, 16 cm Zw.sparrendä., außen diffusionsoffen	0,29 0,00 0,00	8,0 - -	+7,71 - -	27,6 - -	kein Akkumulieren; Feuchte-Level unproblematisch (Schimmelrisiko separat prüfen)	a) kein Akkumulieren; Level unproblematisch b) kein Akkumulieren; Level unproblematisch
8 <u>Geneigtes Dach</u> ¹⁾ 6 cm Untersparrendämm., PE-Folie, 10 cm Zwischensparren- dämmung außen diffusionsoffen	1,25 0,00 0,30	10,1 - 20,8	+8,85 - +20,5	8,08 - 69,3	kein Akkumulieren; Feuchte-Level unproblematisch (Schimmelrisiko separat prüfen)	a) kein Akkumulieren; Level unproblematisch b) kein Akkumulieren; Level unproblematisch (Schimmelrisiko separat prüfen)

(nach DIN-Blockklima unzulässig ; nach WUFI-Simulation kritisch

 nach DIN-Blockklima zulässig ; nach WUFI-Simulation unkritisch)

7. Vorschläge für eine künftige feuchtetechnische Bewertungsmethodik in DIN 4108-3

Wie die Analyse von DIN EN ISO 13788 zeigt, erfordert der Rechenansatz nach dieser Norm (stationäres Monatsbilanz-Verfahren für Diffusion) eine genauere Untersuchung hinsichtlich seiner Richtigkeit bzw. Unsicherheit und seiner Allgemeingültigkeit. Im Gegensatz zum einfachen Glaser-Verfahren (stationäres Periodenbilanz-Verfahren für Diffusion) wird der dort angegebene Ausfall von Tauwasser „in einem Bereich“ mit der internationalen Norm nicht abgedeckt. Außerdem wäre zu prüfen, ob und in welcher Weise die aus dem Diffusionsverfahren nach DIN EN ISO 13788 mit monatlichen Klimamittelwerten resultierenden Tauwasser- und Verdunstungsmassen für eine Bewertung der Zulässigkeit bzw. Schadensfreiheit von Baukonstruktionen zugrunde gelegt werden kann. Dies dürfte aber auch insofern problematisch sein, da das Modell einerseits von realen Monatsmitteln für Klimadaten ausgeht und damit eine gewisse Realitätsnähe andeutet, andererseits aber auch nur ein reines Diffusionsmodell wie bei Glaser nutzt, ebenfalls ohne Berücksichtigung von Sorptions- und Kapillaritätseinflüssen und damit ebenfalls nur ein Bewertungsinstrument. Das würde bedeuten, dass hierfür in analoger Weise ein neuer Bewertungsmaßstab gefunden werden müsste. Zu ähnlich kritischen Einschätzungen der begrenzten Tauglichkeit von DIN EN ISO 13788 kommen auch Hauser/Otto [5]. Dann ist es sinnvoller, man belässt es zunächst bei dem einfachen Bewertungsmodell mit Blockklima-Randbedingungen, wofür ja bereits ein Bewertungsschema existiert.

Ausgehend davon und vor dem Hintergrund der hier durchgeführten Vergleichsrechnungen wäre es jedoch zweckdienlich und praktisch denkbar, künftig von einer erweiterten feuchtetechnischen Bewertungsmethodik auszugehen. Dies könnte in einem 2-stufigen Ablauf geschehen:

Schritt 1: Prüfung mit Hilfe des einfachen Blockklima-Modells (Periodenbilanz-Verfahren) und den vereinfachten neuen Randbedingungen, ggf. z. B. mit ergänzender Schimmelrisiko-Überprüfung (siehe DIN 4108-2), wobei dann bereits die gleichen thermischen Randbedingungen vorlägen.

Schritt 2: Falls das Prüfergebnis aus Schritt 1 nicht eindeutig oder grenzwertig wäre, sollte eine weitere Abklärung mit Hilfe eines echten normativ tauglichen Si-

mulationsmodells (Bedingungen dafür siehe DIN EN 15025) erfolgen, wobei Datensätze für verschiedene repräsentative Klimastandorte (auch künstlich generierte Jahresgänge, z.B. MRY, Moisture Reference Year), ggf. in 3 Klimaklassen, für typische Innen und Außenbedingungen entwickelt werden könnten. Die Grundlagen dafür wären gegeben, z. B. Innenraumklima-Klassen mit sinusförmigen Approximationen, reale Jahresgänge für thermische und hygrische Außenbedingungen, z.B. für kartografierte Referenz-Zonen wie "trocken-kalt", "moderat", "feucht-warm" (z. B. analog Übersichtskarte für Sommerlichen Wärmeschutz in DIN 4108-2).

Da bis heute für instationäre Berechnungen des Feuchteverhaltens von Bauteilen noch keine allgemeingültigen Randbedingungen bezüglich Innen- und Außenklima vorliegen, sind diese Verfahren derzeit im öffentlich rechtlichen Nachweis nicht bindend. Daraus folgt, dass dort aktuell nur das normative Glaserverfahren angewendet werden kann.

Eine Analyse der Ergebnisse von Tauwasser- und Verdunstungsmassen unter Verwendung der „neuen vereinfachten“ Klimarandbedingungen zeigt, dass die dabei vorgenommene Anpassung an Werte, die bereits in anderen DIN-Normen Verwendung finden (siehe DIN 4108-2), für die untersuchten Typkonstruktionen zu weitgehend sicheren Ergebnissen hinsichtlich Zulässigkeitsbewertung führt. Es zeigt sich aber auch, dass darüber hinausgehend eine weitere Stufe in der feuchtetechnischen Bewertung eingeführt werden sollte, da der einfache Bewertungsmaßstab in DIN 4108-3, der schon vor Jahrzehnten eingeführt worden ist und sich ja auch bewährt hat, der Vielfältigkeit heutiger Baukonstruktionen nicht immer voll Rechnung trägt. Die methodischen Grundlagen für diese Verfahrenserweiterung wären vorhanden, die erforderlichen Datensätze für Stoffeigenschaften und Klimadaten-Klassifizierungen liegen weitgehend vor bzw. könnten in einer entsprechenden Aufbereitung zur Verfügung gestellt werden.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen der Überarbeitung von DIN 4108-3:2001-07 war vorgegeben, das Verfahren nach DIN EN ISO 13788 (Monatsbilanz-Verfahren) zu integrieren, wobei die Festlegung der zu verwendenden Klimarandbedingungen nationale Angelegenheit bleiben sollte. In Kenntnis der bekannten Unzulänglichkeiten dieses Verfahrens vom Ansatz wie auch von den Randbedingungen her, wurde beschlossen, die Randbedingungen so zu definieren, dass das feuchtetechnische Bewertungs-Jahr in eine Winterperiode (Tauperiode, 90 Tage) und eine Sommerperiode (Verdunstungsperiode, 90 Tage) eingeteilt werden soll. Das geschah in Analogie zum bereits existierenden Norm-Diffusionsverfahren nach Glaser (Periodenbilanz-Verfahren). Neben der Anpassung der Periodendauer sind bei der Gelegenheit auch Anpassungen bei den thermischen und hygrischen Randbedingungen derart vorgenommen worden, dass bestimmte Unzulänglichkeiten (z. B. Umkehrdiffusionseffekt mit Tauwasserbildung bei Dächern in der Verdunstungsperiode) eliminiert werden konnten.

Dabei ist allerdings zu prüfen, ob mit den neuen Randbedingungswerten bisher zulässige bzw. unzulässige Konstruktionen auch weiterhin als zulässig oder unzulässig nachgewiesen werden. Von der Qualität der Anforderung her soll keine "Aufweichung" sondern tendenziell eher eine leichte Verschärfung erreicht werden, um auf der sicheren Seite zu bleiben.

Zur Klärung dieser Fragen wird im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens zunächst auf analytischer Basis der Frage nachgegangen, wo bei den Szenarien des Tauwasserausfalls in Bauteilen die kritischen Werte abhängig von den Wasserdampfdiffusionswiderständen liegen. Aus dieser Betrachtung folgt, dass – mit wenigen Ausnahmen – die neuen (auch die vereinfachten neuen) Klimarandbedingungen zu leicht verschärften Anforderungen führen.

Um diese Aussage zu präzisieren, werden acht ausgesuchte, unterschiedlich gefährdete Typkonstruktionen hinsichtlich Tauwasserausfall und Zulässigkeit untersucht. Als Berechnungsmethode wird das Glaser(Periodenbilanz)-Verfahren mit den alten Klimarandbedingungen nach DIN 4108-3:2001-07, mit neuen Klimawerten und mit neuen vereinfachten Werten untersucht.

Zur Absicherung der Ergebnisse aus dem Diffusionsverfahren nach Glaser werden an denselben Typkonstruktionen instationäre Simulationsrechnungen mit dem Programm WUFI durchgeführt, wobei bekanntlich Sorptions- und Kapillaritätseffekte mit berücksichtigt werden können und speziell analysierte reale Klimadatensätze (Stundenmittel) für Referenz-Klimazonen " trocken-kalt" und " feucht-warm" (ausgewählt: Hof und Karlsruhe) über eine Dauer von 20 Jahren zugrunde liegen. Wie die Simulationsrechnungen zeigen, muss für derartige Untersuchungen von Bauteilen mehr als ein Referenzstandort betrachtet werden. Außerdem zeigt sich deutlich, dass beim wärmeren Referenzort ein deutlich höherer Maximalwert der inneren Raumlufffeuchte (70 %) im Vergleich zum trocken-kalten Standort (60 %) anzusetzen ist. Um bei der Simulation die thermischen und hygrischen Trägheiten und die daraus resultierende Einschwingzeit hinreichend genau berücksichtigen zu können, ist meist eine Berechnungsdauer von mindestens zehn Jahren erforderlich.

Die Auswertung und der Vergleich der Berechnungen nach dem Glaser-Verfahren und den Simulationen zeigen, dass beim Periodenbilanz-Verfahren, auch mit den neuen und den vereinfachten neuen Klimarandbedingungen, bei einem einfachen Ansatz eine hinreichend sichere Beurteilung von Bauteilen hinsichtlich Tauwasserausfall im Inneren möglich ist. Konstruktionen die nach Glaser „alt“ nicht zulässig sind, sind in der Regel auch nach Glaser „neu vereinfacht“ nicht zulässig. Weiterhin wird deutlich, dass Bauteile die nach dem Glaser-Verfahren zulässig sind, auch bei einer Simulation als unkritisch eingestuft werden können bzw. dass das Glaser-Verfahren meist schärfere Anforderungen liefert als die Simulation.

Mit den vorliegenden Untersuchungen an einer Reihe von ausgewählten Typkonstruktionen können somit die „neuen“ und die „neuen vereinfachten“ Randbedingungen für ein Periodenbilanz-Verfahren nach Glaser als tauglich eingestuft werden. Aus den Untersuchungen ergeben sich jedoch auch Hinweise darauf, wie eine künftig verbesserte feuchtetechnische Bewertung prinzipiell aussehen könnte und wie dies methodisch anzugehen wäre.

9. Literatur

- [1] DIN 4108-3:2001-07 :Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- [2] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen — Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation
- [3] DIN EN ISO 13788:2001-11 :Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren.
- [4] Häupl, P., Fechner, H. und Stopp, H.: Erarbeitung eines Verfahrens und einer Planungsrichtlinie zur hygrischen Bemessung von Außenbauteilen. Untersuchungsbericht Institut für Bauklimatik, TU Dresden 2001.
- [5] Hauser, G. und Otto, F.: Auswirkungen der neuen europäischen Norm EN ISO 13788 " Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren" auf Konstruktion und Holzschutz von Außenbauteilen in Holzbauart. DIBT- und DGfH geförderte Untersuchung, Bericht des Ingenieurbüros Hauser, Az. IBH 457/01, Baunatal 2003.
- [6] Künzel, H. M.: Raumlufftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung Nr. 314, 24 (1997).