



Aufgabe für die Diplomarbeit

Name, Vorname:	Susan Friedrich	Matr.Nr.: 254995
Bearbeitungszeit:	vom 21.10.2002 bis 20.12.2002	(8 Wochen)
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer	
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing. Jens Bode	

Thema: Untersuchungen über die Anwendbarkeit unterschiedlicher Nachweisverfahren um Tauwasserschutz von Bauteilkonstruktionen

Der Tauwasserschutz im Inneren von Bauteilkonstruktionen wird in der Regel nach dem genormten Verfahren aus DIN 4108-3 (Glaser-Verfahren 1959) ergänzend mit dem Verfahren nach Jenisch (1971) nachgewiesen. Im Zuge der europäischen Normung und der damit verbundenen Neuordnung der nationalen Normen auf dem Gebiet des Wärmeschutzes wurde 2001 die Norm DIN EN ISO 13788 als teilweiser Ersatz für DIN 4108-3 in das nationale Normenwerk übernommen. Aufbauend auf der Methodik des Glaser - Verfahrens werden in dieser Norm die Nachweisverfahren zum Tauwasserschutz durch detailliertere und universellere Randbedingungen und Berechnungsmethoden neu geregelt. Erfahrungen im Umgang mit den neuen Verfahren aus DIN EN ISO 13788 liegen weitestgehend noch nicht vor.

Im Einzelnen werden u. a. folgende Teilleistungen verlangt:

1. Recherche zum Inhalt und zur Entstehung der drei o. g. Nachweisverfahren
2. Durchführung einer Vergleichsstudie zu den o. g. Nachweisverfahren anhand von mehreren Fallbeispielen mit Variation von Bauteiltyp, Konstruktion und Klimarandbedingungen
3. Analyse zu den Anwendungsmöglichkeiten der Norm DIN EN ISO 13788. Hierbei ist auch auf den Nachweis zum Schutz vor Oberflächenfeuchte und die informativen Anhänge zu dieser Norm (insbesondere auch Anhang F.2) einzugehen
4. Recherche zu Computerprogrammen die das Berechnungsverfahren nach DIN EN ISO 13788 zum Inhalt haben

Alle Berechnungen und deren Randbedingungen sind detailliert und nachvollziehbar darzulegen.

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	5
2	ZUSAMMENFASSUNG	7
3	BERECHNUNGSVERFAHREN.....	10
3.1	Gegenüberstellung der Verfahren.....	10
3.2	Glaser-Verfahren.....	13
3.2.1	Entstehung	14
3.2.2	Inhalt	14
3.2.2.1	Berechnungsmethodik nach Glaser (1959)	15
3.2.2.2	Verwendung des Glaser-Verfahrens in DIN 4108-3.....	26
3.3	Verfahren nach Jenisch	40
3.3.1	Entstehung	41
3.3.2	Inhalt	43
3.3.2.1	Grundlagen.....	43
3.3.2.2	Klimaverhältnisse	46
3.3.2.3	Berechnung der Kondensations- bzw. Austrocknungsmengen	46
3.4	Verfahren nach DIN EN ISO 13788	53
3.4.1	Entstehung	53
3.4.2	Inhalt	53
3.4.2.1	Grundlagen.....	53
3.4.2.2	Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung der kritischen Oberflächenfeuchte.....	59
3.4.2.3	Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren.....	62
4	VERGLEICHSTUDIE AN FALLBEISPIELEN	72
4.1	Variation Bauteiltyp	72
4.1.1	Außenwand, einschalig	72
4.1.1.1	Berechnung nach DIN 4108-3	73
4.1.1.2	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	77

4.1.1.3	Berechnung nach <i>Jenisch</i>	93
4.1.1.4	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse.....	99
4.1.2	Außenwand mit Innendämmung	103
4.1.2.1	Berechnung nach DIN 4108-3	103
4.1.2.2	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	104
4.1.2.3	Berechnung nach <i>Jenisch</i>	104
4.1.2.4	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse.....	105
4.1.3	Außenwand in Leichtbauweise.....	106
4.1.3.1	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse.....	106
4.1.4	Geschossdecke unter belüftetem Dachraum	107
4.1.4.1	Berechnung nach DIN 4108-3	107
4.1.4.2	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	108
4.1.4.3	Berechnung nach <i>Jenisch</i>	109
4.1.4.4	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse.....	109
4.1.5	Flachdach.....	109
4.1.5.1	Berechnung nach DIN 4108-3	110
4.1.5.2	Berechnung nach <i>Jenisch</i>	110
4.1.5.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	111
4.1.5.4	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse.....	111
4.1.6	Steildach	112
4.1.6.1	Berechnung nach DIN 4108-3	112
4.1.6.2	Berechnung nach <i>Jenisch</i>	113
4.1.6.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	113
4.1.6.4	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse.....	113
4.1.7	Sohlplatte an Erdreich	114
4.1.7.1	Verfahren nach DIN 4108-3.....	114
4.1.7.2	Verfahren nach DIN EN ISO 13788.....	115
4.1.7.3	Verfahren nach <i>Jenisch</i>	115
4.1.7.4	Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse.....	116
4.2	Variation Klimabedingungen	116
4.2.1	Außenwand, Standort Hamburg - Dresden	116
4.2.2	Flachdach, Standort Berlin – Karlsruhe.....	118
4.2.3	Außenwand, europäische Standorte nach Einteilung in Klimazonen	120
4.2.3.1	Außenwand, einschalig	122
4.2.3.2	Außenwand mit Innendämmung.....	123

4.3	Übersicht	124
5	ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER DIN EN ISO 13788	128
5.1	Nachweis zum Schutz vor Tauwasser im Bauteilinneren	128
5.2	Nachweis zum Schutz vor Oberflächenfeuchte	129
5.2.1	Einflussgrößen	129
5.2.2	Beispielberechnung Massivbauweise.....	131
5.2.3	Beispielberechnung Leichtbaubauweise	133
5.2.4	Verfahrensanalyse	134
5.2.4.1	Wärmebrücken	134
5.2.4.2	Wärmedurchlasswiderstand	135
5.2.4.3	Lüftungsverhalten	135
5.2.4.4	Raumseitige Feuchtezufuhr.....	136
5.2.4.5	Raumseitige Lufttemperatur	136
5.2.4.6	Raumseitige relative Luftfeuchte	136
5.3	Feuchteumverteilung in der flüssigen Phase	137
6	DÄMMWERK-PROGRAMM	139
7	LITERATURVERZEICHNIS	141
8	TABELLENVERZEICHNIS	143
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	145

1 Einleitung

Wasser ist Voraussetzung allen Lebens auf der Erde. Im Bauwesen jedoch ist Wasser in allen drei Aggregatzuständen äußerst unerwünscht.

Die Ansammlung von Feuchtigkeit in Bauteilen kann beträchtliche Bauschäden verursachen, wie zum Beispiel das Auftreten von Schimmel- und sonstigen Pilzen. Auch wirkt sich Feuchtigkeit nachteilig auf das Innenklima eines Gebäudes aus. Weiterhin beeinträchtigt der Feuchtigkeitsgehalt einer Wand ihre Wärmeschutzwirkung erheblich, da die Wärmeleitfähigkeit der Bau- und Dämmstoffe mit ihrem Feuchtigkeitsgehalt stark ansteigt.¹

Bauteile werden auf verschiedene Arten durch Feuchtigkeit beansprucht:

- Baufeuchte, die z. B. durch das Anmachwasser bei Beton hervorgerufen wird,
- aufsteigende Feuchte bzw. drückendes Wasser aus dem Erdreich,
- Niederschlagsfeuchte infolge Schlagregen,
- Wasserdampf, der aus der Wohnfeuchte resultiert.²

Schon sehr früh beschäftigten sich Wissenschaftler mit den Ein- bzw. Auswirkungen von Wasser auf Bauteilen, insbesondere die Vorgänge der Wasserdampfwanderung in Raumbegrenzungsflächen wurden untersucht.

Erste Ursprünge liegen schon bei *A. Fick* („Über die Diffusion“) im Jahre 1855 und *J. Stefan* in den Jahren 1871 und 1874 mit den Titeln „Über das Gleichgewicht und die Bewegung insbesondere die Diffusion von Gasmengen“ und „Versuche über die Verdampfung“. Ferner berichtete *M. Knudsen* 1910 über die thermische Molekularströmung.

Den Wasserdampfdurchgang und die Wasserausscheidungen quantitativ zu berechnen, wurde erst seit 1956 mit der Aufstellung der sogenannten Gemeinschaftsgleichung möglich, an deren Aufstellung u.a. *J. S. Cammerer*, *K. Seiffert*, *H. Reiher*, *K. Egner*, *P. Görling* und *W. Caemmerer* beteiligt waren.³

¹ Gesundheitsingenieur, 107. Jahrgang 1986, Heft 2, S. 85

² Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Feuchteschutz 1, S. 2

³ Karl Seiffert: Wasserdampfdiffusion im Bauwesen, 1967, S. 9f

Erst zu diesem Zeitpunkt wurden die geschaffenen wissenschaftlichen Grundlagen der Praxis nahe gebracht, somit konnten erstmals Diffusionsberechnungen für alle denkbaren Baukonstruktionen mit vertretbarem Zeitaufwand durchgeführt werden.

Im Jahre 1959 veröffentlichte *H. Glaser* das von ihm entwickelte graphisch–rechnerische Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, welches die Grundlage für alle späteren gültigen Verfahren bildete. So baute z. B. *R. Jenisch* 1971 mit seinem Berechnungsverfahren auf *Glaser* auf.

Nach DIN 4108-3 werden bei nichtklimatisierten Wohn- und Büroräumen vereinfachte Annahmen für die Klimarandbedingungen zugrunde gelegt [siehe Abschnitt 3.2.2.2b)], das *Glaser*–Verfahren wird angewandt. Unter anderen Klimabedingungen, z. B. in Schwimmbädern, muss das tatsächliche Raumklima sowie das Außenklima am Standort des Gebäudes mit deren zeitlichen Verlauf berücksichtigt werden. Hierbei wird auf das Verfahren nach *Jenisch* zurückgegriffen.

Im November 2001 erschien die europäische Norm, DIN EN ISO 13788, welche die DIN 4108-3 teilweise ersetzt (siehe Abschnitt 3.4).

In der vorliegenden Arbeit wird auf die oben genannten Nachweisverfahren eingegangen. Insbesondere werden die „alten“ Verfahren mit der seit November 2001 gültigen europäischen Norm DIN EN ISO 13788 verglichen und auf deren Anwendbarkeit hin überprüft.

2 Zusammenfassung

Die untersuchten Berechnungsverfahren zur Beurteilung eines Bauteiles hinsichtlich der Tauwassergefahr legen unterschiedliche Randbedingungen zugrunde.⁴ Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem bisher gebräuchlichen Verfahren nach DIN 4108-3 und der europäischen Normung stellen die Klimabedingungen dar. Während nach DIN 4108-3 vereinfachte Werte festgelegt werden, arbeitet die DIN EN ISO 13788 mit tatsächlich vorhandenen Bedingungen am Standort des Bauteiles. Zusätzlich werden für die Verhältnisse im Raum von der Gebäudenutzung abhängige Innenbedingungen angesetzt. Für extreme Verhältnisse, wie z. B. in Schwimmhallen, wurde bisher das Verfahren nach *Jenisch* angewendet, welches ebenso mit den tatsächlichen Klimabedingungen rechnet.

Unter Berücksichtigung der Sonnenwärmeeinstrahlung wird nach DIN 4108-3 bei Dächern ein günstigerer Nachweis geführt. Das unter Abschnitt 4 berechnete Flach- bzw. Steildach wurde daher als zulässig eingestuft. Bei Ansatz der tatsächlich vorhandenen Klimabedingungen konnte jedoch die angefallene Tauwassermenge in den Sommermonaten nicht vollständig verdunsten; nach *Jenisch* und DIN EN ISO 13788 wurden die untersuchten Konstruktionen als unzulässig eingestuft.

Der Tauwassernachweis wurde unter Abschnitt 4.2 für Bauteile an verschiedenen Orten in Deutschland sowie in Europa durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass Konstruktionen nördlicherer deutscher Städte größere Tauwassermengen aufweisen als südlichere. Dabei ist es auch möglich, dass für ein und dasselbe Bauteil Tauwasserbildung an einem Standort vorausgesagt wird, an einem anderen jedoch nicht.

Bei Betrachtung von Bauteilen an verschiedenen europäischen Standorten wurden, wie erwartet, die ungünstigsten Beurteilungen bezüglich der Tauwassermengen für das winterfeuchte Kaltlima⁵ vorausgesagt.

Einen weiteren Unterschied stellen die Wärmeübergangswiderstände⁶ dar. Während nach DIN 4108-3 die Wärmestromrichtung ausschlaggebend ist, ist es nach DIN EN ISO 13788 die Wärmeträgheit. Der ungünstiger angesetzte raumseitige Wärmeübergangswiderstand nach der europäischen Norm bewirkt zwar einen stärkeren Temperatur- und somit Sättigungsdruckabfall,

⁴ Vgl. Abschnitt 3.1, Tabelle 3-1

⁵ Siehe Abschnitt 4.2.3

⁶ Vgl. Abschnitt 3.1, Tabelle 3-1

jedoch hat er keinen Einfluss auf die Tauwassermenge, da die Akkumulation nach DIN EN ISO 13788 von der Außenseite begonnen wird. Grenzt ein Bauteil an Erdreich, wird es durch den größeren Wärmeübergangswiderstand günstiger beurteilt. Bei hinterlüfteten Bauteilen erfolgt eine ungünstigere Beurteilung.

Neu ist die in DIN EN ISO 13788 festgelegte zusätzliche Aufteilung von Schichten mit einem hohen Wärmedurchlasswiderstand (wie Dämmmaterial) in eine Reihe von Schichten mit einem maximalen Wärmedurchlasswiderstand von $0,25 \text{ m}^2 \text{ W/K}$. Dabei ist jede dieser Schichten als separate Schicht zu behandeln. Diese Regelung führt zu einer größeren Genauigkeit, da der Sättigungsdampfdruck in einer solchen Schicht nicht mehr linear, sondern gekrümmt verläuft.

Die Begrenzung der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu = 100.000$ bewirkte bei dem untersuchten Steildach⁷ einen größeren Tauwasserausfall in der Verdunstungsperiode als nach DIN 4108-3, welche für diffusionsdichte Materialien $s_d \geq 1500 \text{ m}$ vorschreibt.

Der für die Berechnung der Tauwassermenge benötigte Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient δ wird bei den Verfahren nach DIN 4108-3 und DIN EN ISO 13788 unterschiedlich verwendet.⁸ Mit dem von der europäischen Norm angesetzten Wert wird eine größere Tauwassermenge ermittelt als nach DIN 4108-3.

Das Verfahren nach *Jenisch*, welches ebenso mit tatsächlich vorhandenen Klimabedingungen rechnet, akkumuliert die Tauwassermengen aller vorangegangenen Monate ohne das Jahr zu begrenzen. Dadurch ist eine Bilanzierung über einen längeren Zeitraum möglich. Nach DIN EN ISO 13788 wird mit dem ersten Monat mit Tauwasserausfall in der Tauperiode begonnen, wobei der Zeitraum der Berechnung zwölf Monate beträgt. Dadurch sammelt sich im Bauteil nur soviel Wasser an, wie im Laufe eines Jahres gebildet werden kann. Die akkumulierten Tauwassermengen unterscheiden sich demzufolge erheblich.

Im Gegensatz zur DIN 4108-3 berücksichtigt die DIN EN ISO 13788 den erneuten Tauwasserausfall in der Verdunstungsperiode.

Auch die Bewertung der Bauteilkonstruktionen ist verschieden. Nach DIN 4108-3 wird ein Bauteil als ‚zulässig‘ oder ‚unzulässig‘ eingestuft, wobei die Beurteilungskriterien klar formuliert sind. Die DIN EN ISO 13788 verlangt im Falle einer vollständigen Verdunstung des Tauwassers

⁷ siehe Abschnitt 4.3

⁸ Vgl. Abschnitt 4.1.1.1

in den Sommermonaten die Angabe der Grenzschicht mit der maximalen Tauwassermenge sowie den dazugehörigen Monat. Die Aussage ‚zulässig‘ gibt es nicht; es wird auf gesetzliche Bestimmungen und Produktnormen verwiesen.

In Abschnitt 5.1 sind die in der DIN EN ISO 13788 angegebenen Fehlerquellen aufgelistet. Dabei wird klar, dass dieses Verfahren trotz des enormen Rechenaufwandes⁹ lediglich stationäre Vorgänge untersucht. In der Norm wird zusätzlich darauf hingewiesen, dass das Verfahren zur Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren lediglich zur Einschätzung eines Bauteils dient; genaue Vorhersagen können damit nicht getroffen werden.¹⁰ Somit stellt sich die Frage, ob die in Abschnitt 5.1 erwähnten EDV-Berechnungsmodelle¹¹ nicht vorzuziehen wären, da damit die realen Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge ermittelt werden können. „Längerfristig werden weiterentwickelte instationäre Rechenverfahren das Normberechnungsverfahren nach und nach ersetzen [...]“¹²

Für den Nachweis zum Schutz vor Oberflächenfeuchte sind einige Einflussgrößen wesentlich: Die wärmeschutztechnische Güte, die raumseitige Feuchtezufuhr sowie die Innentemperatur und das Heizungssystem.¹³ Für die Gefahr der Schimmelbildung auf Bauteiloberflächen spielt hierbei das Heiz- und Lüftungsverhalten der Bewohner eine entscheidende Rolle. Dieses Verhalten kann nicht abgeschätzt werden.

Durch den Ansatz eines ungünstigen raumseitigen Wärmeübergangswiderstandes wird der ungünstigste Fall der Gefahr der Tauwasserbildung in einer Raumecke berücksichtigt. Zudem wirkt sich dieser Wärmeübergangswiderstand auf den Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils aus, der sich wiederum positiv auf die wärmeschutztechnische Güte auswirkt.

Die Einteilung in raumseitige Luftfeuchteklassen erfolgt aufgrund der Gebäudenutzung. Ein Sicherheitsfaktor soll instationäre Schwankungen ausgleichen.

In der DIN EN ISO 13788 wird zusätzlich ein Verfahren beschrieben, welches die Feuchteumverteilung in der flüssigen Phase auf der Grundlage des kritischen Feuchtegehaltes berücksichtigt. Inwiefern diese Berechnung der Realität entspricht bleibt unklar.

⁹ Ein EDV-Programm ist zwingend erforderlich!

¹⁰ DIN EN ISO 13788.2001-11, Abschnitt 6.1, Seite 10

¹¹ z. B. WUFI, Fraunhofer Institut

¹² H. M. Künzel: Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis?, IBP-Mitteilung Fraunhofer Institut, Nr. 26, 1999

¹³ gemäß den Abschnitten 5.2 und 5.2.4

3 Berechnungsverfahren

Im Folgenden werden die zur Zeit in der Praxis verwendeten Berechnungsverfahren zur Ermittlung von Kondensations- und Austrocknungsmengen in Baukonstruktionen beschrieben und gegenübergestellt.

3.1 Gegenüberstellung der Verfahren

Mit Hilfe des rechnerisch-graphischen Verfahrens nach *Glaser* lassen sich Dampfdiffusionsvorgänge in Baukonstruktionen untersuchen. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich das Dampfdruckgefälle und das Temperaturfeld in einem stationären Zustand befinden. In Deutschland wird das *Glaser*-Verfahren nach DIN 4108-5 mit den Klimarandbedingungen der DIN 4108-3 angewendet. Die dort „angegebenen Berechnungen beziehen sich auf plattenförmige, ein- oder mehrschichtige Bauteile mit planparallelen Oberflächen bzw. Trennflächen und eindimensionalem, zeitlich konstantem Wärmestrom.“¹⁴ Die Klimarandbedingungen werden vereinfacht festgelegt (Tabelle 3-4).

Jenisch entwickelte ein Berechnungsverfahren, mit dem es möglich ist, „unter Verwendung des Jahresmittelwertes und der Häufigkeit des Tagesmittels der Außenlufttemperatur am Standort eines Gebäudes festzustellen, ob die während eines Jahres in einem Bauteil anfallende Tauwassermenge in der Verdunstungsperiode wieder austrocknet. Weiterhin erlaubt das Verfahren festzustellen, bis zu welchem Feuchtegehalt der Raumluft dies der Fall ist.“¹⁵ Ebenso wie beim *Glaser*-Verfahren werden auch hier stationäre Bedingungen vorausgesetzt. Nach DIN 4108-3¹⁶ wird die Berechnungsmethode nach *Jenisch* angewandt, wenn die Auswirkungen des tatsächlichen Raumklimas und des Außenklimas am Standort des Gebäudes mit zu erfassen sind.¹⁷

Die Norm DIN EN ISO 13788 ersetzt teilweise die DIN 4108-3 und beschreibt vereinfachte Berechnungsverfahren zur Ermittlung der kritischen Oberflächentemperatur sowie der Gefahr der Tauwasserbildung im Bauteilinneren. Dabei werden mittlere Monats- bzw. Jahreswerte aus

¹⁴ DIN 4108-3: 2001-07, S. 15, Abschnitt A.3

¹⁵ WTA-Schriftenreihe, Heft Nr. 18, R. Käser: Grenzen der Standard-Verfahren in der Praxis, Abschnitt 2, S. 23

¹⁶ DIN 4108-3: 2001-07, S. 14, Abschnitt A.2.2

¹⁷ WTA-Schriftenreihe, Heft Nr. 18, R. Käser: Grenzen der Standard-Verfahren in der Praxis, Abschnitt 2, S. 23

Klimatabellen, abhängig vom Standort und der Nutzung des Gebäudes, verwendet. Auch hier werden stationäre Bedingungen sowie eindimensionale Bauteile vorausgesetzt.

Die Berechnungsverfahren unterscheiden sich in einigen Randbedingungen. Diese sollen in der folgenden Tabelle gegenübergestellt werden. Bei dem Verfahren nach *Jenisch* werden, abgesehen von den Klimabedingungen, sonstige Randbedingungen wie in DIN 4108-3 zugrundegelegt. Weitere Ergänzungen bzw. Abweichungen sind deshalb in der Tabelle unter der DIN 4108-3 zu finden.

Tabelle 3-1 Gegenüberstellung der Randbedingungen nach DIN 4108-3 und Jenisch mit der DIN EN ISO 13788 zur Tauwasserbildung im Bauteilinneren

DIN 4108-3	DIN EN ISO 13788
Klimarandbedingungen	
Tauperiode: 1440 h außen: -10°C und 80 % innen: 20°C und 50 % Verdunstungsperiode: 2160 h außen und innen: 12°C und 70 % Klima im Tauwasserbereich: 100 % Dächer: 20°C Oberflächentemperatur <u>Jenisch</u> : Verwendung von Jahresmittelwerten	Außenklima: Ansatz von monatlichen Mittelwerten Innenklima: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperaturen sind national festgelegt (in Deutschland 20°C) ▪ Relative Luftfeuchte: Berechnung, abhängig von Gebäudenutzung und Außenlufttemperatur
Luftschichten (diffusionsoffene Schichten)	
Wärmedurchlasswiderstände für: Ruhende Luftschichten: Werte gemäß Tabelle 3-3 Schwach belüftete Luftschichten: die Hälfte des entsprechenden Wertes gemäß Tabelle 3-3 Stark belüftete Luftschichten: Vernachlässigung der Wärmedurchlasswiderstände der Luftschicht und aller anderen Schichten zwischen Luftschicht und Außenumgebung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Für diffusionsoffene Schichten gilt: $s_d \leq 0,50m$ ▪ Zusätzlich gilt für <u>außenseitige Schichten</u>: $min s_d = 0,10m$ 	Unabhängig von Luftschichtdicke und Neigung wird eine wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke von $s_d = 0,01m$ angesetzt.

DIN 4108-3	DIN EN ISO 13788
Wärmeübergangswiderstände	
<p>Abhängig von der <u>Wärmestromrichtung</u>:</p> <p>R_{sj} : $\rightarrow\uparrow$ 0,13 m² K/W \downarrow 0,17 m² K/W</p> <p>R_{se} :</p> <p>alle Richtungen, an Außenluft: 0,04 m² K/W alle Richtungen, an belüftete Luftschicht: 0,08 m² K/W alle Richtungen, an Erdreich: 0 m² K/W</p>	<p>Abhängig von der <u>Wärmeträgheit</u>:</p> <p>R_{sj} : an Verglasungen und Rahmen: 0,13 m² K/W sonstige Oberflächen: 0,25 m² K/W</p> <p>R_{se} : 0,04 m² K/W</p>
Bauteilschichten	
Jede Bauteilschicht wird als separate Schicht betrachtet.	
	Zusätzliche Aufteilung von Schichten mit einem hohen Wärmedurchlasswiderstand (wie Dämmmaterial) in eine Reihe von Schichten mit einem maximalen Wärmedurchlasswiderstand von 0,25 m ² W/K. Jede dieser Schichten wird als separate Schicht betrachtet.
diffusionsdichte Schichten	
$s_d \geq 1500 \text{ m}$	$\mu = 100.000$
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient	
$\delta_a = \frac{1}{Z} = \frac{1}{1,5 \cdot 10^6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}} \right]$	$\delta_0 = 2 \cdot 10^{-10} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \right]$ $= \frac{1}{1,39 \cdot 10^6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}} \right]$
Raumseitiger Sättigungsdampfdruck	
<p>$p_i = \varphi_i \cdot p_{si} \text{ [Pa]}$</p> <p>mit: φ_i - raumseitige relative Luftfeuchte p_{si} - raumseitiger Sättigungsdruck [Pa]</p>	<p>$p_i = \Delta p + p_e \text{ [Pa]}$</p> <p>mit: Δp - raumseitiges Dampfdruckgefälle [Pa], multipliziert mit einen Sicherheitsfaktor von 1,10; abhängig von Gebäudenutzung und Außenlufttemperatur p_e - außenseitiger Dampfdruck [Pa]</p>

DIN 4108-3	DIN EN ISO 13788
Tauwassermenge	
Die Tauwassermenge wird aus der Differenz der eindiffundierenden Feuchtemenge und der von dort ausdiffundierenden Feuchtemenge berechnet.	
<p><u>DIN 4108-3:</u> Die Kondensationsdauer beträgt 1440 h. Tauwasser kann in einer oder zwei Ebenen auftreten, aber auch in einem Bereich.</p> <p><u>Jenisch:</u> Die Tauwassermengen werden abzüglich der Verdunstungsmengen für jeden Monat summiert. Dabei wird der davor liegende Monat mit einbezogen, ohne diese Akkumulation durch das Ende eines Jahres zu begrenzen.</p>	<p>Tauwasser kann an einer oder mehrerer Grenzflächen entstehen.</p> <p>Auch hier findet eine Tauwasser-Akkumulation statt. Dabei wird die Tau- bzw. Verdunstungsperiode über den Zeitraum <u>eines</u> Jahres begrenzt; begonnen wird mit einem zuvor festgelegten Anfangsmonat, welcher den ersten Monat mit Tauwasserausfall in einer Tauperiode darstellt.</p>
Verdunstung	
Erneuter Tauwasserausfall während der Verdunstungsperiode wird nicht berücksichtigt.	Verdunstung an einer Grenzfläche und Tauwasserbildung an einer anderen Grenzfläche in einem Bauteil, bei dem Tauwasserbildung an zwei Grenzflächen aufgetreten ist, wird berücksichtigt.
Bewertung	
<p>Das in der Kondensationsperiode anfallende Tauwasser muss während der Verdunstungsperiode wieder abgeführt werden können.</p> <p>Dabei wird für Baukonstruktionen Tauwasserbildung zugelassen, wenn eine bestimmte flächenbezogene Tauwassermenge nicht überschritten wird.</p> <p>Zusätzlich sind Bauteile festgelegt, für die kein rechnerischer Nachweis erforderlich ist, wenn bestimmte Kriterien erfüllt werden [vgl. Abschnitt 3.2.2.2 g)]</p>	<p>Die Beurteilung erfolgt hinsichtlich der Tauwassermenge, ob und wie viel Tauwasser gebildet wurde bzw. ob es in den Sommermonaten vollständig oder unvollständig verdunstete.</p> <p>Eine Beurteilung ‚nicht bestanden‘ erfolgt für Bauteile, in denen das Tauwasser unvollständig verdunstete. Bei Tauwasserbildung mit vollständiger Verdunstung wird auf gesetzliche Bestimmungen und Produktnormen verwiesen.</p>

An dieser Stelle sollen die verschiedenen Randbedingungen nur genannt werden. Die Auswirkungen werden in Abschnitt 4 erörtert.

3.2 Glaser-Verfahren

„Der Diffusionsvorgang durch mehrschichtige Wände lässt sich einfach verfolgen, wenn der Verlauf des Dampfdruckes abhängig vom spezifischen Diffusionswiderstand bestimmt wird. Dies

ist mit Hilfe eines graphischen Verfahrens auch dann möglich, wenn sich während der Diffusion Feuchtigkeit ausscheidet. Ferner eignet sich das Verfahren zur Ermittlung des erforderlichen Widerstandes von Sperrschichten.“¹⁸

3.2.1 Entstehung

Im Oktober 1959 veröffentlichte Prof. Dr.-Ing. Helmuth *Glaser* ein von ihm entwickeltes rechnerisch-graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, das sogenannte *Glaser*-Verfahren.

„Für homogene und mehrschichtige Wände ließen sich Dampfdruckverlauf, Diffusionsstromdichte usw. bereits mathematisch berechnen; auch dann, wenn sich während der Diffusion Feuchtigkeit ausschied. Die mathematische Berechnung bot dabei vor allem für systematische Untersuchungen Vorteile. Für die Bedürfnisse der Praxis war dies jedoch nicht tauglich, weshalb *Glaser* auf eine graphische Lösung zurückgriff.“¹⁹

3.2.2 Inhalt

Das *Glaser*-Verfahren bildet bis heute die Grundlage für Berechnungen von Dampfdiffusionsvorgängen in Baukonstruktionen. Aus diesem Grund wird das Verfahren zunächst so beschrieben, wie es Prof. *Helmuth Glaser* im November 1959 in der Fachzeitschrift „Kältetechnik“ veröffentlichte. Danach wird der Berechnungsgang nach DIN 4108-3 dargelegt, in der das *Glaser*-Verfahren durch entsprechenden Randbedingungen modifiziert wurde.

Als Hinweis sei noch erwähnt, dass *Glaser* seine graphische Rechenmethode zunächst für Kühlhausdämmungen entwickelte. Für die Beschreibung seines Verfahrens (Abschnitt 3.2.2.1) bedeutet dies, dass an der Außenseite der Wand eine höhere Temperatur herrscht als an der Innenseite. Gleiches gilt auch für den Dampfdruck (Beispiel Kühlraumwand).

¹⁸ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 345

¹⁹ DIN 4108-3: 2001-07, S. 15, Abschnitt A.3

3.2.2.1 Berechnungsmethodik nach Glaser (1959)

a) Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens

Voraussetzung für die unmittelbare Anwendbarkeit des Verfahrens ist eine reine stationäre Dampfdiffusion, das heißt „Sorption und Flüssigtransport bleiben unberücksichtigt.“²⁰

b) Grundlagen²¹

Dampf diffundiert durch eine Wand, wenn der Teildruck des Wasserdampfes in der Luft an der Außenseite der Wand größer ist, als an ihrer Innenseite. Dabei stellt sich die in Gleichung (3.1) dargestellte Diffusionsstromdichte ein:

$$g = \frac{\delta}{\mu R_D T_m s} (P_a - P_i) \quad (3.1)$$

mit: δ - Diffusionszahl
 μ - Diffusionswiderstandszahl
 R_D - Gaskonstante des Wasserdampfes
 T_m - mittlere Temperatur der Wandschicht
 s - Dicke der Wandschicht
 P_a, P_i - Dampfdruck außen bzw. innen

²⁰ Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Feuchteschutz 1, S. 23

²¹ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 345f

„Besteht die Wand aus mehreren Schichten, stellt sich in jeder Schicht ein linearer Dampfdruckverlauf ein, dessen Gefälle sich aber von Schicht zu Schicht ändert (Bild 3-1). Dabei ist die Diffusionsstromdichte in allen Schichten gleich groß. Für jede Schicht gilt eine zu Gleichung (3.1) analoge Beziehung, die in den Gleichungen (3.2) bis (3.4) angeführt wird.“²²

$$g = \frac{\delta_I}{\mu_I R_D T_{Im} s_I} (P_a - P_I) \quad (3.2)$$

$$g = \frac{\delta_{II}}{\mu_{II} R_D T_{II,m} s_{II}} (P_I - P_{II}) \quad (3.3)$$

$$g = \frac{\delta_N}{\mu_N R_D T_{Nm} s_N} (P_{N-1} - P_i) \quad (3.4)$$

mit den Indizes: I, II - Schicht 1 und 2
 N - N - Schichten

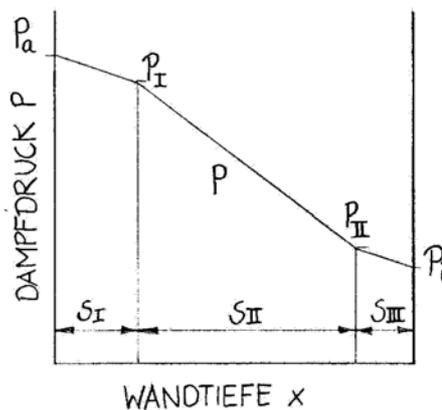


Bild 3-1 Kühlraumwand. Dampfdruckverlauf in einer mehrschichtigen Wand. Keine Feuchtigkeitsausscheidung.²³

²² Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 345f

²³ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 345f

Zur Vereinfachung führt *Glaser* folgende Beziehung ein:

$$\frac{\mu R_D T_m s}{\delta} = \zeta. \quad (3.5)$$

„Die Größe ζ stellt den spezifischen Diffusionswiderstand dar, den eine Schicht von 1 m² Querschnitt und der Dicke s besitzt.“²⁴ Aus den Gleichungen (3.2) bis (3.4) folgt demnach:

$$g = \frac{P_a - P_I}{\zeta_I} \quad (3.6)$$

$$g = \frac{P_I - P_{II}}{\zeta_{II}} \quad (3.7)$$

$$g = \frac{P_{N-I} - P_i}{\zeta_N} \quad (3.8)$$

„Für ein unendlich dünnes Element der Wand erhält man in gleicher Weise“²⁵:

$$g = - \frac{dP}{d\zeta}. \quad (3.9)$$

Die Diffusionsstromdichte ist in der gesamten Wand konstant, wenn sich keine Feuchtigkeit ausscheidet. Demzufolge ist auch das Dampfdruckgefälle konstant. Gemäß diesen Gleichungen verhält sich das Dampfdruckgefälle in jeder Schicht bei konstanter Diffusionsstromdichte g gegenüber dem spezifischen Diffusionswiderstand proportional:

$$\Delta P_N = g \cdot \zeta_N. \quad (3.10)$$

Dabei stellt die Diffusionsstromdichte den Proportionalitätsfaktor dar.

²⁴ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 345f

²⁵ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 345f

Der Dampfdruckverlauf lässt sich nun in einer mehrschichtigen Wand sehr einfach ermitteln. Zunächst werden die spezifischen Diffusionswiderstände $\zeta_I, \zeta_{II}, \dots, \zeta_N$ der einzelnen Schichten berechnet. Dann werden diese auf der Abszisse eines Diagramms eingetragen. Auf der Ordinate werden die Dampfdrücke P_a bei $\zeta = 0$ sowie P_i bei $\zeta = \sum_I^N \zeta_N$ aufgetragen. Beim Verbinden dieser beiden Punkte ergibt sich der Dampfdruckverlauf als gerade Linie.

Es können nun die Dampfdrücke P_I, P_{II} usw. für die Werte $\zeta_I, \zeta_{II}, \dots, \zeta_N$ abgelesen werden. In einem P, ζ -Diagramm verläuft folglich der Dampfdruck auch bei einer mehrschichtigen Wand abhängig von ζ linear, wenn die Diffusionsstromdichte konstant ist. Gleichung (3.9) zufolge ist die Diffusionsstromdichte g gleich der Neigung der Geraden in Bild 3-2 und kann ohne weitere Berechnung direkt abgelesen werden.

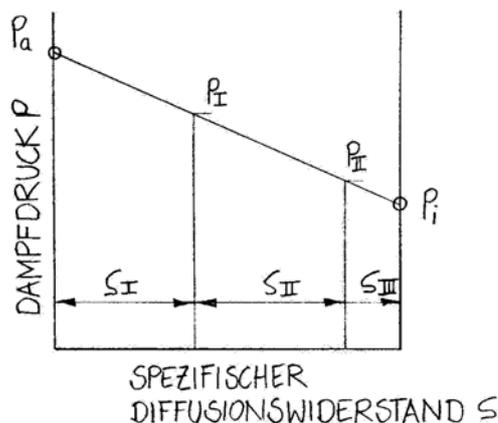


Bild 3-2 Kühlraumwand. Dampfdruckverlauf in einer mehrschichtigen Wand abhängig vom spezifischen Diffusionswiderstand.²⁶

c) Ermittlung des Dampfdruckverlaufes bei Feuchtigkeitsausscheidung

„Während der Diffusion scheidet sich in der Wand Feuchtigkeit aus, falls der Dampf den Sättigungszustand erreicht.“²⁷ Hier lassen sich nun mit Hilfe des P, ζ -Diagramms alle benötigten Größen ermitteln. Dabei vernachlässigt Glaser die bei der

²⁶ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

²⁷ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

Feuchtigkeitsausscheidung frei werdende Kondensationswärme, welche den Temperatur- und Dampfdruckverlauf geringfügig beeinflusst.

Im Folgenden werden die physikalischen Gesichtspunkte aufgezeigt, die bei der Anwendung des graphischen Verfahrens berücksichtigt werden:

1. „Der tatsächliche Dampfdruck kann nie größer werden als der Sättigungsdampfdruck, welcher der örtlichen Wandtemperatur zugeordnet ist. Es muss also folgende Bedingung erfüllt sein“²⁸:

$$P \leq P_s . \quad (3.11)$$

2. „Die Diffusionsstromdichte kann im Beharrungszustand längs des Diffusionsweges konstant bleiben oder abnehmen, aber nie größer werden, sofern in der Wand keine Feuchtigkeitsquellen vorhanden sind; demzufolge gilt“²⁹:

$$\frac{d^2 P}{d\zeta^2} \geq 0 \quad (3.12)$$

3. „Solange der tatsächliche Dampfdruck kleiner als der örtliche Sättigungsdruck ist, muss die Diffusionsstromdichte konstant bleiben“.³⁰ Somit ergibt sich Gleichung (3.13) aus Gleichung (3.9):

$$P < P_s : \quad \frac{dP}{d\zeta} = const \quad (3.13)$$

²⁸ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

²⁹ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

³⁰ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

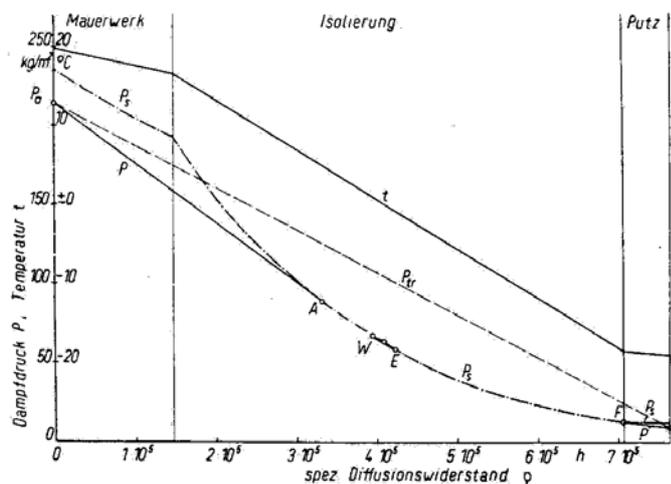


Bild 3-3 Temperatur- und Dampfdruckverlauf in einer Kühlraumwand³¹

In Bild 3-3 ist der Verlauf der Temperatur t in einer mehrschichtigen Wand abhängig vom spezifischen Diffusionswiderstand ζ dargestellt. Der Temperaturverlauf bleibt linear, da sich ζ gemäß Gleichung (3.5) innerhalb einer Schicht linear mit der Wandtiefe s verändert.

Weiterhin sind der zum Temperaturverlauf gehörende Verlauf des Sättigungsdampfdruckes P_s sowie die Dampfteildrücke P_a und P_i dargestellt.

Die drei zuvor genannten Bedingungen werden erfüllt: „zunächst nimmt der Dampfdruck P_a an der wärmeren Außenseite der Wand linear mit dem spezifischen Diffusionswiderstand ζ ab und erreicht die Sättigungskurve tangential im Punkt A.“³² Die Diffusionsstromdichte g bleibt gemäß Gleichung (3.9) unverändert, da das Dampfdruckgefälle $\frac{dP}{d\zeta}$ in diesem Bereich konstant ist.

Somit wird $P < P_s$ eingehalten. In dem Bereich von Punkt A bis Punkt W wird Feuchtigkeit in Form von Wasser (siehe zugehörige Temperatur) ausgeschieden, da das Dampfdruckgefälle und die Diffusionsstromdichte stetig kleiner werden. Zwischen den Punkten W und E ändert sich der Dampfdruck linear. „Es handelt sich hierbei um den engen Bereich, der sich beiderseits

³¹ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

³² Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

der 0°C–Grenze erstreckt und in dem sich aufgrund früherer Untersuchungen³³ keine Feuchtigkeit ausscheiden kann, so dass hier die Diffusionsstromdichte konstant bleibt.“³⁴

Zur Erklärung: „der Temperaturgradient der Dampfdruckkurven für die Sättigung über Wasser und Eis bei 0°C ändert sich unstetig. Die Gerade $W - E$ stellt die gemeinsame Tangente an die mit einem Knick aneinander stoßenden Sättigungskurven für Wasser und Eis dar, welche sie in den Punkten W (Wasser) und E (Eis) berührt. In diesem Bereich kann der Dampfdruck dem Sättigungsdruck nicht folgen, da dies gegen die zweite Bestimmung³⁵ verstoßen würde.“³⁶

„Von Punkt E aus fällt der tatsächliche Dampfdruckverlauf wieder mit dem Verlauf des Sättigungsdruckes bis zum Punkt F (Feuchtigkeit) zusammen.“³⁷ In diesem Bereich wird das Dampfdruckgefälle $\frac{dP}{d\zeta}$ stetig kleiner. Entsprechend verringert sich auch gleichzeitig die Diffusionsstromdichte; Feuchtigkeit wird in Form von Eis (siehe zugehörige Temperatur) ausgeschieden.

„Vom Punkt F aus nimmt der Dampfdruck schließlich linear auf den Wert P_i an der Innenseite der Wand ab. Daher ist er in der letzten Schicht kleiner als der örtliche Sättigungsdruck P_s , sodass in dieser Schicht keine Feuchtigkeit mehr ausgeschieden wird. Dagegen wird das Dampfdruckgefälle im Punkt F unstetig um einen geringen Betrag kleiner. Aus Gleichung (3.9) folgt dann, dass sich an der Schichtgrenze eine gewisse Feuchtigkeitsmenge ausscheiden muss, weil mehr Feuchtigkeit zur Schichtgrenze hindiffundiert, als durch die letzte Schicht aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften fortgeführt werden kann. Die wärmere Seite der letzten Schicht wirkt dabei als Kondensationsfläche, die jedoch für einen Teil des ankommenden Dampfstromes durchlässig ist. Würde sich der Überschuss nicht niederschlagen, sondern aufstauen, so müsste der Dampfdruck ansteigen. Dies würde aber der ersten Bedingung³⁸ widersprechen.“³⁹

³³ Siehe Kältetechnik Heft 10/1958, H. Glaser: „Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis“, S. 358/364 und S. 386/390

³⁴ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

³⁵ siehe Seite 15

³⁶ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

³⁷ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

³⁸ vgl. Seite 15

³⁹ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

„An der Schichtgrenze scheidet sich eine [...] Feuchtigkeitsmenge aus, die sich sofort aus dem P, ζ - Diagramm als Differenz der beiden Dampfdruckgefälle entnehmen lässt, welche unmittelbar vor und hinter der Schichtgrenze herrschen.“⁴⁰

Ebenso können aus dem Diagramm entnommen werden:

- Das örtliche Dampfdruckgefälle g ,
- die örtlich ausgeschiedene Feuchtigkeitsmenge g_o ,
- die in die Wand eindiffundierte Feuchtigkeitsmenge g_a (ist gleich dem Dampfdruckgefälle $\frac{dP_a}{d\zeta_a}$ an der warmen Seite der Wand)
- sowie die zur kalten Seite hindiffundierte Feuchtigkeitsmenge g_i (ist gleich dem dort herrschenden Dampfdruckgefälle $\frac{dP_i}{d\zeta_i}$).

Die gesamte Feuchtigkeitsmenge, die in der Wand ausgeschieden wurde, ergibt sich als Differenz der beiden Diffusionsstromdichten g_a und g_i bzw. der Differenz zwischen den

Dampfdruckgefällen $\frac{dP_a}{d\zeta_a}$ und $\frac{dP_i}{d\zeta_i}$, die zu beiden Seiten der Wand herrschen.

⁴⁰ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 346f

d) Berücksichtigung des äußeren Stoffüberganges⁴¹

In seinen Ausführungen berücksichtigt *Glaser* erstmals den Stoffübergang an den beiden Außenseiten einer Wand. Für den Stoffübergang an der wärmeren Außenseite gilt:

$$g = \frac{\beta_1}{R_D T_1} (P_1 - P_a) \quad (3.14)$$

mit: β_1 - Stoffübergangszahl an der warmen Außenseite
 T_1 - Temperatur der Außenluft
 P_1 - zugehöriger Wasserdampfteildruck

Für die kältere Innenseite gilt analog Gleichung (3.15).

$$g = \frac{\beta_2}{R_D T_2} (P_i - P_2) \quad (3.15)$$

Glaser setzt

$$\zeta_1 = \frac{R_D T_1}{\beta_1} \quad (3.16)$$

und

$$\zeta_2 = \frac{R_D T_2}{\beta_2} \quad (3.17)$$

Damit folgt aus den Gleichungen (3.14) und (3.15)

$$g = \frac{P_1 - P_a}{\zeta_1} \quad (3.18)$$

und

$$g = \frac{P_i - P_2}{\zeta_2} \quad (3.19)$$

Mit Hilfe der beiden spezifischen Diffusionswiderstände ζ_1 und ζ_2 kann der Stoffübergang zu beiden Seiten der Wand berücksichtigt werden. ζ_1 und ζ_2 werden in das P, ζ -Diagramm links

⁴¹ Vgl. Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 347

bzw. rechts vom spezifischen Gesamtdiffusionswiderstand $\sum_I^N \zeta_N$ der Wand angetragen (Bild 3-4).

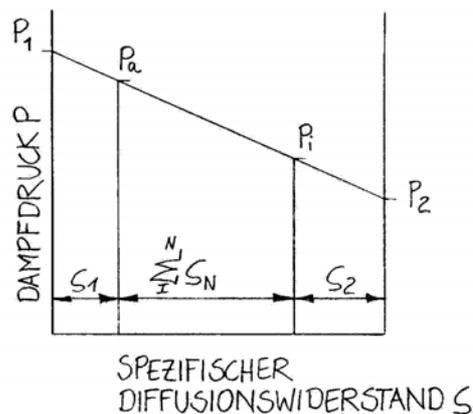


Bild 3-4 Berücksichtigung der Übergangswiderstände⁴²

e) Der Mindestwiderstand einer Sperrschicht

„Mit Hilfe des P, ζ - Diagramms kann sehr schnell festgestellt werden, wie groß der spezifische Diffusionswiderstand einer Sperrschicht mindestens sein muss, wenn [...] vorausgesetzt wird, dass die Wand vollkommen trocken ist.“⁴³

In Bild 3-5 ist dargestellt, wie der erforderliche Mindestwiderstand ζ_s der Sperrschicht ermittelt werden kann. Der Aufbau der Wand gilt analog zu Bild 3-3. Die Sperrschicht muss auf der wärmeren Seite der Wand angeordnet werden, das heißt der Aufbau der kälteren Wandseite bleibt unverändert. Gleiches gilt auch für den Verlauf der Temperatur sowie des Sättigungsdampfdruckes in diesem Bereich.

⁴² Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 347

⁴³ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 348

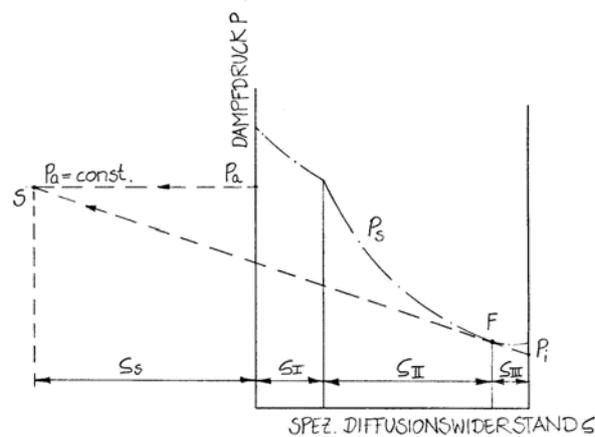


Bild 3-5 Ermittlung des spezifischen Diffusionswiderstandes einer Sperrschicht⁴⁴

Nun führt man folgende Konstruktion aus:

- Durch den Punkt P_i wird eine Gerade gezeichnet, die den Kurvenzug für den Sättigungsdruck P_s gerade so berührt (Punkt F).
- Verlängert man diese Gerade (P, F) nun bis zum Schnitt mit der Linie $P_a = \text{const.}$, so erhält man den Schnittpunkt S .

Der waagerechte Abstand dieses Schnittpunktes S bis zum Punkt P_i ergibt den gesamten spezifischen Diffusionswiderstand einschließlich Sperrschicht, den diese Wandkonstruktion besitzen muss, wenn eine Feuchtigkeitsausscheidung gerade eben verhindert werden soll.

⁴⁴ Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10/1959, S. 348

Der waagerechte Abstand vom Schnittpunkt S bis zur Ordinatenachse ist gleich dem spezifischen Diffusionswiderstand, den die Sperrschicht mindestens verursachen muss. Dabei ist

$$\zeta_s = \frac{\mu_s R_D T_s s_s}{\delta_s} \quad (3.20)$$

- mit:
- μ_s - Diffusionswiderstandsfaktor der Sperrschicht
 - R_D - Gaskonstante von Wasserdampf
 - s_s - Dicke der Sperrschicht
 - T_s - Temperatur der Sperrschicht
 - δ_s - die zu T_s gehörende Diffusionszahl

Die Konstruktion (Bild 3-5) erfolgt zunächst unter der Voraussetzung, dass die Sperrschicht an der warmen Außenseite angebracht wird. In der Praxis wird sie jedoch unmittelbar vor der Dämmschicht angeordnet; der erforderliche spezifische Diffusionswiderstand der Sperrschicht wird dadurch aber nicht beeinflusst. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass unmittelbar vor der Sperrschicht Feuchtigkeit ausgeschieden wird. Daher muss die geradlinige Verbindung zwischen den Punkten P_a und P_i erhalten bleiben, anderenfalls würde es wieder zur Tauwasserbildung kommen.

3.2.2.2 Verwendung des *Glaser*-Verfahrens in DIN 4108-3

In diesem Abschnitt wird das Berechnungsverfahren so wiedergeben, wie es zum jetzigen Zeitpunkt in der DIN 4108-3 vom Juli 2001 beschrieben wird.

a) Material- und Produkteigenschaften

Die festgelegten Wärmeübergangswiderstände werden in Tabelle 3-2 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 3-2 Wärmeübergangswiderstände nach DIN 4108-3⁴⁵

Bauteil	Wärmeübergangswiderstände R_s [$m^2 K / W$]	
Raumseitig	Wärmestromrichtung horizontal, aufwärts bzw. Dachschrägen	0,13
	Wärmestromrichtung abwärts	0,17
Außenseitig	alle Wärmestromrichtungen, wenn Außenoberfläche an Außenluft grenzt	0,04
	alle Wärmestromrichtungen, wenn Außenoberfläche an belüftete Luftschichten grenzt	0,08
	alle Wärmestromrichtungen, wenn Außenoberfläche an Erdreich grenzt	0
Innen liegende Bauteile	Zu beiden Seiten des Bauteils ist mit demselben Wärmeübergangswiderstand zu rechnen.	

Diese Wärmeübergangswiderstände widersprechen sich mit den nach DIN EN ISO 6946 ermittelten, obwohl in DIN 4108-3 auf die Berechnung nach DIN EN ISO 6946 hingewiesen wird. Bei allen nachfolgenden Berechnungen werden die in Tabelle 3-2 beschriebenen Wärmeübergangswiderstände verwendet, so wie sie in der DIN 4108-3 aufgeführt sind. Als Hinweis sei an dieser Stelle angemerkt, dass für die Berechnung der kritischen Oberflächenfeuchte, welche nicht Bestandteil dieser Arbeit sein soll, die Wärmeübergangswiderstände nach DIN 4108-2: 2001-03 berechnet werden.

Die Wärmedurchlasswiderstände R_i von homogenen Schichten und Luftschicht im Bauteil werden nach DIN EN ISO 6946:1996-11, wie in Gleichung (3.21) dargestellt, berechnet. Für homogene Schichten gilt:

$$R_i = \sum_1^n \frac{d}{\lambda_R} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.21)$$

mit: d - Schichtdicke in m

λ_R - Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)

⁴⁵ DIN 4108-3: 2001-07, S. 14

Bei Luftschichten unterscheidet man, ob und wie stark diese belüftet sind:⁴⁶

1. Ruhende Luftschicht: der Luftraum ist von der Umgebung abgeschlossen. Es gelten die in Tabelle 3-3 angegebenen Wärmedurchlasswiderstände. Für die Werte ‚horizontal‘ gelten Wärmestromrichtungen von $\pm 30^\circ$ horizontal zur Ebene.

Tabelle 3-3 Wärmedurchlasswiderstand von ruhenden Luftschichten⁴⁷

Dicke der Luftschicht mm	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23
Zwischenwerte werden geradlinig interpoliert.			

2. Schwach belüftete Luftschicht: der Luftaustausch mit der Außenumgebung durch Öffnungen ist durch folgende Maße begrenzt:
 - über 500 bis 1500 mm² je m Länge für vertikale Luftschichten,
 - über 500 bis 1500 mm² je m² Oberfläche für horizontale Luftschichten.

Für den Wärmedurchlasswiderstand wird hier die Hälfte des entsprechenden Wertes nach Tabelle 3-3 verwendet. Bei Überschreitung von $R = 0,15 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$ der Schicht zwischen Luftschicht und Außenumgebung, muss mit einem Höchstwert von $R = 0,15 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$ gerechnet werden.

⁴⁶ Vgl. DIN EN ISO 6946, Abschnitt 5.3

⁴⁷ DIN EN ISO 6946:1997-11, Abschnitt 5.3.1, Tabelle 2

3. Stark belüftete Luftschicht: die Öffnungen zwischen Luftschicht und Außenumgebung überschreiten folgende Werte:

- 1500 mm² je Länge für vertikale Luftschichten,
- 1500 mm² je m² Oberfläche für horizontale Luftschichten.

Der Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht und aller anderen Schichten ist zu vernachlässigen.

Der Wärmedurchgangswiderstand R_T durch ein mehrschichtiges Bauteil ist sinngemäß wie eine Reihenschaltung von Widerständen zu behandeln.⁴⁸

$$R_T = R_{si} + \sum_1^n R_i + R_{se} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.22)$$

mit: R_{si}, R_{se} - innerer, äußerer Wärmeübergangswiderstand in m² K / W nach Tabelle 3-2

Der Wärmedurchgangskoeffizient lässt sich wie in Gleichung (3.23) dargestellt, berechnen.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_1^n \left(\frac{d}{\lambda_R} \right) + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (3.23)$$

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d lässt sich gemäß Gleichung (3.24) berechnen.

$$s_d = \mu \cdot d \quad [m] \quad (3.24)$$

mit: μ - Wasserdampf-Diffusionswiderstandzahl

„Für außenseitig auf Bauteilen bzw. außenseitig von Wärmedämmungen vorhandene Schichten mit ermittelten wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken $s_d < 0,1 m$ ist in der Berechnung $s_d = 0,1 m$ anzusetzen.“⁴⁹ Bei diffusionsdichten Materialien wird eine

⁴⁸ Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/Holzminen/Göttingen, Wärmeschutz, S. 22

⁴⁹ DIN 4108-3: 2001-07, S. 15

wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke von $s_d \geq 1500 \text{ m}$ verwendet.⁵⁰ Diffusionsoffene Schichten⁵¹ werden mit $s_d \leq 0,5 \text{ m}$ berechnet. Für diffusionshemmende Schichten wird $0,5 \text{ m} < s_d < 1500 \text{ m}$ angesetzt.

b) Klimarandbedingungen

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, entwickelte *Glaser* seine Rechenmethode zunächst für Kühlhausdämmungen. Mit der Aufnahme seines Berechnungsverfahrens in die Norm mussten Klimadaten für das Innen- und das Außenklima festgelegt werden, die der Realität sehr nahe kommen, aber auch eine strenge Beurteilung von Bauteilen bewirken sollten. Diese wurden erstmals bei dem sogenannten „Fertighaus-Verfahren“ verwendet (siehe Abschnitt 3.3.1).⁵²

Später wurden diese festgelegten, vereinfachten Klimadaten in die DIN 4108-3 aufgenommen und sind in Tabelle 3-4 übersichtlich dargestellt.

⁵⁰ DIN 4108-3: 2001-07, S. 5

⁵¹ z.B. Luftschichten

⁵² Fr. Eichler u. H. Arndt: Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 2.Auflage 1989, S. 203 f, Abschnitt 11.4 sowie W. Caemmerer: Berechnungen der Wasserdampfdurchlässigkeit und Bemessung des Feuchtigkeitsschutzes von Bauteilen, 1968, S. 68

Tabelle 3-4 Vereinfachte Klimabedingungen⁵³

Zeile	Klima	Temperatur Θ [°C]	Relative Luftfeuchte Φ [%]	Dauer	
				h	d
1	Tauperiode (Winter)				
1.1	Außenklima a)	-10	80	1440	60
1.2	Innenklima	20	50		
2	Verdunstungsperiode (Sommer)				
2.1	Wandbauteile und Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen				
2.1.1	Außenklima	12	70	2160	90
2.1.2	Innenklima				
2.1.3	Klima im Tauwasserbereich		100		
2.2	Dächer, die Aufenthaltsräume gegen die Außenluft abschließen b)				
2.2.1	Außenklima	12	70	2160	90
2.2.2	Temperatur der Dachoberfläche	20	—		
2.2.3	Innenklima	12	70		

a) Gilt auch für nicht beheizte, belüftete Nebenräume, z. B. belüftete Dachräume, Garagen

b) Vereinfachend können bei diesen Dächern auch die Klimabedingungen für Bauteile der Zeile 2.1 zu Grunde gelegt werden.

c) Temperaturverteilung

Im Folgenden wird die Ermittlung der Temperaturverteilung über den Querschnitt eines Bauteils aufgezeigt.

1. Temperatur der Bauteilinnen- bzw. der Bauteilaußenoberfläche:

$$\Theta_{si} = \Theta_i - R_{si} \cdot q \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (3.25)$$

$$\Theta_{se} = \Theta_e - R_{se} \cdot q \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad (3.26)$$

mit: Θ_i, Θ_e - Innen- bzw. Außenlufttemperatur in °C nach Tabelle 3-4
 q - Wärmestromdichte = $U \cdot (\Theta_i - \Theta_e)$ in W/m^2

⁵³ DIN 4108-3: 2001-07, S. 15

2. Temperatur der Trennflächen:

$$\Theta_1 = \Theta_{si} - R_1 \cdot q \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (3.27)$$

$$\Theta_2 = \Theta_1 - R_2 \cdot q \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (3.28)$$

...,

$$\Theta_{n-1} = \Theta_{n-2} - R_{n-1} \cdot q \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad (3.29)$$

- mit: R_1, R_2 - Wärmedurchlasswiderstand der 1. bzw. 2. Schicht in $\text{m}^2 \text{K} / \text{W}$
 R_{n-1} - Wärmedurchlasswiderstand der vorletzten Schicht in $\text{m}^2 \text{K} / \text{W}$
 Θ_{n-1} - Temperatur in der Trennfläche zwischen vorletzter und letzter Schicht in $^{\circ}\text{C}$
 n - Anzahl der Einzelschichten

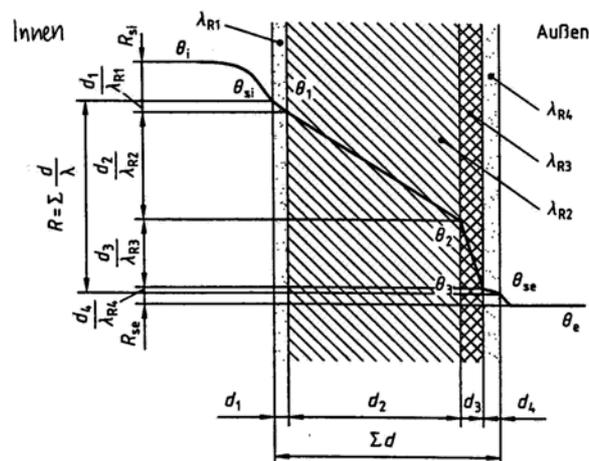


Bild 3-6 Temperaturverteilung über den Querschnitt eines mehrschichtigen Bauteils⁵⁴

⁵⁴ DIN 4108-3: 2001-07, S. 17

d) Wasserdampfteildruck

Der Wasserdampfteildruck p lässt sich nach Gleichung (3.30) berechnen.

$$p = \varphi \cdot p_s \quad [Pa] \quad (3.30)$$

mit: φ - relative Luftfeuchte als Dezimalbruch

p_s - Wasserdampfsättigungsdruck in Pa.

Der Wasserdampfsättigungsdruck ist temperaturabhängig und wird aus Tabelle 3-5⁵⁵ entnommen.

⁵⁵ siehe auch DIN 4108-3: 2001-07, S. 18f

Tabelle 3-5 Wasserdampf-sättigungsdrücke in Abhängigkeit der Temperatur⁵⁶

	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wasserdampf-sättigungsdruck über Wasser in N/m ² = Pa	30	4244	4289	4294	4319	4344	4369	4394	4419	4445	4469
	29	4006	4030	4053	4077	4101	4124	4148	4172	4196	4219
	28	3781	3803	3828	3848	3871	3894	3918	3939	3961	3984
	27	3566	3588	3609	3631	3652	3674	3695	3717	3739	3759
	26	3362	3382	3403	3423	3443	3463	3484	3504	3525	3544
	25	3169	3188	3208	3227	3246	3266	3284	3304	3324	3343
	24	2985	3003	3021	3040	3059	3077	3095	3114	3132	3151
	23	2810	2827	2845	2863	2880	2897	2915	2932	2950	2968
	22	2645	2661	2678	2695	2711	2727	2744	2761	2777	2794
	21	2487	2504	2518	2535	2551	2566	2582	2598	2613	2629
	20	2340	2354	2369	2384	2399	2413	2428	2443	2457	2473
	19	2197	2212	2227	2241	2254	2268	2283	2297	2310	2324
	18	2065	2079	2091	2105	2119	2132	2145	2158	2172	2185
	17	1937	1950	1963	1976	1988	2001	2014	2027	2039	2052
	16	1818	1830	1841	1854	1866	1878	1889	1901	1914	1926
	15	1706	1717	1729	1739	1750	1762	1773	1784	1795	1806
	14	1599	1610	1621	1631	1642	1653	1663	1674	1684	1695
	13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1559	1569	1578	1588
	12	1403	1413	1422	1431	1441	1451	1460	1470	1479	1488
	11	1312	1321	1330	1340	1349	1358	1367	1375	1385	1394
10	1228	1237	1245	1254	1262	1270	1279	1287	1296	1304	
9	1148	1158	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1218	
8	1073	1081	1088	1096	1103	1110	1117	1125	1133	1140	
7	1002	1008	1016	1023	1030	1038	1045	1052	1059	1066	
6	935	942	949	955	961	968	975	982	988	995	
5	872	878	884	890	896	902	907	913	919	925	
4	813	819	825	831	837	843	849	854	861	866	
3	759	765	770	776	781	787	793	798	803	808	
2	705	710	716	721	727	732	737	743	748	753	
1	657	662	667	672	677	682	687	691	696	700	
0	611	616	621	626	630	635	640	645	648	653	
Wasserdampf-sättigungsdruck über Eis	-0	611	605	600	595	592	587	582	577	572	567
	-1	562	557	552	547	543	538	534	531	527	522
	-2	517	514	509	505	501	496	492	489	484	480
	-3	476	472	468	464	461	456	452	448	444	440
	-4	437	433	430	426	423	419	415	412	408	405
	-5	401	398	395	391	388	385	382	379	375	372
	-6	368	365	362	359	356	353	350	347	343	340
	-7	337	336	333	330	327	324	321	318	315	312
	-8	310	306	304	301	298	296	294	291	288	286
	-9	284	281	279	276	274	272	269	267	264	262
	-10	260	258	255	253	251	249	246	244	242	239
	-11	237	235	233	231	229	228	226	224	221	219
	-12	217	215	213	211	209	208	206	204	202	200
	-13	198	197	195	193	191	190	188	186	184	182
	-14	181	180	178	177	175	173	172	170	168	167
	-15	165	164	162	161	159	158	157	155	153	152
	-16	150	149	148	146	145	144	142	141	139	138
-17	137	136	135	133	132	131	129	128	127	126	
-18	125	124	123	122	121	120	118	117	116	115	
-19	114	113	112	111	110	109	107	106	105	104	
-20	103	102	101	100	99	98	97	96	95	94	

⁵⁶ Jürgen A. Stein: Physik für Bauingenieure, Band 2, Seite 280, Tabelle A 6a

e) Vorgehensweise für die Berechnung der Tauwassermenge im Bauteilinneren

In diesem Abschnitt wird das Verfahren zur Bestimmung der Tauwassermenge im Bauteilinneren vorgestellt.

1. Bestimmung der Temperaturverteilung über den Querschnitt des Bauteils und der dazugehörigen Sättigungsdrücke des Wasserdampfes p_s .
2. Berechnung der dampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d , wobei für die Wasserdampf-Diffusionswiderstandzahl μ immer der ungünstigere Wert zu verwenden ist.
3. Aufstellung eines Diffusionsdiagramms im Maßstab s_d , Einzeichnen des Wasserdampfsättigungsdrucks p_s sowie der Wasserdampfteildrücke p_i, p_e .

Aus dem *Glaser*-Diagramm kann nun entnommen werden, ob und wie Tauwasser auftritt.⁵⁷

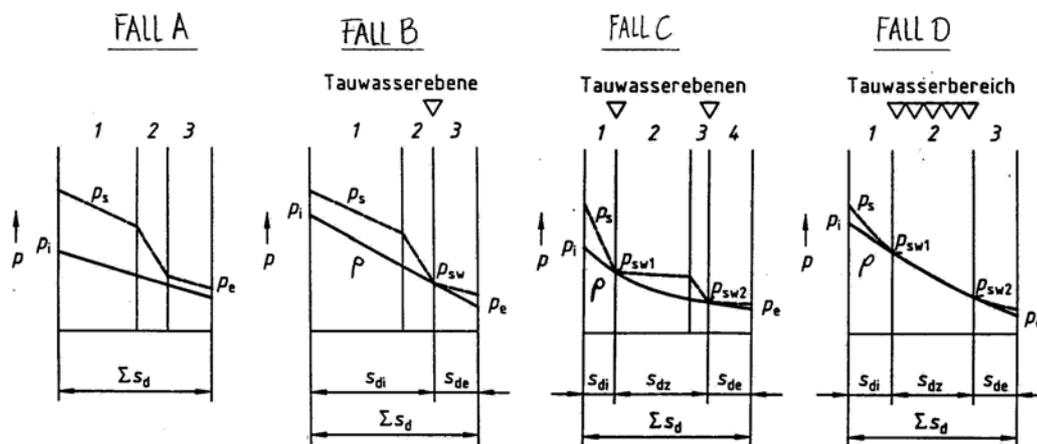
Fall a: $p < p_s$, das heißt es ist kein Tauwasser vorhanden.

Fall b: Berührung des Sättigungsdruckes durch den Wasserdampfteildruck in einem Punkt: Tauwasserausfall in einer Ebene.

Fall c: Berührung des Sättigungsdruckes durch den Wasserdampfteildruck in zwei Punkten: Tauwasserausfall in zwei Ebenen.

Fall d: Berührung des Wasserdampfteildruckes in zwei Punkten: Tauwasserausfall in einem Bereich.

⁵⁷ siehe Bild 3-7

Bild 3-7 Diffusionsdiagramme (Kondensationsperiode)⁵⁸

4. Bestimmung der Dampfteildrücke p_{sw} (Wasserdampf-sättigungsdruck an der Stelle des Tauwasserausfalls).
5. Bestimmung der Tauwassermenge, die sich aus der Differenz der zum Tauwasserbereich (hin) eindiffundierenden Diffusionsstromdichte g_i und der vom Tauwasserbereich (weg) ausdiffundierenden Diffusionsstromdichte g_e berechnet.⁵⁹

$$\text{Fall b: } m_{W,T} = t_T \cdot \left[\left(\frac{p_i - p_{sw}}{Z_i} \right) - \left(\frac{p_{sw} - p_e}{Z_e} \right) \right] \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \quad (3.31)$$

$$\text{Fall c: } m_{W,T} = m_{W,T1} + m_{W,T2} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \quad (3.32)$$

$$m_{W,T1} = t_T \cdot \left[\left(\frac{p_i - p_{sw1}}{Z_i} \right) - \left(\frac{p_{sw1} - p_{sw2}}{Z_z} \right) \right] \quad (3.33)$$

$$m_{W,T2} = t_T \cdot \left[\left(\frac{p_{sw1} - p_{sw2}}{Z_z} \right) - \left(\frac{p_{sw2} - p_e}{Z_e} \right) \right] \quad (3.34)$$

⁵⁸ DIN 4108-3: 2001-07, S. 24 f⁵⁹ Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/Holzminen/Göttingen, Feuchteschutz 2, S. 18

$$\text{Fall d: } m_{W,T} = t_T \cdot \left[\left(\frac{\rho_i - \rho_{sw1}}{Z_i} \right) - \left(\frac{\rho_{sw2} - \rho_e}{Z_e} \right) \right] \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \quad (3.35)$$

mit: $m_{W,T}$ - flächenbezogene Tauwassermenge in kg/m²

t_T - Dauer der Tauperiode in h

Z - Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand in m² h Pa/kg

$$Z = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \sum_1^n s_{d,n}$$

Z_i wird durch $s_{d,i}$ beschrieben, welches die diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken der Bauteilschichten von der raumseitigen Bauteiloberfläche bis zur (ersten) Tauwasserebene ρ_{sw} (bzw. Beginn des Tauwasserbereiches) beschreibt. Analog dazu wird Z_e durch $s_{d,e}$ beschrieben, welches die diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken der Bauteilschichten von der (zweiten) Tauwasserebene ρ_{sw} (bzw. dem Ende des Tauwasserbereiches) zur außenseitigen Bauteiloberfläche beschreibt. Bei mehreren Tauwasserebenen bzw. einem Tauwasserbereich wird zusätzlich der Wert Z_z verwendet, der den Bereich zwischen den Tauwasserebenen bzw. den Tauwasserbereich abdeckt.

f) Vorgehensweise für die Berechnung der Verdunstungsmenge

Mit den festgelegten Klimabedingungen für die Kondensations- und Verdunstungsperiode ist das von Glaser entwickelte Verfahren anwendbar, um nun auch den Verlauf der Verdunstung in einem Bauteil zu untersuchen.

„Nach einem vorhergehenden Tauwasserausfall im Bauteil wird in der Tauwasserebene bzw. zwischen zwei Tauwasserebenen bzw. in einem Tauwasserbereich Sättigungsdruck angenommen.“⁶⁰ Die Ermittlung der Verdunstungsmenge erfolgt analog zu Absatz 5, siehe Bild 3-8.

⁶⁰ DIN 4108-3: 2001-07, S. 26

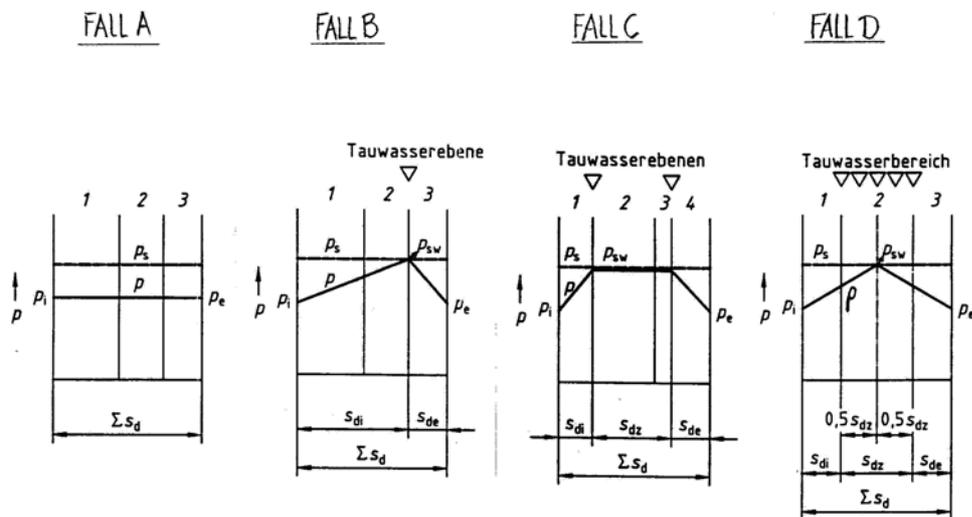


Bild 3-8 Diffusionsdiagramme (Verdunstungsperiode)⁶¹

Fall a: Es findet keine Verdunstung statt, da kein Tauwasserausfall stattfindet.

Fall b: Verdunstung nach Tauwasserausfall in einer Ebene. Die Verdunstungsmenge berechnet sich zu:⁶²

$$m_{W,V} = t_V \cdot \left[\left(\frac{p_{sw} - p_i}{Z_i} \right) + \left(\frac{p_{sw} - p_e}{Z_e} \right) \right] \quad \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (3.36)$$

Fall c: Verdunstung nach Tauwasserausfall in zwei Ebenen. Ist zu einem Zeitpunkt die Tauwassermenge in der ersten bzw. zweiten Tauwasserebene verdunstet, so ergibt sich die flächenbezogene Verdunstungsmenge $m_{W,V}$ in kg/m^2 , die während der Verdunstungsperiode t_V insgesamt aus dem Bauteil abgeführt werden kann. Die Verdunstungszeiten t_{V1} und t_{V2} werden, wie in den Gleichungen (3.37) und (3.38) dargestellt, berechnet.

⁶¹ DIN 4108-3: 2001-07, S. 26 ff

⁶² Diese Gleichung weist in der DIN 4108-3:2001-07, S. 27 einen Druckfehler auf: statt addiert, wird die äußere von der inneren Diffusionsstromdichte subtrahiert.

$$t_{V1} = \frac{m_{W,T1}}{\frac{\rho_{sw} - \rho_i}{Z_i}} \quad [h] \quad (3.37)$$

$$t_{V2} = \frac{m_{W,T2}}{\frac{\rho_{sw} - \rho_e}{Z_e}} \quad [h] \quad (3.38)$$

Die Verdunstungsmenge ergibt sich für $t_{V1} < t_{V2}$ zu:

$$m_{W,V} = t_{V1} \cdot \left[\left(\frac{\rho_{sw} - \rho_i}{Z_i} \right) + \left(\frac{\rho_{sw} - \rho_e}{Z_e} \right) \right] + (t_V - t_{V1}) \cdot \left(\frac{\rho_{sw} - \rho_i}{Z_i + Z_z} + g_e \right) \quad (3.39)$$

bzw. für $t_{V1} > t_{V2}$ zu:

$$m_{W,V} = t_{V2} \cdot \left[\left(\frac{\rho_{sw} - \rho_i}{Z_i} \right) + \left(\frac{\rho_{sw} - \rho_e}{Z_e} \right) \right] + (t_V - t_{V2}) \cdot \left(g_i + \frac{\rho_{sw} - \rho_e}{Z_e + Z_z} \right). \quad (3.40)$$

Fall d: Verdunstung nach Tauwasserausfall in einem Bereich. Die Verdunstungsmenge beträgt:

$$m_{W,V} = t_V \cdot \left[\left(\frac{\rho_{sw} - \rho_i}{Z_i + 0,5 \cdot Z_z} \right) + \left(\frac{\rho_{sw} - \rho_e}{0,5 \cdot Z_z + Z_e} \right) \right] \quad \left[\frac{kg}{m^2} \right]. \quad (3.41)$$

g) Beurteilung der Berechnungsergebnisse

Nach DIN 4108-3 (Juli 2001) gilt Tauwasserbildung als unschädlich, wenn die im Folgenden dargestellten wesentlichen Anforderungen erfüllt sind.⁶³

- „Stoffe, die mit Feuchtigkeit in Berührung kommen, dürfen durch sie nicht geschädigt werden (z. B. durch Korrosion, Pilzbefall).“⁶⁴
- Während der Verdunstungsperiode muss das angefallene Tauwasser wieder an die Umgebung abgeführt werden können.
- „Bei Dach- und Wandkonstruktionen darf eine flächenbezogene Tauwassermasse von insgesamt 1,0 kg/m² nicht überschritten werden.“⁶⁵ Dies gilt nicht für Bedingungen nach folgenden Kriterien:
- „Tritt Tauwasser an Berührungsflächen mit einer kapillar nicht wasser-aufnahmefähigen Schicht auf, so darf eine flächenbezogene Tauwassermasse von 0,5 kg/m² nicht überschritten werden. Festlegungen für Holzbauteile nach DIN 68800-2.“⁶⁶
- „Bei Holz ist eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes um mehr als 5%, bei Holzwerkstoffen um mehr als 3% unzulässig (ausgenommen Holzwolle-Leichtbauplatten und Mehrschicht-Leichtbauplatten nach DIN 1101)“.⁶⁷

Zudem sind in der DIN 4108-3:2001-07, S. 7ff Bauteile festgelegt, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein ausreichender Wärmeschutz nach DIN 4108-2 mit luftdichter Ausführung nach DIN V 4108-7 vorliegt.

3.3 Verfahren nach *Jenisch*

Jenisch entwickelte auf der Grundlage des *Glaser*-Verfahrens eine Berechnungsmethode, mit der es möglich ist, unter Verwendung des Jahresmittelwertes der Außenlufttemperatur, die während eines Jahres zu erwartende Kondensationsmenge in der betreffenden Konstruktion zu

⁶³ siehe dazu im Vergleich Abschnitt 3.3.1

⁶⁴ DIN 4108-3: 2001-07, S. 7

⁶⁵ DIN 4108-3: 2001-07, S. 7

⁶⁶ DIN 4108-3: 2001-07, S. 7

⁶⁷ Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Feuchteschutz 2, S. 25

ermitteln. Außerdem erlaubt das Verfahren, festzustellen, „bis zu welchem Feuchtigkeitsgehalt der Raumluft die Jahresbilanz positiv bleibt, und wie groß der Diffusionswiderstand einer dampfhemmenden Beschichtung gewählt werden muss, um eine positive Jahresbilanz zu gewährleisten.“⁶⁸

3.3.1 Entstehung

Zur Beurteilung der Kondensations- und Austrocknungsvorgänge in Außenwänden über den Zeitraum eines Jahres wurden aufbauend auf dem Verfahren von *Glaser* verschiedene Berechnungsmethoden entwickelt, die einen enormen Rechenaufwand erforderten bzw. deren Ergebnisse nicht befriedigend waren.

Haferland beispielsweise bestimmte die äußere relative Luftfeuchtigkeit im Freien aus den Monatsmittelwerten der Monate Oktober bis März und legte für diese Zeit einen Mittelwert von 85% fest. Um den Rechenumfang einzuschränken, nahm er die relative Luftfeuchtigkeit im Freien als konstant an. Als Beurteilungsgrundlage diente ein Vergleich des Außendampfdruckes mit den Monatsmittelwerten des Dampfdruckes von Hannover⁶⁹. Die mögliche Austrocknung der Bauteile in der warmen Jahreszeit wurde von *Haferland* nicht untersucht.⁷⁰

Fehér dagegen suchte unter Verwendung des *Glaser*-Diagramms und der Klimadaten durch „Probieren“ die Lufttemperatur und die Dampfdrücke im Freien für Anfang und Ende des Kondensationsvorganges. Für den Zeitraum der Kondensations- bzw. Trocknungsperiode berechnete er die mittleren Außenlufttemperaturen und die mittleren Dampfdrücke der Außenluft mit Hilfe der Monatsmittelwerte und berechnete anhand derer die Kondensations- bzw. Trocknungsmengen. Im Gegensatz zu *Haferland* setzte *Fehér* keine konstante äußere relative Luftfeuchtigkeit voraus, sondern verwendete die Monatsmittelwerte des Dampfdruckes.⁷¹ Dieses Verfahren war sehr zeitaufwendig.

„Mit der Einführung des „Fertighaus-Verzeichnisses“ und der damit verbundenen Zulassung von Fertighausbauweisen für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland entstand die Forderung nach einheitlichen Prüfverfahren zur Untersuchung von Dampfdiffusionsvorgängen in Bauteilen. Vom Länder-Sachverständigenausschuss für neue Baustoffe und Bauarten

⁶⁸ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 10, S. 307, Abschnitt 4

⁶⁹ ausgewählt aus den Mittelwerten von 34 deutschen Städten

⁷⁰ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 257f, Abschnitt 2.1

⁷¹ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 258, Abschnitt 2.2

veranlasst, wurden Richtlinien für die Überprüfung von Fertighäusern zwecks Aufnahme in das Fertighausverzeichnis ausgearbeitet. Da die Berechnung der Kondensations- und Trocknungsmengen aus dem Jahresverlauf umständlich ist, wurden vereinfachte Klimabedingungen festgelegt.⁷² Diese wurden so gewählt, dass nach erfolgreicher Prüfung der Bauweise diese im gesamten Bundesgebiet zugelassen werden konnten.⁷³

Unter den in der Tabelle 3-4 genannten Bedingungen wurde eine Feuchtigkeitskondensation in den Bauteilen zugelassen, wenn folgende Forderungen erfüllt waren.⁷⁴

- „Während der Befeuchtungsperiode (Winter) darf im Allgemeinen nicht mehr als 0,5 kg/m² Tauwasser anfallen. Bei Holz bzw. Holzwerkstoffen ist jedoch nur eine Feuchtigkeitszunahme von 3 Gew.-% zugelassen.
- Während der Trocknungsperiode muss das angefallene Tauwasser wieder an die Umgebung abgeführt werden können.
- Die während der Befeuchtungsperiode errechnete Feuchtigkeitszunahme der Baustoffe darf nicht zu einer Senkung des Wärmeschutzes der Bauteile unter der in DIN 4108 ‚Wärmeschutz im Hochbau‘ geforderten Mindestwerte des Wärmedurchlasswiderstandes führen.
- Stoffe, die mit Feuchtigkeit in Berührung kommen, dürfen durch sie nicht geschädigt werden.“⁷⁵

Dennoch war auch dieses Berechnungsverfahren nicht befriedigend, da hierbei keine Rücksicht auf Standort und Konstruktion eines Bauteiles genommen wurde hinsichtlich seiner Kondensationszeit aufgrund meteorologischer Daten.

Die aufgeführten Berechnungsverfahren konnten bis dahin nicht den Anforderungen der Praxis genügen. Es wurde nach einer Methode gesucht, deren Ergebnisse den tatsächlichen Verhältnissen entsprachen. So veröffentlichte Richard *Jenisch* 1971 eine im Institut für technische Physik Stuttgart⁷⁶ neuentwickelte Rechenmethode.

⁷² Vgl. Tabelle 3-4

⁷³ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 258f, Abschnitt 2.4

⁷⁴ siehe dazu im Vergleich Seite 30

⁷⁵ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 258f, Abschnitt 2.4

⁷⁶ heute Fraunhofer Institut

3.3.2 Inhalt

In diesem Abschnitt wird genauer auf das von *Jenisch* beschriebene „Berechnungsverfahren unter Verwendung von Jahresmittelwerten der Lufttemperatur“ eingegangen, wie er es 1971 im „Gesundheits-Ingenieur“ veröffentlichte.

3.3.2.1 Grundlagen

a) Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens

„Bei den Berechnungen der Diffusionsvorgänge werden die Temperaturzustände immer als stationär betrachtet,“⁷⁷ das heißt Sorption und Flüssigtransport bleiben unberücksichtigt.

b) Ermittlung der Jahresmittelwerte des Sättigungsdampfdruckes⁷⁸

Es werden vereinfachte Annahmen für die Klimaverhältnisse zu beiden Seiten des Bauteils sowie für den Rechengang angenommen. Zunächst müssen die Mittelwerte des Sättigungsdampfdruckes aus dem Dampfdruckverlauf ermittelt werden. Dabei verwendet *Jenisch* die Dampfdruckgleichung von *Glaser*, welche die Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes wiedergibt:

$$p_s = a_1 + a_2 t + a_3 t^2, \quad (3.42)$$

mit den Konstanten⁷⁹

$$a_1 = 63,43 \text{ kp/m}^2,$$

$$a_2 = 3,65 \text{ kp/m}^2 / \text{grad},$$

$$a_3 = 0,2515 \text{ kp/m}^2 / \text{grad}^2.$$

Die einzelnen Temperaturwerte sind bekannt. Nun kann der Jahresmittelwert des Sättigungsdampfdruckes nach Gleichung (3.43) ermittelt werden.

⁷⁷ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 257, Abschnitt 2

⁷⁸ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 260ff, Abschnitt 3.1

⁷⁹ für den Sättigungsdampfdruck im Bereich zwischen 0 °C und 20 °C

$$\rho_{sam} = \frac{1}{12} \sum_1^{12} \rho_{san} = a_1 + a_2 \frac{1}{12} \sum_1^{12} t_{an} + a_3 \frac{1}{12} \sum_1^{12} t_{an}^2. \quad (3.43)$$

Das Glied nach der Konstanten a_2 ergibt die Jahresmitteltemperatur t_{am} . Daraus folgt:

$$\rho_{sam} = a_1 + a_2 t_{am} + a_3 \frac{1}{12} \sum_1^{12} t_{an}^2. \quad (3.44)$$

Die Abweichung des Monatsmittelwertes vom Jahresmittelwert der Temperatur wird durch Δt_{an}

ausgedrückt, wobei $\sum_1^{12} \Delta t_{an} = 0$ ist. Der Jahresmittelwert des Sättigungsdampfdruckes

vereinfacht sich dadurch zu:

$$\rho_{sam} = \rho'_{sam} + \Delta \rho'_{sam}, \quad (3.45)$$

wobei

$$\rho'_{sam} = a_1 + a_2 t_{am} + a_3 t_{am}^2 \quad (3.46)$$

und

$$\Delta \rho'_{sam} = a_3 \frac{1}{12} \sum_1^{12} \Delta t_{an}^2 \quad (3.47)$$

mit: ρ'_{sam} - Sättigungsdruck der Mitteltemperatur t_{am}

$\Delta \rho'_{sam}$ - Korrekturglied

betragen.

In einem **zweischichtigen** Bauteil beträgt die Temperatur t_w zwischen den Schichten

$$t_w = t_i - R (t_i - t_a). \quad (3.48)$$

Der Wert R beträgt

$$R = \frac{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta t}}{\frac{1}{k}}. \quad (3.49)$$

Der Sättigungsdruck p_{swm} in der Ebene zwischen den beiden Schichten ergibt sich zu

$$p_{swm} = p'_{swm} + \Delta p'_{swm}, \quad (3.50)$$

wobei p'_{swm} und $\Delta p'_{swm}$ analog zu den Gleichungen (3.25) und (3.26) sind.

c) Vereinfachte Annahmen für die Berechnung⁸⁰

Schon bei der Entwicklung seiner Rechenmethode hat *Glaser* die Annahmen getroffen, „dass die Wasserdampfübergangswiderstände vernachlässigbar sind und dass der Diffusionswiderstandsfaktor μ der Baustoffe als konstant vorausgesetzt“ werden kann. „Der Diffusionswiderstand einer Baustoffschicht

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{\mu R_D T_m s}{\delta} \left[\frac{m^2 h \text{ kp} / m^2}{kg} \right] \quad (3.51)$$

ist temperaturabhängig,“ jedoch ist der Einfluss der Temperatur auf den Diffusionswiderstand sehr gering. Somit kann für den Faktor $(R_D T_m) / \delta$ ein konstanter Wert angenommen werden. Dieser Wert wird in Anlehnung an die DIN 52612, „die für den Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit eine Bezugstemperatur von 10 °C vorschreibt, für eine Mitteltemperatur von 10 °C berechnet und bei allen Berechnungen verwendet. Der Diffusionswiderstand einer Baustoffschicht ist dann“:

⁸⁰ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 10, S. 299, Abschnitt 3.3

$$\frac{1}{\Delta} = \mu \cdot 0,1504 \cdot 10^6 \cdot s \left[\frac{m^2 h \text{ kp} / m^2}{kg} \right] \quad (3.52)$$

mit: μ_s - Diffusionswiderstandszahl des Baustoffes
s - Dicke der Baustoffschicht [m]

3.3.2.2 Klimaverhältnisse⁸¹

Die Klimadaten werden wie folgt verwendet:

a) Temperatur

Die Raumlufttemperatur kann für jeden Monat entsprechend der tatsächlichen Verhältnissen angenommen werden. Die Außentemperaturen als Jahresmittel wurden nach dem jeweiligen Standort aus den Monatsmitteltemperaturen errechnet und können aus Klimatabellen entnommen werden.

b) Relative Luftfeuchtigkeit

Bei den Berechnungen wird für die relative Luftfeuchte im Raum, wie auch bei der Raumtemperatur, von den tatsächlich vorhandenen Verhältnissen ausgegangen. Die äußere relative Luftfeuchtigkeit wird, wie auch die Außentemperatur, aus Klimatabellen entnommen.

Jenisch legt dar, dass zur Vereinfachung der Berechnungen nur mit dem Sättigungsdruck der Jahresmitteltemperaturen gerechnet wird. Dies ist möglich, weil die unter Abschnitt 3.3.2.1, Seite 43 abgeleitete Korrekturgleichung immer positiv abweicht. Wird folglich die Korrekturgleichung nicht verwendet, führt dies immer zu ungünstigeren Ergebnissen; der entstandene geringe Fehler führt zu größeren Kondensationsmengen, hat also eine strengere Beurteilung zur Folge.

3.3.2.3 Berechnung der Kondensations- bzw. Austrocknungsmengen

Auf die gesamte Herleitung dieses Berechnungsverfahrens wird nachfolgend nicht eingegangen. Es werden nur einzelne Überlegungen dargelegt.

⁸¹ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 262, Abschnitt 3.2

Für die Berechnung wird nun das Jahr in Zeitintervalle der Dauer z eingeteilt, für die konstante Temperatur- und Dampfdruckverhältnisse angenommen werden.

„Zur Feststellung, ob nun im Laufe eines Jahres die Kondensationsmengen größer als die Austrocknungsmengen sind bzw. umgekehrt, wird für jedes der Zeitintervalle z die kondensierende bzw. austrocknende Feuchtigkeitsmenge errechnet und über das ganze Jahr summiert. Bei einem positiven Ergebnis ist die Kondensationsmenge größer als die Austrocknungsmenge; bei einem negativen Ergebnis würde mehr austrocknen als kondensieren.“⁸²

Zur Ermittlung der Kondensations- bzw. Austrocknungsmengen müssen die im Folgenden angeführten Schritte durchgeführt werden:

1. Nach Abschnitt 3.3.2.2 werden die Daten für das Außenklima je nach Standort aus Klimatabellen entnommen, das Innenklima wird je nach Gebäudenutzung festgelegt.

Nun wird die Grenztemperatur t_{ax} berechnet, unterhalb welcher Kondensation beginnt.

2. Der Sättigungsdruck p_{swm} und der Teildampfdruck p_{wm} in der Ebene zwischen den Schichten werden mit den Gleichungen (3.53) und (3.54) berechnet.

$$p_{swm} = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j p_{swj} \quad (3.53)$$

$$p_{wm} = p_i - S(p_i - p_{am}). \quad (3.54)$$

3. *Jenisch* führt zur Vereinfachung den Wert L ein:

$$L = 1 + \frac{2(t_i - t_{am})(1 - R)}{\frac{a_2}{a_3} + 2t_{am}}. \quad (3.55)$$

⁸² Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 9, S. 262, Abschnitt 3.2

mit: t_i - Innentemperatur in °C
 t_{am} - mittlere Außentemperatur in °C
 $\frac{a_2}{a_3}$ - für $t \geq 0$: $\frac{a_2}{a_3} = 31,3 - 1,715 t$
 $t < 0$: $\frac{a_2}{a_3} = 26,3 - 1,823 t$

$$R = \frac{\frac{1}{\alpha_j} + \sum_{1}^n \frac{1}{\Delta_n}}{\frac{1}{k}}$$

mit: n - Anzahl der Schichten zwischen dem Raum und der zu berechnenden Stelle

$\frac{1}{k}$ - Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils

4. Aus der äußeren relativen Luftfeuchtigkeit und dem Faktor S ergibt sich

$$S_a \cdot \frac{\varphi_a}{100}, \quad (3.56)$$

wobei sich der Faktor S wie folgt berechnet:

$$S = \frac{\sum_{1}^{n=l} \frac{1}{\Delta_l}}{\sum_{1}^{n=n} \frac{1}{\Delta_n}}$$

mit:

l - Anzahl der Schichten zwischen dem Raum und der Kondensationsebene

n - Anzahl der Schichten der gesamten Wandkonstruktion

5. Es ergibt sich nun ein Näherungswert für den Sättigungsdruck p_{sax} im Freien, bei dem die Kondensation beginnt.⁸³

$$p_{sax} = p_{sam} - \frac{p_{swm} - p_{wm}}{R \cdot L - S \frac{\varphi_a}{100}} \quad (3.57)$$

- mit: p_{sam} - Sättigungsdruck beim Jahresmittelwert der Außentemperatur t_{am}
 p_{swm} - Sättigungsdruck beim Jahresmittelwert der Temperatur t_{wm} in der Kondensationsebene
 p_{wm} - Jahresmittelwert des Dampfteildruckes in der Wand

6. Mit Hilfe der Dampfdrucktafel⁸⁴ findet man die Grenztemperatur t_{ax} . Die Wiederholung der Berechnung von L , jetzt aber unter Berücksichtigung von $\Delta t_a = t_{am} - t_{ax}$,

$$L = 1 + \frac{2t_i - (2t_{am} - \Delta t_a)}{\frac{a_2}{a_3} + (2t_{am} - \Delta t_a)} (1 - R) \quad (3.58)$$

- mit: Δt_a - Differenz zwischen dem Jahresmittelwert der Außentemperatur und der Grenztemperatur t_{ax} , bei der Kondensation beginnt

ergibt den korrigierten Sättigungsdruck im Freien p_{sax} nach Gleichung (3.57), bei dem Kondensation beginnt. Wiederum wird aus der Dampfdrucktafel (Tabelle 3-6) die zugehörige Grenztemperatur t_{ax} entnommen.

Der Unterschied zwischen dem Näherungswert und dem korrigierten Wert ist sehr gering. Wie unter Abschnitt 3.2.2.1a) beschrieben, weicht der korrigierte Wert positiv von dem Näherungswert ab und bewirkt somit eine strengere Beurteilung.

⁸³ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 10, S. 305, Abschnitt 3.4.4

⁸⁴ Tabelle 3-6

Tabelle 3-6 Dampfdrucktafel. Dampfdruck über Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur [kg/m²]⁸⁵

	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	62,3	62,8	63,3	63,8	64,2	64,7	65,2	65,7	66,1	66,6
1	67,0	67,5	68,0	68,5	69,0	69,5	70,0	70,4	70,9	71,4
2	71,9	72,4	73,0	73,5	74,1	74,6	75,1	75,7	76,2	76,8
3	77,4	78,0	78,5	79,1	79,6	80,2	80,8	81,3	81,9	82,4
4	82,9	83,5	84,1	84,7	85,3	85,9	86,5	87,1	87,8	88,3
5	88,9	89,5	90,1	90,7	91,3	91,9	92,5	93,1	93,7	94,3
6	95,3	96,0	96,7	97,3	98,0	98,7	99,4	100,1	100,7	101,4
7	102,1	102,8	103,6	104,3	105,0	105,8	106,5	107,2	108,0	108,7
8	109,4	110,2	110,9	111,7	112,4	113,2	113,9	114,7	115,5	116,2
9	117,0	117,8	118,6	119,4	120,2	121,0	121,8	122,6	123,4	124,2
10	125,2	126,1	126,9	127,8	128,6	129,5	130,4	131,2	132,1	132,9
11	133,8	134,7	135,6	136,6	137,5	138,4	139,3	140,2	141,2	142,1
12	143,0	144,0	145,0	145,9	146,9	147,9	148,8	149,8	150,8	151,7
13	152,7	153,7	154,7	155,8	156,8	157,8	158,9	159,9	160,9	161,9
14	163,0	164,1	165,2	166,3	167,4	168,5	169,5	170,6	171,7	172,8
15	173,9	175,0	176,2	177,3	178,4	179,6	180,7	181,9	183,0	184,1
16	185,3	186,5	187,7	189,0	190,2	191,4	192,6	193,8	195,1	196,3
17	197,5	198,8	200,1	201,4	202,7	204,0	205,3	206,6	207,9	209,2
18	210,5	211,9	213,2	214,6	216,0	217,3	218,7	220,0	221,4	222,7
19	224,0	225,5	227,0	228,4	229,8	231,2	232,7	234,1	235,5	236,9
20	238,5	240,0	241,5	243,0	244,5	246,0	247,5	249,0	250,5	252,1
21	253,5	255,2	256,7	258,4	260,0	261,6	263,2	264,8	266,4	267,9
22	269,6	271,3	273,0	274,7	276,4	278,0	279,7	281,4	283,1	284,8
23	286,4	288,2	290,0	291,8	293,6	295,3	297,1	298,9	300,7	302,5
24	304,3	306,1	308,0	309,9	311,8	313,7	315,5	317,4	319,3	321,2
25	323,0	325,0	327,0	328,9	330,9	332,9	334,8	336,8	338,8	340,8
26	342,7	344,8	346,9	348,9	351,0	353,0	355,1	357,2	359,3	361,3
27	363,5	365,7	367,9	370,1	372,3	374,5	376,7	378,9	381,1	383,2
28	385,4	387,7	390,0	392,3	394,6	396,9	399,2	401,5	403,8	406,1
29	408,4	410,8	413,2	415,6	418,0	420,4	422,8	425,3	427,7	430,1
30	432,6	435,2	437,7	440,3	442,8	445,4	447,9	450,5	453,1	455,6

„Nachdem die Grenztemperatur t_{ax} , bei deren Unterschreitung Kondensation beginnt,“ aus der Dampfdrucktafel (Tabelle 3-6) ermittelt wurde, „muss die Kondensationsdauer z_k und die mittlere Außenlufttemperatur t_{ak} während der Kondensationsdauer ermittelt werden.“ Sie „werden aufgrund ihrer Häufigkeit der Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur bestimmt.“⁸⁶ In Tabelle 3-7 wurde für sieben deutsche Städte nach Werten von *Reidat* die mittlere Außenlufttemperatur für die Zeitdauer berechnet, während der eine bestimmte Lufttemperatur⁸⁷ unterschritten wird.

⁸⁵ Karl Moritz: Richtig und Falsch im Wärmeschutz-Feuchtigkeitsschutz-Bautenschutz, 1965, S. 471f, Tabelle 12 b

⁸⁶ Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, 1971, Heft 10, S. 303, Abschnitt 3.4.3

⁸⁷ z.B. die Grenztemperatur t_{ax}

7. Die während der Kondensationsdauer z_k anfallende Tauwassermenge G_k ergibt sich wie folgt (hier für ein zweischichtiges Bauteil):

$$G_k = [\Delta_1(p_i - p_{swk}) - \Delta_2(p_{swk} - p_{ak})] z_k \quad (3.59)$$

- mit:
- G_k - Kondensations- oder Austrocknungsmenge
 - Δ - Kehrwert des Wasserdampfdiffusionswiderstandes
$$= \frac{1}{\mu \cdot 0,1504 \cdot 10^6 \cdot s} \left[\frac{kg}{m^2 h kp / m^2} \right]$$
 - p_i - Teildampfdruck innen
 - p_{swk} - Sättigungsdampfdruck in der Kondensationsebene bei der Kondensationstemperatur t_{ak}
 - p_{ak} - Teildampfdruck außen bei der Kondensationstemperatur t_{ak}
 - z_k - Kondensationsdauer

Die Kondensationsmenge muss kleiner sein als die Austrocknungsmenge. Daher gilt:

$$\sum_1^j G_j \leq 0. \quad (3.60)$$

Tabelle 3-7 Anzahl der Stunden z_k , in denen der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur während eines Jahres unterschritten wird und der Mittelwert t_{ak} der Außenlufttemperatur für diese Zeit⁸⁸

Temperaturbereich °C	Braunschweig		Bremen		Clausthal		Hamburg		Karlsruhe		München		Münster	
	z_k	t_{ak}	z_k	t_{ak}	z_k	t_{ak}	z_k	t_{ak}	z_k	t_{ak}	z_k	t_{ak}	z_k	t_{ak}
	h	°C	h	°C	h	°C	h	°C	h	°C	h	°C	h	°C
29,0 bis 29,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28,0 bis 28,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27,0 bis 27,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26,0 bis 26,9	—	—	8760	9,0	—	—	—	—	8760	10,1	8760	8,2	—	—
25,0 bis 25,9	8760	9,0	8753	9,0	—	—	8760	8,7	8741	10,0	8750	8,2	8758	9,1
24,0 bis 24,9	8753	8,9	8741	9,0	8760	6,0	8753	8,7	8712	10,0	8738	8,1	8738	9,1
23,0 bis 23,9	8726	8,9	8712	8,9	8753	6,0	8738	8,6	8664	9,9	8722	8,1	8712	9,1
22,0 bis 22,9	8669	8,8	8674	8,9	8741	6,0	8712	8,6	8580	9,8	8690	8,0	8671	9,0
21,0 bis 21,9	8597	8,6	8616	8,8	8719	5,9	8662	8,5	8480	9,6	8604	7,9	8594	8,9
20,0 bis 20,9	8486	8,5	8518	8,6	8681	5,8	8594	8,4	8263	9,3	8486	7,7	8494	8,7
19,0 bis 19,9	8318	8,2	8374	8,4	8630	5,8	8486	8,3	8018	9,0	8309	7,4	8354	8,5
18,0 bis 18,9	8105	7,9	8196	8,2	8546	5,6	8302	8,0	7709	8,5	8087	7,1	8174	8,3
17,0 bis 17,9	7826	7,6	7951	7,8	8420	5,4	8071	7,7	7349	8,0	7771	6,6	7934	8,0
16,0 bis 16,9	7500	7,1	7651	7,5	8268	5,2	7769	7,3	6938	7,5	7423	6,1	7610	7,6
15,0 bis 15,9	7118	6,6	7274	7,0	8083	5,0	7368	6,8	6547	7,0	7054	5,6	7241	7,1
14,0 bis 14,9	6684	6,1	6814	6,4	7824	4,6	6895	6,3	6144	6,4	6694	5,1	6802	6,6
13,0 bis 13,9	6233	5,4	6310	5,6	7524	4,2	6372	5,6	5746	5,6	6329	4,5	6324	6,0
12,0 bis 12,9	5803	4,8	5858	5,2	7162	3,8	5904	5,0	5381	5,3	5940	3,9	5861	5,4
11,0 bis 11,9	5431	4,3	5482	4,7	6768	3,2	5498	4,4	5026	4,8	5542	3,3	5446	4,8
10,0 bis 10,9	5074	3,8	5083	4,2	6339	2,7	5150	3,9	4668	4,3	5218	2,8	5066	4,3
9,0 bis 9,9	4754	3,4	4728	3,7	5878	2,1	4831	3,5	4325	3,8	4894	2,3	4682	3,8
8,0 bis 8,9	4375	2,8	4386	3,2	5474	1,5	4498	3,0	3955	3,3	4586	1,8	4325	3,4
7,0 bis 7,9	4039	2,4	4003	2,7	5107	1,0	4142	2,6	3654	2,7	4277	1,3	3938	2,9
6,0 bis 6,9	3619	1,8	3583	2,2	4776	0,6	3761	2,1	3170	2,1	3936	0,8	3509	2,3
5,0 bis 5,9	3230	1,2	3118	1,5	4423	0,1	3324	1,5	2777	1,5	3598	0,2	3041	1,7
4,0 bis 4,9	2806	0,6	2652	0,8	4063	-0,4	2880	0,9	2378	0,8	3250	-0,3	2582	1,0
3,0 bis 3,9	2378	-0,1	2227	0,1	3691	-0,9	2424	0,2	2006	0,1	2880	-0,9	2124	0,2
2,0 bis 2,9	1994	-0,8	1812	-0,6	3269	-1,4	2018	-0,5	1618	-0,7	2513	-1,6	1745	-0,5
1,0 bis 1,9	1603	-1,6	1435	-1,4	2839	-2,0	1674	-1,3	1308	-1,5	2143	-2,3	1385	-1,3
0,0 bis 0,9	1222	-2,6	1102	-2,3	2366	-2,7	1207	-2,2	1003	-2,4	1757	-3,1	1039	-2,2
-0,0 bis -0,9	928	-3,6	809	-3,4	1922	-3,5	886	-3,2	761	-3,3	1402	-4,0	766	-3,2
-1,0 bis -1,9	713	-4,6	614	-4,2	1502	-4,3	670	-4,0	564	-4,3	1126	-4,8	574	-4,0
-2,0 bis -2,9	545	-5,6	461	-5,2	1162	-5,1	482	-5,0	418	-5,2	886	-5,8	410	-5,1
-3,0 bis -3,9	425	-6,4	338	-6,1	867	-6,1	362	-5,8	314	-6,1	694	-6,7	305	-6,0
-4,0 bis -4,9	334	-7,2	245	-7,1	636	-7,0	259	-6,8	238	-7,0	540	-7,6	221	-6,9
-5,0 bis -5,9	250	-8,0	178	-8,1	478	-7,8	190	-7,6	178	-7,8	415	-8,6	173	-7,6
-6,0 bis -6,9	182	-9,0	134	-9,0	346	-8,7	132	-8,5	130	-8,7	324	-9,5	118	-8,5
-7,0 bis -7,9	130	-10,0	98	-9,9	240	-9,7	91	-9,4	96	-9,5	250	-10,3	84	-9,3
-8,0 bis -8,9	98	-10,8	72	-10,8	175	-10,4	60	-10,4	62	-10,6	194	-11,2	60	-10,5
-9,0 bis -9,9	72	-11,7	53	-11,6	108	-11,7	46	-11,0	46	-11,3	151	-11,9	36	-11,4
-10,0 bis -10,9	58	-12,3	38	-12,4	77	-12,6	34	-11,6	31	-12,2	110	-12,8	24	-12,3
-11,0 bis -11,9	48	-12,8	29	-13,1	58	-13,2	19	-12,4	17	-13,6	84	-13,5	17	-13,1
-12,0 bis -12,9	29	-13,5	19	-13,9	43	-13,8	10	-13,2	12	-14,5	56	-14,6	12	-13,7
-13,0 bis -13,9	17	-14,2	12	-14,7	26	-14,7	2	-15,5	10	-15,0	38	-15,5	6	-15,5
-14,0 bis -14,9	9	-14,8	7	-15,5	14	-15,7	2	-15,5	7	-15,5	26	-16,4	5	-15,5
-15,0 bis -15,9	2	-15,5	5	-16,0	7	-16,8	2	-15,5	5	-16,0	19	-17,1	3	-16,5
-16,0 bis -16,9	—	—	2	-16,5	2	-19,5	—	—	2	-16,5	14	-17,7	2	-16,8
-17,0 bis -17,9	—	—	—	—	2	-19,5	—	—	—	—	7	-18,8	—	—
-18,0 bis -18,9	—	—	—	—	2	-19,5	—	—	—	—	5	-19,5	—	—
-19,0 bis -19,9	—	—	—	—	2	-19,5	—	—	—	—	2	-20,5	—	—
-20,0 bis -20,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	-20,5	—	—

⁸⁸ R. Jenisch und W. Schüle, Untersuchungsbericht verschiedener Verfahren des klimabedingten Feuchtigkeits-schutzes, Institut für Bauphysik Stuttgart, Heft 102, 1975, S. 36, Tabelle 3

3.4 Verfahren nach DIN EN ISO 13788

Die DIN EN ISO 13788 beschreibt vereinfachte Berechnungsverfahren, welche die raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung der kritischen Oberflächenfeuchte sowie der Tauwasserbildung im Bauteilinneren behandeln. Andere Feuchteaspekte wie z. B. Grundwasser, Niederschlag, Rohbaufeuchte und Feuchtekonvektion werden hierbei nicht betrachtet.

3.4.1 Entstehung

Diese Norm hat seit November 2001 Gültigkeit und ist ein teilweiser Ersatz für die DIN 4108-3:2001-07. Sie gehört zu einer Reihe von Normen, die Prüfverfahren für Wärme- und Feuchteschutzeigenschaften von Baustoffen festlegen. Das in DIN 4108-3 genormte Diffusionsberechnungsverfahren nach Glaser wurde im Rahmen der europäischen Normung so überarbeitet, dass es in allen europäischen Ländern eingesetzt werden kann.

3.4.2 Inhalt

In den folgenden Abschnitten wird das Verfahren nach DIN EN ISO 13788 genauer beschrieben.

3.4.2.1 Grundlagen

a) Anwendungsbereich

„Diese Norm beschreibt Verfahren zur Berechnung

- der raumseitigen Oberflächentemperatur von Bauteilen oder Bauelementen, unterhalb welcher bei der gegebenen Innentemperatur und relativen Luftfeuchte ein Befall durch Schimmel wahrscheinlich ist. Außerdem lässt sich mit dem Verfahren beurteilen, ob ein Risiko besteht dass im Zusammenhang mit der Tauwasserbildung auf der Oberfläche andere Probleme auftreten können.
- der Gefahr der Tauwasserbildung im Bauteilinneren infolge von Wasserdampfdiffusion. Voraussetzung hierbei ist, dass die Rohbaufeuchte

ausgetrocknet ist. Dieses Berechnungsverfahren gilt nur für Bauwerke, bei denen nachfolgend genannte Wirkungen vernachlässigbar sind:

- Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt,
- Freisetzung und Verbrauch latenter Wärme,
- Veränderungen der Stoffeigenschaften in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt,
- Saugwirkung von Kapillaren und Transport von Feuchte in der flüssigen Phase in Baustoffen,
- Luftbewegung durch Spalten oder in Luftschichten und
- hygroskopisches Verhalten von Baustoffen.“⁸⁹

b) Material- und Produkteigenschaften

„Für Luftschichten wird R aus DIN EN ISO 6946 entnommen; s_d wird unabhängig von Luftschichtdicke und Neigung mit 0,01 m angenommen.“⁹⁰

c) Klimabedingungen

Eine Übersicht über die Klimabedingungen soll nachfolgend die Tabelle 3-8 geben.

⁸⁹ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 3, Abschnitt 1

⁹⁰ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 6, Abschnitt 4.1

Tabelle 3-8 Klimabedingungen nach DIN EN ISO 13788⁹¹

Zeile	Randbedingungen	
1	Standort	Es gelten die außenseitigen Bedingungen abhängig vom Standortes des Gebäudes.
2	Temperaturen	
3	Außenseitig	Zur Beurteilung von Gebäuden hinsichtlich der Gefahr des Schimmelbefalls bzw. der Tauwasserbildung im Bauteilinneren sind monatliche Mittelwerte zu verwenden. Für Bauelemente mit niedriger Wärmeträgheit (z.B. Fenster und deren Rahmen) ist für die Berechnung der Tauwasserbildung an den Oberflächen der jährliche Mittelwert der Tagesmindesttemperatur sowie die entsprechende relative Luftfeuchte anzuwenden.
4	Raumseitig	Es sind Werte entsprechend der zu erwartenden Gebäudenutzung anzuwenden; sie können national festgelegt werden.
5	Erdreich	Es ist der jährliche Mittelwert der außenseitigen Lufttemperatur anzuwenden.
6	Feuchtebedingungen	
7	Außenseitig	Zur Festlegung der außenseitigen Luftfeuchtebedingungen ist die volumenbezogene Luftfeuchte oder der Wasserdampfdruck anzuwenden [siehe Gleichungen (3.55) bis (3.60)]. Für Bauelemente mit niedriger Wärmeträgheit (z.B. Fenster und deren Rahmen) ist für die Berechnung der Tauwasserbildung an den Oberflächen der jährliche Mittelwert der Tagesmindesttemperatur sowie die entsprechende relative Luftfeuchte anzuwenden.
8	Raumseitig	Die raumseitigen Luftfeuchte wird nach der Gleichungen (3.61) oder (3.62) unter Zugrundelegung der Gleichungen (3.55) bis (3.60) abgeleitet. Die Werte Δp bzw. Δv sind zur Sicherheit mit dem Faktor 1,10 zu multiplizieren. Sie kann aber auch als Konstante angegeben werden, wenn sie bekannt ist und konstant gehalten wird (z.B. durch Klimatisierung). Hierbei ist die relative Luftfeuchte um 0,05 zu erhöhen (Sicherheitsspielraum).
9	Erdreich	Es wird eine relative Luftfeuchte von $\varphi = 1$ angenommen.

Zeile 3 und 5:

Mittlere Monats- bzw. Jahreswerte aus Klimatabellen⁹²

Zeile 4:

In Deutschland wird für Wohnräume eine Innentemperatur von 20 °C verwendet.

⁹¹ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 6f, Abschnitt 4.2

⁹² z. B. Klimadaten vom Deutschen Wetterdienst

Zeile 7:

Die außenseitige relative Luftfeuchte φ_e berechnet sich aus dem monatlichen Mittelwert des Wasserdampfdruckes \bar{p}_e oder dem monatlichen Mittelwert der volumenbezogenen Luftfeuchte \bar{v}_e und dem Sättigungsdruck von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur.

$$\varphi_e = \frac{\bar{p}_e}{p_{sat}} \quad (3.61)$$

Dabei berechnet sich der monatliche Mittelwert des Wasserdampfdruckes wie folgt:

$$\bar{p}_e = \bar{\varphi}_e p_{sat}(\bar{\Theta}_e) \quad [Pa]. \quad (3.62)$$

Der monatliche Mittelwert $\bar{\varphi}_e$ wird abhängig von Standort des Gebäudes aus Klimatabellen⁹³ entnommen.

Der Sättigungsdampfdruck beträgt in Abhängigkeit von der Temperatur:

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{17,26 \cdot \Theta}{237,3 + \Theta}} \quad [Pa] \quad \text{wenn } \Theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (3.63)$$

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{21,87 \cdot \Theta}{265,5 + \Theta}} \quad [Pa] \quad \text{wenn } \Theta < 0^\circ\text{C}. \quad (3.64)$$

Wird die Berechnung mit Hilfe der volumenbezogenen Luftfeuchte durchgeführt, gilt die Beziehung gemäß Gleichung (3.65).

$$\bar{p}_e = \bar{v}_e R_v T \quad [Pa] \quad (3.65)$$

mit: R_v - Gaskonstante für Wasser = $462 \frac{Pa \cdot m^3}{K \cdot kg}$

T - thermodynamische Temperatur in K .

⁹³ z. B. Klimadaten vom Deutschen Wetterdienst

Wobei sich die volumenbezogene Luftfeuchte zu

$$\bar{v}_e = \bar{\varphi}_e v_{sat} (\bar{\Theta}_e) \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.66)$$

ergibt.

Der Wert v_{sat} kann, wie auch p_{sat} , aus der DIN EN ISO 13788, Tabelle E.1, S. 28 entnommen werden.

Zeile 8:

Die raumseitige Luftfeuchte φ_i kann aus dem raumseitigen Wasserdampfdruck p_i

$$p_i = p_e + \Delta p \quad [Pa] \quad (3.67)$$

oder aus der raumseitigen volumenbezogenen Luftfeuchte gemäß Gleichung (3.68) abgeleitet werden.

$$v_i = v_e + \Delta v \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.68)$$

mit: Δp - raumseitiges Dampfdruckgefälle in Pa

Δv - raumseitige Feuchtezufuhr = $\frac{G}{n V}$ in kg/m^3

mit: G - raumseitige Feuchtebelastung in kg/h

n - Luftwechselrate in h^{-1}

V - Raumvolumen in m^3

Die Werte Δp und Δv werden entsprechend dem voraussichtlichen Verwendungszweck (Tabelle 3-9) in Abhängigkeit der außenseitigen Temperatur einem Diagramm entnommen (Bild 3-9). Das raumseitige Dampfdruckgefälle kann auch nach Gleichung (3.69) berechnet werden.

$$\Delta p = \Delta v \cdot R_v \cdot [273 + (T_i + T_e) / 2]^{94} \quad (3.69)$$

mit: T_i, T_e - thermodynamische Temperatur in K

Tabelle 3-9 Raumseitige Luftfeuchteklassen⁹⁵

Luftfeuchteklassen	Gebäude
1	Lager
2	Büros, Geschäfte
3	Wohnhäuser mit geringer Belegung
4	Wohnhäuser mit hoher Belegung, Sporthallen, Küchen, Kantinen, Gebäude mit Gasöfen ohne Schornsteinanschluss
5	Besondere Gebäude, z. B. Wäschereien, Brauereien, Schwimmbäder

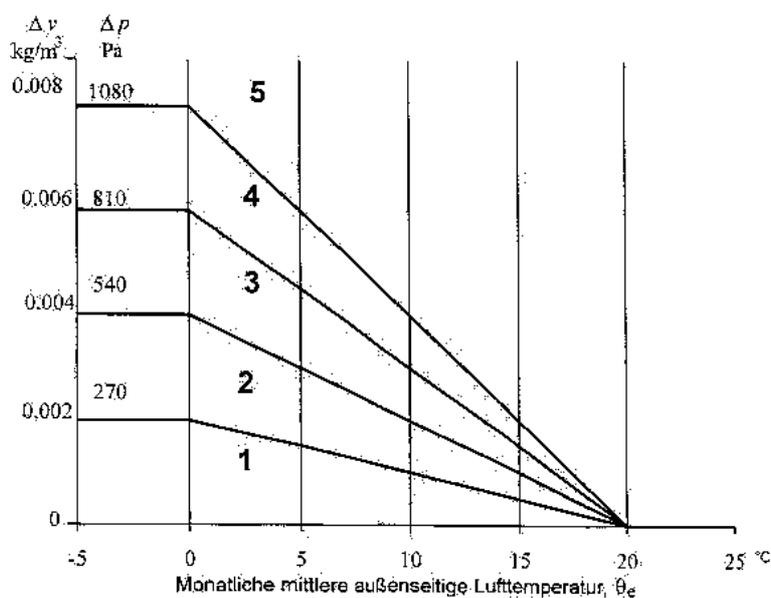


Bild 3-9 Veränderung der raumseitigen Luftfeuchteklassen in Abhängigkeit der Außentemperatur⁹⁶

⁹⁴ In der DIN EN ISO 13788 ist die Formel unvollständig abgedruckt.

⁹⁵ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 17, Anhang A, Tabelle A.1

⁹⁶ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 17, Anhang A, Tabelle A.1

d) Übergangswiderstände an Oberflächen

Für die Beurteilung des Schimmelbefalls und der Tauwasserbildung im Bauteilinneren sind die in Tabelle 3-10 angegebenen Wärmedurchlasswiderstände anzuwenden.

Tabelle 3-10 Wärmedurchlasswiderstände an der Oberfläche⁹⁷

Wärmedurchlasswiderstand	m ² K / W
an außenseitigen Oberflächen R_{se}	0,04
an raumseitigen Oberflächen R_{si}	
an Verglasungen und Rahmen	0,13
andere raumseitige Oberflächen	0,25

Der Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstand wird vernachlässigt.

3.4.2.2 Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung der kritischen Oberflächenfeuchte

„In diesem Abschnitt wird ein Verfahren zur Auslegung der Gebäudehülle festgelegt, um negativen Wirkungen der kritischen Oberflächenfeuchte, z. B. Schimmelbefall, vorzubeugen.“⁹⁸

a) Vorgehensweise zur Beurteilung des möglichen Schimmelbefalls eines Bauteils

„Es besteht das Risiko eines Schimmelbefalls an Oberflächen, wenn die relative Luftfeuchte über mehrere Tage den Wert **0,8** übersteigt.“⁹⁹

Folgende Schritte sind für **jeden einzelnen Monat** auszuführen:¹⁰⁰

1. Festlegung der außenseitigen Lufttemperatur nach Tabelle 3-8, Zeile 3
2. Festlegung der außenseitigen Luftfeuchte nach Tabelle 3-8, Zeile 7

⁹⁷ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 7, Abschnitt 4.3.1

⁹⁸ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 8, Abschnitt 5.1

⁹⁹ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 8, Abschnitt 5.1

¹⁰⁰ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 8 f, Abschnitt 5.3

3. Festlegung der raumseitigen Temperatur nach Tabelle 3-8, Zeile 4
4. Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte nach Tabelle 3-8, Zeile 8
5. Berechnung des niedrigsten zulässigen Sättigungsdampfdruckes p_{sat} oder der niedrigsten zulässigen volumenbezogenen Sättigungsluftfeuchte ν_{sat} mit der höchsten angenommenen relativen Luftfeuchte an der Oberfläche $\varphi_{si} = 0,8$:

$$p_{sat}(\Theta_{si}) = \frac{p_i}{0,8} \quad [Pa] \quad (3.70)$$

oder

$$\nu_{sat}(\Theta_{si}) = \frac{\nu_i}{0,8} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.71)$$

6. Bestimmung der niedrigsten zulässigen Oberflächentemperatur $\Theta_{si,min}$ aus der niedrigsten zulässigen Sättigungsluftfeuchte nach folgenden Gleichungen:

$$\Theta_{si,min} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad [^{\circ}C] \quad \text{wenn } p_{sat} \geq 610,5 Pa \quad (3.72)$$

$$\Theta_{si,min} = \frac{265,5 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} \quad [^{\circ}C] \quad \text{wenn } p_{sat} < 610,5 Pa \quad (3.73)$$

7. Berechnung des Mindestwertes des Temperaturfaktors $f_{Rsi,min}$ aus der niedrigsten zulässigen Oberflächentemperatur $\Theta_{si,min}$, der angenommenen

raumseitigen Lufttemperatur Θ_i ¹⁰¹ und der Außentemperatur Θ_e ¹⁰² nach Gleichung (3.74).

$$f_{Rsi,min} = \frac{\Theta_{si,min} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} \quad (3.74)$$

Der Monat mit dem höchsten erforderlichen Wert $f_{Rsi,min}$ ist der kritische Monat. Der Temperaturfaktor dieses Monats ist $f_{Rsi,max}$. Das Bauteil ist so zu bemessen, dass $f_{Rsi,max}$ immer überschritten wird:

$$f_{R,si} > f_{Rsi,max} \cdot \quad (3.75)$$

mit: $f_{R,si} = (U^{-1} - R_{si}) / U^{-1}$ (für ebene Elemente) (3.76)

b) Vorgehensweise zur Beurteilung der möglichen Oberflächenfeuchte in leichten Bauweisen

Reagieren Bauteile in leichter Bauweise innerhalb eines Zeitraumes, der weniger als ein Tag beträgt, auf Temperaturschwankungen, werden nachfolgend beschriebene Berechnungen durchgeführt:¹⁰³

1. Festlegung der außenseitigen Lufttemperatur als mittlere jährliche Mindesttemperatur nach Tabelle 3-8, Zeile 3.
2. Festlegung der außenseitigen relativen Luftfeuchte zu $\varphi_e = 0,95$ und Berechnung des Dampfdruckes oder der volumenbezogenen Luftfeuchte nach den Gleichungen (3.65) bzw. (3.66).
3. Festlegung der raumseitigen Temperatur nach Tabelle 3-8, Zeile 4.
4. Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte nach Tabelle 3-8, Zeile 8.

¹⁰¹ Tabelle 3-8, Zeile 4

¹⁰² Tabelle 3-8, Zeile 3

¹⁰³ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 9 f, Abschnitt 5.4

5. Berechnung des niedrigsten zulässigen Sättigungsdampfdruckes p_{sat} oder der niedrigsten zulässigen volumenbezogenen Sättigungsluftfeuchte ν_{sat} mit der höchsten angenommenen relativen Luftfeuchte an der Oberfläche $\varphi_{si} = 1,0$:

$$p_{sat}(\Theta_{si}) = p_i \quad [Pa] \quad (3.77)$$

oder

$$\nu_{sat}(\Theta_{si}) = \nu_i \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.78)$$

6. Bestimmung der niedrigsten zulässigen Oberflächentemperatur $\Theta_{si,min}$ aus der niedrigsten zulässigen Sättigungsluftfeuchte nach den Gleichungen (3.74) und (3.75).
7. Berechnung des für die Gebäudehülle erforderlichen Temperaturfaktors $f_{Rsi,min}$.¹⁰⁴

3.4.2.3 Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren

a) Voraussetzung

Es wird „davon ausgegangen, dass die gesamte Rohbaufeuchte ausgetrocknet ist.“ Weiterhin werden „eindimensionale stationäre Bedingungen vorausgesetzt. Luftbewegungen durch oder innerhalb von Bauteilen werden nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der Feuchtetransport nur als reine Wasserdampfdiffusion erfolgt.“¹⁰⁵

b) Materialeigenschaften¹⁰⁶

„Jede Schicht ist als separate Schicht zu betrachten. Bauteile mit einem hohen Wärmedurchlasswiderstand, wie z. B. Wärmedämmstoffe, werden in eine Reihe von Schichten

¹⁰⁴ wie unter Abschnitt 3.4.2.2, Seite 59 beschrieben

¹⁰⁵ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 10, Abschnitt 6.1 u. 6.2

¹⁰⁶ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 11, Abschnitt 6.4.1

unterteilt, wobei jede Schicht den gleichen Wärmedurchlasswiderstand R von maximal $0,25 m^2 \cdot K / W$ aufweisen muss. Diese Unterteilungen werden in allen Berechnungen als separate Materialschichten betrachtet.“¹⁰⁷

Materialien, die den Durchgang von Wasserdampf verhindern, besitzen eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu = \infty$. Für dieses Berechnungsverfahren wird aber ein finiter Wert benötigt, der mit $\mu = 100.000$ angenommen wird.

Zwischen der Außenluft und jeder Grenzfläche n werden der akkumulierte Wärmedurchlasswiderstand R'_n und die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s'_{d,n}$ gemäß den Gleichungen (3.79) und (3.80) berechnet.

$$R'_n = R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.79)$$

$$s'_{d,n} = \sum_{j=1}^n s_{d,j} = \mu_1 \cdot d_1 + \mu_2 \cdot d_2 + \mu_n \cdot d_n \quad [m] \quad (3.80)$$

Demzufolge errechnen sich der Gesamtwärmedurchlasswiderstand R'_T und die gesamte wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s'_{d,T}$ nach den Gleichungen (3.81) und (3.82).

$$R'_T = R_{si} + \sum_{j=1}^N R_j + R_{se} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3.81)$$

$$s'_{d,T} = \sum_{j=1}^N s_{d,j} \quad [m] \quad (3.82)$$

¹⁰⁷ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 11, Abschnitt 6.4.1

c) Randbedingungen

Die Klimabedingungen sind wie in Tabelle 3-8 beschrieben zu verwenden.¹⁰⁸

d) Anfangsmonat

Der Anfangsmonat wird nach den Kriterien des nachfolgenden Abschnittes festgelegt.¹⁰⁹

- Es wird ein beliebiger Monat als sogenannter Probemonat gewählt und für diesen die Temperatur, der Sättigungsdampfdruck sowie die Wasserdampfverteilung im Bauteil berechnet. Wird für diesen Probemonat keine Tauwasserbildung erwartet, wird die Berechnung an den darauffolgenden Monaten solange wiederholt, bis entweder
 - in keinem der Monate Tauwasser gebildet wurde; dann wird das Bauteil als frei von Tauwasser bezeichnetoder
 - in einem der Monate Tauwasserbildung festgestellt wurde; dann ist dieser Monat der Anfangsmonat.

- Wird für den Probemonat jedoch Tauwasser erwartet, wird die Berechnung mit dem jeweils vorangehenden Monat wiederholt, bis entweder
 - Tauwasserbildung für alle zwölf Monate vorhergesagt wird, dann wird ein beliebiger Monat als Anfangsmonat gewählt und die Akkumulation¹¹⁰ von Tauwasser für das gesamte Jahr ausgeführtoder
 - es kommt ein Monat mit Tauwasserbildung vor, so gilt der darauffolgende Monat als Anfangsmonat.

¹⁰⁸ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 11, Abschnitt 6.4.2

¹⁰⁹ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 12, Abschnitt 6.4.3

¹¹⁰ lateinisch für Anhäufung

e) Temperatur- und Sättigungsdampfdruckverteilung

An jedem Übergang zwischen zwei Materialien wird die Temperatur nach Gleichung (3.83) berechnet.¹¹¹

$$\theta_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T} (\theta_i - \theta_e) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.83)$$

Aufgrund der vorausgesetzten stationären Bedingungen verläuft die Temperatur linear, wie Abbildung 3-10 zeigt.

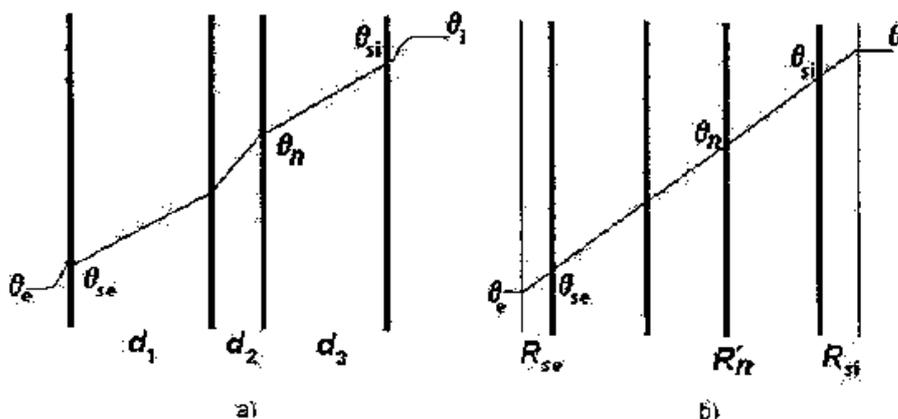


Bild 3-10 Temperaturverteilung in einem mehrschichtigen Bauteil¹¹²

Der Sättigungsdampfdruck zwischen zwei Materialschichten ergibt sich aus der Temperatur zwischen zwei Materialschichten nach den Gleichungen (3.63) bzw. (3.64).¹¹¹

f) Dampfdruckverteilung¹¹³

Der Querschnitt des Bauteils wird so gezeichnet, dass die Schichtdicken entsprechend ihrer wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke s_d dargestellt werden. Danach wird der Sättigungsdampfdruck eingezeichnet.

¹¹¹ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 12, Abschnitt 6.4.4

¹¹² DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 12, Abschnitt 6.4.4

¹¹³ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 13, Abschnitt 6.4.5

Tritt kein Tauwasser auf, verläuft der Wasserdampfdruck geradlinig zwischen dem raum- und außenseitigen Wasserdampfdruck wie in Bild 3-11 dargestellt. Dabei verläuft der Wasserdampfdruck an jedem Punkt im Bauteil unterhalb des Sättigungsdampfdruckes.

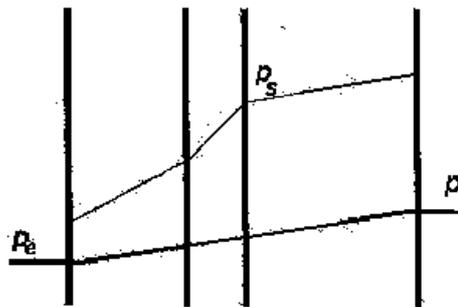


Bild 3-11 Wasserdampfdiffusion in einem mehrschichtigen Bauteil ohne Tauwasserbildung im Bauteilinneren¹¹⁴

Übersteigt der Wasserdampfdruck an einer Stelle den Sättigungsdruck, so wird dieser als eine Reihe von Geraden neu gezeichnet. Dabei darf der Wasserdampfdruck den Sättigungsdruck höchstens berühren, jedoch nicht kreuzen. Die Berührungspunkte stellen die Grenzflächen der Tauwasserbildung dar (siehe Bild 3-12).

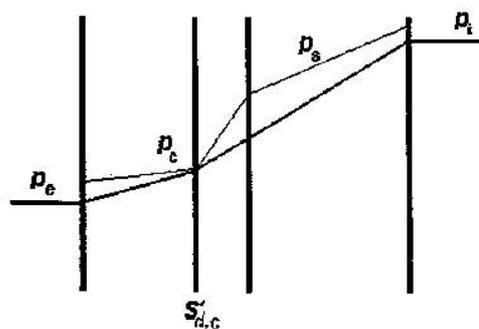


Bild 3-12 Wasserdampfdiffusion mit Tauwasserbildung im Bauteilinneren in einer Grenzebene¹¹⁵

¹¹⁴ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 13, Abschnitt 6.4.5

¹¹⁵ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 13, Abschnitt 6.4.5

g) Tauwasserbildung¹¹⁶

Die Tauwassermenge ergibt sich aus der Differenz der Feuchtemenge, die zur Grenzfläche hintransportiert wird und der Feuchtemenge, die von dort abgeführt wird:

$$g_c = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]. \quad (3.84)$$

mit: δ_0 - Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient = $2 \cdot 10^{-10} \text{ kg / (m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$

p_i, p_e - Wasserdampfteildrücke innen bzw. außen

p_c - Wasserdampfteildruck an einer Grenzfläche mit Tauwasserbildung

$s'_{d,T}$ - gesamte wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke des Bauteils

$s'_{d,c}$ - wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke des Bauteils bis zu der Grenzfläche mit Tauwasserbildung

Berührt der Wasserdampfteildruck den Sättigungsdruck an mehreren Grenzflächen (Bild 3-13), so erfolgt die Berechnung der Tauwassermenge für jede Grenzfläche aus der Differenz der Steigung der aufeinanderfolgenden Geraden nach den Gleichungen (3.85) und (3.86).

Grenzschnitt $c1$:

$$g_{c1} = \delta_0 \left(\frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (3.85)$$

Grenzschnitt $c2$:

$$g_{c2} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (3.86)$$

¹¹⁶ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 14, Abschnitt 6.4.6

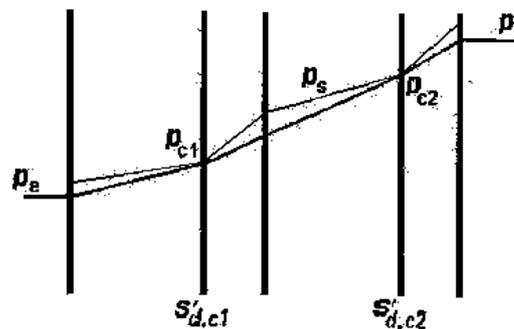


Bild 3-13 Wasserdampfdiffusion mit Tauwasserbildung in zwei Grenzebenen¹¹⁷

h) Verdunstung¹¹⁸

Der Verlauf des Wasserdampfdruckes wird durch Verbindungsgeraden zwischen dem raumseitigen Wasserdampfdruck, der Grenzfläche mit Tauwasserbildung sowie dem außenseitigen Wasserdampfdruck dargestellt (Bild 3-14).

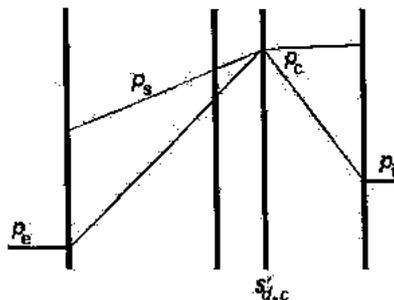


Bild 3-14 Verdunstung an einer Grenzfläche innerhalb eines Bauteiles¹¹⁹

Analog zur Ermittlung der Tauwassermenge wird auch die Verdunstungsmenge berechnet, das heißt die Verdunstungsmenge wird für jede Grenzfläche aus der Differenz der Steigung der aufeinanderfolgenden Geraden ermittelt.

$$g_{ev} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (3.87)$$

mit: ev - Index für Verdunstung

¹¹⁷ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 14, Abschnitt 6.4.6

¹¹⁸ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 14 f, Abschnitt 6.4.7

¹¹⁹ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 14 f, Abschnitt 6.4.7

Bei Vorhandensein mehrerer Grenzflächen mit Tauwasserbildung wird auch die Verdunstungsmenge für jede Grenzfläche gemäß den Gleichungen (3.85) und (3.86) gesondert berechnet, siehe dazu Bild 3-15.

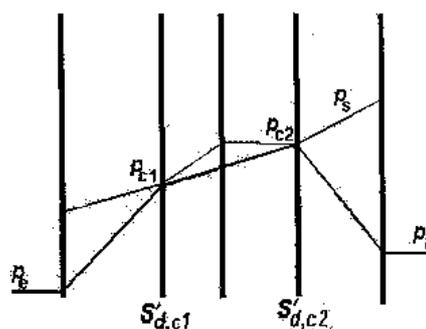


Bild 3-15 Verdunstung an einem Bauteil mit Tauwasserbildung in zwei Grenzflächen¹²⁰

Ergibt die akkumulierte Tauwassermenge in einer Grenzfläche am Monatsende einen negativen Wert, ist sie als null anzugeben.

i) Verdunstung und Tauwasserbildung¹²¹

In einem Bauteil mit mehreren Grenzflächen mit Tauwasserbildung könnte es Monate mit Tauwasserbildung in einer Grenzfläche und Verdunstung in einer anderen geben (siehe Bild 3-16). Die Tauwassermenge g_c bzw. die Verdunstungsmenge g_{ev} wird analog zu Absatz g) und h) für jede Grenzfläche gesondert berechnet:

Tauwasserbildung zwischen den Schichten 1 und 2:

$$g_c = \delta_0 \left(\frac{p_{ev2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (3.88)$$

¹²⁰ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 14f, Abschnitt 6.4.7

¹²¹ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 15f, Abschnitt 6.4.8

Verdunstung zwischen den Schichten 3 und 4:

$$g_{ev} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_{ev2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{ev2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (3.89)$$

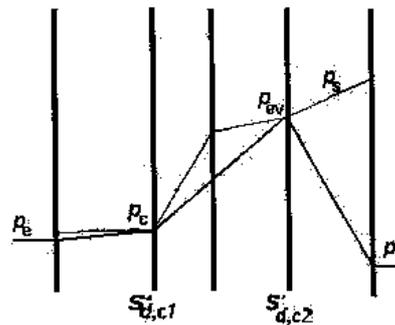


Bild 3-16 Verdunstung an einer Grenzfläche und Tauwasserbildung an einer anderen Grenzfläche in einem Bauteil, bei dem Tauwasserbildung an zwei Grenzflächen aufgetreten ist.¹²²

j) Beurteilung der Berechnungsergebnisse

Nachfolgend wurden die Beurteilungskriterien hinsichtlich der Tauwasserbildung im Bauteilinneren in einer Tabelle zusammengestellt.

¹²² DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 15f, Abschnitt 6.4.8

Tabelle 3-11 Beurteilungskriterien¹²³

Ergebnis		Beurteilung
A	Tauwasserbildung wird für keine Grenzfläche und für keinen Monat vorhergesagt.	Das Bauteil ist frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren.
B	Tauwasserbildung tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf; bei jeder betroffenen Grenzfläche wird jedoch die <u>vollständige</u> Verdunstung des Tauwassers in den Sommermonaten vorhergesagt.	Angabe <ul style="list-style-type: none"> ▪ der maximalen Tauwassermenge, die an der Grenzfläche auftritt und den dazugehörigen Monat Berücksichtigung der gesetzlichen Bestimmungen und Hinweise in Produktnormen hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> ▪ der Gefahr der Verschlechterung des Zustandes von Baustoffen ▪ sowie der Verminderung der Wärmedämmung als Folge der berechneten maximalen Tauwassermenge.
C	Tauwasser, das sich an einer oder mehreren Grenzflächen bildet, verdunstet in den Sommermonaten <u>unvollständig</u> .	Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden. Angabe der Feuchtemenge <ul style="list-style-type: none"> ▪ die sich an jeder Grenzfläche bildet ▪ die nach 12 Monaten an jeder Grenzfläche verbleibt.

¹²³ DIN EN ISO 13788:2001-11, S. 16, Abschnitt 6.5

4 Vergleichsstudie an Fallbeispielen

In diesem Abschnitt wird eine Vergleichsstudie über die Berechnungsverfahren nach DIN 4108-3, *Jenisch* und DIN EN ISO 13788 in Bezug auf die Tauwasserbildung im Bauteilinneren durchgeführt. Dabei wird der Bauteiltyp und die Art der Konstruktion betrachtet. Zusätzlich soll die Anwendbarkeit der einzelnen Nachweisverfahren hinsichtlich der Klimarandbedingungen auf verschiedene Klimazonen geprüft werden.

Die Berechnungen wurden zum Teil mit Hilfe der Bauphysiksoftware Dämmwerk 5.10 der Firma KERN-Ingenieurkonzepte erstellt. Für die Verfahren *Jenisch* und DIN EN ISO 13788 werden die aktuellen Klimadaten vom Deutschen Wetterdienst verwendet.

4.1 Variation Bauteiltyp

Nachfolgend werden die verschiedenen Berechnungsverfahren getrennt nach DIN 4108-3, *Jenisch* und DIN EN ISO 13788 betrachtet und deren Ergebnisse in Bezug auf Tauwasserbildung im Bauteilinneren gegenübergestellt und diskutiert.

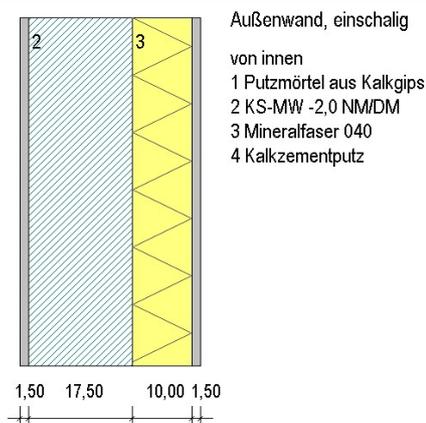
Das erste Beispiel wird von Hand nachvollziehbar berechnet und graphisch dargestellt. Alle anderen untersuchten Konstruktionen werden mit Hilfe des Bauphysik-Programms DÄMMWERK 5.10 berechnet.

Der Standort für die verschiedenen Bauteiltypen soll Hamburg sein.¹ Sämtliche Berechnungen wurden als Wohnhauskonstruktionen durchgeführt.

4.1.1 Außenwand, einschalig

Bei der zu untersuchenden Wand handelt es sich um eine einschalige Mauerwerkswand, welche an die Außenluft grenzt. Der Aufbau dieser Konstruktion ist in Bild 4-4 dargestellt.

¹ Klimadaten vom Deutschen Wetterdienst der Periode von 1961 bis 1990

Bild 4-1 Schichtaufbau Außenwand²

4.1.1.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Sämtliche für die Berechnung erforderlichen Eingangsgrößen sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt. Die Klimabedingungen werden aus der Tabelle 3-4, die Wasserdampfsättigungsdrücke aus Tabelle 3-5 in Abhängigkeit der jeweiligen Lufttemperatur entnommen. Die Wasserdampfteildrücke berechnen sich nach Gleichung (3.30).

Tabelle 4-1 Eingangsgrößen

Periode bzw. Klimamerkmale	Innenklima	Außenklima
Tauperiode (1440 h)		
Lufttemperatur	20 °C	-10 °C
Relative Luftfeuchte	50 %	80 %
Wasserdampfsättigungsdruck	2340 Pa	260 Pa
Wasserdampfteildruck	1170 Pa	208 Pa
Verdunstungsperiode (2160 h)		
Lufttemperatur	12 °C	12 °C
Relative Luftfeuchte	70 %	70 %
Wasserdampfsättigungsdruck	1403 Pa	1403 Pa
Wasserdampfteildruck	982 Pa	982 Pa

² Der Schichtaufbau wurde der Baustoffdatenbank von DÄMMWERK 5.10 entnommen.

Die für das Diffusionsdiagramm erforderlichen Größen werden in Tabelle 4-2 berechnet.

Tabelle 4-2 Berechnung der erforderlichen Größen in der Tauperiode

Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,13	20	2340
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	18,7	2158
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	18,5	2132
3	Mineralfaser 040	0,100	1	0,10	0,040	2,50	16,9	1926
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	-9,3	276
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	-9,5	272
			$\sum s_d =$	3,41	$R_T =$	2,87		

Auf der Abszisse eines Diffusionsdiagramms (*Glaser-Diagramm*) werden die wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicken s_d aufgetragen. Die Ordinate gibt den Wasserdampfdruck an.

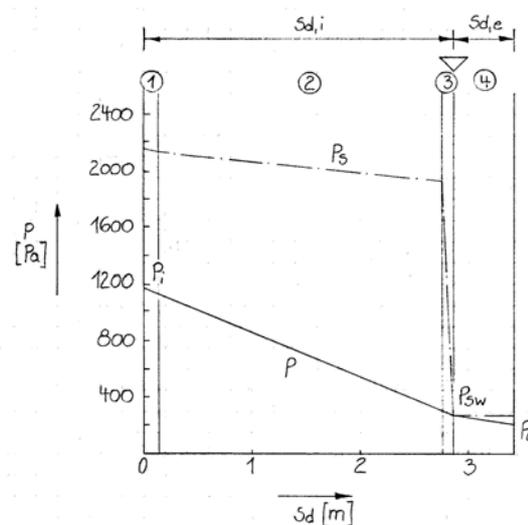


Bild 4-2 Diffusionsdiagramm in der Tauperiode

Aus dem Diagramm kann entnommen werden, dass Tauwasser in einer Ebene (zwischen den Schichten 3 und 4) ausfällt, da der Wasserdampfdruck den Sättigungsdruck in einem Punkt berührt. In Abhängigkeit der an dieser Schichtgrenze vorliegenden Temperatur von $\Theta = -9,3^\circ\text{C}$ beträgt der Wasserdampfdruck in der Tauwasserebene $p_{sw} = 276 \text{ Pa}$ (siehe Tabelle 4-2). Nach Abschnitt 3.2.2.2 liegt hier Fall b vor, somit muss die Tauwassermenge, die in dieser Ebene in der Tauperiode ausfällt, gemäß Gleichung (3.31) berechnet werden.

$$m_{W,T} = t_T \cdot \left[\left(\frac{p_i - p_{sw}}{Z_i} \right) - \left(\frac{p_{sw} - p_e}{Z_e} \right) \right]$$

$$= 1440 \cdot \left[\left(\frac{1170 - 276}{4,32 \cdot 10^6} \right) - \left(\frac{276 - 208}{7,95 \cdot 10^5} \right) \right] = 0,1748 \text{ kg} / \text{m}^2$$

$$\text{mit: } Z_i = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \sum_1^n s_{d,n} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot 2,88 = 4,32 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$$

$$Z_e = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \sum_1^n s_{d,n} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot 0,53 = 7,95 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$$

Für die Randbedingungen der Verdunstungsperiode (Tabelle 4-1) wird wiederum ein *Glaser*-Diagramm aufgestellt. Die Temperatur Θ und damit auch der Wasserdampf-sättigungsdruck p_s verlaufen konstant über den Wandquerschnitt.

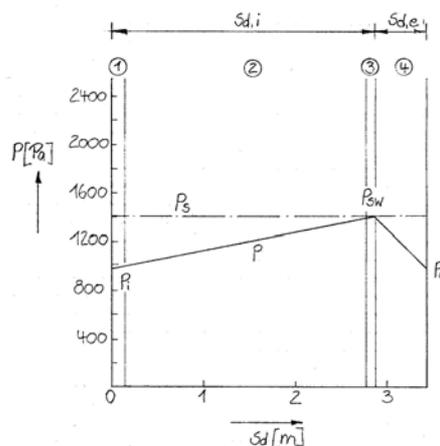


Bild 4-3 Diffusionsdiagramm in der Verdunstungsperiode

Die flächenbezogene Verdunstungsmenge errechnet sich nach Abschnitt 3.2.2.2, Fall b gemäß Gleichung (3.36).

$$m_{W,V} = t_V \cdot \left[\left(\frac{p_{sw} - p_i}{Z_i} \right) + \left(\frac{p_{sw} - p_e}{Z_e} \right) \right]$$

$$= 2160 \cdot \left[\left(\frac{1403 - 982}{4,32 \cdot 10^6} \right) + \left(\frac{1403 - 982}{7,95 \cdot 10^5} \right) \right] = 1,354 \text{ kg} / \text{m}^2$$

$$\text{mit: } Z_i = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \sum_1^n s_{d,n} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot 2,88 = 4,32 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$$

$$Z_e = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \sum_1^n s_{d,n} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot 0,53 = 7,95 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$$

$$m_{W,T} = 174,8 \text{ g} / \text{m}^2 < m_{W,V} = 1354 \text{ g} / \text{m}^2$$

Im Sinne der DIN 4108-3 gilt das während der Tauperiode anfallende Wasser als unschädlich, da es während der Verdunstungsperiode wieder an die Umgebung abgegeben werden kann.

a) Gegenüberstellung der Berechnungen von Hand mit DÄMMWERK 5.10

Die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Berechnungsergebnisse weichen nur geringfügig voneinander ab. Die ausführliche Berechnung mit dem DÄMMWERK-Programm ist im Anhang beigefügt..

Tabelle 4-3 Gegenüberstellung der Berechnung von Hand und mit DÄMMWERK

	p_s an der Tauwasserebene [Pa]	Tauwassermenge $m_{W,T}$ [g/m ²]	Verdunstungsmenge $m_{W,V}$ [g/m ²]
Handrechnung	276	174,8	1354,0
DÄMMWERK	274	178,5	1365,6

b) Einfluss des Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten

In Abschnitt 3.1, Tabelle 3-1 wurde bereits erwähnt, dass der für die Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungsmengen benötigte Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient zwischen der DIN 4108-3 und der DIN EN ISO 13788 abweicht.

$$\begin{array}{ccc} \text{DIN 4108-3} & & \text{DIN EN ISO 13788} \\ 1,5 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}} \right] & \leftrightarrow & 1,39 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}} \right] \end{array}$$

Um den Einfluss zu verdeutlichen, wird die für die einschalige Außenwand berechnete Tauwasser- bzw. Verdunstungsmenge einmal mit dem Diffusionsleitkoeffizienten nach DIN EN ISO 13788 berechnet:

$$Z_i = 1,39 \cdot 10^6 \cdot \sum_1^n s_{d,n} = 1,39 \cdot 10^6 \cdot 2,88 = 4,003 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$$

$$Z_e = 1,39 \cdot 10^6 \cdot \sum_1^n s_{d,n} = 1,39 \cdot 10^6 \cdot 0,53 = 7,367 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$$

$$m_{W,T} = 1440 \cdot \left[\left(\frac{1170 - 276}{4,003 \cdot 10^6} \right) - \left(\frac{276 - 208}{7,367 \cdot 10^5} \right) \right] = 0,1887 \text{ kg} / \text{m}^2$$

$$m_{W,V} = 2160 \cdot \left[\left(\frac{1403 - 982}{4,003 \cdot 10^6} \right) + \left(\frac{1403 - 982}{7,367 \cdot 10^5} \right) \right] = 1,4615 \text{ kg} / \text{m}^2$$

Die errechneten Mengen zeigen, dass der von der DIN EN ISO 13788 verwendete Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient zu einem ungünstigeren Ergebnis führt. Das Bauteil wird dadurch strenger beurteilt.

4.1.1.2 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Das DÄMMWERK-Programm gibt leider keine Berechnungshintergründe an. Aus diesem Grund wird die Berechnung der einschaligen massiven Außenwand zunächst per Hand durchgeführt.

Zunächst sollen die raum- und außenseitigen Klimarandbedingungen in Tabelle 4-4 dargestellt werden.

Tabelle 4-4 Klimarandbedingungen (Wohnhaus, Standort Hamburg)

Monat	Raumseitig		Außenseitig	
	Θ_i [°C]	φ_i	Θ_e [°C]	φ_e
Januar	20,0	0,61	0,5	89
Februar	20,0	0,60	1,1	86
März	20,0	0,59	3,7	81
April	20,0	0,56	7,3	72
Mai	20,0	0,56	12,2	68
Juni	20,0	0,61	15,5	70
Juli	20,0	0,66	16,8	73
August	20,0	0,69	16,6	77
September	20,0	0,65	13,5	79
Oktober	20,0	0,63	9,7	84
November	20,0	0,62	5,1	88
Dezember	20,0	0,61	1,9	90

Die raumseitigen Luftfeuchten wurden, wie unter Abschnitt 3.4.2.1, Tabelle 3-8 beschrieben, berechnet und sind in Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für Hamburg

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	0,5	869	633	0,89	563	1432	20	2335	0,61
Februar	1,1	842	661	0,86	568	1410			0,60
März	3,7	726	796	0,81	645	1371			0,59
April	7,3	566	1022	0,72	736	1302			0,56
Mai	12,2	347	1420	0,68	966	1313			0,56
Juni	15,5	200	1759	0,70	1231	1431			0,61
Juli	16,8	143	1911	0,73	1395	1538			0,66
August	16,6	151	1887	0,77	1453	1604			0,69
September	13,5	290	1546	0,79	1221	1511			0,65
Oktober	9,7	459	1202	0,84	1010	1469			0,63
November	5,1	664	878	0,88	773	1437			0,62
Dezember	1,9	806	700	0,90	630	1436			0,61

Nun werden der akkumulierte Wärmedurchlasswiderstand R'_n sowie die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s'_{d,n}$ zwischen der Außenluft und jeder Grenzfläche n gemäß den Gleichungen (3.79) und (3.80) berechnet. Ebenso müssen diese Werte auch für das gesamte Bauteil ermittelt werden [Gleichungen (3.81) und (3.82)]. Daraus errechnet sich dann die Temperatur [Gleichung (3.83)] an jedem Übergang zwischen zwei Materialien und die dazugehörigen Sättigungsdampfdrücke nach Gleichung (3.63) bzw. (3.64). Die DIN EN ISO 13788 schreibt vor, dass Bauteile mit einem hohen Wärmedurchlasswiderstand³ in eine Reihe von Schichten eingeteilt werden müssen, wobei jede Schicht den gleichen Wärmedurchlasswiderstand von maximal $0,25 m^2 K / W$ aufweisen soll. Für die Berechnung der Außenwand wird die Wärmedämmschicht in zehn Schichten aufgeteilt; der Wärmedurchlasswiderstand R jeder dieser Schichten beträgt dann

$$\frac{d}{\lambda_R} = \frac{0,01}{0,04} = 0,25 m^2 K / W .$$

Die Berechnung muss für jeden Monat durchgeführt werden. Zunächst wird mit dem gewählten Probemonat Dezember begonnen und gemäß Abschnitt 3.4.2.3 der Anfangsmonat festgelegt. Die Berechnung wird wiederum in einer Tabelle durchgeführt.

³ wie z. B. Dämmstoffe

Tabelle 4-6 Temperatur und Sättigungsdampfdruckverteilung für Dezember nach DIN EN ISO 13788

DEZEMBER									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R'_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	0,04	1,9	700
								2,1	710
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	0,06	2,3	721
3.10	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,31	3,8	801
3.9	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,56	5,3	890
3.8	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,81	6,8	987
3.7	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,06	8,3	1094
3.6	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,31	9,8	1211
3.5	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,56	11,3	1338
3.4	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,81	12,9	1487
3.3	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,06	14,4	1639
3.2	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,31	15,9	1805
3.1	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,56	17,4	1985
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	2,72	18,4	2114
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	2,74	18,5	2127
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,25	2,99	20	2335
			$s'_{d,T} =$	3,41	$R'_T =$	2,99			

Das Diffusionsdiagramm Bild 4-4 zeigt, dass eine Grenzebene (zwischen den Schichten 3.10 und 4) mit Tauwasserbildung auftritt. Die p_i, p_e -Linie würde die Linie des Sättigungsdampfdruckes im unteren Bereich der Schicht 3.10 schneiden; der Schnittpunkt p_c „rutscht“ also auf die Grenzebene zwischen den Schichten 3.10 und 4.

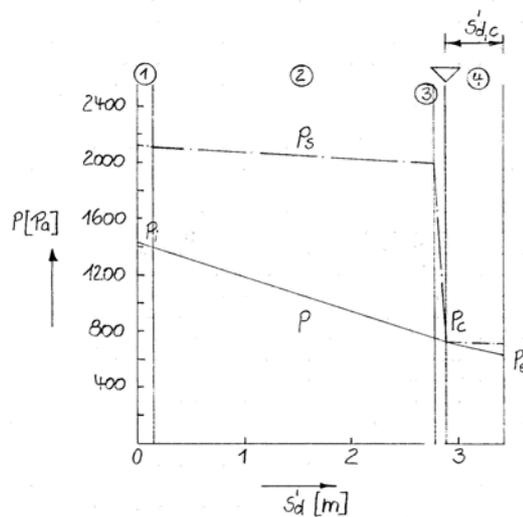


Bild 4-4 Diffusionsdiagramm für Dezember (DIN EN ISO 13788)

Die Tauwassermenge berechnet sich nach Gleichung (3.83).

$$\begin{aligned}
 g_c &= \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) = 2 \cdot 10^{-10} \left(\frac{1436 - 721}{3,41 - 0,53} - \frac{721 - 630}{0,53} \right) \\
 &= 1,531 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 0,000053 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \underline{\underline{41,01 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}}}
 \end{aligned}$$

Die Berechnung erfolgt nun für den Monat November, da er, wie unter Abschnitt 3.4.2.3, beschrieben, der vorangehende Monat ist.

Tabelle 4-7 Temperatur und Sättigungsdampfdruckverteilung für November nach DIN EN ISO 13788

NOVEMBER									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R'_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
–	Wärmeübergang außen	–	–	–	–	0,04	0,04	5,1	878
								5,3	890
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	0,06	5,4	896
3.10	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,31	6,6	974
3.9	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,56	7,9	1065
3.8	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,81	9,1	1155
3.7	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,06	10,4	1260
3.6	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,31	11,6	1365
3.5	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,56	12,9	1487
3.4	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,81	14,1	1607
3.3	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,06	15,4	1748
3.2	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,31	16,6	1887
3.1	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,56	17,9	2049
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	2,72	18,7	2154
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	2,74	18,8	2167
–	Wärmeübergang innen	–	–	–	–	0,25	2,99	20	2335
			$s'_{d,T} =$	3,41	$R'_T =$	2,99			

Das Diffusionsdiagramm zeigt, dass kein Tauwasser ausfällt, da der Wasserdampfdruck an jeder Stelle im Bauteilquerschnitt kleiner ist (allerdings nur sehr geringfügig), als der Sättigungsdampfdruck:

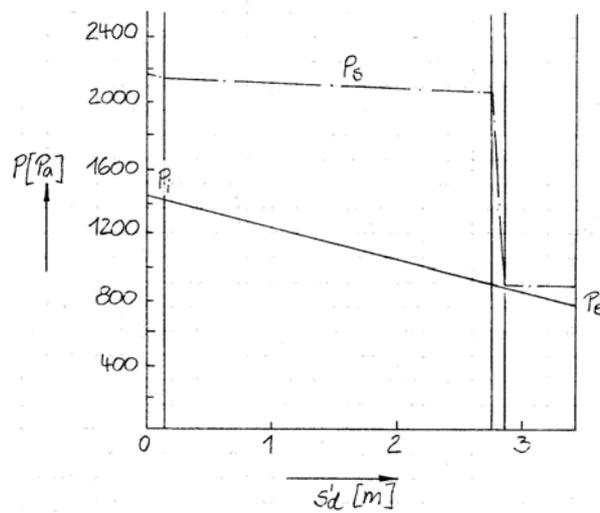


Bild 4-5 Diffusionsdiagramm für November (DIN EN ISO 13788)

Die Temperaturen sind in den dem November vorangehenden Monaten höher und somit auch die Wasserdampfdrücke innen und außen sowie der Sättigungsdampfdruck außen. Aus diesem Grund ist für diese dem November vorangehenden Monate auch kein Tauwasser zu erwarten. Als nächster Monat soll der April untersucht werden.

Tabelle 4-8 Temperatur und Sättigungsdampfdruckverteilung für April nach DIN EN ISO 13788

APRIL									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R'_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	0,04	7,3	1022
								7,5	1036
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	0,06	7,6	1043
3.10	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,31	8,6	1116
3.9	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,56	9,7	1202
3.8	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,81	10,7	1286
3.7	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,06	11,8	1383
3.6	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,31	12,9	1487
3.5	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,56	13,9	1587
3.4	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,81	15,0	1703
3.3	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,06	16,0	1816
3.2	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,31	17,1	1948
3.1	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,56	18,2	2088
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	2,72	18,9	2181
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	2,74	18,9	2181
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,25	2,99	20	2335
			$s'_{d,T} =$	3,41	$R'_T =$	2,99			

Es ergibt sich das in Bild 4-6 dargestellte Diffusionsdiagramm.

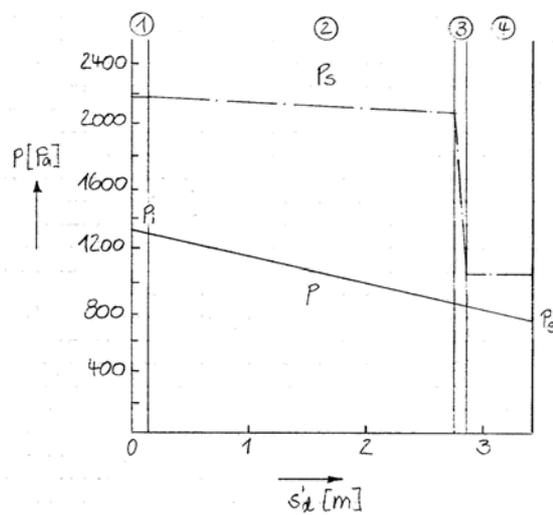


Bild 4-6 Diffusionsdiagramm für April (DIN EN ISO 13788)

Der Wasserdampfdruck ist immer kleiner als der Sättigungsdampfdruck. Der April bleibt tauwasserfrei. Der nächste vorangehende Monat ist der März.

Tabelle 4-9 Temperatur und Sättigungsdampfdruckverteilung für März nach DIN EN ISO 13788

MÄRZ									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R'_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
–	Wärmeübergang außen	–	–	–	–	0,04	0,04	3,7	796
								3,9	807
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	0,06	4,0	813
3.10	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,31	5,4	896
3.9	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,56	6,8	987
3.8	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,81	8,1	1079
3.7	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,06	9,5	1186
3.6	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,31	10,8	1294
3.5	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,56	12,2	1420
3.4	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,81	13,6	1556
3.3	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,06	14,9	1693
3.2	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,31	16,3	1851
3.1	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,56	17,7	2023
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	2,72	18,5	2127
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	2,74	18,6	2141
–	Wärmeübergang innen	–	–	–	–	0,25	2,99	20	2335
			$s'_{d,T} =$	3,41	$R'_T =$	2,99			

Auch im März bildet sich kein Tauwasser, aber in dem Diffusionsdiagramm Bild 4-7 kann man erkennen, dass sich der Wasserdampfdruck langsam dem Sättigungsdampfdruck annähert.

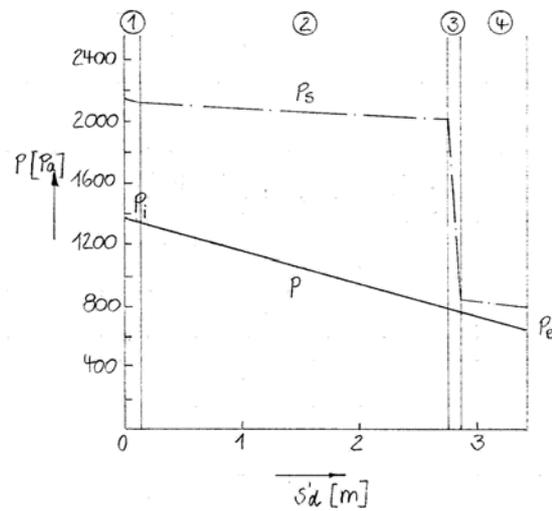


Bild 4-7 Diffusionsdiagramm für März (DIN EN ISO 13788)

Die Berechnung wird fortgeführt mit dem nächsten vorangehenden Monat, dem Februar.

Tabelle 4-10 Temperatur und Sättigungsdampfdruckverteilung für Februar nach DIN EN ISO 13788

FEBRUAR									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R'_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
–	Wärmeübergang außen	–	–	–	–	0,04	0,04	1,1	661
								1,4	676
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	0,06	1,5	680
3.10	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,31	3,1	763
3.9	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,56	4,6	848
3.8	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,81	6,2	947
3.7	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,06	7,8	1057
3.6	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,31	9,4	1178
3.5	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,56	11,0	1311
3.4	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,81	12,5	1448
3.3	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,06	14,1	1607
3.2	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,31	15,7	1782
3.1	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,56	17,3	1973
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	2,72	18,3	2101
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	2,74	18,4	2114
–	Wärmeübergang innen	–	–	–	–	0,25	2,99	20	2335
			$s'_{d,T} =$	3,41	$R'_T =$	2,99			

Aus den Werten für den Monat Februar ergibt sich das in Bild 4-8 dargestellte Diffusionsdiagramm.

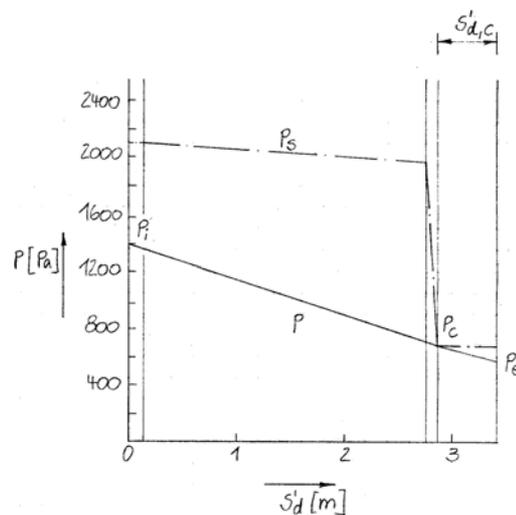


Bild 4-8 Diffusionsdiagramm für Februar (DIN EN ISO 13788)

Im Februar fällt wiederum Tauwasser in einer Ebene zwischen den Schichten 3.10 und 4 aus. Die Tauwassermenge wird gemäß Gleichung (3.83) berechnet.

$$\begin{aligned}
 g_c &= \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) = 2 \cdot 10^{-10} \left(\frac{1410 - 680}{3,41 - 0,53} - \frac{680 - 568}{0,53} \right) \\
 &= 8,43 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 0,0000084 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \underline{\underline{20,4 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}}}
 \end{aligned}$$

Die Berechnung wird nun mit dem Monat Januar fortgeführt.

Tabelle 4-11 Temperatur und Sättigungsdampfdruckverteilung für Januar nach DIN EN ISO 13788

JANUAR									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R'_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
–	Wärmeübergang außen	–	–	–	–	0,04	0,04	0,5	633
								0,8	647
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	0,06	0,9	652
3.10	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,31	2,5	731
3.9	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,56	4,2	824
3.8	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	0,81	5,8	922
3.7	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,06	7,4	1029
3.6	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,31	9,0	1147
3.5	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,56	10,7	1286
3.4	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	1,81	12,3	1429
3.3	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,06	13,9	1587
3.2	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,31	15,6	1770
3.1	Mineralfaser 040	0,010	1	0,01	0,040	0,25	2,56	17,2	1960
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	2,72	18,2	2088
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	2,74	18,4	2114
–	Wärmeübergang innen	–	–	–	–	0,25	2,99	20	2335
			$s'_{d,T} =$	3,41	$R'_T =$	2,99			

Aus dem Diffusionsdiagramm in Bild 4-9 wird ersichtlich, dass zwischen den Schichten 3.10 und 4 Tauwasser ausfällt.

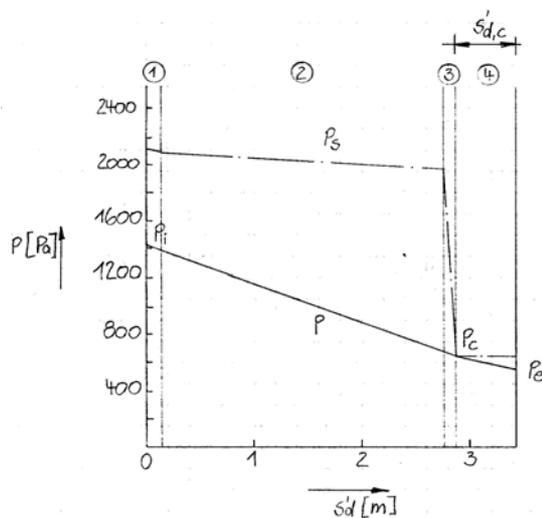


Bild 4-9 Diffusionsdiagramm für Januar (DIN EN ISO 13788)

Die Tauwassermenge beträgt nach Gleichung (3.83):

$$g_c = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) = 2 \cdot 10^{-10} \left(\frac{1432 - 652}{3,41 - 0,53} - \frac{652 - 563}{0,53} \right)$$

$$= 2,06 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 0,0000206 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \underline{\underline{55,1 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}}}$$

Für die Akkumulation (Tabelle 4-12) wird der Dezember als Anfangsmonat festgelegt, da er der darauffolgende Monat vom Februar ist, in welchem Tauwasser gebildet wird. Bisher wurde lediglich die angefallene Tauwassermenge berechnet, nicht aber die Verdunstungsmenge in den Sommermonaten. Die Tauwassermenge steigt im kältesten Monat Januar auf einen Spitzenwert von $g_c = 55,1 \text{ g/m}^2$ und fällt im Februar auf $g_c = 20,4 \text{ g/m}^2$. Im März wird keine Tauwasserbildung erwartet, wie man in dem Diffusionsdiagramm (Bild 4-7) erkennen kann. Es muss also im März Verdunstung auftreten.

Die Verdunstungsmenge für den Monat März wird gemäß Gleichung (3.86) ermittelt.

$$g_{ev} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) = 2 \cdot 10^{-10} \left(\frac{1371 - 813}{3,41 - 0,53} - \frac{813 - 645}{0,53} \right)$$

$$= -2,46 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = -0,0000246 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \underline{\underline{-66,0 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}}}$$

In Tabelle 4-12 wird ersichtlich, dass die Verdunstungsmenge vom März noch nicht für eine vollkommene Verdunstung des angefallenen Tauwassers ausreicht. Deshalb muss auch für April die Verdunstungsmenge errechnet werden.

Im April beträgt die Verdunstungsmenge nach Gleichung (3.86):

$$g_{ev} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) = 2 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{1302 - 1043}{3,41 - 0,53} - \frac{1043 - 736}{0,53} \right)$$

$$= -9,79 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{m^2 \cdot s} = -0,0000979 \frac{g}{m^2 \cdot s} = \underline{\underline{-253,7 \frac{g}{m^2}}}$$

Die akkumulierte Tauwassermenge M_a erreicht jetzt den Wert null, das heißt während April trocknet das akkumulierte Tauwasser vollständig aus dem Bauteil aus.

Tabelle 4-12 Monatliche Tauwassermenge und Akkumulation an der Grenzfläche

Monat	Dez.	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.
g_c [g/m ²]	41,0	55,1	20,4	-66,0	-253,7	0	0	0	0	0	0	0
M_a [g/m ²]	41,0	96,1	116,5	50,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Das Ergebnis dieser Berechnung nach DIN EN ISO 13788 ist gemäß Tabelle 3-11 vorzunehmen.

Tauwasser tritt an einer Grenzfläche auf. Es verdunstet jedoch während der Verdunstungsperiode vollständig aus dem Bauteil. Die maximale Tauwassermenge fällt im Januar in der Grenzfläche zwischen den Schichten 3 (Mineralfaser 040) und 4 (Kalkzementputz) aus. Sie beträgt $g_c = 55,1 \text{ g/m}^2$. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

Gegenüberstellung der Berechnungen von Hand mit DÄMMWERK 5.10:

Die Berechnung nach DIN EN ISO 13788 wurde zur Überprüfung mit dem Programm DÄMMWERK nachgerechnet. Der Gesamtausdruck befindet sich im Anhang. In Tabelle 4-13 wurden die errechneten Sättigungsdampfdrücke sowie die Tauwassermengen und die

akkumulierte Tauwassermenge gegenübergestellt. Die Klimabedingungen wurden bei der Eingabe in DÄMMWERK manuell auf die in Tabelle 4-5 angegebenen Werte angepasst.

Tabelle 4-13 Vergleich Handrechnung mit DÄMMWERK 5.10

Monat	p_s an der Grenzebene [Pa]		g_c [g/m ²]		M_a [g/m ²]	
	Handrechnung	DÄMMWERK	Handrechnung	DÄMMWERK	Handrechnung	DÄMMWERK
Dezember	721	706	41	52	41	52
Januar	652	639	55	64	96	117
Februar	680	667	20	31	116	147
März	813	802	-66	-54	50	93
April	1043	1028	-254	-297	0	0

Die Ergebnisse weichen geringfügig voneinander ab, wobei DÄMMWERK größere, das heißt ungünstigere Tauwassermengen errechnet hat.

4.1.1.3 Berechnung nach *Jenisch*

Die Klimarandbedingungen werden wie bei dem Verfahren nach DIN EN ISO 13788 verwendet. Die anfallenden Tauwassermengen in der Außenwand wurden der Berechnung mit DÄMMWERK entnommen. Anhand der Diffusionsdiagramme soll verdeutlicht werden, ob und an welcher Grenzebene Tauwasser ausfällt. Auch hier wird jeder Monat einzeln untersucht; begonnen wird mit dem Januar.

Tabelle 4-14 Temperatur- und Sättigungsdampfdruckverteilung für Januar nach Jenisch

Januar									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,13	0,13	20	2340
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	0,15	19,1	2212
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	0,31	19,0	2197
3	Mineralfaser 040	0,100	1	0,10	0,040	2,50	2,81	17,9	2052
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	2,83	0,9	653
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	2,87	0,8	648
				$s_{d,T} =$	3,41	$R_T =$	2,87		0,5
									635

Das Diffusionsdiagramm Bild 4-10 zeigt, dass an der Grenzebene zwischen den Schichten 3 und 4 Tauwasser ausfällt:

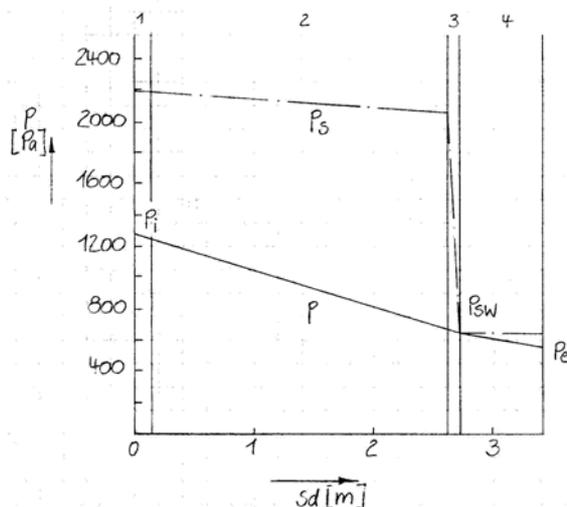


Bild 4-10 Diffusionsdiagramm für Januar (Jenisch)

Nach der Berechnung mit DÄMMWERK wird im Januar eine Tauwassermenge von $w_T = 51 \text{ g/m}^2$ gebildet. Als nächstes wird der Februar untersucht.

Tabelle 4-15 Temperatur- und Sättigungsdampfdruckverteilung für Februar nach Jenisch

Februar									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,13	0,13	20,0	2340
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	0,15	19,1	2212
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	0,31	19,0	2197
3	Mineralfaser 040	0,100	1	0,10	0,040	2,50	2,81	18,0	2065
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	2,83	1,5	682
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	2,87	1,4	677
				$s_{d,T} =$	3,41	$R_T =$	2,87		

Auch hier fällt Tauwasser aus, wie man im Diffusionsdiagramm Bild 4-11 erkennen kann. Die Tauwassermenge beträgt gemäß DÄMMWERK $w_T = 16 \text{ g} / \text{m}^2$.

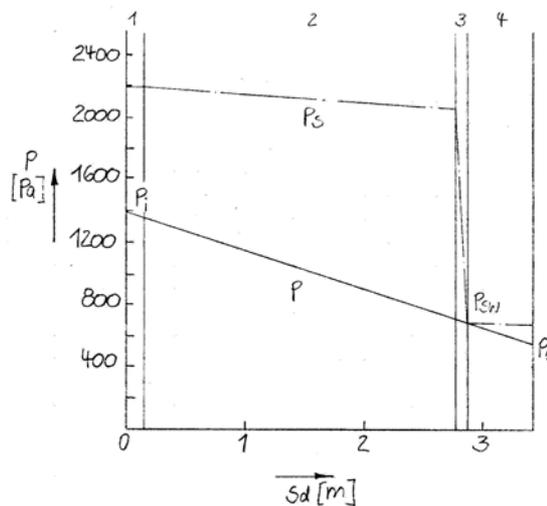


Bild 4-11 Diffusionsdiagramm für Februar (Jenisch)

Für den März wird nach der Berechnung mit dem DÄMMWERK-Programm keine Tauwasserbildung erwartet. Die Verdunstung in diesem Monat beträgt $w_v = -59 \text{ g} / \text{m}^2$.

Tabelle 4-16 Temperatur- und Sättigungsdampfdruckverteilung für März nach Jenisch

März									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,13	0,13	20,0	2340
								19,3	2241
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	0,15	19,1	2212
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	0,31	18,2	2091
3	Mineralfaser 040	0,100	1	0,10	0,040	2,50	2,81	4,0	813
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	2,83	3,9	808
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	2,87	3,7	798
		$s_{d,T} =$		3,41	$R_T =$		2,87		

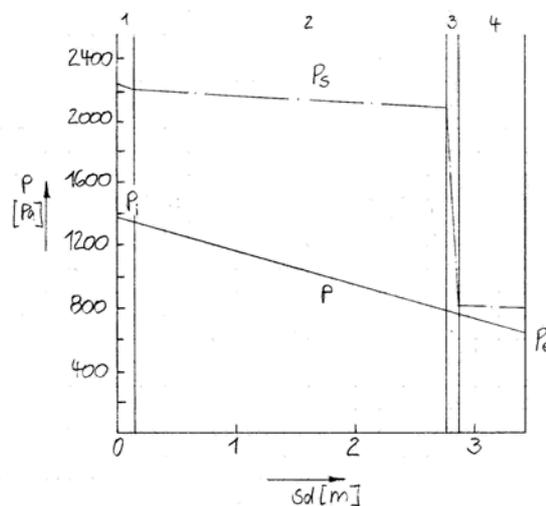


Bild 4-12 Diffusionsdiagramm für März (Jenisch)

Als nächstes wird der November untersucht, da in den dazwischenliegenden Monaten keine Tauwasserbildung zu erwarten ist.

Tabelle 4-17 Temperatur- und Sättigungsdampfdruckverteilung für November nach Jenisch

November									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,13	0,13	20,0	2340
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	0,15	19,3	2241
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	0,31	19,2	2227
3	Mineralfaser 040	0,100	1	0,10	0,040	2,50	2,81	18,4	2119
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	2,83	5,4	896
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	2,87	5,3	890
				$s_{d,T} =$	3,41	$R_T =$	2,87		

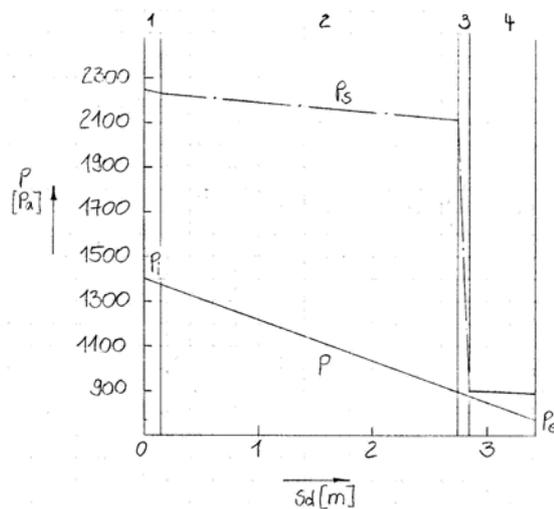


Bild 4-13 Diffusionsdiagramm für November (Jenisch)

Wie zu erkennen, wird im November kein Tauwasser gebildet, allerdings ist der Abstand des Wasserdampfdruckes nur noch sehr gering bis zur Berührung des Sättigungsdampfdruckes. Für Dezember wird daher Tauwasserbildung erwartet.

Tabelle 4-18 Temperatur- und Sättigungsdampfdruckverteilung für Dezember nach Jenisch

Dezember									
Nr.	Schicht	d [m]	μ [-]	s_d [m]	λ_R [W/(m K)]	R [m ² K/W]	R_n [m ² K/W]	Θ [°C]	p_s [Pa]
-	Wärmeübergang innen	-	-	-	-	0,13	0,13	20,0	2340
1	Putzmörtel aus Kalkgips	0,015	10	0,15	0,700	0,02	0,15	19,2	2227
2	Kalksandsteinmauerwerk	0,175	15	2,63	1,100	0,16	0,31	19,1	2212
3	Mineralfaser 040	0,100	1	0,10	0,040	2,50	2,81	18,0	2065
4	Kalkzementputz	0,015	35	0,53	0,870	0,02	2,83	2,3	721
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	0,04	2,87	2,2	716
				$s_{d,T} =$	3,41	$R_T =$	2,87		

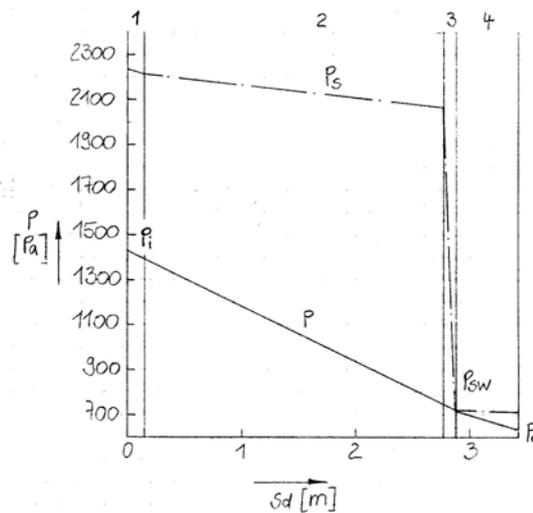


Bild 4-14 Diffusionsdiagramm für Dezember (Jenisch)

Die von DÄMMWERK errechnete Tauwassermenge beträgt für Dezember $w_t = 36 \text{ g/m}^2$.

Gegenüberstellung der Berechnungen von Hand mit DÄMMWERK 5.10:

Bei dem Verfahren nach *Jenisch* wurde lediglich überprüft, ob in den von DÄMMWERK angegebenen Monaten tatsächlich Tauwasser ausfällt. Dies stimmte mit der rechnerisch-graphischen Überprüfung überein. In den Monaten ohne Tauwasserausfall, also Monate, in denen Verdunstung stattfindet, konnte ebenso eine Übereinstimmung mit dem EDV-Programm festgestellt werden: Anhand der graphischen Darstellung ist zu erkennen, dass in diesen Monaten kein Tauwasser ausfällt. Der gesamte Ausdruck befindet sich im Anhang.

Für die Beurteilung kann man aus der Berechnung entnehmen, dass über den Verlauf eines Jahres gesehen das Bauteil vollständig austrocknet; die Bilanz ist kleiner null. Das während der Tauperiode anfallende Wasser gilt als unschädlich. Es wird ein funktionierender Bauteilquerschnitt vorausgesetzt.

4.1.1.4 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Die berechneten Temperatur- und die dazugehörigen Sättigungsdampfdruckverläufe sowie der Verlauf der Wasserdampfdrucke lassen sich nun tabellarisch gegenüberstellen. Für die Verfahren nach *Jenisch* und DIN EN ISO 13788 soll für die Tauperiode der Januar (kältester Monat), für die Verdunstungsperiode der Juli (wärmster Monat) betrachtet werden. Die unterschiedlichen Randbedingungen, die einen Einfluss auf diese Verläufe haben, wurden bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben.

Bei den Verfahren nach DIN EN ISO 13788 und *Jenisch* kann man anhand der unterschiedlichen Temperaturverläufe erkennen, welche Auswirkungen die verschieden angesetzten Wärmeübergangswiderstände haben. Der Sättigungsdruckverlauf ist ungleich: Zunächst „sinkt“ jener nach der DIN EN ISO 13788 stärker als der nach *Jenisch*; an der Tauwasserebene jedoch erreichen beide Sättigungsdampfdrucke den (fast) gleichen Wert. Der innere Wärmeübergangswiderstand hat also nur Einfluss bis zur Tauwasserebene, an welcher die Temperatur im Bauteil rapide sinkt.

Tabelle 4-19 Gegenüberstellung der Temperatur- und Dampfdruckverläufe (Tauperiode)

		Januar						Gesamte Tauperiode		
Nr.	Schicht	DIN EN ISO 13788			Jenisch			DIN 4108-3		
		Θ [°C]	p_s [Pa]	p_i [Pa]	Θ [°C]	p_s [Pa]	p_i [Pa]	Θ [°C]	p_s [Pa]	p_i [Pa]
				p_e [Pa]			p_e [Pa]			p_e [Pa]
-	Wärmeübergang innen	20,0	2335	1432	20,0	2340	1427	20,0	2340	1170
1	Putzmörtel aus Kalkgips	18,4	2114		19,1	2212		18,7	2158	
2	Kalksandsteinmauerwerk	18,2	2088		19,0	2197		18,5	2132	
3	Mineralfaser 040	17,2	1960		17,9	2052		16,9	1926	
4	Mineralfaser 040	0,9	652		0,9	653		-9,3	276	
4	Kalkzementputz	0,8	647		0,8	648		-9,5	272	
-	Wärmeübergang außen	0,5	633	563	0,5	635	565	-10,0	260	208

Tabelle 4-20 Gegenüberstellung der Temperatur- und Dampfdruckverläufe (Verdunstungsperiode)

		Juli						Gesamte Verdunstungsperiode		
Nr.	Schicht	DIN EN ISO 13788			Jenisch			DIN 4108-3		
		Θ [°C]	p_s [Pa]	p_i [Pa]	Θ [°C]	p_s [Pa]	p_i [Pa]	Θ [°C]	p_s [Pa]	p_i [Pa]
				p_e [Pa]			p_e [Pa]			p_e [Pa]
-	Wärmeübergang innen	20,0	2335	1538	20,0	2340	1427			
1	Putzmörtel aus Kalkgips	19,7	2292		19,9	2324				
2	Kalksandsteinmauerwerk	19,7	2292		19,8	2310				
3	Mineralfaser 040	19,5	2264		19,7	2297		12	1403	982
4	Mineralfaser 040	16,9	1923		16,9	1926				
4	Kalkzementputz	16,8	1911		16,8	1914				
-	Wärmeübergang außen	16,8	1911	1395	16,8	1914	1397			

Die errechneten Tauwasser- bzw. Verdunstungsmengen sind in folgender Tabelle zusammengestellt. Dabei fällt auf, dass bei der Berechnung nach DIN 4108-3 die größte Tauwassermenge in der Konstruktion ausfällt, was auf die ungünstigsten Klimabedingungen auf der Außenseite für die Tauperiode zurückzuführen ist.

Tabelle 4-21 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse

Berechnung nach	anfallende Tauwassermenge pro Tauperiode [g/m ²]	Verdunstungsmenge pro Verdunstungsperiode [g/m ²]
DIN 4108-3	174,8	1354,0
DIN EN ISO 13788	116,5	— *
Jenisch	103,0	2840,0

* Nach DIN EN ISO 13788 wird die Verdunstungsmenge nur solange berechnet, bis die akkumulierte Tauwassermenge null ergibt, das heißt bis das Bauteil ausgetrocknet ist.

Die Beurteilungen der Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 4-22 gegenübergestellt.

Tabelle 4-22 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse⁴

Verfahren	Außenwand an Außenluft	
	Berechnungsergebnisse	Beurteilung
DIN 4108-3	<p>Das während der Tauperiode im Inneren des Bauteils anfallende Wasser wird während der Verdunstungsperiode vollständig an die Umgebung abgegeben.</p> <p>Die flächenbezogene Tauwassermasse bleibt unterhalb der höchstzulässigen Grenze von 1,0 kg/m².</p>	Das anfallende Tauwasser gilt als <u>unschädlich</u> .
DIN EN ISO 13788	Eine Tauwasserbildung tritt an einer Grenzfläche auf. In den Sommermonaten verdunstet das Wasser vollständig aus dem Bauteil.	<p>An der Grenzfläche zwischen den Schichten 3 und 4 fällt Tauwasser aus. Im Januar erreicht die anfallende Tauwassermenge einen Maximalwert von 55,1 g/m².</p> <p>Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind einzuhalten.</p>
Jenisch	<p>Das während der Tauperiode im Inneren des Bauteils anfallende Wasser wird während der Verdunstungsperiode vollständig an die Umgebung abgegeben.</p> <p>Die flächenbezogene Tauwassermasse bleibt unterhalb der höchstzulässigen Grenze von 1,0 kg/m².</p>	Das anfallende Tauwasser gilt als <u>unschädlich</u> .

Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsverfahren schätzen die Außenwandkonstruktion grundlegend gleich ein, wobei nach DIN EN ISO 13788 jedoch nicht das Kriterium ‚unschädlich‘ verwendet wird. Es wird lediglich die Angabe der anfallenden Tauwassermenge in der jeweiligen Grenzsicht sowie der Monat, in der es auftritt, verlangt. Die Beurteilung, ob das anfallende Tauwasser die Konstruktion schädigen kann, wird mit dem Nachsatz der ‚Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen‘ nicht eindeutig geklärt.

⁴ Beurteilung gemäß DIN 4108-3:2001-07, Abschnitt 4.2 sowie gemäß DIN EN ISO 13788:2001-11, Abschnitt 6.5

4.1.2 Außenwand mit Innendämmung

Die zu untersuchende Außenwand eines Wohnhauses wurde nachträglich mit einer Dämmung von 4 cm auf der Innenseite versehen. Sie grenzt an die Außenluft und hat den in Bild 4-15 dargestellten Aufbau. Die gesamte Berechnung mit DÄMMWERK befindet sich im Anhang.

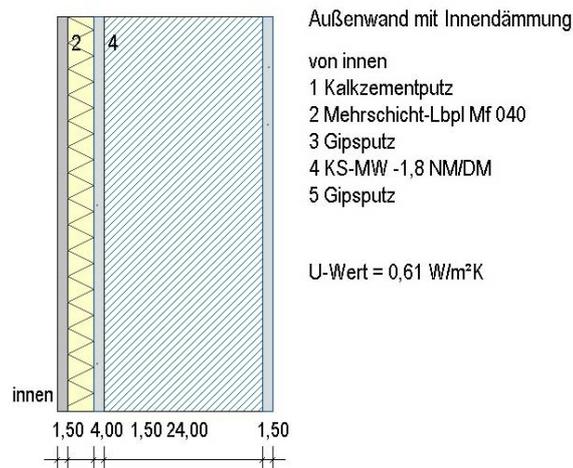


Bild 4-15 Schichtaufbau Außenwand mit Innendämmung

4.1.2.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Die Berechnung wurde mit Hilfe von DÄMMWERK durchgeführt. Während der Kondensationsperiode bildet sich im Bauteil in dem Bereich von Schichtgrenze ‚Dämmung‘ - ‚Gipsputz‘ bis zur Schichtgrenze ‚Gipsputz‘ - ‚Mauerwerk‘ Tauwasser (siehe Bild 4-16), welches in den Sommermonaten unvollständig verdunstet. Die Konstruktion ist nicht zulässig.

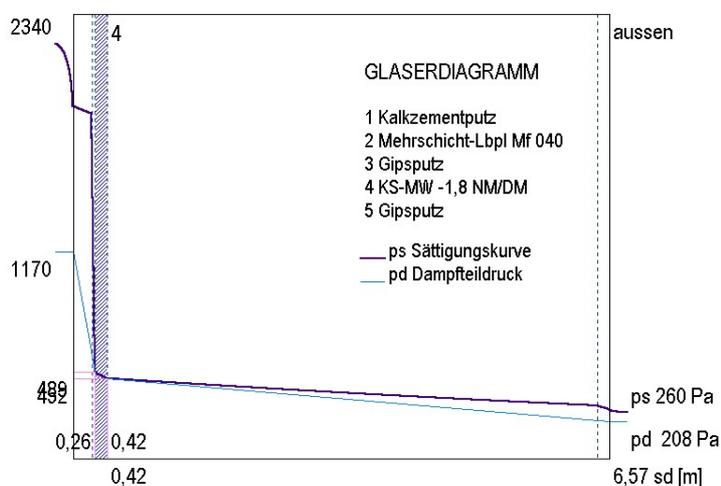


Bild 4-16 Diffusionsdiagramm Außenwand mit Innendämmung (DIN 4108-3)⁵

4.1.2.2 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Die Klimadaten wurden zuvor im Programm auf die vom Deutschen Wetterdienst nach der Berechnung in Tabelle 4-5 angepasst.

In der Berechnung des DÄMMWERK-Programms wird deutlich, dass Tauwasser an zwei Grenzebenen auftritt: Im Oktober und April zwischen den Schichten ‚Gipsputz‘ und ‚Mauerwerk‘, in den Monaten November bis März sowie von Mai bis August zwischen den Schichten ‚Dämmung‘ und ‚Gipsputz‘. Im September tritt an keiner Grenzfläche im Bauteil Tauwasser auf. Das Programm akkumuliert die Tauwassermengen jedoch nicht wie in der Norm vorgeschrieben für jede einzelne Grenzschicht, sondern im Gesamten.⁶ Danach trocknet das Bauteil im September vollständig aus.

4.1.2.3 Berechnung nach Jenisch

Auch für diese Berechnung wurden die Klimadaten denen des Deutschen Wetterdienstes angepasst. In der Tauperiode sammelt sich in der Konstruktion zwischen den Schichten ‚Dämmung‘ und ‚Gipsputz‘ sowie zwischen ‚Gipsputz‘ und ‚Mauerwerk‘ Wasser an, welches in den Sommermonaten unvollständig verdunstet.

⁵ Abbildung erstellt von DÄMMWERK 5.10

⁶ Hierbei handelt es sich um einen Programmfehler, der von DÄMMWERK zur Zeit richtiggestellt wird, nachdem die Verfasserin darauf aufmerksam machte.

4.1.2.4 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Die Nachweisverfahren schätzen die Außenwandkonstruktion sehr unterschiedlich ein. Während nach dem Verfahren nach DIN 4108-3 Tauwasserbildung in einem Bereich auftritt, wird nach DIN EN ISO 13788 genau angegeben, an welcher Grenzebene und dem dazugehörigen Monat jeweils Tauwasser entsteht.

Tabelle 4-23 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse

Verfahren	Außenwand an Außenluft	
	Berechnungsergebnisse	Beurteilung
DIN 4108-3	Im Inneren der Außenwandkonstruktion wird in dem Bereich zwischen den Schichten 2 und 3 sowie 3 und 4 Tauwasser gebildet. Die Verdunstungsmenge ist kleiner als die Tauwassermenge, das heißt das Bauteil ist nicht zulässig.	
DIN EN ISO 13788	Eine Tauwasserbildung tritt an zwei Grenzflächen auf. In den Sommermonaten verdunstet das Wasser vollständig aus dem Bauteil.	An den Grenzflächen zwischen den Schichten 2 und 3 sowie zwischen den Schichten 3 und 4 fällt Tauwasser aus. Im Januar erreicht die anfallende Tauwassermenge einen Maximalwert von 980 g/m ² . Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind einzuhalten.
Jenisch	Im Bauteil wird in dem Bereich zwischen den Schichten 2 und 3 sowie 3 und 4 Tauwasser gebildet. Es verdunstet unvollständig in den Sommermonaten.	

Zudem wird das Bauteil nach DIN EN ISO 13788 weder als ‚zulässig‘ noch ‚unzulässig‘ eingestuft. Bei einer vollständigen Verdunstung in den Sommermonaten neigt man jedoch dazu, die Konstruktion als ‚zulässig‘ zu betrachten. Dies könnte aber für dieses Bauteil bei einem Maximalwert an Tauwasseranfall von 980 g/m² in einem Monat durchaus fatale Auswirkungen haben, wenn man die maximal angesammelte Tauwassermenge von $M_a = 3,9 \text{ kg} / \text{m}^2$ im April betrachtet. Die Norm verlangt dafür zwar den Zusatz der Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen, jedoch wäre eine Begrenzung der anfallenden Tauwassermenge sinnvoller. Es könnte nämlich der Eindruck entstehen, dass eine vollständige Verdunstung des Tauwassers ausreichen würde, um ein Bauteil für ‚zulässig‘ zu bewerten.

4.1.3 Außenwand in Leichtbauweise

Bei dieser Wand eines Wohnhauses handelt es sich um eine Außenwand in Leichtbauweise. Der Aufbau der Konstruktion ist folgendermaßen gewählt:

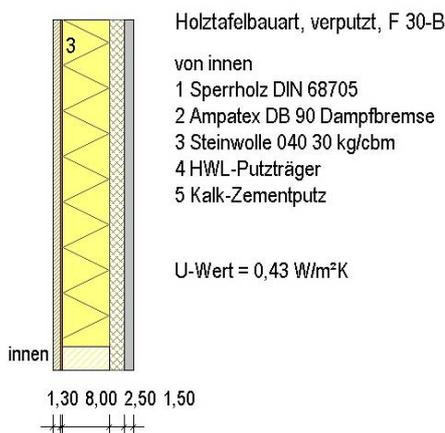


Bild 4-17 Schichtaufbau einer Außenwand in Leichtbauweise⁷

Für den Tauwassernachweis soll der Gefachbereich betrachtet werden. Das Bauteil wurde für alle drei Nachweisverfahren mit dem DÄMMWERK-Programm berechnet; der Programmausdruck befindet sich im Anhang.

4.1.3.1 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Bei diesem Bauteil wird gemäß Darstellung in Tabelle 4-24 für keines der Berechnungsverfahren Tauwasser vorhergesagt.

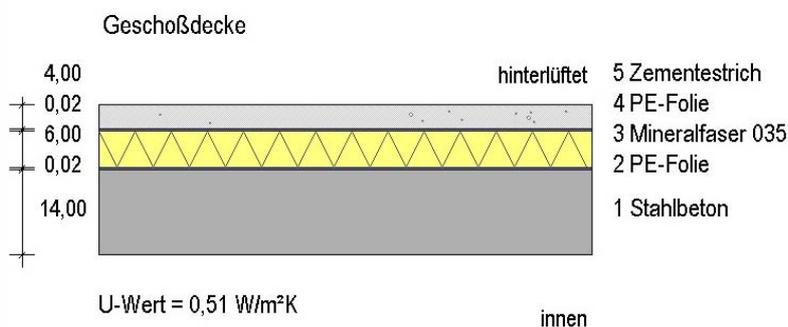
⁷ Der Schichtaufbau wurde der Baustoffdatenbank von DÄMMWERK 5.10 entnommen.

Tabelle 4-24 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse

Verfahren	Außenwand in Leichtbauweise an Außenluft	
	Berechnungsergebnisse	Beurteilung
DIN 4108-3	Für die Außenwandkonstruktion wird keine Tauwasserbildung erwartet.	
DIN EN ISO 13788	Tauwasserbildung wird für keine Grenzfläche und für keinen Monat vorhergesagt.	Das Bauteil ist frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren.
Jenisch	Im Bauteil wird kein Tauwasser gebildet.	

4.1.4 Geschossdecke unter belüftetem Dachraum

Die Geschossdecke besitzt den in Bild 4-18 dargestellten Aufbau. Sie grenzt an einen belüfteten Dachraum eines Wohnhauses.

Bild 4-18 Schichtaufbau Geschossdecke unter belüftetem Dachraum⁸

4.1.4.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Unter den festgelegten Klimarandbedingungen gemäß Abschnitt 3.2.2.2 fällt im Bauteil zwischen den Schichten 3 (Mineralfaser 035) und 4 (PE-Folie) während der Tauperiode Tauwasser aus. Die Tauwassermenge beträgt $m_{W,T} = 24,0 \text{ g/m}^2$. In der Verdunstungsperiode verdunstet das Wasser vollständig aus dem Bauteil; erneuter Tauwasserausfall findet gemäß Bild 4-18 nicht statt. Die flächenbezogene Tauwassermasse

⁸ Der Schichtaufbau wurde der Baustoffdatenbank von DÄMMWERK 5.10 entnommen.

überschreitet nicht den zulässigen Wert von 500 g/m^2 . Die Tauwasserbildung im Bauteil gilt somit als unschädlich.

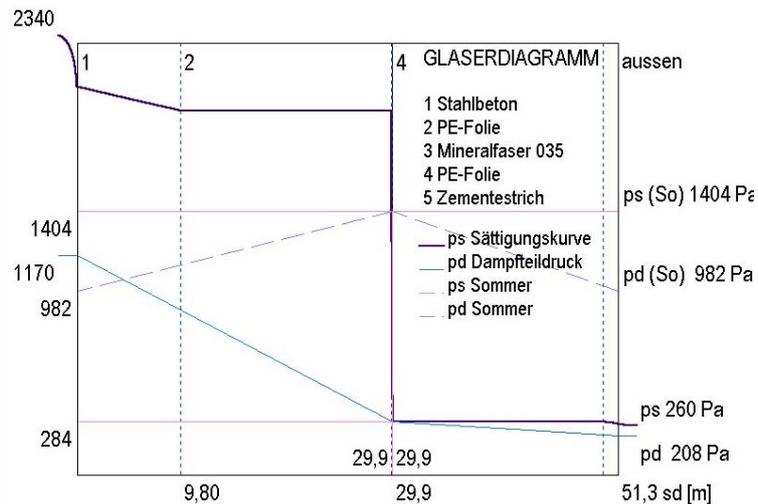


Bild 4-19 Diffusionsdiagramm Geschosdecke an belüfteten Dachraum (DIN 4108-3)⁹

4.1.4.2 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Für die Klimabedingungen auf der Kaltseite werden die Außenbedingungen von Hamburg zugrunde gelegt. Mit diesem Ansatz liegt man auf der sicheren Seite.

Auch nach diesem Berechnungsverfahren tritt an der Grenzebene zwischen der Mineralfaser 035 und der PE-Folie Tauwasser auf. Im kältesten Monat Januar steigt die Tauwassermenge auf einen Spitzenwert und fällt bis März. Von April bis Juni verdunstet das Wasser; während Juni trocknet es vollständig aus dem Bauteil aus.

Tabelle 4-25 Monatliche Tauwassermenge und Akkumulation an einer Grenzfläche

Monat	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.
g_c [g/m ²]	6	10	11	9	6	-3	-19	-31	0	0	0	0
M_a [g/m ²]	6	16	27	36	41	38	20	0	0	0	0	0

Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind einzuhalten.

⁹ von DÄMMWERK erstelltes Diffusionsdiagramm

4.1.4.3 Berechnung nach Jenisch

Auch für das Verfahren nach *Jenisch* werden die Außenbedingungen von Hamburg angesetzt. Tauwasserbildung wird für die Monate von Januar bis März sowie November und Dezember vorausgesagt. In den Sommermonaten trocknet das Bauteil vollständig aus.

4.1.4.4 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Nach DIN 4108-3 werden für Bauteile gegen belüftete Dachräume die auch für „normale“ Außenbauteile geltenden Klimabedingungen herangezogen. Das während der Tauperiode anfallende Wasser verdunstet in den Sommermonaten vollständig aus der Konstruktion. Die Tauwasserbildung wird als unschädlich eingestuft.

Sowohl bei dem Verfahren nach *Jenisch* als auch bei dem nach DIN EN ISO 13788 wird mit den tatsächlich am Standort des Gebäudes vorliegenden Klimabedingungen gerechnet. Dabei wurden die ungünstigeren Außenbedingungen angenommen. Aufgrund der verschiedenartigen Akkumulation¹⁰ beträgt die Höchstmenge an Tauwasser im Bauteil nach *Jenisch* im März 35 g/m^2 , nach DIN EN ISO 13788 41 g/m^2 . Ab April tritt bei beiden Berechnungsverfahren Verdunstung ein bis im Juni das gesamte Wasser aus dem Bauteil ausgetrocknet ist.

4.1.5 Flachdach

Das Flachdach grenzt Wohnraum gegen Außenluft ab. Der Aufbau der Konstruktion sieht wie folgt aus:

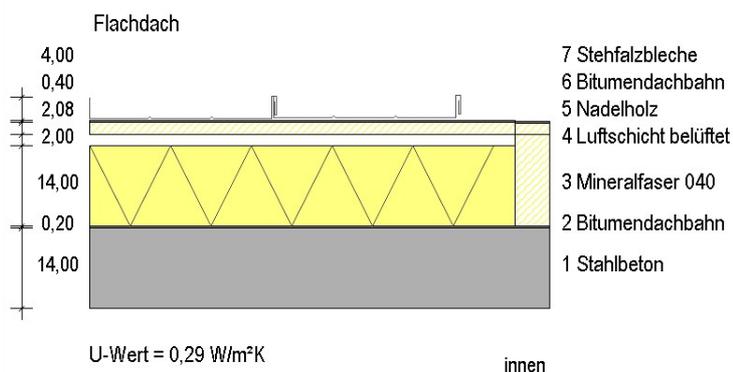


Bild 4-20 Schichtaufbau Flachdach

¹⁰ Vgl. Abschnitt 3.1, Tabelle 3-1

4.1.5.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Die Berechnung ergab für den Feldbereich eine Tauwasserbildung von $m_{W,T} = 61,4 \text{ g/m}^2$ in der Tauebene vor der ‚Luftschicht belüftet‘. Während der Sommermonate verdunstet das Wasser vollständig aus dem Bauteil; die Verdunstungsmenge beträgt $m_{W,V} = 141,7 \text{ g/m}^2$. Die höchstzulässige flächenbezogene Tauwassermenge von 500 g/m^2 wird nicht überschritten. Somit gilt die Tauwasserbildung in der Konstruktion als unschädlich.

In der Verdunstungsperiode fällt aufgrund der innenliegenden Abdichtung erneut Tauwasser aus. Dies wird jedoch von der DIN 4108-3 nicht berücksichtigt. Das Programm gibt stattdessen gesondert (im Rahmen der DIN 4108-3) an, dass es im Sommer erneut zu Tauwasserausfall kommt. Dabei entsteht eine Tauwassermenge von $49,6 \text{ g/m}^2$, wovon $48,5 \text{ g/m}^2$ an der Sperrschicht kondensieren.

Als Anmerkung sei an dieser Stelle erwähnt, dass bei Dächern im Sommer aufgrund solarer Einstrahlung die Diffusionsrichtung umgedreht wird. Dabei wird Feuchte zum Rauminnen transportiert und kann dort an diffusionsdichten bzw. diffusionshemmenden Schichten auskondensieren.¹¹ Das Diffusionsdiagramm für die Verdunstungsperiode zeigt diese Umkehrdiffusion, jedoch ist die graphische Darstellung aufgrund der hohen diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke sehr unübersichtlich und wird daher nicht aufgeführt.

4.1.5.2 Berechnung nach Jenisch

In den Monaten der Kondensationsperiode wird im Feldbereich des Bauteils Tauwasser gebildet, welches in der Verdunstungsperiode nicht vollständig aus dem Bauteil austrocknet. Die Jahresbilanz ist positiv, das heißt über den Zeitraum mehrerer Jahre hinweg wird sich in der Konstruktion immer mehr Wasser ansammeln.

Das DÄMMWERK-Programm berechnet Tauwasserausfall für die Grenzebenen ‚Mineralfaser‘ – ‚Luftschicht‘ sowie ‚Bitumendachbahn‘ – ‚Nadelholz‘.

¹¹ Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Feuchteschutz 1, Seite 27

4.1.5.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Wie bereits nach dem Verfahren nach DIN 4108-3 ermittelt, fällt in der Verdunstungsperiode erneut Tauwasser aus. Leider gibt DÄMMWERK nicht an, in welchen Monaten dies der Fall ist.¹² Die Akkumulation wird vom Programm lediglich für eine Grenzfläche (‘Mineralfaser’ – ‘Luftschicht’) durchgeführt. Danach verdunstet das angesammelte Tauwasser während der Sommermonate unvollständig. Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden.

4.1.5.4 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Aufgrund der belüfteten Luftschicht im Aufbau werden nach DIN 4108-3 und *Jenisch* die Wärmedurchlasswiderstände $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $R_{se} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ angesetzt; für die Berechnung nach DIN EN ISO 13788 jedoch $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ und $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$. Die Wärmedurchgangswiderstände der Luftschicht selbst und die aller nachfolgenden Schichten zur Außenluft hin werden für alle drei Nachweisverfahren vernachlässigt.

Die Stehfalzbleche bestehen aus „praktisch dampfdichten“ Material. Für die Berechnung nach DIN 4108-3 wurde dies mit $s_d = 1500 \text{ m}$ berücksichtigt, nach DIN EN ISO 13788 mit $\mu = 100.000$.

Für das Verfahren nach DIN 4108-3 wird für die Dachoberfläche ein günstigerer Nachweis geführt, da die Sonnenwärmeeinstrahlung berücksichtigt wird. Das in der Tauperiode anfallende Tauwasser verdunstet während der Sommermonate vollständig aus dem Bauteil und gilt daher als unschädlich.

Die Verfahren nach *Jenisch* und DIN EN ISO 13788 berechnen für die Grenzfläche ‘Mineralfaser’ – ‘Luftschicht’ Tauwasser, welches über die Sommermonate jedoch nicht vollständig verdunstet. Während das Verfahren nach *Jenisch* die höchste akkumulierte Tauwassermenge für Dezember berechnet, ist es nach der DIN EN ISO 13788 der Mai. Es fällt auf, dass die berechneten Tauwassermengen beider Verfahren fast identisch sind. Da bei dem Verfahren nach *Jenisch* die Akkumulation mit allen vorangehenden Monaten durchgeführt wird, nach DIN EN ISO 13788 aber mit dem Anfangsmonat der Tauperiode, fallen die akkumulierten Tauwassermengen so unterschiedlich aus.

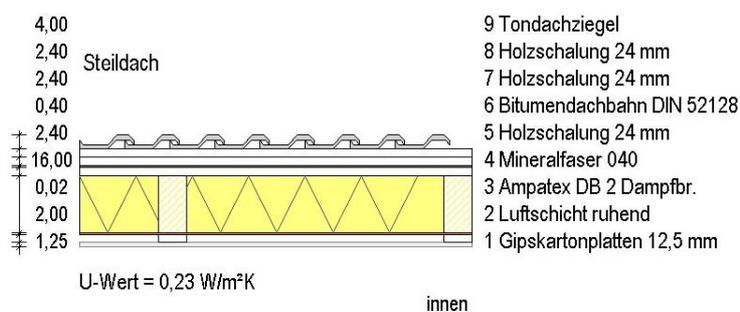
¹² Es handelt sich hier um einen Programmfehler, welcher zur Zeit auf Hinweis der Verfasserin bearbeitet wird.

Tabelle 4-26 Vergleich der Tauwassermengen nach Jenisch und DIN EN ISO 13788

		Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept
Jenisch	Tauwassermenge [g/m ²]	9	19	25	28	23	20	9	-5	-12	-14	-10	-1
DIN EN ISO 13788	Tauwassermenge [g/m ²]	10	20	26	28	24	21	10	0	-12	-17	-17	-4
Jenisch	Akkumulierte Tauwassermenge [g/m ²]	229	248	273	209	233	253	262	257	245	231	221	219
DIN EN ISO 13788	Akkumulierte Tauwassermenge [g/m ²]	10	29	55	83	107	128	137	138	126	109	92	88

4.1.6 Steildach

Das Steildach grenzt wiederum Wohnraum gegen Außenluft ab. Die Konstruktion soll folgenden Aufbau haben:

**Bild 4-21 Schichtaufbau Steildach**

4.1.6.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Während der Tauperiode entsteht an der Schichtgrenze ‚Holzschalung‘ – ‚Bitumendachbahn‘ Tauwasser, welches in den Sommermonaten vollständig verdunstet. Das Bauteil hat die Beurteilung bestanden.

Der erneute Tauwasserausfall (siehe Bild 4-22) in der Verdunstungsperiode an der Schichtgrenze ‚Dampfbremse‘ – ‚Mineralfaser‘ wird nach DIN 4108-3 nicht berücksichtigt.

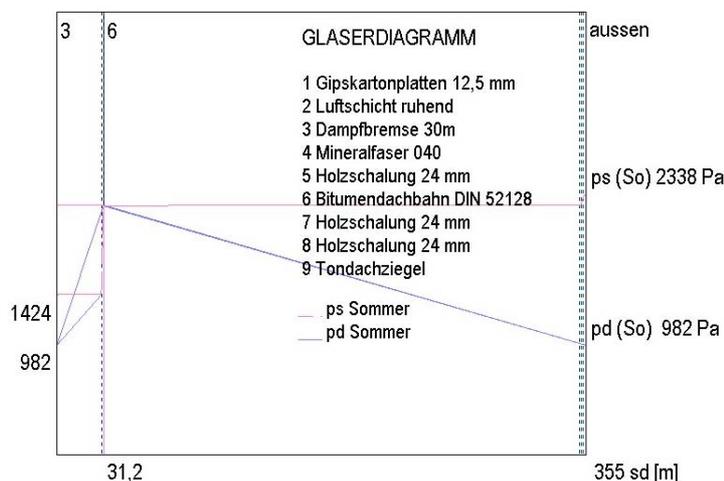


Bild 4-22 Steildach. Diffusionsdiagramm Verdunstungsperiode (DIN 4108-3)

4.1.6.2 Berechnung nach Jenisch

Mit Hilfe des DÄMMWERK-Programms kann für dieses Verfahren die anfallende Tauwassermenge für jede Grenzschicht berechnet und aufsummiert werden. Tauwasser entsteht hiernach an der Schichtgrenze ‚Mineralfaser‘ – ‚Holzschalung‘ sowie an der Schichtgrenze ‚Holzschalung‘ – ‚Bitumendachbahn‘. An beiden Grenzebenen verdunstet das Wasser unvollständig in den Sommermonaten.

4.1.6.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Während der Tauperiode fällt an der Schichtgrenze ‚Holzschalung‘ – ‚Bitumendachbahn‘ Tauwasser aus. Bei der Berechnung nach DIN 4108-3 wurde bereits ermittelt, dass in der Verdunstungsperiode erneut Tauwasser ausfällt. Der unter Abschnitt 4.1.5.3 beschriebene Programmfehler trifft auch hier zu: die Akkumulation wurde nur für eine Grenzschicht durchgeführt. Dabei verdunstet nach DIN EN ISO 13788 das angefallene Wasser unvollständig aus dem Bauteil. Die Beurteilung ist nicht bestanden.

4.1.6.4 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Nach DIN 4108-3 wird für die Dachoberfläche die Sonnenwärmestrahlung bezüglich der Oberflächentemperatur berücksichtigt. Dies führt zu einem günstigeren Nachweis; die

Tauwasserbildung im Sinne der DIN 4108-3 ist unschädlich. Unter Ansatz der tatsächlichen Klimabedingungen nach *Jenisch* und DIN EN ISO 13788 verdunstet das angefallene Wasser im Bauteil unvollständig während der Verdunstungsperiode.

4.1.7 Sohlplatte an Erdreich

Es soll eine an Erdreich grenzende Sohlplatte eines beheizten Aufenthaltsraumes, wie in Bild 4-23 dargestellt, untersucht werden.

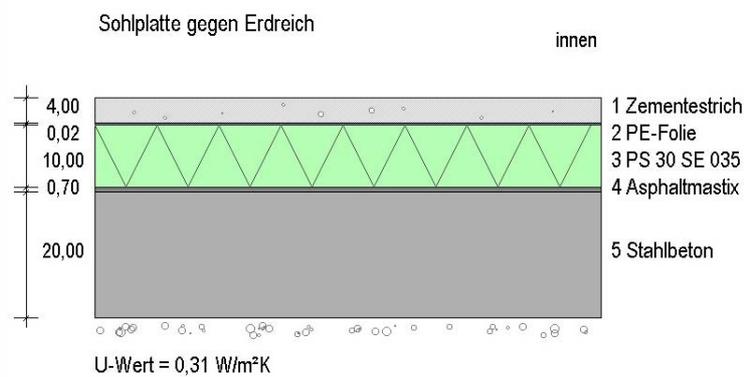


Bild 4-23 Schichtaufbau Sohlplatte

Für alle drei Nachweisverfahren soll für das Bauteil der Einfluss von Grundwasser berücksichtigt werden, das heißt die relative Luftfeuchte der Kaltseite beträgt 100%.

4.1.7.1 Verfahren nach DIN 4108-3

Die Außentemperatur wurde mit $+10^{\circ}\text{C}$ festgelegt; sie soll über den Betrachtungszeitraum hinweg konstant sein. Die Wärmeübergangswiderstände wurden mit $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$ und $R_{se} = 0,00 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$ angesetzt. Die Schicht ‚Asphaltmastix‘ ist „praktisch dampfdicht“ und wird daher mit $s_d = 1500 \text{ m}$ berücksichtigt.

Unter den vorliegenden Randbedingungen wurde für das Bauteil keine Tauwasserbildung vorhergesagt.

4.1.7.2 Verfahren nach DIN EN ISO 13788

Für die Berechnung wurden die Wärmeübergangswiderstände mit $R_{si} = 0,25 m^2 K / W$ und $R_{se} = 0,04 m^2 K / W$ angenommen. Die „praktisch dampfdichte“ Materialschicht ‚Asphaltmastix‘ wurde mit $\mu = 100.000$ berechnet. Für die Außentemperaturen wurde für jeden Monat die Jahresmitteltemperatur von Hamburg angesetzt. Die raumseitigen relativen Luftfeuchten sind in Tabelle 4-27 berechnet.

Tabelle 4-27 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für Hamburg unter Verwendung der Jahresmitteltemperatur und einer äußeren relativen Luftfeuchte von 100%.

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	8,6	869	1116	1,00	1116	1985	20	2335	0,85
Februar		842				1958			0,84
März		726				1842			0,79
April		566				1682			0,72
Mai		347				1463			0,63
Juni		200				1316			0,56
Juli		143				1259			0,54
August		151				1267			0,54
September		290				1406			0,60
Oktober		459				1575			0,67
November		664				1780			0,76
Dezember		806				1922			0,82

Im Bauteilinneren wird in jedem Monat an einer Grenzfläche (zwischen den Schichten 3 und 4) Tauwasser gebildet. Im Januar erreicht es seinen Höchstwert; Verdunstung findet in keinem Monat statt. Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden.

4.1.7.3 Verfahren nach Jenisch

Die Klimabedingungen wurden analog zu dem Verfahren nach DIN EN ISO 13788 verwendet. Auch hier findet in jedem Monat Tauwasserbildung statt. Die Bilanz ist größer null, das heißt im Bauteil sammelt sich immer mehr Wasser an.

4.1.7.4 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse

Bei der Berechnung nach DIN 4108-3 wird im Bauteilinneren kein Tauwasser gebildet. Sowohl nach dem Verfahren nach *Jenisch* als auch nach DIN EN ISO 13788 entsteht an der Ebene zwischen ‚PS Hartschaum‘ und ‚Asphaltmastix‘ in allen Monaten Tauwasser, welches in den Sommermonaten unvollständig verdunstet.

4.2 Variation Klimabedingungen

In diesem Abschnitt sollen die Klimarandbedingungen für ein Bauteil variiert werden. Zum einen soll untersucht werden, wie ein Bauteil hinsichtlich der Tauwasserbildung im Bauteilinneren beurteilt wird, wenn die gleiche Konstruktion an verschiedenen Orten in Deutschland angesetzt wird. Zum anderen soll die europäische Norm beleuchtet werden, inwiefern ein und dasselbe Bauteil für verschiedene in Europa vorkommende Klimazonen beurteilt wird.

4.2.1 Außenwand, Standort Hamburg - Dresden

In diesem Abschnitt wird die massive einschalige Außenwand, die bereits in Abschnitt 4.1.1 für den Standort Hamburg untersucht wurde, für den Standort Dresden berechnet.

Zunächst sollen in nachfolgender Tabelle die raumseitigen relativen Luftfeuchten ermittelt werden. Die Werte der mittleren Monatstemperaturen sowie der äußeren relativen Luftfeuchten stammen von Deutschen Wetterdienst.¹³

¹³ Periode von 1961 bis 1990

Tabelle 4-28 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für Dresden

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	-0,7	891	576	0,80	461	1352	20	2335	0,58
Februar	0,4	873	628	0,78	490	1363			0,58
März	3,9	717	807	0,74	597	1314			0,56
April	8,1	530	1079	0,68	734	1264			0,54
Mai	13,1	307	1506	0,66	994	1301			0,56
Juni	16,5	156	1875	0,66	1238	1394			0,60
Juli	18,0	89	2062	0,69	1423	1512			0,65
August	17,7	102	2023	0,71	1436	1538			0,66
September	14,2	258	1618	0,75	1214	1472			0,63
Oktober	9,8	454	1211	0,78	945	1399			0,60
November	4,4	695	836	0,81	677	1372			0,59
Dezember	1,0	846	656	0,81	531	1377			0,59

Berechnet man das Bauteil mit den Klimabedingungen am Standort Dresden, so findet im Inneren der Konstruktion keine Tauwasserbildung statt. Zur Übersicht sind die anfallenden Tauwassermengen am Standort Hamburg in der folgenden Tabelle noch einmal aufgelistet.

Tabelle 4-29 Vergleich der Tauwassermengen, Standorte Hamburg und Dresden

		Dezember	Januar	Februar	März	April
Hamburg	Tauwassermenge	52	64	31	-54	-297
Dresden	g_c [g/m ²]	0	0	0	0	0

Die Gegenüberstellung zeigt, dass sich die zwei Standorte hinsichtlich der Tauwassermenge in derselben Konstruktion erheblich unterscheiden.

Mit den angepassten Klimabedingungen von Dresden wurde diese Außenwandkonstruktion auch für das Verfahren nach *Jenisch* berechnet. Dabei ist die Jahresbilanz zwar kleiner null, aber im kältesten Monat Januar entsteht zwischen den Schichten 3 und 4 Tauwasser.

In dem DÄMMWERK-Programm ist es sehr leicht möglich eine Bauteilkonstruktion für verschiedene Standorte zu berechnen. Durch „probieren“ wurde für diese Außenwand herausgefunden, dass nördlich gelegene Städte (wie z.B. Berlin, Hamburg, Bremen, Hannover)

aufgrund ihrer Klimabedingungen zu einem größeren Tauwasserausfall im Bauteil führen als südlichere Städte (wie Dresden, Karlsruhe, Köln, Frankfurt).

4.2.2 Flachdach, Standort Berlin – Karlsruhe

Für die Standorte Berlin und Karlsruhe werden zunächst die raumseitigen relativen Luftfeuchten in den nachfolgenden Tabellen (4-30) und (4-31) berechnet. Die Werte der mittleren Monatstemperaturen sowie der äußeren relativen Luftfeuchten stammen vom Deutschen Wetterdienst.¹³

Tabelle 4-30 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für Berlin-Tempelhof

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	-0,2	891	601	0,85	511	1402	20	2335	0,60
Februar	0,8	855	647	0,81	524	1379			0,59
März	4,2	704	824	0,76	626	1330			0,57
April	8,6	508	1116	0,70	781	1289			0,55
Mai	13,9	272	1587	0,64	1016	1288			0,55
Juni	17,4	116	1985	0,67	1330	1446			0,62
Juli	18,8	53	2167	0,69	1495	1548			0,66
August	18,4	71	2114	0,74	1564	1635			0,70
September	14,6	241	1660	0,77	1278	1519			0,65
Oktober	10,0	446	1227	0,82	1006	1452			0,62
November	4,9	673	866	0,86	745	1418			0,61
Dezember	1,4	829	676	0,88	595	1424			0,62

Tabelle 4-31 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für Karlsruhe

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	1,2	811	666	0,84	559	1370	20	2335	0,59
Februar	2,5	780	731	0,80	585	1365			0,58
März	6,0	624	934	0,75	701	1325			0,57
April	9,9	450	1219	0,70	853	1303			0,56
Mai	14,3	254	1628	0,70	1140	1394			0,60
Juni	17,5	111	1998	0,71	1419	1530			0,66
Juli	19,6	18	2278	0,72	1640	1658			0,71
August	18,8	53	2167	0,75	1625	1678			0,72
September	15,4	205	1748	0,81	1416	1621			0,69
Oktober	10,4	428	1260	0,84	1058	1486			0,64
November	5,3	655	890	0,85	757	1412			0,60
Dezember	2,2	793	715	0,86	615	1408			0,60

Die Berechnung mit DÄMMWERK ergab, wie auch schon für den Standort Hamburg, Tauwasserbildung an der Schichtgrenze ‚Mineralfaser‘ – ‚Luftschicht‘. Die Tauwassermengen aller Standorte für die Berechnung nach DIN EN ISO 13788 sind in Tabelle 4-32 gegenübergestellt.

Tabelle 4-32 Flachdach. Vergleich der Tauwassermengen für die Standorte Hamburg, Berlin, Karlsruhe (DIN EN ISO 13788)

Monat	Tauwassermenge g_c [g/m ²]			Akkumulierte Tauwassermenge [g/m ²]		
	Hamburg	Berlin	Karlsruhe	Hamburg	Berlin	Karlsruhe
Oktober	10	8	8	10	8	8
November	20	19	18	29	27	26
Dezember	26	27	24	55	54	50
Januar	28	28	25	83	83	75
Februar	24	23	20	107	106	95
März	21	18	14	128	124	109
April	10	6	3	137	130	112
Mai	0	-6	-9	138	124	103
Juni	-12	-19	-21	126	105	82
Juli	-17	-27	-32	109	78	49
August	-17	-25	-28	92	53	21
September	-4	-8	-13	88	45	8

Der Höchstwert an Tauwasser wird an jedem betrachteten Standort im Januar erreicht. Die Tauwassermenge ist im südlicheren Karlsruhe immer kleiner als an den anderen beiden Standorten. Auf den ersten Blick weichen die Tauwassermengen nur geringfügig voneinander ab. An den akkumulierten Tauwassermengen wird jedoch deutlich, dass das Flachdach in Hamburg im September 88 g/m² Tauwasser enthält, in Berlin nur 45 g/m² und in Karlsruhe sogar nur 8 g/m². Außerdem kann man erkennen, dass in Hamburg die Verdunstung erst im Juni einsetzt, in Berlin und Karlsruhe aber schon im Mai.

4.2.3 Außenwand, europäische Standorte nach Einteilung in Klimazonen

Das Berechnungsverfahren nach DIN EN ISO 13788 soll nun auf die Anwendbarkeit auf verschiedene europäische Standorte getestet werden. Dafür wird eine Einteilung in Klimazonen nach *W. Köppen* vorgenommen.

Die Einteilung in Klimazonen erfolgt nach verschiedenen Kriterien. Dabei sind die Außenlufttemperaturen und die Niederschlagsmengen im Sommer und Winter ausschlaggebend.

Tabelle 4-33 Klimazonen in Europa, einige Vertreter

Klimazonen	winterfeuchtes Kaltklima	warmes sommertrockenes Klima	feuchtgemäßigtes Klima
Vertreter	Moskau Warschau	Athen Madrid Rom	London Wien alle deutschen Städte

Für je einen Vertreter einer Klimazone soll das Verfahren nach DIN EN ISO 13788 auf die schon unter Abschnitt 4.1 berechnete einschalige Außenwand sowie die Außenwand mit Innendämmung angewendet werden. Die raumseitigen relativen Luftfeuchten werden in den Tabellen (4-34) bis (4-36) unter Zugrundelegung einer für alle Standorte gleichen Innentemperatur von 20°C berechnet. Für Athen erscheint diese Annahme sehr niedrig, jedoch liegt man damit auf der sicheren Seite.

Tabelle 4-34 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für Moskau

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	-11,0	891	237	0,86	204	1095	20	2335	0,47
Februar	-9,6	891	269	0,83	223	1114			0,48
März	-4,8	891	408	0,80	326	1217			0,52
April	3,4	740	779	0,74	576	1316			0,56
Mai	12,0	356	1401	0,67	939	1295			0,55
Juni	15,2	214	1726	0,69	1191	1405			0,60
Juli	18,6	62	2141	0,71	1520	1582			0,68
August	15,7	192	1782	0,77	1372	1564			0,67
September	10,4	428	1260	0,80	1008	1436			0,61
Oktober	3,6	731	790	0,83	656	1387			0,59
November	-2,4	891	500	0,87	435	1326			0,57
Dezember	-8,2	891	304	0,87	264	1155			0,49

Tabelle 4-35 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für Athen

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	8,6	508	1116	0,75	837	1345	20	2335	0,58
Februar	9,4	472	1178	0,74	872	1344			0,58
März	11,9	361	1392	0,70	974	1335			0,57
April	15,3	209	1737	0,68	1181	1390			0,60
Mai	20,0	0	2335	0,65	1518	1518			0,65
Juni	24,4	0	3052	0,57	1740	1740			0,75
Juli	27,3	0	3623	0,50	1812	1812			0,78
August	26,9	0	3539	0,47	1663	1663			0,71
September	23,5	0	2892	0,58	1677	1677			0,72
Oktober	19,4	27	2250	0,68	1530	1557			0,67
November	14,1	263	1607	0,80	1286	1549			0,66
Dezember	10,5	423	1269	0,76	964	1387			0,59

Tabelle 4-36 Berechnung der raumseitigen relativen Luftfeuchte für London

Monat	Θ_e [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\Theta_e)$ [Pa]	φ_e	p_e [Pa]	p_i [Pa]	Θ_i [°C]	$p_{sat}(\Theta_i)$ [Pa]	φ_i
Januar	3,4	740	779	0,90	701	1441	20	2335	0,62
Februar	4,3	699	830	0,82	681	1380			0,59
März	5,6	642	909	0,75	682	1324			0,57
April	8,9	495	1139	0,72	820	1315			0,56
Mai	12,1	352	1410	0,72	1015	1367			0,59
Juni	15,7	192	1782	0,68	1212	1404			0,60
Juli	17,3	120	1973	0,72	1421	1541			0,66
August	16,7	147	1899	0,75	1424	1571			0,67
September	14,2	258	1618	0,78	1262	1520			0,65
Oktober	9,9	450	1219	0,90	1097	1547			0,66
November	6,1	619	941	0,88	828	1447			0,62
Dezember	4,0	713	813	0,90	732	1445			0,62

4.2.3.1 Außenwand, einschalig

In Abschnitt 4.1.1 ergab die Berechnung für Hamburg Tauwasserbildung an der Grenzebene zwischen den Schichten ‚Mineralfaser‘ und ‚Kalkzementputz‘. Ab März trat Verdunstung ein; im April trocknete das Bauteil vollständig aus. Wie erwartet fällt in dem Bauteil mit Standort in Moskau ebenso Tauwasser in dieser Grenzebene aus. Hierbei ist das Bauteil erst im Mai vollständig ausgetrocknet. Am Standort London wird viel weniger Tauwasser gebildet; die Verdunstung ist bereits im März abgeschlossen. Für das Bauteil mit Standort in Athen wird kein Tauwasser erwartet.

Es soll noch erwähnt werden, dass sich die Anfangsmonate, in denen die Akkumulation beginnt, unterscheiden. Während in Moskau schon zu Beginn der Tauperiode (nämlich im November) Tauwasser im Bauteil gebildet wird, tritt dies in London erst im Dezember auf. Das bedeutet, dass in Moskau fünf Monate lang Tauwasser gebildet wird, in London aber nur drei Monate bis zum Beginn der Verdunstung.

In Tabelle (4-37) sind die untersuchten europäischen Standorte sowie Hamburg im Vergleich zueinander aufgelistet.

Tabelle 4-37 Vergleich der Tauwassermengen der Standorte Moskau, Hamburg, London und Athen

		Nov.	Dez.	Jan.	Febr.	März	April	Mai
Moskau	Tauwassermenge g_c [g/m ²]	73	102	112	89	56	-416	-1123
Hamburg		52	64	31	-54	-297	0	0
London		0	26	35	6	-81	0	0
Athen		0	0	0	0	0	0	0

4.2.3.2 Außenwand mit Innendämmung

Bei der Berechnung der Außenwand für Hamburg, bildete sich Tauwasser an zwei Grenzebenen, jedoch in verschiedenen Monaten. In Moskau und London dagegen wird Tauwasser lediglich an einer Grenzebene gebildet. Die Tauwassermengen sind in Tabelle (4-38) zusammengestellt.

Tabelle 4-38 Außenwand mit Innendämmung. Vergleich der Tauwassermengen für die Standorte Moskau, Hamburg¹⁴, London und Athen

Monat	Tauwassermenge g_c [g/m ²]				Akkumulierte Tauwassermenge [g/m ²]			
	Moskau	Hamburg	London	Athen	Moskau	Hamburg	London	Athen
Oktober	596	66	172	0	596	66	172	0
November	1008	555	448	0	1605	621	620	0
Dezember	1095	853	691	0	2700	1474	1311	0
Januar	1177	980	752	11	3877	2454	2063	11
Februar	1028	796	473	-20	4905	3250	2535	0
März	995	585	291	0	5900	3834	2826	0
April	464	56	101	0	6365	3890	2927	0
Mai	-942	-420	-353	0	5422	3471	2575	0
Juni	-1417	-933	-917	0	4005	2538	1658	0
Juli	-2102	-1200	-1243	0	1903	1338	415	0
August	-1553	-1163	-1130	0	350	175	0	0
September	-684	-605	0	0	0	0	0	0

¹⁴ Wie unter Abschnitt 4.1.2.2 erwähnt, wurden bei der Berechnung zwei Grenzebenen mit Tauwasserbildung in verschiedenen Monaten nachgewiesen. Vom Programm wird jedoch - entgegen der Normvorschrift - nicht jede einzelne Grenzschicht akkumuliert.

In dieser Zusammenstellung wird deutlich, wie unterschiedlich die angesammelte Tauwassermenge für dasselbe Bauteil an verschiedenen Orten ausfallen kann. Für Athen wäre die Außenwandkonstruktion durchaus ausführbar, da eine relativ geringe Tauwassermenge nur in einem Monat ausfällt und im darauffolgenden schon wieder verdunstet. Für die anderen Standorte kann man bei gegebenem Aufbau davon ausgehen, dass die große Menge an angesammeltem Wasser im Bauteil (in Moskau immerhin $6,4 \text{ kg/m}^2$) beträchtlichen Einfluss auf eine Verschlechterung des Zustandes der Baustoffe mit sich führen kann. Als Folge dieser hohen Tauwassermenge wird deutlich, dass sich die Wärmedämmwirkung der Konstruktion (dies gilt auch für die Standorte Hamburg und London) vermindern wird.

4.3 Übersicht

Dieser Abschnitt soll eine Übersicht über die Auswirkungen der unterschiedlichen Randbedingungen der einzelnen Berechnungsverfahren geben.

1. Klimarandbedingungen

Nach DIN 4108-3 darf für Dächer ein günstigerer Nachweis geführt werden, da die Sonnenwärmeeinstrahlung berücksichtigt wird.¹⁵ Dies führte bei der Berechnung des Flachdaches und des Steildaches dazu, dass zwar Tauwasser berechnet wurde, dies aber in den Sommermonaten vollständig verdunstete. Somit gilt die Tauwasserbildung für diese Bauteile im Sinne der DIN 4108-3 als unschädlich. Unter Ansatz der tatsächlichen Klimabedingungen wurde jedoch nachgewiesen, dass das Wasser während der wärmeren Jahreszeit unvollständig verdunstet. Hierbei gilt die Beurteilung als nicht bestanden.

Nach DIN EN ISO 13788 ergab die Berechnung eines Bauteiles an verschiedenen Orten in Deutschland wesentliche Unterschiede zwischen nördlichen und südlicheren Städten.¹⁶ Die Tauwassermengen weichen mitunter stark voneinander ab. Dabei kann es auch vorkommen, dass für ein Bauteil Tauwasserbildung an einem Standort errechnet wird, an einem anderen dagegen bleibt das gleiche Bauteil tauwasserfrei.

¹⁵ Vgl. Abschnitt 3.2.2.2, Tabelle 3-4

¹⁶ siehe Abschnitt 4.2.1

Die Untersuchung von Konstruktionen an verschiedenen Orten in Europa ergab für die Berechnung nach DIN EN ISO 13788 wie erwartet ungünstigere Beurteilungen bezüglich der Tauwassergefahr im winterfeuchten Kaltklima. Bauteile in der feuchtgemäßigten Klimazone sind weniger tauwassergefährdet und Bauteile im warmen sommertrockenen Klima noch weniger oder gar nicht.¹⁷

2. Wärmeübergangswiderstände

Der nach DIN EN ISO 13788 angesetzte raumseitige Wärmeübergangswiderstand von $R_{si} = 0,25 m^2 \cdot K / W$ bewirkt im Gegensatz zu dem nach DIN 4108-3 von $R_{si} = 0,13 m^2 \cdot K / W$ einen stärkeren Temperaturabfall im Bauteil und somit auch einen stärkeren Sättigungsdruckabfall von der Raumseite bis zur Tauwasserebene. Dadurch dass nach der europäischen Norm jedoch die Wärmeübergangswiderstände von außen akkumuliert werden, hat der ungünstigere Ansatz des raumseitigen Wärmeübergangswiderstandes keinen Einfluss auf die Tauwassermenge im Inneren einer Konstruktion, insofern der Wasserdampfdruck den Sättigungsdruck nicht schon in diesem Bereich berührt.

Der bei Bauteilen an Erdreich angesetzte außenseitige Wärmeübergangswiderstand von $R_{se} = 0,00 m^2 \cdot K / W$ nach DIN 4108-3 bewirkt einen stärkeren Temperatur- und Sättigungsdruckabfall von der Außenseite bis zur Tauwasserebene. Somit wird in diesem Fall nach DIN 4108-3 eine größere Tauwassermenge berechnet als nach DIN EN ISO 13788; hier gilt $R = 0,04 m^2 \cdot K / W$.

Bei einer belüfteten Luftschicht im Bauteil bzw. Angrenzung an einen hinterlüfteten Raum ergibt sich für die Berechnung nach DIN EN ISO 13788 eine größere Tauwassermenge, da der äußere Wärmeübergangswiderstand mit $R = 0,04 m^2 \cdot K / W$ kleiner ist als jener nach DIN 4108-3 mit $R = 0,08 m^2 \cdot K / W$.

¹⁷ siehe Abschnitt 4.2.3

3. Bauteilschichten

Durch die Aufteilung von Schichten mit einem hohen Wärmedurchlasswiderstand¹⁸ in eine Reihe von Schichten mit einem maximalen Wert $R = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ soll eine größere Genauigkeit erreicht werden. Dadurch verläuft der Sättigungsdruck nicht mehr linear, sondern gekrümmt. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass der Dampfteildruck den Sättigungsdruck in ein oder mehreren Punkten berührt, also Tauwasser ausfallen würde.

4. Dampfdichte Materialien

Je größer die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke eines Materials ist, desto weniger Dampf kann durch dieses Material hindurch diffundieren. Die DIN 4108-3 rechnet bei diffusionsdichten Materialien mit $s_d \geq 1500 \text{ m}$. Die DIN EN ISO 13788 jedoch mit einer Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu = 100.000$. Dieser Unterschied soll an dem unter Abschnitt 4.1.6 untersuchten Steildach verdeutlicht werden. Dabei sollen die vereinfachten Klimabedingungen nach DIN 4108-3 angesetzt werden.

Unter Zugrundelegung von $\mu = 100.000$ ergibt die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke für die Dampfbremse $s_d = 100.000 \cdot 0,0003 = 30 \text{ m}$. Dies führt zu einer erneuten Tauwasserbildung in der Verdunstungsperiode an der Schichtgrenze ‚Mineralfaser‘ – ‚Dampfbremse‘. Dabei fallen $27,5 \text{ g} / \text{m}^2$ Feuchtigkeit aus, wovon $21,9 \text{ g} / \text{m}^2$ nach unten bzw. eine Restmenge von $5,6 \text{ g} / \text{m}^2$ durch die Dämmschicht abdiffundieren (Darstellung siehe Bild 4-24).

Die Berechnung mit $s_d = 1500 \text{ m}$ für die Dampfbremse¹⁹ ergibt in der Verdunstungsperiode einen erneuten Tauwasserausfall von $6,0 \text{ g} / \text{m}^2$ (Bild 4-24). Davon diffundieren lediglich $0,4 \text{ g} / \text{m}^2$ nach unten ab; die restlichen $5,6 \text{ g} / \text{m}^2$ nach oben durch die Dämmschicht.²⁰

¹⁸ z. B. Wärmedämmstoffe

¹⁹ unter diesen Voraussetzungen als dampfdicht zu bezeichnen

²⁰ siehe Anhang

Durch die unterschiedlichen wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken entsteht für die Steildachkonstruktion unter vereinfachten Klimabedingungen wesentlich mehr Tauwasser in der Verdunstungsperiode, wenn die Festlegungen der DIN EN ISO 13788 zugrunde gelegt werden. Der größte Teil der angefallenen Tauwassermenge diffundiert dabei nach unten ab. Die durch die Dämmschicht nach oben diffundierende Feuchte ist bei beiden Verfahren gleich groß.

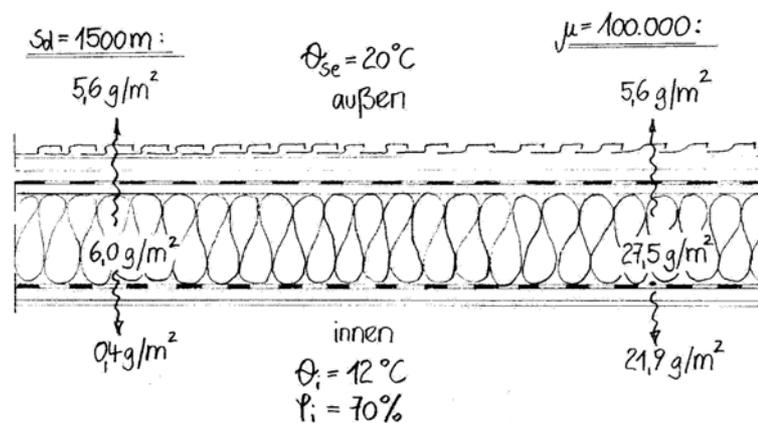


Bild 4-24 Steildach. Erneuter Tauwasserausfall in der Verdunstungsperiode. Einfluss der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken auf die Tauwassermenge

5 Anwendungsmöglichkeiten der DIN EN ISO 13788

In diesem Abschnitt soll auf die Anwendungsmöglichkeiten der in DIN EN ISO 13788 beschriebenen Verfahren zum Tauwasserschutz im Bauteilinneren sowie der Nachweis zum Schutz vor Oberflächenfeuchte eingegangen werden. Zusätzlich wird auf die informativen Anhänge der Norm hingewiesen.

5.1 Nachweis zum Schutz vor Tauwasser im Bauteilinneren

Bei dem unter Abschnitt 3.4.2.3 dargelegten Berechnungsverfahren handelt es sich um ein Verfahren zur Ermittlung der jährlichen Feuchtebilanz infolge Tauwasserbildung im Bauteilinneren. Dabei werden ausschließlich stationäre Vorgänge vorausgesetzt.

Die Norm weist auf verschiedene Fehlerquellen¹ hin, die aufgrund der Vereinfachungen im Verfahren hervorgerufen werden.

1. Die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes hängt vom Feuchtegehalt ab. Durch Tauwasserbildung bzw. Verdunstung wird Wärme freigesetzt bzw. verbraucht. Dadurch kommt es zu einer Änderung der Temperaturverteilung und somit auch zu einer Änderung der Sättigungsdampfdrücke, deren Verlauf wiederum die Tauwasser- bzw. Verdunstungsmenge beeinflusst.
2. Die Stoffeigenschaften werden als konstant angenommen.
3. In einigen Baustoffen tritt Kapillarität und Transport von Feuchte in der flüssigen Phase auf. Dies kann zu einer geänderten Feuchteverteilung führen.²
4. Luftbewegungen in Rissen oder innerhalb von Lufträumen können zu einer Änderung der Feuchteverteilung durch Feuchtekonvektion führen. Die Feuchtebedingungen können auch durch Regen oder schmelzenden Schnee beeinflusst werden.
5. Die verwendeten Klimarandbedingungen sind monatliche bzw. jährliche Mittelwerte. Die tatsächlichen Werte sind jedoch nicht konstant über einen Monat bzw. über ein Jahr.

¹ DIN EN ISO 13788, Abschnitt 6.3, Seite 10f

² In der DIN EN ISO 13788, Anhang F.2 wird ein Verfahren beschrieben, mit welchem diese Feuchteumverteilung in der flüssigen Phase näherungsweise berücksichtigt werden kann.

6. Die meisten Baustoffe sind in einem gewissen Grad hygroskopisch und können Wasserdampf absorbieren.
7. Für sämtliche Berechnungen wird ein eindimensionaler Feuchtetransport vorausgesetzt.
8. Einflüsse aus Sonneneinstrahlung und langwelliger Strahlung werden nicht berücksichtigt.

Um diese instationären Randbedingungen berücksichtigen zu können, wurden EDV-gestützte Berechnungsmodelle entwickelt, anhand derer es möglich ist, die realen Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge zu ermitteln.³

Beispielsweise kann mit dem vom Fraunhofer Institut entwickelten Simulationsprogramm WUFI der gekoppelte ein- und zweidimensionale Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen berechnet werden. Dabei wird mit Standardstoffkennwerten sowie mit einfach zu bestimmenden Speicher- und Flüssigtransportfunktionen unter Verwendung natürlicher Klimabedingungen (einschließlich Schlagregen und Sonneneinstrahlung) gearbeitet.

5.2 Nachweis zum Schutz vor Oberflächenfeuchte

An feuchtigkeitsempfindlichen ungeschützten Baumaterialien kann es zu Schäden durch Tauwasserbildung an Oberflächen kommen. Vorübergehend kann sie jedoch in kleinen Mengen akzeptiert werden, insofern die Feuchte nicht von der Oberfläche absorbiert wird bzw. angrenzende Materialien durch sie nicht geschädigt werden.⁴

5.2.1 Einflussgrößen

Die Norm legt fest, dass bei Überschreitung der relativen Feuchte von 80% über mehrere Tage Gefahr der Schimmelbildung an der Oberfläche eines Bauteils besteht. Bei leichten Bauweisen sowie Fenstern und Rahmen wird mit einer höchsten angenommenen relativen Luftfeuchte von 100% gerechnet, da aufgrund der undurchlässigen Oberflächenbehandlung selten Pilzbefall vorkommt.⁵

³ z. B. WUFI (Fraunhofer Institut), DIM (Universität Dresden), MATCH (Universität Kopenhagen)

⁴ DIN EN ISO 13788, Anhang D, Seite 26

⁵ DIN EN ISO 13788, Abschnitt 5.1, Seite 8

Die Tauwasserbildung auf Bauteiloberflächen wird vom außenseitigen Klima beeinflusst. Wesentlichen Einfluss haben aber auch die im Folgenden genannten drei Größen.

1. Wärmeschutztechnische Güte:

Hierunter wird die Charakterisierung einer Konstruktion unter Berücksichtigung

- des Wärmedurchlasswiderstandes R'_{T} ,
- von Wärmebrücken,
- der Geometrie eines Bauteils sowie
- der innere Wärmeübergangswiderstand R_{Si} verstanden.

Diese Wärmeschutztechnische Güte wird durch den Temperaturfaktor f_{Rsi} ⁶ der raumseitigen Oberfläche ausgedrückt.

Für den Fall, dass z. B. aufgrund der Geometrie mehrere raumseitige Randtemperaturen auftreten, wird auf ein in der DIN EN ISO 10211-1 beschriebenes Verfahren verwiesen.

2. Raumseitige Feuchtezufuhr:

Entsprechend dem voraussichtlichen Verwendungszweck eines Gebäudes sind das raumseitige Dampfdruckgefälle bzw. die raumseitige Feuchtezufuhr aus einem Diagramm zu entnehmen. Der Sicherheitsfaktor von 10% soll die in der Praxis auftretenden Schwankungen⁷ der Außentemperatur, der Sonneneinstrahlung, der hygroskopischen Trägheit sowie unterbrochenes Heizen ausgleichen. Wird die raumseitige relative Luftfeuchte konstant gehalten, reicht ein Sicherheitsspielraum von 5% aus.

3. Innentemperatur und Heizungssystem:

Die Innentemperaturen sind national festgelegt; in Deutschland geht man von 20°C aus. Das Heizungssystem spielt jedoch eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Luftbewegung und die Temperaturverteilung in den Räumen. In Räumen mit herabgesetzter, unterbrochener oder fehlender Beheizung kann es zu einer kritischen Oberflächenfeuchte kommen.

⁶ siehe Gleichung (3.75)

⁷ = instationäre Vorgänge

Für das in DIN EN ISO 13788 festgelegte Bemessungsverfahren sind hauptsächlich die Bestimmung der raumseitigen Luftfeuchte sowie daraus resultierend, der zulässige Sättigungsdampfdruck bzw. die zulässige volumenbezogene Sättigungsluftfeuchte an der Oberfläche eines Bauteils ausschlaggebend.

Die Beurteilung eines Bauteiles bezüglich der Gefahr der Schimmelbildung an der Oberfläche kann

- unter Verwendung von raumseitigen Luftfeuchteklassen,⁸
- unter Annahme einer konstanten relativen raumseitigen Luftfeuchte (bei klimatisierten Gebäuden),
- mit bekannter Feuchtezufuhr und konstanter Luftwechselrate sowie
- mit bekannter Feuchtezufuhr und veränderlicher Luftwechselrate⁹ durchgeführt werden.

Zunächst soll jeweils ein Beispiel für Massiv- bzw. Leichtbauweise zur Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung der kritischen Oberflächenfeuchte unter Verwendung von raumseitigen Luftfeuchteklassen durchgeführt werden.

5.2.2 Beispielberechnung Massivbauweise

Es soll eine Außenwand¹⁰ mit Standort in Hamburg bezüglich der Verhinderung des Schimmelbefalls untersucht werden. Dafür werden die Anhaltswerte der raumseitigen Luftfeuchteklassen¹¹ verwendet.

Gemäß der Berechnung in Abschnitt 4.2.1.2 beträgt der Wärmedurchlasskoeffizient der Wand

$$U = \frac{1}{R'_T} = \frac{1}{2,99} = 0,334 \frac{W}{m^2 \cdot K} .$$

⁸ siehe Tabelle 3-9 sowie Bild 3-9

⁹ Die Beziehung zwischen Luftwechselrate und der Temperatur muss bekannt sein.

¹⁰ Aufbau gemäß Abschnitt 4.2.1, Bild 4-1

¹¹ gemäß DIN EN ISO 13788, Anhang A (vgl. auch Abschnitt 3.4.2.1, Tabelle 3-9)

Die Berechnung des Temperaturfaktors $f_{Rsi,max}$ erfolgt in Tabelle 5-1 nach der unter Abschnitt 3.4.2.2 dargelegten Vorgehensweise.

Tabelle 5-1 Massivbauweise¹², Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungstemperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen

Monat	Θ_e [°C]	φ_e	p_e [Pa]	Δp [Pa]	p_i [Pa]	$p_{sat}(\Theta_{si})$ [Pa]	$\Theta_{si,min}$ [°C]	Θ_i [°C]	$f_{Rsi,min}$
Januar	0,5	0,89	563	869	1432	1790	15,8	20	0,784
Februar	1,1	0,86	568	842	1410	1763	15,5		0,762
März	3,7	0,81	645	726	1371	1714	15,1		0,699
April	7,3	0,72	736	566	1302	1628	14,3		0,551
Mai	12,2	0,68	966	347	1313	1641	14,4		0,282
Juni	15,5	0,70	1231	200	1431	1789	15,8		0,067
Juli	16,8	0,73	1395	143	1538	1923	16,9		0,031
August	16,6	0,77	1453	151	1604	2005	17,5		0,265
September	13,5	0,79	1221	290	1511	1889	16,6		0,477
Oktober	9,7	0,84	1010	459	1469	1836	16,2		0,631
November	5,1	0,88	773	664	1437	1796	15,8		0,718
Dezember	1,9	0,90	630	806	1436	1795	15,8		0,768

Nach dieser Berechnung ist der Januar mit $f_{Rsi,max} = 0,784$ der kritische Monat. Bei gegebenem Aufbau beträgt der Bemessungstemperaturfaktor f_{Rsi} für dieses Bauteil:

$$\begin{aligned}
 f_{Rsi} &= (U^{-1} - R_{si}) / U^{-1} \\
 &= (0,334^{-1} - 0,25) / 0,334^{-1} = 0,917
 \end{aligned}$$

¹² Schichtaufbau gemäß Abschnitt 4.2.1

Die Außenwand wurde so bemessen, dass der Temperaturfaktor im kritischen Monat überschritten wird:

$$f_{Rsi} = 0,917 > f_{Rsi,max} = 0,784$$

Der Nachweis zur Vermeidung der kritischen Oberflächenfeuchte ist für dieses Bauteil gemäß DIN EN ISO 13788 erbracht.

5.2.3 Beispielberechnung Leichtbauweise

Hierfür soll die Berechnung der Außenwand mit dem unter Abschnitt 4.2.3 angegebenen Schichtaufbau durchgeführt werden. Für die Beurteilung bezüglich der Oberflächenfeuchte sollen wiederum die raumseitigen Luftfeuchteklassen angewandt werden. Die Berechnung erfolgt in Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2 Leichtbauweise¹³, Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungstemperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen

$\theta_{e,Mittel}$ [°C]	φ_e	p_e [Pa]	θ_i [°C]	Δp [Pa]	$p_{sat}(\theta_{si})$ [Pa]	$\theta_{si,min}$ [°C]	$f_{Rsi,min}$
8,6	0,95	1061	20	462	1523	13,3	0,412

Der Wärmedurchlasskoeffizient der Leichtbauwand beträgt gemäß der DÄMMWERK-Berechnung $U = 0,428 W / (m^2 \cdot K)$. Demnach ergibt sich für diese Wand ein Bemessungstemperaturfaktor von

$$f_{Rsi} = (U^{-1} - R_{si}) / U^{-1} = (0,428^{-1} - 0,25) / 0,428^{-1} = 0,893.$$

¹³ Schichtaufbau gemäß Abschnitt 4.2.3

Für die Konstruktion besteht gemäß DIN EN ISO 13788 keine Gefahr des Schimmelbefalls, da die Bedingung

$$f_{Rsi} = 0,893 > f_{Rsi,max} = 0,412$$

eingehalten wird.

5.2.4 Verfahrensanalyse

In diesem Abschnitt soll genauer auf die unter Abschnitt 5.2.1 genannten Einflussgrößen zur Gefahr der Schimmelbildung aufgrund kritischer Oberflächenfeuchte eingegangen werden.

5.2.4.1 Wärmebrücken¹⁴

Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Stellen in Außenbauteilen, die im Gegensatz zu den angrenzenden Bauteilbereichen eine höhere Wärmestromdichte bzw. einen höheren Wärmefluss aufweisen. Es tritt nicht nur ein erhöhter Wärmeverlust ein, sondern die Oberflächentemperaturen in dem betreffenden Bereich des Bauteiles verringern sich. Entscheidend bei Wärmebrücken ist die Möglichkeit zur Bildung von Tauwasser, welches bei einem starken Absinken der Oberflächentemperatur unter die Taupunkttemperatur entstehen kann.

Das Heiz- und Lüftungsverhalten der Bewohner spielt hierbei eine entscheidende Rolle. In den Wintermonaten können Außenwandecken, Wand- und Decken-Zusammenschnitte sowie Fußleistenbereiche stark auskühlen, wenn bei tiefen Außentemperaturen auf das Heizen während der Nacht oder tagsüber verzichtet wird. Hierbei sind die kältesten Bereiche einer Wand am stärksten betroffen. Häufig werden Räume bei Anwesenheit intensiv beheizt, jedoch nicht vollständig durchgewärmt. Bei Abstellen der Heizung kühlen die Wände umso schneller aus.

Weiterhin muss erwähnt werden, dass in einem Wohnraum die Oberflächentemperaturen zwischen einer Außenwand und einer Außenwandecke variieren. Den kältesten Punkt im Raum bilden oft Außenwandecken, wo sich Tauwasser an der Oberfläche bilden kann, wenn die Oberflächentemperatur in diesem Bereich stärker als die Taupunkttemperatur absinkt.

¹⁴ Michael Könecke (Hrsg. Fraunhofer Verlag): Schimmel im Haus, Abschnitt 2.2, Seite 33ff

Die DIN EN ISO 13788 berücksichtigt diesen ungünstigsten Fall der Gefahr der Tauwasserbildung in einer Raumecke mit einem Wärmeübergangswiderstand an raumseitigen Oberflächen von $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$. Verglasungen und Rahmen werden dagegen nur mit einem Wärmeübergangswiderstand von $R_{Si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ berechnet, da durch die heute verwendeten Isolierverglasungen bei Fenstern die Verglasungen nicht mehr den kältesten Punkt im Raum darstellen.

5.2.4.2 Wärmedurchlasswiderstand¹⁵

Wie unter Abschnitt 5.2.4.1 beschrieben, stellt sich bei einer Wärmebrücke immer eine erhöhte Wärmestromdichte ein. Durch die herabgesetzte Temperatur der Innenoberfläche besteht eine erhöhte Gefahr der Tau- und Kondenswasserbildung. Es kommt zur Tauwasserbildung, wenn die raumseitige Oberflächentemperatur eines Außenbauteiles bis unter die Taupunkttemperatur sinkt. Um dies zu vermeiden, wird für ein Bauteil ein bestimmter Wärmedurchgangskoeffizient U erforderlich, der sich in dem Temperaturfaktor $f_{R_{Si}}$ widerspiegelt.

Der Kehrwert von U ist der Wärmedurchlasswiderstand R'_{T} , welcher durch den Ansatz des raumseitigen Wärmeübergangswiderstand $R_{Si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ vergrößert wird. Ein hoher Wärmedurchlasswiderstand eines Bauteils, wirkt sich demnach positiv auf die unter Abschnitt 5.2.1 beschriebene wärmeschutztechnische Güte einer Konstruktion aus.

5.2.4.3 Lüftungsverhalten

Auch das Lüftungsverhalten ist stark nutzerabhängig. So können lüftungstechnisch bedingte Wärmebrücken ebenfalls Schimmelbefall auf raumseitigen Bauteiloberflächen hervorrufen, wenn bestimmte Bereiche einer Innenwand¹⁶ schlecht oder überhaupt nicht belüftet werden, was erfahrungsgemäß bei kaltem Wetter häufig der Fall ist. Aufgrund dieser Tatsache kühlen solche Bereiche in den Wintermonaten stärker ab als andere Wandbauteile.

Nach DIN EN ISO 13788 kann bei bekannter Beziehung zwischen Luftwechselrate und Temperatur die Berechnung zur Beurteilung eines Bauteils bezüglich der Oberflächenfeuchte unter Anwendung einer veränderlichen Luftwechselrate durchgeführt werden.¹⁷

¹⁵ Michael Könecke (Hrsg. Fraunhofer Verlag): Schimmel im Haus, Abschnitt 2.2, Seite 33ff

¹⁶ z. B. durch dicke Vorhänge oder Einbauschränke

¹⁷ unter Verwendung von Gleichung (3.69)

5.2.4.4 Raumseitige Feuchtezufuhr

Nach DIN EN ISO 13788 erfolgt abhängig von der Gebäudenutzung eine Einteilung in raumseitige Luftfeuchteklassen, welche aufgrund von Messwerten in Westeuropa abgeleitet wurden. Demnach ist die Verwendung dieser Luftfeuchteklassen für Berechnungen von Bauteilen beispielsweise in Moskau oder Warschau ungenau.¹⁸ Die Norm legt dafür fest, dass in diesen Fällen Messwerte angewendet werden dürfen. Dies setzt natürlich voraus, dass diese auch bekannt sind.

Der angesetzte Sicherheitsspielraum von 10% bzw. 5% soll lediglich die instationären Schwankungen ausgleichen. Das Verfahren berücksichtigt jedoch nicht das Lüftungsverhalten der Nutzer, welches wie in Abschnitt 5.2.4.3 beschrieben eine maßgebliche Wirkung auf die Tauwasserbildung an Bauteiloberflächen haben kann. Beim Lüften wird die feuchte Luft im Raum gegen Frischluft ausgetauscht. „Die zugeführte kalte Außenluft kann nach der Erwärmung auf Zimmertemperatur den Wasserdampf aus der Raumluft aufnehmen.“¹⁹ Durch wiederholtes Lüften²⁰ wird die Feuchtigkeit wieder ins Freie abgegeben.

5.2.4.5 Raumseitige Lufttemperatur

Die Raumtemperatur wird entsprechend der erwartenden Gebäudenutzung angewandt. Für Wohnhäuser wird in Deutschland von 20°C ausgegangen. Allerdings ist auch dieser Wert, wie bereits erwähnt, nutzerabhängig.

5.2.4.6 Raumseitige relative Luftfeuchte

Für massive Bauteilkonstruktionen legt die Norm fest, dass das Risiko eines Schimmelbefalls besteht, wenn über mehrere Tage 80% Luftfeuchtigkeit vorherrschen. Dieses Kriterium wurde gewählt und kann je nach Erfordernis, z. B. bei Vermeidung von Korrosion, strenger gewählt werden. Dies setzt jedoch voraus, dass dieses Risiko abgeschätzt werden kann.

Für Leichtbaukonstruktionen besteht nach DIN EN ISO 13788 erst ab 100% relativer Luftfeuchte Gefahr der Schimmelbildung auf Oberflächen. Dabei geht man von einer undurchlässigen

¹⁸ Vgl. auch die Einteilung der Klimazonen in Europa, Abschnitt 4.3.3, Tabelle 4-33

¹⁹ Michael Könecke (Hrsg. Fraunhofer Verlag): Schimmel im Haus, Abschnitt 2.1.2, Seite 18

²⁰ regelmäßige Stoßlüftung

Oberflächenbehandlung aus.²¹ In der Praxis könnte dies aber durchaus fatale Auswirkungen haben, da es zu Ausführungsfehlern baulicher Anlagen kommen kann.

5.3 Feuchteumverteilung in der flüssigen Phase

In dem in der DIN EN ISO 13788 beschriebenen Verfahren wurde bisher davon ausgegangen, dass das an einer Grenzfläche auftretende Tauwasser auch an dieser Grenzfläche verbleibt. Aufgrund der Kapillarleitung kann das angefallene Tauwasser jedoch in die Schichten auf jeder Seite der Grenzfläche wandern.²²

„Baustoffschichten in Baukonstruktionen können bei Wasserkontakt je nach ihrer kapillaren Charakteristik Feuchtigkeit aufnehmen und mehr oder weniger schnell weiterleiten. Diese Eigenschaft beeinflusst den Feuchtigkeitshaushalt eines Bauteiles wesentlich. Sie wird durch die Kapillarstruktur eines Baustoffes bestimmt.“²³

Nach dem in DIN EN ISO 13788 beschriebenen Berechnungsverfahren kann dieser Feuchtetransport auf der Grundlage eines kritischen Feuchtegehaltes berücksichtigt werden. In Tabelle 5-3 sind typische Werte des kritischen Feuchtegehaltes einiger Baustoffe aufgelistet, bei deren Überschreitung kapillarer Wassertransport beginnt. Unterhalb der angegebenen Feuchtegehalte findet nur eine reine Dampfdiffusion statt.

Tabelle 5-3 Typische Werte des kritischen Feuchtegehaltes²⁴

Stoff	Kritischer Feuchtegehalt w_{cr} [kg/m ³]
Dampfgehärteter Porenbeton	120
Ziegel	60 bis 130
Zementmörtel	180
Beton	125
Kalksandstein	80 bis 110

²¹ Bei Leichtbauweisen wird bezüglich der kritischen Oberflächentemperatur durch Ansatz einer mittleren jährlichen Mindesttemperatur ein vereinfachter Nachweis geführt, der das Bauteil insgesamt „lockerer“ einschätzt.

²² DIN EN ISO 13788, Anhang F.2, Seite 29

²³ Horst Arndt: Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, Verlag für Bauwesen Berlin, Abschnitt 5.2.3, Seite 33f

²⁴ DIN EN ISO 13788, Anhang F.2, Tabelle F.1

Ist die akkumulierte Tauwassermenge M_a , die an einer Grenzebene auftritt, bekannt, so wird die Dicke d_w , über welche die Feuchtigkeit verteilt wird, nach Gleichung (5.1) berechnet.

$$d_w = \frac{M_a}{w_{cr}} \quad [m] \quad (5.1)$$

In der Zone mit der Dicke d_w wird dann die unter Abschnitt 3.4.2.3 beschriebene Berechnung mit einer relativen Luftfeuchte von 100% durchgeführt.

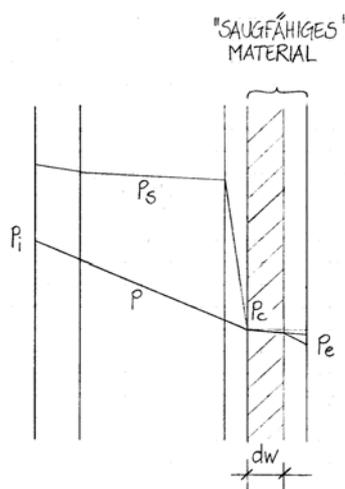


Bild 5-1 Berücksichtigung des Feuchtetransports in der flüssigen Phase

6 DÄMMWERK-Programm

In diesem Abschnitt soll die Bauphysiksoftware DÄMMWERK 5.10 bezüglich der Berechnungen zum Feuchteschutz beurteilt werden.

Mit dem Programm lassen sich Bauteilkonstruktionen hinsichtlich der Tauwassergefahr im Bauteilinneren berechnen. Dabei kann zwischen den in Abschnitt 3 beschriebenen Berechnungsverfahren gewählt werden. Die DIN EN ISO 13788 hat zwar seit November 2001 Gültigkeit, jedoch setzt sich dieses Verfahren in der Praxis nur schwer durch. Deshalb bietet DÄMMWERK die Möglichkeit die Berechnungsgrundlage zu wählen.

Leider hat das Verfahren nach DIN 4108-3 auch bei DÄMMWERK immer noch Vorrang, das heißt nur für diese Nachweismethode erscheinen weitestgehend alle Formelhintergründe auf der Benutzeroberfläche.²⁵ Anhand der Diffusionsdiagramme kann man einen sehr guten graphischen Überblick über die Tauwassersituation im Bauteil erhalten.

Auch für die Berechnung nach DIN EN ISO 13788 wird ein Diffusionsdiagramm erstellt. Die Tauwassermengen werden in farbigen „50 Gramm-Päckchen“ neben der Tauzone gezeichnet, wobei die Darstellung für jeden Monat in einem Diagramm durchgeführt wird. Durch die zusätzliche Eintragung der Dampfteildruckverläufe wird die graphische Darstellung jedoch äußerst unübersichtlich. Die Sättigungsdampfdruckverläufe werden leider nicht bildlich dargestellt, aber für jede relevante Querschnittsposition und den dazugehörigen Monat aufgelistet. Der Ort des Tauwasserausfalls ist dabei durch Unterstreichung der betreffenden Sättigungsdampfdrücke kenntlich gemacht.

Wie in Abschnitt 4.1.5.3 erwähnt, weist DÄMMWERK zur Zeit noch einen Programmfehler auf: Fällt während der Verdunstungsperiode erneut Tauwasser aus, wird die Akkumulation der Tauwassermengen gemäß Normvorschrift für beide Grenzebenen durchgeführt. Vom Programm wird aber nur eine Akkumulation für beide Grenzebenen zusammen durchgeführt. Dieser Fehler war der Firma KERN bisher nicht bekannt; er wird gerade überarbeitet.²⁶

²⁵ Für die Verfahren nach Jenisch und DIN EN ISO 13788 können im Menüpunkt ‚Handbuch‘ Formeln und Erklärungen eingesehen werden.

²⁶ Circa alle zwei Wochen steht ein aktuelles Up-Date zur Verfügung, welches direkt aus dem Internet herunterzuladen ist.

Bei dem Verfahren nach Jenisch sind lediglich die Klimarandbedingungen für jeden Monat sowie die Tautemperatur und die daraus resultierende Tauwasser- oder Verdunstungsmenge ersichtlich.

Die vom Programm gebrauchten Klimadaten weichen geringfügig von denen in Abschnitt 4 verwendeten ab.²⁷ Sie können für verschiedene Standorte (in Deutschland, Europa oder Weltweit) je nach Gebäudenutzung gewählt werden.

Für die Berechnung der Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte stehen die in der Normvorschrift dargelegten Vorgehensweisen zur Verfügung.²⁸

Abschließend kann man sagen, dass es sich bei dem DÄMMWERK-Programm um ein sehr anwenderfreundliches und übersichtliches Programm handelt.

²⁷ In der DIN EN ISO 13788 sind hierfür keine Bezugsquellen angegeben; die Klimadaten weichen aufgrund unterschiedlich verwendeter Messperioden voneinander ab.

²⁸ Siehe Abschnitt 5.2

7 Literaturverzeichnis

- [1] H. Glaser, Wasserdampfdiffusion durch hygroskopische Baustoffe im Hinblick auf die DIN 4108, Gesundheitsingenieur, 107. Jahrgang Heft 2, 1986
- [2] Prof. Dr.-Ing. H.-P. Leimer, Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/ Holzminden / Göttingen, Feuchteschutz 1, 2002
- [3] Karl Seiffert, Wasserdampfdiffusion im Bauwesen, Bauverlag GmbH, 1967
- [4] DIN 4108-3: 2001-07, Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [5] R. Käser, Grenzen der Standard-Verfahren in der Praxis, WTA-Schriftenreihe, Heft Nr. 18, Hrsg. H. M. Künzel, AEDIFICATIO Verlag, 1999
- [6] H. Glaser, Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, Kältetechnik, 11. Jahrgang, Heft 10, 1959
- [7] H. Glaser, Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis, Kältetechnik Heft 10, 1958
- [8] DIN EN ISO 6946:1997-11, Bauteile, Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Berechnungsverfahren
- [9] Prof. Dr.-Ing. H.-P. Leimer, Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/ Holzminden / Göttingen, Wärmeschutz, 2002
- [10] Fr. Eichler u. H. Arndt, Bautechnischer Wärme- und Feuchtigkeitsschutz, 2.Auflage, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1989
- [11] W. Caemmerer: Berechnungen der Wasserdampfdurchlässigkeit und Bemessung des Feuchtigkeitsschutzes von Bauteilen, Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin, 1968
- [12] Jürgen A. Stein: Physik für Bauingenieure, Band 2: Wärme und Feuchte, AVH-Verlag Hamburg, 1997
- [13] Prof. Dr.-Ing. H.-P. Leimer, Vorlesungsskript zur Bauphysik, FH Hildesheim/ Holzminden / Göttingen, Feuchteschutz 2, 2002
- [14] R. Jenisch, Berechnung der Feuchtigkeitskondensation in Außenbauteilen und die Austrocknung abhängig vom Außenklima, Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang Heft 9, 1971
- [15] Karl Moritz, Richtig und Falsch im Wärmeschutz-Feuchtigkeitsschutz-Bautenschutz, Bauverlag GmbH Wiesbaden – Berlin, 1965
- [16] R. Jenisch und W. Schüle, Untersuchungsbericht verschiedener Verfahren des klimabedingten Feuchtigkeitsschutzes, Institut für Bauphysik Stuttgart, Heft 102, 1975

- [17] DIN EN ISO 13788:2001-11, Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren, Berechnungsverfahren
- [18] Horst Arndt, Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, Verlag für Bauwesen Berlin, 1996
- [19] Michael Könecke, Schimmel im Haus, Fraunhofer IRB Verlag, 2002
- [20] H. M. Künzel: Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis?, IBP-Mitteilung Fraunhofer Institut, Nr. 26, 1999
- [21] Deutscher Wetterdienst: www.deutscher-wetterdienst.de
- [22] DÄMMWERK: www.bauphysik-software.de

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1	Massivbauweise, Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungstemperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen.....	132
Tabelle 5-2	Leichtbauweise, Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungstemperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen	133
Tabelle 5-3	Typische Werte des kritischen Feuchtegehaltes.....	137
Tabelle 5-1	Massivbauweise, Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungstemperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen.....	132
Tabelle 5-2	Leichtbauweise, Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungstemperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen	133
Tabelle 5-3	Typische Werte des kritischen Feuchtegehaltes.....	137
Tabelle 5-1	Massivbauweise, Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungs- temperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen.....	132
Tabelle 5-2	Leichtbauweise, Standort Hamburg. Berechnung des Bemessungs- temperaturfaktors anhand der raumseitigen Luftfeuchteklassen	133
Tabelle 5-3	Typische Werte des kritischen Feuchtegehaltes	137

9 Abbildungsverzeichnis

Bild 3-1	Kühlraumwand. Dampfdruckverlauf in einer mehrschichtigen Wand. Keine Feuchtigkeitsausscheidung.	16
Bild 3-2	Kühlraumwand. Dampfdruckverlauf in einer mehrschichtigen Wand abhängig vom ... spezifischen Diffusionswiderstand.	18
Bild 3-3	Temperatur- und Dampfdruckverlauf in einer Kühlraumwand.....	20
Bild 3-4	Berücksichtigung der Übergangswiderstände.....	24
Bild 3-5	Ermittlung des spezifischen Diffusionswiderstandes einer Sperrschicht.....	25
Bild 3-6	Temperaturverteilung über den Querschnitt eines mehrschichtigen Bauteils.....	32
Bild 3-7	Diffusionsdiagramme (Kondensationsperiode).....	36
Bild 3-8	Diffusionsdiagramme (Verdunstungsperiode)	38
Bild 3-9	Veränderung der raumseitigen Luftfeuchteklassen in Abhängigkeit der..... Außentemperatur.....	58
Bild 3-10	Temperaturverteilung in einem mehrschichtigen Bauteil	65

Bild 3-11	Wasserdampfdiffusion in einem mehrschichtigen Bauteil ohne Tauwasserbildung im Bauteilinneren	66
Bild 3-12	Wasserdampfdiffusion mit Tauwasserbildung im Bauteilinneren in einer Grenzzebene	66
Bild 3-13	Wasserdampfdiffusion mit Tauwasserbildung in zwei Grenzebenen	68
Bild 3-14	Verdunstung an einer Grenzfläche innerhalb eines Bauteiles	68
Bild 3-15	Verdunstung an einem Bauteil mit Tauwasserbildung in zwei Grenzflächen	69
Bild 3-16	Verdunstung an einer Grenzfläche und Tauwasserbildung an einer anderen Grenzfläche in einem Bauteil, bei dem Tauwasserbildung an zwei Grenzflächen aufgetreten ist	70
Bild 4-1	Schichtaufbau Außenwand	73
Bild 4-2	Diffusionsdiagramm in der Tauperiode.....	74
Bild 4-3	Diffusionsdiagramm in der Verdunstungsperiode.....	75
Bild 4-4	Diffusionsdiagramm für Dezember (DIN EN ISO 13788)	81
Bild 4-5	Diffusionsdiagramm für November (DIN EN ISO 13788)	83
Bild 4-6	Diffusionsdiagramm für April (DIN EN ISO 13788).....	85
Bild 4-7	Diffusionsdiagramm für März (DIN EN ISO 13788).....	87
Bild 4-8	Diffusionsdiagramm für Februar (DIN EN ISO 13788)	89
Bild 4-9	Diffusionsdiagramm für Januar (DIN EN ISO 13788).....	91
Bild 4-10	Diffusionsdiagramm für Januar (<i>Jenisch</i>)	94
Bild 4-11	Diffusionsdiagramm für Februar (<i>Jenisch</i>).....	95
Bild 4-12	Diffusionsdiagramm für März (<i>Jenisch</i>)	96
Bild 4-13	Diffusionsdiagramm für November (<i>Jenisch</i>).....	97
Bild 4-14	Diffusionsdiagramm für Dezember (<i>Jenisch</i>).....	98
Bild 4-15	Schichtaufbau Außenwand mit Innendämmung	103
Bild 4-16	Diffusionsdiagramm Außenwand mit Innendämmung (DIN 4108-3).....	104
Bild 4-17	Schichtaufbau einer Außenwand in Leichtbauweise.....	106
Bild 4-18	Schichtaufbau Geschossdecke unter belüftetem Dachraum	107
Bild 4-19	Diffusionsdiagramm Geschossdecke an belüfteten Dachraum (DIN 4108-3)	108
Bild 4-20	Schichtaufbau Flachdach	109
Bild 4-21	Schichtaufbau Steildach	112
Bild 4-22	Steildach. Diffusionsdiagramm Verdunstungsperiode (DIN 4108-3).....	113
Bild 4-23	Schichtaufbau Sohlplatte	114
Bild 4-24	Steildach. Erneuter Tauwasserausfall in der Verdunstungsperiode. Einfluss der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken auf die Tauwassermenge.....	127
Bild 5-1	Berücksichtigung des Feuchtetransports in der flüssigen Phase	138

INHALTSVERZEICHNIS

1	AUßENWAND, EINSCHALIG	3
1.1	Berechnung nach DIN 4108-3	3
1.2	Berechnung nach Jenisch	5
1.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	6
2	AUßENWAND MIT INNENDÄMMUNG	7
2.1	Berechnung nach DIN 4108-3	7
2.2	Berechnung nach Jenisch	9
2.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	10
3	AUßENWAND, LEICHTBAUWEISE	11
3.1	Berechnung nach DIN 4108-3	11
3.2	Berechnung nach Jenisch	13
3.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	14
4	GESCHOSSDECKE UNTER BELÜFTETEM DACHRAUM	15
4.1	Berechnung nach DIN 4108-3	15
4.2	Berechnung nach Jenisch	17
4.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	18
5	FLACHDACH (GRENZT WOHNRAUM GEGEN AUßENLUFT AB)	19
5.1	Berechnung nach DIN 4108-3	19
5.2	Berechnung nach Jenisch	21
5.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	22
6	STEILDACH (GRENZT WOHNRAUM GEGEN AUßENLUFT AB)	23
6.1	Berechnung nach DIN 4108-3	23
6.2	Berechnung nach Jenisch	26
6.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	27
7	SOHLPLATTE AN ERDREICH	28
7.1	Berechnung nach DIN 4108-3	28

7.2	Berechnung nach Jenisch	30
7.3	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	31
8	AUßENWAND STANDORT DRESDEN	32
8.1	Berechnung nach Jenisch	32
8.2	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	33
9	FLACHDACH STANDORT BERLIN	34
9.1	Berechnung nach Jenisch	34
9.2	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	35
10	FLACHDACH STANDORT KARLSRUHE	36
10.1	Berechnung nach Jenisch	36
10.2	Berechnung nach DIN EN ISO 13788	37
11	AUßENWAND FÜR EUROPÄISCHE STANDORTE.....	38
11.1	Moskau.....	38
11.2	London	39
11.3	Athen	40
12	AUßENWAND MIT INNENDÄMMUNG FÜR EUROPÄISCHE STANDORTE.....	41
12.1	Moskau.....	41
12.2	London	42
12.3	Athen	43

Im Anhang befinden sich alle mit dem DÄMMWERK-Programm durchgeführten Berechnungen. Die Ausdrücke beschränken sich jedoch auf die für die Tauwassernachweise nötigen Randbedingungen und Ergebnisse, da der Ausdruck sonst zu umfangreich werden würde.

1 AUßENWAND, EINSCHALIG

1.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Bauteilquerschnitt

Bauteil Außenwand, einschalig

Bauteiltyp Außenwand (Neubau)

Querschnitt

von innen	s [cm]	ρ [kg/m ³]	[kg/m ²]	λ_R [W/mK]	R [m ² K/W]
R_{si}					0,13
01 Putzmörtel aus Kalkgips	1,500	1400	21,0	0,700	0,02
02 KS-MW -2,0 NM/DM	17,500	2000	350,0	1,100	0,16
03 Mineralfaser 040	10,000	20	2,0	0,040	2,50
04 Kalkzementputz	1,500	1800	27,0	0,870	0,02
R_{se}					0,04
$d = 30,500$				$G = 400,0$	
				$R_T = 2,87$	

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Bauteil Außenwand, einschalig

Klimabedingungen Normklimadaten DIN 4108

Tauperiode 1440 Stunden	Außenklima	-10,0 °C	$\varphi = 80 \%$
	Innenklima	20,0 °C	$\varphi = 50 \%$
Verdunstungsperiode 2160 Stunden	Außenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$
	Innenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$

Grenzschichttemperaturen und Sättigungsdampfdrücke

von innen vor der Schichtgrenze	Tauperiode		
	T _{gr} [°C]	p _s [Pa]	p _d [Pa]
Raumluft	20,0	2340	1170
1 Putzmörtel aus Kalkgips	18,6	2145	1170
2 KS-MW -2,0 NM/DM	18,4	2119	1123
3 Mineralfaser 040	16,8	1914	305
4 Kalkzementputz	-9,4	274	274
	-9,6	269	208
Außenluft	-10,0	260	208

Diffusionswiderstände

Schicht	μ _{min}	μ _{max}	μ _{min} *s	μ _{max} *s	s _d
	[-]	[-]	[m]	[m]	
1 Putzmörtel aus Kalkgips	10	10	0,15	0,15	0,15
2 KS-MW -2,0 NM/DM	15	25	2,63	4,38	-> 2,63
3 Mineralfaser 040	1	1	0,10	0,10	0,10
4 Kalkzementputz	15	35	0,22	0,53	<- 0,53

				Σ μ*s =	3,41

Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen (A.2)

Taubene vor Schicht "Kalkzementputz"

$$m_{W,T} = 1440 * \left(\frac{1170 - 274}{2,88} - \frac{274 - 208}{0,52} \right) / 1500 = 178,5 \text{ g/m}^2 \text{ Tauwasser}$$

$$m_{W,V} = 2160 * \left(\frac{1403 - 982}{2,88} + \frac{1403 - 982}{0,52} \right) / 1500 = 1365,6 \text{ g/m}^2 \text{ Verdunstung}$$

Die Tauwasserbildung im Bauteil ist im Sinne von DIN 4108-3 unschädlich, da $m_{W,T} < \text{zul } m_{W,T}$ und $m_{W,V} > m_{W,T}$

1.2 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Hamburg φ_e Hamburg

Betrachtungspunkt bei $s_d = 2,88$ m (vor Kalkzementputz)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	0,9	51	86
Februar	672	20,0	60	1,1	86	1,5	16	103
März	744	20,0	59	3,7	81	4,0	-59	43
April	720	20,0	56	7,3	72	7,6	-238	0
Mai	744	20,0	56	12,2	68	12,4	-470	0
Juni	720	20,0	61	15,5	70	15,6	-551	0
Juli	744	20,0	66	16,8	73	16,9	-565	0
August	744	20,0	69	16,6	77	16,7	-471	0
September	720	20,0	65	13,5	79	13,6	-314	0
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	9,9	-152	0
November	720	20,0	62	5,1	88	5,4	-20	0
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	2,3	36	36
						$\Sigma =$	-2738	

1.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Hamburg

Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für manuell

p_{sat} nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	1,9	0,5	1,1	3,7	7,3	12,2	15,5	16,8	16,6	13,5	9,7	5,1
φ_i	61	61	60	59	56	56	61	66	69	65	63	62
φ_e	90	89	86	81	72	68	70	73	77	79	84	88

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck p_{sat} in [Pa]

0,15	2315	2313	2314	2317	2321	2326	2330	2332	2331	2328	2324	2318
2,77	2166	2153	2159	2182	2215	2261	2292	2305	2303	2273	2238	2195
2,78	1968	1942	1953	2002	2072	2170	2239	2266	2262	2197	2120	2029
2,79	1786	1749	1765	1835	1937	2083	2187	2229	2222	2123	2007	1874
2,80	1619	1573	1593	1681	1809	1998	2135	2192	2183	2051	1900	1730
2,81	1466	1413	1435	1537	1689	1917	2085	2155	2144	1982	1798	1595
2,82	1326	1267	1292	1405	1576	1839	2036	2119	2106	1914	1700	1470
2,83	1198	1135	1161	1283	1470	1763	1988	2083	2069	1849	1608	1353
2,84	1080	1015	1042	1170	1370	1690	1941	2048	2032	1785	1520	1245
2,85	973	906	934	1066	1276	1620	1895	2014	1995	1724	1436	1144
2,86	876	808	836	971	1188	1552	1850	1980	1959	1664	1356	1051
2,87	787	719	747	883	1105	1487	1806	1947	1924	1606	1280	964
2,88	<u>706</u>	<u>639</u>	<u>667</u>	<u>802</u>	1028	1424	1762	1914	1890	1550	1208	884
3,40	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546	1202	878

Tauwasserbildung bei $s_d = 2,88\text{m}$ "Mineralfaser 040 - Kalkzementputz"

Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c 52 64 31 -54 -297

M_a 52 117 147 93

	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

2 AUßENWAND MIT INNENDÄMMUNG

2.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Bauteilquerschnitt

Bauteil Außenwand mit Innendämmung

Bauteiltyp Außenwand

Querschnitt

von innen	s [cm]	ρ [kg/m ³]	[kg/m ²]	λ_R [W/mK]	R [m ² K/W]
R _{si}					0,13
01 Kalkzementputz	1,500	1800	27,0	0,870	0,02
02 Mehrschicht-Lbpl Mf 040	4,000	50	2,0	0,040	1,00
03 Gipsputz	1,500	1200	18,0	0,350	0,04
04 KS-MW -1,8 NM/DM	24,000	1800	432,0	0,990	0,24
05 Gipsputz	1,500	1200	18,0	0,350	0,04
R _{se}					0,04
d = 32,500		G = 497,0		R _T = 1,52	

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Klimabedingungen Normklima DIN 4108

Tauperiode 1440 Stunden	Außenklima	-10,0 °C	$\varphi = 80 \%$
	Innenklima	20,0 °C	$\varphi = 50 \%$
Verdunstungsperiode 2160 Stunden	Außenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$
	Innenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$

Grenzschichttemperaturen und Sättigungsdampfdrücke

von innen vor der Schichtgrenze	T _{gr} [°C]	Tauperiode	
		ps [Pa]	pd [Pa]
Raumluft	20,0	2340	1170
1 Kalkzementputz	17,4	1988	1170
2 Mehrschicht-Lbpl Mf 040	17,1	1950	592
3 Gipsputz	-2,7	489	489
4 KS-MW -1,8 NM/DM	-3,6	452	452
5 Gipsputz	-8,4	298	214
	-9,2	279	208
Außenluft	-10,0	260	208

Diffusionswiderstände

Schicht	μ_{\min} [-]	μ_{\max} [-]	$\mu_{\min} \cdot s$ [m]	$\mu_{\max} \cdot s$ [m]		sd [m]
1 Kalkzementputz	15	35	0,22	0,53	->	0,22
2 Mehrschicht-Lbpl Mf 040	1	1	0,04	0,04		0,04
3 Gipsputz	10	10	0,15	0,15		0,15
4 KS-MW -1,8 NM/DM	15	25	3,60	6,00	<-	6,00
5 Gipsputz	10	10	0,15	0,15		0,15
				$\Sigma \mu \cdot s =$		6,57

Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2001

Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen (A.2)

Taubereich "Gipsputz - KS-MW -1,8 NM/DM"

$$m_{W,T} = 1440 \cdot \left(\frac{1170 - 489}{0,26} - \frac{452 - 208}{6,15} \right) / 1500 = 2428,9 \text{ g/m}^2 \text{ Tauwasser}$$

$$m_{W,V} = 2160 \cdot \left(\frac{1403 - 982}{0,34} + \frac{1403 - 982}{6,23} \right) / 1500 = 1880,0 \text{ g/m}^2 \text{ Verdunstung}$$

Die Tauwassermasse ist zu groß und die Verdunstungsrate zu klein.
Nicht zulässig!

2.2 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Hamburg φ_e Hamburg

Betrachtungspunkt bei $s_d = 0,26$ m (vor Gipsputz)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	5,2	992	2836
Februar	672	20,0	60	1,1	86	5,7	806	3642
März	744	20,0	59	3,7	81	7,7	583	4225
April	720	20,0	56	7,3	72	10,4	48	4273
Mai	744	20,0	56	12,2	68	14,1	-611	3661
Juni	720	20,0	61	15,5	70	16,6	-886	2775
Juli	744	20,0	66	16,8	73	17,6	-928	1848
August	744	20,0	69	16,6	77	17,4	-741	1107
September	720	20,0	65	13,5	79	15,1	-393	714
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	12,2	65	779
November	720	20,0	62	5,1	88	8,7	563	1343
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	6,3	859	2201

$\Sigma = 357$

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 714 g/m²

Betrachtungspunkt bei $s_d = 0,42$ m (vor KS-MW -1,8 NM/DM)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	4,7	662	2134
Februar	672	20,0	60	1,1	86	5,2	538	2673
März	744	20,0	59	3,7	81	7,2	406	3079
April	720	20,0	56	7,3	72	10,0	57	3136
Mai	744	20,0	56	12,2	68	13,9	-382	2754
Juni	720	20,0	61	15,5	70	16,5	-571	2182
Juli	744	20,0	66	16,8	73	17,5	-594	1588
August	744	20,0	69	16,6	77	17,3	-474	1114
September	720	20,0	65	13,5	79	14,9	-238	876
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	11,9	65	941
November	720	20,0	62	5,1	88	8,3	385	1326
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	5,8	584	1910

$\Sigma = 438$

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 876 g/m²

2.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Hamburg

Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum

$psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	9,7	5,1	1,9	0,5	1,1	3,7	7,3	12,2	15,5	16,8	16,6	13,5
φ_i	63	62	61	61	60	59	56	56	61	66	69	65
φ_e	84	88	90	89	86	81	72	68	70	73	77	79

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]

0,22	2316	2308	2302	2299	2301	2305	2312	2321	2327	2329	2329	2323
0,23	2106	2010	1945	1917	1929	1981	2055	2159	2232	2262	2257	2188
0,24	1912	1745	1637	1592	1611	1697	1823	2008	2141	2196	2187	2059
0,25	1734	1512	1373	1316	1340	1450	1615	1866	2053	2131	2119	1938
0,26	1571	1307	1147	1083	1110	1235	1428	1732	1968	2069	2053	1822
0,27	1421	1127	955	887	916	1048	1260	1608	1887	2008	1989	1713
0,42	1391	1091	918	850	878	1012	1226	1582	1870	1995	1975	1690
6,42	1229	907	730	662	690	825	1051	1443	1775	1923	1900	1567
6,57	1202	878	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546

Tauwasserbildung bei $s_d = 0,27m$ "Mehrschicht-Lbpl Mf 040 - Gipsputz"

Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	66	555	853	980	796	585	56	-420	-933	-1200	-1163	-605
M_a	66	621	1474	2454	3250	3834	3890	3471	2538	1338	175	

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

Anmerkung:

Derzeit liegt bei der Berechnung nach DIN EN ISO 13788 ein Programmfehler vor. DÄMMWERK akkumuliert die Tauwassermengen für beide Grenzebenen mit Tauwasserausfall in verschiedenen Monaten - entgegen den Festlegungen in der Norm – im Gesamten. Die Angabe ‚Tauwasserbildung bei $s_d = 0,27 m \dots$ ‘ ist falsch.

3 AUßENWAND, LEICHTBAUWEISE

3.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Bauteilquerschnitt

Bauteil Holztafelbauart, verputzt, F 30-B

Bauteiltyp Außenwand

Querschnitt

von innen	s [cm]	ρ [kg/m ³]	[kg/m ²]	λ_R [W/mK]	R [m ² K/W]	
R _{si}					0,13	
01 Sperrholz DIN 68705	1,300	800	10,4	0,150	0,09	
02 Ampatex DB 90 Dampfbremse	0,033	-	0,1	-	-	
03 Steinwolle 040 30 kg/cbm	8,000	30	2,4	0,040	2,00	
04 HWL-Putzträger	2,500	360	9,0	0,090	0,28	
05 Kalk-Zementputz	1,500	1800	27,0	0,870	0,02	
R _{se}					0,04	
d =		13,333	G =	48,9	R _T =	2,55

U_{Gefach} = 0,392 W/m²K

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Klimabedingungen Normklima DIN 4108

Tauperiode 1440 Stunden	Außenklima	-10,0 °C	ϕ =	80 %
	Innenklima	20,0 °C	ϕ =	50 %
Verdunstungsperiode 2160 Stunden	Außenklima	12,0 °C	ϕ =	70 %
	Innenklima	12,0 °C	ϕ =	70 %

Grenzschichttemperaturen und Sättigungsdampfdrücke

von innen vor der Schichtgrenze	T _{gr} [°C]	ps [Pa]	pd [Pa]
Raumluft	20,0	2340	1170
1 Sperrholz DIN 68705	18,5	2132	1170
2 Ampatex DB 90 Dampfbremse	17,5	2001	1144
3 Steinwolle 040 30 kg/cbm	17,5	2001	237
4 HWL-Putzträger	-6,1	365	234
5 Kalk-Zementputz	-9,3	276	229
	-9,5	272	208
Außenluft	-10,0	260	208

Diffusionswiderstände

Schicht	μ_{\min} [-]	μ_{\max} [-]	$\mu_{\min} \cdot s$ [m]	$\mu_{\max} \cdot s$ [m]		s_d [m]
1 Sperrholz DIN 68705	50	400	0,65	5,20	->	0,65
2 Ampatex DB 90 Dampfbremse	-	-	23,00	23,00		23,00
3 Steinwolle 040 30 kg/cbm	1	1	0,09	0,09		0,09
4 HWL-Putzträger	2	5	0,05	0,13	<-	0,13
5 Kalk-Zementputz	15	35	0,22	0,53	<-	0,53

				$\Sigma \mu \cdot s =$		24,39

Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2001

Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen (A.2)

Keine Tauwasserbildung im Bauteil.
 Diffusionsstromdichte = 0,026 g/m²h

3.2 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Hamburg φ_e Hamburg

Betrachtungspunkt bei $s_d = 23,74$ m (vor HWL-Putzträger)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	2,9	-129	0
Februar	672	20,0	60	1,1	86	3,5	-138	0
März	744	20,0	59	3,7	81	5,7	-194	0
April	720	20,0	56	7,3	72	8,9	-294	0
Mai	744	20,0	56	12,2	68	13,2	-425	0
Juni	720	20,0	61	15,5	70	16,1	-449	0
Juli	744	20,0	66	16,8	73	17,2	-440	0
August	744	20,0	69	16,6	77	17,0	-375	0
September	720	20,0	65	13,5	79	14,3	-304	0
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	11,0	-227	0
November	720	20,0	62	5,1	88	7,0	-160	0
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	4,2	-136	0
						$\Sigma =$	-3271	

3.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Hamburg

Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum

p_{sat} nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	0,5	1,1	3,7	7,3	12,2	15,5	16,8	16,6	13,5	9,7	5,1	1,9
φ_i	61	60	59	56	56	61	66	69	65	63	62	61
φ_e	89	86	81	72	68	70	73	77	79	84	88	90
Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck p_{sat} in [Pa]												
0,65	2235	2238	2251	2269	2295	2312	2319	2318	2301	2282	2258	2242
24	2235	2238	2251	2269	2295	2312	2319	2318	2301	2282	2258	2242
24	1994	2004	2047	2108	2193	2252	2276	2272	2216	2149	2070	2017
24	1776	1792	1859	1956	2096	2194	2234	2228	2134	2023	1896	1812
24	1580	1599	1687	1814	2002	2137	2193	2184	2054	1904	1735	1626
24	1402	1425	1528	1681	1912	2082	2153	2142	1977	1791	1586	1456
24	1243	1268	1383	1557	1825	2028	2113	2099	1903	1684	1449	1303
24	1099	1126	1250	1441	1742	1975	2073	2058	1831	1582	1322	1163
24	971	999	1129	1333	1662	1923	2035	2017	1761	1486	1205	1037
24	856	884	1018	1232	1586	1872	1997	1977	1694	1395	1097	924
24	753	781	916	1137	1513	1823	1960	1938	1629	1309	997	821
24	694	723	858	1082	1468	1793	1937	1914	1589	1258	939	762
24	640	668	802	1028	1425	1763	1914	1890	1551	1208	884	707
24	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546	1202	878	700
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez

Eine Tauwasserbildung wird für keine Grenzfläche und keinen Monat vorhergesagt. Das Bauteil ist frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren.

4 GESCHOSSDECKE UNTER BELÜFTETEM DACHRAUM

4.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Bauteilquerschnitt

Bauteil Geschoßdecke

Bauteiltyp Decke unter Dachräumen

Querschnitt

von innen	s [cm]	ρ [kg/m ³]	λ_R [W/mK]	R [m ² K/W]
R_{si}				0,13
01 Stahlbeton	14,000	2400	2,100	0,07
02 PE-Folie	0,020	1000	-	-
03 Mineralfaser 035	6,000	30	0,035	1,71
04 PE-Folie	0,020	1000	-	-
05 Zementestrich	4,000	2000	1,400	0,03
R_{se}				0,08
$d = 24,040$		$G = 418,2$		$R_T = 2,02$

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Klimabedingungen Normklima DIN 4108

Tauperiode 1440 Stunden	Außenklima	-10,0 °C	$\varphi = 80 \%$
	Innenklima	20,0 °C	$\varphi = 50 \%$
Verdunstungsperiode 2160 Stunden	Außenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$
	Innenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$

Grenzschichttemperaturen und Sättigungsdampfdrücke

von innen vor der Schichtgrenze	T _{gr} [°C]	ps [Pa]	pd [Pa]
Raumluft	20,0	2340	1170
1 Stahlbeton	18,1	2079	1170
2 PE-Folie	17,1	1950	884
3 Mineralfaser 035	17,1	1950	300
4 PE-Folie	-8,4	298	298
5 Zementestrich	-8,4	298	214
	-8,8	288	208
Außenluft	-10,0	260	208

Diffusionswiderstände

Schicht	μ_{\min} [-]	μ_{\max} [-]	$\mu_{\min} \cdot s$ [m]	$\mu_{\max} \cdot s$ [m]		s_d [m]
1 Stahlbeton	70	150	9,80	21,00	->	9,80
2 PE-Folie	100000	100000	20,00	20,00		20,00
3 Mineralfaser 035	1	1	0,06	0,06		0,06
4 PE-Folie	100000	100000	20,00	20,00		20,00
5 Zementestrich	15	35	0,60	1,40	<-	1,40

				$\Sigma \mu \cdot s =$		51,26

Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2001

Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen (A.2)

Taubene vor Schicht "PE-Folie"

$$m_{W,T} = 1440 \cdot \left(\frac{1170 - 298}{29,86} - \frac{298 - 208}{21,40} \right) / 1500 = 24,0 \text{ g/m}^2 \text{ Tauwasser}$$

$$m_{W,V} = 2160 \cdot \left(\frac{1403 - 982}{29,86} + \frac{1403 - 982}{21,40} \right) / 1500 = 48,6 \text{ g/m}^2 \text{ Verdunstung}$$

Die Tauwasserbildung im Bauteil ist im Sinne von DIN 4108-3 unschädlich, da $m_{W,T} < m_{W,V}$ und $m_{W,V} > m_{W,T}$

4.2 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Hamburg φ_e Hamburg

Betrachtungspunkt bei $s_d = 29,86$ m (vor PE-Folie)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	1,5	10	23
Februar	672	20,0	60	1,1	86	2,1	7	31
März	744	20,0	59	3,7	81	4,6	4	35
April	720	20,0	56	7,3	72	8,0	-4	31
Mai	744	20,0	56	12,2	68	12,6	-14	17
Juni	720	20,0	61	15,5	70	15,7	-18	0
Juli	744	20,0	66	16,8	73	17,0	-19	0
August	744	20,0	69	16,6	77	16,8	-16	0
September	720	20,0	65	13,5	79	13,8	-9	0
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	10,3	-2	0
November	720	20,0	62	5,1	88	5,9	5	5
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	2,9	8	13
						$\Sigma =$	-47	

4.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Hamburg

Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum

p_{sat} nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	5,1	1,9	0,5	1,1	3,7	7,3	12,2	15,5	16,8	16,6	13,5	9,7
φ_i	62	61	61	60	59	56	56	61	66	69	65	63
φ_e	88	90	89	86	81	72	68	70	73	77	79	84

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck p_{sat} in [Pa]

9,80	2257	2241	2234	2237	2250	2269	2294	2311	2318	2317	2301	2281
30	2257	2241	2234	2237	2250	2269	2294	2311	2318	2317	2301	2281
30	1989	1921	1892	1905	1959	2037	2148	2226	2257	2252	2178	2091
30	1750	1642	1597	1616	1702	1827	2010	2143	2197	2188	2062	1915
30	1536	1400	1344	1367	1475	1636	1880	2062	2138	2126	1950	1752
30	1345	1189	1126	1153	1275	1463	1758	1985	2081	2066	1844	1602
30	1176	1007	940	968	1099	1306	1642	1910	2025	2007	1744	1462
30	1026	850	782	810	945	1164	1534	1837	1971	1949	1648	1334
30	892	715	647	675	810	1036	1431	1767	1917	1893	1556	1216
50	892	715	647	675	810	1036	1431	1767	1917	1893	1556	1216
51	878	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546	1202

Tauwasserbildung bei $s_d = 29,86\text{m}$ "Mineralfaser 035 - PE-Folie"

Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	6	10	11	9	6	-3	-19	-31				
M_a	6	16	27	36	41	38	20					

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

5 FLACHDACH (GRENZT WOHNRAUM GEGEN AUßENLUFT AB)

5.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Bauteilquerschnitt

Bauteil Flachdach (grenzt Wohnraum gegen Außenluft ab)

Bauteiltyp Dachdecke

Querschnitt

von innen	s [cm]	ρ [kg/m ³]	[kg/m ²]	λ _R [W/mK]	R [m ² K/W]
R _{si}					0,13
01 Stahlbeton	14,000	2400	336,0	2,100	0,07
02 Bitumendachbahn	0,200	1200	2,4	-	-
03 Mineralfaser 040	14,000	20	2,8	0,040	3,50
04 Luftschicht belüftet	2,000	1	0,0	-	-
05 Nadelholz	2,080	600	12,0	0,130	-
06 Bitumendachbahn	0,400	1200	4,8	-	-
07 Stehfalzbleche	4,000	-	2,0	-	-
R _{se}					0,08
	= 36,680	G =	360,0	R _T =	3,78

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Klimabedingungen Normklimadaten DIN 4108

Tauperiode 1440 Stunden	Außenklima	-10,0 °C	φ = 80 %
	Innenklima	20,0 °C	φ = 50 %
Verdunstungsperiode 2160 Stunden	Außenklima	12,0 °C	φ = 70 %
	Innenklima	12,0 °C	φ = 70 %
Temperatur der Dachoberfläche		20,0 °C	

Grenzschichttemperaturen und Sättigungsdampfdrücke

von innen vor der Schichtgrenze	Tauperiode		Verdunstungsperiode	
	T _{gr} [°C]	p _s [Pa]	T _{gr} [°C]	p _s [Pa]
Raumluft	20,0	2340	12,0	1403
1 Stahlbeton	19,0	2197	12,3	1431
2 Bitumendachbahn	18,4	2119	12,4	1441
3 Mineralfaser 040	18,4	2119	12,4	1441
4 Luftschicht belüftet	-9,4	274	20,0	2340
5 Nadelholz	-9,4	274	20,0	2340
6 Bitumendachbahn	-9,4	274	20,0	2340
7 Stehfalzbleche	-9,4	274	20,0	2340
Außenluft	-10,0	260	12,0	1403

Diffusionswiderstände

Schicht	μ _{min} [-]	μ _{max} [-]	μ _{min} *s [m]	μ _{max} *s [m]	s _d [m]
1 Stahlbeton	70	150	9,80	21,00	-> 9,80
2 Bitumendachbahn	2000	20000	4,00	40,00	-> 4,00
3 Mineralfaser 040	1	1	0,14	0,14	0,14
4 Luftschicht belüftet	1	1	0,02	0,02	0,10
5 Nadelholz	40	40	0,83	0,83	0,83
6 Bitumendachbahn	10000	80000	40,00	320,00	<- 320,00
7 Stehfalzbleche	-	-	1500,00	1500,00	1500,00
Σ μ*s =					1834,87

Mindestwert s_d = 0.10 m nach DIN 4108-3:2001, A.2.4 wurde angesetzt.

Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2001

Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen (A.2)

Taubene vor Schicht "Luftschicht belüftet"

$$m_{W,T} = 1440 * \left(\frac{1170 - 274}{13,94} - \frac{274 - 208}{1820,93} \right) / 1500 = 61,7 \text{ g/m}^2 \text{ Tauwasser}$$

$$m_{W,V} = 2160 * \left(\frac{2340 - 982}{13,94} + \frac{2340 - 982}{1820,93} \right) / 1500 = 141,4 \text{ g/m}^2 \text{ Verdunstung}$$

Die Tauwasserbildung im Bauteil ist im Sinne von DIN 4108-3 unschädlich, da $m_{W,T} < \text{zul } m_{W,T}$ und $m_{W,V} > m_{W,T}$

Überprüfung der Verdunstungsmengen gedichteter Dachkonstruktionen

Beachten Sie das Diffusionsdiagramm

Verdunstung [g/m ²]	nach innen	nach außen	Summe
nach DIN 4108	140,3	1,1	141,3
überprüft	48,5	1,1	49,6

5.2 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Hamburg φ_e Hamburg

Betrachtungspunkt bei $s_d = 13,94$ m (vor Luftschicht belüftet)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	0,9	28	209
Februar	672	20,0	60	1,1	86	1,5	23	233
März	744	20,0	59	3,7	81	4,0	20	253
April	720	20,0	56	7,3	72	7,6	9	262
Mai	744	20,0	56	12,2	68	12,4	-5	257
Juni	720	20,0	61	15,5	70	15,6	-12	245
Juli	744	20,0	66	16,8	73	16,9	-14	231
August	744	20,0	69	16,6	77	16,7	-10	221
September	720	20,0	65	13,5	79	13,6	-1	219
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	9,9	9	229
November	720	20,0	62	5,1	88	5,4	19	248
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	2,3	25	273
						$\Sigma =$	91	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 209 g/m²

Betrachtungspunkt bei $s_d = 14,87$ m (vor Bitumendachbahn)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	0,9	26	196
Februar	672	20,0	60	1,1	86	1,5	22	218
März	744	20,0	59	3,7	81	4,0	19	237
April	720	20,0	56	7,3	72	7,6	8	245
Mai	744	20,0	56	12,2	68	12,4	-4	241
Juni	720	20,0	61	15,5	70	15,6	-11	229
Juli	744	20,0	66	16,8	73	16,9	-13	217
August	744	20,0	69	16,6	77	16,7	-10	207
September	720	20,0	65	13,5	79	13,6	-1	206
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	9,9	8	214
November	720	20,0	62	5,1	88	5,4	18	232
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	2,3	24	255
						$\Sigma =$	85	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 196 g/m²

5.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Hamburg

Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum

$psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	9,7	5,1	1,9	0,5	1,1	3,7	7,3	12,2	15,5	16,8	16,6	13,5
φ_i	63	62	61	61	60	59	56	56	61	66	69	65
φ_e	84	88	90	89	86	81	72	68	70	73	77	79

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]

9,80	2308	2295	2287	2283	2285	2292	2301	2314	2323	2327	2326	2318
14	2308	2295	2287	2283	2285	2292	2301	2314	2323	2327	2326	2318
14	2213	2160	2124	2109	2115	2144	2185	2242	2281	2297	2294	2257
14	2122	2032	1972	1946	1957	2006	2075	2172	2240	2267	2263	2199
14	2034	1911	1829	1794	1809	1875	1969	2104	2199	2238	2232	2141
14	1949	1796	1695	1653	1671	1751	1868	2037	2159	2209	2201	2085
14	1868	1687	1570	1522	1542	1635	1771	1973	2120	2180	2171	2030
14	1789	1584	1453	1399	1422	1526	1679	1910	2081	2152	2141	1976
14	1713	1486	1344	1286	1311	1423	1591	1849	2043	2124	2111	1923
14	1641	1394	1242	1181	1207	1326	1508	1790	2005	2096	2082	1872
14	1571	1307	1147	1083	1110	1235	1428	1732	1968	2069	2053	1822
14	1503	1225	1059	993	1021	1150	1352	1676	1932	2042	2025	1773
14	1438	1147	976	909	937	1069	1279	1622	1896	2015	1996	1726
14	1376	1074	900	832	860	994	1210	1569	1861	1989	1968	1679
14	1316	1004	828	760	789	924	1144	1518	1827	1962	1941	1634
14	1258	939	762	694	722	858	1081	1468	1793	1937	1914	1589
14	<u>1202</u>	<u>878</u>	<u>700</u>	<u>633</u>	<u>661</u>	<u>796</u>	<u>1022</u>	<u>1420</u>	<u>1759</u>	<u>1911</u>	<u>1887</u>	<u>1546</u>
14	1202	878	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546
15	1202	878	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546
335	1202	878	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546
10335	1202	878	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546

Tauwasserbildung bei $s_d = 13,94m$ "Mineralfaser 040 - Luftschicht belüftet"
Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	10	20	26	28	24	21	10	0	-12	-17	-17	-4
M_a	10	29	55	83	107	128	137	138	126	109	92	88
	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf und verdunstet in den Sommermonaten unvollständig. Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden.

6 STEILDACH (GRENZT WOHNRAUM GEGEN AUßENLUFT AB)

6.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Bauteilquerschnitt

Bauteil Steildach

Bauteiltyp Decke gegen die Außenluft

Querschnitt

von innen	s [cm]	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ²]	λ_R [W/mK]	R [m ² K/W]
R _{si}					0,13
01 Gipskartonplatten 12,5 mm	1,250	900	11,3	0,250	0,05
02 Luftschicht ruhend	2,000	1	0,0	-	0,04
03 Dampfbremse 30m	0,030	-	-	-	-
04 Mineralfaser 040	16,000	20	3,2	0,040	4,00
05 Holzschalung 24 mm	2,400	600	14,4	0,130	0,18
06 Bitumendachbahn DIN 52128	0,400	1200	4,8	0,170	0,02
07 Holzschalung 24 mm	2,400	600	14,4	0,130	0,18
08 Holzschalung 24 mm	2,400	600	14,4	0,130	0,18
09 Tondachziegel	4,000	2000	80,0	1,000	0,04
R _{se}					0,04
d = 30,880		G = 142,5		R _T = 4,88	

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Klimabedingungen Normklimadaten DIN 4108

Tauperiode 1440 Stunden	Außenklima	-10,0 °C	$\varphi = 80 \%$
	Innenklima	20,0 °C	$\varphi = 50 \%$
Verdunstungsperiode 2160 Stunden	Außenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$
	Innenklima	12,0 °C	$\varphi = 70 \%$
Temperatur der Dachoberfläche		20,0 °C	

Grenzschichttemperaturen und Sättigungsdampfdrücke

von innen vor der Schichtgrenze	Tauperiode		Verdunstungsperiode	
	T _{gr} [°C]	p _s [Pa]	T _{gr} [°C]	p _s [Pa]
Raumluft	20,0	2340	12,0	1403
1 Gipskartonplatten 12,5 mm	19,2	2227	12,2	1422
2 Luftschicht ruhend	18,9	2185	12,3	1431
3 Dampfbremse 30m	18,6	2145	12,4	1441
4 Mineralfaser 040	18,6	2145	12,4	1441
5 Holzschalung 24 mm	-6,0	368	19,0	2197
6 Bitumendachbahn DIN 52128	-7,1	336	19,3	2241
7 Holzschalung 24 mm	-7,2	333	19,3	2241
8 Holzschalung 24 mm	-8,4	298	19,6	2283
9 Tondachziegel	-9,5	272	19,9	2324
	-9,8	264	20,0	2340
Außenluft	-10,0	260	12,0	1403

Diffusionswiderstände

Schicht	μ _{min} [-]	μ _{max} [-]	μ _{min} *s [m]	μ _{max} *s [m]	s _d [m]
1 Gipskartonplatten 12,5 mm	8	8	0,10	0,10	0,10
2 Luftschicht ruhend	1	1	0,02	0,02	0,02
3 Dampfbremse 30m	-	-	30,00	30,00	30,00
4 Mineralfaser 040	1	1	0,16	0,16	0,16
5 Holzschalung 24 mm	40	40	0,96	0,96	0,96
6 Bitumendachbahn DIN 52128	10000	80000	40,00	320,00	<- 320,00
7 Holzschalung 24 mm	40	40	0,96	0,96	0,96
8 Holzschalung 24 mm	40	40	0,96	0,96	0,96
9 Tondachziegel	30	40	1,20	1,60	<- 1,60

				Σ μ*s =	354,76

Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2001

Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen (A.2)

Tauebene vor Schicht "Bitumendachbahn DIN 52128"

$$m_{W,T} = 1440 * \left(\frac{1170 - 336}{31,24} - \frac{336 - 208}{323,52} \right) / 1500 = 25,2 \text{ g/m}^2 \text{ Tauwasser}$$

$$m_{W,V} = 2160 * \left(\frac{2241 - 982}{31,24} + \frac{2241 - 982}{323,52} \right) / 1500 = 63,6 \text{ g/m}^2 \text{ Verdunstung}$$

Die Tauwasserbildung im Bauteil ist im Sinne von DIN 4108-3 unschädlich, da $m_{W,T} < \text{zul } m_{W,T}$ und $m_{W,V} > m_{W,T}$

Überprüfung der Verdunstungsmengen gedichteter Dachkonstruktionen

Beachten Sie das Diffusionsdiagramm

Verdunstung [g/m ²]	nach innen	nach außen	Summe
nach DIN 4108	58,0	5,6	63,6
überprüft	21,9	5,6	27,5

Wird die Dampfbremse als dampfdicht angenommen, ergibt sich die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke für die Berechnung der Konstruktion nach DIN 4108-3 zu $s_d = 1500 \text{ m}$. Der erneute Tauwasserausfall während der Verdunstungsperiode ergibt sich wie folgt.

Diffusionswiderstände

Schicht	μ_{\min} [-]	μ_{\max} [-]	$\mu_{\min} \cdot s$ [m]	$\mu_{\max} \cdot s$ [m]	s_d [m]
1 Gipskartonplatten 12,5 mm	8	8	0,10	0,10	0,10
2 Luftschicht ruhend	1	1	0,02	0,02	0,02
3 Dampfbremse 30m	-	-	1500,00	1500,00	1500,00
4 Mineralfaser 040	1	1	0,16	0,16	0,16
5 Holzschalung 24 mm	40	40	0,96	0,96	0,96
6 Bitumendachbahn DIN 52128	10000	80000	40,00	320,00	<- 320,00
7 Holzschalung 24 mm	40	40	0,96	0,96	0,96
8 Holzschalung 24 mm	40	40	0,96	0,96	0,96
9 Tondachziegel	30	40	1,20	1,60	<- 1,60

					$\Sigma \mu \cdot s = 1824,76$

Überprüfung der Verdunstungsmengen gedichteter Dachkonstruktionen

Beachten Sie das Diffusionsdiagramm

Verdunstung [g/m ²]	nach innen	nach außen	Summe
nach DIN 4108	1,2	5,6	6,8
überprüft	0,4	5,6	6,0

6.2 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima	T_i Wohnraum	φ_i Wohnraum
Außenklima	T_e Hamburg	φ_e Hamburg

Betrachtungspunkt bei $s_d = 30,28$ m (vor Holzschalung 24 mm)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	3,1	11	47
Februar	672	20,0	60	1,1	86	3,6	9	56
März	744	20,0	59	3,7	81	5,9	7	63
April	720	20,0	56	7,3	72	9,0	2	65
Mai	744	20,0	56	12,2	68	13,3	-4	60
Juni	720	20,0	61	15,5	70	16,1	-7	53
Juli	744	20,0	66	16,8	73	17,2	-8	45
August	744	20,0	69	16,6	77	17,1	-6	39
September	720	20,0	65	13,5	79	14,4	-3	37
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	11,1	2	39
November	720	20,0	62	5,1	88	7,1	7	45
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	4,3	9	55
						$\Sigma =$	18	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 37 g/m²

Betrachtungspunkt bei $s_d = 31,24$ m (vor Bitumendachbahn DIN 52128)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	61	0,5	89	2,4	11	59
Februar	672	20,0	60	1,1	86	2,9	9	68
März	744	20,0	59	3,7	81	5,3	7	75
April	720	20,0	56	7,3	72	8,5	3	78
Mai	744	20,0	56	12,2	68	13,0	-4	74
Juni	720	20,0	61	15,5	70	15,9	-7	67
Juli	744	20,0	66	16,8	73	17,1	-7	60
August	744	20,0	69	16,6	77	16,9	-6	54
September	720	20,0	65	13,5	79	14,1	-2	52
Oktober	744	20,0	63	9,7	84	10,7	3	55
November	720	20,0	62	5,1	88	6,5	7	62
Dezember	744	20,0	61	1,9	90	3,7	10	72
						$\Sigma =$	24	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 52 g/m²

6.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Hamburg

Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum

ρ_{sat} nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	9,7	5,1	1,9	0,5	1,1	3,7	7,3	12,2	15,5	16,8	16,6	13,5
φ_i	63	62	61	61	60	59	56	56	61	66	69	65
φ_e	84	88	90	89	86	81	72	68	70	73	77	79

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck ρ_{sat} in [Pa]

0,10	2320	2313	2308	2306	2306	2310	2316	2323	2328	2330	2330	2325
0,12	2307	2294	2286	2282	2284	2291	2300	2314	2323	2326	2326	2317
30	2307	2294	2286	2282	2284	2291	2300	2314	2323	2326	2326	2317
30	2234	2191	2161	2148	2153	2177	2211	2259	2291	2304	2302	2271
30	2164	2091	2041	2020	2029	2069	2126	2204	2259	2281	2277	2226
30	2095	1995	1928	1899	1912	1966	2043	2151	2228	2258	2254	2181
30	2029	1903	1820	1785	1800	1867	1962	2100	2197	2236	2230	2137
30	1964	1815	1718	1677	1694	1772	1885	2049	2166	2214	2206	2094
30	1901	1731	1620	1574	1594	1682	1810	1999	2136	2192	2183	2052
30	1839	1650	1528	1477	1499	1595	1738	1950	2106	2170	2160	2010
30	1780	1572	1440	1386	1409	1513	1669	1903	2076	2148	2137	1970
30	1722	1497	1357	1299	1323	1434	1601	1856	2047	2127	2115	1930
30	1666	1426	1278	1217	1243	1359	1537	1811	2018	2106	2092	1890
30	1611	1358	1203	1140	1166	1288	1474	1766	1990	2085	2070	1852
30	1559	1292	1131	1067	1094	1220	1414	1722	1962	2064	2048	1814
30	1507	1230	1064	998	1026	1155	1356	1680	1934	2043	2026	1776
30	1457	1170	1000	933	961	1093	1300	1638	1907	2023	2005	1740
30	1409	1112	940	872	901	1034	1246	1597	1880	2003	1983	1704
30	1362	1057	883	815	843	977	1194	1557	1853	1983	1962	1668
30	1316	1005	829	760	789	924	1144	1518	1827	1963	1941	1634
31	1281	965	788	720	749	884	1106	1488	1806	1947	1925	1607
351	1277	960	783	715	744	879	1102	1484	1804	1945	1923	1604
352	1243	922	745	677	705	840	1065	1455	1783	1930	1907	1577
353	1210	886	708	641	669	804	1029	1426	1763	1914	1890	1551
355	1202	878	700	633	661	796	1022	1420	1759	1911	1887	1546

Tauwasserbildung bei $s_d = 31,24\text{m}$ "Holzschalung 24 mm - Bitumendachbahn DIN 52128" Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	3	7	10	11	9	7	3	-2	-8	-10	-10	-4
M_a	3	10	20	31	40	47	50	47	40	29	19	15
	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf und verdunstet in den Sommermonaten unvollständig. Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden.

7 SOHLPLATTE AN ERDREICH

7.1 Berechnung nach DIN 4108-3

Bauteilquerschnitt

Bauteil Sohlplatte gegen Erdreich

Bauteiltyp Fußboden gegen Erdreich

Querschnitt

von innen	s [cm]	ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ²]	λ_R [W/mK]	R [m ² K/W]
R _{si}					0,17
01 Zementestrich	4,000	2000	80,0	1,400	0,03
02 PE-Folie	0,020	1000	0,2	-	-
03 PS-Hartschaum 30 SE 035	10,000	30	3,0	0,035	2,86
04 Asphaltmastix	0,700	2000	14,0	0,170	0,04
05 Stahlbeton	20,000	2400	480,0	2,100	0,10
R _{se}					0,00
d = 34,720		G = 577,2		R _T = 3,19	

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Klimabedingungen gegen Erdreich

Tauperiode	Außenklima	10,0 °C	$\phi = 100 \%$
1440 Stunden	Innenklima	20,0 °C	$\phi = 50 \%$
Verdunstungsperiode	Außenklima	10,0 °C	$\phi = 100 \%$
2160 Stunden	Innenklima	12,0 °C	$\phi = 70 \%$

Grenzschichttemperaturen und Sättigungsdampfdrücke

von innen vor der Schichtgrenze	Tauperiode		Verdunstungsperiode	
	T _{gr} [°C]	p _s [Pa]	T _{gr} [°C]	p _s [Pa]
Raumluft	20,0	2340	12,0	1403
1 Zementestrich	19,5	2268	11,9	1394
2 PE-Folie	19,4	2254	11,9	1394
3 PS-Hartschaum 30 SE 035	19,4	2254	11,9	1394
4 Asphaltmastix	10,4	1262	10,1	1237
5 Stahlbeton	10,3	1254	10,1	1237
	10,0	1228	10,0	1228
Außenluft	10,0	1228	10,0	1228

Diffusionswiderstände

Schicht	μ_{\min} [-]	μ_{\max} [-]	$\mu_{\min} \cdot s$ [m]	$\mu_{\max} \cdot s$ [m]		s_d [m]
1 Zementestrich	15	35	0,60	1,40	->	0,60
2 PE-Folie	100000	100000	20,00	20,00		20,00
3 PS-Hartschaum 30 SE 035	40	100	4,00	10,00	->	4,00
4 Asphaltmastix	-	-	1500,00	1500,00		1500,00
5 Stahlbeton	70	150	14,00	30,00	<-	30,00

						$\Sigma \mu \cdot s = 1554,60$

Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2001

Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen (A.2)

Keine Tauwasserbildung im Bauteil.
 Diffusionsstromdichte = $-0,000 \text{ g/m}^2\text{h}$

7.2 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Hamburg φ_e Hamburg

Betrachtungspunkt bei $s_d = 24,60$ m (vor Asphaltmastix)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	85	8,6	100	9,1	17	237
Februar	672	20,0	84	8,6	100	9,1	15	252
März	744	20,0	79	8,6	100	9,1	14	266
April	720	20,0	72	8,6	100	9,1	10	276
Mai	744	20,0	63	8,6	100	9,1	6	282
Juni	720	20,0	56	8,6	100	9,1	3	285
Juli	744	20,0	54	8,6	100	9,1	2	288
August	744	20,0	54	8,6	100	9,1	2	290
September	720	20,0	60	8,6	100	9,1	5	295
Oktober	744	20,0	67	8,6	100	9,1	8	303
November	720	20,0	76	8,6	100	9,1	12	315
Dezember	744	20,0	82	8,6	100	9,1	15	330
						$\Sigma =$	110	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 237 g/m²

7.3 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Hamburg

Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für manuell

$psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
φ_i	85	84	79	72	63	56	54	54	60	67	76	82
φ_e	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]

0,60	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320
21	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320
21	2194	2194	2194	2194	2194	2194	2194	2194	2194	2194	2194	2194
21	2074	2074	2074	2074	2074	2074	2074	2074	2074	2074	2074	2074
22	1960	1960	1960	1960	1960	1960	1960	1960	1960	1960	1960	1960
22	1851	1851	1851	1851	1851	1851	1851	1851	1851	1851	1851	1851
22	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748	1748
23	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650
23	1557	1557	1557	1557	1557	1557	1557	1557	1557	1557	1557	1557
23	1468	1468	1468	1468	1468	1468	1468	1468	1468	1468	1468	1468
24	1384	1384	1384	1384	1384	1384	1384	1384	1384	1384	1384	1384
24	1304	1304	1304	1304	1304	1304	1304	1304	1304	1304	1304	1304
24	1228	1228	1228	1228	1228	1228	1228	1228	1228	1228	1228	1228
25	1156	1156	1156	1156	1156	1156	1156	1156	1156	1156	1156	1156
95	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144
125	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116

Tauwasserbildung bei $s_d = 24,60\text{m}$ "PS-Hartschaum 30 SE 035 - Asphaltmastix"
Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	17	14	14	10	6	3	2	2	5	8	12	15
M_a	17	31	45	55	61	64	66	68	72	80	92	107
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf und verdunstet in den Sommermonaten unvollständig. Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden.

8 AUßENWAND STANDORT DRESDEN

8.1 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Dresden φ_e Dresden

Betrachtungspunkt bei $s_d = 2,88$ m (vor Kalkzementputz)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/gm]
Januar	744	20,0	58	-0,7	80	-0,3	5	5
Februar	672	20,0	58	0,4	78	0,8	-23	0
März	744	20,0	56	3,9	74	4,2	-131	0
April	720	20,0	54	8,1	68	8,3	-302	0
Mai	744	20,0	56	13,1	66	13,2	-530	0
Juni	720	20,0	60	16,5	66	16,6	-675	0
Juli	744	20,0	65	18,0	69	18,0	-699	0
August	744	20,0	66	17,7	71	17,7	-639	0
September	720	20,0	63	14,2	75	14,3	-406	0
Oktober	744	20,0	60	9,8	78	10,0	-237	0
November	720	20,0	59	4,4	81	4,7	-73	0
Dezember	744	20,0	59	1,0	81	1,4	-15	0
						$\Sigma =$	-3724	

8.2 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Dresden
 Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	-0,7	0,4	3,9	8,1	13,1	16,5	18,0	17,7	14,2	9,8	4,4	1,0
φ_i	60	61	59	56	57	63	68	71	66	63	61	61
φ_e	58	58	56	54	56	60	65	66	63	60	59	59

Querschnittsposition s_d in [m]	und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]											
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
0,15	2312	2313	2317	2322	2327	2331	2333	2333	2329	2324	2317	2314
2,77	2143	2152	2184	2223	2269	2302	2316	2313	2280	2239	2189	2158
2,78	1920	1940	2006	2088	2189	2260	2292	2286	2212	2122	2016	1951
2,79	1717	1746	1841	1960	2111	2219	2268	2258	2145	2010	1855	1762
2,80	1534	1570	1688	1839	2035	2178	2245	2231	2081	1904	1705	1589
2,81	1368	1409	1546	1725	1962	2139	2221	2204	2018	1802	1566	1432
2,82	1218	1263	1414	1617	1891	2100	2198	2178	1956	1706	1437	1288
2,83	1083	1130	1293	1515	1822	2061	2175	2152	1897	1614	1318	1157
2,84	961	1010	1181	1418	1756	2023	2152	2126	1839	1526	1207	1038
2,85	851	901	1077	1328	1691	1986	2130	2100	1782	1443	1105	929
2,86	753	803	982	1242	1629	1949	2107	2075	1727	1363	1010	831
2,87	665	714	894	1161	1569	1913	2085	2050	1674	1288	922	743
2,88	583	634	813	1085	1510	1878	2063	2025	1622	1216	842	662
3,40	576	628	807	1079	1506	1875	2062	2023	1618	1211	836	656

Eine Tauwasserbildung wird für keine Grenzfläche und keinen Monat vorhergesagt. Das Bauteil ist frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren.

9 FLACHDACH STANDORT BERLIN

9.1 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Berlin φ_e Berlin

Betrachtungspunkt bei $s_d = 13,94$ m (vor Luftschicht belüftet)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	60	-0,2	85	0,0	28	135
Februar	672	20,0	59	0,8	81	1,0	23	158
März	744	20,0	57	4,2	76	4,4	18	176
April	720	20,0	55	8,6	70	8,7	5	181
Mai	744	20,0	55	13,9	64	14,0	-11	170
Juni	720	20,0	62	17,4	67	17,4	-19	151
Juli	744	20,0	66	18,8	69	18,8	-23	129
August	744	20,0	70	18,4	74	18,4	-17	111
September	720	20,0	65	14,6	77	14,7	-5	106
Oktober	744	20,0	62	10,0	82	10,1	8	114
November	720	20,0	61	4,9	86	5,1	19	132
Dezember	744	20,0	62	1,4	88	1,6	27	160
						$\Sigma =$	53	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 106 g/m²

Betrachtungspunkt bei $s_d = 14,87$ m (vor Bitumendachbahn)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	60	-0,2	85	0,0	26	128
Februar	672	20,0	59	0,8	81	1,0	22	149
März	744	20,0	57	4,2	76	4,4	17	166
April	720	20,0	55	8,6	70	8,7	5	171
Mai	744	20,0	55	13,9	64	14,0	-10	161
Juni	720	20,0	62	17,4	67	17,4	-17	143
Juli	744	20,0	66	18,8	69	18,8	-21	122
August	744	20,0	70	18,4	74	18,4	-16	106
September	720	20,0	65	14,6	77	14,7	-5	101
Oktober	744	20,0	62	10,0	82	10,1	7	108
November	720	20,0	61	4,9	86	5,1	18	126
Dezember	744	20,0	62	1,4	88	1,6	25	152
						$\Sigma =$	51	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 101 g/m²

9.2 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Berlin
Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	10,0	4,9	1,4	-0,2	0,8	4,2	8,6	13,9	17,4	18,8	18,4	14,6
φ_i	62	61	62	60	59	57	55	55	62	66	70	65
φ_e	82	86	88	85	81	76	70	64	67	69	74	77

Querschnittsposition s_d in [m]	und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]											
9,80	2308	2295	2286	2281	2284	2293	2305	2319	2328	2332	2331	2321
14	2308	2295	2286	2281	2284	2293	2305	2319	2328	2332	2331	2321
14	2217	2158	2119	2101	2112	2150	2200	2262	2304	2321	2316	2270
14	2128	2028	1962	1933	1951	2015	2100	2207	2280	2310	2301	2221
14	2042	1906	1816	1777	1802	1887	2004	2152	2256	2298	2286	2173
14	1960	1789	1680	1632	1662	1767	1912	2099	2232	2287	2271	2125
14	1880	1679	1553	1498	1532	1653	1823	2047	2209	2276	2257	2079
14	1803	1575	1434	1373	1411	1546	1738	1997	2185	2265	2242	2033
14	1729	1477	1323	1258	1298	1445	1657	1947	2162	2254	2227	1988
14	1658	1384	1220	1151	1194	1350	1578	1898	2139	2243	2213	1944
14	1589	1297	1124	1052	1097	1260	1504	1851	2117	2232	2199	1901
14	1523	1214	1035	961	1007	1176	1432	1804	2094	2221	2184	1859
14	1459	1136	952	877	923	1097	1363	1759	2072	2210	2170	1818
14	1398	1062	875	799	846	1022	1297	1714	2050	2200	2156	1777
14	1339	993	803	728	774	952	1234	1671	2028	2189	2142	1737
14	1282	927	737	662	708	886	1174	1628	2006	2178	2128	1698
14	1227	866	676	601	647	824	1116	1587	1985	2167	2114	1660
14	1227	866	676	601	647	824	1116	1587	1985	2167	2114	1660
15	1227	866	676	601	647	824	1116	1587	1985	2167	2114	1660
335	1227	866	676	601	647	824	1116	1587	1985	2167	2114	1660
735	1227	866	676	601	647	824	1116	1587	1985	2167	2114	1660

Tauwasserbildung bei $s_d = 13,94m$ "Mineralfaser 040 - Luftschicht belüftet"
Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	8	19	27	28	23	18	6	-6	-19	-27	-25	-8
M_a	8	27	54	83	106	124	130	124	105	78	53	45
	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf und verdunstet in den Sommermonaten unvollständig. Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden.

10 FLACHDACH STANDORT KARLSRUHE

10.1 Berechnung nach Jenisch

Feuchtebilanz mit Monatsmittelwerten (nach Jenisch)

Raumklima T_i Wohnraum φ_i Wohnraum
 Außenklima T_e Karlsruhe φ_e Karlsruhe

Betrachtungspunkt bei $s_d = 13,94$ m (vor Luftschicht belüftet)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	59	1,2	84	1,4	25	114
Februar	672	20,0	58	2,5	80	2,7	20	134
März	744	20,0	57	6,0	75	6,1	14	148
April	720	20,0	56	9,9	70	10,0	3	150
Mai	744	20,0	60	14,3	70	14,4	-9	141
Juni	720	20,0	66	17,5	71	17,5	-16	125
Juli	744	20,0	71	19,6	72	19,6	-23	103
August	744	20,0	72	18,8	75	18,8	-18	85
September	720	20,0	69	15,4	81	15,4	-5	80
Oktober	744	20,0	64	10,4	84	10,5	8	88
November	720	20,0	60	5,3	85	5,5	17	105
Dezember	744	20,0	60	2,2	86	2,4	24	129
						$\Sigma =$	40	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 80 g/m²

Betrachtungspunkt bei $s_d = 14,87$ m (vor Bitumendachbahn)

	Dauer [h]	T_i [°C]	φ_i [%]	T_a [°C]	φ_a [%]	ϑ_{sd} [°C]	W_t, W_v [g/m ² M]	m [g/qm]
Januar	744	20,0	59	1,2	84	1,4	23	107
Februar	672	20,0	58	2,5	80	2,7	18	125
März	744	20,0	57	6,0	75	6,1	13	138
April	720	20,0	56	9,9	70	10,0	2	141
Mai	744	20,0	60	14,3	70	14,4	-8	132
Juni	720	20,0	66	17,5	71	17,5	-15	117
Juli	744	20,0	71	19,6	72	19,6	-21	96
August	744	20,0	72	18,8	75	18,8	-17	79
September	720	20,0	69	15,4	81	15,4	-5	75
Oktober	744	20,0	64	10,4	84	10,5	7	82
November	720	20,0	60	5,3	85	5,5	16	98
Dezember	744	20,0	60	2,2	86	2,4	23	121
						$\Sigma =$	37	

Positive Feuchtebilanz, Feuchte-Eintrag in 3 Jahren = 75 g/m²

10.2 Berechnung nach DIN EN ISO 13788

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Karlsruhe
 Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	10,4	5,3	2,2	1,2	2,5	6,0	9,9	14,3	17,5	19,6	18,8	15,4
φ_i	64	60	60	59	58	57	56	60	66	71	72	69
φ_e	84	85	86	84	80	75	70	70	71	72	75	81

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]

9,80	2310	2296	2288	2285	2288	2298	2308	2320	2329	2334	2332	2323
14	2310	2296	2288	2285	2288	2298	2308	2320	2329	2334	2332	2323
14	2221	2163	2128	2116	2131	2171	2215	2267	2305	2330	2321	2280
14	2136	2036	1977	1959	1983	2049	2126	2215	2282	2327	2310	2238
14	2053	1916	1836	1811	1844	1934	2039	2164	2259	2323	2298	2196
14	1974	1802	1705	1674	1714	1825	1956	2114	2236	2319	2287	2155
14	1897	1694	1581	1546	1592	1721	1876	2065	2213	2315	2276	2115
14	1822	1592	1465	1426	1477	1622	1799	2017	2191	2312	2265	2076
14	1751	1496	1357	1315	1370	1529	1724	1970	2169	2308	2254	2037
14	1681	1404	1256	1211	1270	1440	1652	1925	2147	2304	2243	1998
14	1614	1318	1162	1115	1176	1355	1583	1879	2125	2300	2232	1961
14	1550	1236	1074	1025	1088	1275	1516	1835	2103	2297	2221	1924
14	1488	1158	991	942	1007	1199	1452	1792	2082	2293	2210	1887
14	1428	1085	915	865	930	1128	1390	1750	2060	2289	2200	1852
14	1370	1017	843	793	859	1060	1331	1709	2039	2286	2189	1816
14	1314	951	777	727	793	995	1274	1668	2018	2282	2178	1782
14	<u>1260</u>	<u>890</u>	<u>715</u>	<u>666</u>	<u>731</u>	<u>934</u>	<u>1219</u>	<u>1628</u>	<u>1998</u>	<u>2278</u>	<u>2167</u>	<u>1748</u>
14	1260	890	715	666	731	934	1219	1628	1998	2278	2167	1748
15	1260	890	715	666	731	934	1219	1628	1998	2278	2167	1748
335	1260	890	715	666	731	934	1219	1628	1998	2278	2167	1748
735	1260	890	715	666	731	934	1219	1628	1998	2278	2167	1748

Tauwasserbildung bei $s_d = 13,94m$ "Mineralfaser 040 - Luftschicht belüftet"
 Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	8	18	24	25	20	14	3	-9	-21	-32	-28	-13
M_a	8	26	50	75	95	109	112	103	82	49	21	8
	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf und verdunstet in den Sommermonaten unvollständig. Das Bauteil hat die Beurteilung nicht bestanden.

11 AUßENWAND FÜR EUROPÄISCHE STANDORTE

11.1 Moskau

Temperaturverlauf und Diffusionsberechnung

Bauteil Außenwand, einschalig

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte ϕ_e [%] für Moskau
Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte ϕ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	-2,4	-8,2	-11,0	-9,6	-4,8	3,4	12,0	15,2	18,6	15,7	10,4	3,6
ϕ_i	57	49	47	48	52	56	55	60	68	67	61	59
ϕ_e	87	87	86	83	80	74	67	69	71	77	80	83

Querschnittsposition s_d in [m]	und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]											
0,15	2310	2303	2300	2302	2307	2316	2326	2330	2334	2330	2324	2317
2,77	2127	2076	2052	2064	2106	2180	2259	2289	2322	2294	2244	2181
2,78	1889	1786	1738	1762	1846	1996	2166	2233	2305	2243	2134	2000
2,79	1674	1532	1467	1499	1614	1827	2077	2177	2288	2193	2028	1832
2,80	1481	1310	1234	1272	1408	1670	1990	2123	2271	2144	1927	1677
2,81	1307	1117	1034	1075	1226	1525	1907	2069	2255	2096	1831	1533
2,82	1152	950	864	906	1064	1392	1827	2017	2238	2049	1738	1401
2,83	1013	805	718	760	922	1268	1750	1967	2222	2003	1650	1278
2,84	890	680	593	636	797	1155	1676	1917	2206	1957	1566	1165
2,85	779	567	477	520	687	1050	1605	1868	2190	1913	1485	1061
2,86	681	465	382	421	588	954	1536	1821	2174	1869	1408	965
2,87	592	380	304	340	494	866	1470	1774	2158	1827	1335	877
2,88	506	309	241	273	414	785	1406	1729	2142	1785	1265	796
3,40	500	304	237	269	408	779	1401	1726	2141	1782	1260	790

Tauwasserbildung bei $s_d = 2,88m$ "Mineralfaser 040 - Kalkzementputz"
Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	73	102	112	89	56	-416	-1123
M_a	73	175	287	377	432	17	

	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

11.2 London

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für London
Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	4,0	3,4	4,3	5,6	8,9	12,1	15,7	17,3	16,7	14,2	9,9	6,1
φ_i	62	62	59	57	56	59	60	66	67	65	66	62
φ_e	90	90	82	75	72	72	68	72	75	78	90	88

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]

0,15	2317	2316	2317	2319	2323	2326	2330	2332	2332	2329	2324	2319
2,77	2185	2180	2188	2200	2230	2260	2294	2309	2304	2280	2239	2204
2,78	2008	1996	2014	2039	2104	2168	2243	2277	2264	2212	2124	2048
2,79	1843	1827	1852	1888	1983	2080	2193	2245	2225	2145	2013	1902
2,80	1691	1670	1701	1748	1869	1994	2144	2213	2187	2081	1908	1766
2,81	1550	1525	1562	1616	1761	1912	2096	2182	2150	2018	1807	1637
2,82	1419	1392	1433	1493	1658	1833	2049	2152	2112	1956	1711	1517
2,83	1298	1268	1313	1379	1561	1757	2003	2121	2076	1897	1620	1405
2,84	1186	1155	1202	1272	1468	1683	1957	2091	2040	1839	1533	1300
2,85	1083	1050	1099	1173	1381	1612	1913	2061	2005	1782	1450	1203
2,86	987	954	1004	1081	1298	1544	1869	2032	1970	1727	1371	1111
2,87	899	866	917	995	1219	1478	1827	2003	1935	1674	1295	1026
2,88	<u>819</u>	<u>785</u>	<u>836</u>	915	1145	1415	1785	1975	1902	1622	1224	947
3,40	813	779	830	909	1139	1410	1782	1973	1899	1618	1219	941

Tauwasserbildung bei $s_d = 2,88\text{m}$ "Mineralfaser 040 - Kalkzementputz"
Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	26	35	6	-81
M_a	26	61	68	

	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

11.3 Athen

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Athen
 Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	8,6	9,4	11,9	15,3	20,0	24,4	27,3	26,9	23,5	19,4	14,1	10,5
φ_i	58	58	57	60	65	75	78	71	72	67	66	59
φ_e	75	74	70	68	65	57	50	47	58	68	80	76

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]

0,15	2322	2323	2326	2330	2335	2340	2344	2343	2339	2335	2329	2324
2,77	2227	2235	2258	2290	2335	2378	2407	2403	2369	2330	2279	2245
2,78	2098	2114	2164	2235	2335	2433	2500	2490	2413	2322	2210	2136
2,79	1975	1998	2074	2180	2335	2489	2595	2581	2457	2315	2142	2031
2,80	1858	1888	1986	2127	2335	2546	2695	2674	2502	2308	2076	1931
2,81	1747	1784	1902	2075	2335	2605	2797	2770	2548	2301	2012	1835
2,82	1643	1684	1822	2024	2335	2664	2903	2869	2594	2293	1950	1744
2,83	1543	1590	1744	1974	2335	2725	3012	2971	2641	2286	1890	1656
2,84	1449	1500	1669	1925	2335	2787	3125	3076	2689	2279	1831	1572
2,85	1361	1415	1597	1877	2335	2850	3241	3184	2737	2272	1774	1493
2,86	1277	1334	1528	1830	2335	2914	3361	3296	2787	2265	1718	1416
2,87	1197	1257	1461	1785	2335	2980	3485	3411	2837	2258	1664	1343
2,88	1122	1184	1397	1740	2335	3047	3613	3530	2888	2251	1611	1274
3,40	1116	1178	1392	1737	2335	3052	3623	3539	2892	2250	1607	1269
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez

Eine Tauwasserbildung wird für keine Grenzfläche und keinen Monat vorhergesagt. Das Bauteil ist frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren.

12 AUßENWAND MIT INNENDÄMMUNG FÜR EUROPÄISCHE STANDORTE

12.1 Moskau

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Moskau
Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	3,6	-2,4	-8,2	-11,0	-9,6	-4,8	3,4	12,0	15,2	18,6	15,7	10,4
φ_i	59	57	49	47	48	52	56	55	60	68	67	61
φ_e	83	87	87	86	83	80	74	67	69	71	77	80

Querschnittsposition s_d in [m] und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]

0,22	2305	2294	2284	2279	2281	2290	2305	2321	2326	2333	2327	2318
0,23	1979	1861	1753	1703	1728	1816	1975	2155	2226	2303	2237	2121
0,24	1694	1501	1334	1259	1296	1430	1687	2000	2129	2273	2149	1938
0,25	1446	1204	1005	920	962	1118	1437	1855	2035	2244	2065	1770
0,26	1230	960	750	664	706	868	1220	1719	1946	2215	1984	1614
0,27	1043	761	547	458	501	668	1032	1592	1860	2187	1905	1471
0,42	1006	723	508	421	463	631	996	1566	1842	2181	1888	1442
6,42	820	531	329	259	292	437	809	1425	1743	2147	1797	1286
6,57	790	500	304	237	269	408	779	1401	1726	2141	1782	1260

Tauwasserbildung bei $s_d = 0,27m$ "Mehrschicht-Lbpl Mf 040 - Gipsputz"
Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	596	1008	1095	1177	1028	995	464	-942	-1417	-2102	-1553	-684
M_a	596	1605	2700	3877	4905	5900	6365	5422	4005	1903	350	
	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

12.2 London

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für London
 Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	9,9	6,1	4,0	3,4	4,3	5,6	8,9	12,1	15,7	17,3	16,7	14,2
φ_i	66	62	62	62	59	57	56	59	60	66	67	65
φ_e	90	88	90	90	82	75	72	72	68	72	75	78

Querschnittsposition s_d in [m]	und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]											
0,22	2317	2310	2306	2305	2306	2309	2315	2321	2327	2330	2329	2325
0,23	2110	2030	1987	1975	1993	2020	2089	2157	2237	2273	2259	2203
0,24	1919	1781	1708	1687	1718	1763	1882	2004	2149	2217	2191	2088
0,25	1744	1558	1463	1437	1477	1535	1693	1860	2065	2162	2125	1977
0,26	1583	1361	1250	1220	1265	1334	1522	1726	1984	2109	2061	1872
0,27	1435	1186	1065	1032	1081	1156	1365	1600	1905	2056	1998	1772
0,42	1405	1151	1028	996	1045	1121	1334	1574	1888	2045	1985	1751
6,42	1245	970	842	809	860	938	1167	1434	1797	1983	1912	1637
6,57	1219	941	813	779	830	909	1139	1410	1782	1973	1899	1618

Tauwasserbildung bei $s_d = 0,27m$ "Mehrschicht-Lbpl Mf 040 - Gipsputz"
 Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	172	448	691	752	473	291	101	-353	-917	-1243	-1130
M_a	172	620	1311	2063	2535	2826	2927	2575	1658	415	

	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer oder mehreren Grenzflächen auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.

12.3 Athen

Tauwasserbildung im Bauteilinneren nach EN ISO 13788

Außentemperatur θ_e [°C] und relative Luftfeuchte φ_e [%] für Athen
 Raumtemperatur θ_i [°C] und relative Luftfeuchte φ_i [%] für Wohnraum
 $psat$ nach EN ISO 13788 mit Formelbezügen E.7 / E.8

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
θ_i	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
θ_e	8,6	9,4	11,9	15,3	20,0	24,4	27,3	26,9	23,5	19,4	14,1	10,5
φ_i	58	58	57	60	65	75	78	71	72	67	66	59
φ_e	75	74	70	68	65	57	50	47	58	68	80	76

Querschnittsposition s_d in [m]	und Sättigungsdampfdruck $psat$ in [Pa]											
0,22	2314	2316	2320	2327	2335	2343	2349	2348	2342	2334	2324	2318
0,23	2082	2099	2153	2228	2335	2440	2511	2501	2418	2321	2201	2123
0,24	1871	1901	1996	2133	2335	2540	2683	2663	2497	2309	2084	1942
0,25	1678	1719	1849	2041	2335	2643	2865	2834	2578	2296	1972	1775
0,26	1504	1552	1712	1953	2335	2751	3058	3014	2661	2283	1865	1621
0,27	1345	1400	1584	1869	2335	2861	3262	3204	2746	2271	1763	1478
0,42	1313	1369	1558	1851	2335	2886	3308	3246	2765	2268	1742	1449
6,42	1144	1205	1416	1753	2335	3026	3574	3494	2872	2253	1627	1294
6,57	1116	1178	1392	1737	2335	3052	3623	3539	2892	2250	1607	1269

Tauwasserbildung bei $s_d = 0,42m$ "Gipsputz - KS-MW -1,8 NM/DM"
 Tauwassermenge g_c und Akkumulation M_a in [g/m²]

g_c	11	-20
M_a	11	

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tauwasserbildung im Bauteilinneren tritt an einer Grenzfläche auf, verdunstet jedoch in den Sommermonaten vollständig. Die gesetzlichen Bestimmungen und Produktnormen sind zu beachten.