

HFT Stuttgart

Zentrum für Akustische und
Thermische Bauphysik

Forschungsprojekt

SoFt

Doppelte Membrankonstruktion mit low-e Beschichtung für ein transluzentes Dach
über dem Neubau eines Sportzentrums in Fürth

Bericht zum Arbeitspaket Feuchte in Membrandächern

Bearbeitung und Bericht:

Dipl.-Phys. Doris G. Buck

Projektleitung:

Prof. Dr. Andreas Beck

Oktober 2018

Arbeitspaket Feuchte in Membrandächern

zum Forschungsprojekt

Doppelte Membrankonstruktion mit low-e Beschichtung
für ein transluzentes Dach über
dem Neubau eines Sportzentrums in Fürth (SoFt)

Förderkennzeichen: 03ET1163A
Projektbearbeitung durch: Prof. Dr. Andreas Beck
Prof. Dr.-Ing. Jan Cremers
Prof. Dr. habil. Ursula Eicker
Dipl.-Ing.(FH) Andreas Biesinger
Dipl.-Phys. Doris G. Buck
Dipl.-Ing. Petra Fischbach
Dr. Volker Fux
Dipl.-Phys. Daniel Gürlich
Dr. Dilay Kesten Erhart
Nansi Palla M.A.

Projektpartner: Stadt Fürth,
FAB Architekten,
ZAE Bayern,
Wacker Ingenieure,
F.I.B.U.S. Research Institute

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Vorhaben wird gefördert vom Bundesministerium für
Wirtschaft und Technologie, Förderlinie Forschung für
Energieoptimiertes Bauen.

Vorwort

Für die dauerhafte Funktionstüchtigkeit von Gebäudehüllen sind in jedem Fall auch bauphysikalische Aspekte zu berücksichtigen. Aufgrund der Eigenschaften der im Membranbau verwendeten Materialien und der im Membranbau notwendigen konstruktiven Detaillösungen müssen die bauphysikalischen Aspekte speziell für den Membranbau neu untersucht werden.

Wichtig für die dauerhafte Funktionstüchtigkeit und für ein behagliches und hygienisches Raumklima ist, dass der Wand- und / oder Dachaufbau – egal ob herkömmlicher Aufbau oder aus Membranen bestehend – nicht dauerhaft durchfeuchtet wird.

Erfahrungen mit gebauten Beispielen von Gebäuden mit Membrandach oder Membran-Gebäudehülle zeigen, dass es immer wieder zu Problemen mit Feuchtigkeit innerhalb und an den Membranen kam. Dabei dürften es auch einige Fälle geben, bei denen Probleme auftraten, über die jedoch nichts bekannt wurde. (Vergleiche hierzu die Zusammenstellung von Membranbauten in [Haase11], Teil 2).

Die unterschiedlichen Ansätze, diese Probleme zu lösen ([Haase11], Teil 2), zeigen auch, dass es an Wissen, Erfahrungen, und Berechnungsmethoden mangelt, um während der Planungsphase den bestmöglichen Systemaufbau und die bestmöglichen Detaillösungen auszuwählen. Vor diesem Problem standen auch die Autoren von [Haase11], Teil 1, Vorwort.

Daher war das Ziel dieses Projektteils, am Beispiel des Membrandaches der Sporthalle in Fürth zunächst zu untersuchen, wie die feuchtetechnischen Verhältnisse in Membranaufbauten berechnet und in der Planungsphase zumindest abgeschätzt werden können. Dies betrifft die Wärmebrücken, die durch die Stützen zur Befestigung der inneren Membran entstehen, aber auch die Dachhaut in der Fläche des Membrandaches.

Die Wärmebrücken werden durch die thermische Entkopplung weitgehend entschärft. Aus diesem Grund und wegen der um ein Vielfaches größeren räumlichen Ausdehnung der Dachfläche wurde zunächst die Dachfläche feuchtetechnisch untersucht.

Die Internet- und Literaturrecherche zeigte, dass es wenige Informationen zu Membranbauteilen mit Wärmedämmung gibt. In Bezug auf das feuchtetechnische Verhalten solcher Bauteile liegen noch weniger Informationen vor. Dies betrifft sowohl Materialdaten, Erfahrungsberichte, bisher durchgeführte Berechnungen und Handlungsempfehlungen. Teilweise sind selbst die bauphysikalischen Grundlagen in der Literatur zu diesem Fachgebiet nicht vorhanden oder es werden unterschiedliche Berechnungsformeln und Zahlenwerte angegeben.

Daher nahm das Zusammentragen all dieser Informationen einen längeren Zeitraum ein als vorgesehen. Um für nachfolgende Projekte diese Informationen zur Verfügung zu stellen, werden diese in diesem Bericht daher ausführlich dargestellt.

Aus der zum Thema Feuchte in Membrandächern relevanten Literatur werden die wichtigsten Ergebnisse dargestellt. Das Kapitel zu den physikalischen Grundlagen enthält sicherlich viel bereits aus der bauphysikalischen Fachliteratur Bekanntes. Um das Thema zusammenhängend darzustellen, wurden diese wiederholt, ergänzt um Vergleiche unterschiedlicher Angaben und weitere wichtige Informationen aus anderen Fachgebieten. Das Thema innere und äußere Randbedingungen nimmt ebenfalls relativ viel Platz ein, weil auch hier die Datenlage unübersichtlich ist und unterschiedliche, teilweise widersprüchliche Angaben zu finden sind.

Teilweise wurden auch nach der Bearbeitung des jeweiligen Bericht-Teils neue Versionen verfügbar, die dann jedoch nicht mehr berücksichtigt werden konnten.

Kaltdächer sind zwar eine bekannte Dachkonstruktion, jedoch je nach Orientierung und Neigung nicht immer unproblematisch, wie die Berechnungen in [Zirkelbach16] zeigen. Bei Membrandächern kommt noch hinzu, dass hier andere Materialien mit anderen hygrothermischen Eigenschaften verwendet werden. Dies rechtfertigt eine erneute genauere Betrachtung.

Zunächst wurde das hygrothermische Verhalten der äußeren Membran untersucht, da dieses auch Auswirkungen auf die Randbedingungen des inneren Dachaufbaus und somit dessen hygrothermisches Verhalten hat. Hierfür wurde eine Berechnungsmethode erarbeitet und in ein PC-Programm implementiert, das die zu erwartende Menge des von der äußeren Membran auf den inneren Dachaufbau abtropfenden Wassers berechnet. Dieser Effekt in hinterlüfteten Dachaufbauten wird in der Literatur auch beschrieben. Eine Berechnungsmethode stand bisher nicht zur Verfügung.

Die Auswirkungen von abtropfendem Wasser auf die darunterliegenden Bauteilschichten konnten im Rahmen des Projektes nicht mehr ausführlich untersucht werden. So können hier nur qualitative Hinweise auf die zu erwartenden Auswirkungen und auf mögliche Berechnungsmethoden gegeben werden.

Oktober 2018

Inhalt

Einleitung	1
Projektbeschreibung	2
Aufgabenstellung zu den feuchtetechnischen Untersuchungen	3
Vorgehensweise	3
Stand des Wissens.....	4
Allgemeines zu Sporthallen.....	4
Anforderungen an Sporthallen.....	4
DIN 18032-1	4
Tageslichtversorgung.....	4
Eisporthallen	5
Internet- und Literatur-Recherche	6
Ergebnisse der Internet- und Literatur-Recherche.....	6
Bisher gebaute Gebäude mit wärmegeprägten Membrandächern.....	9
Zusammenstellung von Membrandachbauten im Projekt [Haase11]	9
Die untersuchten Gebäude im Einzelnen.....	11
Olympia-Schwimmhalle München	11
Cuppamare	13
TOM Dortmund	14
Kurklinik Masserberg.....	15
Buddy Holly Musicaltheater, heute Stage Theater im Hafen Hamburg	16
Gaudi Musical Dome in Köln	17
Odate Jukai Dome Park	18
Tabaluga Musical Theater.....	19
Bürgerzentrum Puchheim	20
Tegut Verbrauchermarkt	20
Storek-Varia Verkaufsgebäude	21
Technologie- und Medienzentrums Erfurt.....	21
Parkbad Velbert.....	22
New Bankok Airport	22
Modern Tea House	23
Fazit aus den dokumentierten Praxiserfahrungen	23
Weitere Gebäude mit Membrandächern.....	24
Andreas-Peter-und-Paul-Kirche in Maassluis, Niederlande	24
Mehrlagige Test-Membranaufbauten, Messergebnisse.....	25
Fazit	25
Simulationen von Membrandächern	28
Tauwasserausfall an Dächern von Eissporthallen, Berechnung der Temperaturen am Dach [Marquardt/Mainka08]	28
Ergebnisse	28
Kritik	29
Simulationen von ETFE-Folienkissen	30
Ergebnisse der Internet- und Literatur-Recherche: Zusammenfassung der Anforderungen an und Empfehlungen für Membrandächer mit Wärmedämmung	31
Regensicherheit.....	31
Verformungen der Membrandächer.....	31
Entwässerung	31

Befestigung der inneren Membran	32
Wärmeverluste durch die Anschlüsse des inneren Dachaufbaus	32
Luftdichtigkeit der inneren Membran und deren Anschlüsse.....	33
Luftdichtigkeit der Membran	33
Membranstöße.....	33
Membranränder und-ecken	34
Grate, Kehlen, Hoch- und Tiefpunkte.....	34
Wasserdampfdiffusion durch die innere Membran und deren Anschlüsse.....	34
Wasserdampfdurchlässigkeit der Membran	34
Membranstöße.....	35
Wärmedämmung	35
Material.....	35
Befestigung der Wärmedämmung	36
Unterspannbahn.....	37
Der Luftzwischenraum	37
Beschreibung des Membrandaches und erste feuchtetechnische Betrachtungen.....	39
Aufbau des Membrandaches	39
Anschlüsse der Membranen und der Wärmedämmung.....	45
Lage der Sporthalle	48
Orientierung und Neigung des Daches	49
Feuchtekritische Bereiche	50
Dachfläche.....	50
Ränder des Membrandaches	51
Wärmebrücken.....	53
Die Stahlträger im Luftzwischenraum	54
Bauphysikalische Anforderungen an Membrandächer.....	54
Anforderungen an den Wärme- und Feuchteschutz.....	55
Anwendbare Regelungen	55
Wärmeschutz	57
Anforderungen an den Wärmeschutz	57
Innentemperatur von Sporthallen	58
Normen	59
Membrandachfläche	59
Linienförmige Wärmebrücken.....	59
Punktförmige Wärmebrücken	59
Feuchteschutz	60
Normen	60
Vermeidung von Tauwasser und Schimmel auf der raumseitigen Oberfläche	60
Randbedingungen für die Berechnung	62
Schutz der Wärmedämmschicht vor Feuchtigkeit.....	63
Entwässerung	63
Dampfdiffusion.....	63
Verfahren zu Berechnung des Tauwasserausfalls im Bauteilinneren	65
Luftdichtheit / Lüftung	66
Tageslichtversorgung.....	67
Bauphysikalische Grundlagen	68
Wärmeübergang.....	68
Wärmeübergang an der Außenseite von Bauteilen	68
Wärmeübergang an der Innenseite von Bauteilen	68
Zusammenstellung der Angaben zu Wärmeübergangskoeffizienten	68
Äußerer Wärmeübergangskoeffizient	69

Innerer Wärmeübergangskoeffizient	70
Windstärken	71
Vergleich der Angaben zum äußeren Wärmeübergangskoeffizienten.....	71
Strahlungsabsorption und -emission	73
Absorptions- und Emissionsgrad, lang- und kurzwellige Strahlung	73
Solarstrahlung	74
Langwellige Strahlung und Himmelstemperatur.....	75
Berechnung der langwelligen Strahlung aus anderen Wettergrößen	76
Feuchteübergang und damit verbundener Wärmeübergang	77
Nicht-feuchteabsorbierende Oberflächen	80
Feuchteabsorbierende Oberflächen	80
Der Feuchteübergangskoeffizient	82
Für stationäre Berechnungen.....	82
Für dynamische Simulationen nach [Kuenzel94] und [Incropera13]	82
Nach [Willems07].....	84
Nach [DIN EN 15026].....	85
Vergleich der Angaben zum Feuchteübergangskoeffizienten	87
Der Wasserdampfdruck in der Luft	88
Der Wasserdampfdruck an einer Oberfläche.....	88
Der Wasserdampfsättigungsdruck	89
Potenzformel nach [DIN 4108], Teil 3 von 2001.....	89
Magnus-Formel	90
Antoine-Gleichung	90
Zusammenhang von Magnus-Formel und Antoine-Gleichung	91
Formeln als Funktion der absoluten Temperatur.....	92
Weitere Formeln zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks	93
Zusammenstellung	93
Fazit	97
Die Verdunstungs- / Sublimationsenthalpie	98
Zusammenhang von Verdunstungs- / Sublimationsenthalpie und Sättigungsdampfdruck.....	99
Die Schmelzenthalpie	104
Wasserdampfdiffusion in Luft	105
Wasserdampf in Baustoffen	109
Wasserdampfdiffusion in Baustoffen	109
Wasserdampfdiffusion durch Baustoffe	109
Verwendete Werte zur Berechnung des Wärme- und Feuchteübergangs.....	111
Äußerer konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	111
Feuchteübergangskoeffizient	112
Benutzte Formeln für den Sättigungsdampfdruck	112
Benutzte Formeln für Verdunstungs-, Sublimations- und Schmelzenthalpie	112
Materialeigenschaften	113
Datenlage	113
Membranen.....	114
Hygrische Eigenschaften	115
Dichtigkeit gegenüber flüssigem Wasser	115
Wasserdampfdurchlässigkeit.....	115
Benetzungsverhalten.....	116
Optische Eigenschaften	118
Übersicht optische Eigenschaften verschiedener Membranen	120
Alterung und Verschmutzung.....	123
Wärmedämmung	123

Hygrische Eigenschaften	123
Optische und thermische Eigenschaften.....	124
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	125
Materialdaten aus der Literatur für ähnliche Wärmedämm-Materialien und deren Anwendung auf Glasfasergespinst-Wärmedämm-Material	126
Die Wärmekapazität.....	126
Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl.....	126
Optische Eigenschaften	126
Unterspannbahn.....	129
Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d	130
Verschmutzung.....	131
Bemessungswerte und Messverfahren für thermische und hygrische Eigenschaften von Baustoffen	131
Randbedingungen	133
Außenklima / Wetterdaten	133
Verfügbare Wetterdaten	133
Klimaregionen in Deutschland	133
Statistiken für den Zeitraum 1961 bis 1990	133
Mittelwerte für den Zeitraum seit 1990.....	134
Testreferenzjahre von 1986.....	134
Testreferenzjahre von 2011.....	134
Verfügbarkeit.....	135
Testreferenzjahre 2010, Solarstrahlung und atmosphärische Gegenstrahlung	135
Testreferenzjahre und Winddaten	136
Testreferenzjahre und Regendaten	136
Testreferenzjahre in WUFI pro 5.3	136
WUFI-Testreferenzjahre und Regendaten	136
Verfügbarkeit der WUFI-Testreferenzjahre	137
Hygrothermische Referenzjahre in WUFI pro ab Version 6.0.....	139
Überprüfungen der HRY.....	140
Anpassung an das lokale Klima	141
Datenbasis	142
Überprüfung der Anpassungen	142
Verfügbarkeit.....	142
METEONORM-Wetterdaten	143
Regendatensätze nach [DIN EN ISO 15927], Teil 3	143
Wetterdaten für EnergyPlus.....	144
Weitere Datenquellen	144
Winddaten am Flughafen Nürnberg	144
Am Standort der Sporthalle gemessene Wetterdaten.....	144
Abschätzung der atmosphärischen Wärmestrahlung	145
Auswertung der verfügbaren Wetterdaten.....	146
Statistiken der Wetterdaten aus [DIN 4710]	146
Kombinationen von Lufttemperatur- und Luftfeuchtwerten	146
Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....	148
Statistiken für den Zeitraum seit 1990	149
Winddaten am Flughafen Nürnberg	149
Testreferenzjahre von 2010.....	151
Für den Standort der Sporthalle in Fürth angepasste Testreferenzjahre	151
Testreferenzjahre und Feuchtereferenzjahre aus WUFI.....	151
Auswahl des verwendeten Feuchtereferenzjahres	152

Vergleich der Lage der Standorte.....	152
Vergleich der Solarstrahlung der Standorte	154
Vergleich der Temperaturen der Standorte	156
Auswahl des verwendeten Feuchtereferenzjahres	158
Anpassung an den Standort und den bisherigen Klimawandel.	160
Anpassung an den Standort und den zukünftigen Klimawandel.	161
Anpassung an die Orientierung und Neigung des Daches	161
Klima im Membrandachzwischenraum.....	162
Innenraumklima	165
Methoden zur Ermittlung des Raumklimas.....	165
Soll- und Auslegungstemperatur in Sporthallen	165
Sinusverlauf der Temperatur und relativen Feuchte	166
Raumklima nach [DIN EN 15026] und [WTA_6-2-14/D]	168
Raumklima nach [DIN EN 15026] und [WTA_6-2-14/D] ohne obere Grenze	171
Raumklima nach [DIN EN ISO 13788] mit geschätztem Feuchteüberschuss	173
Berechnung des Raumklimas aus dem Nutzungsprofil, der Luftwechselrate und dem Gebäudevolumen etc.	177
Herleitung.....	177
Eingangsgrößen	180
Grundfläche und Volumen des Raumes	180
Der Volumenstrom der Lüftung	180
Raumtemperatur	180
Die Wasserdampfkonzentration der Außenluft	181
Die Wärme- und Feuchteproduktionsrate in der Halle	181
Belegungsdichte	183
Nutzungszeiten.....	184
Anfangswert für die Wasserdampfkonzentration im Raum	184
Ergebnisse	185
Vergleich dieser Raumklima-Modelle	196
Fazit	197
Ausblick	198
Temperaturschichtung in der Halle	198
Ausgewählte Wetterdatensätze für das Außenklima und das Raumklima	199
Erzeugte Wetterdatensätze für Simulationen	200
Inhalt der Wetterdatensätze	200
Zeitraum / Dauer der Datensätze.....	201
Wetterdaten für erhöhte Feuchtebelastung	202
Wetterdatensätze für „strenges“ Klima.....	202
TRY für warmen Sommer und kalten Winter.....	203
WUFI-Feuchtereferenzjahre für feuchteres Klima	203
Gemessene Wetterdaten eines relativ feuchten Jahres.....	204
Serien von normalen und kalten Hygrothermischen Referenzjahren.....	204
Hygrothermische Berechnungen	206
Abgrenzung dieser Studie gegen damit zusammenhängende Themen.....	206
Berechnungsverfahren	208
Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach [DIN EN ISO 6946].....	208
Der Wärmeübergangskoeffizient der inneren Luftgrenzschicht	209
Der Wärmeübergangskoeffizient der äußeren Luftgrenzschicht	209
Die Wärmedurchlasswiderstände massiver Bauteilschichten.....	210
Die Wärmedurchlasswiderstände von Luftschichten	211
Korrekturen für den U-Wert.....	212

Korrektur für Luftspalte in der Wärmedämmschicht	212
Anzahl der Durchdringungen	213
Abschätzung für den X-Wert einer Durchdringung	213
Beurteilung der Gefahr von Tauwasser und Schimmelbildung an raumseitigen Oberflächen ...	214
Der Temperaturfaktor f_{Rsi}	215
Beurteilung der Gefahr von Tauwasser im Bauteilquerschnitt	219
Glaser-Verfahren nach [DIN 4108], Teil 3	220
Glaser-Verfahren nach [DIN EN ISO 13788]	220
Beschränkungen des Glaser-Verfahrens	220
Kapillarwassertransport	220
Solarstrahlung	221
Luftleckagen	221
Luftspalte in der Wärmedämmung	221
Temperatur- und Feuchtegehaltsabhängigkeit der Materialdaten	222
Hygrothermische Simulationen	222
Allgemeines	222
Merkblätter und Normen zu hygrothermischen Simulationen	223
Simulationsprogramme	224
Die WUFI-Familie	224
Delphin	224
Weitere hygrothermische Simulationsprogramme	225
Multiphysics-Programme	225
Hinweise und Empfehlungen für hygrothermische Simulationen	226
Ziel der Untersuchungen	226
Sommer- und Winterkondensation	227
Start-Zeitpunkt der Simulation	227
Dauer der Simulation	227
Anfangsbedingungen	228
Wetterdaten	228
Innenraumklima	230
Luftleckagen	230
Solarstrahlung	231
Simulation der Schimmelpilzentwicklung	231
Berechnungen für die Dachfläche	232
Berechnungen für die äußere Membran	234
Wärme- und Feuchteströme an der äußeren Membran	234
Näherungen und Annahmen	234
Randbedingungen	235
Wetterdaten für den Außenraum	235
Wetterdaten für den Membrandach-Zwischenraum	235
Hygrothermische Berechnungen mit WUFI Pro 5.3	235
Anmerkung zu Begrifflichkeiten in WUFI	235
Bauteil-Aufbau	236
Orientierung und Neigung	236
Oberflächenübergangskoeffizienten	236
Außenseite	236
Langwelliger Strahlungswärmeaustausch	236
Absorptionsgrad und Albedo für Solarstrahlung	237
Innenseite	237
Anfangsbedingungen	237
Simulationszeitraum und Zeitschritt	237

Weiterverarbeitung der Ergebnisse mit Excel.....	238
Berechnung der Feuchteströme.....	238
Berechnung der Wasser- und Eisschichtdicken.....	239
Berechnung der Abtropfrate an der Unterseite der Membran.....	239
Zusammenstellung der Eingabedaten.....	240
Ergebnisse.....	241
Eigenes Berechnungsprogramm für die äußere Membran.....	242
Motivation.....	242
Kurzbeschreibung der Berechnungsmethode für die äußere Membran.....	243
Ausführliche Beschreibung der Berechnungsmethode.....	244
Annahmen und Näherungen.....	244
Orientierung und Neigung des Daches.....	244
Temperatur der Unterspannbahn.....	244
Äußeres und inneres Membrandach als planparallel.....	244
Ränder des Membrandaches.....	244
Stahlträger.....	244
Homogene Temperatur über die Dicke der äußeren Membran und ihre Wasser-, Eis- und Schneeschichten.....	244
Thermisches Gleichgewicht in jedem Zeitschritt.....	245
Membran absolut inert gegenüber Wasser.....	245
Niederschlag.....	245
Wärmekapazität des Niederschlages.....	245
Flüssig-fest-Phasenübergang.....	245
Verdunstungskühlung.....	246
Maximale Schichtdicken für Wasser.....	246
Übersicht über die einzelnen Beiträge zum Wärmestrom zur Membran / von der Membran.....	247
Ansatz.....	248
Wärmeströme an der Außenseite der Membran.....	249
Solarstrahlung.....	249
Langwelliger Strahlungsaustausch.....	249
Konvektiver Wärmeübergang von und zur Luft.....	250
Mit dem Feuchteübergang verbundener Wärmeübergang.....	251
Wärmeströme an der Innenseite der Membran.....	253
Solarstrahlung.....	253
Langwelliger Strahlungsaustausch.....	254
Konvektiver Wärmeübergang von und zur Luft.....	256
Mit dem Feuchteübergang verbundener Wärmeübergang.....	256
Lösung des Gleichungssystems.....	257
Ableitungen für die Außenseite der Membran.....	258
Ableitungen für die Innenseite der Membran.....	259
Verhalten von Membran, Wasser, Wasserdampf und Eis bei 0 °C.....	259
Fall 1: Kondensation und Eisbildung bei 0 °C Membrantemperatur.....	260
Fall 2: Eis schmilzt an den Membranoberflächen.....	261
Prüfung auf die Membrantemperatur kleiner, gleich oder größer als 0 °C.....	261
Berechnung für Membrantemperatur bei -0°C.....	262
Berechnung für Membrantemperatur bei +0°C.....	262
Entscheidung über das Berechnungsverfahren.....	262
Geteilte Zeitschritte.....	262
Implementierung.....	263
Programmiersprache und Entwicklungsumgebung.....	263

Bereitstellung der Eingabedaten	263
Wetterdaten	263
Angabe sonstiger Eingabedaten	263
Validierung des Programms	264
Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen mit WUFI und Excel mit den Ergebnissen des VBA-Programms	266
Summe des abtropfenden Wassers	286
Zusammenfassung	287
Kritische Betrachtung der Berechnungsmethode	288
Schlussfolgerungen für Simulationen des inneren Dachaufbaus	289
Berechnungen für den inneren Dachaufbau	290
Der Wärmedurchgangskoeffizient des inneren Dachaufbaus	290
Vorüberlegungen und Abschätzungen zu hygrischen Berechnungen	292
Vereinfachte hygrothermische Berechnung nach dem Glaser-Verfahren	292
Heat Pipe-Effekt in der Wärmedämmschicht	292
Absorption von Solarstrahlung in der Wärmedämmschicht	293
Schlussfolgerungen aus den Simulationen der äußeren Membran	294
Fazit	295
Ausblick	295
Verfahren nach [Koelsch16]	296
Erste Idee mit WUFI	296
Vorbereitung	296
Iterationen mit WUFI und eigenen Berechnungen	297
Zweite Idee mit WUFI	298
Dritte Idee mit Multiphysics-Simulationsprogramm	298
Literatur	299
Liste der Abbildungen & Bildquellen	317
Anhang A	325
Jahresverlauf	325
Nummerierung der Tage im Jahr	325
Winkel der Himmelsrichtungen	327
Anhang B	328
Physikalische Konstanten	328

Einleitung

Die Menschheit nutzt seit Jahrtausenden textile Materialien für Bekleidung, für technische Geräte (Windräder, Filter etc.) und auch für Behausungen (Überdachungen, Zelte). Einen Abriss der geschichtlichen Entwicklung gibt [Hoppe07] in seiner Einleitung.

Der moderne Membranbau wurde eingeleitet durch die Entwicklung der Kunststoffe und somit der Möglichkeit der Herstellung dauerhaft haltbarer Materialien [Knippers10]. Zunächst beschränkte sich die Verwendung dieser beschichteten Kunststoff-Membranen auf einlagige Überdachungen, meist für nicht beheizte Räume oder temporäre Bauwerke. Dabei wurden zeltartigen Konstruktionen seit der Antike als reine Funktionsbauten ohne weitere Bedeutung für die Architektur betrachtet [Knippers10]. Dies änderte sich erst ab ca. 1955 durch die aufsehenerregenden Membranbauten von Frei Otto [Knippers10] und weiteren Architekten, von denen in Deutschland die olympischen Sportstätten in München am bekanntesten sein dürften.

Seither hat sich auch der Membranbau weiterentwickelt. Es werden Membranen für besondere Anforderungen entwickelt, wie z.B. Transparenz und Transluzenz [Knippers10], und mehrlagige Aufbauten, um die Vorteile von Membranhüllen, ihr geringes Gewicht und ihr geringer Materialverbrauch, auch für klimatisierte Räume nutzen zu können. Hierfür wird im mitteleuropäischen Klima vor allem eine gute Wärmedämmung benötigt. Die seither gebauten Beispiele zeigen die Bestrebungen, Membranhüllen auch als vollwertige Gebäudehüllen zu etablieren [Haase11].

Darüber hinaus gibt es Bemühungen, Membranhüllen mit weiteren Eigenschaften oder Kombinationen von Eigenschaften auszustatten, wie z.B. gute Wärmedämmeigenschaften und Lichtdurchlässigkeit oder z. B. Transluzenz und Elektrizitätserzeugung mit Dünnschicht-Fotovoltaik. Weitere Beispiele werden in [Haase11] und in [Knippers10] genannt.

Für die dauerhafte Funktionstüchtigkeit von Gebäudehüllen sind in jedem Fall auch bauphysikalische Aspekte zu berücksichtigen. Aufgrund der Eigenschaften der im Membranbau verwendeten Materialien und der im Membranbau notwendigen konstruktiven Detaillösungen müssen die bauphysikalischen Aspekte speziell für den Membranbau neu untersucht werden.

Wichtig für die dauerhafte Funktionstüchtigkeit und für ein behagliches und hygienisches Raumklima ist, dass der Wand- und / oder Dachaufbau – egal ob herkömmlicher Aufbau oder aus Membranen bestehend – nicht dauerhaft durchfeuchtet wird.

Erfahrungen mit gebauten Beispielen von Gebäuden mit Membrandach oder Membran-Gebäudehülle zeigen, dass es immer wieder zu Problemen mit Feuchtigkeit innerhalb und an den Membranen kam. Dabei dürften es auch einige Fälle geben, bei denen Probleme auftraten, über die jedoch nichts bekannt wurde. (Vergleiche hierzu die Zusammenstellung von Membranbauten in [Haase11], Teil 2).

Die unterschiedlichen Ansätze, diese Probleme zu lösen ([Haase11], Teil 2), zeigen auch, dass es an Wissen, Erfahrungen, und Berechnungsmethoden mangelt, um während der Planungsphase den bestmöglichen Systemaufbau und die bestmöglichen Detaillösungen auszuwählen. Vor diesem Problem standen auch die Autoren von [Haase11], Teil 1, Vorwort.

Daher war das Ziel dieser Studie, zunächst zu untersuchen, wie die feuchtetechnischen Verhältnisse in Membranaufbauten berechnet und in der Planungsphase zumindest abgeschätzt werden können.

Projektbeschreibung

In Fürth, in der Nähe von Nürnberg, wurde in den Jahren 2014 bis 2017 eine Dreifeld-Sporthalle mit Umkleiden, Fitnessraum und Zuschauerbereich für ca. 500 Personen gebaut. Sie wird für den Schul- und Vereinssport genutzt. Eine Besonderheit der Sporthalle ist ihr geschwungenes Membrandach. Dieses Dach ist mit einer 40 cm starken Wärmedämmung ausgestattet und dennoch transluzent.

Der Bau der Sporthalle wurde durch die Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart wissenschaftlich begleitet. An die Fertigstellung der Halle schloss sich eine Monitoring-Phase an. Dabei wurden viele Größen kontinuierlich gemessen: Wetterdaten, Luftzustand im Membrandach-Zwischenraum etc. In der Halle selbst wurden zu ausgewählten Zeitpunkten die Luftbewegungen gemessen. Des Weiteren wurden die Tageslichtverhältnisse und die thermische Behaglichkeit im Innenraum untersucht.

Im Rahmen des Projektes wurde auch ein Planungsleitfaden für den Membranbau erstellt.

Eine detailliertere Beschreibung der Sporthalle und der verschiedenen Projektteile findet sich im Hauptbericht des Forschungsvorhabens. Der Planungsleitfaden steht auf der Projekt-Webseite der HFT Stuttgart zur Verfügung.

Link zur Projektseite der HFT Stuttgart:

<http://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Projekte/Projekt102.html/de>



Bild 1: Außenansicht der Sporthalle nach der Fertigstellung

Aufgabenstellung zu den feuchte- technischen Untersuchungen

Eine der Aufgaben der HfT Stuttgart innerhalb des Projektes „SoFt“ bestand darin, das geplante Membrandach feuchtetechnisch zu untersuchen. Dies betrifft die Wärmebrücken, die durch die Stützen zur Befestigung der inneren Membran und der Wärmedämmung entstehen, aber auch die Dachhaut in der Fläche des Membrandaches.

Die Wärmebrücken werden durch die thermische Entkopplung weitgehend entschärft. Aus diesem Grund und wegen der um ein Vielfaches größeren räumlichen Ausdehnung der Dachfläche wurde zunächst die Dachfläche feuchtetechnisch untersucht.

Vorgehensweise

Zunächst wurde anhand einer Literatur- und Internetrecherche der Stand des Wissens und die bisherigen Erfahrungen mit wärmegeprägten Membrandächern erkundet. ETFE-Folienkissen-Konstruktionen wurden hierbei nur berücksichtigt, soweit sie oder bestimmte Aspekte auch für Membrandächer mit Wärmedämmschichten interessant sind. Die Ergebnisse werden im nächsten Kapitel dargestellt.

Danach werden die Informationen, die für wärme- und feuchtetechnische Berechnungen und Bewertungen benötigt werden, in einzelnen Kapiteln zusammengefasst. Diese unterteilen sich in

- Die Wärme- und Feuchteschutz-Anforderungen an Bauteile im Allgemeinen und an Membrandächer im Besonderen
- Die Beschreibung des Dachaufbaus
- Überlegungen zu den möglicherweise auftretenden Problemen
- Unterteilung der Aufgabenstellung in Abschnitte des Membrandaches
- Die physikalischen Grundlagen zum Wärme- und Feuchtetransport
- Eigenschaften der verwendeten Materialien
- Die Randbedingungen, also das Außen- und das Innenraumklima

Die Darstellung der Berechnungen unterteilt sich in

- Die Voraussetzungen und Annahmen
- Die Darstellung der verschiedenen Berechnungsmethoden und Werkzeuge
- Die Berechnungen für die Membrandachfläche, unterteilt in
 - Berechnungen für die äußere Membran
 - Berechnungen für den inneren Dachaufbau

Stand des Wissens

Allgemeines zu Sporthallen

Anforderungen an Sporthallen

DIN 18032-1

[DIN 18032-1] gibt allgemeine Anforderungen an Sporthallen an. Im Bereich der Bauphysik nennt [DIN 18032-1] Anforderungen bezüglich

- der Tageslichtversorgung und der Beleuchtung,
- der Raumtemperaturen,
- der Rechenwerte für die Raumtemperaturen
 - für die Auslegung der Heizungsanlage nach DIN 12831 und
 - für den Energieausweis nach DIN V 18599,
- die Lüftung

Auf die einzelnen Aspekte wird in den entsprechenden Kapiteln eingegangen.

Tageslichtversorgung

Da in der Sporthalle in Fürth ein transluzentes Dach eingebaut wurde, seien hier zum Vergleich mit den optischen Materialwerten die Beleuchtungs-Anforderungen für Sporthallen, die in [DIN 18032-1] genannt werden, zusammengefasst.

In Sporthallen mit Oberlichtern sollte der Tageslichtquotient im Mittel 4 bis 10 % betragen. Dies würde für ein fast horizontales (Membran-) Dach bedeuten, dass das Dach 4 bis 10 % des darauf einfallenden sichtbaren Lichtes durchlassen sollte, falls keine weiteren Fenster vorhanden sind. Dieser Wert wird bei der Sporthalle in Fürth nicht erreicht. Da die Sporthalle aber auch eine Fensterfront besitzt, erhält sie auch durch diese Tageslicht.

Weitere, in [DIN 18032-1] und [VBG12] genannte Forderungen betreffen die gleichmäßige Verteilung des Lichtes in der Halle und die Streuung des Lichtes, um Blendwirkung und Schlagschatten zu vermeiden. Beide Kriterien werden durch die gleichmäßige Transluzenz des Daches sehr gut erfüllt.

Auf diesen Aspekt wird in dieser Studie nicht weiter eingegangen.

Eisporhallen

In Eisporhallen besteht die Besonderheit, dass der Fußboden im Allgemeinen kälter ist als die Luft in der Halle. Kondensation und Eisbildung durch Luftfeuchtigkeit am Hallenboden ist in diesem Fall kein Problem. Der kalte Hallenboden führt aber durch Strahlungsaustausch mit dem Dach der Halle dazu, dass die Temperatur der inneren Oberflächen des Hallendaches oft unter die Lufttemperatur der Halle sinkt. Vor Allem bei mildem Winterwetter führt dies zu Kondensation von Luftfeuchtigkeit am Dach mit allen negativen Folgen von abtropfenden, auf dem Eis gefrierenden und sogenannte Eispickel bildenden Wassertropfen, über Schimmelpilzbildung bis zu massiven Schäden an der Bausubstanz [Marquardt/Mainka08].

Auf die Besonderheiten von Eisporhallen wird in dieser Studie nicht weiter eingegangen. Es soll hier jedoch noch auf die für Eisporhallen geltende Norm [DIN 18036] hingewiesen werden.

Internet- und Literatur-Recherche

Ergebnisse der Internet- und Literatur-Recherche

Die Suche nach Internet- und Literaturquellen zum Thema <<Feuchte in Membrandächern mit Wärmedämmung>> ergab folgendes Bild:

- In den meisten Publikationen zu Membrandächern wird auf das Thema Feuchte im Dachaufbau nicht eingegangen, z. B. [Motro13].
- Einige Publikationen zu Membrandächern weisen lediglich darauf hin, dass auch Membrandächer unter feuchtetechnischen Gesichtspunkten zu untersuchen sind, z. B. in [Deinhammer11], [Zhang07], [Tian11]

[Knippers10] weisen darauf hin, dass Membrandächer nicht nur an den Befestigungspunkten der Membranen, die immer auch Wärmebrücken darstellen, zu untersuchen sind, sondern auch in der Membrandachfläche selbst. Zum einen müssen Stöße und Nähte dampfdicht ausgeführt werden. Zum anderen sind die verwendeten Membranen nicht dampfdicht.

- Manche Quellen befassen sich mit der Kondensat-Problematik in und an ETFE-Folienkissen, z. B. [Schmid09], Teil 2 und [Grunwald09], S. 59. Auf diese wird im Folgenden nur eingegangen, soweit das dort gesagte auch für die in dieser Studie betrachteten Membrandächer mit Wärmedämmung interessant ist.
- Nur wenige Publikationen gehen konkreter auf das Thema <<Feuchte in Membrandächern mit Wärmedämmung>> ein. Dies sind
 - [Schmid04], Teil 2 geht ausführlich auf die Feuchteproblematik in wärmegeprägten Membranbauten ein, erklärt die Zusammenhänge und gibt Empfehlungen.
 - [Schmid09], Teil 1 und Teil 2 befassen sich mit der Feuchteproblematik an und in Membrandächern mit Folienkissen. Die Folienkissen müssen ständig mit trockener Luft durchströmt werden. An den Randprofilen anfallendes Kondensat kann mittels Sammelschienen abgeleitet werden. Es wird auch auf die Gefahr von Schnee- und Wassersäcken hingewiesen, die sich bei nur flach geneigten oder horizontalen Dächern bilden können. Diese sind nicht nur ein feuchtetechnisches Problem, sondern können durch ihr Gewicht auch ein statisches Problem darstellen [Schmid09], Teil 1, S. 198.

- In einem Forschungsprojekt, das vom Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart mit einigen Projektpartnern bearbeitet wurde, wurden intelligente textile Fassadenelemente entworfen [Haase11], Teil 1. Im Projekt wurden zudem die Grundlagen zu textilem Bauen, wie z.B. eine Übersicht über die verfügbaren Materialien, erarbeitet. Das im Projekt erstellte und dem Bericht beiliegende Simulations-Tool zur Berechnung des Wärmedurchganges durch mehrschichtige Aufbauten, auch mit Luftzwischenräumen und transluzenten Lagen konnte nicht getestet werden, da es sich nicht ausführen ließ.

In einem zweiten Teil des Projektes wurde nach Beispielen von realisierten Bauwerken mit Membrandächern recherchiert. Diese werden auch unter bauphysikalischen Gesichtspunkten beschrieben. Darunter sind einige Bauten mit einlagigen Membrandächern, aber auch mehrere Bauwerke mit mehrlagigen Membrandächern, die mit einer Wärmedämmung ausgestattet sind. Der Bericht beschreibt 26 Bauwerke. Jedes Gebäude wird kurz vorgestellt mit Baujahr, Standort, Nutzung, Konstruktionsdetails und bauphysikalischen Aspekten, auch zum Thema Feuchte, sofern darüber Informationen vorlagen.

Bei der Erstellung dieser Übersicht standen die Autoren immer wieder vor dem Problem, dass es sehr schwierig war, detaillierte Informationen zu erhalten. Es existieren nur wenige Veröffentlichungen. Diese enthalten kaum Informationen zum bauphysikalischen Verhalten der Membrankonstruktionen und der Gebäude, so dass faktisch keinerlei Grundlagen zur bauphysikalischen Evaluierung von Membranbauten verfügbar waren. Ebenso waren nur wenige Materialdaten verfügbar. [Haase11], Teil 2, Vorwort. Diese Aussagen können nach den durchgeführten Internet- und Literatur-Recherchen nur bestätigt werden.

Die Autoren von [Haase11] führen diesen Umstand darauf zurück, dass das Wissen im Bereich Membranbau sich überwiegend auf privatwirtschaftliche Ingenieurbüros und Firmen konzentriert, die verständlicherweise nicht daran interessiert sind, ihr Know-how zu verbreiten.

In Bezug auf die vorliegenden Informationen zu den einzelnen Gebäuden geben [Haase11] zudem zu bedenken, dass bei der Erstellung der Bauwerke möglicherweise von der jeweils geplanten Ausführung abgewichen wurde, oder es kann sein, dass nachträglich Veränderungen vorgenommen wurden, ohne dass dies den Autoren der Übersicht bekannt wurde. [Haase11], Teil 2, Vorwort, S. 7.

- Eine Beschreibung einer rechnerischen Untersuchung zum Feuchteverhalten eines wärme gedämmten Membrandaches wurde bisher nur in wenigen Literaturstelle gefunden. [Marquardt/Mainka08] untersuchten Dächer von Eissporthallen durch Messungen der Temperaturen und Luftfeuchten. Eine der untersuchten Eissporthallen besitzt ein wärme gedämmtes Membrandach Die Autoren leiten auch Gleichungssysteme zur Berechnung der Temperaturen in den Dachaufbauten her. Die Herleitung der Gleichungssysteme geht von ausgeglichenen Energiebilanzen an verschiedenen Stellen im Dachaufbau aus. D. h. die Gleichungssysteme gelten für konstante Randbedingungen. Die latente Wärme durch kondensierendes Wasser wird in den angegebenen Gleichungen berücksichtigt. Da diese jedoch nicht quantifiziert werden konnte, wurde sie in den durchgeführten Berechnungen vernachlässigt. Für die Solarstrahlung wurden mittlere Werte nach [DIN 4710] angesetzt. Trotz dieser Näherungen zeigen die Ergebnisse bei den dargestellten Wochenmittelwerten gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen Sowohl die Messungen wie auch die für verschiedene Randbedingungen berechneten Temperaturen zeigen, dass durch die Abstrahlung an die kalte Eisfläche die Temperatur der inneren Oberfläche des Dachaufbaus fast immer unter die Lufttemperatur fällt und somit die Gefahr von Kondenswasserbildung besteht. Besonders stark ist der Effekt bei milder Witterung.

Bisher gebaute Gebäude mit wärmegeämmten Membrandächern

Zusammenstellung von Membrandachbauten im Projekt [Haase11]

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Kurzübersicht über alle 26 im Bericht vorgestellten Gebäude. Im Anschluss werden für viele dieser Gebäude die wichtigsten Daten zusammengefasst, speziell derjenigen Gebäude, die ein mehrlagiges Membrandach mit einer Wärmedämmschicht besitzen, deren Dachaufbau also mit dem Aufbau des Daches der Sporthalle in Fürth vergleichbar ist. Diese Informationen wurden an manchen Stellen durch Angaben aus [Knippers10], S. 217/218 ergänzt. Gelb markierte Zellen enthalten speziell Aussagen zur Feuchteproblematik.

Die Membrandächer mit Wärmedämmung werden alle belüftet, teils einfach durch natürliche Belüftung, teilweise durch mechanische Belüftung und teilweise auch mit konditionierter Luft. Bei manchen Dächern wurde die Wärmedämmung gänzlich in Folie eingeschweißt, um sie vor Feuchtigkeit zu schützen. Beim neuen Membrandach der Olympia-Sporthalle in München wurde dies auch zunächst geplant. Doch die ausführende Firma sah sich nicht in der Lage, die Vielzahl von Schweißverbindungen dauerhaft dampfdicht herzustellen. Im jetzigen Aufbau wird die Wärmedämmschicht selbst mit erwärmter Luft durchströmt, um diese vor kondensierender Feuchtigkeit zu schützen.

Auf die Schwierigkeiten, Membrankonstruktionen und allgemein Leichtbauwerke dampfdicht herzustellen, weisen mehrere Autoren hin. [Haase11], Teil 2 zitieren folgenden Satz aus [Gesamthochschule_Essen_Fach_Konstruktive_Gestaltung79-85], Teil 5:

„„Mehrschalige Konstruktionen dampfdicht auszuführen ist praktisch nicht möglich.“

Im Gebäudebetrieb trat an vielen der Membrandächer Kondensation auf. Teilweise führte dies zu Schäden, teilweise wird die Kondensatbildung bewusst akzeptiert und das Kondenswasser abgeleitet.

Tabelle: In [Haase11] vorgestellte, untersuchten Gebäude

Nr.	Name	Standort	Jahr der Fertigstellung	Nutzung	ÜGF [m²]	Außenmembran	Innenmembran	Wärmedämmung	Transluzenz [%]
1	Olympia-Schwimmhalle	München	1972	Schwimmbad	8200	Seilnetz mit Acrylglas	PES/PVC-beschichtet	Mineralwolle, nach Umbau PES-Vlies	0 bis 2
2	Cuppamare	Kuppenheim	1978	Schwimmbad	1600	PES/PVC-beschichtet, + 4 Membranlagen mit Durchlüftung	PES/PVC-beschichtet	Teflonfolie als Luftpolster, 3-lagig	0
3	TOM Dortmund	Dortmund	1978	Eisbahn, jetzt Diskothek	2300	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	PES/PVC-beschichtet	Mineralwolle 20 mm, nach Umbau 80 mm	0
4	Denver International Airport	Denver, USA	1994	Flughafen	23250	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasgewebe / PTFE-beschichtet Akustikmembran	-----	10
5	Kurklinik Masserberg	Masserberg	1994	Freizeitbereich und Schwimmbad	3300	PES/PVC-beschichtet	PES/PVC-beschichtet	Mineralwolle 2 * 80 mm	0
6	Buddy Holly Musical Dome	Hamburg	1994	Musical Dome	5000	PES/PVC-beschichtet	PES/PVC-beschichtet	-----	0
7	Gaudi Musical Dome	Köln	1996	Musical Dome	4000	PES/PVC-beschichtet	PES/PVC-beschichtet	Mineralwolle 160 mm	0
8	Odate Jukai Dome Prak	Odate, Japan	1997	Stadion	21911	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	-----	
9	Millenium Dome	Greenwick, Großbritannien	1998	Veranstaltungs-gebäude	80425	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	-----	12
10	Tabaluga Musical-Theater	Oberhausen	1999	Musical Dome	4560	PES/PVC-beschichtet	PES/PVC-beschichtet	Mineralwolle 150 mm	0
11	Kulturzentrum Puchheim	Puchheim	1999	Veranstaltungsgebäude	1000	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Mineralwolle 180 mm	0
12	Atriumsüberdachung Schöllerbank	Wien, Österreich	2000	Atrium	270	ETFE	ETFE	-----	
13	Tegut	Fulda	2000	Supermarkt	1837	PES/PVC-beschichtet	PES/PVC-beschichtet	Vlies	0
14	Storek	Leonberg	2000	Ausstellungsraum	900	PES/PVC-beschichtet	Glasgewebe / Silikon-beschichtet	PES-Vlies 80 + 40 mm	0
15	Cargolifter Halle / Tropical Island Resort	Brand	2000	Werfthalle / Tropischer Freizeitpark	66000	PES/PVC-beschichtet + PES/PVC-beschichtet	PES/PVC-beschichtet + PES/PVC-beschichtet	-----	2
16	Eden Project	St. Austell, Cornwall, Großbritannien	2001	Gewächshaus	22140	ETFE	ETFE	-----	95
17	Festo Technologiezentrum	Esslingen	2001	Atrium		ETFE	ETFE	-----	
18	TMZ Erfurt	Erfurt	2001	Bürogebäude		Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasespinnst 100 mm	15-20
19	Villa Arena	Amsterdam, Niederlande	2001	Atrium	3890	ETFE	ETFE	-----	
20	Parkbad Velbert	Velbert	2002	Schwimmbad	700	PES/PVC-beschichtet mit PVDV	PES/PVC-beschichtet mit Acryl	PES-Vlies 2 * 120 mm	0
21	Papageno Kindertheater	Frankfurt	2003	Theater	630	PES/PVC-beschichtet	PES/PVC-beschichtet	Mineralwolle 1000 mm	
22	Allianz Arena	München	2005	Stadion		ETFE	ETFE	-----	
23	New Bangkok Airport	Bankok, Thailand	2005	Flughafen	10800	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasgewebe / Silikon-beschichtet	-----	2
24	Stadion Z	Sachsenhausen	2005	Gedenkstätte		Glasgewebe / PTFE-beschichtet	Glasgewebe / PTFE-beschichtet	-----	
25	Modern Teaehouse	Frankfurt	2007	Teehaus		PTFE-Gewebe / Fluor-Folie	PTFE-Gewebe / Fluor-Folie	-----	38
26	Schulungszentrum der Bergwacht Bayern	Bad Tölz	2008	Schulung, Training		ETFE	ETFE	-----	

Die untersuchten Gebäude im Einzelnen

Olympia-Schwimmhalle München

Die Schwimmhalle wurde für die olympischen Sommerspiele im Jahr 1972 erbaut. Damals waren die Dächer der Olympia-Bauten spektakulär. Das Dach der Schwimmhalle sollte für die Fernseh-Übertragungen transluzent sein. Daher fiel die Entscheidung auf plissierte PE-Folie als Wärmedämmung. Bereits 1974 wurde das Dach saniert und die Wärmedämmung ersetzt, da diese den hohen Temperaturen im Membrandach nicht standhielt.

Aufgrund des Einflusses von Feuchte und chlorhaltiger Luft wurde eine erneute Sanierung notwendig, welche in den Jahren 2003 – 2006 erfolgte. Verschiedene Dachaufbauten wurden vorgeschlagen und bauphysikalisch und finanziell bewertet. [Haase11], Teil 2, S. 11. Man entschied sich für eine aufwändige, aber feuchtetechnisch sehr sichere Variante.



Bilder 2 und 3 : Olympia-Schwimmhalle München

Olympia-Schwimmhalle München, 1. Dachaufbau	
Baujahr	1972
Nutzung	Schwimmbad
Standort	München
äußere Membran	Seilnetz mit Acrylglas-Platten
Luftzwischenraum	bis zu 1 m, natürlich belüftet
Abdeckung der Wärmedämmung	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Wärmedämmung	plissierte Folie, 14 cm
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Membrandach-Rand	Acrylglas-Schürze [Knippers10]
Bemerkungen	Transluzenz (war wichtig für Fernsehübertragung) plissierte Folie nicht hitzebeständig bei 100 °C
Feuchteprobleme	Kondensat an Aufhängungen und Durchdringungen

Olympia-Schwimmhalle München, 2. Dachaufbau	
Renovierung	1974
äußere Membran	Seilnetz mit Acrylglas-Platten
Luftzwischenraum	bis zu 1 m, natürlich belüftet
Abdeckung der Wärmedämmung	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Wärmedämmung	PES-Foliendämmung oder Mineralwolle (unklare Angabe), + Mineralwolle, 8 cm
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Bemerkungen	(praktisch) opak
Feuchteprobleme	Kondensat an Aufhängungen und Durchdringungen

Olympia-Schwimmhalle München, 3. Dachaufbau, nicht ausgeführte Variante	
Renovierung	2003 - 2006
äußere Membran	Seilnetz mit Acrylglas-Platten
Luftzwischenraum	bis zu 1 m, natürlich belüftet
Abdeckung der Wärmedämmung	Polyestervlieskissen eingeschweißt in ETFE-Folie
Wärmedämmung	Polyestervlies, 7 cm
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Bemerkungen	Anzahl der Anschlüsse und Durchdringungen stark reduziert
Feuchteprobleme	Zweifel an der Herstellbarkeit von dauerhaft genügend dampfdichten Anschlüssen und Durchdringungen

Olympia-Schwimmhalle München, 3. Dachaufbau, ausgeführte Variante	
Renovierung	2003 - 2006
äußere Membran	Seilnetz mit Acrylglas-Platten
Luftzwischenraum	bis zu 1 m, natürlich belüftet
Abdeckung der Wärmedämmung	ETFE-Folie
Wärmedämmung	Polyestervlies, 7 cm, entlang der Dämmstoff-Ebene durchströmt mit warmer Luft
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Membrandach-Rand	ETFE-Schlauch, belüftet mit Überdruck, nimmt Bewegungen bis 1.5 m auf [Knippers10]
Bemerkungen	Anzahl der Anschlüsse und Durchdringungen stark reduziert, nur noch leicht transluzent



Bild 4: Olympia-Schwimmhalle München

Cuppamare

Cuppamare (Traglufthalle)	
Baujahr	1978, abgerissen 2000 nach starken Sturmschäden
Nutzung	Hallenbad
Standort	Kuppenheim
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Luftzwischenraum	ja, mit Abstandshaltern, im Sommer durchströmt als sommerlicher Wärmeschutz
Abdeckung der Wärmedämmung	3 Lagen ETFE_Folie mit Abstandshaltern
Wärmedämmung	
Luftzwischenraum	ja, mit Abstandshaltern, im Winter durchströmt als Wärmeschutz mit einer Mischung aus Luft aus der Halle und Frischluft
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Feuchteprobleme	nach Aussagen der Stadt Kuppenheim: Schimmel durch Kondensat (nicht schriftlich belegt)

TOM Dortmund

TOM	
Baujahr	1978, äußere Membran und Dämmung erneuert in 2004
Nutzung	Eislaufbahn, jetzt Diskothek
Standort	Dortmund
äußere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
Luftzwischenraum	50 - 60 cm, mechanisch belüftet, Entwässerung von Kondenswasser an der Berandung
Abdeckung der Wärmedämmung	Glasfasergewebe, nicht beschichtet
Wärmedämmung	Mineralfaser, 5 cm, beidseitig versteppt mit unbeschichtetem Glasfasergewebe, später ersetzt durch Polyestervlies 8 cm
Lage unter der Wärmedämmung	Glasfasergewebe, nicht beschichtet
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Feuchteprobleme	keine bekannt
Einschätzung von [Haase11]	vermutlich Kondensat-Probleme bei Nutzung als Diskothek

Kurklinik Masserberg



Bild 5: Kurklinik Masserberg

Kurklinik Masserberg	
Baujahr	1994
Nutzung	Freizeitbereich mit Schwimmbad und Sporthalle
Standort	Masserberg, 800 m über NN
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Luftzwischenraum	mindestens 50 cm, belüftet, über dem Schwimmbad mechanisch belüftet mit konditionierter Luft [Knippers10]
Abdeckung der Wärmedämmung	Unterspannbahn war vorgesehen, wurde aber nicht eingebaut
Wärmedämmung	2 * Mineralwolle 8 cm, versetzte Fugen, auf "Nadeln" aufgesteckt
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
U-Wert berechnet	0.24 W / (m ² K)
Bemerkungen	Membrandachrand mit gefalteter Membran, teilweise mit gefaltetem Gittergewebe
Feuchteprobleme	sehr bald: feuchte Luft aus Schwimmbad (mit Überdruck) und evtl. aus Konzerthalle führte zu Kondensat an äußerer Membran, Abtropfen und Durchnässen der Wärmedämmung Nach Beseitigung der Ursachen keine weiteren Probleme bekannt; Gittergewebe am Rand: Schnee drang ein, schmolz und durchnässte die Dämmung

Buddy Holly Musicaltheater, heute Stage Theater im Hafen Hamburg



Bild 6: Stage Theater Hamburg

Buddy Holly Musical Dome	
Baujahr	1994, geplant als temporärer Bau für 2 Jahre, umgebaut in 2000
Nutzung	Veranstaltungshalle für Vorführungen
Standort	Hamburg
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Luftzwischenraum	25 - 75 cm, mechnisch belüftet, bei Außentemperaturen unter -3°C: Umluftbetrieb mit Luft aus der Halle, diese evtl. geheizt, um Eis an äußerer Membran zu vermeiden; normale Winterschaltung: Belüftung mit Luft aus dem Innenraum, evtl. teils mit Frischluft; Kondensation an äußerer Membran wird akzeptiert und abgeleitet
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Feuchteprobleme	Ausage des technischen Leiters: Keine Probleme an innerer Membran, selten Kondensation im Zwischenraum
Bemerkungen	durch Membranen verschlossene Ränder des Zwischenraumes, aber mit Entwässerungsöffnungen und Reißverschlüssen für Revisionen

Gaudi Musical Dome in Köln



Bild 7: Gaudi Musical Dome, Köln

Gaudi Musical Dome	
Baujahr	1996
Nutzung	Veranstaltungshalle für Vorführungen
Standort	Köln
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Luftzwischenraum	35 - 235 cm, mechanisch belüftet, Lüftungskonzept wie bei Buddy Holly Musical Dome
Abdeckung der Wärmedämmung	Wärmedämmung eingeschweißt in PVC-beschichtetes PES-Gewebe
Wärmedämmung	Steinwolle, 15 - 16 cm
Lage unter der Wärmedämmung	Wärmedämmung eingeschweißt in PVC-beschichtetes PES-Gewebe, an innere Membran geschweißt
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
U-Wert berechnet	0.231 W / (m ² K)
Bemerkungen	äußere Membran dunkelblau, hohe Temperaturen der Membranen (welche Temperatur und welche Membran nicht angegeben)
Feuchteprobleme	keine bekannt

Odate Jukai Dome Park



Bilder 8 und 9: Odate Jukai Dome Park

Odate Jukai Dome Park	
Baujahr	1997
Nutzung	Sportstätte, klimatisiert
Standort	Odate, Japan, schneereiches Klima
äußere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
Luftzwischenraum	mechanisch belüftet, Luft konditioniert, auch zum Abschmelzen von Schnee
innere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
Bemerkungen	Kühlung durch Wasserverdunstung (auf der äußeren Membran?), Lichttransmission 8 %
Feuchteprobleme	keine Angaben

Tabaluga Musical Theater



Bilder 10 und 11: Stage Metronom Theater im Jahr 2004 und im Jahr 2015

Die Halle heißt jetzt „Stage Metronom Theater“. Ab Juni 2015 wurden an der Dachkonstruktion umfangreiche Renovierungsarbeiten durchgeführt. Die ursprüngliche, grüne Membran wurde ersetzt durch eine silberfarbene Membran (Foto rechts).

Tabaluga Musical Theater	
Baujahr	1999
Nutzung	Veranstaltungshalle für Vorführungen
Standort	Oberhausen
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Luftzwischenraum	25 cm, natürlich belüftet, Lüftungsöffnungen unten und oben
Abdeckung der Wärmedämmung	Membran, dampfdicht
Wärmedämmung	Mineralwolle, 15 cm, eingeschweißt, Kissen miteinander verschweißt, aufgelegt
Lage unter der Wärmedämmung	Membran, dampfdicht
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Feuchteprobleme	keine bekannt

Bürgerzentrum Puchheim

Bürgerzentrum Puchheim	
Baujahr	1999
Nutzung	Veranstaltungshalle
Standort	Puchheim
äußere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
Luftzwischenraum	15 cm, belüftet
Abdeckung der Wärmedämmung	Drahtnetz, aufkaschiert für mechanische Stabilität und Verbindung der Dämmbahnen
Wärmedämmung	Mineralfaser, 18 cm (8 + 10 cm, [Knippers10])
Lage unter der Wärmedämmung	Membran, Dampfsperre
Lage unter der Wärmedämmung	sandgefülltes Distanzgewebe für Schallschutz, 2 mal, je 20 mm [Knippers10]
Luftzwischenraum	keine weitere Angabe
innere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
U-Wert	0.2 W / (m ² K) [Knippers10]
Bemerkungen	Gitternetz am Rand des Zwischenraumes
	Glasfasergespinst als Wärmedämmung wurde wegen Brandschutz nicht zugelassen
Feuchteprobleme	keine bekannt
Einschätzung durch [Haase11]-Autoren	Unterspannbahn auf Wärmedämmung würde diese vor abtropfendem Wasser schützen

Tegut Verbrauchermarkt

Tegut Verbrauchermarkt	
Baujahr	1998
Nutzung	4 getrennte Bauwerke, Lebensmittelmarkt, Getränkemarkt
Standort	Petersberg
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Luftzwischenraum	natürlich belüftet
Wärmedämmung	Vlies, keine weiteren Angaben
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Bemerkungen	Gitternetz am Rand des Zwischenraumes
Feuchteprobleme	keine bekannt

Storek-Varia Verkaufsgebäude

Storek-Varia Verkaufsgebäude	
Baujahr	2000
Nutzung	Ausstellungsräume, Möbelhaus
Standort	Leonberg
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet, außen zusätzlich Polyvinylidenfluorid
Luftzwischenraum	natürlich belüftet, nur oben, teilweise vorbeiströmende Luft aus dem Innenraum
mittlere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Wärmedämmung	Polyestervlies, 8 cm, zunächst einlagig, teilweise verstärkt um 3 - 4 cm im Jahr 2002, an mittlere Membran geschnürt
Lage unter der Wärmedämmung	Dampfsperre (DeltaFol Reflex der Firma Ewald Dörken) eingebaut in 2002
innere Membran	Glasgewebe, Silikon-beschichtet
Feuchteprobleme	Kondenswasser und Eis an äußerer Membran, an mittlerer Membran, Kondenswasser sammelte sich unten an wegen ungenügender Entwässerung
	Eindringen von Dampf vom Innenraum in die Wärmedämmung, Kondensation an mittlerer Membran, verstärkt durch sich bildende Spalte zwischen Dämmplatten, Durchfeuchtung der Wärmedämmung
	Kondenswasser und schmelzendes Eis drang durch Undichtigkeiten, Schädigung der hölzernen Auflagerbalken

Technologie- und Medienzentrum Erfurt

Technologie- und Medienzentrum Erfurt	
Baujahr	2001
Nutzung	Erschließungsbereiche Verwaltungsgebäude
Standort	Erfurt
äußere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
Luftzwischenraum	nein, da Innenraum der Erschließungszone stark durchlüftet
Wärmedämmung	Glasfasergespinnst, 10 cm, eingeschweißt und auf die inneren Membran geschweißt
innere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
Bemerkung	keine Unterspannbahn
Feuchteprobleme	keine Angaben

Parkbad Velbert

Parkbad Velbert	
Baujahr	2002
Nutzung	Schwimmbad
Standort	Velbert
äußere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet
Luftzwischenraum	bis zu 1 m, natürlich belüftet, Luftgeschwindigkeit 0.5 - 5 m/s, Gittergewebe im Randabschluss des Luftzwischenraumes
Abdeckung der Wärmedämmung	Unterspannbahn, s_d -Wert 8 cm
Wärmedämmung	Polyestervlies, 24 cm, zweilagig, aufgeschnürt
innere Membran	PES-Gewebe, PVC-beschichtet, s_d -Wert 9 m
Bemerkung	alle Lagen entwässert für zeitweilig auftretendes Kondenswasser
	zu geringes Schalldämm-Maß des Daches
Feuchteprobleme	keine bekannt

New Bankok Airport

New Bankok Airport	
Baujahr	2005
Nutzung	Flughafen-Verbindungshallen
Standort	Bangkok, Thailand (Temperatur ganzjährig 25°C - 35°C, hohe solare Einstrahlung, vergleichbar mit Hochsommerwetter in Deutschland)
äußere Membran	Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet
Luftzwischenraum	mit Seilnetz mit 6mm-Polycarbonatplatten für Schallschutz, wird bis zu 50°C warm
innere Membran	Glasfasergewebe, solafionbeschichtet, innen low-e-beschichtet, offenporig
Bemerkung	Hier ging es bei der Auswahl des Aufbaus vor allem um Schallschutz und "sommerlichen Wärmeschutz"
	Transluzenz des Gesamtaufbaus: 2 %
	Temperierung der Hallen: Fußbodenkühlung
	keine Entwässerung innen: Kondensation an Innenseite der Mittellage laut Berechnungen nur bei >35°C / >70% rF außen und <26°C / 40% rF innen (=sehr unwahrscheinlich)
Feuchteprobleme	keine Angaben

Modern Tea House

Modern Tea House	
Baujahr	2007
Nutzung	Veranstaltungshalle, Kunstwerk
Standort	Frankfurt
äußere Membran	Fluorkunststofffasern und Fluorfolien
Luftzwischenraum	beleuchtet, Kunststoffseile für mechanische Stabilität, Überdruck bis 22 mbar mit gefilterter und getrockneter Luft
innere Membran	Fluorkunststofffasern und Fluorfolien
Bemerkung	Transluzenz 38 %,
Feuchteprobleme	keine Angaben

Fazit aus den dokumentierten Praxiserfahrungen

Dächer und Gebäudehüllen aus Membranen sind immer noch eine Seltenheit. Entsprechend wenig Erfahrungen und vor allem dokumentierte Praxiserfahrungen gibt es hierzu. An den in [Haase11] vorgestellten Gebäuden zeigt sich, dass in der Planungspraxis mit dem Thema Feuchtigkeit in Membrandächern sehr unterschiedlich umgegangen wird. Die Membrandächer werden zwar alle belüftet, jedoch auf sehr unterschiedliche Weise: Manche Dächer werden nur natürlich belüftet. Der andere Extremfall ist das neue Dach der Olympia-Schwimmhalle in München, bei der ein sehr hoher Aufwand betrieben wird, um die Wärmedämmschicht vor Feuchtigkeit zu schützen.

Entsprechend groß ist die Bandbreite der Betriebserfahrungen mit den Gebäuden von massiven Feuchteschäden bis zu Gebäuden ohne jegliche Probleme. Es ist jedoch zu bedenken, dass aus der Tatsache, dass den Autoren des Berichtes keine Informationen über Feuchteprobleme vorlagen, nicht zwingend daraus geschlossen werden kann, dass es keine Probleme mit Feuchtigkeit gibt. Es zeigte sich am Beispiel „Cuppamare“, dass Feuchteprobleme nicht unbedingt schriftlich dokumentiert werden.

Daran, wie unterschiedlich in der Planungspraxis mit dem Thema Feuchtigkeit in Membrandächern umgegangen wird, zeigt sich, dass das Thema schon lange als möglicher Problempunkt gesehen wird. Die Lösungsansätze scheinen jedoch eher auf dem Trial-and-Error-Prinzip zu beruhen als auf wissenschaftlich fundierten Erkenntnissen. Dies zeigt, dass hier noch großer Forschungs- und Informationsbedarf besteht.

Weitere Gebäude mit Membrandächern

Andreas-Peter-und-Paul-Kirche in Maassluis, Niederlande

[Motro13], S. 144 – 149 stellen diese Kirche aus dem Jahr 2007 vor mit kurzer Beschreibung des Dachaufbaus.

Die innere und die äußere Membran sind an den Stahlträgern befestigt. An den Rändern verbinden Membranlappen die beiden Membranen, so dass die Stahlträgerstruktur gänzlich von den Membranen umhüllt ist. Auf der inneren Membran befindet sich eine Wärmedämmschicht. Der 40 cm bis ca. 2 m hohe Luftzwischenraum zwischen den Membranschichten wird belüftet. Weitere Informationen zu bauphysikalischen Aspekten werden nicht gegeben.



Bilder 12 bis 14: Andreas-Peter-und-Paul-Kirche in Maassluis, Niederlande

Mehrlagige Test-Membranaufbauten, Messergebnisse

Im Projekt von [Haase11] wurden auch Messungen an Testaufbauten von verschiedenen, mehrlagigen Membranaufbauten durchgeführt. Dabei wurden deren U-Werte und deren optische Eigenschaften bestimmt.

Die untenstehende Tabelle zeigt die verschiedenen Aufbauten mit einigen der Messwerte und daraus berechneten Werten.

Die konvektiven Wärmeübergangswiderstände wurden von [Haase11] zu $4,64 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und $5,55 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bestimmt für die Kaltseite und die Warmseite. Der radiative Wärmeübergang wurde von [Haase11] in der Auswertung aufgrund der Art des Messaufbaus nicht berücksichtigt. In der Tabelle unten werden diese berechnet anhand der Oberflächentemperaturen und angenommener Emissivitäten der Oberflächen von 0,85. Aus dem in der Messung ermittelten U-Wert wird der Wärmewiderstand des Membranaufbaus ohne die Luftgrenzschichten berechnet (Spalte „Wärmewiderstand der Schichten“) und mit den Norm-Wärmeübergangswiderständen der U-Wert berechnet nach [DIN EN ISO 6946].

Des Weiteren wurde die Tabelle durch die Ergebnisse der optischen Messungen an den Membranaufbauten ergänzt.

Fazit

Die direkte Gegenüberstellung der wärmetechnischen und optischen Eigenschaften der verschiedenen Membranaufbauten zeigt deutlich: Das Ziel, mit Membranen leichte Gebäudehüllen zu entwickeln, die den bauphysikalischen Anforderungen in Bezug auf den Wärmeschutz genügen und dennoch den zusätzlichen Vorteil der Tageslichtnutzung bieten, ist noch nicht erreicht.

Diejenigen Membranaufbauten mit einigermaßen guten Wärmedämmeigenschaften (grün hinterlegt) lassen praktisch kein Licht durch (rot hinterlegt). Andererseits zeigen die Membranaufbauten mit guter Transmission (grün hinterlegt) schlechte U-Werte (rot hinterlegt), die denen von veralteten Doppelverglasungen mit Luftfüllung und ohne Low-e-Beschichtung vergleichbar sind. Mittlere Werte bei der Strahlungstransmission von ca. 18 % und auch mittlere U-Werte von ca. $1,6$ bis $1,7 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ zeigen die Aufbauten mit ETFE-Folien und Glasfasergespinnst als Wärmedämmung. Dieser Transmissionsgrad erscheint zunächst niedrig, hat aber schon deutlichen Einfluss auf die Beleuchtung des Bauwerkes.

Beim Vergleich mit bekannten opaken Bauteilen einerseits und mit Verglasungen andererseits, muss man jedoch auch bedenken, dass die Membranbau-Technologie eine noch junge, noch nicht ausgereifte Technik ist, in der sicher noch einiges Entwicklungspotential steckt.

Tabelle: Eigenschaften verschiedener Membranbauteile
Datenquelle: [Haase11], S. 49 und S. 64; eigene Berechnungen

Aufbau	Lagen	Temperatur [°C]			
		Warm, Raum	Warm OF	Kalt OF	Kalt, Raum
REF 001	EPS, 50 mm	42,20	41,04	7,00	8,06
001	ETFE, 10 mm Luft, 100 mm PES- Vlies, 10 mm Luft, ETFE	38,61	37,88	84,00	6,90
002	ETFE, 32 mm Abstandsgewebe, Transluz. PVC (Verseidag B1014)	40,74	38,03	14,92	10,84
003	ETFE, 10 mm Luft, auf 5 mm komprimiertes GF-Gespinst zwischen 2 Lagen Gittergewebe, 10 mm Luft, ETFE	40,42	38,32	14,37	9,64
004	ETFE, 10 mm Luft, unkomprimiertes (75 mm) GF-Gespinst zwischen 2 Lagen Gittergewebe, 10 mm Luft, ETFE	39,85	38,72	11,57	8,72
005	ETFE, 35 mm Luft, auf 5 mm komprimiertes GF-Gespinst zwischen 2 Lagen Gittergewebe, 35 mm Luft, ETFE	40,47	38,07	14,85	9,15
006	ETFE, 12 mm Luft, ETFE	39,59	33,56	20,07	11,53
007	PVC/PES (B1015), 12 mm Luft , PVC/PES (B1015)	38,31	33,38	19,04	11,39
008	PVC/PES + low-e (B1015), 12 mm Luft, PVC/PES + low-e (B1015); Low-e-Schichten zum Zwischenraum	40,94	36,46	16,05	9,91

Emmisivität der Umgebungen 0,85
 Emmisivität der Proben 0,85
 Stefan-Boltzmann-Konstante [W/(m² K⁴)] 5,67E-08

Wärmefluss [W/m ²] (Wärmefluss-Messplatte)	U-Wert [W/(m ² K)] aus Messwerten	radiativer Wärmeübergangs- koeffizient, Warmseite [W/(m ² K)]	radiativer Wärmeübergangs- koeffizient, Kaltseite [W/(m ² K)]	Wärmewiderstand der Schichten [(m ² K)/W]	U-Wert [W/(m ² K)] nach [DIN EN ISO 6946]	VIS			UV/VIS/NIR		
						Reflexion	Absorption	Transmission	Reflexion	Absorption	Transmission
23,02	0,674	3,438	3,397	1,247	0,706						
14,70	0,464	3,430	5,077	1,943	0,473	0,738	0,2604	0,0021	0,718	0,2785	0,0035
53,52	1,790	3,467	3,494	0,325	2,021	0,608	0,3431	0,049	0,586	0,3591	0,056
44,21	1,436	3,456	3,506	0,462	1,581	0,526	0,3001	0,1744	0,48	0,3373	0,1825
45,78	1,471	3,438	3,470	0,445	1,625	Messung nicht möglich					
49,19	1,571	3,462	3,524	0,403	1,744	0,526	0,3001	0,1744	0,48	0,3373	0,1825
75,24	2,681	3,531	3,579	0,141	3,214	0,133	0,0325	0,8350	0,126	0,0306	0,8431
63,98	2,377	3,510	3,562	0,188	2,790	0,894	0,0944	0,0114	0,796	0,1843	0,0200
58,78	1,894	3,501	3,533	0,295	2,150	0,896	0,1039	0,0000	0,792	0,2074	0,0001

Simulationen von Membrandächern

In der Literatur konnten nur sehr wenige Beschreibungen zu Berechnungen der Temperaturen und evtl. des Kondensationsrisikos an Membrandächern gefunden werden.

Tauwasserausfall an Dächern von Eissporthallen, Berechnung der Temperaturen am Dach [Marquardt/Mainka08]

[Marquardt/Mainka08] untersuchten die Dächer von mehreren Eissporthallen. Bei milder Witterung kann die innere Oberfläche der Dächer bis auf Temperaturen unterhalb des Taupunktes der Luft in der Halle abkühlen. Dies liegt an der Wärmeabstrahlung des Daches an die kalte Eisfläche. In der Folge tritt an der Dachinnenseite Kondensation oder gar Reifbildung auf. Da dies nicht nur gelegentlich geschieht treten dann auch Schimmel und Korrosion an Stahlteilen und / oder Holzfäule bei Holzträgern auf.

Eine der untersuchten Hallen ist mit einem zweischaligen, wärmegeämmten Membrandach ausgestattet. Für dieses Dach wurden für stationäre Randbedingungen die Berechnungsformeln aufgestellt, beruhend auf den Energiebilanzen an mehreren Stellen im Membrandach.

Für eine andere Halle mit einem einschaligen Dach aus Asbestzement-Wellplatten wurden ebenfalls die Berechnungsformeln aufgestellt. Zusätzlich wurden die Temperaturen für ein Dach aus zwei Membranschichten ohne Wärmedämmschicht berechnet.

Dabei wurde der Wärmeübergang in Innenraum explizit als konvektiver Wärmeübergang zur Raumluft und als Strahlungsaustausch mit der Eisfläche modelliert.

Berechnet wurden jeweils die Temperaturen an verschiedenen Stellen im Membrandach bzw. beim einschaligen Dach aus Asbestzement-Wellplatten die Temperatur dieser Platten.

Die Berechnungen wurden unter stationären Bedingungen ausgeführt mit Werten für Außentemperaturen von 0 °C und 20 °C, für Solarstrahlungsintensitäten von 0 W / m² bis 300 W / m², verschiedenen Luftwechselraten in der Halle und verschiedenen Werten für den Wärmeeintrag durch Personen und Beleuchtung. Die Temperatur der Eisfläche am Boden der Halle wurde jeweils mit -5 °C angenommen.

Ergebnisse

In den meisten berechneten Fällen, von Allem bei milder Witterung, liegt die Temperatur der inneren Dachhaut unter der Lufttemperatur in der Halle und sehr oft auch unter deren Taupunkttemperatur. Für das einschalige Asbestzement-Dach wurden die berechneten Werte mit gemessenen Wochenmittelwerten verglichen und trotz einiger Näherungen in den Berechnungen eine gute Übereinstimmung festgestellt. Bei diesem Dach liegt die Temperatur der Asbestzement-Platten unterhalb der Taupunkttemperatur, wenn die Außenlufttemperatur über 7 °C steigt.

Dieses Problem ist nur sehr schwer in den Griff zu bekommen. Die effektivste Methode wäre sicher eine Entfeuchtung der Hallenluft, was jedoch mit einem hohen Investitionsaufwand und hohen Betriebskosten verbunden ist.

[Marquardt/Mainka08] schlagen noch eine zusätzliche Unterdecke vor, die die Hallendecke vor der Auskühlung schützt. Dies verlagert allerdings das Problem lediglich an die Unterdecke. Ein denkbarer Weg wäre hier noch, diese Unterdecke so zu gestalten, dass sie gut gereinigt werden kann und nach einigen Jahren mit wenig Aufwand ausgetauscht werden kann.

Kritik

Allerdings

- wird in den Formeln die Feuchteübergangsrate verwendet, ohne dass darauf eingegangen wird, wie dieser Wert berechnet wird, oder welche Annahme hier getroffen wurde. Bei der Berechnung der dargestellten Ergebnisse wurde jedoch der Wärmeeintrag durch Kondensation gänzlich vernachlässigt.
- wird für den Wert der Verdunstungsenthalpie von Wasser nur der Wert bei 100 °C angegeben, unabhängig von der Temperatur. Zudem wird auch nicht zwischen Membrantemperaturen über und unter 0 °C unterschieden. wurde die Solarstrahlung (nach DIN 4710) als fester Wert mit 0 W/m² oder 200 W/m² oder 300 W/m² angenommen.
- wurde in beiden Fällen der langwellige Strahlungsaustausch mit dem Himmel nicht gesondert beachtet, sondern auf der Außenseite des Daches ein pauschaler Wärmeübergangskoeffizient angenommen.

Die Vernachlässigung der Abstrahlung an den kalten Himmel hat im Falle der zweischaligen gedämmten Dachstruktur keinen großen Einfluss auf die berechnete Temperatur der inneren Membran. Mit Berücksichtigung dieses Effektes wird sich zumindest nachts eine etwas niedrigere Temperatur für die äußere Membran und auch eine geringfügig niedrigere Temperatur der inneren Membran ergeben.

Im Falle des einschaligen Daches hat die Abstrahlung an den kälteren Himmel jedoch erheblichen Einfluss und kann die Temperatur der Dachschale um ein paar weitere Kelvin absenken. Tagsüber wird diese Abstrahlung evtl. durch die Solarstrahlung ausgeglichen, nicht jedoch nachts. Daher wird die Tauwassergefahr durch die Abstrahlung an den kalten Himmel vor allem nachts in nicht vernachlässigbarem Ausmaß verschärft.

Simulationen von ETFE-Folienkissen

[Schmid04], Teil 2, S. 63 bezieht sich bei der Aussage zur möglichen Kondenswasserbildung an verschiedenen Schichten des Dachaufbaus (je nach Witterung) auf bauphysikalische Simulationen. Für das Freizeitbad „Tropical Island“ in Brand in der Nähe von Berlin wurden die hygrothermischen Simulationen der ETFE-Folienkissen vom Ingenieurbüro DyAna durchgeführt [form_TL15], S. 10. Dieses Ingenieurbüro nutzte für diese Simulationen selbst erstellte Software [DyAna15]. Die Internet-Präsenz des Büros existierte am 8.2.2016 nicht mehr.

Ergebnisse der Internet- und Literatur-Recherche: Zusammenfassung der Anforderungen an und Empfehlungen für Membrandächer mit Wärmedämmung

Im Folgenden werden die aus verschiedenen Literaturquellen entnommenen Anforderungen an und Empfehlungen für Membrandächer mit Wärmedämmschicht zusammengefasst.

Regensicherheit

Die Regensicherheit ist die vorrangige Aufgabe des Daches. Diese ist hauptsächlich eine geometrische und konstruktive Aufgabe (siehe hierzu [Schmid04], Teil 2, S. 62), eine Frage der Materialwahl und der Ausbildung der Verbindungsstellen der Bauteile und Bauteilabschnitte. Im Falle des Membrandaches sind dies die Randbefestigungen der Membran und die Nähte der einzelnen Membranbahnen. Auf beide wird in späteren Abschnitten noch eingegangen.

Verformungen der Membrandächer

Membrandächer verformen sich unter Wind- und Schneelasten. Beispielsweise betragen bei der Olympia-Schwimmhalle in München die Bewegungen des Membrandachrandes bis zu 1,5 m [Knippers10], S. 218. Für das Parkbad Velbert wurden die Verformungen der Membranen berechnet. Die Verformungen der äußeren Membran betragen bis zu

	nach oben	nach unten
Dachrand	15 cm	20 cm
Dachmitte	60 cm	90 cm

Tabelle: Membranverformungen beim Parkbad Velbert

Datenquelle: [Schmid04], Teil 2, S. 64 / S. 66

Die Verformungen des inneren Dachaufbaus mit innerer Membran, Wärmedämmung und Unterspannbahn sind zwar geringer als bei der Außenhaut, aber dennoch nicht vernachlässigbar.

Um zu verhindern, dass sich die äußere Membran und der innere Dachaufbau mit innerer Membran, Wärmedämmung und Unterspannbahn berühren, soll der Abstand zwischen den Membranen ausreichend groß sein. Beim Parkbad Velbert beträgt er 1 m [Schmid04], Teil 2.

Diese Verformungen der äußeren wie auch der inneren Membran müssen bei allen weiteren Planungen und bei der Ausführung mit beachtet werden.

Entwässerung

Je nach Witterung kann sich Kondenswasser an verschiedenen Schichten im Dachaufbau bilden. Deswegen sollen alle Schichten so geformt werden, dass sie zu den Rändern hin entwässert werden [Schmid04], Teil 2, S. 63.

Befestigung der inneren Membran

Wärmeverluste durch die Anschlüsse des inneren Dachaufbaus

Die Befestigungen der Membranen müssen hohe Kräfte aufnehmen und daher mechanisch sehr stabil sein. Im Falle des inneren Dachaufbaus stellen sie daher immer auch Wärmebrücken dar. Um die Wärmebrückenwirkung zu minimieren, ist zu prüfen, inwieweit der innere Teil der Membranbefestigung von der äußeren Tragstruktur thermisch getrennt werden kann.

[Grunwald09] untersuchten durch 2D-Simulationen die thermische Trennung zwischen der inneren und äußeren Ebene bei der Befestigung von mehreren Lagen ETFE-Folie. Eine Zwischenlage aus PU-Schaum im Stahlrahmenprofil zeigte die beste Dämmwirkung, wird aber als mechanisch nicht stabil genug eingeschätzt. Als Alternative zeigte Holz eine fast genauso gute Dämmwirkung und wird als stabil genug eingeschätzt, um die Kräfte durch das Spannen der Membranen aufzunehmen.

Aus den Ergebnissen konnte für ein Rahmenprofil mit einer 40 mm starken Trennung aus PU-Schaum ein U-Wert des Befestigungsprofils von ca. $2,4 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ abgeschätzt werden. Für ein Befestigungsprofil mit einer thermischen Trennschicht aus Holz mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,11 \text{ W} / (\text{m K})$ wurde ein U-Wert des Rahmenprofils von $2,52 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ berechnet. Diese Werte gelten für einen luftgefüllten Folienzwischenraum. Für einen Folienzwischenraum mit Wärmedämmschicht kann der U-Wert für das Rahmenprofil mit PU-Schaum-Trennung zu $1,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ abgeschätzt werden. Im Falle der thermischen Trennung aus Holz wurde ein U-Wert von $1,72 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ berechnet.

Der Anschluss des inneren Dachaufbaus (innere Membran mit Wärmedämmung) an die Gebäudewände ist bei manchen Gebäuden so gelöst, dass sich der innere Dachaufbau auch an dieser Stelle bewegen kann.

Dies ist z.B. bei der Olympia-Schwimmhalle in München der Fall. Der Anschluss an die Gebäudewände war ursprünglich mit Acrylglasschürzen gelöst, die sich in einem Spalt in der Außenwand auf und ab bewegen konnten. Beim jetzigen Aufbau wird der Anschluss durch pneumatische ETFE-Folienkissen hergestellt. Diese stellen zugleich auch einen besseren Wärmeschutz dar als die Einscheiben-Acrylglasschürzen.

Luftdichtigkeit der inneren Membran und deren Anschlüsse

Die Luftdichtigkeit der inneren Membran ist bei Aufbauten mit Wärmedämmschicht wichtig, damit nicht durch Konvektion feuchte Luft in die Wärmedämmung eindringt und der enthaltene Wasserdampf dort oder an deren äußerer Abdeckung kondensiert.

Luftdichtigkeit der Membran

Die Membranen sind luftdicht. Ein Eintrag von Luftfeuchtigkeit in die Wärmedämmschicht durch Konvektion ist daher ausgeschlossen.

Membranstöße

Zur Luftdichtigkeit von Membranstößen gibt es nur sehr wenige Informationen in der Literatur. Im Buch von [Bubner05] werden verschiedene Verbindungstechniken von Membranbahnen (Membranstöße) beschrieben. Dabei geht der Autor jeweils auch auf deren Dichtigkeit für flüssiges Wasser ein. Membrananschlüsse, die nicht wasserdicht sind, sind natürlich auch nicht luft- und wasserdampfdicht.

- Genähte Stöße sind nicht wasserdicht. Sie können versiegelt werden. Die Versiegelung kann aber bei hoher Zugbeanspruchung reißen.
- Geschweißte Stöße sind wasserdicht.
- Genähte und anschließend zusätzlich geschweißte Stöße (Kombinaht) sind im Allgemeinen ebenfalls wasserdicht.
- Geschweißte und dann zusätzlich genähte Stöße sind nicht wasserdicht, da die Nähnadel die Membran durchstößt.
- Bei geklebten Nähten hängt die Dichtigkeit von der Qualität des Klebers und der Ausführung ab
- Geschraubte und geschnürte Stöße sind nicht wasserdicht.
- Reißverschlüsse gibt es auch in gasdichten Ausführungen. Reißverschlüsse halten nur wenig Zugbelastung aus. Zudem sind sie wartungsintensiv. Sie werden z.B. für Notausstiege verwendet.
- Zu Klemmplattenstößen gibt es keine Angaben zur Dichtigkeit. Aufgrund deren Konstruktion wird vermutet, dass die Kontaktstellen von Membran und Klemmplatten zwar wasser- und luftdicht ist. Jedoch an den Enden der Klemmplatten entstehen Lücken, die nicht dicht sind oder zusätzlich abgedichtet werden müssen.

Heutzutage werden fast ausschließlich geschweißte Stöße verwendet [Bubner05], S. 47. Geschweißte Stöße sind auch für Luft undurchlässig..

Es wird vermutet, dass geschweißte Membranstöße mindestens so wasserdampfdicht sind wie die Membranen selbst, da die Beschichtungen der Gewebe miteinander verschmolzen werden.

Membranränder und-ecken

Bei Membrandächern sind vor Allem die Befestigungen der Innenmembran an der Tragstruktur und bei den Gebäudeanschlüssen zu beachten. Diese stellen immer Problempunkte dar. Daher sollte die Anzahl der notwendigen Befestigungen und der Durchdringungen der inneren Membran (z.B. zur Befestigung der Beleuchtung etc.) möglichst gering gehalten werden.

[Bubner05] beschreibt verschiedene Möglichkeiten der Befestigungen der Membranränder. Für den Anschluss der inneren Membran an die Gebäudehülle eignen sich Kederschienen und Klemmplatten. Bei Kederschienen wird der verdickte Membranrand (Keder) in eine passende Schiene eingezogen. Diese Verbindungen sind nicht wasserdicht, wenn sie nicht zusätzlich mit Dichtungslippen ausgestattet sind. Zudem stellt sich die Frage der Dichtigkeit an den Enden der Kederschienen.

Für Membranränder mit Klemmplatten gilt das bereits oben zu Klemmplattenstößen gesagte.

Für Membranecken werden keine Varianten gezeigt, die sich für den Membrananschluss an zwei aneinanderstoßende Wände eignen.

Grate, Kehlen, Hoch- und Tiefpunkte

Die Konstruktion von Graten, Kehlen, Hoch- und Tiefpunkten wird in [Bubner05] ebenfalls behandelt. Zu deren Dichtigkeit werden keine Angaben gemacht. Sie kann aber aus der jeweiligen Konstruktionsart abgeleitet werden.

Wasserdampfdiffusion durch die innere Membran und deren Anschlüsse

Wasserdampfdurchlässigkeit der Membran

Die innere Membran stellt im Falle eines Membrandaches die Dampfbremse dar. Der s_d -Wert von PVC-beschichtetem Polyestergewebe beträgt 9 bis 11 m und erfüllt somit die Anforderungen der Norm. Dieser Wert ist dennoch eher niedrig. Deshalb ist mit Feuchteeintrag vom Raum in die Wärmedämmung zu rechnen und die Unterspannbahn sollte besonders diffusionsoffen sein [Schmid04], Teil 2.

PTFE-beschichtete Glasfasergewebe und ETFE-Folien besitzen noch geringere s_d -Werte.

Bei PES / PVC-Membranen ist zu beachten, dass mit den Jahren die Weichmacher aus dem PVC ausdünsten können, wodurch das PVC versprödet und sich Mikrorisse bilden. Die Wasserdampfdurchlässigkeit wird dadurch vermutlich erhöht. Das PVC wird zwar durch eine Lackschicht als Finish geschützt. Jedoch wittern diese Lackschichten im Laufe von mehreren Jahren ab ([Schmid04], Teil 1 S. 58 + 62). Die innere Membran ist zwar nicht direkt dem Wettergeschehen ausgesetzt. Dennoch muss mit einer, wenn auch langsameren, Degradation der Lackschichten durch die Bewegungen der Membranen gerechnet werden.

Membranstöße

Zur Wasserdampfdichtigkeit von Membranstößen gibt es keine Informationen. Es wird vermutet, dass geschweißte Membranstöße mindestens so wasserdampfdicht sind wie die Membranen selbst.

Die anderen Verbindungstechniken sind nicht luft-, somit auch nicht wasserdampfdicht, werden jedoch heute nur sehr selten eingesetzt.

Wärmedämmung

Material

Für die Wärmedämmschicht kommen verschiedene Materialien in Frage, wie man aus der Beschreibung der bereits ausgeführten Membranbauten ersehen kann.

Als Material für die Wärmedämmung empfiehlt [Schmid04], Teil 2 gekrempelte oder elastische Vlieswerkstoffe aus Polyester. Diese Materialien nehmen Verformungen durch die Bewegungen des Membrandaches auf und gehen danach wieder in ihre Ursprungsform zurück. Zudem sind sie feuchteunempfindlich, pilzfest und unverrottbar. Ein Nachteil dieser Materialien ist ihre Brennbarkeit.

Glasfasergespinnste gibt es in verschiedenen Dichten und Wärmeleitfähigkeit. Je nach Dichte und Schichtdicke sind sie mehr oder weniger transluzent.

Des Weiteren kann Mineralwolle verwendet werden, die auch bei anderen Dach- und Wandaufbauten verwendet wird.

Befestigung der Wärmedämmung

Die wind- und schneeinduzierten Verformungen des Daches sind auch bei der Einbringung der Wärmedämmung zu beachten. Diese muss deswegen auf der Innenmembran befestigt werden, um nicht abzurutschen.

Bei der Kurklinik Masserberg wurden auf die innere Membran Taschen aufgeschweißt, in welche Teller mit Dornen eingeschoben wurden. Auf diese Dornen wurde die Wärmedämmung aufgespießt. Es zeigte sich, dass einige Dornen abbrachen. Daher hat man heute so vor, dass man auf die Innenmembran Laschen aufschweißt, an denen die Wärmedämmung festgeschnürt wird. Die großflächige Verbindung der Wärmedämmung mit der Innenmembran durch Kleben wurde noch nicht erprobt [Knippers10], S. 218. Zuvor erhalten die Bahnen der Wärmedämmung den gleichen Zuschnitt wie die Innenmembran, damit diese hohlraum- und faltenfrei auf dieser aufliegt [Schmid04], Teil 2.

Wird die Wärmedämmung als mehrere Lagen mit versetzten Stößen aufgebracht, so minimiert sich die Gefahr, dass sich durch die Bewegungen des Daches durch die gesamte Dicke der Wärmedämmschicht gehende Spalte zwischen den einzelnen Wärmedämmplatten bilden.

An den Aufhängungen der Innenmembran und deren Anschluss an die Gebäudewände sollte darauf geachtet werden, dass alle Spalte und Fugen mit Wärmedämmmaterial ausgefüllt werden, um die Wärmebrückenwirkung zu minimieren.

Beschreibungen oder Zeichnungen von Anschlussdetails der Innenmembran, der Wärmedämmschicht und der Unterspannbahn an eine Gebäudewand konnten in der Literatur nur wenige gefunden werden. Zudem sind die Beschreibungen und Zeichnungen wenig detailliert. Für das zu bearbeitende Forschungsprojekt konnten diese auch deswegen nicht genutzt werden, weil die dargestellten Anschlussdetails ganz anders ausgebildet sind als bei der Sporthalle in Fürth.

Unterspannbahn

Die Unterspannbahn hat die Aufgabe, die Wärmedämmung vor Schmutz und Wasser zu schützen. Andererseits muss sie aber das Austrocknen von in die Wärmedämmschicht eingedrunenem Wasser ermöglichen. Sie muss also wasserdicht, aber diffusionsoffen sein. Da die Membranen, auch die innere Membran, nur einen mittleren s_d -Wert besitzen, sollte die Unterspannbahn besonders diffusionsoffen sein [Schmid04], Teil 2.

Unterspannbahnen sind in verschiedenen Qualitäten am Markt verfügbar: In den Brandschutzklassen B1 und B2 und mit s_d -Werten von 0,02 m bis 0,15 m [Schmid04], Teil 2.

Die Unterspannbahn muss ebenfalls lagefixiert werden. Dabei sollen sich einzelne Bahnen so überlappen, dass ablaufendes Kondensat nicht in die entstehenden Falten läuft.

An den Ränder und den Befestigungen des inneren Dachaufbaus an den Stahlträgern muss auch die Unterspannbahn sorgfältig lückenlos und ohne Fugen verlegt werden. Ansonsten kann Kondenswasser, das von der äußern Membran abtropft oder an den Stahlträgern nach unten abläuft, in die Wärmedämmschicht eindringen. Andererseits muss darauf geachtet werden, dass die Unterspannbahn und ihre Befestigung auch bei Bewegungen des Daches nicht unter zu hohe Zugspannungen gerät.

Der Luftzwischenraum

Der Luftzwischenraum zwischen dem inneren Dachaufbau und der äußern Membran dient der Hinterlüftung der Wärmedämmung. [Knippers10], S. 218 empfehlen eine Höhe des Luftzwischenraumes von 50 cm oder mehr.

An den Rändern soll die Außenluft gut in den Zwischenraum einströmen können. Gleichzeitig soll der Luftzwischenraum vor dem Eindringen von Vögeln geschützt werden. Die dritte Anforderung ergibt sich speziell im Membranbau: Wiederum müssen die Bewegungen der Membranen beachtet werden.

Beim Parkbad Velbert ist an der Traufe ein Membran-Faltenbalg mit Gummizug und Gittergewebe befestigt.

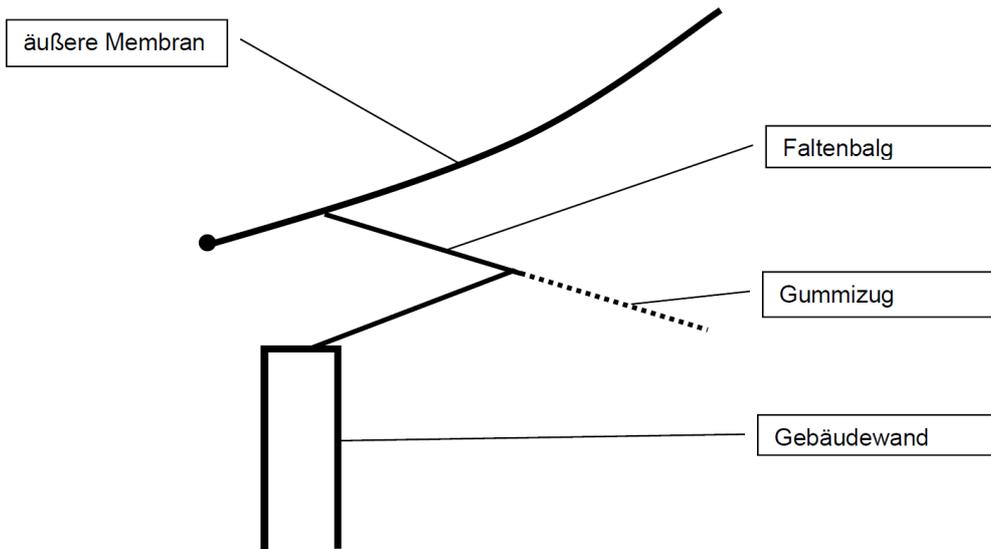


Bild 15: Faltenbalg zum Anschluss der äußeren Membran an feste Gebäudeteile

Beim Dach des Energy Efficiency Centers in Würzburg, dem Sitz des Zentrums für Angewandte Energieforschung Bayern (ZAE), besteht nur das äußere Dach aus einer Membran. Der Gebäudeanschluss dieser Membran an der Traufe besteht aus einem Streifen Lochblech und darüber einer Membranschürze, die am Lochblech festgeschnürt ist.

Bei der im Bau befindlichen Sporthalle in Fürth wird der Luftzwischenraum nach außen durch ein Lochblech geschützt. Eine schmale Membranschürze darüber erlaubt die Verformungen der äußeren Membran. Die Bilder zeigen die Membranschürzen an den Seitenwänden und vorne über der Glasfassade, auf dem linken Bild von außen, auf den beiden anderen Bildern von innen.



Bilder 16 bis 18: Anschluss der äußeren Membran an das Lochblech mittels einer Membranfalte. Links von außen gesehen, mittleres und rechtes Bild: von innen gesehen.

Beschreibung des Membrandaches und erste feuchtetechnische Betrachtungen

Aufbau des Membrandaches

Die Tragstruktur des Daches wird von 4 Doppel-Stahlträgern gebildet. Diese liegen im hinteren Bereich auf dem Gebäudeteil mit den Nebenräumen auf, spannen sich über die gesamte Halle mit dem Foyer und werden vorne vor der Glasfassade von Stützen gehalten.

Jeder der vier Stahlträger besteht aus zwei oberen und zwei unteren Bögen (Ober- und Untergurte), die durch Streben miteinander verbunden sind. Über die oberen Bögen der Stahlträger ist die äußere Membran gespannt. Diese bildet die zweite wasserführende Schicht des Daches. Zwischen dieser äußeren Dachhaut und dem inneren Teil des Daches befindet sich ein belüfteter Zwischenraum, der allseitig offen ist. Damit ist gemeint, dass dieser Zwischenraum auf allen vier Seiten des Gebäudes im Luftaustausch mit der Umgebung steht. Er wird lediglich durch Vogelschutzgitter mit einem Öffnungsanteil von 51 % geschützt. (Diese sind in der Computergraphik unten nicht dargestellt).

Die folgenden Bilder zeigen verschiedenen Ansichten der Halle und eine Graphik der Stahlträger.

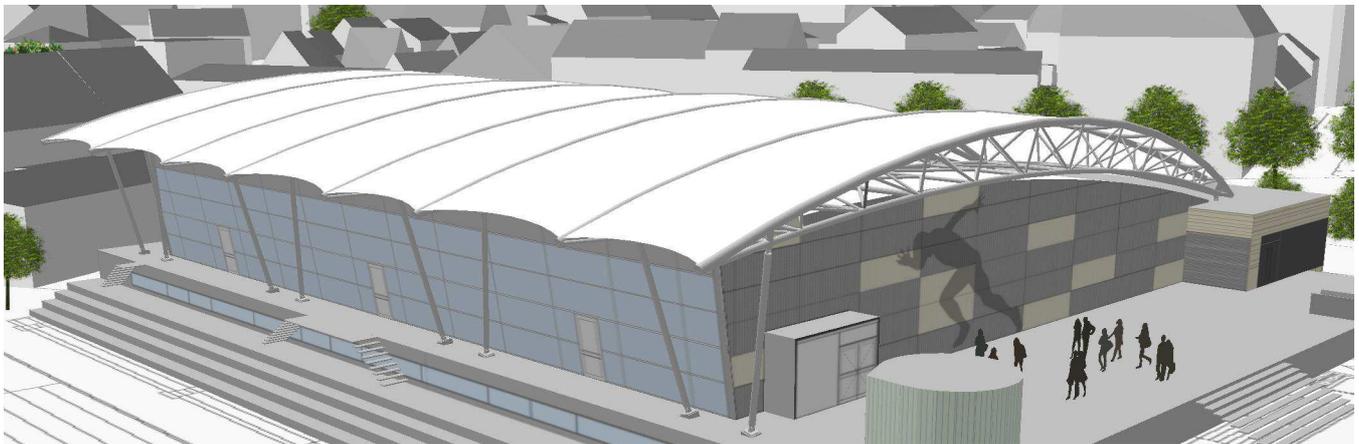


Bild 19: Computergrafik der Sporthalle: links vorne die Glasfassade der Halle zum Sportplatz hin. Im hinteren Bereich der zweigeschossiger Flachdach-Anbau mit Umkleiden und weiteren Nebenräumen.



Bild 20: Ansicht von der Straßenseite



Bild 21: Seitliche Ansicht nach dem Einbau der oberen Membran

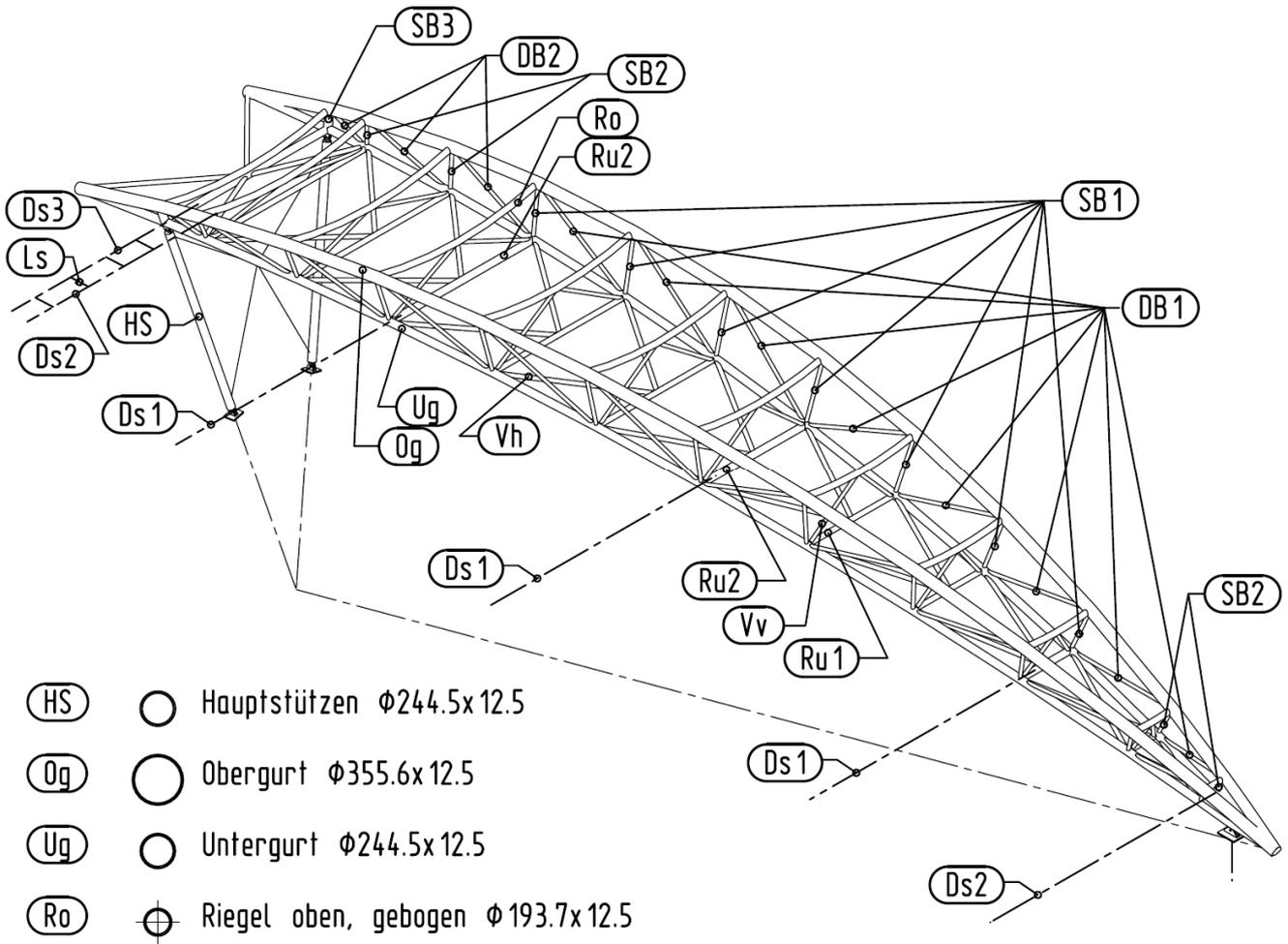


Bild 22: Zeichnung eines Stahlträgers



Bild 23: Ansicht des Halleninnenraumes mit der Stahlträgerstruktur und der äußeren Membran. Der innere Dachaufbau fehlte zum Zeitpunkt der Aufnahme noch.



Bild 24: Ansicht vom Sportplatz aus nach Einbau der oberen Membran. An den Rändern des Daches sieht man das Lochblech (rote Pfeile)

Der innere Teil des Dachaufbaus besteht im Wesentlichen aus der inneren Membran, die den Raumabschluss bildet, der Wärmedämmschicht und einer die Wärmedämmschicht nach oben schützenden Folie als Unterspannbahn.

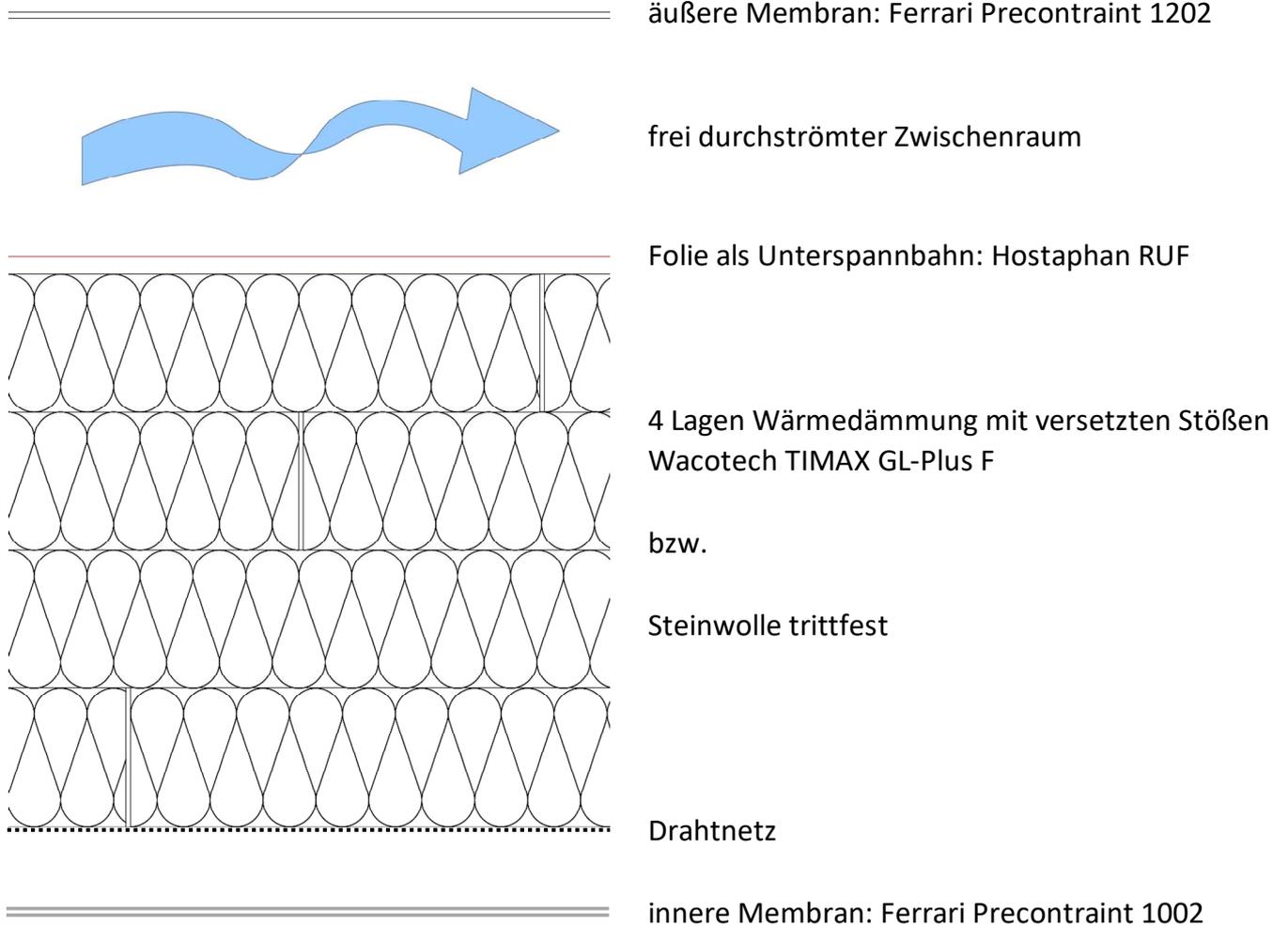


Bild 25: Schemazeichnung des Dachaufbaus
Graphik: HfT Stuttgart unter Verwendung einer Graphik von fab-Architekten)

Die innere Membran wird in Kederschien in gespannt. Diese sind über eine thermische Trennung an den Stützen an den Untergurten der Stahlträger befestigt.



Bild 26: Detail der Trägerstruktur zur Befestigung der inneren Membran

- ← Stützen
- ← Thermische Trennung
- ← Schiene zur Befestigung der Kederschiene
- ← Kabelkanal

Das Bild zeigt einen der Untergurte eines Stahlträgers mit den Stützen nach unten. An diesen wurden über eine thermische Trennung die Schienen zur Befestigung der inneren Membran angebracht, welche auf dem Bild noch nicht montiert ist. Darunter befindet sich noch ein Kabelkanal. Rechts oben im Bild wird gerade ein Teil der Messtechnik für das Monitoring angebracht.

Die Wärmedämmschicht muss aus Brandschutzgründen mit einem Abstand von mindestens 4 cm von der inneren Membran entfernt eingebaut werden. Um die Wärmedämmschicht auf Abstand von der inneren Membran zu halten, wird ein Drahtnetz an den Stahlträgern verankert. Auf dieses wird die Wärmedämmschicht aufgelegt.

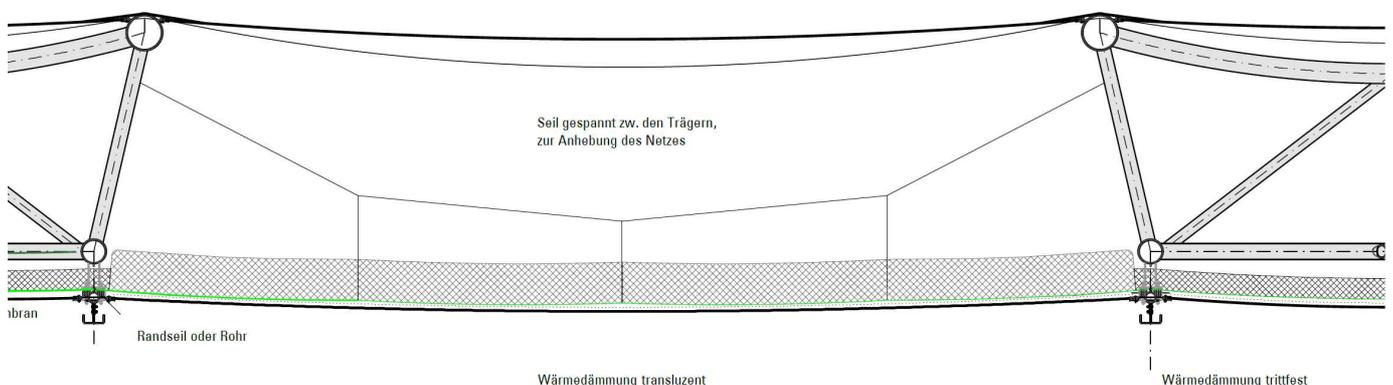


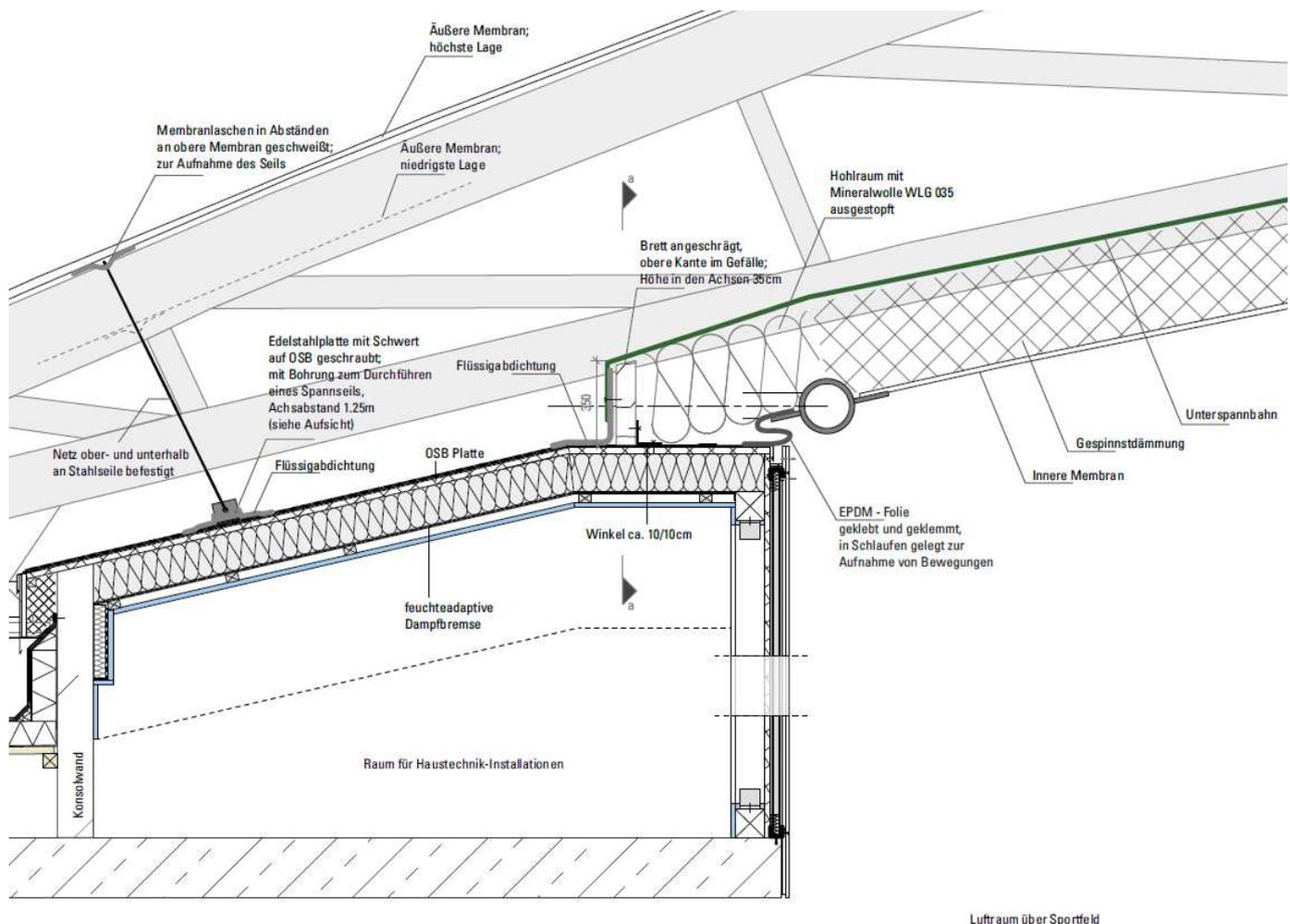
Bild 27: Querschnitt des Dachaufbaus mit Drahtnetz als Halterung der Wärmedämmschicht (grün)

Um die Wärmeverluste durch das Dach weiter zu reduzieren, wurde geprüft, ob anstelle der weißen inneren Membran eine Membran mit low- ϵ -Beschichtung eingebaut werden sollte. Da diese jedoch eine weitaus niedrigere Transmission besitzt als die weißen Membranen, wurde hierauf verzichtet.

Anschlüsse der Membranen und der Wärmedämmung

Die Lage und die Befestigungen der inneren Membran und der Wärmedämmung in der Dachfläche werden bereits in den Bildern im vorigen Abschnitt gezeigt. Die nachfolgenden Bilder zeigen die Anschlüsse der inneren Membran und der Wärmedämmung an der rückwärtigen und den seitlichen Wänden, sowie an der Glasfassade zum Sportplatz hin.

Die Stahl-Doppelträger, an der die äußere Membran und die Wärmedämmung in der Dachfläche befestigt sind, befinden sich im Dach-Zwischenraum, der im Winter praktisch so kalt wird wie die Außenluft. Daher sind alle Anschlüsse dieser Stahlträger an die Wände und die Glasfassade mittels Iso-Körben von diesen thermisch getrennt. Ebenso sind die Schienen, die die Kederschienen für die innere Membran halten, von den Stahl-Doppelträgern thermisch getrennt.



Luftraum über Sportfeld

Bild 28: Anschluss der Stahlträgerstruktur, der inneren Membran und der Wärmedämmung an die rückwärtige Wand



Bild 29: Anschluss der Stahlträgerstruktur an die rückwärtige Wand

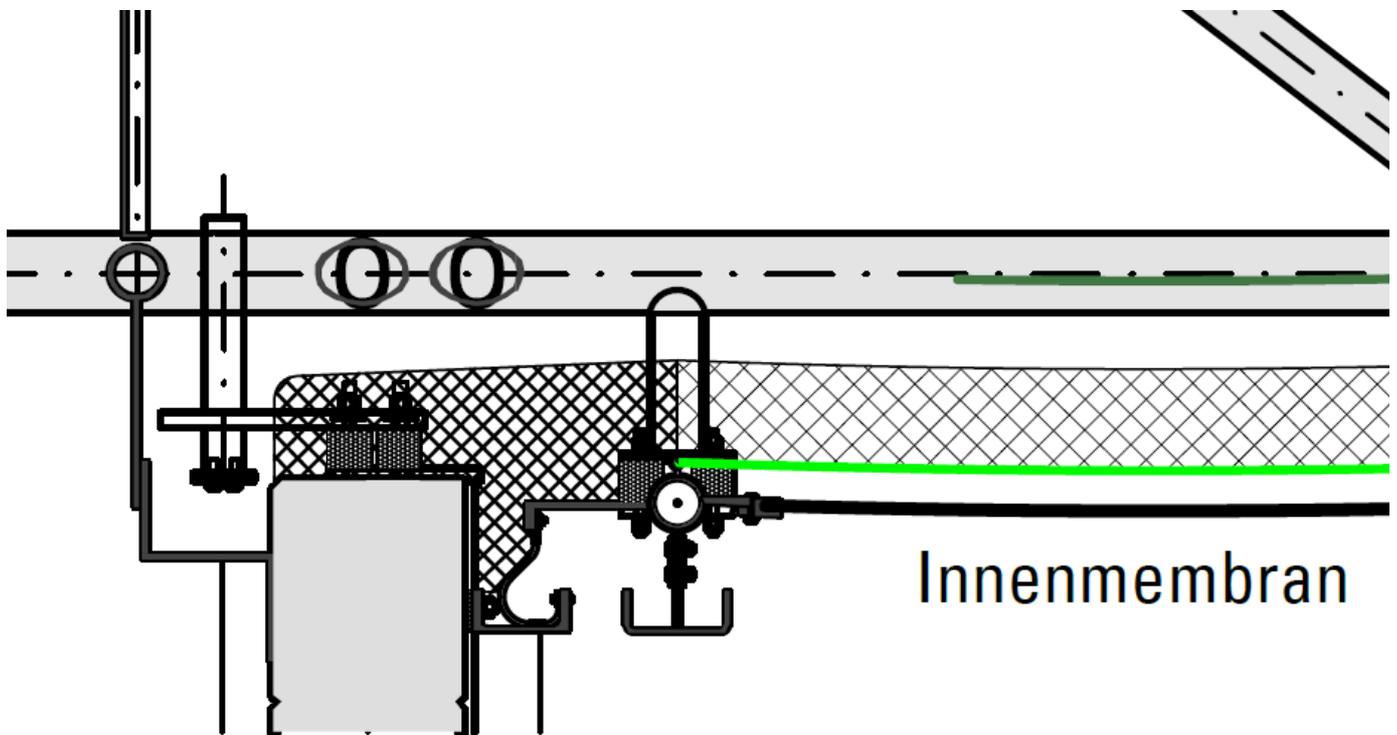


Bild 30: Anschluss der Stahlträgerstruktur, der inneren Membran und der Wärmedämmung an die seitliche Wand

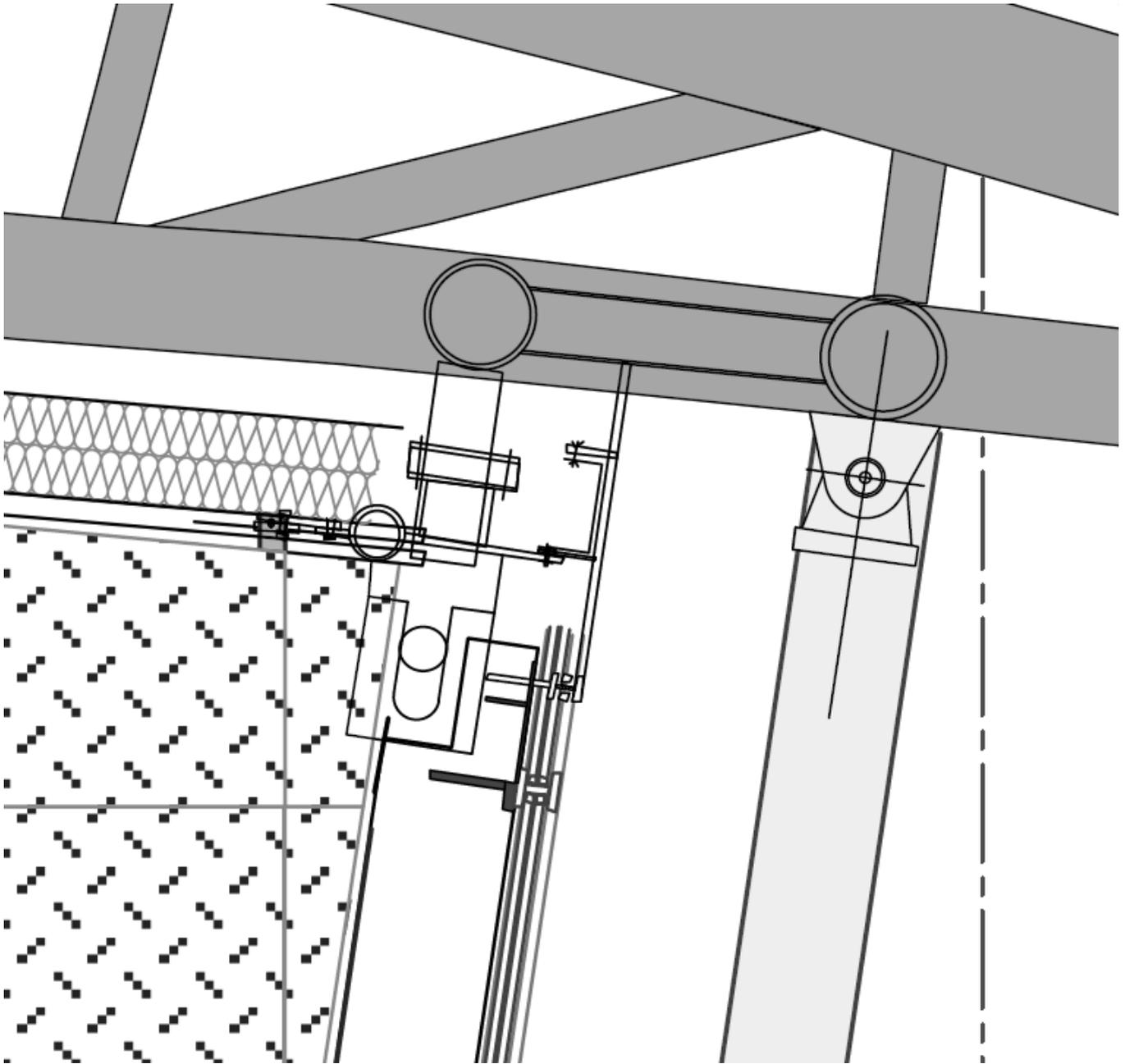


Bild 31: Anschluss der Stahlträgerstruktur, der inneren Membran und der Wärmedämmung an die vordere Glasfassade

Lage der Sporthalle

Die Sporthalle befindet sich am Rande der Innenstadt von Fürth zwischen dem vorhandenen Sportplatz und der Kapellenstraße.

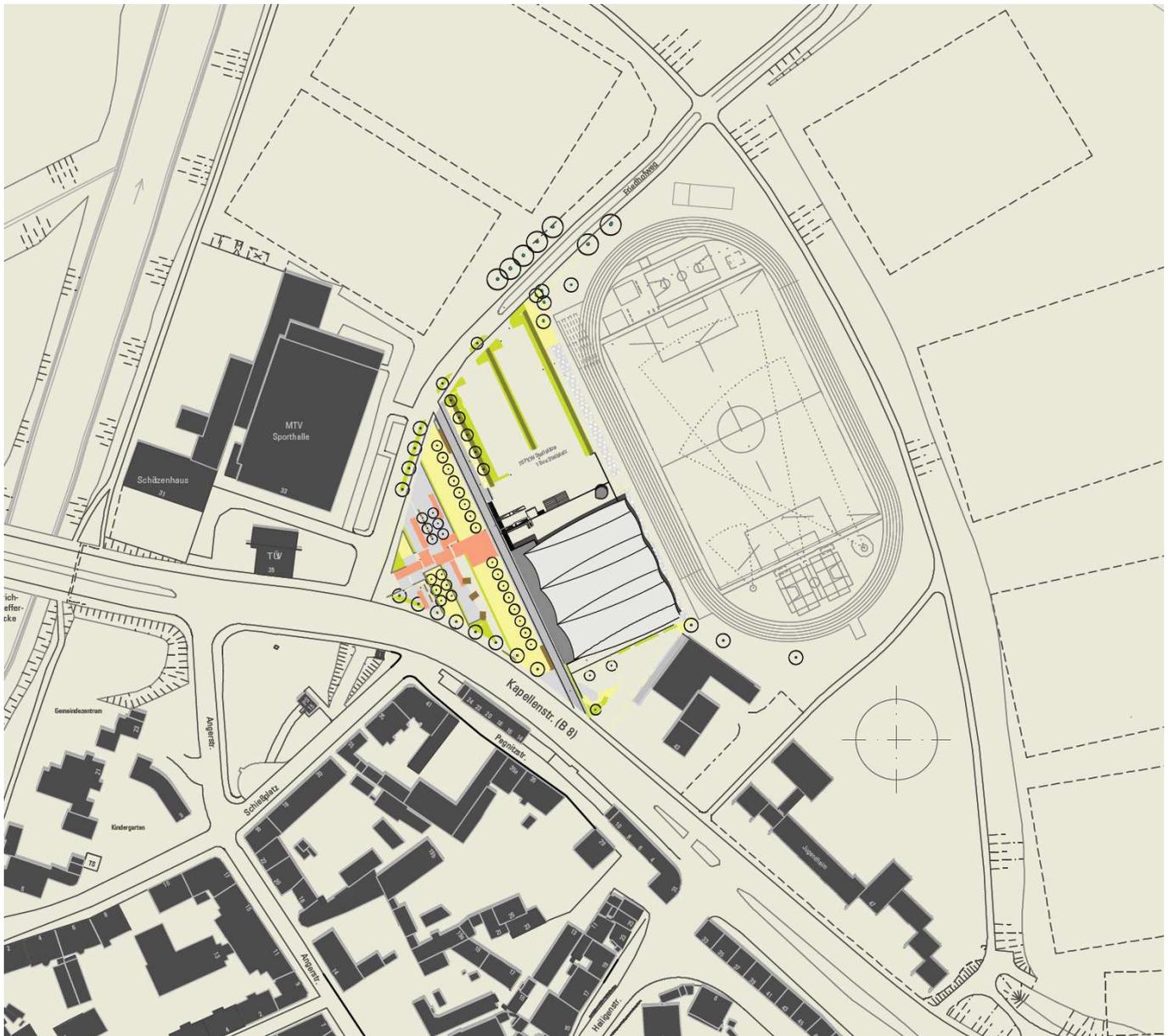


Bild 32: Lageplan der Sporthalle



Sport-
platz

Bild 33: Foto von Fürth mit Kirche und Sportplatz im Hintergrund.

Die bebaute Umgebung der Halle besteht aus drei- bis viergeschossiger Gebäuden. Ihre Dächer haben also ca. die gleiche Höhe wie das Dach der neuen Sporthalle. Diese Informationen werden später bei der Auswahl der geeigneten Wetterdaten für die Simulationen benutzt.

Orientierung und Neigung des Daches

Die niedrigere Seite des gewölbten Daches über dem zweigeschossigen Anbau mit den Nebenräumen befindet sich zur Straße hin mit einer Orientierung von ca. WSW oder 245° (Vergleiche hierzu Anhang A).

Die mittlere Neigung des Daches, berechnet als die Neigung der Verbindungslinie der beiden Dachkanten zum Sportplatz und zur Straße hin beträgt $3,8^\circ$.

Feuchtekritische Bereiche

Für eine langfristige Funktionstüchtigkeit der Bauteile und für ein gesundes und behagliches Raumklima ist es unerlässlich, dass weder an der inneren Bauteiloberfläche noch im Bauteilinneren Schimmelpilze wachsen können. Schimmelpilze bilden sich, wenn an der Oberfläche oder im Material über einen längeren Zeitraum hohe relative Luftfeuchten über 80 % herrschen. Feuchtigkeit in Wärmedämmmaterialien aus Mineralfasern etc. führt zudem zu einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit des Materials und im Extremfall dazu, dass das Material sich verdichtet und seine Wärmedämmeigenschaft gänzlich verliert.

Feuchteintrag in das Innere von Bauteilen, z.B. in Wärmedämmschichten lassen sich nicht gänzlich unterbinden. Daher ist es notwendig, dass die eingedrungene Feuchtigkeit wieder genügend abtrocknen kann und sich nicht über Jahre hinweg der Feuchtegehalt im Bauteil immer weiter aufschaukelt.

Dachfläche

Die Dachfläche ist im Prinzip aufgebaut wie ein Kaltdach. Bei einem Kaltdach befindet sich eine nach außen belüftete Luftschicht zwischen der Wärmedämmung und der äußeren, wasserführenden Dachabdeckung. Die Wärmedämmung wird nach oben von einer diffusionsoffenen Unterspannbahn geschützt. Nach unten wird sie von einer Dampfbremssolie vor zu hohem Feuchteintrag aus der Raumluft geschützt. Geringe Mengen Feuchtigkeit, die dennoch durch die Folie dringen, können im Sommer zur belüfteten Luftschicht hin abtrocknen.

Ein Kaltdach stellt eine bewährte Dachkonstruktion dar. Bei Membrandächern und so auch beim Membrandach der Sporthalle in Fürth gibt es jedoch Besonderheiten zu beachten.

- Auch bei üblichen Kaltdächern kühlt die äußere Dachabdeckung vor allem nachts bis unter die Lufttemperatur ab. Bei klarem Nachthimmel liegt die Himmelstemperatur mehr als 15 K unter der Lufttemperatur. Je nach Wasserdampfgehalt der Außenluft kann es zu Kondensation an der Unterseite der Dachabdeckung kommen. Bei geneigten Dächern kann dieses Kondenswasser zum Dachrand hin ablaufen. Das Dach der Sporthalle Fürth ist jedoch nur sehr gering geneigt und teilweise horizontal. Sich bildendes Kondenswasser wird also nicht ablaufen, sondern auf die Unterspannbahn über der Wärmedämmung abtropfen.
- Durch die geringe Masse der Membranen können sich diese schnell den Temperaturverhältnissen anpassen. Dies bedeutet, dass sich die äußere Membran durch die Abstrahlung an den Himmel vor allem nachts sehr stark abkühlen wird. Die Gefahr von Kondenswasser erhöht sich dadurch. [Haase11], Teil 2. Bei tiefen Außentemperaturen kann es auch zu Eisbildung auf der Außenseite und der Innenseite der äußeren Membran kommen. Evtl. treten Kondensation und Eisbildung auch auf der Unterspannbahn auf.
- Auch der innere Teil des Dachaufbaus ist nur wenig bis nicht geneigt, so dass Kondenswasser, das von der äußeren Membran abtropft, oder evtl. sich auch auf der Unterspannbahn selbst bildet; kaum ablaufen wird. Dort erhöht vorhandenes Wasser den Dampfdruck bis zum Sättigungsdampfdruck, so dass eine Austrocknung der Wärmedämmung verhindert wird oder sogar Wasserdampf in die Wärmedämmung diffundiert. Im Extremfall können sich Wassersäcke bilden, die durch ihr Gewicht die

Wärmedämmung verformen und verdichten. Unter Umständen stellen große Wassersäcke auch ein statisches Problem dar.

- Für die äußere und innere Membran, die Wärmedämmung und auch für die Unterspannbahn werden andere Materialien verwendet als bei üblichen Kaldächern. Entsprechend besitzen diese Materialien wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften, die von den in Kaldächern verwendeten Materialien deutlich abweichen und die sich daher anders verhalten.
- Die helle Farbe der äußeren Membran bewirkt eine weitgehende Reflexion der Solarstrahlung. Erfahrungen in den USA zeigten, dass es in Flachdächern vermehrt zu Feuchteproblemen im Dachaufbau kam, nachdem eine dunkle Dachabdeckung durch eine weiße EPDM-Membran ersetzt wurde [Ennis/Kehrer13]. Durch die zuvor vorhandene dunkle Dachabdeckung hatte sich das Dach stärker erwärmt und die Austrocknung der darunter befindlichen Wärmedämmung befördert. Allerdings handelte es sich um Dachaufbauten ohne oder mit nur geringer Luftschicht zwischen der Wärmedämmschicht und der Außenhaut. Inwieweit die Farbe und somit die Absorptivität für Solarstrahlung bei Membrandächern mit ihrem zumeist recht hohen Luftzwischenraum die Feuchteverhältnisse in der Wärmedämmschicht beeinflussen, kann nicht einfach abgeschätzt werden.
- Die Transluzenz der äußeren Membran bewirkt bei Sonnenschein eine Erwärmung der Unterspannbahn und des oberen Teils der Wärmedämmschicht, da auch diese Materialien etwas transluzent sind. Dadurch kann
 - es auf der Unterspannbahn bei dort vorhandener Feuchtigkeit zu erhöhtem Wasserdampfdruck kommen, so dass Wasserdampf in die Wärmedämmung diffundiert (Umkehrdiffusion).
 - die höhere Temperatur in der Wärmedämmung die Austrocknung des Materials beschleunigen, wenn die Unterspannbahn trocken ist.

Einige dieser Phänomene wurden bei einem Gebäude mit Membrandach, dessen Aufbau mit dem geplanten Dachaufbau der Sporthalle in Fürth vergleichbar ist ([Haase11], Teil2, über das Gebäude von Storek-Vario), beobachtet und messtechnisch nachgewiesen.

Die hier aufgelisteten, zu erwartenden Auswirkungen des Dachaufbaus haben teilweise gegenläufige Auswirkungen. Manche der dargestellten Folgen des Dachaufbaus wirken eher in Richtung verstärkter Feuchteansammlung in der Wärmedämmschicht. Manche Auswirkungen wirken eher in Richtung Verringerung der Feuchtebelastung.

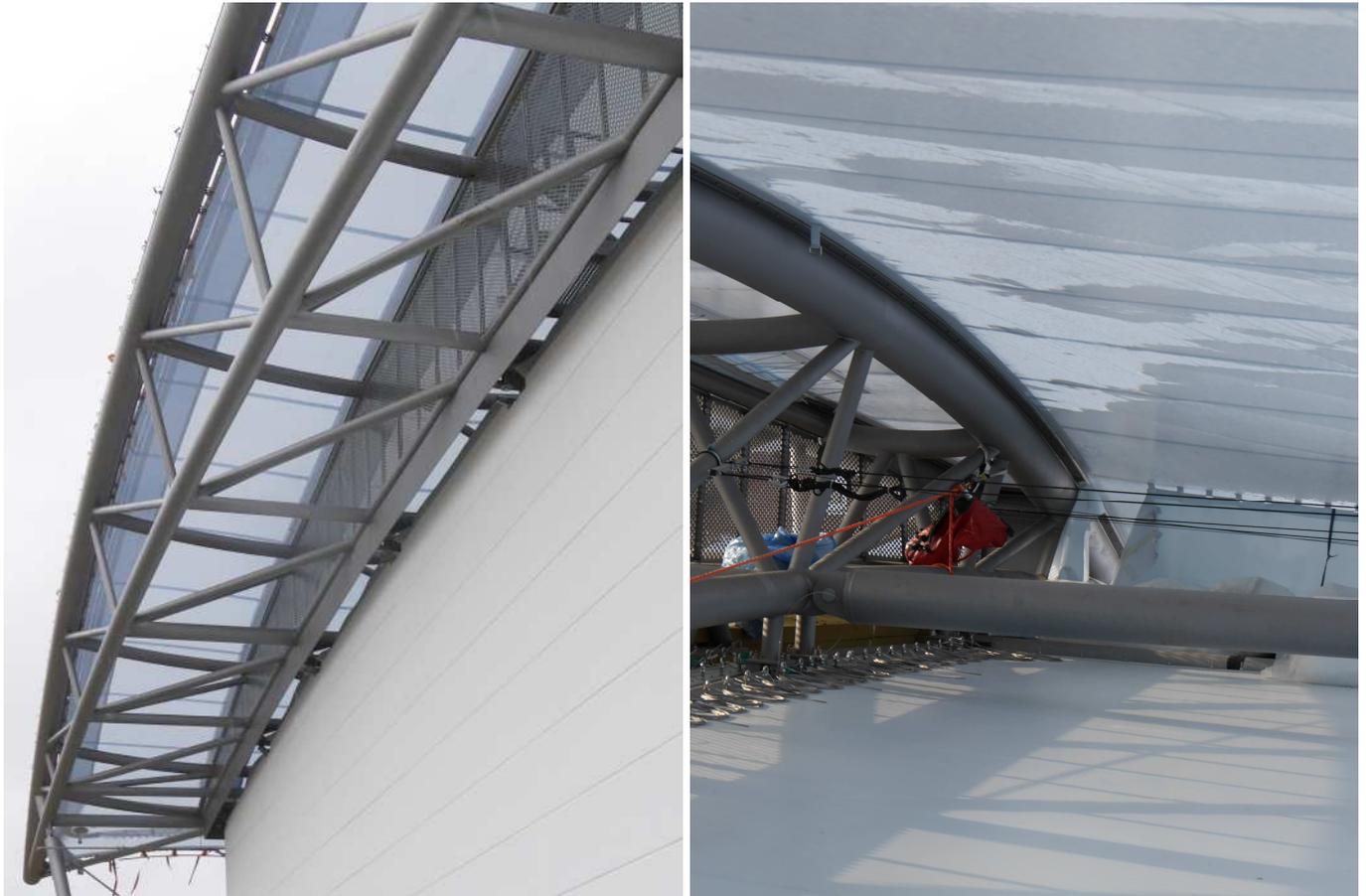
Die Größe und die Relevanz dieser Effekte für die feuchtetechnische Beurteilung des geplanten Dachaufbaus kann nicht anhand einfacher Überlegungen abgeschätzt werden. Auch das Glaser-Verfahren zur Beurteilung der feuchtetechnischen Unbedenklichkeit berücksichtigt diese Effekte nicht. Die einschlägigen Normen verweisen in solchen Fällen auf hygrothermische Simulationen ([DIN 4108], Teil 3 und [DIN EN ISO 13788]).

Ränder des Membrandaches

Die Ränder des Membrandaches werden durch das Lochblech nur teilweise verschlossen. Trotz des Überstandes des äußeren Membrandaches an der Südost- und der Nordwest-Seite des Gebäudes mit dem senkrechten Lochblech wird es bei stärkerem Wind zu Eintrag von Regen und Schnee kommen. Dies betrifft vor allem die Nordwest-Seite des Daches, dies aus zwei Gründen: In Deutschland haben

Westwinde im Durchschnitt höhere Windgeschwindigkeiten als Ostwinde. Ostwinde bringen meist trockene Luft nach Deutschland und sind somit selten mit Niederschlag verbunden. Durch diesen Eintrag von Regen und Schnee verlängern sich die Zeiten, in denen auf der Unterspannbahn die Luftfeuchte den Sättigungsdampfdruck erreicht und bereits eingedrungene Feuchtigkeit nicht nach außen abtrocknen kann.

Durch die Einstrahlung von Solarenergie durch das Lochblech auf die Unterspannbahn kann es zudem eher zur Kombination von Feuchtigkeit und gegenüber der Umgebung erhöhten Temperaturen kommen. Dadurch werden die oben für die Membrandachfläche beschriebenen Gefahrenpunkte vor Allem am nordwestlichen Rand des Membrandaches deutlich verstärkt.



Bilder 34 und 35: Nord-West- und Süd-Ost-Rand des Membrandaches: Außenansicht und im Dach-Zwischenraum

An den anderen beiden Rändern des Membrandaches an der Vorder- und der Rückseite des Gebäudes steht die äußere Membran in geringen Höhen und weit über den inneren Dachaufbau hinaus. Vor Regeneintrag sind diese Ränder daher geschützt. Bei entsprechender Wetterlage kann jedoch Flugschnee auch hier eindringen.



Bild 36: Lochblech-Abschluss am Nord-Ost-Rand des Membrandaches

Wärmebrücken

Weitere kritische Bereiche sind evtl. die Aufhängungen der inneren Membran und die Anschlüsse des inneren Dachaufbaus an die Gebäudewände. Durch deren Wärmebrückenwirkung kann an diesen Stellen die Temperatur an der raumseitigen Oberfläche des Dachaufbaus evtl. so weit absinken, dass Luftfeuchtigkeit aus der Raumluft dort kondensiert. Daher wurden die inneren Befestigungsschienen mit den Stützen über thermische Trennungen verbunden. Dies vermindert diese Gefahr weitestgehend. Aber auch innerhalb des Dachaufbaus werden in der Nähe dieser Wärmebrücken die Temperaturen erniedrigt sein im Vergleich zur übrigen Dachfläche, so dass es auch innerhalb des Dachaufbaus zu einer erhöhten Gefahr von Tauwasserbildung kommen kann, speziell an den Oberflächen der kalten Stahlträgerstützen, die sich im fertigen Dachaufbau zumindest teilweise innerhalb der Wärmedämmschicht befinden.

Die Stahlträger im Luftzwischenraum

Die Rohre der Stahlträger stehen durch konvektiven Wärmeübergang in gutem thermischem Kontakt mit der Luft im Membrandachzwischenraum. Sie stehen über Strahlungsaustausch auch in Kontakt mit der Unterspannbahn und der äußeren Membran. Für beide kann angenommen werden, dass ihre Temperatur sehr ähnlich der Temperatur der Luft im Zwischenraum ist, die der Unterspannbahn evtl. etwas höher als die Lufttemperatur, die der äußeren Membran zumindest nachts etwas niedriger als die Lufttemperatur. Daraus wird die Temperatur der Stahlträger als sehr ähnlich der Lufttemperatur im Zwischenraum des Membrandaches abgeschätzt. Dort wird also kein oder nur in vernachlässigbarem Ausmaß Kondensation erwartet.

Bauphysikalische Anforderungen an Membrandächer

Membrandächer müssen im Grunde die gleichen bauphysikalischen Anforderungen erfüllen, wie übliche Dachaufbauten. Dies betrifft viele verschiedene Aspekte. Die Anforderungen ergeben sich aus der Forderung nach Funktionstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit des Daches und des gesamten Gebäudes. Sie werden in diversen Verordnungen, Normen und Regelwerken konkretisiert.

Anforderungen bestehen bezüglich

- des Brandschutzes,
- des Schallschutzes und der Raumakustik,
- evtl. der Tageslichtversorgung des Raumes und somit der Transparenz oder Transluzenz des Daches,
- des Wärmeschutzes,
- des Feuchteschutzes und
- der Luftdichtheit

In diesem Projektteil steht der Feuchteschutz im Vordergrund. Die weiteren Aspekte werden berücksichtigt, soweit sie für die Analyse des Feuchteschutzes wichtig sind. Dies betrifft vor allem den Wärmeschutz und die Luftdichtheit.

Anforderungen an den Wärme- und Feuchteschutz

Im Falle des Membrandaches stellt sich zudem auch die Frage, ob im offenen Luftzwischenraum die Temperatur- und Feuchtwerte zu einer Degradation der Materialien und des Membrandaches führen werden.

Durch Niederschläge und Kondensation eingetragenes Wasser und hohe Luftfeuchtwerte können – vor allem in Verbindung mit hohen Temperaturen – zu Korrosion der Stahlträger und zur Gefahr von Schimmelpilzbildung führen. Beide Aspekte betreffen den Luftzwischenraum des Membrandaches. Das Problem der Schimmelpilzbildung kann auch die Innenseite des Membrandaches betreffen, speziell an den Bauteilanschlüssen.

Im Besonderen stellt sich auch die Frage, inwiefern Feuchtigkeit in die Wärmedämmschicht eindringen und diese durchfeuchten und unbrauchbar machen kann.

Wichtig ist, dass sich an den Oberflächen im Luftzwischenraum des Membrandaches und im Wärmedämm-Material nicht über längere Zeit hinweg Wasser ansammelt, sondern sich evtl. bildendes Kondenswasser oder gar Eis und auch eindringender Regen und Schnee abfließen und die restliche Feuchtigkeit immer wieder abtrocknen kann

Anwendbare Regelungen

Gesetze und Verordnungen sind verpflichtend. In Bezug auf den Wärmeschutz bei Gebäuden ist die Energieeinsparverordnung die relevante Verordnung. Die letzte Novelle der Energieeinsparverordnung trat am 1.5.2014 in Kraft [DIBt13].

Normen sind nicht von sich aus verpflichtend. Sie gelten als anerkannte Regeln der Technik. Für jeden im technischen Bereich Tätigen empfiehlt es sich aus Haftungsgründen, sich an diese anerkannten Regeln der Technik zu halten. Normen können aber durch Gesetze und Verordnungen verpflichtend werden. Dies trifft gerade auch beim Wärmeschutz von Gebäuden zu. Die Energieeinsparverordnung verlangt, dass bei Außenbauteilen die „Anforderungen des Mindestwärmeschutzes nach den anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden“. Entsprechend gilt für Wärmebrücken, dass ihr Einfluss nach den anerkannten Regeln der Technik minimiert werden muss (§ 7 in [EnEV2015] und [EnEV2009]).

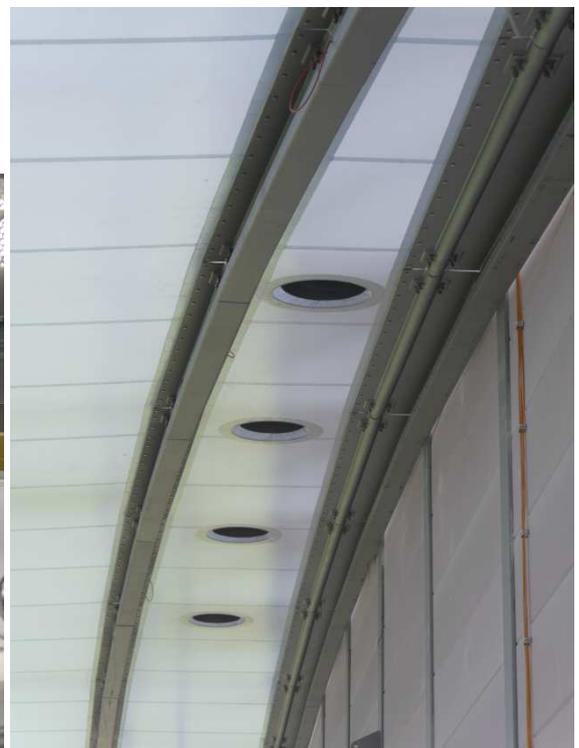
Hinsichtlich des Wärmeschutzes gilt im Fall der Sporthalle Fürth die Energieeinsparverordnung von 2009 [EnEV2009]. Dass noch diese frühere Version der Energieeinsparverordnung gilt, liegt daran, dass der Bauantrag im Jahr 2012 genehmigt wurde. Die Energieeinsparverordnung (EnEV) gilt prinzipiell auch für Sportstätten. Für ein Bauvorhaben ist diejenige Fassung der Energieeinsparverordnung gültig, die zum Zeitpunkt des Bauantrages oder der Bauanzeige bzw. der Kenntnissgabe gegenüber den zuständigen Behörden Gültigkeit hat. (EnEV2009, §28, Abs. (1) und (2) S. 17 und EnEV2015, §28 Abs. (1) und (2) S. 36)

Ausnahmen bestehen bei Gebäuden, bei denen aufgrund ihres Verwendungszweckes Tore lang anhaltend offen stehen oder die nur auf geringe Temperaturen unter 12 °C beheizt werden oder weniger als vier Monate im Jahr beheizt sowie weniger als zwei Monate im Jahr gekühlt werden [EnEV2009], §1 Abs. (2), Nr. 2 und 9 S. 3 und [EnEV2015], §1 Abs. (3), Nr. 2 und 9 S. 3-4 . Für solche Gebäude gilt die EnEV nicht. Diese Ausnahmen können z. B. auf Eissporthallen zutreffen.

Mit der für das jeweilige Bauvorhaben gültigen Ausgabe der EnEV gelten bei den dort referenzierten Normen und technischen Regeln diejenigen Ausgaben, die in dieser Ausgabe der EnEV angegeben sind, sofern dort eine konkrete Ausgabe der Norm angegeben ist. Ansonsten gilt die jeweils aktuellste Fassung.

Verweist die Energieeinsparverordnung auf eine datierte Regel und verweist diese wiederum auf eine zweite, undatierte Regel, so gilt von dieser zweiten Regel diejenige Ausgabe, die zu Zeitpunkt der Herausgabe der ersten, datierten Regel gültig war.

Auch weitere Regelungen können Auswirkungen auf den Wärme- und Feuchteschutz eines Membrandaches haben. Die bayerische Versammlungsstätten-Verordnung befasst sich hauptsächlich mit dem Thema Brandschutz. In diesem Zusammenhang beschreibt sie die brandschutztechnischen Anforderungen an die Materialien auch von Dächern. In Bezug auf die Entrauchung fordert sie, dass Rauchableitungsöffnungen an der höchsten Stelle des Daches angebracht werden. Je nach Ausbildung des Daches wird daher eine Durchdringung des inneren wärmegeprägten Dachaufbaus notwendig, die ebenfalls eine Wärmebrücke darstellt. So ist es auch im Falle der neuen Sporthalle in Fürth.



Bilder 37 und 38: Entrauchungsöffnungen. Links mit Anschluss an die innere Membran, die Wärmedämmung war zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht eingebracht. Rechts vom Halleninnenraum aus gesehen

Wärmeschutz

Anforderungen an den Wärmeschutz

Konkrete Höchstwerte für die U-Werte einzelner Bauteile werden für Neubauvorhaben in der EnEV nicht vorgegeben. Stattdessen fordert die EnEV, dass der Jahresprimärenergiebedarf des geplanten Gebäudes denjenigen eines hypothetischen, sogenannten Referenzgebäudes nicht übersteigt. Dieses Referenzgebäude ist ein gedachtes Gebäude, das bezüglich der Größe und Form, sowie dem Standort und der Orientierung dem geplanten Gebäude entspricht. Die Ausstattung der Gebäudehülle und der Anlagentechnik jedoch wird in der EnEV vorgegeben. Für dieses Referenzgebäude wird der Jahresprimärenergiebedarf berechnet. Der Jahresprimärenergiebedarf des geplanten Gebäudes darf den Jahresprimärenergiebedarf des Referenzgebäudes nicht übersteigen.

Der U-Wert des Daches des zu errichtenden Gebäudes darf auch höher sein als der für das Referenzgebäude anzusetzende U-Wert. Jedoch muss der höhere Wärmeverlust an anderer Stelle im Gebäude ausgeglichen werden. Daher kann man den U-Wert eines Bauteils im Referenzgebäude als Richt- oder Zielwert für den U-Wert des Bauteils im geplanten Gebäude betrachten.

Für opake und transparente Dächer und oberste Geschossdecken der Referenzgebäude gibt Tabelle 1 in Anlage 2 der EnEV2009 und EnEV2015 folgende U-Werte an:

U-Wert des Bauteiles des Referenzgebäudes in EnEV2009 und EnEV2014 [W/(m² K)]		
Raum-Soll-Temperatur [°C]	≥ 19	< 19
Dach	0.20	0.35
Glasdach	2.40	2.40
Lichtband	2.70	2.70
Lichtkuppel	1.30	1.90

Tabelle: U-Werte von Dachaufbauten des Referenzwohngebäudes

Für transluzente Dächer werden keine Werte angegeben. In diesem Fall kann ein Dach mit geringer Transmission mit einem opaken Dach verglichen werden, ein Dach mit hoher Transmission eventuell mit einem Glasdach.

Zudem wird ein Höchstwert des mittleren U-Wertes aller Bauteile ähnlicher Art in der EnEV vorgegeben: Die Energieeinsparverordnung von 2015 übernahm zunächst die Werte der EnEV2009, verschärft diese aber für Neubauvorhaben seit dem 1.1.2016.

mittlerer-U-Wert aller opaken Bauteile in [W/(m ² K)]			
Raum-Soll-Temperatur [°C]		≥ 19	< 19
Opake Außenbauteile	EnEV 2009	0.35	0.50
	EnEV 2014, Neubauten bis 31.12.2015	0.35	
	EnEV 2014, Neubauten ab 1.1.2016	0.28	
Glasdach, Lichtband, Lichtkuppel	EnEV 2009	3.10	3.10
	EnEV 2014, Neubauten bis 31.12.2015	3.10	
	EnEV 2014, Neubauten ab 1.1.2016	2.50	

Tabelle: Geforderte mittlere U-Werte von Außenbauteilen

Wie bereits gesagt, werden konkrete Höchstwerte für die U-Werte einzelner Bauteile in der EnEV nicht vorgegeben. Der U-Wert des Daches des zu errichtenden Gebäudes darf auch höher sein als der U-Wert des Daches des Referenzgebäudes und auch höher als dieser geforderte mittlere U-Wert der Außenbauteile. Jedoch müssen dann die anderen opaken Außenbauteile entsprechend besser wärmegeklämt werden.

Im Übrigen fordert die EnEV, dass Gebäude entsprechend den anerkannten Regeln der Technik errichtet werden. Dies gilt in Bezug auf den Wärmeschutz der Außenbauteile und konstruktive Wärmebrücken (§7 Abs. (1) und (2)), die Dichtheit der Gebäudehülle (§6 Abs. (1)) und den Mindestluftwechsel (§6 Abs. (2)).

Innentemperatur von Sporthallen

[DIN 18032-1] S. 23-24 empfiehlt eine Nutzungstemperatur von Sporthallen von 17 °C. Zur Auslegung der Heizungsanlage und zum energetischen Nachweis nach [DIN V 18599] ist jedoch eine Raumtemperatur von 20 °C anzunehmen.

[DIN V 18599], Teil 10 S. 65 gibt Werte an, die zum Berechnen des Energiebedarfs eines Gebäudes verwendet werden können, sofern keine genaueren Daten vorliegen. Dort wird der Rechenwert für die Raum-Soll-Temperatur im Heizfall mit 21 °C angegeben.

Das Fachinfoblatt "Gestaltung von Sporthallen" [VGB12] stellt ebenfalls Forderungen an die Heizungsanlage: Sie muss in der Lage sein, in der Sporthalle eine Temperatur von 20°C zu ermöglichen. In den Umkleiden muss sie 22 °C und in den Wasch- und Duschräumen muss sie 24 °C bereitstellen können.

Normen

Membrandachfläche

Die relevante Norm zum Wärmeschutz ist insbesondere [DIN 4108], Teil 2. Auf den Feuchteschutz, der eng mit dem Wärmeschutz zusammenhängt, wird im nächsten Kapitel eingegangen.

Teil 2 von [DIN 4108] gibt für flächige Außenbauteile Mindestwerte des Wärmedurchlasswiderstandes vor. Dabei wird unterschieden zwischen schweren Bauteilen und leichten Bauteilen mit einem Flächengewicht von weniger als 100 kg/m² unterschieden.

Tabelle: Vorgaben für flächige Dächer, Dachschrägen und Flachdächer beheizter Räume nach [DIN 4108], Teil 2, Tabelle 3 und nachfolgende Abschnitte.

Flächengewicht [kg / m ²]	≥ 100	< 100
Wärmedurchlasswiderstand R [(m ² K)/W]	1,20	1,75
U-Wert (Dach) [W/(m ² K)]	0,75	0,53

Tabelle: Maximale U-Werte von Dächern

Für Membrandächer mit geringem Flächengewicht ist somit der niedrigere Wert die Vorgabe für den maximalen U-Wert der Dachfläche. Dieser U-Wert muss also eingehalten werden, da die EnEV Bauweisen nach den anerkannten Regeln der Technik verlangt, zu denen auch die Normen zählen. Der U-Wert ist dabei nach [DIN EN ISO 6946] zu berechnen.

Linienförmige Wärmebrücken

Für linienförmige Wärmebrücken, die nicht anhand des Beiblattes 2 von [DN 4108] beurteilt werden können, richten sich die Anforderungen nach den Anforderungen des Feuchteschutzes.

Punktförmige Wärmebrücken

Der Wärmeverlust punktförmiger Wärmebrücken kann bei der Berechnung der Wärmeverlust in der Regel vernachlässigt werden [Steinert15] und [DIN 4108], Teil 2, S. 17 unten. Daher fordert [DIN 4108], Teil 2 keine Begrenzung und keinen Nachweis der punktförmigen Wärmebrücken zum Zweck des Wärmeschutzes.

Feuchteschutz

Normen

Zum Feuchteschutz gibt es vor Allem zwei Normen: Dies sind [DIN 4108], Teil 3 und [DIN EN ISO 13788], von beiden gibt es seit der Baugenehmigung der Sporthalle in Fürth neue Ausgaben. Während die ältere Ausgabe von Teil 3 der [DIN 4108] keine Angaben bezüglich ihres Gültigkeitsbereiches macht, schränkt die neue Ausgabe von 2014 ihren Gültigkeitsbereich ein auf Wohngebäude und wohnähnlich genutzte Gebäude. Bei Sportstätten muss der Feuchteschutz zukünftig also nach [DIN EN ISO 13788] beurteilt werden.

Membrandächer gehören zu den Sonderbauweisen, die in den Normen nicht beschrieben werden. Diese müssen mittels hygrothermischen Simulationen beurteilt werden. Dennoch sollen als Grundlage und zum Vergleich die in den Normen beschriebenen Berechnungsmethoden hier dargestellt werden.

[DIN 4108], Teil 2, S. 12 schreibt vor, dass der Wärmeschutz von Bauteilen nicht durch Tauwasserbildung oder Niederschlagseinwirkung unzulässig vermindert werden darf und verweist im Übrigen auf Teil 3 dieser Norm.

Vermeidung von Tauwasser und Schimmel auf der raumseitigen Oberfläche

Die Gefahr von Schimmelpilzbildung auf der raumseitigen Oberfläche wird mittels des Temperaturfaktors f_{Rsi} beurteilt. Er ist definiert als die Temperaturdifferenz zwischen der raumseitigen Oberfläche und der Außentemperatur, bezogen auf die Differenz zwischen der Innen- und der Außenraumluft.

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e}$$

Zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung auf der raumseitigen Oberfläche gilt im Allgemeinen, dass der Temperaturfaktor f_{Rsi} mindestens 0,7 betragen soll. Dies gilt sowohl für flächige Bauteile wie auch für linien- und punktförmige Wärmebrücken. Bei einer Außentemperatur von -5°C und bei Raumluft mit 20°C und 50 % relativer Luftfeuchte entspricht dies einer Oberflächentemperatur von $12,6^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von 80 % an der Bauteiloberfläche. Dabei wird von einer gleichmäßigen Beheizung, einer ausreichenden Belüftung des Gebäudes und einer ungehinderten Luftzirkulation an den inneren Oberflächen der Außenbauteile ausgegangen. Sicherheitshalber wird jedoch der Wärmeübergangskoeffizient an der raumseitigen Oberfläche niedriger angenommen als für die Berechnungen zum Wärmeschutz, nämlich mit $4 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2\text{K})}$.

Für ein flächiges Bauteil ist

$$f_{R_{si}} = \frac{\sum R_j + R_{se}}{R_{si} + \sum R_j + R_{se}}$$

Für ein flächiges Bauteil lässt sich somit der maximale U-Wert eines Bauteils errechnen. Man stellt die Formel

$$f_{R_{si},min} = 0,7 = \frac{\sum R_j + R_{se}}{R_{si} + \sum R_j + R_{se}}$$

Um und löst nach der Summe der Wärmedurchlasswiderstände der Bauteilschichten $\sum R_j$ auf

$$\left(\sum R_j\right)_{min} = \frac{(R_{se} + R_{si}) f_{R_{si},min} - R_{se}}{1 - f_{R_{si},min}}$$

Mit den üblichen Werten für R_{se} und R_{si} ergibt sich ein minimale Summe der Wärmedurchlasswiderstände der Bauteilschichten $\left(\sum R_j\right)_{min}$ von

$$\left(\sum R_j\right)_{min} = 0,5433 \frac{m^2 K}{W}$$

und ein maximaler U-Wert des Bauteils von $1,2 \frac{W}{m^2 K}$.

Beachte: R_{si} ist hier mit 0,25 angesetzt, also $\alpha_i = 4W/(m^2 K)$

Ist das Kriterium $f_{R_{si}} > 0,7$ erfüllt, so kann dennoch in kalten Wintern zeitweise die Luftfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche über 80% betragen. Dies wird dann aber nur für begrenzte Zeiten geschehen, so dass dennoch nicht mit einem Schimmelpilzbefall zu rechnen ist.

Allerdings macht [DIN 4108]; Teil 2 S 17 Ausnahmen für Fenster und deren Rahmen und für Pfosten-Riegel-Konstruktionen, weil deren Oberflächen die Feuchtigkeit nicht absorbieren. An Fenstern und Pfosten-Riegel-Konstruktionen kann Tauwasser vorübergehend und in kleinen Mengen toleriert werden. Hierbei muss jedoch sichergestellt sein, dass auch am Anschluss des Rahmens zur Gebäudewand kein Tauwasser von der Wand aufgenommen wird.

Für Fenster etc. verweist [DIN 4108]; Teil 2 auf [DIN EN ISO 13788]. Auch [DIN EN ISO 13788] behandelt Fenster und Pfosten-Riegel-Konstruktionen anders als übliche Außenwände. Sie erlaubt 100 % relativer Luftfeuchte an der raumseitigen Bauteiloberfläche.

Fenster werden in [DIN EN ISO 13788] nicht nur in Bezug auf die erlaubte Luftfeuchte an der Oberfläche anders behandelt als massive Bauteile, sondern auch in Bezug auf die anzunehmenden Randbedingungen für die Berechnungen.

Durch das geringe Flächengewicht und die geringe thermische Masse passen sich die Temperaturen im Bauteil und an den Bauteiloberflächen schneller an die aktuellen Randbedingungen an. Die Wahl niedrigerer Außenlufttemperaturen für die Randbedingungen zur Berechnung des hygrischen Verhaltens von Fenstern und leichten Bauteilen trägt dem Rechnung.

Für Membrandächer gilt, dass sie erstens geringes Flächengewicht und somit wenig thermische Masse haben und zum zweitens raumseitig aus Materialien mit feuchteunempfindlichen Oberflächen bestehen. Dies sind die innere Membran selbst und die metallischen Halterungen der Membran. Aus diesen beiden Gründen sind Membrandächer eher mit Fenstern oder Pfosten-Riegel-Konstruktionen vergleichbar, wenn die Schimmelpilzgefahr an der raumseitigen Oberfläche nach den Kriterien von [DIN EN ISO 13788] beurteilt werden soll.

Wie bereits erwähnt erlaubt die Norm bei Fenstern und Pfosten-Riegel-Konstruktionen das vorübergehende Auftreten von Kondenswasser. Bei manchen der bisher gebauten Membrankonstruktionen wurden bewusst Entwässerungsrinnen zum Ableiten des auftretenden Tauwassers eingebaut.

Randbedingungen für die Berechnung

Zur Beurteilung des Tauwasserrisikos an der Innenseite sind wegen der starken Belüftung des Membrandach-Zwischenraumes nur die Bauteilschichten unterhalb des Zwischenraumes zu berücksichtigen und im Zwischenraum Außenluftbedingungen anzunehmen.

Ob Solarstrahlung und langwelliger Strahlungsaustausch mit dem Himmel berücksichtigt werden sollte, hängt von den Strahlungstransmissionseigenschaften der äußeren Membran ab.

Im Membranbau werden meist Folienkissen aus zwei oder drei Lagen ETFE-Folie verwendet oder PVC-beschichtete Polyestergewebe, wie bei der Sporthalle in Fürth. Letztere sind für Solarstrahlung nur geringfügig transluzent (Transmissionsgrad 5 % bis 16 %) und für langwellige Strahlung opak. In diesem Fall sollten auch bei Dächern die Solarstrahlung und langwelliger Strahlungsaustausch mit dem Himmel nicht berücksichtigt werden.

Für Membrandächer mit höherer Lichttransmission können evtl. ETFE-Folien als äußere Membran genutzt werden. Diese sind für Solarstrahlung hochtransparent und lassen auch IR-Strahlung zu einem gewissen Grad durch. In diesem Falle sollte der Einfluss der Solarstrahlung auf den inneren Dachaufbau berücksichtigt werden. Langwelliger Strahlungsaustausch des inneren Dachaufbaus mit dem Himmel sollte in Berechnungen jedoch nicht angenommen werden, da auch die ETFE-Folien doch den größten Anteil der IR-Strahlung absorbieren. (Vergleiche hierzu das Kapitel „Materialeigenschaften“)

Schutz der Wärmedämmschicht vor Feuchtigkeit

Entwässerung

Je nach Witterung kann sich Kondenswasser an verschiedenen Schichten im Dachaufbau bilden [Schmid04], Teil 2, S. 63. Deswegen sollen alle Schichten so geformt werden, dass sie zu den Rändern hin entwässert werden. Dies ist auch beim Überlapp von Membranen zu bedenken: Dieser sollte so gestaltet werden, dass sich kein Wasser ansammeln kann.

Dampfdiffusion

Zum Schutz der Wärmedämmschicht vor Feuchteakkumulation aus dem Innenraum ist es notwendig, dass insgesamt weniger Feuchte in die Wärmedämmschicht eindringt als wieder abtrocknen kann. Als Faustregel gilt, dass die einzelnen Schichten von innen nach außen diffusionsoffener werden sollen. Bei einem Wand- oder Dachaufbau ohne massive und somit relativ dampfdichter Schicht auf der Innenraumseite schützt man daher die Wärmedämmschicht mit einer Dampfbremsschicht. Diese muss eine geschlossene Schicht bilden, auch an den Bauteilanschlüssen. Für Dächer mit einer Unterspannbahn auf der Außenseite der Wärmedämmschicht gilt als Faustregel, dass die s_d -Werte der raumseitigen Dampfbremsschicht und der Unterspannbahn sich um einen Faktor von mindestens ca. 10:1 unterscheiden sollen [Frank15].

[DIN 4108], Teil 3, S. 22 nennt für nicht belüftete Dächer, also Dächer ohne belüftete Luftschicht direkt über der Wärmedämmung, als Bedingung dafür, dass kein rechnerischer Nachweis erforderlich ist, dass die wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicken die Werte der folgenden Tabelle einhalten.

Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke	
m	
außen	innen
$s_{d,e}$	$s_{d,i}$
$\leq 0,1$	$\geq 1,0$
$0,1 < s_{d,e} \leq 0,3$	$\geq 2,0$
$0,3 < s_{d,e} \leq 2,0$	$\geq 6 \cdot s_{d,e}$

$s_{d,e}$ = Summe der s_d -Werte aller Schichten über der Wärmedämmung

$s_{d,i}$ = Summe der s_d -Werte aller Schichten über der Wärmedämmung

Tabelle: Anforderungen an nachweisfreie Dachaufbauten

Für Dächer mit einer Neigung von weniger als 5° wird für die Nachweisfreiheit zudem gefordert, dass die Entfernung zwischen den gegenüberliegenden Belüftungsöffnungen der Luftschicht maximal 10 m beträgt. Weitere Anforderungen betreffen die Höhe bzw. den Querschnitt der Luftschicht. Diese sind bei Membranbauten mit ihren im Allgemeinen relativ großen Abständen zwischen den Membranen bzw. äußerer Membran und innerem Dachaufbau mit Wärmedämmung meist erfüllt.

[DIN 4108], Teil 3 erlaubt in kapillar nicht aufnahmefähigen Schichten eine Wassereinlagerung von bis zu $0,5 \text{ kg / m}^2$ während der Tauperiode, damit diese Menge während der Verdunstungsperiode wieder abtrocknet.

Für Membrandächer mit Wärmedämmschicht gilt Entsprechendes. Aus dem bereits Gesagten ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

Die Anschlüsse der inneren Membran an die Gebäudewand, an andere Membranteile und an Durchdringungen der inneren Membran müssen sorgfältig durchgehend und weitgehend luft- und dampfdicht abgedichtet werden. Aufgrund der Bewegungen von Membrandächern stellt es eine Herausforderung dar, diese Anschlüsse so auszubilden, dass sie die Bewegungen des Daches aufnehmen können. D.h. sie dürfen auch bei wind- und sturminduzierten Bewegungen des Daches nicht unter so hohe Zugkräfte geraten, dass sie reißen. Andererseits aber sollten sie nicht durch Faltenwurf die Entwässerung behindern. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch, dass auch die Gebäudeecken entsprechend ausgebildet werden.

Es konnte keine Literatur gefunden werden, in der die Ausbildung von Anschlüssen der inneren Membran an die Seitenwände des Gebäudes detailliert beschrieben werden.

Es empfiehlt sich, die Ausbildung dieser Anschlüsse detailliert zu planen. Somit können bereits im Vorfeld notwendige Maßnahmen getroffen werden, um diese Anschlüsse und Ecken dann auf der Baustelle auch zügig gut abdichten zu können.

[DIN 4108], Teil 7, Kapitel 4 weist jedoch auch darauf hin, dass auch bei Gebäuden, die die Anforderung an die Luftdichtigkeit einhalten, lokale Undichtigkeiten vorhanden sein können, die durch Luftkonvektion zu einem Eintrag von Luftfeuchtigkeit in den Wand- oder Dachaufbau und somit zu Feuchteschäden führen können. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der gewissenhaften Planung und Ausführung der Anschlüsse in Kanten und Ecken.

Die Folie, die das Wärmedämmmaterial nach außen hin schützt, sollte einen weit geringeren s_d -Wert besitzen als die innere Membran. Gleichzeitig muss sie dicht für flüssiges Wasser sein und im Falle einer transparenten oder transluzenten äußeren Membran oder teilweise offener Ränder des Membrandaches muss sie auch UV-langzeitstabil sein. Deren Anschlüsse müssen zwar nicht dampfdicht sein, aber das Eindringen von flüssigem Wasser oder auch Flugschnee verhindern und ebenso die Bewegungen des Daches aufnehmen können.

Verfahren zu Berechnung des Tauwasserausfalls im Bauteilinneren

Das Prinzip der Berechnungsmethode nach [DIN EN ISO 13788] besteht darin, das Glaser-Verfahren für jeden Monat des Jahres anzuwenden. Die Außentemperatur wird dabei berechnet, wie auch bei der Berechnung des Temperaturfaktors, also abhängig von der Art des Bauteils. Dickere Bauteilschichten werden in mehrere Schichten zerlegt, so dass deren Wärmedurchlasswiderstand jeweils $0,25 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$ nicht übersteigt. Beginnend mit einem Monat ohne Tauwasser wird der zeitliche Verlauf der Tauwassermenge an den Grenzflächen zwischen den einzelnen Bauteilschichten berechnet.

Wenn in keinem Monat Tauwasser auftritt, kann das Bauteil als tauwasserfrei angenommen werden. Tritt Tauwasser auf, verdunstet aber laut der Berechnung im Laufe eines Jahres wieder, so ist das Bauteil gefährdet und es kann zu Feuchteschäden kommen. Bei einer Akkumulation von Feuchtigkeit darf das Bauteil nicht eingebaut werden.

[DIN 4108], Teil 3 verwendet ebenfalls das Glaser-Verfahren, unterteilt das Jahr aber nur in zwei Zeitabschnitte: eine Tauwasserperiode und eine Trocknungsperiode. Sie weist ausdrücklich darauf hin, dass dieses Verfahren nicht die realen Feuchteverhältnisse im Bauteil wiedergibt.

Luftdichtheit / Lüftung

Die Energieeinsparverordnung fordert, dass die Gebäudehülle luftundurchlässig ausgeführt wird entsprechend den anerkannten Regeln der Technik ([EnEV2009] und [EnEV2015] §6). Anforderungen werden auch in [DIN 4108], Teil 7, Kapitel 4 angegeben. Je nach Ausstattung des Gebäudes bezüglich des Lüftungssystems soll die Luftwechselrate n_{50} bei einer Druckdifferenz von Raumluft und Außenluft von 50 Pa den Wert von 1 h^{-1} bis 3 h^{-1} nicht überschreiten. Bei großen Gebäuden mit einem Innenvolumen von mehr als 1500 m^3 wird die Luftwechselrate auf die Fläche der Gebäudehülle bezogen.

Anforderungen und Empfehlungen für die Luftdichtheit von Gebäuden	geforderte Höchstwerte nach [EnEV 2014]		geforderte Höchstwerte nach [DIN 4108],		empfohlene Höchstwerte nach [DIN 4108], Teil 7, Kapitel 4, Tabelle 1 alle Gebäudegrößen
	Gebäude < 1500 m^3	Gebäude > 1500 m^3	Gebäude < 1500 m^3	Gebäude > 1500 m^3	
Gebäude ohne raumluftechn. Anlagen, Lüftung über Fenster oder nicht verschließbare Außenluftdurchlässe	3 h^{-1}	$4,5 \text{ m h}^{-1}$	3 h^{-1}	3 m h^{-1}	3 h^{-1}
Gebäude ohne raumluftechn. Anlagen, Querlüftung über verschließbare Außenluftdurchlässe oder Schachtlüftung					$1,5 \text{ h}^{-1}$
Gebäude mit raumluftechn. Anlagen	$1,5 \text{ h}^{-1}$	$2,5 \text{ m h}^{-1}$	$1,5 \text{ h}^{-1}$		1 h^{-1}

Tabelle: Anforderungen an die Luftdichtigkeit

Die Luftdichtheit des Gebäudes ist jedoch nicht nur zur Vermeidung von unkontrollierter Lüftung wichtig. Sie ist auch wichtig, um die Wärmedämmschicht vor Feuchtigkeit zu schützen. Deswegen muss die luftdichte und gleichzeitig Wasserdampfdiffusions-behindernde Hülle raumseitig der Wärmedämmschicht liegen, wie im Abschnitt „Dampfdiffusion“ bereits dargelegt.

Da das Membrandach, insbesondere auch an den Anschlüssen an die Gebäudewand und die Durchdringungen, weitgehend dampfdicht ausgeführt werden müssen, ist somit auch Luftdichtigkeit gegeben.

Tageslichtversorgung

Da in die Sporthalle in Fürth ein transluzentes Dach eingebaut wurde, seien hier die Anforderungen an Sporthallen aus [DIN 18032-1] genannt.

In Sporthallen mit Oberlichtern sollte der Tageslichtquotient im Mittel 4 bis 10 % betragen. Dies würde für das fast horizontale Membrandach der Sporthalle in Fürth bedeuten, dass das Dach 4 bis 10 % des darauf einfallenden sichtbaren Lichtes durchlassen sollte. Da die Sporthalle aber auch eine Fensterfront besitzt, erhält sie auch durch diese Tageslicht.

Weitere, in [DIN 18032-1] und [VGB12], S. 6 genannte Forderungen betreffen die gleichmäßige Verteilung des Lichtes in der Halle und die Streuung des Lichtes, um Blendwirkung und Schlagschatten zu vermeiden. Beide Kriterien sind mit dem Membrandach sehr gut erfüllt.

Auf die aus Wärmeschutz-Gründen angedachte low- ϵ -Beschichtung der inneren Membran wurde verzichtet, da diese Beschichtung die Transparenz der Membran sehr stark reduziert.

Beleuchtung in dieser Studie

Auf den Aspekt der Tageslichtnutzung wird in dieser Studie nicht weiter eingegangen. Die Anforderungen an die Tageslichtversorgung von Sporthallen wurden hier nur der Vollständigkeit halber und zum Vergleich mit den optischen Materialwerten erwähnt.

Bauphysikalische Grundlagen

Die physikalischen Grundlagen der Berechnungen sind größtenteils in der einschlägigen Literatur beschrieben. Manche der für die feuchtetechnischen Berechnungen benötigten Formeln und Stoffwerte werden dort jedoch nicht, nur unvollständig oder widersprüchlich angegeben. Daher sollen die wichtigen Grundlagen hier nochmals zusammengestellt werden.

Wärmeübergang

Wärmeübergang an der Außenseite von Bauteilen

In der Bauphysik ist es üblich, den konvektiven und den radiativen Wärmeübergang zusammenzufassen und mit einem pauschalen, von der Temperatur und der Luftgeschwindigkeit unabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten zu beschreiben.

Für genauere Berechnungen sollte jedoch der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den konvektiven Wärmeübergang und der Einfluss der Wärmeabstrahlung an den Himmel auf die äußere Oberflächentemperatur der Bauteile mit berücksichtigt werden. Dies gilt vor Allem dann, wenn der Wind oder die Abstrahlung an den Himmel großen Einfluss haben oder speziell diese Einflüsse untersucht werden sollen.

Wärmeübergang an der Innenseite von Bauteilen

Auch für raumseitige Oberflächen von Bauteilen werden üblicherweise der konvektive und der radiative Wärmeübergang zusammengefasst und mit einem pauschalen, von der Temperatur und der Luftgeschwindigkeit unabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben. In diesem Fall wird dabei unterschieden zwischen verschiedenen geneigten Oberflächen, um dem Einfluss der natürlichen Konvektion Rechnung zu tragen.

Für hygrothermische Berechnungen jedoch soll der konvektive Wärmeübergangskoeffizient oft geringer angesetzt werden, um für die Oberflächentemperatur eher zu niedrige Werte zu berechnen. Somit liegen die Ergebnisse eher „auf der sicheren Seite“.

Zusammenstellung der Angaben zu Wärmeübergangskoeffizienten

Die folgenden Tabellen stellen die verschiedenen Angaben zu den Wärmeübergangskoeffizienten bzw. Wärmeübergangswiderständen zusammen.

Äußerer Wärmeübergangskoeffizient

Diese Werte gelten – falls nicht anders angegeben – als Durchschnittswerte für geringe bis mittlere Gebäudehöhen.

	Gesamt- Wärme- übergangs- widerstand	Gesamt- Wärme- übergangs- koeffizient	konvektiver Wärme- übergangskoeffizient	radiativer Wärme- übergangs- koeffizient	Quelle
	[m ² K / W]	[W / (m ² K)]	[W / (m ² K)]	[W / (m ² K)]	
Gegen Außenluft	0,04	25			[DIN EN ISO 6946]
gegen stark belüftete Luftschicht, aufsteigender Wärmestrom			5		[DIN EN ISO 6946], S. 18
gegen stark belüftete Luftschicht, absteigender Wärmestrom			0,7		[DIN EN ISO 6946], S. 18
gegen stark belüftete Luftschicht, horizontaler Wärmestrom			2,5		[DIN EN ISO 6946], S. 18
Gegen Außenluft	0,059	17	10		[Kuenzel94], S. 32
Gegen Außenluft, geneigte oder flache Dächer	0,052	19,231			[WUFI-Hilfetext]
Gegen Außenluft, Außenwände	0,056	17,857			[WUFI-Hilfetext]
exponierte Bauteile, große Höhen über Gelände			windabhängig		[WTA_E_6-2], S. 21 oben
Gegen Außenluft, Luftgeschwindigkeit nahe der Oberfläche			$4 + 4 \frac{s}{m} v_L$	$\sigma \varepsilon 4 T_m^3$	[DIN EN ISO 15026], S. 14 und [DIN EN ISO 6946], S. 18 bzw. S. 17
Gegen Außenluft, Luv-Seite und horizontale Flächen			$4,5 + 1,6 \frac{s}{m} v_L$		[WUFI-Vorgabe-Werte], [Schaube/Werner86]
Gegen Außenluft, Lee-Seite			$4,5 + 0,33 \frac{s}{m} v_L$		[WUFI-Vorgabe-Werte], [Schaube/Werner86]

mit schwarz: Werte aus der Literatur, blau: daraus berechnet

v_L = Luftgeschwindigkeit nahe der Bauteiloberfläche

v_W = Windgeschwindigkeit

T_m = mittlere Temperatur zwischen der Temperatur des Himmels und der Temperatur der Bauteiloberfläche

ε = Emmissivität der Bauteiloberfläche für langwellige Strahlung

Innerer Wärmeübergangskoeffizient

	Wärme- übergangs- widerstand	Wärme- übergangs- koeffizient	konvektiver Wärme- übergangskoeffizient	radiativer Wärme- übergangs- koeffizient	Quelle
	[m ² K / W]	[W / (m ² K)]	[W / (m ² K)]	[W / (m ² K)]	
aufsteigender Wärmestrom	0,1	10			[DIN EN ISO 6946]
absteigender Wärmestrom	0,17	5,882			[DIN EN ISO 6946]
horizontaler Wärmestrom	0,13	7,692			[DIN EN ISO 6946]
für Feuchteberechnungen bei opaken Bauteilen und Tauwasser an innerer Oberfläche	0,25	4			[DIN EN ISO 13788], S. 12
Keller- und Außenwände, Dächer	0,13	7,692			[WUFI-Hilfetext]
allgemein	0,125	8			[Kuenzel94], S. 32
allgemein	0,125	8			[WTA_E_6-2], S. 21 oben
für Feuchteberechnungen in Ecken und Kanten, hinter Gegenständen	0,250	4			[WTA_E_6-2], S. 21 oben
für Feuchteberechnungen, aufsteigender Wärmestrom			5	5,7 ε	[DIN EN ISO 15026], S. 12
für Feuchteberechnungen, absteigender Wärmestrom			0,7	5,7 ε	[DIN EN ISO 15026], S. 12
für Feuchteberechnungen, horizontaler Wärmestrom			2,5	5,7 ε	[DIN EN ISO 15026], S. 12

schwarz: Werte aus der Literatur, blau: daraus berechnet

Für die üblichen raumseitigen Oberflächen kann ein Emissionsgrad von 0,9 angenommen werden.

Bei dieser Zusammenstellungen der verschiedenen Angaben zu den Wärmeübergangskoeffizienten bzw. Wärmeübergangswiderständen an den äußeren und raumseitigen Oberflächen von Bauteilen ist zu beachten, dass sich manche Quellen auf stationäre Berechnungen beziehen und es in manchen Quellen um dynamische Berechnungen geht: [DIN EN ISO 6946] und [DIN EN ISO 13788] beschreiben stationäre Berechnungsverfahren. Bei [Schaube/Werner86] handelt es sich um die Darstellung von Messergebnissen. Alle anderen Quellen beschreiben dynamische hygrothermische Simulationen.

Windstärken

Die folgende Tabelle soll eine Vorstellung von den Windstärken bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten vermitteln.

Wind- geschwindig- keit [m/s]	Wind- geschwindig- keit [km/h]	Wind-Bezeichnung
0	0,0	Windstille unter 1,85 km/h
10	36,0	mäßiger Wind bis 37 km/h
20	72,0	stürmischer Wind bis 74 km/h
30	108,0	orkanartiger Sturm bis 117 km/h

Tabelle: Windstärken

Quelle: Wikipedia: Wind

Vergleich der Angaben zum äußeren Wärmeübergangskoeffizienten

Das Bild zeigt den Vergleich der drei Angaben zum Wind- bzw.- Luftgeschwindigkeits-abhängigen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten auf der Außenseite. Grün: Die beiden Angaben für Luv und parallel angeströmte Oberflächen und für die Lee-Seite nach [Schaube/Werner86], wie sie in WUFI vorgegeben sind, blau nach [DIN EN ISO 15026] und [DIN EN ISO 6946].

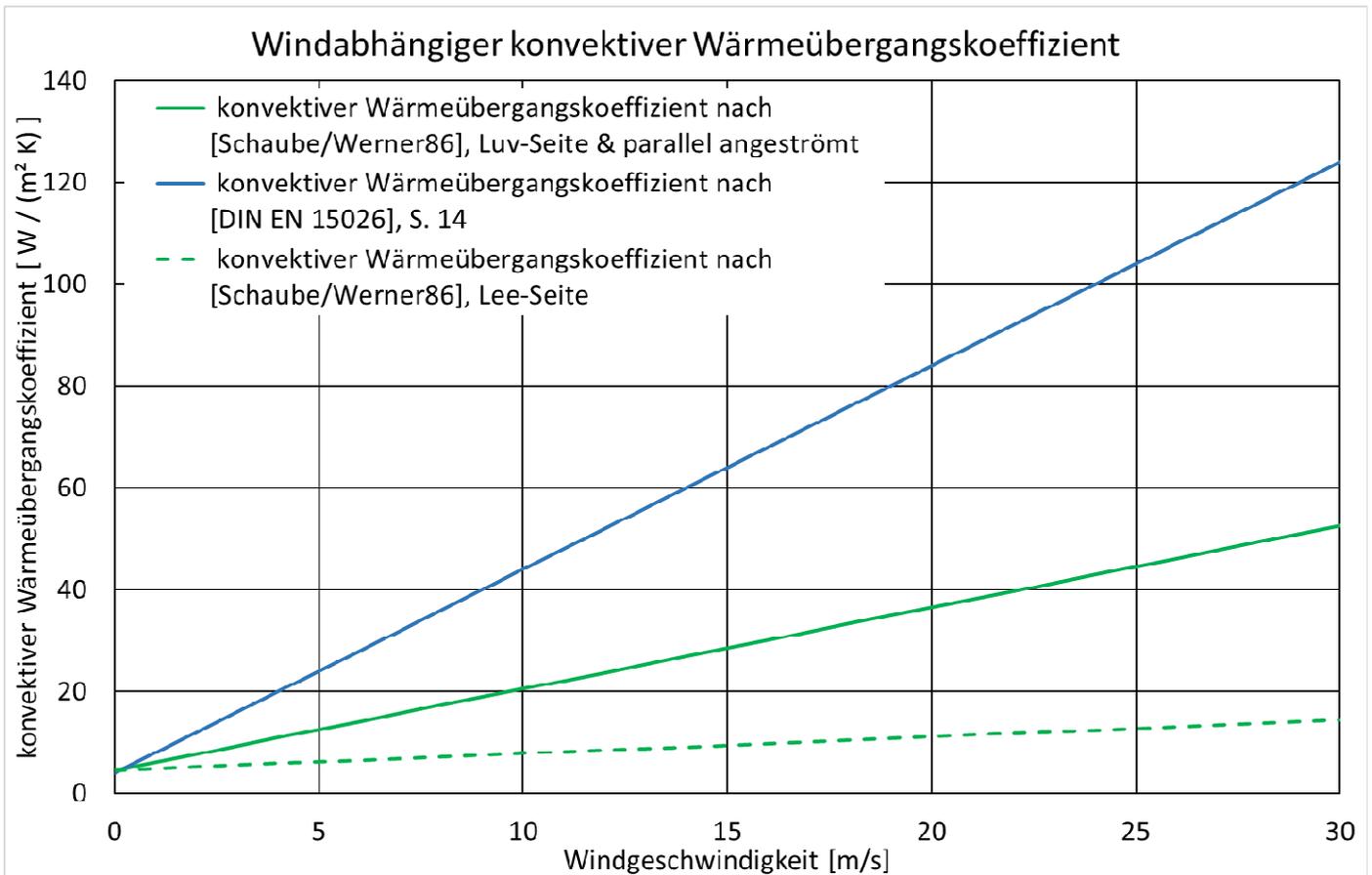


Bild 39: wind- bzw. luftgeschwindigkeitsabhängiger konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Beim Vergleich dieser Angaben ist zu beachten, dass sich die Angabe in [DIN EN ISO 15026] und [DIN EN ISO 6946] auf eine Luftgeschwindigkeit nahe der Oberfläche bezieht. Die Angaben aus [Schaube/Werner86] beziehen sich auf die Windgeschwindigkeit.

Die Windgeschwindigkeit wird vom Deutschen Wetterdienst in 10 m Höhe über offenem Gelände oder mindestens 6 m über der durchschnittlichen Bebauungshöhe gemessen [DWD-TRY11], Handbuch, S. 11. Auch die in den Testreferenzjahren angegebenen Windgeschwindigkeiten beziehen sich auf einen solchen Standort. Auch privat betriebene Wetterstationen, z. B. von Forschungsinstitutionen, deren Daten evtl. verwendet werden, sind üblicherweise auf dem Dach eines Gebäudes angebracht. Dort ist die Windgeschwindigkeit im Allgemeinen höher als an den Gebäudefassaden.

Bei gegebener Windgeschwindigkeit ist die Luftgeschwindigkeit an der Fassade im Allgemeinen geringer. Daher ist es sinnvoll, den Einfluss der Luftgeschwindigkeit in der Berechnungsformel zu erhöhen, wenn für die Berechnung die Luftgeschwindigkeit an der Fassade verwendet wird.

Für hygrothermische Berechnungen stehen jedoch in den seltensten Fällen Messwerte der Luftgeschwindigkeit nahe der Gebäudeoberfläche zur Verfügung. Im Allgemeinen stehen Windgeschwindigkeiten aus gemessenen Wetterdaten, aus Testreferenzjahren oder ähnlichen Quellen zur Verfügung. Dann sollte besser eine der Korrelationen nach [Schaube/Werner86] verwendet werden.

Stehen für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten Werte der Luftgeschwindigkeit an der betrachteten Oberfläche zur Verfügung, dann sollte die Formel aus [DIN EN ISO 15026] bzw. [DIN EN ISO 6946] verwendet werden.

Strahlungsabsorption und -emission

Das elektromagnetische Spektrum wird in verschiedenen Wellenlängenbereiche eingeteilt. In der Bauphysik sind die Bereiche der Solarstrahlung und der Wärmestrahlung bei üblichen Umgebungstemperaturen von Interesse.

Einteilung des in der Bauphysik interessierenden Teils des elektromagnetischen Spektrums nach [DIN 5031], Teil 7.

Bereiche		Wellenlängen	
Ultraviolett	UV-C	100 - 280 nm	
	UV-B	280 - 315 nm	
	UV-A	315 - 380 nm	
sichtbar	blau	380 - 780 nm	
	grün		
	gelb		
	rot		
Infrarot	nahes IR (NIR)	780 - 3000 nm 0,78 - 3 µm	
	mittleres IR (MIR)	3000 - 50000 nm 3 - 50 µm	
	fernes Infrarot (FIR)	50000 - 1000000 nm 50 µm - 1 mm	

Tabelle: Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums

Absorptions- und Emissionsgrad, lang- und kurzwellige Strahlung

Der Absorptionsgrad ist wellenlängenabhängig. In bauphysikalischen und solarthermischen Zusammenhängen (Niedertemperatur-Solarthermie) unterscheidet man jedoch nur zwischen den Absorptionsgraden für den Bereich der kurzwelligen Solarstrahlung mit Wellenlängen kleiner als ca. 3000 nm und Absorptionsgraden für die Infrarotstrahlung für Wellenlängen über 3000 nm. Für beide Bereiche werden Mittelwerte über den gesamten Wellenlängenbereich gebildet.

Dies rechtfertigt sich darin, dass das Solarspektrum bei Wellenlängen über 3000 nm nur geringe Intensität besitzt und andererseits die Wärmestrahlung von Bauteilen bei den in diesem Zusammenhang vorkommenden Temperaturen nur seine geringe Intensität bei Wellenlängen kürzer als 3000 nm hat. Man kann die beiden Bereiche also als weitgehend getrennt voneinander betrachten.

Für jede Wellenlänge ist der Emissionskoeffizient gleich dem Absorptionskoeffizient. Bei Verwendung von Mittelwerten über die beiden Bereiche der kurzwelligen und der langwelligen bzw. Infrarot-Strahlung benötigt man also zwei Absorptions- bzw. Emissionskoeffizienten für die kurz- und die langwellige Strahlung.

Der Absorptionsgrad für Solarstrahlung kann aus der wahrgenommenen Helligkeit einer Oberfläche abgeschätzt werden. Der langwellige Emissions- bzw. Absorptionsgrad kann für die meisten matten Oberflächen mit ca. 0,9 angenommen werden. Für Glas, Metalle und glänzende Oberflächen ist er geringer. Werte für die Emissionsgrade für langwellige Strahlung findet man in der Literatur zur Gebäudethermographie, z. B. [Schindel07], S. 88.

Solarstrahlung

Die Solarstrahlung wird mit dem Anteil, der durch den solaren Absorptionsgrad der Oberfläche angegeben wird, absorbiert. Der Wärmestrom durch absorbierte Solarstrahlung beträgt also

$$\dot{j}_{sol,o} = G \alpha_{sol,o}$$

mit

G = auf die Dachfläche auftreffende Solarstrahlung
 $\alpha_{sol,o}$ = Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung
an der Außenseite der Membran

Dabei ist hier die gesamte Solarstrahlung gemeint, die sich zusammensetzt aus der Strahlung direkt von der Sonne, aus kurzwelliger Diffusstrahlung durch Reflexionen in der Atmosphäre und aus Strahlung, die an anderen Oberflächen in der Umgebung reflektiert wurde.

Je nach verwendeten Wetterdaten können diese die Strahlungswerte für die direkte und diffuse Solarstrahlung auf eine horizontale Ebene enthalten oder sie können Strahlungswerte enthalten, die bereits für die Orientierung und Neigung des betrachteten Bauteils umgerechnet wurden. Im ersten Fall müssen die Strahlungsdaten noch für die Orientierung und Neigung des betrachteten Bauteils umgerechnet werden. Eine Anleitung findet sich in vielen Büchern zur Nutzung von Solarenergie, z.B. [Duffie/Beckman06]., aber auch in [VDI 6020], S. 18 ff. Wetterdaten mit bereits für eine vorgegebene Orientierung und Neigung umgerechneten Strahlungsdaten können z. B. mit einem Gebäudesimulationsprogramm erzeugt werden, da die Umrechnung dort implementiert ist.

Langwellige Strahlung und Himmelstemperatur

Für die langwellige Strahlung, die eine horizontale Fläche vom Himmel empfängt, wird in den Wetterdaten entweder die Strahlungsintensität (atmosphärische Gegenstrahlung) oder einer dieser entsprechenden Himmelstemperatur angegeben. Wird die Himmelstemperatur angegeben, so erfolgt dies für einen Emissionsgrad der Atmosphäre von 1.

Diese Himmelstemperatur liegt immer unterhalb der Lufttemperatur. Bei bewölktem Himmel ist der Unterschied zur Lufttemperatur gering. Bei wolkenlosem Himmel und klarer Luft (wenig Staub und Wasserdampf etc.) kann die Differenz zur Lufttemperatur bis über 20 K betragen.

Für geneigte Flächen muss auch die Intensität der auftreffenden Wärmestrahlung vom Himmel umgerechnet werden für die jeweilige Neigung. Hinzu kommt in diesem Fall noch die Wärmestrahlung, die an Oberflächen der Umgebung (Gebäude, Vegetation) reflektiert wird und die von diesen Oberflächen selbst ausgesandt wird. Zur Berechnung der von den Umgebungsflächen ausgesandten Wärmestrahlung wird deren Temperatur im Allgemeinen gleich der Lufttemperatur gesetzt und ein Emissionsgrad von 0,9 angenommen. Die Umrechnung der IR-Strahlungsdaten erfolgt für geneigte Flächen analog zur Umrechnung von Solarstrahlungswerten für die Horizontale in Solarstrahlungswerte für geneigte Flächen.

Die Absorption dieser Strahlung erfolgt entsprechend des Absorptionsgrades der Bauteiloberfläche für langwellige Strahlung. Die Emission langwelliger Strahlung erfolgt entsprechend dem Emissionsgrad der Oberfläche für langwellige Strahlung, der gleich dem Absorptionsgrad für diesen Wellenlängenbereich ist. Mehrfachreflexionen zwischen der Oberfläche und dem Himmel werden nicht berücksichtigt. Sie sind aufgrund der geringen Ausdehnung einer Gebäudeoberfläche im Vergleich zur Himmelskuppel vernachlässigbar [WUFI15].

Für horizontale Oberflächen ergibt dies zusammen eine Wärmestromdichte von

$$\dot{j}_{IR,o} = \varepsilon_{IR,o} \dot{j}_{sky} - \sigma \varepsilon_{IR,o} (\vartheta_s + T_f)^4$$

mit

- \dot{j}_{sky} = auf die Dachfläche auftreffende langwellige Strahlung vom Himmel und der Umgebung
- σ = Stefan-Boltzmann-Konstante
- $\varepsilon_{IR,o}$ = Absorptions- und Emissionsgrad der Oberfläche für langwellige Strahlung
- ϑ_s = Oberflächentemperatur [°C]
- T_f = Verschiebung der Celcius- und Kelvin Temperaturskalen

oder

$$j_{IR,o} = \sigma \varepsilon_{IR,o} (\vartheta_{sky} + T_f)^4 - \sigma \varepsilon_{IR,o} (\vartheta_s + T_f)^4$$

mit

ϑ_{sky} = Temperatur des Himmels

Berechnung der langwelligigen Strahlung aus anderen Wettergrößen

Falls keine Daten zur Himmelstemperatur oder zur langwelligigen Einstrahlung vom Himmel vorliegen, müssen diese aus den übrigen Wetterdaten geschätzt werden. Für wolkenlosen Himmel existieren zur Abschätzung der Himmelstemperatur oder des Emissionsgrades der Atmosphäre verschiedene Modelle. [Eicker/Dalibard11] listen einige Modelle auf und vergleichen sie mit eigenen gemessenen Daten zur Himmelstemperatur.

Mit dem Modell von [Berdahl/Martin84-2] für den Emissionsgrad der Atmosphäre konnte die aus den Pyrgometer-Messungen berechnete Himmelstemperatur gut angenähert werden, solange der Himmel klar war.

Für bewölkten Himmel kann der Emissionsgrad der Wolken mit 0,9 angenommen werden. Für teilweise bewölkten Himmel muss der Bewölkungsgrad bestimmt werden. Hierzu wurde das Modell von [Perraudeau86] benutzt. Die Emissionsgrade für klaren und bewölkten Himmel wurden gewichtet gemittelt entsprechend dem TRNSYS-Type 15 [TRNSYS12]. Das in [Eicker/Dalibard11] beschriebene Modell von [Perraudeau86], aber auch andere Modelle zur Berechnung des Bewölkungsgrades nutzen die Werte der Diffus- und Direktstrahlung. Dies bedeutet, dass der Bewölkungsgrad nur für die Stunden während des Tages berechnet werden kann. Für die Nächte wird dann der Bewölkungsgrad des jeweils vorangegangenen Nachmittags angenommen.

Während bewölkter Phasen war die Übereinstimmung mit den Pyrgometer-Messungen weniger gut. Das beschriebene Modell für die langwellige Himmelsstrahlung wurde für Simulationen des PV/T-Kollektors des Solar Decathlon-Hauses der Hochschule für Technik Stuttgart benutzt, welcher nachts zur Kühlwasser-Rückkühlung benutzt wurde. Trotz der nur sehr groben Schätzung der nächtlichen Bewölkung stimmten die Simulationsergebnisse gut mit den Messwerten überein.

Die Möglichkeiten zur Berechnung der atmosphärischen Gegenstrahlung aus anderen Wettergrößen wurden nicht weiter recherchiert, da dies für das vorliegende Projekt nicht notwendig war. Daher können an dieser Stelle nur diese Literaturhinweise gegeben werden.

Feuchteübergang und damit verbundener Wärmeübergang

Der Übergang von Wasser, das in der Luft als Wasserdampf vorhanden ist, an Oberflächen erfolgt durch Wasserdampfdiffusion in der Luft und durch Feuchtetransport an die Oberfläche durch Luftkonvektion. Wie auch beim konvektiven Wärmeübergang können diese beiden Mechanismen nicht klar voneinander getrennt werden. Analog zum konvektiven Wärmeübergang betrachtet man den Luftraum außerhalb der oberflächennahen Grenzschicht als Raum mit homogenem Wasserdampfgehalt und definiert einen Feuchteübergangskoeffizienten β . Während für den konvektiven Wärmeübergang die Temperaturdifferenz zwischen der Luft und der Oberfläche das treibende Potential darstellt, ist für den Feuchteübergang die Differenz der Wasserdampfdrücke in der Luft und an der Oberfläche das treibende Potential. Die Feuchtestromdichte von der Luft zur Oberfläche ist proportional zum Feuchteübergangskoeffizienten und zur Differenz der Wasserdampfdrücke in der Luft und an der Oberfläche.

$$\dot{m}' = \beta_p (p_{air} - p_{surf})^{(1)}$$

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : \text{immer} \\ - : m' > 0 \end{array} \right)$$

mit

- \dot{m}' = Massenstromdichte für Wasserdampf
- β_p = Feuchteübergangskoeffizient, bezogen auf die Dampfdruckdifferenz
- p_{air} = Wasserdampfpartialdruck in der Luft
- p_{surf} = Wasserdampfdruck an der Oberfläche
- m' = für nicht feuchtespeichernde Materialien:
= Massenbelegung der Oberfläche mit Wasser oder Eis

Die einzelnen Größen und der Anmerkung (1) in der obigen Gleichung werden weiter unten noch erläutert.

Manche Literaturstellen geben die Feuchtestromdichte als proportional zur Differenz der Wasserdampfkonzentration an. Der Proportionalitätsfaktor wird dann β_c oder nach [DIN EN ISO 9346] β_v genannt.

$$\dot{m}' = \beta_v (c_{air} - c_{surf})^{(1)}$$

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : immer \\ - : m' > 0 \end{array} \right)$$

mit

- \dot{m}' = Massenstromdichte für Wasserdampf
- β_c = Feuchteübergangskoeffizient, bezogen auf die Differenz der Wasserdampfkonzentration
- c_{air} = Wasserdampfkonzentration in der Luft
- c_{surf} = Wasserdampfkonzentration an der Oberfläche

Die Wasserdampfkonzentration als treibendes Potential anzunehmen, ist jedoch nur bei isothermen Problemstellungen gerechtfertigt, da bei homogener Temperatur die Wasserdampfkonzentration proportional zum Dampfdruck ist. Wasserdampf in Luft kann in guter Näherung als ideales Gas betrachtet und mit der allgemeinen Gasgleichung berechnet werden.

$$pV = nRT$$

$$c = \frac{n}{V} = \frac{p}{RT}$$

mit

- p = Wasserdampfdruck
- V = Volumen
- n = Anzahl der Mole
- R = allgemeine Gaskonstante
- T = absolute Temperatur in K

Bei unterschiedlichen Temperaturen an zwei Orten ist aber selbst bei überall gleicher Wasserdampfkonzentration am Ort mit der höheren Temperatur auch der Dampfdruck höher.

Im Folgenden wird stets der Wasserdampfdruck als treibendes Potential betrachtet und der Feuchteübergangskoeffizient der Einfachheit halber meist einfach β genannt.

In der Luft ist das Wasser als Wasserdampf; also im gasförmigen Zustand enthalten. Wasser an einer Oberfläche befindet sich im flüssigen Zustand. Bei hygroskopischen Materialien ist es zudem noch mehr oder weniger fest an die Oberfläche des Baustoffes gebunden. Der Übergang vom Wasserdampf in der Luft zu flüssigem Wasser an einer Oberfläche ist also mit einem Phasenwechsel verbunden, bei dem Kondensationswärme oder -enthalpie frei wird. Umgekehrt wird zur Verdunstung oder Verdampfung

Verdunstungswärme oder -enthalpie benötigt, die der Umgebung entzogen wird. Der Wert der spezifischen Kondensations- oder Verdunstungsenthalpie hängt von der Art der Oberfläche und der Temperatur ab. Hierauf wird später noch eingegangen. Bei Oberflächentemperaturen unterhalb von 0 °C gilt das entsprechende für die Eis- oder Reifbildung an der Oberfläche bzw. der Sublimation von Eis.

Der mit dem Feuchteübergang verbundene Wärmeübergang berechnet sich also aus der Massenstromdichte und der spezifischen Verdunstungs- oder Sublimationsenthalpie.

$$\dot{j}_m = \dot{m}' h_V$$

$$\dot{j}_m = \beta (p_{air} - p_{surf})^{(1)} h_V$$

$$(1) = \begin{pmatrix} + : immer \\ - : m' > 0 \end{pmatrix}$$

mit

\dot{j}_m = mit dem Feuchteübergang und Phasenwechsel verbundene
Wärmestromdichte

h_V = spezifische Verdunstungs- bzw. Kondensationsenthalpie

Die einzelnen Größen werden im Folgenden noch erläutert.

Nicht-feuchteabsorbierende Oberflächen

Für nicht-feuchteabsorbierende Oberflächen wie Glas, Kunststoffe und Lacke und Metalle wird zur Berechnung des Feuchteübergangs der Wasserdampfdruck an der Oberfläche abgenommen als der Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Oberfläche.

Wenn ein Feuchteübergang von der Luft zur Oberfläche berechnet wird, also der Ausdruck für die Feuchteübergangsrate in der Formel positiv ist, findet Kondensation statt und der Ausdruck wird in der Berechnung berücksichtigt. Wenn der Ausdruck für die Feuchteübergangsrate negativ ist, also ein Feuchteübergang von der Oberfläche zur Luft berechnet wird, wird dieser nur dann berücksichtigt, wenn auf der Oberfläche Wasser oder Eis vorhanden ist. Verdunstung von Wasser oder Sublimation von Eis kann nur stattfinden, wenn und solange auf der Oberfläche auch Wasser oder Eis vorhanden ist. Dies wird ausgedrückt durch den Zusatz in der Gleichung für den Massenstrom zur Oberfläche.

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : \textit{immer} \\ - : m' > 0 \end{array} \right)$$

Bei Außenoberflächen, die auch dem Regen oder Schneefall ausgesetzt sind, ist auch der Niederschlag zu beachten. Im Falle, dass auf der Oberfläche keine Feuchtigkeit vorhanden ist, es aber regnet, kann der auftreffende Regen verdunsten, jedoch maximal bis zur auftreffenden Regenmenge. Entsprechendes gilt für Niederschlag als Schnee. Der Ausdruck (1) muss dann lauten

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : \textit{immer} \\ - : m' > 0 \textit{ oder } |\dot{m}'| \leq \dot{m}_{rain} \end{array} \right)$$

mit

m' = Massenbelegung der äußeren Oberfläche der Membran mit Wasser oder Eis

\dot{m}_{rain} = flächenbezogene Regenmenge pro Zeiteinheit

Feuchteabsorbierende Oberflächen

Bei feuchteabsorbierenden Oberflächen wie Beton, Putze und Holz passt sich deren Wassergehalt an den Wasserdampfgehalt der umgebenden Luft an. Man beschreibt ihr Verhalten durch Sorptionsisothermen. Sorptionsisothermen beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt des Baustoffes und dem Feuchtegehalt der umgebenden Luft bei einer festgelegten Temperatur. Der Feuchtegehalt der Luft wird meist als relative Feuchte angegeben. Das folgende Bild zeigt als Beispiel die Sorptionsisothermen von Holz bei verschiedenen Temperaturen.

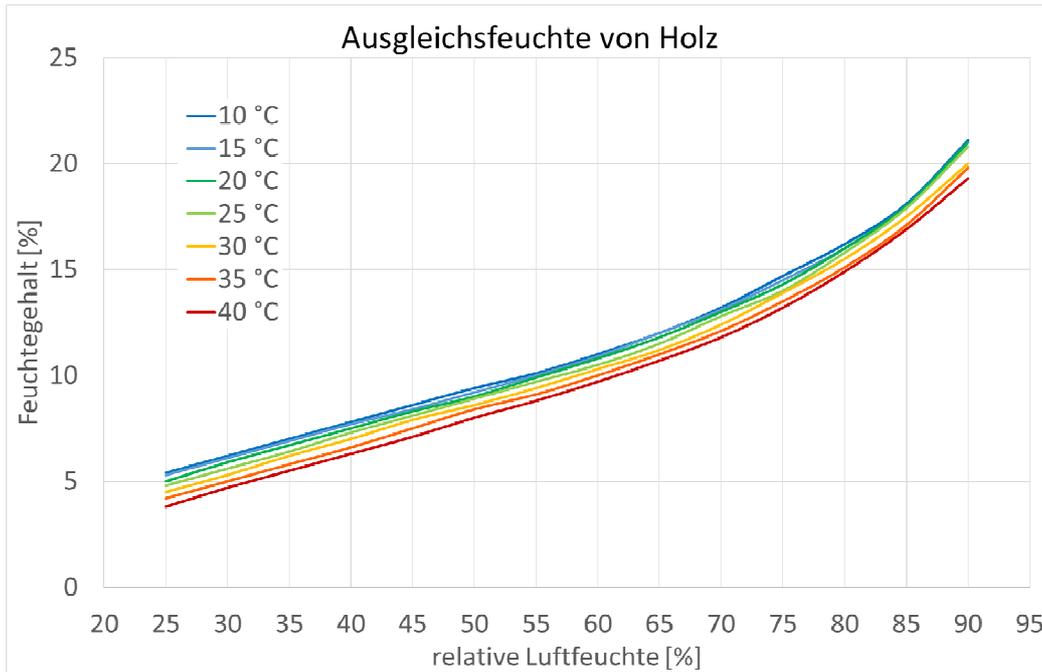


Bild 40: Sorptionsisotherme von Holz bei verschiedenen Temperaturen

Datenquelle: Prof. R. Keylwert und Angaben des U.S.Forest Products Laboratory, Madison 1951, übernommen aus [opw17]

Die relative Feuchte der Luft direkt an der Oberfläche ergibt sich also mit der Sorptionsisothermen aus dem Feuchtegehalt der oberflächennahen Bauteilschicht bei der Temperatur der Oberfläche. Die Luft direkt an der Oberfläche besitzt auch die Temperatur der Oberfläche. Daraus ergibt sich der Wasserdampfdruck an der Oberfläche p_{surf} .

$$p_{surf} = \varphi p_{sat} (\vartheta_{surf})$$

mit

- φ = relative Feuchte der Luft an der Oberfläche
- p_{sat} = Sättigungsdampfdruck
- ϑ_{surf} = Temperatur der Oberfläche

Die Berechnung des Sättigungsdampfdruckes wird weiter unten erläutert.

Der Feuchteübergangskoeffizient

Für stationäre Berechnungen

Der Wasserdampfübergangswiderstand soll für stationäre Berechnungen nach [DIN EN ISO 13788] und nach [DIN 4108], Teil 3, also für das Glaser-Verfahren und die Berechnung des Temperaturfaktors $f_{R_{si}}$, als vernachlässigbar angenommen werden [DIN EN ISO 13788], S. 12. Das bedeutet: Der Feuchteübergangskoeffizient wird unendlich und in der Berechnung entspricht der Wasserdampfdruck an der Oberfläche dem Wasserdampfdruck der Raumluft bzw. der Umgebungsluft. Somit ist der an der Oberfläche angenommene Dampfdruck eher etwas hoch und die Ergebnisse für die Feuchtebelastung des Bauteils liegen eher „auf der sicheren Seite“.

Für dynamische Simulationen nach [Kuenzel94] und [Incropera13]

Für dynamische Simulationen macht diese Annahme keinen Sinn, da sie zu rechentechnischen Problemen führt. Hier muss ein Feuchteübergangskoeffizient mit endlichem Wert angenommen werden. [Kuenzel94], S. 33, gibt den Feuchteübergangskoeffizient als proportional zum konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an mit

$$\beta_p = F_\beta \alpha_k$$

mit

F_β = Feuchteübergangsproportionalitätsfaktor

$$F_\beta = 7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg K}}{\text{s W Pa}} = 7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{K} \cdot \text{s}^4}{\text{kg m}}$$

In der englisch-sprachigen Literatur wird der Feuchteübergangskoeffizient oft aus strömungstechnischen Größen abgeleitet. Die Berechnungsweise wird in [Incropera13] beschrieben. Dort wird ein Proportionalitätsfaktor zwischen dem Feuchte- und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten hergeleitet. Der Feuchteübergangskoeffizient bezieht sich dabei auf die Konzentrationsdifferenz. Diese kann aber umgerechnet werden in eine Dampfdruckdifferenz. Die resultierende Formel für den Proportionalitätsfaktor enthält viele Stoffwerte von Luft und Wasserdampf, die natürlich temperaturabhängig sind. Mit den Stoffwerten für die in der Bauphysik üblichen Temperaturen ergeben sich dann Werte für den Proportionalitätsfaktor, die sehr ähnlich dem von [Kuenzel94] angegebenen Wert sind.

Die folgende Tabelle gibt den berechneten Proportionalitätsfaktor F_β für verschiedenen Temperaturen an.

Temperatur ϑ [°C]	Proportionalitäts- faktor F_{β} [s ⁴ K / (kg m)]
-20	7.624×10^{-9}
10	7.042×10^{-9}
22	6.882×10^{-9}
40	6.616×10^{-9}

Tabelle: Proportionalitätsfaktor F_{β} , berechnet aus der Korrelation in [Incropera13]

Der Wert von $7 \cdot 10^{-9}$ (K s⁴)/(kg m) für den Proportionalitätsfaktor zwischen Feuchte- und konvektivem Wärmeübergangskoeffizienten wird auch im hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI verwendet. Mit dem Wert für den äußeren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von 10 W / (m² K), den [Kuenzel94] als mittleren Wert für Deutschland angibt, ergeben sich daraus folgende mittlere Werte für den inneren und äußeren Feuchteübergangskoeffizienten von

Bauteiloberfläche	Gesamt-Wärmeübergangs- koeffizient α [W / (m ² K)]	konv. Wärmeübergangs- koeffizient α [W / (m ² K)]	Wasserdampfübergangs- koeffizient β [kg / (m ² s Pa)]
Außen	17	10	7.5×10^{-8}
Innen	8	ca. 3,5	2.5×10^{-8}

Tabelle: Mittlere Werte für die Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten nach [Kuenzel94] und nach [WTA_6-2-14/D]

Diese Werte werden auch von [WTA_6-2-14/D] angegeben. Der Wasserdampfübergangskoeffizient gilt auch für raumseitige Oberflächen in Ecken und Kanten oder an sonstigen Wärmebrücken. Der Wärmeübergangskoeffizient soll hier um die Hälfte reduziert werden auf 4 W / (m² K). Für äußere Oberflächen in großer Höhe über Gelände empfiehlt [WTA_6-2-14/D], diesen Wert zu erhöhen oder einen windgeschwindigkeits- und windrichtungsabhängigen Wert zu verwenden.

In WUFI ist die Möglichkeit eines windgeschwindigkeits- und windrichtungsabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten implementiert. Dann wird der Feuchteübergangskoeffizient mit dem oben angegebenen Proportionalitätsfaktor aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten berechnet.

Die Tabelle zeigt beispielhaft die Werte für drei verschiedene Windgeschwindigkeiten auf der Luv-Seite oder am Dach eines Gebäudes

Wind- geschwindigkeit [m/s]	konvektiver Wärmeübergangs- koeffizient α_{konv} [W / (m ² K)]	Wasserdampfübergangs- koeffizient β [kg / (m ² s Pa)]
0	4,5	$31,5 \times 10^{-9}$
5	12,5	$87,5 \times 10^{-9}$
25	44,5	$311,5 \times 10^{-9}$

Tabelle: Werte für die windabhängigen Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten nach [Schaube/Werner86] und [Kuenzel94]

Nach [Willems07]

[Willems07], Kap. 3, S. 134 gibt für die Außenoberflächen exemplarisch drei Werte für drei Windgeschwindigkeiten an. Eine Literaturquelle hierzu wird nicht angegeben.

Wind- geschwindigkeit [m/s]	Wasserdampfübergangs- koeffizient β [kg / (m ² h Pa)]	Wasserdampfübergangs- koeffizient β [kg / (m ² s Pa)]
0	$3,3 \times 10^{-4}$	$91,7 \times 10^{-9}$
5	$6,3 \times 10^{-4}$	$175,0 \times 10^{-9}$
25	$25,0 \times 10^{-4}$	$694,4 \times 10^{-9}$

Tabelle: Äußerer Feuchteübergangskoeffizient nach [Willems07].

Für den Feuchteübergangskoeffizienten an raumseitigen Oberflächen gibt [Willems07], Kap. 3, S. 134 eine recht komplizierte Formel an. Eine Literaturquelle wird auch hierzu nicht angegeben.

$$\beta = 1 \cdot 10^{-6} [(T_i - T_{si}) (0,01 \cdot T_i + 2,46) + 0,48 \cdot T_i + 91]$$

mit

$$\beta = \text{innerer Feuchteübergangskoeffizient in } \frac{kg}{m^2 h Pa}$$

$$T_i = \text{Lufttemperatur innen in K}$$

$$T_{si} = \text{Oberflächentemperatur in K}$$

Berechnet man mit dieser Formel den Feuchteübergangskoeffizienten für eine Raumtemperatur von 23 °C und verschiedene Oberflächentemperaturen, so zeigt sich, dass die Temperatur keinen gravierenden Einfluss auf den berechneten Feuchteübergangskoeffizienten hat.

Oberflächen- temperatur $\vartheta_{s,i}$ [°C]	Oberflächen- temperatur $T_{s,i}$ [K]	Wasserdampfübergangs- koeffizient β [kg / (m ² h Pa)]	Wasserdampfübergangs- koeffizient β [kg / (m ² s Pa)]
20	293,15	$2,494 \times 10^{-4}$	$69,3 \times 10^{-9}$
18	291,15	$2,6,3 \times 10^{-4}$	$72,3 \times 10^{-9}$
15	288,15	$2,765 \times 10^{-4}$	$76,8 \times 10^{-9}$
12	285,15	$2,928 \times 10^{-4}$	$81,3 \times 10^{-9}$

Tabelle: Innerer Feuchteübergangskoeffizient nach [Willems07], Kap. 3, S. 134

Nach [DIN EN 15026]

[DIN EN 15026] gibt für die oberflächennahen Luftgrenzschichten nicht Feuchteübergangskoeffizienten an, sondern wasserdampfdiffusions-äquivalente Luftschichtdicken s_d .

Für äußere Oberflächen soll der s_d -Wert der Luftgrenzschicht berechnet werden mit der Formel

$$s_{d,se} = \frac{1}{67 \frac{1}{m} + 90 \frac{s}{m^2} v}$$

mit

$s_{d,se}$ = wasserdampfdiffusions-äquivalente Luftschichtdicke der äußeren Luftgrenzschicht

v = Luftgeschwindigkeit, gemessen möglichst nahe an der Oberfläche in m/s

Die Feuchtestromdichte ergibt sich dann aus

$$j_D = \frac{\delta_D}{s_{d,se}} (p_{air} - p_{surf})$$

mit

j_D = Wasserdampfstromdichte zur Oberfläche hin

δ_D = Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient

p_{air} = Wasserdampfpartialdruck in der Luft

p_{surf} = Wasserdampfdruck an der Oberfläche

Und der Feuchteübergangskoeffizient ist somit

$$\beta = \left(67 \frac{1}{m} + 90 \frac{s}{m^2} v \right) \delta_D$$

Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient wird im Kapitel „Wasserdampfdiffusion in Luft“ beschrieben.

Die Tabelle gibt beispielhaft Werte für den Feuchteübergangskoeffizienten an.

Windgeschwindigkeit [m/s]	Wasserdampfübergangskoeffizient β [kg / (m ² h Pa)]
0	12,4 x 10 ⁻⁹
5	95,7 x 10 ⁻⁹
25	429,1 x 10 ⁻⁹

Tabelle: Äußerer Feuchteübergangskoeffizient, berechnet nach [DIN EN 15026]

Für raumseitige Oberflächen gibt [DIN EN 15026] die Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten für drei Wärme- bzw. Feuchtestromrichtungen an. Dabei werden die Feuchteübergangskoeffizienten wieder als s_d -Werte ausgedrückt. Die Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten wurden bereits in die obige Übersichtstabelle hierzu aufgenommen, werden hier aber zur Gegenüberstellung nochmals angegeben. Die folgende Tabelle gibt die Werte der Norm wieder und die daraus berechneten Feuchteübergangskoeffizienten. Den drei Wärmestromrichtungen werden zudem Luftgeschwindigkeiten zugeordnet, wie sie in Innenräumen angenommen werden können.

Wärmestrom- richtung	konvektiver Wärme- übergangs- koeffizient [W / (m ² K)]	radiativer Wärme- übergangs- koeffizient [W / (m ² K)]	Luft- geschwindig- keit [m/s]	wasserdampfdiffusions- äquivalente Luftschichtdicke der Luftgrenzschicht $s_{d,si}$ [m]	Feuchteübergangs- koeffizient [kg / (m ² s Pa)]
abwärts	0,7	5,7 ε	0	0,03	6,2 x 10 ⁻⁹
horizontal	2,5	5,7 ε	0,2	0,008	23,1 x 10 ⁻⁹
aufwärts	5	5,7 ε	0,5	0,004	46,3 x 10 ⁻⁹

Tabelle: innerer Feuchteübergangskoeffizient, berechnet nach [DIN EN 15026]

Vergleich der Angaben zum Feuchteübergangskoeffizienten

Im untenstehenden Diagramm werden die beschriebenen Angaben zum Feuchteübergangskoeffizienten als Funktion der Luft- bzw. der Windgeschwindigkeit aufgetragen, um sie miteinander vergleichen zu können.

Der pauschale Wert von [Kuenzel94] für Außenoberflächen wurde der Luftgeschwindigkeit 3,6 m/s zugeordnet, was in etwa der dort angegebenen mittleren Windgeschwindigkeit in Deutschland entspricht. Für die grüne Linie wurde der konvektive Wärmeübergangskoeffizient nach [DIN EN 15026] berechnet und daraus jeweils der Feuchteübergangskoeffizient mit dem Proportionalitätsfaktor von [Kuenzel94].

Die Angaben zum raumseitigen Feuchteübergangskoeffizienten wurden einer Luftgeschwindigkeit von 0,2 m/s zugeordnet. Die Werte aus [DIN EN 15026] für einen Wärmestrom abwärts, horizontal und aufsteigend wurden den Luftgeschwindigkeiten 0, 0,2 bzw. 0,5 m/s zugeordnet.

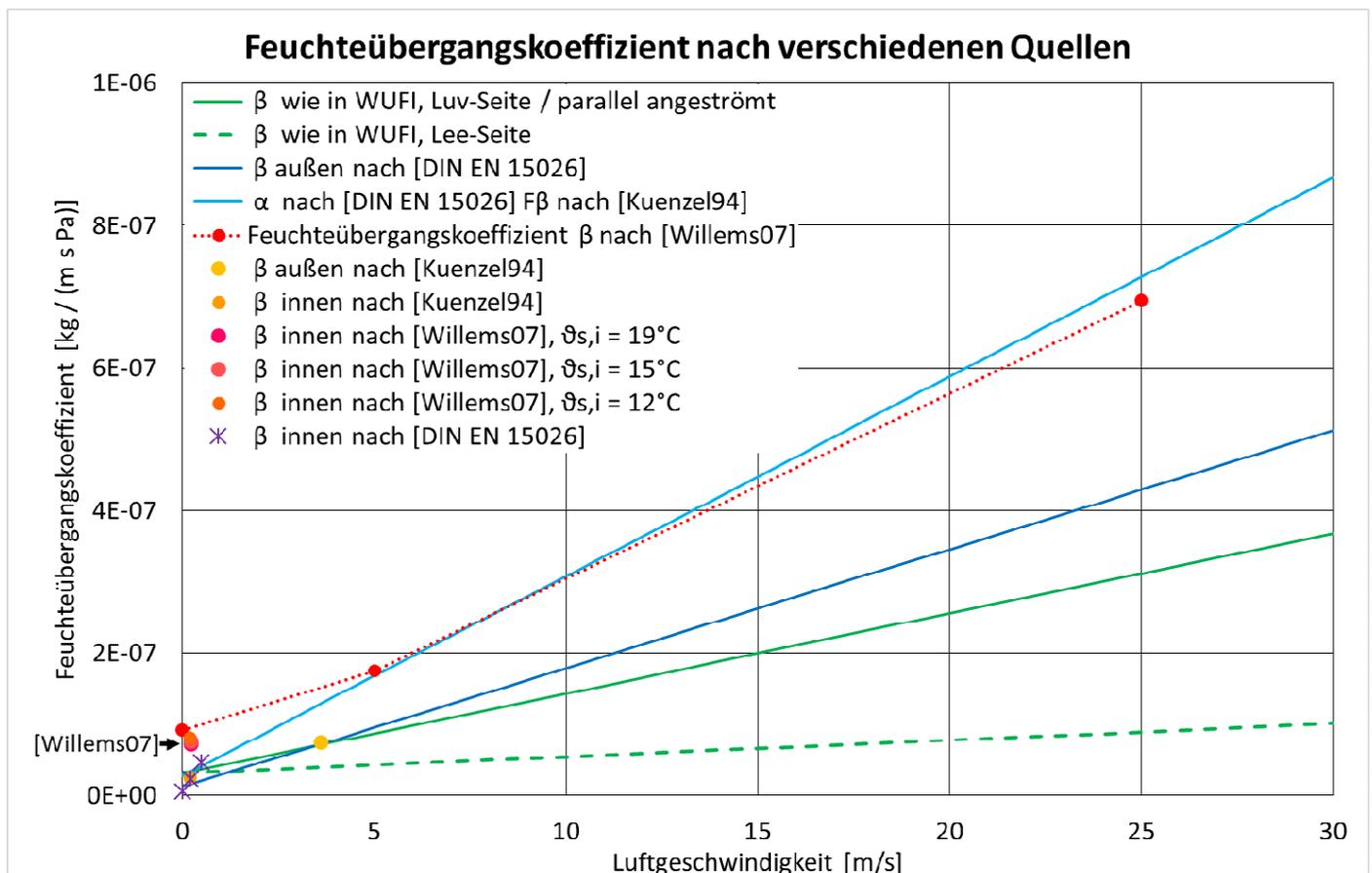


Bild 41: Vergleich verschiedener Angaben zu den inneren und äußeren Feuchteübergangskoeffizienten

Wie der Vergleich zeigt, sind die Angaben zum Feuchteübergangskoeffizienten recht unterschiedlich und es stellt sich die Frage, welchen Wert oder welche Beziehung zur Luft- oder Windgeschwindigkeit verwendet werden sollte.

Für die hellblaue Linie wurde der konvektive Wärmeübergangskoeffizient nach [DIN EN 15026] berechnet und daraus mit dem Proportionalitätsfaktor $F_{\beta} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ (K s}^4\text{) / (kg m)}$ nach [Kuenzel94] der Feuchteübergangskoeffizient. Wie bereits im Abschnitt zum Wärmeübergangskoeffizienten dargelegt, ist die Verwendung der Formel für den äußeren Wärmeübergang aus [DIN EN 15026] jedoch nur dann gerechtfertigt, wenn die Luftgeschwindigkeit nahe an der betrachteten Oberfläche zur Berechnung verwendet werden kann. Ansonsten sollte der Feuchteübergang nach der Formel für den Feuchteübergangskoeffizienten in [DIN EN 15026] (dunkelblaue Linie) oder wie in WUFI (grüne Linien) berechnet werden.

Die Angaben aus [Willems07] (rot gepunktet) decken sich weitgehend mit den Werten nach der Formel für den Feuchteübergangskoeffizienten in [DIN EN 15026].

Der Wasserdampfdruck in der Luft

Im deutschsprachigen Raum wird der Feuchtegehalt der Luft meist als relative Feuchte angegeben. Die relative Feuchte ist definiert als das Verhältnis des Wasserdampfpartialdruckes zum Wasserdampf-sättigungsdruck über einer freien Wasseroberfläche bei der Temperatur der Luft. Die relative Feuchte wird meist als Prozent-Wert angegeben.

$$\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_s} 100\%$$

mit

$$\begin{aligned} p_{H_2O} &= \text{Wasserdampfpartialdruck} \\ p_s &= \text{Sättigungsdampfdruck} \end{aligned}$$

Für Berechnungen wird die relative Feuchte als Anteil, also als Wert zwischen 0 und 1 benötigt. Dann berechnet sich der Wasserdampfpartialdruck aus dem Produkt der relativen Feuchte und des Sättigungsdampfdruckes.

Der Wasserdampfdruck an einer Oberfläche

Zur Berechnung der Feuchtstromdichte zu oder von einer Oberfläche aus oder in die umgebende Luft, wird auch der Wasserdampfdruck an der Oberfläche benötigt. Hier ist zunächst zu unterscheiden, ob die Oberfläche Feuchtigkeit ab- oder adsorbiert oder nicht.

Für Oberflächen, die keine Feuchte aufnehmen, berechnet man den Wasserdampfdruck an der Oberfläche als Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Oberfläche.

Bei Feuchteabsorbierenden Materialien ergibt sich der Wasserdampfdruck aus der relativen Feuchte an der Oberfläche, die sich aus der Sorptionsisothermen des Baustoffes und dessen oberflächennahem Wassergehalt ergibt, und dem Sättigungsdampfdruck, wieder bei der Temperatur der Oberfläche.

Hierauf wurde bereits im ersten Teil dieses Kapitels eingegangen.

Der Wasserdampf-sättigungsdruck

Zur Berechnung des Wasserdampf-sättigungsdruckes über einer ebenen, freien Wasseroberfläche gibt es verschiedene empirische Näherungsformeln. Diese unterscheiden sich in der Genauigkeit und in ihrem Geltungsbereich. Von diesen Formeln seien hier nur diejenigen genannt, die sich im Druck- und Temperaturbereich, der für die Bauphysik interessant ist, und für die Anwendung in Rechenprogrammen gut eignen. Für Berechnungen sind die Magnus- und die Antoine-Gleichung praktisch, da sie relativ einfache Formeln sind, die sich auch umstellen und nach der Temperatur auflösen lassen. Ihre Geltungsbereiche sind für bauphysikalische Anwendungen groß genug.

Potenzformel nach [DIN 4108], Teil 3 von 2001

$$p_s = a \left(b + \frac{\vartheta}{100^\circ C} \right)^n$$

mit

p_s = Sättigungsdampfdruck in Pa
 a, b, n = Konstanten

Die Parameter werden weiter unten in einer Übersichtstabelle angegeben.

Diese Formel wurde in der neuen Ausgabe der Norm ersetzt durch eine Magnus-Formel, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Diese Formel soll hier aber erwähnt werden, da sie noch in vielen Büchern zu finden ist.

Magnus-Formel

Die Magnus-Formel hat die Form

$$p_s = p_0 \cdot e^{\frac{a \vartheta}{b + \vartheta}}$$

mit

$$\begin{aligned} p_s &= \text{Sättigungsdampfdruck} \\ p_0 &= \text{Sättigungsdampfdruck bei } 0 \text{ }^\circ\text{C} \\ a \text{ und } b &= \text{Konstanten} \\ \vartheta &= \text{Temperatur in } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Diese Formel ist in [DIN EN ISO 12572] von 2001, S. 10, Kap. 8.3 und in [DIN 4108], Teil 3 von 2014, Anhang A, S. 33 in umgestellter Form angegeben. In Wikipedia wird diese Formel „Magnus-Formel“ genannt und ist dort mit leicht unterschiedlichen Konstanten angegeben [Wikipedia/Saettigungsdampfdruck14]. Dabei gibt es zwei Parametersätze: Einen Parametersatz für den Sättigungsdampfdruck über Eis und einen Parametersatz für den Sättigungsdampfdruck über Wasser. Letzterer gilt auch für flüssiges Wasser bei Temperaturen unterhalb von 0 °C, also für den Dampfdruck über unterkühltem Wasser.

Die in verschiedenen Quellen angegebenen Parametersätze werden wieder in der Übersichtstabelle angegeben.

Antoine-Gleichung

Eine ähnliche Form hat die Antoine-Gleichung. Sie ist äquivalent zur Magnus-Formel. Die beiden Formeln können ineinander umgerechnet werden. Die Antoine-Gleichung wird in der Literatur in unterschiedlicher Form angegeben. Z. B. wird sie in Wikipedia in der Form

$$\begin{aligned} p_s &= 10^{(a - \frac{b}{c + \vartheta})} \\ \log_{10}(p_s) &= a - \frac{b}{c + \vartheta} \end{aligned}$$

angegeben und im [VDI-Waermeatlas13], Kap. D1, S. 153 und in [Vajen03] in den Formen

$$\ln \frac{p_s}{Pa} = A + \frac{B}{\vartheta + C}$$

bzw.

$$p_s = 10^2 e^{a - \frac{b}{c + \vartheta}}$$

Dabei haben die Koeffizienten jeweils andere Werte.

Sie kann umgeschrieben werden in die Form

$$p_s = p_0 e^{-\frac{b}{c+\vartheta}}$$

mit

$$p_0 = e^a$$

oder

$$p_s = e^{\alpha - \frac{\beta}{\gamma + \vartheta}}$$

Die unten angegebenen Parameter beziehen sich auf die zuletzt genannte Form der Antoine-Gleichung.

Zusammenhang von Magnus-Formel und Antoine-Gleichung

Die Magnus-Formel in der Form

$$p_s = e^{\ln p_0 + \frac{a\vartheta}{b+\vartheta}}$$

kann der Antoine-Gleichung gleichgesetzt werden. Durch Vergleich der Exponenten

$$\ln p_0 + \frac{a\vartheta}{b+\vartheta} = \alpha - \frac{\beta}{\gamma + \vartheta}$$
$$\frac{b \ln p_0 + \vartheta \ln p_0 + a\vartheta}{b + \vartheta} = \frac{\alpha\gamma + \alpha\vartheta - \beta}{\gamma + \vartheta}$$

folgt durch Koeffizientenvergleich

$$b \ln p_0 = \alpha\gamma - \beta$$

$$\ln p_0 + a = \alpha$$

$$b = \gamma$$

und daraus die Umrechnungen der Parameter.

$$p_0 = e^{\alpha - \frac{\beta}{\gamma}}$$

$$a = \frac{\beta}{\gamma}$$

$$b = \gamma$$

$$\alpha = \ln p_0 + a$$

$$\beta = a b$$

$$\gamma = b$$

Formeln als Funktion der absoluten Temperatur

Für die unten vorgestellte Berechnung der Verdunstungsenthalpie aus dem Sättigungsdampfdruck müssen die Formeln umgewandelt werden.

Die Magnus-Formel wird dann zu

$$p_s = p_0 \cdot e^{\frac{(aT - aT_f)}{(T - T_0)}}$$

mit

T = absolute Temperatur

T_f = Verschiebung der Celcius- und Kelvin-Temperaturskalen

$$T_f = 273,15K$$

$$T_0 = T_f - b$$

Die Antoine-Gleichung schreibt sich als der Funktion der absoluten Temperatur

$$p_s = e^{\alpha - \frac{\beta}{T - T_0}}$$

mit

T = absolute Temperatur

T_f = Verschiebung der Celcius- und Kelvin-Temperaturskalen

$$T_f = 273,15K$$

$$T_0 = T_f - \gamma$$

Weitere Formeln zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks

Zwei weitere Formeln sollen hier lediglich erwähnt werden, da sie für andere Anwendungsgebiete interessant sein können:

Der Wikipedia-Artikel „Sättigungsdampfdruck“ nennt die Goff-Gracht-Gleichung als derzeit exakteste Gleichung zu Berechnung des Sättigungsdampfdruckes. Sie wird auch von der Weltorganisation für Meteorologie empfohlen.

[VDI-Waermeatlas13], Kap. D1, S. 153 nennt die Wagner-Gleichung als Gleichung, mit der der gesamte Bereich bis zum kritischen Punkt wiedergegeben werden kann. D. h. sie gilt auch für Temperaturen über 100 °C und entsprechend hohe Drücke.

Zusammenstellung

Die Tabelle stellt die Koeffizienten der vorgestellten Formeln zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes zusammen und gibt jeweils den Gültigkeitsbereich der Formeln an.

Die aus der Literatur übernommenen Parameter für die Magnus-Formel wurden umgerechnet in Parameter für die Antoine-Gleichung (blaue Schrift in der Tabelle) und umgekehrt: Parameter für die Antoine-Gleichung wurden umgerechnet in Parameter für die Magnus-Formel. Sie werden ebenfalls in blauer Schrift dargestellt.

[Glueck91], S. 12/13 gibt für die Antoine-Gleichung mit den von ihm angegebenen Parametern eine Genauigkeit von 0,2 % im Bereich über 0 °C an und eine Genauigkeit von 0,26 % im Bereich unter 0 °C.

Bei Anwesenheit anderer Gase, z.B. Luft ist ein Korrekturfaktor anzuwenden. Dieser Korrekturfaktor ist bei normalem Umgebungsdruck praktisch gleich 1 und kann daher vernachlässigt werden.

Parameter			Parameter				Gültigkeitsbereich		
p_0 / n	a	b	p_0	α	β	γ	ϑ_{\min}	ϑ_{\max}	Aggregatzustand
[Pa] / [-]	[Pa] / [-]	[-] / [K]	[Pa]	[-]	[K]	[K]	[°C]	[°C]	

Potenzformel

[DIN 4108-3] von 2001	8,02	288,680	1,098					0	30	Wasser
[DIN 4108-3] von 2001	12,30	4,689	1,486					-20	0	(Eis)

Magnus-Formel

DIN EN ISO 12572 DIN 4108-3, S. 71 DIN EN ISO 13788, Anhang E	610,500	17,269	237,300		23,683	4097,93	237,300			Wasser
DIN 4108-3, S. 71 DIN EN ISO 13788, Anhang E	610,500	21,875	265,500		28,289	5807,81	265,500			Eis

Wikipedia: Sättigungsdampfdruck	611,200	17,620	243,120		24,035	4283,77	243,120	-45	60	(unterkühltes) flüssiges Wasser
Wikipedia: Sättigungsdampfdruck	611,200	22,460	272,620		28,875	6123,05	272,620	-65	0,01	Eis

WUFI-Hilfe: Kapitel "Luftfeuchte"	610,780	17,081	234,175		23,496	3999,91	234,175	0,01	100,9	Wasser
WUFI-Hilfe: Kapitel "Luftfeuchte"	610,780	17,844	245,425		24,258	4379,27	245,425	-50,9	0,01	(unterkühltes) flüssiges Wasser
WUFI-Hilfe: Kapitel "Luftfeuchte"	610,714	22,443	272,440		28,858	6114,35	272,440	-50,9	0,01	Eis

Antoine-Gleichung

Wikipedia: Antoine-Gleichung	605,580	17,071	233,426		23,478	3984,92	233,426	0,01	100	flüssiges Wasser
[Glueck91], S. 13	610,754	17,206	236,251		23,621	4065,00	236,251	0,01	80	flüssiges Wasser
[Glueck91], S. 10	610,696	22,511	273,141		28,925	6148,56	273,141	-20	0,01	Eis vermutlich
[Vajen03], S. 2	610,961	17,206	236,250	100	19,016	4064,95	236,250			flüssiges Wasser > 0 °C vermutlich

Tabelle: Zusammenstellung der in der Literatur angegebenen Parameter zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes

Die nachfolgenden Bilder vergleichen die Werte, die mit den verschiedenen Formeln und Parametern berechnet wurden, mit den tabellierten Werten des Sättigungsdampfdruckes [VDI-Waermeatlas13], Kap. D2, S. 177/178. Die Übereinstimmung der Werte ist sehr gut, obwohl die Parametersätze etwas voneinander abweichen.

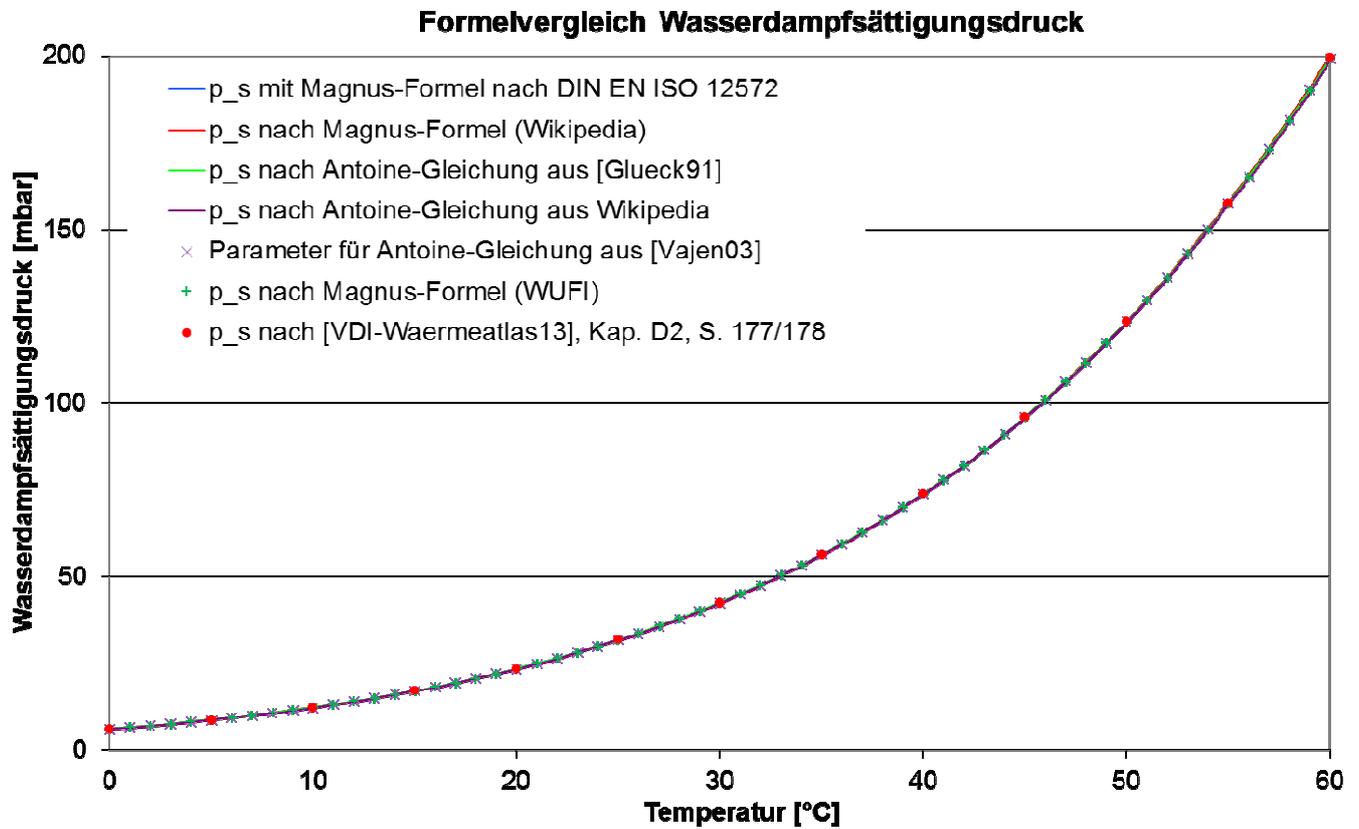


Bild 42: Vergleich der Werte für den Sättigungsdampfdruck, berechnet mit verschiedenen Formeln und Parametersätzen. Hier: Temperaturbereich 0 °C bis 60 °C.

Formelvergleich Wasserdampfsättigungsdruck

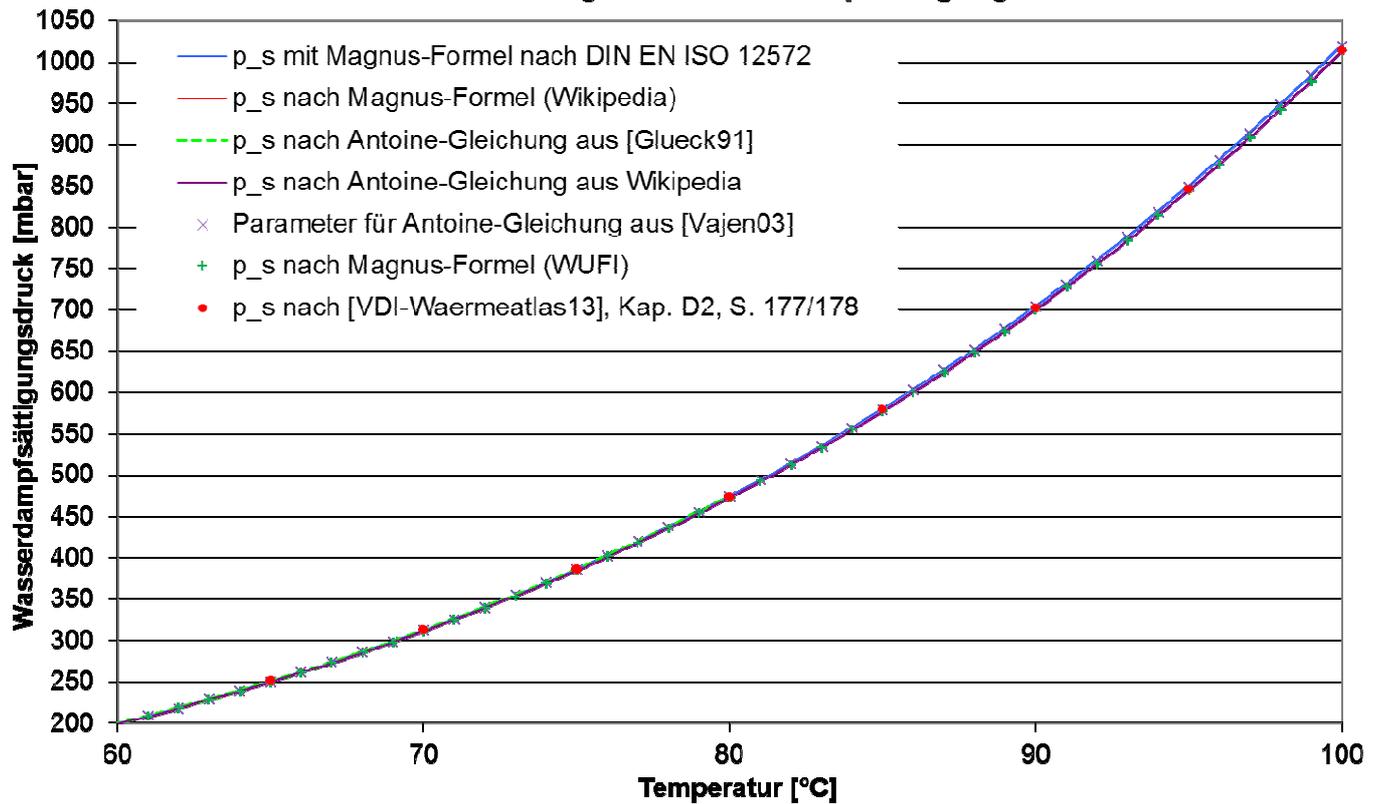


Bild 43: Vergleich der Werte für den Sättigungsdampfdruck, berechnet mit verschiedenen Formeln und Parametersätzen. Hier: Temperaturbereich 60 °C bis 100 °C

Für den Temperaturbereich unterhalb von 0 °C wird zum Vergleich noch die Sättigungsdampfdruckkurve angegeben, berechnet nach der Formel für den Temperaturbereich über von 0 °C.

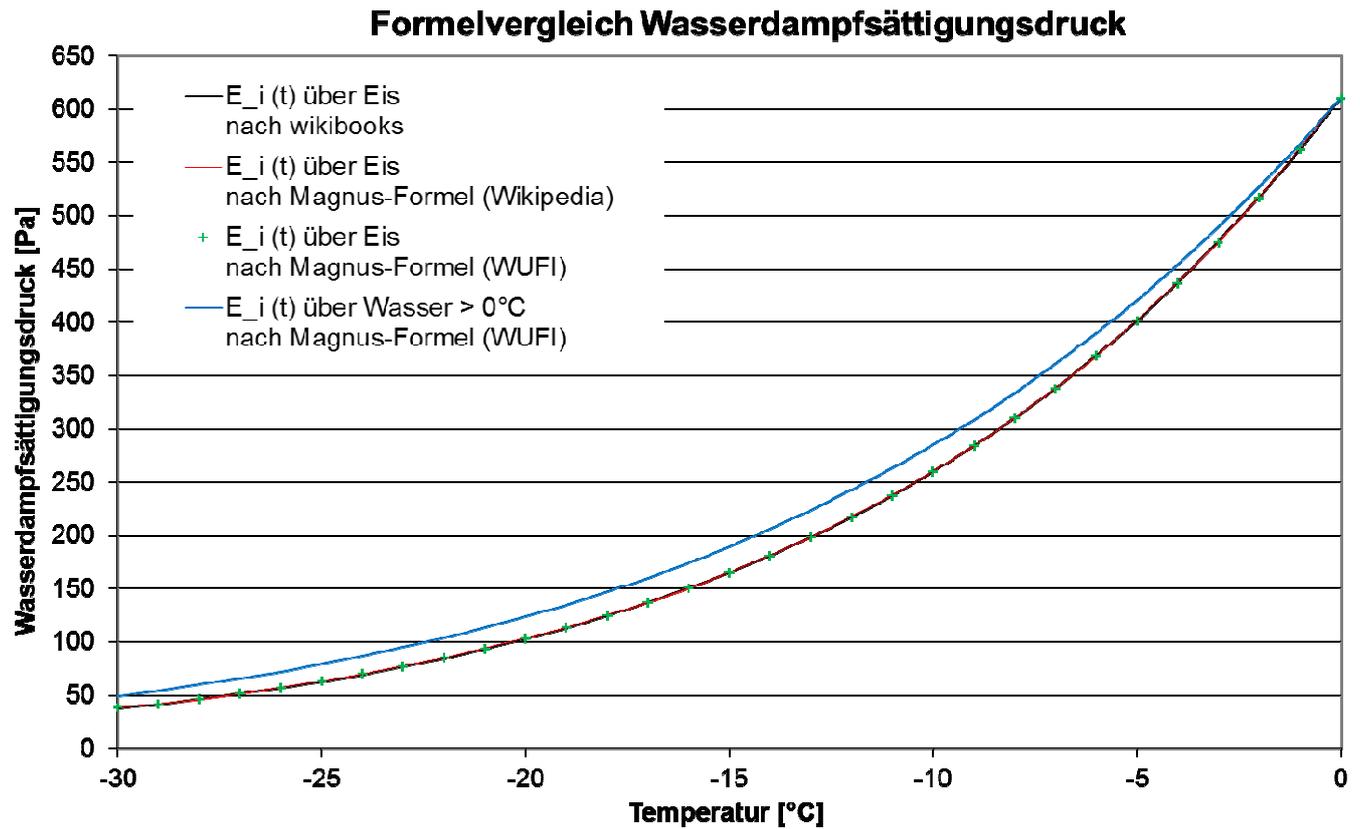


Bild 44: Vergleich der Werte für den Sättigungsdampfdruck, berechnet mit verschiedenen Formeln und Parametersätzen. Hier: Temperaturbereich -30 °C bis 0 °C

Fazit

Die Unterschiede in den Sättigungsdampfdruckkurven, wie man sie mit den verschiedenen Formeln und Parametern berechnet, ist vernachlässigbar gering. Lediglich bei Temperaturen über 85 °C, die in der Bauphysik höchstens bei sonnenbeschienenen dunklen Oberflächen von Interesse sind, zeigen sich leichte Unterschiede.

Die Verdunstungs- / Sublimationsenthalpie

Die Verdunstungs- bzw. Kondensationsenthalpie ist ebenfalls temperaturabhängig. Sie nimmt mit steigender Temperatur ab. In der Literatur zur Bauphysik wird oft nur der Wert der Verdampfungsenthalpie bei 100 °C angegeben. Selten wird die Verdunstungsenthalpie für verschiedene Temperaturen angegeben, z.B. in [Haupt13], Kap., S. 243 und in [Fischer08], Teil III, S. 398. [Chaplin15] gibt sehr genaue, aber nur sehr wenige Werte bei ca. -33 °C, 0°C und 100 °C an. Im [VDI-Waermeatlas13], Kap. D2, S177/178 wird die spezifische Enthalpie von Dampf und von flüssigem Wasser für verschiedenen Temperaturen angegeben. Deren Differenz ist die spezifische Verdunstungsenthalpie.

Die Tabelle zeigt die Enthalpie-Werte aus [VDI-Waermeatlas13], Kap. D2 und die daraus berechnete Verdunstungsenthalpie.

Temperatur [°C]	spez. Enthalpie		Differenz der spez. Enthalpie = Verdunstungsenthalpie [kJ / kg]
	flüssig [kJ / kg]	gasförmig [kJ / kg]	
0	-0.041588	2500.90	2500.94
0.01	0.000612	2500.90	2500.90
5	21.02	2510.10	2489.08
10	42.02	2519.20	2477.18
15	62.98	2528.40	2465.42
20	83.92	2537.50	2453.58
25	104.84	2546.50	2441.66
30	125.75	2555.60	2429.85
35	146.64	2564.60	2417.96
40	167.54	2573.50	2405.96
45	188.44	2582.50	2394.06
50	209.34	2591.30	2381.96
55	230.24	2600.10	2369.86
60	251.15	2608.80	2357.65
65	272.08	2617.50	2345.42
70	293.02	2626.10	2333.08
75	313.97	2634.60	2320.63
80	334.95	2643.00	2308.05
85	355.95	2651.30	2295.35
90	376.97	2659.50	2282.53
95	398.02	2667.60	2269.58
100	419.10	2675.60	2256.50

Tabelle: Spezifische Enthalpie von Wasser und Dampf, sowie Verdunstungsenthalpie

Unterhalb von 0 °C kann sich Eis oder Reif auf der Oberfläche bilden oder Eis sublimieren, sofern auf der Oberfläche Eis vorhanden ist. Die Sublimationsenthalpie ist höher als die Verdunstungsenthalpie,

da die Wassermoleküle im Eis fester gebunden sind als im flüssigen Wasser. Auch die Sublimationsenthalpie nimmt mit sinkender Temperatur zu. Die Tabelle stellt die Literaturwerte zusammen für Temperaturen unterhalb von 0 °C und bei 0 °C bzw. dem Tripelpunkt des Wassers bei 0,01 °C.

Temperatur [°C]	Sublimationsenthalpie [kJ / kg]	Datenquelle
-33,15	2838,647749608	[Chaplin15]
-20	2841,00	[Haeupl13], [Fischer08]
0	2834,207072	[Chaplin15]
0	2837	[Haeupl13], [Fischer08]
0	2501	[Haeupl13], [Fischer08]
0,01	2500,712172	[Chaplin15]
0,01	2500,90	[VDI-Waermeatlas13]

Tabelle: Sublimationsenthalpie, Werte aus verschiedenen Quellen

Zusammenhang von Verdunstungs- / Sublimationsenthalpie und Sättigungsdampfdruck

Nach [Smith96] kann die Verdunstungsenthalpie bzw. Sublimationsenthalpie aus dem Sättigungsdampfdruck berechnet werden. Im Falle von freien Wasseroberflächen sind die Werte der Verdunstungsenthalpie bzw. Sublimationsenthalpie bekannt. Jedoch für Wasser, das an einen Stoff gebunden ist, sei es z.B. in einer Salzlösung absorbiert oder in einem porösen Feststoff adsorbiert, findet man in der Literatur oft keine Werte für die Verdunstungsenthalpie, jedoch für den Sättigungsdampfdruck, z.B. in der Form von Sorptionsisothermen. Falls keine Literaturwerte verfügbar sind, kann der Sättigungsdampfdruck auf einfachere Weise experimentell bestimmt werden als die Verdunstungsenthalpie.

Die Gleichung hierzu, die Clapeyron-Gleichung, lautet

$$E_V = T \Delta V \frac{d p_s}{dT}$$

mit

$$\begin{aligned} E_V &= \text{Verdunstungs- oder Sublimationsenthalpie eines Moleküls} \\ T &= \text{Temperatur in K} \\ \Delta V &= \text{Volumenänderung beim Verdampfen} \\ p_s &= \text{Sättigungsdampfdruck} \end{aligned}$$

Für den Phasenübergang zwischen flüssiger und gasförmiger Phase können zwei Näherungen angewandt werden, falls der interessierende Druck- und Temperaturbereich noch weit entfernt ist vom kritischen Punkt des Stoffes. Der kritische Punkt von Wasser liegt bei 373,95 °C und 220,64 bar. Bei Wasserdampfdrücken unterhalb von 1 bar und Temperaturen unterhalb von 100 °C ist dies für Wasser erfüllt. Dann kann das Volumen der flüssigen Phase vernachlässigt werden im Vergleich zum Volumen der gasförmigen Phase. Die zweite Näherung besteht darin, den Dampf als ideales Gas zu beschreiben mit der allgemeinen Gasgleichung

$$pV = N k_B T$$

mit

$$\begin{aligned} p &= \text{Druck} \\ V &= \text{Volumen} \\ N &= \text{Anzahl der Moleküle} \\ k_B &= \text{Boltzmann-Konstante} \\ T &= \text{Temperatur in K} \end{aligned}$$

Damit wird die Gleichung für die Verdunstungsenthalpie eines Moleküls zu

$$E_V = T \frac{k_B T}{p_s} \frac{dp_s}{dT} = k_B \frac{T^2}{p_s} \frac{dp_s}{dT}$$

Dies kann auch als die folgende, Clausius/Clapeyron-Gleichung genannte Gleichung, geschrieben werden [Smith96], S. 198 und [Krischer/Kast78]

$$-\frac{E_V}{k_B} = \frac{d}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \ln(p_s)$$

denn

$$\frac{d}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \ln(p_s) = \frac{dT}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \frac{d}{dT} \ln(p_s) = -T^2 \frac{1}{p_s} \frac{d}{dT} \ln(p_s)$$

Für die massenspezifische Verdampfungsenthalpie lautet die Clausius/Clapeyron-Gleichung

$$h_V = -\frac{R}{m_{mol}} \frac{d}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \ln(p_s)$$

mit

$$\begin{aligned} h_V &= \text{massenspezifische Verdampfungsenthalpie} \\ R &= \text{universelle Gaskonstante} \end{aligned}$$

Dieser Zusammenhang gilt allgemein, sowohl für freie Wasser- oder Eisflächen, für gekrümmte Oberflächen (z. B. Wassertropfen) wie auch für Oberflächen von Stoffen, in denen Wasser absorbiert (z.B. Salzlösungen) oder adsorbiert (z.B. poröse Baustoffe) vorhanden ist.

Für die Verdunstung oder Sublimation an freien Wasserflächen kann die Verdunstungsenthalpie aus der Magnus-Formel oder der Antoine-Gleichung berechnet werden. Mit den entsprechenden Parametern der Formeln gilt dies auch für die Sublimationsenthalpie von Eis.

Der Logarithmus der oben angegebenen Magnus-Formel, ausgedrückt als Funktion der absoluten Temperatur, kann nach $\frac{1}{T}$ abgeleitet werden. Damit wird

$$\frac{d}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \ln(p_s) = \frac{a T_0 - a T_f}{\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)^2}$$

und ausgedrückt als Funktion der Temperatur in °C

$$\frac{d}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \ln(p_s) = -a b \left(1 + \frac{T_f - b}{\vartheta + b}\right)^2$$

Dies führt dann zu folgenden Formeln für die Verdunstungsenthalpie eines Moleküls.

$$E_V = a b k_B \left(1 + \frac{T_f - b}{\vartheta + b}\right)^2$$

$$E_V = a b k_B \left(\frac{T}{T - T_0}\right)^2$$

und für die massenspezifische Verdunstungsenthalpie.

$$h_V = \frac{R}{m_{mol}} a b \left(\frac{T}{T - T_0}\right)^2$$

Ebenso wie bei der Magnus-Formel kann auch der Logarithmus der Antoine-Gleichung nach $\frac{1}{T}$ abgeleitet werden.

$$p_s = e^{\alpha - \frac{\beta}{\gamma + \vartheta}}$$

$$\ln p_s = \alpha - \frac{\beta}{T - T_0}$$

$$\frac{d}{d\frac{1}{T}} \ln p_s = \frac{d(T - T_0)}{d\frac{1}{T}} \cdot \frac{d}{d(T - T_0)} \frac{\beta}{T - T_0}$$

$$\frac{d}{d\frac{1}{T}} \ln p_s = -\frac{1}{\left(\frac{1}{T}\right)^2} \cdot \frac{\beta}{(T - T_0)^2} = -\beta \left(\frac{T}{T - T_0}\right)^2$$

Damit wird die Verdunstungsenthalpie pro Molekül zu

$$E_V = k_B \beta \left(\frac{T}{T - T_0} \right)^2$$

und die Verdunstungsenthalpie pro Masse zu

$$h_V = \frac{R}{m_{mol}} \beta \left(\frac{T}{T - T_0} \right)^2$$

Die Enthalpiedifferenz durch die Änderung der Temperatur des Wasserdampfes von der Temperatur der Oberfläche zur Temperatur der umgebenden Luft wird hierbei vernachlässigt. Sie ist im Vergleich zur Verdunstungsenthalpie äußerst gering, so dass dies gerechtfertigt ist.

Die Clausius/Clapeyron-Gleichung wurde auf die Magnus-Formel mit den in WUFI angegebenen Parametern angewandt. Das folgende Bild zeigt den Vergleich der so berechneten Verdunstungs-enthalpie mit den in der Literatur angegebenen Werten. Die braune gepunktete Linie gehört zur rechten Achse und zeigt das Verhältnis der berechneten Werte zu den Werten in [Haeupl13].

Man beachte die Minimal- und Maximalwerte der vertikalen Achsen.

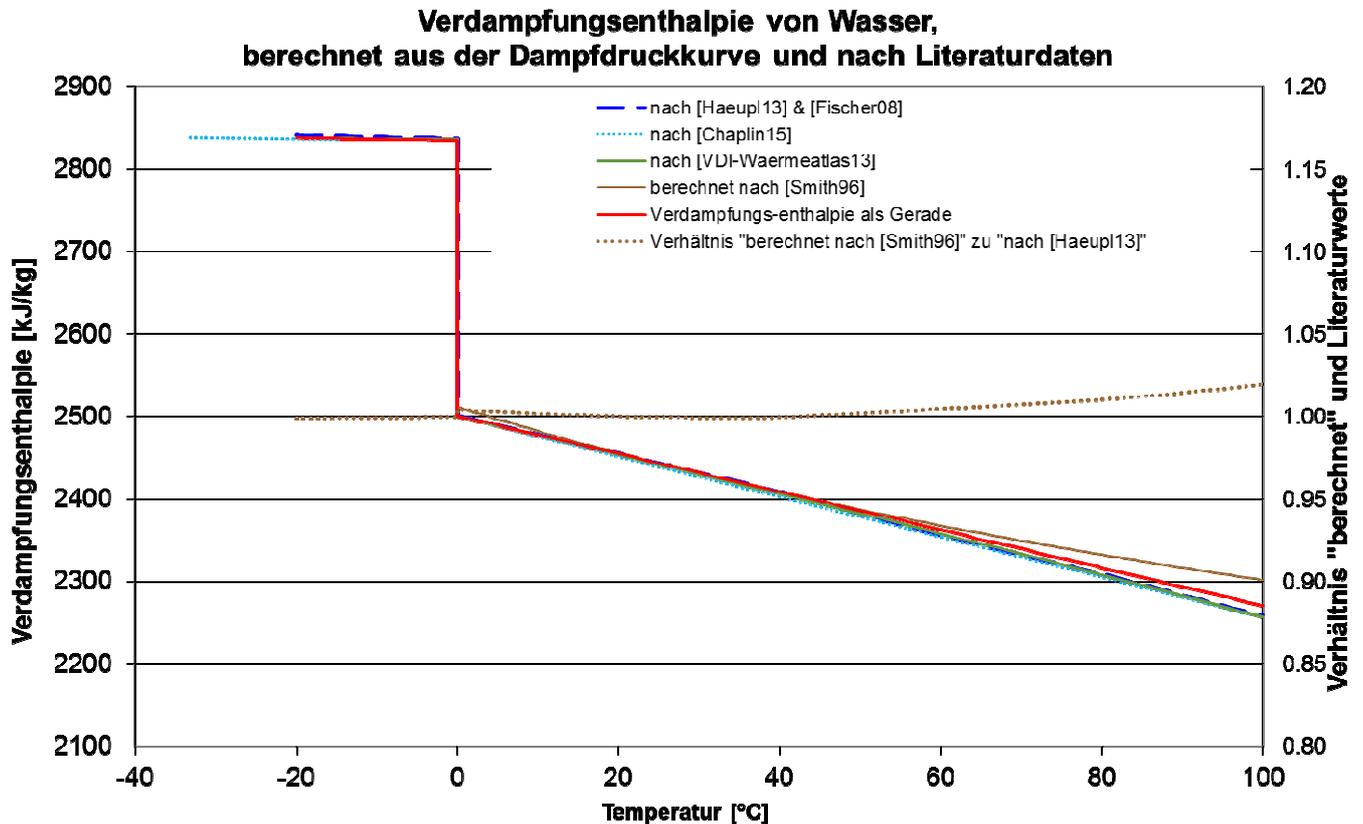


Bild 45: Verdampfungsenthalpie, berechnet auf unterschiedliche Weise

Für die durchgeführten Simulationen wurden die Verdunstungsenthalpie und Sublimationsenthalpie als lineare Funktionen modelliert. Im Bild werden diese durch die rote Linie dargestellt. Die Parameter der linearen Funktionen oberhalb und unterhalb von 0 °C wurden so gewählt, dass die resultierenden Werte im bauphysikalisch interessierenden Temperaturbereich bis 40 °C gut mit den in [Haeupl13] angegebenen Werten übereinstimmen.

$$h_V = h_{V,0} + s_{hv} \vartheta$$

mit

- h_V = Verdunstungs- / Kondensations- / Eisbildungs- oder Sublimationsenthalpie bei 0 °C
- s_{hv} = Temperaturabhängigkeit der Verdunstungs- (etc.) -Enthalpie

Die Parameter der linearen Funktionen für die Verdunstungsenthalpie und die Sublimationsenthalpie sind

	Über Wasser	Über Eis
Achsenabschnitt [kJ/kg] $h_{V,0}$	2500,712	2834,207
Geradensteigung [kJ/(kg K)] s_{hv}	-2,3	-0,2

Tabelle: Parameter zur Berechnung der Verdunstungsenthalpie

Die Schmelzenthalpie

Bekanntlich gefriert oder schmilzt Eis bei 0 °C. Auch hierbei wird Wärme frei oder es wird Wärme aus der Umgebung aufgenommen. Die Schmelzenthalpie von Wasser ist ein fester Wert. Er entspricht genau der Differenz der Sublimationsenthalpie und der Verdunstungsenthalpie beim Tripelpunkt des Wassers.

$$h_S = 333,495 \frac{kJ}{kg}$$

Wasserdampfdiffusion in Luft

Bei der Diffusion eines Gases in einem anderen Gas oder Gasgemisch, wie hier Wasserdampf in Luft, setzt dies voraus, dass das Trägergas, hier die Luft, in Ruhe ist. Bei konstanter und homogener Temperatur ist die Feuchtestromdichte proportional zum Gradienten der Wasserdampfkonzentration. Dies wird durch das 1. Fick'sche Gesetz beschrieben. Der Proportionalitätsfaktor heißt Diffusionskoeffizient D , hier mit dem Subskript D für Dampf.

$$\vec{j}_D = -D_D \nabla c$$

Für die weiteren Erläuterungen genügt die eindimensionale Betrachtung

$$j_D = -D_D \frac{dc}{dx}$$

Je höher die Temperatur und je niedriger der Luftdruck, desto größer ist die Beweglichkeit der Wassermoleküle. Der Diffusionskoeffizient kann anhand der Schirmerschen Formel berechnet werden [Haeupl13], S. 198/199.

$$D_D = 0,0828 \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,81}$$

mit

$$j_D = \text{Wasserdampfstromdichte in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}}$$

$$D_D = \text{Diffusionskoeffizient in } \frac{\text{m}^2}{\text{h}}$$

$$c = \text{Konzentration in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$p = \text{Luftdruck in Pa}$$

$$p_0 = \text{Normaldruck} = 101325 \text{ Pa}$$

$$T = \text{Temperatur in Kelvin}$$

$$T_0 = \text{Temperatur bei } 0 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$$

Zu beachten sind hier die Einheiten des Diffusionskoeffizienten und somit der Wasserdampfstromdichte, beide bezogen auf den Zeitraum von einer Stunde.

Der so berechnete Wert des Diffusionskoeffizienten gilt, falls die Konzentration in Masse pro Volumen angegeben wird. Die Temperatur ist als absolute Temperatur in Kelvin anzugeben.

Ist die Temperatur der Luft nicht homogen, so muss man bedenken, dass sich mit der Temperatur auch die anderen Zustandsgrößen der Luft und des darin enthaltenen Wasserdampfes ändern. Der Antrieb für die Diffusion ist dann also nicht das Konzentrationsgefälle, sondern der Gradient des Wasserdampfpartialdruckes.

Um die Wasserdampfstromdichte in Abhängigkeit des Wasserdampfdruckgradienten auszudrücken, definiert man den Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten, so dass gilt

$$j_D = -\delta_D \frac{dp}{dx}$$

Mit der allgemeinen Gasgleichung lässt sich die obige Formel, die die Diffusionsstromdichte aus dem Konzentrationsgefälle berechnet, umrechnen in eine Formel zur Berechnung der Diffusionsstromdichte aus dem Dampfdruckgradienten.

Aus

$$n R T = p_{H_2O} V$$

ergibt sich

$$\frac{n}{V} = \frac{m}{m_{mol} V} = \frac{p_{H_2O}}{R T}$$

und auch

$$c = \frac{m}{V} = \frac{p_{H_2O} m_{mol}}{R T}$$

mit

- m = Masse des Wasserdampfes
- n = Anzahl Mole
- R = universelle Gaskonstante, siehe Anhang
- T = thermodynamische Temperatur in K
- p_{H_2O} = Wasserdampfpartialdruck
- V = Volumen
- m_{mol} = Masse eines Mols Wasser
- c = Konzentration des Wasserdampfes [-]

Abgeleitet ergibt dies

$$\frac{dc}{dx} = \frac{m_{mol}}{R} \frac{d}{dx} \left(\frac{p_{H_2O}}{T} \right)$$
$$\frac{dc}{dx} = \frac{m_{mol}}{R} \left[\frac{1}{T} \frac{dp_{H_2O}}{dx} - \frac{p_{H_2O}}{T^2} \frac{dT}{dx} \right]$$

Unter Vernachlässigung des zweiten Terms in der Klammer folgt daraus

$$j_D = -D_D \frac{m_{mol}}{R} \frac{1}{T} \frac{dp_{H_2O}}{dx} = -\delta_D \frac{dp_{H_2O}}{dx}$$

mit

$$\delta_D = D_D \frac{m_{mol}}{R} \frac{1}{T} = \frac{D_D}{R_D T}$$

mit

$$\begin{aligned}\delta_D &= \text{Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient} \\ R_D &= \text{spezifische Gaskonstante für Wasserdampf}\end{aligned}$$

und

$$R_D = \frac{R}{m_{mol}} = 461,401 \frac{J}{kg K}$$

Die Schirmer'sche Formel lässt sich ebenfalls umrechnen, so dass damit direkt der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient δ_D berechnet werden kann. Bezogen auf den Zeitraum von einer Sekunde lautet sie dann

$$\delta_D = \frac{2,306 \cdot 10^{-5}}{R_D T} \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,81}$$

mit

$$\delta_D = \text{Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in } \frac{kg}{m s Pa}$$

In dieser Form wird sie im Entwurf zu [DIN EN ISO 12572] von 2015 angegeben. Hier sind die Zahlenwerte so gewählt, dass der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient δ_D in SI-Einheiten angegeben wird.

Für eine Temperatur von 10 °C und Normal-Luftdruck beträgt $\delta_D = 1.883771 \cdot 10^{-10} \frac{kg}{m s Pa}$

Die frühere Ausgabe von Teil 3 der Normenreihe [DIN 4108] aus dem Jahr 2001 gibt auf S. 19 vereinfacht einen Zahlenwert für den Kehrwert des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten an. Dieser gilt für eine Bezugstemperatur von 10 °C. Zu beachten ist hier wieder die Einheit mit der Bezugszeit eine Stunde.

$$\begin{aligned}\frac{1}{\delta_D} &= 1,5 \cdot 10^6 \frac{mhPa}{kg} \\ \delta_D &= 6,66\bar{6} \dots \cdot 10^{-7} \frac{kg}{mhPa} = 1,851 \dots \cdot 10^{-10} \frac{kg}{msPa}\end{aligned}$$

Das Diagramm zeigt die geringe Temperaturabhängigkeit des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten. Man beachte den Bereich der vertikalen Skala.

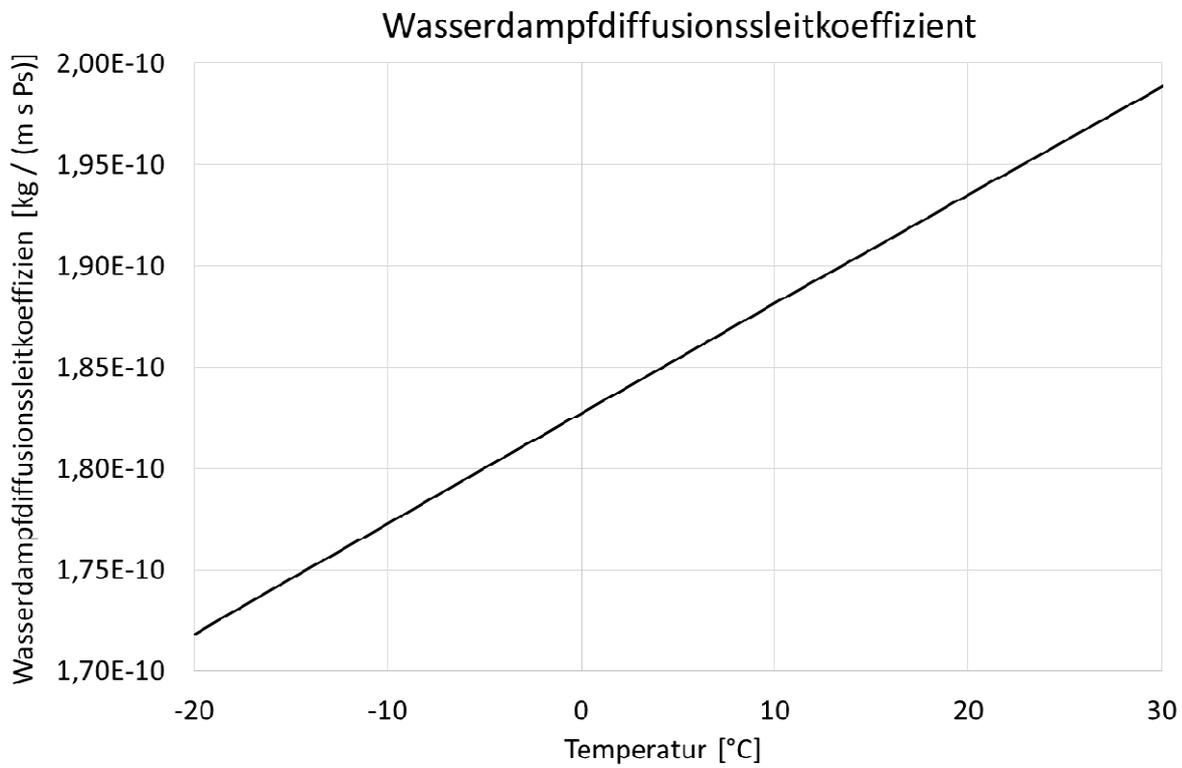


Bild 46: Temperaturabhängigkeit des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten

Wasserdampf in Baustoffen

Wasserdampfdiffusion in Baustoffen

In Baustoffen findet die Wasserdampfdiffusion in der Luft in den Poren des Baustoffes statt. Sie wird ganz analog zur Wasserdampfdiffusion in Luft beschrieben

$$j_D = -\delta_{D,S} \frac{dp}{dx}$$

Die langsamere Diffusion des Wasserdampfes in den Baustoffporen im Vergleich zur Diffusion in ruhender Luft wird durch einen Abminderungsfaktor, die Diffusionswiderstandszahl μ beschrieben.

$$\mu = \frac{\delta_D}{\delta_{D,S}}$$

mit

j_D = Wasserdampfstromdichte

$\delta_{D,S}$ = Wasserdampfdiffusionskoeffizient in Materialien, auf den Gradienten des Partialdruckes bezogen

p = Wasserdampfpartialdruck

μ = Diffusionswiderstandszahl (ohne Einheit)

Somit gilt

$$j_D = -\frac{\delta_D}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

Wasserdampfdiffusion durch Baustoffe

Aus den obigen Gleichungen folgt für Schichten von Baustoffen, also für Bauteilschichten, die Gleichung

$$j_D = \frac{\delta_D}{\mu} \frac{\Delta p}{d}$$

mit

Δp = Differenz des Wasserdampfpartialdruckes auf den beiden Seiten der Bauteilschicht

d = Dicke der Bauteilschicht

Das Minus-Zeichen fehlt hier. Die Differenz des Wasserdampfpartialdruckes ist entsprechend zu berechnen bzw. die Richtung des Wasserdampfstromes entsprechend anzunehmen.

Zur Veranschaulichung und Kennzeichnung von flächigen Baustoffen, die gewöhnlicherweise in vorgefertigten Dicken geliefert werden, wie z. B. Bauplatten verschiedener Art und Folien, definiert man die **wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke** s_d . Eine Luftschicht dieser Dicke setzt der Wasserdampfdiffusion den gleichen Widerstand entgegen wie die betrachtete Baustoffschicht.

$$s_d = \mu d$$

Man kann also einen Feuchtedurchlasswiderstand definieren

$$R_\beta = \frac{\mu d}{\delta_D}$$

Die Feuchtestromdichte berechnet sich dann zu

$$j_D = \frac{1}{R_\beta} \Delta p = \frac{\delta_D \Delta p}{s_d}$$

Folien, Abdichtungen und Beschichtungen werden nach [DIN 4108], Teil 3, S. 9 in Kategorien eingeteilt.

Benennung	s_d [m]
diffusionsoffen	$\leq 0,5$
diffusionshemmend	$0,5 < s_d < 1500$
diffusionsdicht	≥ 1500

Verwendete Werte zur Berechnung des Wärme- und Feuchteübergangs

Äußerer konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

In dieser Studie wird der Wärmeübergang an der Außenseite von Bauteilen explizit berechnet mit einem windabhängigen Übergangskoeffizienten für den konvektiven Wärmeübergang und der expliziten Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlungsabsorption und -emission.

Für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Außenoberfläche wird die Formel nach [Schaube/Werner86] und den Vorgabewerten von [WUFI15] benutzt. Für das Dach der Sporthalle Fürth wird entsprechend der WUFI-Anleitung die Formel für die Luv-Seite oder nur gering geneigte Flächen verwendet.

$$\alpha_{conv,o} = 5 \frac{W}{m^2 K} + 1,6 \frac{W s}{m^3 K} v_L$$

mit

$$v_L = \text{Windgeschwindigkeit}$$

Die Wärmestromdichte durch konvektiven Wärmeübergang von und zur Luft beträgt somit

$$\dot{j}_{conv,o} = \alpha_{conv,o} (\vartheta_{air,o} - \vartheta_M)$$

mit

$$\alpha_{conv,o} = \text{konvektiver Wärmeübergangskoeffizient}$$

$$\vartheta_{air,o} = \text{Außenlufttemperatur}$$

$$\vartheta_M = \text{Temperatur der Membran}$$

Im Gegensatz zur Formel in [DIN EN ISO 6946] und [DIN EN ISO 15026] benutzt diese Formel die Werte der Windgeschwindigkeit aus den Wetterdaten. Demgegenüber ist die Luftgeschwindigkeit nahe der Gebäudeoberfläche, die für die Formel in [DIN EN ISO 6946] und [DIN EN ISO 15026] benötigt wird, meist nicht bekannt. Da die Luftgeschwindigkeit nahe einer Gebäudeoberfläche aber geringer ist als die in 10 m über Gelände gemessene Windgeschwindigkeit, dürften die Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten bei Verwendung der beiden Formeln mit den entsprechenden Windgeschwindigkeitswerten sehr ähnlich sein.

Feuchteübergangskoeffizient

Die Berechnung des Feuchteübergangskoeffizienten erfolgt ebenfalls wie in [Kuenzel94] angegeben und in WUFI implementiert mit dem Proportionalitätsfaktor zwischen dem Feuchte- und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von

$$F_{\beta} = 7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg K}}{\text{s W Pa}} = 7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{K s}^4}{\text{kg m}}$$

Benutzte Formeln für den Sättigungsdampfdruck

In WUFI wird die Magnus-Formel verwendet. (WUFI-Hilfe-Text „Referenzen / Luftfeuchte / Sättigungsdampfdruck“)

Für das selbst erstellte Berechnungsprogramm wird ebenfalls die Magnus-Formel mit den in WUFI angegebenen Parametern verwendet.

Benutzte Formeln für Verdunstungs-, Sublimations- und Schmelzenthalpie

Die Verdunstungs- und Sublimationsenthalpien werden für die Bereiche über 0 °C und unterhalb von 0 °C, bzw. über Wasser und über Eis aus der Geraden berechnet, die aus den Literaturangaben bestimmt wurde. Daraus ergibt sich auch die Schmelzenthalpie.

$$h_V = h_{V,0} + s_{hv} \vartheta$$

mit

- h_V = Verdunstungs- / Kondensations- / Eisbildungs- oder Sublimationsenthalpie bei 0 °C
- s_{hv} = Temperaturabhängigkeit der Verdunstungs- (etc.) -Enthalpie

Die Parameter der linearen Funktionen für die Verdunstungsenthalpie und die Sublimationsenthalpie sind

	Über Wasser	Über Eis
Achsenabschnitt [kJ/kg] $h_{V,0}$	2500,712	2834,207
Geradensteigung [kJ/(kg K)] s_{hv}	-2,3	-0,2

Tabelle: Parameter der Geraden zur Berechnung der Verdunstungs- bzw. Sublimationsenthalpie

Die Schmelzenthalpie ergibt sich daraus zu

$$h_S = 333,495 \frac{kJ}{kg}$$

Materialeigenschaften

Für die Berechnung der Feuchteverhältnisse in Membrandächern ist die Kenntnis der Materialeigenschaften Voraussetzung.

Für die Materialien werden folgende Stoffeigenschaften benötigt.

Hygrische Eigenschaften

- Durchlässigkeit für flüssiges Wasser
- Durchlässigkeit für Wasserdampf
- Benetzungsverhalten
- Feuchtespeicherfähigkeit

Optische Eigenschaften

- Reflexionsgrad, Absorptionsgrad und Transmissionsgrad für kurzwellige Solarstrahlung
- Reflexionsgrad, Absorptionsgrad und Transmissionsgrad für langwellige Wärmestrahlung, also Infrarot-(IR)-Strahlung

Wärmetechnische Eigenschaften

- Wärmeleitfähigkeit
- Wärmekapazität

Sonstige

- Dichte

Datenlage

Die Datenlage zu den Materialeigenschaften ist recht lückenhaft. Auch [Haase11], S. 9 beschreiben im Vorwort zu ihrem Bericht, dass sie bei ihrem Projekt zur Entwicklung von mehrlagigen adaptiven Membrankonstruktionen vor der Schwierigkeit standen, dass praktisch keine Materialdaten in der Literatur oder sonst öffentlich zugänglich verfügbar waren. Die Autoren führen dies darauf zurück, dass Forschung zum Thema Membranbau zumeist in Firmen stattfindet, die verständlicherweise darauf bedacht sind, das erworbene Wissen nicht zu verbreiten.

Zwar gibt es im Internet öffentlich zugängliche Materialdatenbanken für Baustoffe (Literaturangaben [10] bis [14] in [Haase11] und [Hegger15]). Diese sind jedoch in ihrem Umfang recht begrenzt. Meist enthalten sie nur Angaben zu einer Klasse von Baustoffen und / oder sie enthalten nur qualitative Angaben ([Haase11] und eigene Recherchen).

Inzwischen wurden die optischen Eigenschaften einiger Membranen bestimmt und die Ergebnisse in den entsprechenden Projektberichten veröffentlicht: [Haase11] und [Manara12]. Im Rahmen dieses Projektes wurden die optischen Eigenschaften der Membranen, die für die Sporthalle in Fürth in Betracht gezogen wurden, am ZAE Bayern gemessen.

Zu den hygrischen Eigenschaften der Membranen wurden im Rahmen dieses Projektes keine Messungen durchgeführt. In der Literatur konnten nur zwei Quellen mit Angaben zur Wasserdampfdurchlässigkeit von Membranen gefunden werden: [Schmid04] und [Zhang07].

Ursprünglich wurde als Abdeckung der Wärmedämmschicht eine Unterspannbahn vorgesehen. Zu Unterspannbahnen sind von den Herstellern Daten zu den hygrischen Eigenschaften verfügbar aber nicht oder kaum zu den optischen Eigenschaften. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass Unterspannbahnen gewöhnlich unter einer opaken Dacheindeckung verwendet werden, und ihre optischen Eigenschaften dann nicht von Interesse sind.

Für die nun verwendete Polyester-Folie gibt es ebenfalls keine Angaben zu deren hygrischen Eigenschaften. Diese wurden aus den Angaben zu ähnlichen Folien des gleichen Herstellers abgeschätzt.

Membranen

Für den Leichtbau stehen Membranen aus verschiedenen Materialien zu Verfügung. [Zhang07] und [Knippers10] und in sehr kompakter Form auch [Schmid04], Teil 1 geben einen Überblick über die für den Membranbau zur Verfügung stehenden Materialien. [Haase11], Teil 1, listen im Anhang Hersteller von Membranen und im Membranbau verwendeten Dämmstoffen auf.

Im Membranbau werden am häufigsten zwei Membran-Sorten verwendet: Für Folienkissen-Konstruktionen werden hochtransparente Ethylen-Tetrafluorethylen- (ETFE-)Folien verwendet. Bekannte Gebäude mit Folienkissen sind z. B. die Gewächshäuser des „Eden Project“ in Cornwall, Großbritannien, und „Water Cube“, die olympische Schwimmhalle in Beijing, China.

Als transluzente oder opake Membranen werden meist mit Polyvinylchlorid (PVC) beschichtete Polyester- (PES)-Gewebe verwendet. Allgemein bekannt sind diese Membranen in etwas dünnerer Ausführung als LKW-Planen.

Ansonsten sind noch mit Polytetrafluorethylen (PTFE) oder evtl. Silikon beschichtete Glasfasergewebe und Gewebe aus Polytetrafluorethylen (PTFE) oder expandiertem PTFE (ePTFE) mit einer Fluoropolymerbeschichtung zu nennen.

Hygrische Eigenschaften

Dichtigkeit gegenüber flüssigem Wasser

Angaben zur Dichtigkeit gegenüber flüssigem Wasser konnten fast keine gefunden werden. Lediglich zu den Membranen „Sefar TENARA 4T20HF“, „Sefar TENARA 4T40HF“ und „Sefar E-Line EH-35-T2“ der Firma Sefar AG, die auch im Rahmen dieses Projektes vermessen wurden, gibt es in den Datenblättern Angaben zum Widerstand gegen Wasser. Angegeben wird eine Wassersäule von 10 m für die beiden „TENARA“- Membranen und 2 m für die Membran „Sefar E-Line EH-35-T2“. Dies entspricht einem hydrostatischen Druck von ca. 1 bar bzw. ca. 0,2 bar. Bei diesen Membranen handelt es sich um Gewebe aus PTFE oder expandiertem PTFE, die mit Fluoropolymeren beschichtet sind [Sefar15].

Für die anderen für dieses Projekt untersuchten Membranen liegen keine Angaben zur Dichtigkeit gegenüber Wasser vor. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Membranen wasserdicht sind.

Wasserdampfdurchlässigkeit

Im Rahmen dieses Projektes wurden keine Messungen der hygrischen Eigenschaften von Membranen durchgeführt. In der Literatur konnten nur wenige Angaben zu Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ und wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d von Membranen gefunden werden. [Schmid04] Teil 2 gibt für einige Membrantypen typische Werte an im Vergleich mit praktisch wasserdampfdichter Aluminiumfolie und diffusionsoffenen Unterspannbahnen und Wärmedämmschichten. [Zhang07] nennt ohne Quellenangabe ebenfalls s_d -Werte von 9 bis 11 m für PES/PVC-Membranen.

Membranmaterial	Membrandicke [mm]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ [-]	wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d [m]
Aluminiumfolie	ab 0.05		>1500, praktisch dampfdicht
PES/PVC Typ III	0.9	12000	11
PES/PVC Typ III	0.8	13000	10
PES/PVC Typ III	0.6	16000	9
PTFE-Glasgewebe Typ IV	0.9	9000	8
PTFE-Glasgewebe Typ III	0.6	8000	5
PTFE-Glasgewebe Typ II	0.4	4700	2
PP-Folie	0.1	1	0.1
Mineralwolle, Faserdämmstoffe	100	1	0.1
Diffusionsoffene Unterspannbahn	-	-	0.02 bis 0.15

Tabelle: Hygrische Eigenschaften von Baustoffen. Datenquelle: [Schmid04], Teil 2

Die PVC-Beschichtung von PES-Geweben schützt das Polyestergewebe vor Festigkeitsverlust durch UV-Strahlung. Sie muss bis zu 40 % flüchtige Weichmacher enthalten. Mit dem Ausdampfen der Weichmacher verspröden die PVC-Beschichtungen und bilden Mikrorisse. Um den Verlust von Weichmachern zu minimieren, erhalten die Membranen ein Finish aus Lack. Diese Lackschichten wittern mit der Zeit jedoch ab. Dies dauert je nach Lackart und Schichtdicke ein bis sechs Jahre [Schmid04], Teil 1, S. 58 und 62.

Es kann vermutet werden, dass sich die Wasserdampfdurchlässigkeit durch die Versprödung der PVC-Beschichtung im Laufe der Jahre erhöht. Die innere Membran ist zwar nicht direkt dem Wettergeschehen ausgesetzt. Dennoch muss auch hier mit einer, wenn auch langsameren, Degradation der Lackschichten durch die Bewegungen der Membranen und somit mit einer Verringerung des s_d -Wertes mit der Zeit gerechnet werden.

Benetzungsverhalten

Falls sich Kondenswasser an der Membran bildet, stellt sich die Frage, wie viel Wasser sich an der Membran ansammeln kann. An der Oberseite wird das sich bildende Kondenswasser oder auch Regen ab einer bestimmten Massenbelegung ablaufen. Aufgrund der geringen Neigung des Membrandaches der Sporthalle Fürth wird Kondenswasser, das sich an der Unterseite der äußeren Membran bildet, nicht ablaufen, sondern abtropfen, wenn die Massenbelegung einen bestimmten Wert übersteigt. Die Menge des sich auf den Oberflächen befindenden Wassers bestimmt, wie viel Wasser verdunsten kann und wie lange die Membran durch die Verdunstung von Wasser abgekühlt wird.

Inwiefern Wasser auf einer Oberfläche Tropfen bildet oder sich ausbreitet, hängt von der Oberflächenspannung des Festkörpers ab. Bei einer geringen Oberflächenspannung bilden sich fast kugelförmige Tropfen, bei einer hohen Oberflächenspannung breitet sich das Wasser auf der Oberfläche aus und bildet einen gleichmäßigen Wasserfilm. [Haeupl13], S. 206 vergleicht die Oberflächenspannung und die Art der Tropfenbildung verschiedener Oberflächen miteinander. Für PVC-Oberflächen liest man aus der Grafik eine Oberflächenspannung σ von ca. 25 mN/m ab. Dies hat einen Randwinkel von Wassertropfen von wenig mehr als 90° zur Folge. D. h. die Tropfen haben die Form einer angeschnittenen Kugel, von der fast die Hälfte abgeschnitten wurde, also von etwas mehr als einer Halbkugel. Für schmutzige Oberflächen liest man eine Oberflächenspannung von ca. 30 mN/m ab und die Wassertropfen haben ungefähr die Form von etwas weniger als einer Halbkugel.

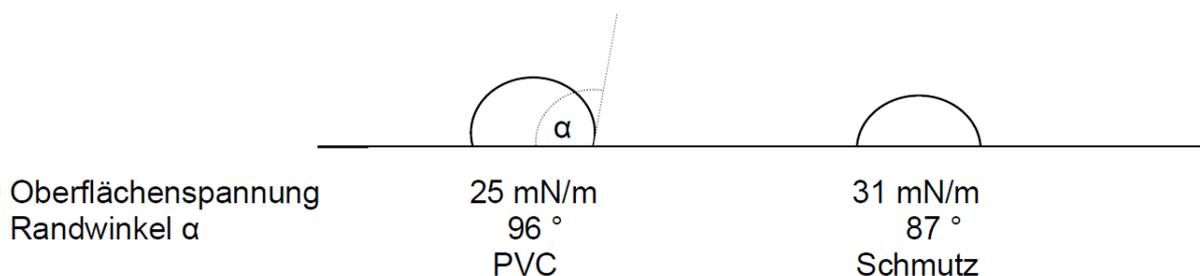


Bild 47: Wassertropfen auf Oberflächen, Randwinkel

Oberflächenmaterial	aus Bild 3.6 in [Haeupl13] S. 206		aus [Schmid04], Teil 2	
	Oberflächen- spannung [mN/m]	Randwinkel von Wassertropfen [°]	Oberflächen- spannung [mN/m]	Randwinkel von Wassertropfen [°]
Silikon	10	125		
PTFE	12	118	22	126
ETFE			25	
PVC	25	96		
Polyethylen (PE)	28	93	36	
Schmutz	31	87		
Polycarbonat (PC)			41	
Glas			70	0 - 30
Wasser	72.8	0		

Tabelle: Oberflächenspannung und Tropfen-Randwinkel

Zur Benetzbarkeit der Membranen liegen keine Daten vor. [Saur10], S. 55 beschreiben einen Sprühtest in Anlehnung an [DIN EN 24920]. Die Norm wurde inzwischen zurückgezogen und durch die internationale Norm [DIN EN ISO 4920] ersetzt. Diese ist fast gleich wie [DIN EN 24920]. Probenstücke der Membranen, mit denen das Benetzungsverhalten hätte untersucht werden können, standen in diesem Projekt jedoch nicht zur Verfügung.

Für Berechnungen der Kondensation an der Membranoberfläche und der Trocknung der nassen Membranoberfläche ist vor Allem von Interesse, wieviel Wasser auf der jeweiligen Oberfläche maximal anhaftet. Dies hängt sowohl von der Oberfläche selbst, aber auch von der Neigung dieser Oberfläche ab. Für die Zeiträume, in denen auf der Membranoberfläche vorhandenes Wasser abtrocknet, kann die Tropfenform und vor allem der Anteil der von Wasser benetzten Oberfläche eine Rolle spielen, da von den trockenen Bereichen zwischen einzelnen Tropfen kein Wasser verdunsten kann und somit die Trocknungsrate evtl. vermindert ist im Vergleich zu einer durchgängig benetzten Oberfläche. Da die Tropfenform und der Anteil der benetzten Fläche nicht zu quantifizieren waren, wurde für die Berechnungen vereinfachend homogene Wasserschichten auf den Membranoberflächen angenommen.

Je nach Witterungsverlauf kann es auch vorkommen, dass sich auf den Oberflächen der Membranen Eis bildet und sich auf der Eisschicht eine Wasserschicht befindet. Dann ist das Benetzungsverhalten von Eis ausschlaggebend für die maximale Wasserschichtdicke.

Optische Eigenschaften

Bei den Membranen und der Wärmedämmschicht sind deren optische Eigenschaften im sichtbaren Wellenlängenbereich wichtig in Bezug auf die Tageslichtnutzung. Die Eigenschaften im gesamten kurzwelligen Solarstrahlungsbereich sind von Interesse in Bezug auf die Nutzung der Solarenergie bzw. die sommerliche Überhitzung. Sie beeinflussen aber auch die Wärmeverhältnisse und somit auch die Feuchteverhältnisse im Dachaufbau. Letzteres gilt auch für die optischen Eigenschaften im langwelligen Bereich der Wärme- oder Infrarot- (IR-) Strahlung.

Im Rahmen des Projektes wurden am Zentrum für Angewandte Energieforschung Bayern (ZAE) Messungen der optischen Eigenschaften verschiedener Membranen durchgeführt. Im sichtbaren und Solarstrahlungsbereich wurden die Reflexions- und die Transmissionsgrade gemessen. Daraus ergeben sich jeweils die Absorptionsgrade.

$$r + \alpha + t = 1$$

mit

$$\begin{aligned} r &= \text{Reflexionsgrad} \\ \alpha &= \text{Absorptionsgrad} \\ t &= \text{Transmissionsgrad} \end{aligned}$$

Im Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung von $\lambda = 1,4$ bis $18 \mu\text{m}$ wurden die Reflexionsgrade der Membranen gemessen, aus dem die Absorptionsgrade bzw. der Emissionsgrade berechnet wurden unter der Voraussetzung, dass keine Wärmestrahlung durch die Membran durchgelassen wird.

$$\varepsilon = 1 - r$$

Nicht alle Kunststoffe sind für Infrarotstrahlung opak. Für die PVC-beschichteten Polyester-Membranen jedoch zeigen die wellenlängenabhängigen Messungen des ZAE im Rahmen dieses Projektes, im Rahmen des Vorgängerprojektes „MESG“ [Manara12] und von [Haase11], Teil 1, dass die Voraussetzung in diesem Fall erfüllt ist.

Das folgende Bild zeigt die wellenlängenabhängigen Emissionsgrade verschiedener Proben, die im Rahmen dieses Projektes gemessen wurden. Die Ergebnisse zeigen die verschwindend geringe IR-Transmission der PES/PVC-Membran und die hohe Emissivität der meisten Membranen von ca. 0,9 bis 0,95.

„Probe 2-4“, und „Probe 3-1“ bezeichnen PTFE-beschichtete Glasfasergewebe [Verseidag15].

„Probe 2-5“, „Probe 2-6“, „Probe 3-2“ und „Probe 3-3“ bezeichnen PVC-beschichtete Polyestergewebe.

„Probe 2-7“ und „Probe 2-7Silberseite“ bezeichnet ein PVC-beschichtetes Polyestergewebe mit low- ε -Beschichtung auf einer Seite (Silberseite).

Das übernächste Bild zeigt die wellenlängenabhängigen Transmissionsgrade von PVC-beschichtetem Polyestergewebe im Vergleich mit anderen Materialien.

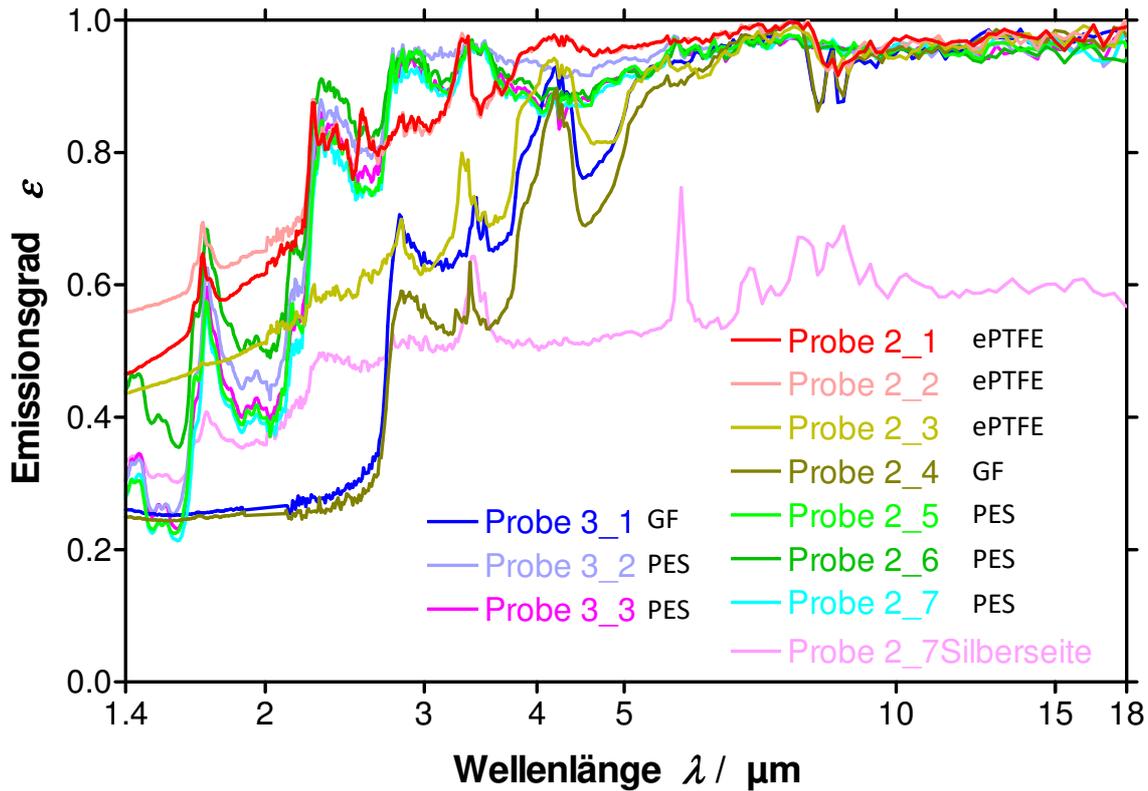


Bild 48: Spektraler Emissionsgrad, berechnet aus $\varepsilon = 1 - r$, der Proben in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ im Bereich von $\lambda = 1,4 \mu\text{m}$ bis $18 \mu\text{m}$.

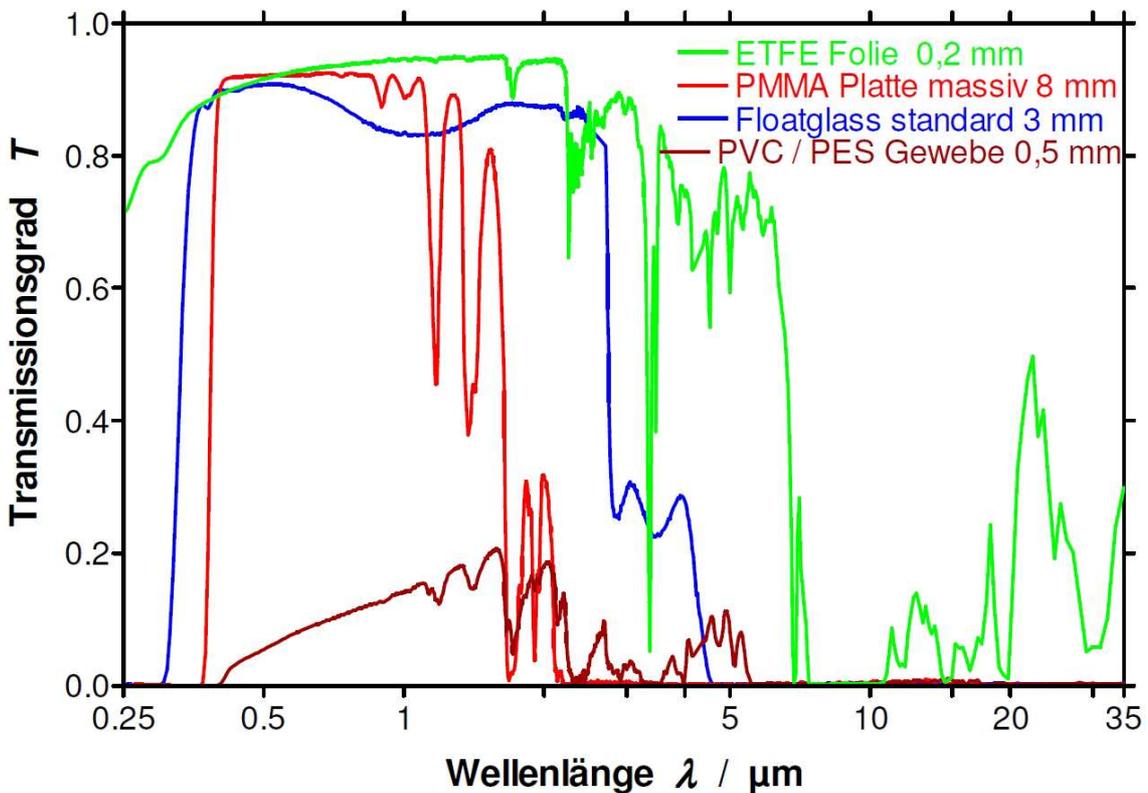


Bild 49: Messung der wellenlängenabhängigen Transmission verschiedener transparenter Baumaterialien im Infrarot-Bereich, gemessen innerhalb des Projektes „MESG“ [Manara12], S. 41

Aus den wellenlängenabhängigen Messwerten der Reflexions- und Transmissionsgrade wurden sowohl für den Wellenlängenbereich der Solarstrahlung von $\lambda = 0,25$ bis $2,5 \mu\text{m}$ wie auch für den langwelligen Bereich der Wärmestrahlung mittlere Reflexions- Absorptions- und Transmissionsgrade berechnet. Diese Mittelwerte wurden zusätzlich auch für die enger begrenzten Bereiche der sichtbaren und der Ultraviolett- (UV-) Strahlung ermittelt.

In [Haase11] wurde bei der Mittelwertbildung über die Wellenlängen unterschiedlich vorgegangen für den Solarstrahlungsbereich von $0,25 \mu\text{m}$ bis $2,5 \mu\text{m}$ und den IR-Bereich von $2,5 \mu\text{m}$ bis $35 \mu\text{m}$. Im kurzwelligen Bereich wurde die wellenlängenabhängige Reflexion mit der Intensität der Solarstrahlung bei der jeweiligen Wellenlänge gewichtet. Entsprechend wurden die Mittelwerte der Absorption und der Transmission berechnet. Im Bereich der langwelligen Wärmestrahlung wurden die Messwerte nicht mit der Strahlungsintensität gewichtet, um die Berechnung an [DIN EN 12898] anzulehnen.

Übersicht optische Eigenschaften verschiedener Membranen

Die folgenden Tabellen stellen die Ergebnisse der beschriebenen Messungen und Angaben aus anderen Informationsquellen zusammen. Für den IR-, den solaren und den sichtbaren Bereich des Spektrums werden die wichtigsten Werte angegeben, jeweils integriert über den jeweiligen Wellenlängenbereich. Für den visuellen Bereich werden nur die Reflexion und die Transmission angegeben, da diese für das Erscheinungsbild und die Transluzenz des Daches wichtig sind. Für hygrothermische Berechnungen werden diese Werte nicht benötigt.

In den Produktdatenblättern der Firma Verseidag werden mehrere Werte angegeben, die auf unterschiedliche Arten gemessen bzw. berechnet wurden. In die nachfolgende Tabelle wurden diejenigen Werte übernommen, die nach [ASHRAE 74-1988] oder nach [DIN EN 410] ermittelt wurden.

Für die Messungen des ZAE Bayern im Rahmen der Projekte „SoFt“ und MESG“ wurde für die über den jeweiligen Wellenlängenbereich integrierten Werte eine Genauigkeit von 0,02 angegeben.

In der Tabelle gelten folgende Abkürzungen

GF	Glasfaser
PES	Polyester
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PTFE	Polytetrafluorethylen
ePTFE	expandiertes Polytetrafluorethylen

Die Angabe „SoFt“ als Datenquelle bezeichnet die beschriebenen Messungen im Rahmen dieses Projektes.

		Material Gewebe	Material Beschichtung	IR, bei 293 bzw. 300 K	solar			visuel		
Membran Nr	Membran Name			Emissionsgrad hemisphärisch	Reflexionsgrad	Absorptionsgrad	Transmissionsgrad	Reflexionsgrad	Transmissionsgrad	Datenquelle
2-1	Sefar TENARA 4T20HF	ePTFE	fluoropolymer	0.90	0.67	0.08	0.25	0.79 - 0.80	0.18 - 0.19	SoFt/[Sefar15]
2-2	Sefar TENARA 4T40HF	ePTFE	fluoropolymer	0.90	0.51	0.08	0.41	0.59 - 0.60	0.38	SoFt/[Sefar15]
2-3	Sefar E-Line EH-35-T2	PTFE	fluoropolymer	0.89	0.67	0.00	0.33	0.64 - 0.72	0.28 - 0.35	SoFt/[Sefar15]
2-4	Verseidag Duraskin B18039	GF	PTFE	0.89	0.53	0.39	0.08	0.41	0.02	SoFt [Verseidag15]
3-1	Verseidag Duraskin B18089	GF	PTFE	0.89	0.74	0.15	0.11	0.78	0.11	SoFt, [Schmid04], Teil 1,[Verseidag15]
	Verseidag B18059 gebleicht 6h + 7h 400°C	GF	PTFE	0.8979	0.7495	0.1052	0.1480	0.7748	0.1489	[Haase11], S. 63 + 112 [Verseidag15]
	Verseidag Duraskin B18589 GF	GF	PTFE						0.17	[Verseidag15]
	Ferrari Preconstraint 1002 T2 backPVDF	PES	PVDF		0.79	0.15	0.06	0.88	0.045 - 0.08	[SergeFerrari14]
	low-e-beschichtete Membran Flughafen Bankok			ca. 0.4						[Haase11], S. 129

Tabelle: Optische Eigenschaften verschiedener Membranen

Membran Nr	Membran Name	Material Gewebe	Material Beschichtung	IR, bei 293 bzw. 300 K	solar			visuel		Datenquelle
				Emissionsgrad hemisphärisch	Reflexionsgrad	Absorptionsgrad	Transmissionsgrad	Reflexionsgrad	Transmissionsgrad	
2-6	Ferrari Precontraint 1002 T2	PES	PVC	0,89	0,64	0,20	0,16	0,69	0,13	SoFt
2-7a	Ferrari Precontraint 1002 T2 nicht low-e-Seite	PES	PVC	0,89	0,81	0,16	0,03	0,91	0,03	SoFt
2-7b	Ferrari Precontraint 1002 T2 low-e-Seite	PES	PVC	0,59	0,64	0,33	0,03	0,66	0,03	SoFt
	Ferrari Precontraint 1002 Fluotop T2	PES			0,80		0,06	0,915	0.045 - 0.085	[SergeFerrari14]
	Ferrari Precontraint 1002 S2	PES			0,798		0,058	0,91	0.04 - 0.08	[SergeFerrari14]
3-3	Ferrari Precontraint 1202 T2	PES	PVC	0,89	0,80	0,14	0,06	0,89	0,05	SoFt
2-5	Verseidag Duraskin B1617	PES ?	PVC	0,89	0,80	0,13	0,07	0,91	0,06	SoFt
3-2	Verseidag Duraskin B1915	PES ?	PVC	0,89	0,79	0,15	0,06	0,90	0,04	SoFt
	Verseidag B4915	PES	PVC	0,9367	0,8027	0,1451	0,0522	0,8968	0,0378	[Haase11], S. 63 + 111 [Verseidag15]
	Verseidag Duraskin B18589				0,719	0,143	0,139	0,755	0,099	SoFt
	Verseidag B1015 low-e Seite silber	PES	PVC	0,2881	0,7716	0,2247	0,0036	0,7704	0,0029	[Haase11], S. 63 + 110
	Verseidag B1015 low-e Seite weiß	PES	PVC	0,9335	0,7938	0,2025	0,0036	0,8970	0,0029	[Haase11], S. 63 + 109
	PVC/PES-Gewebe 0.5 mm	PES	PVC	0,95			0,09			[Manara12]

Fortsetzung der Tabelle: Optische Eigenschaften verschiedener Membranen

Alterung und Verschmutzung

Wie im Kapitel über die hygrischen Eigenschaften der Membranen bereits dargelegt, kommt es durch Verwitterung und Ausdünsten der Weichmacher mit der Zeit zu einer Versprödung und Mikrorissbildung der PVC-Beschichtung [Schmid04], Teil 1, S. 58 und 62. Dies führt vermutlich auch zu einer Aufrauung der Oberflächen, die dadurch schneller verschmutzen.

Die äußere Membran wird durch Regen immer wieder zumindest teilweise gereinigt. Für schräge Flächen aus glatten Materialien zeigt die Erfahrung mit solarthermischen und PV-Anlagen, dass diese Reinigung ausreichend ist. Im Falle der Sporthalle in Fürth mit der nur gering bis gar nicht geneigten Membrandachfläche wird dies evtl. nicht der Fall sein.

Im Falle der Unterspannbahn gibt es keine Selbstreinigung durch Regen.

Daher ist davon auszugehen, dass die Lichttransmission der Membranen im Laufe der Jahre nachlässt aufgrund der Alterung und Verschmutzung. Hierzu liegen kaum Messwerte vor. [Mainini14] maß die Reduktion des Reflexionsgrades und des Transmissionsgrades für verschieden geneigte ETFE-Folien nach drei und sechs Monaten Freibewitterung in Turin, Italien. Die Transmission der horizontal liegenden ETFE-Folien hatte nach sechs Monaten um 8 % abgenommen für den solaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums von 0,3 bis 2,5 μm . Im sichtbaren Bereich des Spektrums nahm die Transmission um 9 % ab. Diese Ergebnisse lassen sich aber nur bedingt auf PVC-beschichtete Membranen übertragen, da die Oberfläche von ETFE-Folien wasserabweisender und witterungsbeständiger ist als die von PVC.

Wärmedämmung

Bei der Sporthalle in Fürth wurde als Wärmedämm-Material ein Glasgespinst mit dem Produkt-namen „TIMax GL-PlusF“ der Firma wacotech eingebaut. In Betracht gezogen wurde außerdem Wärmedämm-Material aus Polyestervlies mit dem Markennamen HACObond. Hersteller des Polyestervlieses ist die Firma Ziegler in Achern.

Hygrische Eigenschaften

Über die hygrischen Eigenschaften der in Frage kommenden Dämm-Materialien aus Glasfaservlies und Polyestervlies ist nichts Konkretes bekannt. Beide werden als feuchteunempfindlich beschrieben mit geringer Wasseraufnahme.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Feuchteadsorption der Materialien, und somit der Wärmetransport durch Ad- und Desorption von Wasserdampf, in hygrothermischen Berechnungen vernachlässigt werden kann.

Optische und thermische Eigenschaften

Für das thermische und hygrische Verhalten des Wärmedämm-Materials sind natürlich die thermischen Eigenschaften wichtig. Im Falle transluzenter Materialien, wie z.B. dem verwendeten Glasfasergespinnst, haben auch die optischen Eigenschaften Einfluss auf den Wärme- und somit auch den Feuchtehaushalt des Materials. In transluzenten Materialien wird die einfallende Solarstrahlung teilweise innerhalb des Materials absorbiert. Dies führt zu einer Wärmeentstehung innerhalb des Materials, die die Austrocknung von eingedrungener Feuchtigkeit beschleunigen kann.

Die Wärmeleitfähigkeiten des Glasfaservlieses und von zwei Proben Polyestervlies mit unterschiedlicher Dichte wurden im Rahmen dieses Projektes am ZAE gemessen. Für verschiedenen Polyestervliese sind Daten auch in Produktdatenblättern enthalten. Diese Angaben stellt die nächste Tabelle zusammen.

	Probe [-]	Proben- dicke [mm]	Dichte [kg/m ³]	Wärme- leitfähigkeit (Nennwert) [W/(m K)]	solarer Transmissions- grad [-]	visueller Transmissions- grad [-]	Bemerkung	Datenquelle
HACObond			15	0.041				[Ziegler/heinze/ ais-online15]
HACObond			20	0.038				[Ziegler/heinze/ ais-online15]
HACObond			40	0.034				[Ziegler/heinze/ ais-online15]
HACObond	D02b	70	15	0.045	0.04	0.04	Mitteltemperatur 10 °C Spreizung 20 K	SoFt
HACObond	D02a	20	20	0.036	0.19	0.19	Mitteltemperatur 10 °C Spreizung 20 K	SoFt
Wacotech	D01	90	5	0.13			Mitteltemperatur 10 °C Spreizung 20 K	SoFt
Wacotech		ca. 100	5			0.26 bis 0.38	(komprimiert auf 56 - 60 mm im Glasverbund)	[wacotech15]

Tabelle: Thermische und optische Eigenschaften von Wärmedämm-Materialien

Das folgende Bild zeigt die am ZAE gemessene wellenlängenabhängige Transmission der beiden HACObond-Proben.

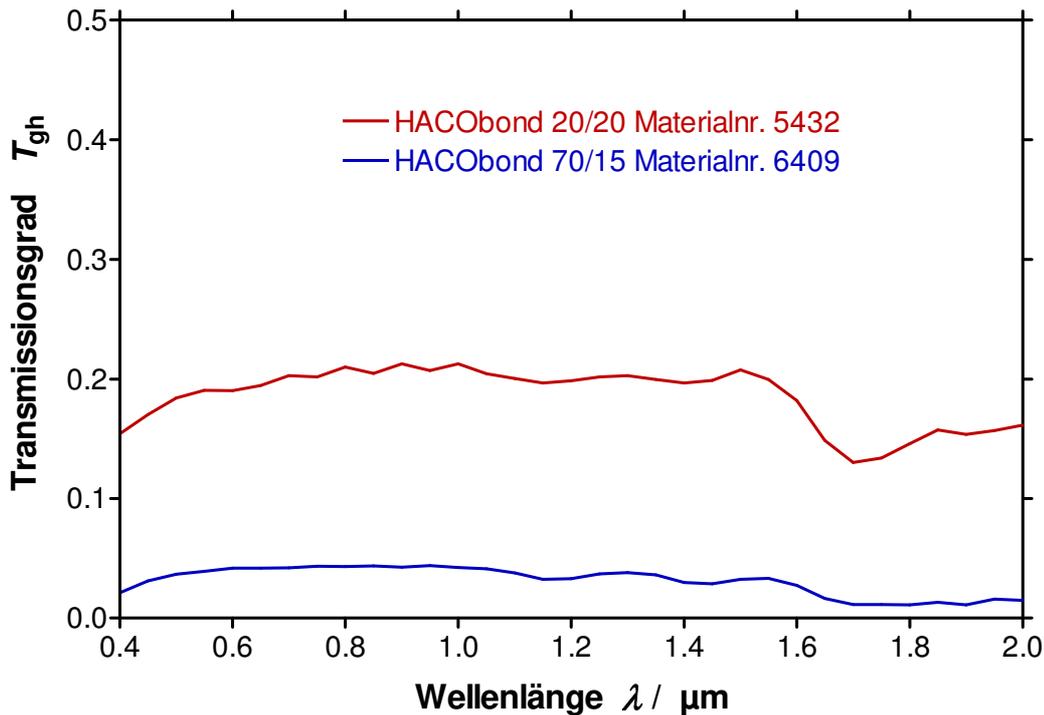


Bild 50: Spektraler Transmissionsgrad der Proben HACObond in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ von 0.4 μm bis 2 μm .

Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit

Die Normen unterscheiden bei den wärmetechnischen Kennwerten von Wärmedämmstoffen zwischen dem Nennwert und dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit. Der Nennwert ist der vom Hersteller angegebene Wert der Wärmeleitfähigkeit. Dieser wird bei einer festgelegten Temperatur und im getrockneten Zustand bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen steigt mit der Temperatur und deren Feuchtegehalt an. Einen guten Überblick über die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe bei Temperatur- und Feuchtegehaltänderung gibt [Ochs04].

Aufgrund dieser Abhängigkeit soll der Nennwert nicht direkt für wärmeschutztechnische Berechnungen verwendet werden. Er wird entweder mit einem pauschalen Zuschlag belegt, z.B. von 5 oder 20 % nach [DIN 4108]; Teil 4 oder mittels eines etwas komplizierteren Verfahrens nach [DIN EN ISO 10456], S. 10/11. Dort werden Berechnungsvorschriften für die Umrechnungsfaktoren angegeben. Diese hängen von der mittleren Betriebstemperatur, der mittleren Temperatur während der Messung, sowie der mittleren Baustofffeuchte im Betrieb und während der Messung ab.

Für die Wärmeleitfähigkeit des vorgesehenen Glasfasergespinnstes liegen Messwerte vor. Diese wurden bei einer mittleren Temperatur von 10 °C gemessen. Dieser Wert entspricht der mittleren Temperatur während der Anwendung des Materials und muss daher nicht umgerechnet werden. Eine Umrechnung der gemessenen Wärmeleitfähigkeit für evtl. unterschiedliche Feuchtegehalte während der Messung und im Betrieb ist ebenfalls nicht notwendig, da das Material zumindest bis zu einer relativen Luftfeuchte von 80% keine Feuchtigkeit aufnimmt (siehe Einträge für Mineralwolle und lose Mineralwolle in [DIN EN ISO 10456], S. 21. Für eine Berücksichtigung von Alterung gibt es keine einfachen,

allgemein gültigen Umrechnungsregeln [DIN EN ISO 10456], S. 11. Da hierzu keine Messwerte vorliegen, wird Alterung nicht berücksichtigt.

Für die Berechnungen wird also der vom ZAE Bayern ermittelte Wert der Wärmeleitfähigkeit verwendet.

Materialdaten aus der Literatur für ähnliche Wärmedämm-Materialien und deren Anwendung auf Glasfasergespinst-Wärmedämm-Material

Zur Abschätzung der nicht verfügbaren Eigenschaften des Glasfaservlieses werden hier Werte für Mineralwolldämmung angegeben, die der Literatur entnommen wurden.

Die Wärmekapazität

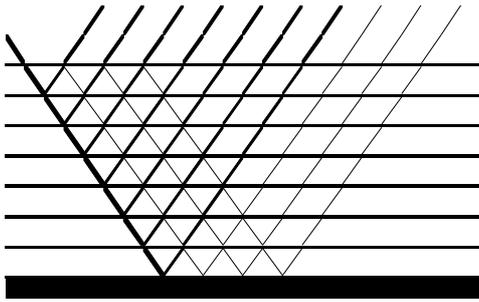
Für die Wärmekapazität von Mineralwolle gibt [DIN EN ISO 10456], S. 21 einen Wert von 1030 J / (kg K) . Die WUFI pro-Materialdatenbank nennt 850 J / (kg K) für Mineralfaser.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wird in [Schmid04], Teil 2, in [DIN 4108], Teil 4, S: 20 und in [DIN EN ISO 10456], S. 21 mit 1 angegeben. Im Eintrag für Mineralwolle in der WUFI pro-Materialdatenbank wird sie mit 1,3 genannt.

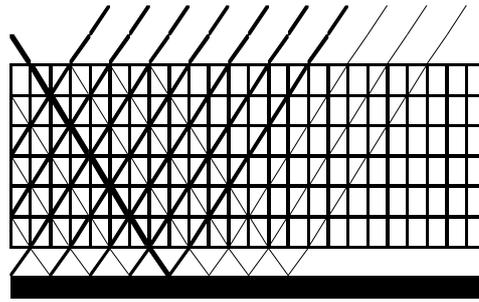
Optische Eigenschaften

[Zang07] und [Glaeser92] geben die Winkelabhängigkeit verschiedener transluzenter und transparenter Wärmedämm-Materialien an. Sie unterscheiden dabei je nach Struktur des Materials, ob dieses Grenzflächen zwischen Feststoff und Luft aufweist, die parallel zur Dämmstoffebene sind oder senkrecht dazu oder verschiedene Richtungen aufweisen. Schäume, aber auch Vliese, wie Polyestervlies und Glasfasergespinst, zählen aufgrund ihrer vielen, über alle Richtungen gleichmäßig verteilten Grenzflächen zu den quasi-homogenen Materialien.



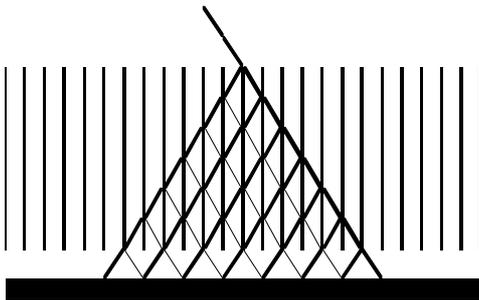
Absorber-parallel

Mehrfachverglasungen auch beschichtete Gläser
Mehrfach-Folienschichten



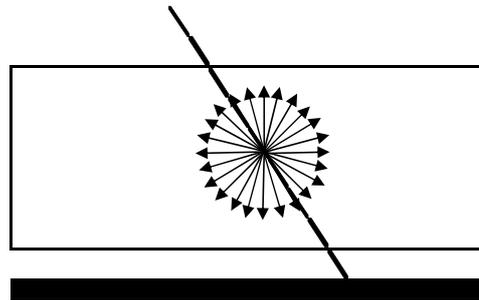
Kammerstruktur

großporiger Schaum
Kunststoff-Kammern



Absorber-senkrecht

Wabenstruktur
Kapillaren
Lamellen



(Quasi-) Homogen

Glasfaser
Aerogel
feinporiger Schaum

Bild 51: TWD-Strukturen. Zeichnung nach [Glaeser92], S. 148

(Quasi-) homogene transluzente Materialien zeigen bei senkrechtem Lichteinfall geringere Transmission als die anderen gezeigten Materialien. Dafür ist jedoch der Transmissionsgrad auch bei großen Einstrahlwinkeln noch relativ hoch.

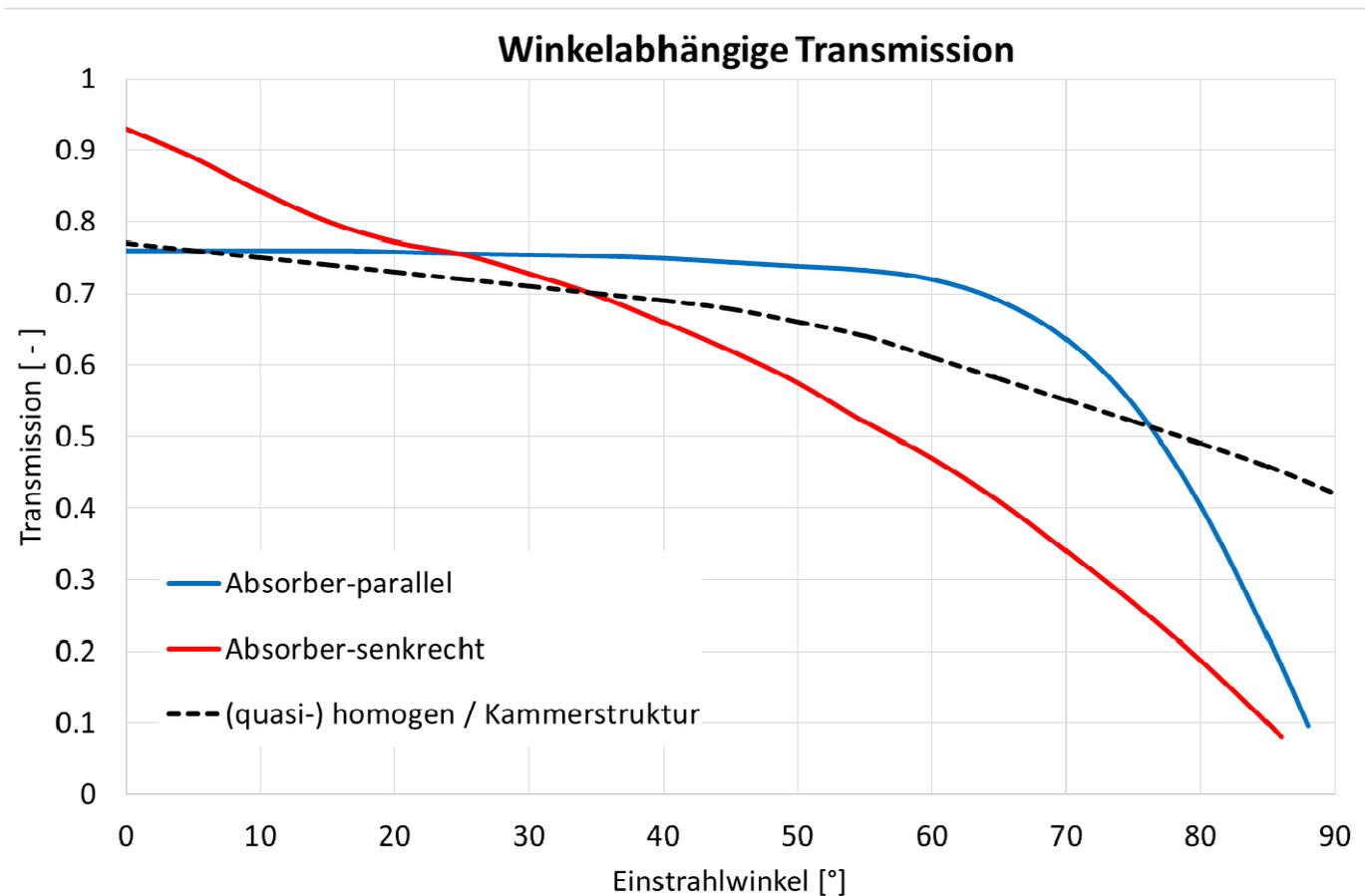


Bild 52: Winkelabhängigkeit der Transmission verschiedener TWD-Strukturen
Nach [Zhang07], S. 59 und [Glaeser92], S. 191

Andererseits nimmt die Transmission bei wachsender Schichtdicke schnell ab. [Glaeser92] zeigt auch Messwerte zur Abhängigkeit des Transmissionsgrades von der Materialdicke, jeweils wieder unterschieden nach der Struktur des Materials. Bei den gezeigten Messwerten handelt es sich um eine Wabenstruktur aus Polycarbonat und einen Schaum aus PMMA.

Aus theoretischen Überlegungen ist zu erwarten, dass der Transmissionsgrad mit zunehmender Materialdicke exponentiell abnimmt. Im unten gezeigten Bild sieht man dies bei den Werten für den PMMA-Schaum deutlich. Bei den Werten für die Polycarbonat-Waben fällt dies weniger auf, da der Absorptionskoeffizient viel geringer ist und die Transmission mit zunehmender Materialstärke somit langsamer abfällt.

Im Bild unten wurden die Werte aus [Glaeser92], S. 153 übernommen und über den dort angegebenen Bereich bis 10 cm Dämmstoffdicke hinaus erweitert entsprechend einer Exponentialfunktion.

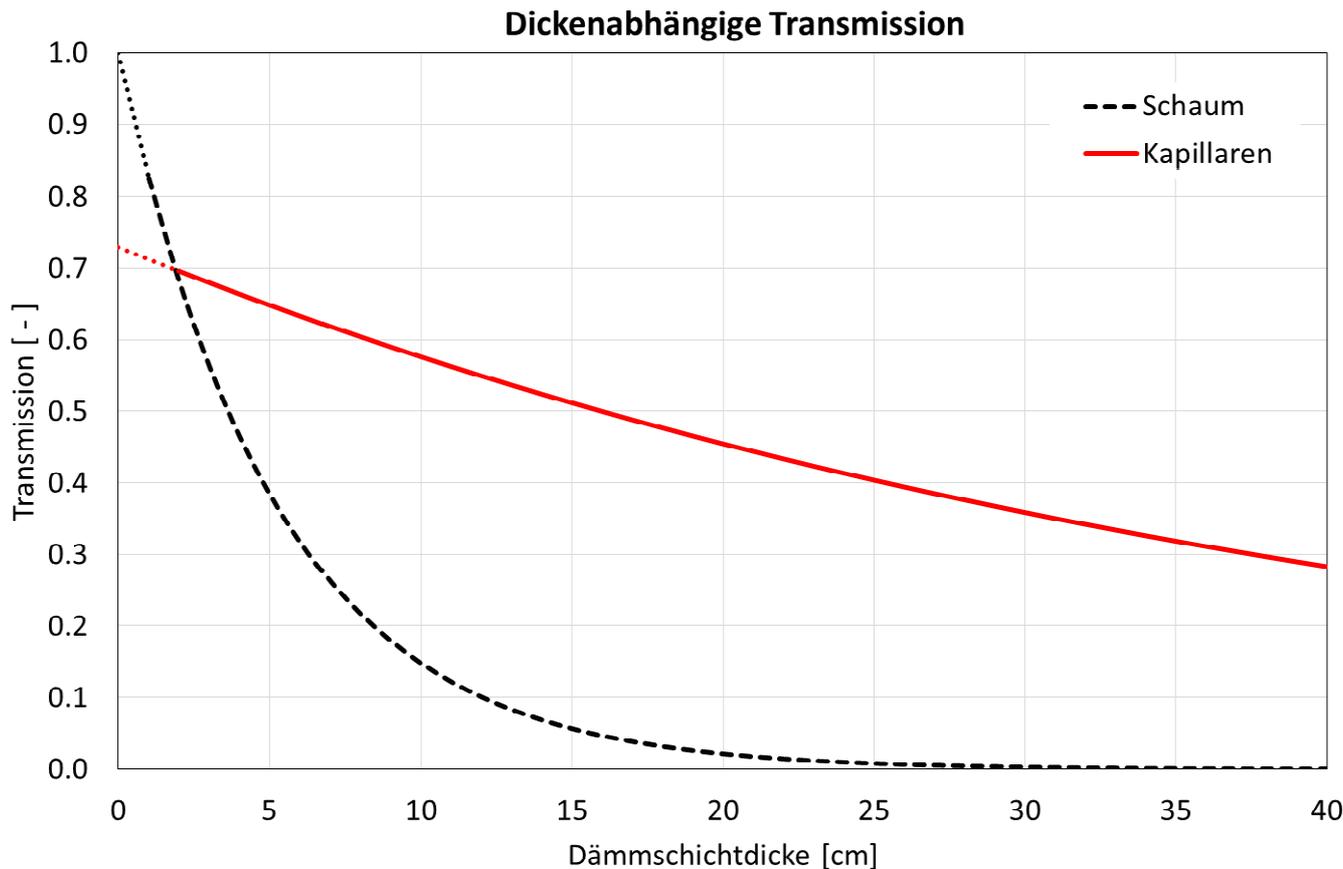


Bild 53. Transmission von TWD als Funktion der Schichtdicke.
Nach [Glaeser92], S. 153, erweitert bis zu einer Dämmstoffdicke von 40 cm.

Unterspannbahn

Die Unterspannbahn deckt die Wärmedämmung ab und dient als zweite wasserführende Schicht. Bei üblichen Kaldächern mit Ziegel- oder Metalleindeckung ist die Dachdeckung opak. Die Unterspannbahn ist daher nicht dem Tageslicht ausgesetzt. Die Unterspannbahnen müssen daher nicht langzeit-UV-stabil sein und die als Unterspannbahnen angebotenen Produkte sind dies auch nicht.

Bei Membrandächern mit transluzenter äußerer Membran und teilweise offenen Rändern wie im Falle der Sporthalle Fürth ist dies anders. Ein weiterer Gesichtspunkt für die Auswahl der Unterspannbahn sind die Brandschutzanforderungen, auf die hier aber nicht weiter eingegangen werden soll.

Als Unterspannbahn wurden zwei verschiedene Folien in Betracht gezogen: Die Unterspannbahn DELTA_FOL SPF der Firma Dörken in Herdecke und Hostaphan RUF-Folie der Firma Mitsubishi Polyester Film GmbH in Wiesbaden. Die Unterspannbahn der Firma Dörken, die für übliche geneigte Kaldächer entwickelt wurde, besitzt jedoch einige Eigenschaften, so dass sie sich für das Membrandach der Sporthalle nicht eignet. Vor allem aus Brandschutzgründen wurde daher nach einer Alternative gesucht. Entschieden wurde dann für die Folie Hostaphan RUF.

Die folgende Tabelle stellt die verfügbaren Informationen über die Eigenschaften der beiden Folien zusammen.

	DELTA_FOL SPF	Hostaphan RUF
Material	Polyethylen (PE)-Gittergewebe zwischen PE-Folien, mikroperforiert	Polyester (PET)
Materialdichte [kg / m³]		1400
Dicke	0.7 - 0.85 mm	19 µm
Flächengewicht [g / m²]	ca. 200	26,6
Reißkraft	ca. 450/450 N/5 cm, EN 12311-1	
Transparenz	milchig weiß durchscheinend	88%
Schlagregendichtheit	Schlagregentest bestanden	
Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	ca. 3	3,52
Temperaturbeständigkeit	-40 °C - 80 °C	-70 °C - 140 °C
Brandverhalten	Klasse E, EN 13501-1, schwer entflammbar B 1 nach DIN 4102, B1 in witterungsgeschützten Einbausituationen, tropft brennend	
Witterungsbeständigkeit	soll nicht länger als 4 bis 6 Wochen ohne Dacheindeckung belassen werden	Versprödung bei > 100 °C und Wasser, versprödet unter normalen Einsatzbedingungen nicht.
UV-Beständigkeit		Hostaphan RUF ist speziell UV-stabilisiert, sehr gute UV-Stabilität
Eignung	für belüftete Steildächer ohne harte Schalung, Neigungswinkel >= 16°	

Tabelle: Eigenschaften von Unterspannbahnen

Datenquellen: [Doerken14], [Mitsubishi16]

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d

Zur Wasserdampfdurchlässigkeit der Folie Hostaphan RUF sind im Datenblatt keine Werte vorhanden. Aus den im Internet verfügbaren Datenblättern zu verschiedenen dicken Folien der Sorte Hostaphan RN (Allzweckfolie aus Polyester) wurden die Angaben zum Wasserdampfdurchtritt pro Tag und Quadratmeter entnommen. Aus diesen Angaben und der Beschreibung des Messverfahrens in der angegebenen Norm [DIN 53122], Teil 1 wurde für jede Folie deren Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ berechnet. Der Mittelwert der berechneten μ -Werte der Hostaphan RN-Folien wird als Schätzwert für die Folie Hostaphan RUF verwendet. Aus ihm ergibt sich eine wasserdampfdiffusions-äquivalente Luftschichtdicke s_d von 3,517 m.

Verschmutzung

Die Unterspannbahn ist ebenso wie die äußere Membran der Verschmutzung durch Schmutzpartikel in der Luft ausgesetzt. Im Gegensatz zur äußeren Membran allerdings, wird die Unterspannbahn nicht immer wieder durch Regen zumindest teilweise abgewaschen. Somit besteht bei der Unterspannbahn die Gefahr, dass sich Verschmutzungen über die Jahre immer weiter anlagern und die Transmission erheblich reduzieren.

Bemessungswerte und Messverfahren für thermische und hygrische Eigenschaften von Baustoffen

Auf die Messverfahren zur Bestimmung der hygrothermischen Stoffeigenschaften soll hier nicht näher eingegangen werden. Statt dessen soll an dieser Stelle eine Liste der relevanten Normen genügen.

Tabelle: Liste von Normen mit Bemessungswerten und zur Messung von hygrischen und thermischen Eigenschaften von Baustoffen.

Eigenschaft	Tabellenwerte	Jahr	Messverfahren / Durchführung	Jahr
Messgeräte			DIN EN ISO 7726	2002
Dichte	DIN EN ISO 10456	2010		
Spezifische Wärmekapazität	DIN EN ISO 10456 DIN 4108, Teil 4	2010	DIN 51007	1994
Wärmeleitfähigkeit / Wärmedurchlasswiderstand	DIN EN ISO 10456	2010	DIN EN 12939	2001
	DIN 4108, Teil 4	2013	DIN EN 12664	2001
				DIN EN 12667
Feuchtegehalt	DIN 4108, Teil 4	2013		
Bestimmung des Feuchtegehaltes von Holz durch Trocknung			DIN 52183	1977
			DIN EN 13183-1 mit Berichtigung 1	2002
Bestimmung des Feuchtegehaltes von Baustoffen durch Trocknung			DIN EN ISO 12570	2013
Feuchtespeicherfunktion, Sorptionsisotherme			DIN EN ISO 12571	2013
Sorptionskinetik			DIN ISO 24353	2006, ohne Nachfolger zurückgezogen in 2014,
kapillare Wasseraufnahme und Leitfähigkeit			DIN EN ISO 15148 mit Änderung A1	2003 / 2015
Wasserdurchgang			DIN EN 20811	1992
Wasserabweisendes Verhalten von Oberflächen			DIN EN ISO 4920 früher DIN 24920	2012 1992
Diffusionswiderstandsfaktor	DIN EN ISO 10456	2010	DIN EN ISO 12572	2001, 2015 Entwurf
Wasserdampfdurchlässigkeit von Folien, Papier etc.			DIN 53122-1	2001
Luftdurchlässigkeit			DIN EN ISO 9237	1995
Strahlungreflexion und -transmission			DIN EN 410	2011

Tabelle: Normen zu Eigenschaften von Baustoffen

Diese Liste ist nicht erschöpfend. In Saur10], ab S. 53 werden noch weitere Messverfahren für Eigenschaften von textilen Werkstoffen beschrieben.

Randbedingungen

Außenklima / Wetterdaten

Für Berechnungen und Simulationen der Wärme- und Feuchteverhältnisse im Membrandach werden Wetterdaten benötigt. Für Simulationen müssen diese mindestens in stündlicher Auflösung vorliegen. Wenn die Feuchtebelastung durch in den Membrandachzwischenraum eindringenden Regen mit untersucht werden soll, müssen die Wetterdaten auch Angaben zum Niederschlag enthalten.

Verfügbare Wetterdaten

Klimaregionen in Deutschland

Für die statistische Auswertung und die Erstellung von Testreferenzjahren (Test Reference Years TRY) wurde Deutschland in Klimaregionen unterteilt. In jeder Klimaregion gibt es eine Repräsentanzstation, aus deren langjährigen Wetteraufzeichnungen die Statistiken und die Testreferenzjahre erstellt wurden.

Westdeutschland war bis zur Wiedervereinigung der Bundesrepublik mit der ehemaligen DDR in 12 Klimaregionen unterteilt. Eine Karte gibt es in der Readme-Datei in [WUFI-Testreferenzjahre86].

Nach der Wiedervereinigung wurde das Gebiet der Bundesrepublik inklusive der neuen Bundesländer in 15 Klimaregionen unterteilt (siehe Kapitel „Verwendete Wetterdaten / Vergleich der Lage der Standorte“).

Statistiken für den Zeitraum 1961 bis 1990

Für den Zeitraum 1961 bis 1990 wurden aus den gemessenen Wetterdaten der Repräsentanzstationen der 12 westdeutschen Klimaregionen umfangreiche Statistiken erstellt. Diese wurden in [DIN 4710] veröffentlicht. Für die Untersuchung der Feuchteverhältnisse in Bauteilen sind vor allen die Häufigkeiten der Zeiten mit bestimmten Kombinationen von Temperatur- und Luftfeuchtwerten interessant. Diese liegen als Jahreswerte und als Werte für die einzelnen Monate vor.

Im Falle des Membrandaches mit seinem offenen Zwischenraum sind auch die Windgeschwindigkeiten und die Windrichtungen von Interesse. Hierfür gibt es in [DIN 4710] ebenfalls Statistiken.

Mittelwerte für den Zeitraum seit 1990

Für den Zeitraum der Datenbasis der neuen Testreferenzjahre (1988 – 2007) sind keine umfangreichen Statistiken bekannt. [DIN V 18599], Teil 10 gibt jedoch auf der Grundlage dieser Daten für die wichtigsten Wettergrößen statistische Werte an: die Temperatur, die Windgeschwindigkeit, gemessen 10 m über Grund, und die solare Strahlungsintensität für verschieden orientierte und geneigte Flächen, jeweils als monatliche und jährliche Mittelwerte.

Testreferenzjahre von 1986

Speziell für Gebäudesimulationen wurden die Testreferenzjahre (TRY) entwickelt. Hierfür wurde Deutschland in 12 Klimaregionen unterteilt. Für jede Klimaregion wurde eine Repräsentanzstation festgelegt. Für die Repräsentanzstationen der 12 westdeutschen Klimaregionen wurde jeweils aus Abschnitten von gemessenen Wetterdaten ein jährlicher Datensatz zusammengestellt, der ein typisches Jahr an diesem Standort darstellt. Die Testreferenzjahre sollen dabei nicht nur in zeitweisen Mittelwerten der Temperatur, der Strahlung etc. mit den langjährigen Mittelwerten übereinstimmen, sondern auch die Dynamik des Wetters, also die Abfolge von Perioden mit heiterem und bewölktem Wetter richtig wiedergeben. [DWD-TRY11], [BBSR-TRY11]. Eine Beschreibung der Entwicklung der Testreferenzjahre wird in [Bluemel86] gegeben.

Für Deutschland wurden Testreferenzjahre entwickelt, die auf gemessenen Wetterdaten der Jahre 1961 bis 1990 beruhen. Dieser Zeitraum wurde von der World Meteorological Organization festgelegt [WUFI pro 5.3].

Testreferenzjahre von 2011

Aufgrund des Klimawandels wurde eine Aktualisierung der Testreferenzjahre nachgefragt und vom Deutschen Wetterdienst umgesetzt. Das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, das nun auch die neuen Bundesländer der ehemaligen DDR umfasst, wurde neu eingeteilt und in nunmehr 15 Klimaregionen aufgeteilt. (siehe Karte im Kapitel „Verwendete Wetterdaten / Vergleich der Lage der Standorte“).

Die neuen Testreferenzjahre beruhen auf Wetterdaten der Jahre 1988 bis 2007. Sie enthalten für jede Klimaregion sechs Datensätze: ein typisches Jahr, ein Jahr mit einem heißen Sommer und ein Jahr mit einem kalten Winter. Jedes dieser drei Jahre (typisch, mit warmem Sommer und mit kaltem Winter) gibt es für das aktuelle Klima und für das zukünftige, im Jahr 2035 zu erwartende Klima. Die Voraussage für das zukünftige Klima im Jahr 2035 wurde aufgrund verschiedener Klimasimulations- und Vorhersagemodelle und deren Ergebnissen erstellt. [BBSR-TRY11], Handbuch. Eine Beschreibung der Entwicklung dieser Testreferenzjahre wird in [Christoffer04] gegeben.

Zudem gibt es zu den Testreferenzjahren ein Umrechnungsprogramm, mit dem der Wetterdatensatz der Repräsentanzstation an den jeweiligen Standort angepasst werden kann. Dabei werden die unterschiedlichen Höhen über dem Meeresspiegel und eine städtische Umgebung berücksichtigt, falls zutreffend. Die Wetter-Messstationen befinden sich im freien Gelände. Für die Umrechnung für eine städtische Umgebung wird die Größe der Stadt (Einwohnerzahl) und die Lage des Gebäudes in der Stadt (Stadtkern, mittleres Stadtgebiet oder Stadtrand) berücksichtigt. Die einzelnen Korrekturen sind im Handbuch recht detailliert beschrieben und es werden Hinweise auf weitere Literatur

gegeben.
[DWD-TRY11] und [BBSR-TRY11]

Verfügbarkeit

Die neuen Testreferenzjahre von 2010 wurden im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojektes erarbeitet und stehen daher kostenfrei zur Verfügung. Die Datensätze, das Umrechnungsprogramm, das Handbuch zu den Testreferenzjahren und der Projektbericht stehen auf der Website des Bundesinstituts für Stadt-, Raum- und Bauforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung zur Verfügung [BBSR-TRY11].

Testreferenzjahre 2010, Solarstrahlung und atmosphärische Gegenstrahlung

Bei diesen Testreferenzjahren von 2010 ist allerdings das Problem aufgetreten, dass die Solarstrahlungswerte nicht für alle Repräsentanzstationen oder nicht für den gesamten Zeitraum zur Verfügung standen. In diesen Fällen wurden Solarstrahlungswerte berechnet. Diese berechneten Strahlungswerte weisen nun einen Zeitversatz gegenüber den übrigen Daten im jeweiligen Stunden-Datensatz auf. Zudem geben diese Daten nicht den Mittelwert über die vergangene Stunde an, sondern den Instantanwert zur vollen Stunde. Daher eignen sich diese neuen Testreferenzjahre nicht für Simulationen von solarthermischen Anlagen oder anderen Simulationen, bei denen die solare Einstrahlung einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Hierauf wird auch im Handbuch zu den TRY hingewiesen. [BBSR-TRY11], [Schaefer/Hiller15].

Im Handbuch der TRY wird auch darauf hingewiesen, dass bei der Umrechnung der Klimaelemente zur Anpassung an die Geländehöhe über Meeresspiegel und an das urbane Umfeld, eine Anpassung der Strahlungsdaten nicht stattfindet, obwohl die Höhe über NN durchaus Einfluss auf die Solarstrahlungsintensität hat [BBSR-TRY11].

Im Handbuch wird auch beschrieben, dass bei der Höhenkorrektur nur die Lufttemperatur und die absolute Luftfeuchte, das Mischungsverhältnis, an die Höhenlage angepasst werden. Da mit zunehmender Höhe im Gelände die Dicke der Luftschicht über dem Standort geringer wird, ist zu erwarten, dass bei Standorten in größerer Höhe über Meeresspiegel die Himmelstemperatur und somit die atmosphärische Gegenstrahlung niedriger ist als bei tiefer gelegenen Standorten. Dies wird bei der Höhenkorrektur offenbar ebenfalls nicht berücksichtigt.

Testreferenzjahre und Winddaten

Laut Handbuch zu den Testreferenzjahren sind die Testreferenzjahre nicht geeignet für die Simulation von Windenergiepotentialen oder die Ausbreitung von Schadstoffen oder Wasserdampf. Die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung hängen stark von der lokalen Geländeform, der Bebauung und oder Vegetation ab. Daher kann die an der Repräsentanzstation gemessene Windgeschwindigkeit und Windrichtung nicht oder nur sehr eingeschränkt auf andere Standorte in der Klimaregion übertragen werden ([DWD-TRY11], Handbuch, S. 4).

Testreferenzjahre und Regendaten

Die TRY enthalten keine Werte der Niederschlagsmenge. Die stündlichen Datensätze enthalten jeweils eine Angabe zum Wetterereignis. Aus dieser Angabe und den im Handbuch gegebenen Erläuterungen dazu kann jedoch keine quantitative Angabe der Niederschlagsmenge abgeleitet werden ([DWD-TRY11], Handbuch, S. 11 und Anhang 2, S. 66 ff).

Testreferenzjahre in WUFI pro 5.3

WUFI pro 5.3 enthält einige Wetterdaten für Standorte weltweit. Für Deutschland, sind 23 Wetterdatensätze enthalten. Sie wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt. Teilweise handelt es sich dabei um Testreferenzjahre aus dem Jahr 2004, teilweise um Testreferenzjahre aus dem Jahr 1986.

WUFI-Testreferenzjahre und Regendaten

Die Testreferenzjahre aus dem Jahr 1986 enthalten auch die stündliche Angabe der Regenmenge. Der DWD weist bei diesen Datensätzen allerdings darauf hin, dass die in den Datensätzen enthaltenen Regendaten nicht den Zweck der Simulation und Beurteilung von Bauteilen dienen und der DWD dieser Verwendung nicht zustimmt. Er weist aber auch darauf hin, dass bei Verwendung der Regendaten für Bauteilsimulationen die Ergebnisse eher eine zu hohe Feuchtebelastung ergeben.

Der Grund für die eher zu hoch berechnete Feuchtebelastung liegt in der stündlichen Zeitauflösung der Wetterdaten. Regenschauer dauern oft nicht eine ganze Stunde. Bei der Simulation wird nun jedoch die in einem kürzeren Zeitraum als eine Stunde gefallene Niederschlagsmenge auf eine Stunde „gestreckt“, so dass bei direkter Einwirkung des Regens auf das Bauteil in der Simulation das Bauteil in dieser zu lange angenommenen Zeit von einer Stunde mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann als in Wirklichkeit während des Regenschauers, der nur einen Bruchteil einer Stunde andauert ([WTA_6-2-14/D], S. 17).

[WTA_6-2-14/D], S. 17 schätzt den dadurch entstehenden Fehler bei stündlichen Wetterdaten für mitteleuropäische Niederschlagsmengen und -dauern als gering ein. Diese zeitliche Streckung der Regenereignisse dürfte sich bei der Simulation von Bauteilen mit wenig feuchteabsorbierenden Oberflächen zudem noch geringer auswirken als bei anderen Oberflächen.

Beim Wetterdatensatz für Würzburg fällt zudem auf, dass auch in manchen Stunden mit Regen die relative Feuchte der Luft nur relativ gering ist. Der niedrigste Wert beträgt 36 %. In Zeiträumen mit Regen ist jedoch eine hohe Luftfeuchte zu erwarten. Möglicherweise sind die niedrigen Luftfeuchtwerten während mancher Stunden mit Regen eine Folge der zeitlichen Auflösung von 1 Stunde und diese Kombinationen von Regen und relativ niedriger Luftfeuchte entstanden bei kurzen Regenschauern. Tatsächlich zeigt eine kurze Analyse des Wetterdatensatzes, dass in den genannten Stunden mit relativer Luftfeuchte kleiner als 60 % die stündliche Regenmenge relativ gering ist. Insgesamt gibt es im Wetterdatensatz für Würzburg 93 Stunden mit Regen und relativer Luftfeuchte kleiner als 60 %. Dies sind wenig mehr als 1 % aller Stunden im Jahr und ca. 4 % von allen 2354 Stunden mit Regen. Das Phänomen tritt also nicht häufig auf. Die anderen Feuchtereferenzjahre wurden nicht auf den Zusammenhang zwischen Regenereignis und relativer Luftfeuchte hin untersucht.

Verfügbarkeit der WUFI-Testreferenzjahre

Die Tabelle auf der nächsten Seite enthält eine Zusammenstellung der in WUFI pro 5.3 enthaltenen Wetterdatensätze. Die mit „Feuchtereferenzjahr“ bezeichneten Wetterdaten enthalten auch stündliche Angaben zur Niederschlagsmenge. Dateien mit diesen Feuchtereferenzjahren können auch auf der WUFI-Website heruntergeladen werden. Die Dateien sind von WUFI lesbar [WUFI-Testreferenzjahre⁸⁶].

Nächste Seite:

Tabelle: Testreferenzjahre und Feuchtereferenzjahre in WUFI pro 5.3

Standort / Repräsentanzstation	TRY-2010-Region		Bezeichnung Datensatz in WUFI
Augsburg			Feuchtereferenzjahr
Bad Marienberg	6	Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete	Testreferenzjahr (2004)
Braunlage	8	Oberharz und Schwarwald, mittlere Lagen	Testreferenzjahr (2004)
Bremerhaven	1	Nordseeküste	Feuchtereferenzjahr
Chemnitz	9	Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland	Testreferenzjahr (2004)
Essen	5	Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland	Feuchtereferenzjahr
Fichtelberg	11	Erzgebirge, Böhmer- und Schwarwald oberhalb 1000 m	Testreferenzjahr (2004)
Frankfurt			Feuchtereferenzjahr
Freiburg			Feuchtereferenzjahr
Freidrichshafen			Feuchtereferenzjahr
Garmisch-Partenkirchen	15	Alpenrand und -täler	Testreferenzjahr (2004)
Hamburg	3	Nordwestdeutsches Tiefland	Testreferenzjahr (2004)
Hannover			Feuchtereferenzjahr
Hof	10	Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m	Feuchtereferenzjahr
Holzkirchen			IBP, Feuchtereferenzjahr
Kassel	7	Nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche	Testreferenzjahr (2004)
Mannheim	12	Oberrheingrabe und unteres Neckartal	Testreferenzjahr (2004)
Mühlendorf/Inn	13 ab 1997	Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland	
München			Feuchtereferenzjahr
Passau	13 bis 1997	Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland	Testreferenzjahr (2004)
Potsdam	4	Nordostdeutsches Tiefland	Testreferenzjahr (2004)
Rostock	2	Ostseeküste	Testreferenzjahr (2004)
Stötten	14	Schwäbische Alb und Baar	Feuchtereferenzjahr
Trier			Feuchtereferenzjahr
Würzburg			Feuchtereferenzjahr

Hygrothermische Referenzjahre in WUFI pro ab Version 6.0

In WUFI Pro 6.1 stehen neu entwickelte Hygrothermische Referenzjahre (Hygrothermal Reference Years HRY) zur Verfügung. Sie wurden von Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt. Als Datenbasis dienten gemessenen Wetterdaten der Firma Meteomedia AG aus den Jahren 2003 bis 2010. Die Wetterdaten liegen für 15 Stationen vor, die sich in der Nähe der Repräsentanzstationen der bisherigen Testreferenzjahre des DWD von 2011 befinden, und für zwei weitere Standorte. Diese Wetterdaten enthalten auch Angaben zur Niederschlagsmenge.

Jedoch enthalten sie keine Werte für die langwellige Strahlung. Diese wurde aus dem Clearness Index nach [Ineichen92] berechnet. Der Clearness Index wiederum wird aus den Solarstrahlungsdaten berechnet. D. h. er kann nur für die Stunden während des Tages berechnet werden. Für die Nachtstunden wurde der Clearness Index interpoliert.

Die Einteilung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland in Klimaregionen wurde aus der Einteilung für die Testreferenzjahre des DWD von 2011 übernommen. Allerdings wurden vier Mal zwei Klimaregionen zusammengefasst, so dass die Hygrothermischen Referenzjahre nun für 11 Klimaregionen vorliegen.

HRY-Region	entsprechende TRY-Region	Name der Station
1	2	Warnemünde
2	1, 3	Hamburg
3	4	Potsdam
4	6, 8	Braunlage
5	5, 7	Kassel
6	9, 10	Chemnitz
7	11	Fichtelberg
8	12	Mannheim
9	13	Fürstgenzell
10	14	Stötten
11	15	Lindenberg

Tabelle: Referenzstationen der Hygrothermischen Referenzjahre

Zur Erzeugung der HRY wurde für jeden Monat des Jahres aus den verfügbaren Messwerten der acht Jahre ein mittlerer Monat berechnet. Aus den gemessenen Wetterdaten wurde dann aus den acht gleichen Monaten derjenige ausgewählt, der dem mittleren Monat am besten entspricht. So wurde für alle 12 Monate des Jahres vorgegangen. Im Anschluss wurden die Übergänge zwischen den ausgewählten Monaten geglättet. Nach dieser Vorgehensweise wurde für alle elf HRY-Klimaregionen verfahren ([Schoener/Zirkelbach16] und [Schoener/Zirkelbach16-2]).

Überprüfungen der HRY

Die so entstandenen Hygrothermischen Referenzjahre wurden auf mehrere Arten überprüft:

Die erste Überprüfung erfolgte durch den Vergleich der Ergebnisse von hygrothermischen Bauteilsimulationen. Für vier verschiedene, typische, als feuchtegefährdet bekannte Bauteil-Konstruktionen wurden hygrothermische Simulationen mit dem Programm WUFI durchgeführt. Bei den vier Bauteilen handelte es sich um

- ein nord-orientiertes Steildach mit Metalleindeckung, Neigung 50 °,
- ein Flachdach mit heller Dachbahn,
- ein begrüntes Dach,
- eine west-orientierte Wand aus Mauerwerk mit Innendämmung.

Als Randbedingungen wurden angenommen:

Innen:

- 20°C / 50 % relative Feuchte oder
- Innenklima, berechnet aus dem Außenklima nach [DIN EN 15026] (siehe hierzu das Kapitel zum Innenraumklima)

Außen:

- Die gemessenen Wetterdaten der 15 Stationen über die acht Jahre von 2003 bis 2010
- Die neu entwickelten HRY, mehrmals hintereinander
- Verschiedene Folgen von HRY und kalten HRY. Die kalten HRY wurden aus den HRY erzeugt durch Verschiebung der Außenlufttemperatur um - 2 K, wie es [DIN EN 15026] empfiehlt.

Bei Bedarf wurden die neu entwickelten HRY angepasst, so dass der in den Simulationen berechnete Feuchtegehalt der Bauteile gleich oder eher etwas höher ist, wenn in den Simulationen als äußere Randbedingung die HRY verwendet werden im Vergleich zum gleichen Bauteiles, simuliert mit den gemessenen Wetterdaten des entsprechenden Standortes.

Eine zweite Überprüfung der neu entwickelten HRY erfolgte durch den Vergleich von hygrothermischen Simulationen der vier Bauteile, die mit den neuen HRY durchgeführt wurden und mit Referenzjahren, die nach [DIN EN ISO 15927], Teil 4 erstellt wurden. Die in [DIN EN ISO 15927], Teil 4 beschriebene Methode zur Erzeugung von Referenzjahren ist gedacht für thermische Simulationen. Für andere Beurteilungskriterien empfiehlt diese Norm andere Methoden zur Erzeugung von Referenzjahren.

Eine dritte Überprüfung erfolgte durch den Vergleich der Heizgradtage. Die neuen HRY zeigen geringfügig geringere Anzahlen von Heizgradtagen als die Testreferenzjahre des DWD ([Schoener/Zirkelbach16] und [Schoener/Zirkelbach16-2]).

Heizgrenztemperatur	HRY
15 °C	-3,8 %
19,4 °C	- 4,6 %

Tabelle: Heizgrenztemperatur

Anpassung an das lokale Klima

Wie bei den Testreferenzjahren von 2011 wurde auch für die Hygrothermischen Referenzjahre ein PC-Programm entwickelt, der „Lokalklimagenerator“, mit dem die HRY an das lokale Klima des Standortes eines Gebäudes angepasst werden können ([Tanaka/Zirkelbach16] und [Tanaka17]).

Zum einen können die Wetterdaten der HRY an die vom Referenzstandort abweichende Höhe über NN angepasst werden. Dabei werden die Werte der folgenden Wetterelemente geändert:

Wetterelement	Änderung
Temperatur	- 0,00411 K / m
absolute Feuchte	- 0,0012 (g/kg) / m
atmosphärische Wärmestrahlung	- 0,021 (W/m ²) / m

Tabelle: Änderung der Wettergrößen mit der Höhe über NN

Zum anderen können die Wetterdaten an die Geländeart angepasst werden. Zur Verfügung stehen die Geländearten

- neutral (offenes, flaches Gelände),
- Gewässernähe,
- Stadt,
- Berg,
- Tal.

Die Geländeform „neutral) bedarf keiner Anpassung der Wetterdaten, da sich die Messstationen bzw. die Referenzstandorte in offenem, flachem Gelände befinden. Für die anderen Geländearten wurden für die einzelnen Wetterelemente Korrekturfunktionen entwickelt. Der Korrekturwerte eines Wetterelementes (Temperatur, absolute Feuchte etc.) variiert im Laufe des Jahres und wird zum Wert des Wetterelementes addiert. Z. B. ist bekannt, dass die Temperatur in Gewässernähe im Winter höher ist als im freien Gelände, im Sommer jedoch niedriger. Entsprechend ist die Korrekturfunktion für die Temperatur bei der Geländeart „Gewässernähe“ im Winter positiv und im Sommer negativ. Manche Wetterelemente benötigen keine Korrektur, z.B. die Globalstrahlung in Gewässernähe.

Die Anpassung an die Höhe über NN und die Anpassung an die Geländeart können auch kombiniert werden, z. B. für eine Stadt in Gewässernähe. Zudem können die Anpassung an die Geländeart gewichtet werden mit Werten zwischen 0 und 1, z. B. für eine kleinere Stadt.

Datenbasis

Die Anpassungen wurden aus gemessenen Wetterdaten der 11 Referenzstandorte und von 63 weiteren Messstationen abgeleitet. Der Zeitraum der Messwerte umfasste die Jahre 2006 bis 2010.

Überprüfung der Anpassungen

Auch für die an Lokalklimata angepassten HRY wurden hygrothermische Simulationen der vier vorgestellten Bauteile durchgeführt und die Ergebnisse mit Simulationen mit gemessenen Wetterdaten verglichen. Bei Bedarf wurden diese Anpassungen der HRY an das jeweilige Lokalklima so modifiziert, dass sie für die Feuchtegehalte der Bauteile die gleichen oder geringfügig höhere Feuchtegehalte liefern als die Simulationen mit den gemessenen Wetterdaten.

Eine zweite Überprüfung erfolgte durch den Vergleich von statistischen Daten (Mittelwerte, Streuungen) der Wetterelemente in den angepassten HRY und den Messwerten des entsprechenden Standortes.

Verfügbarkeit

Der „Lokalklimagenerator“ ist auf der Website zum Programm WUFI als kostenloser Download verfügbar. Er kann auch Wetterdaten in anderem Format verarbeiten. Die Ausgabe erfolgt als Wetterdatendatei für WUFI ([Tanaka/Zirkelbach16] und [Tanaka17]).

Die Entwicklung der Hygrothermischen Referenzjahre und des Zusatzprogramms „Lokalklimagenerator“ werden in [Zirkelbach16] detailliert beschrieben

METEONORM-Wetterdaten

Die schweizerische Firma Meteotest bietet die Software „Meteonorm“ an. Damit können Klimadaten für beliebige Standorte weltweit erzeugt werden. In der Software sind Monatsmittelwerte der wichtigsten Klimagrößen für viele Standorte von Wetterstationen gespeichert. Diese stammen aus langfristig gemessenen Wetterdaten. Aus diesen Monatsmittelwerten werden die Wetterdatensätze erzeugt. Für Standorte ohne Wetterstation werden die Daten von umliegenden Wetterstationen interpoliert [IBP15].

Es können Wetterdaten für den Zeitraum 1981 – 1990 oder 1991 – 2010 oder für die Zukunft erzeugt werden. Letztere basieren auf IPCC-Klimaszenarien.

Beim Ausgabeformat kann zwischen verschiedenen zeitlichen Auflösungen und zwischen Formaten für viele verschiedenen Gebäude- und Solaranlagen-Simulationsprogrammen gewählt werden. Es besteht auch die Möglichkeit, nur Wetterdaten für einzelne Standorte zu erwerben.

In Mitteleuropa bringen fast ausschließlich Westwinde Regen. Eine Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) zeigt, dass die Korrelation zwischen Niederschlagsereignissen und Windgeschwindigkeit und Windrichtung in den mit Meteonorm erzeugten Wetterdaten geringer ist als in der Realität. In mitteleuropäischem Klima führt dazu, dass die Schlagregenbelastung gleichmäßiger über die Himmelsrichtungen verteilt und insgesamt zu gering ist. D. h. dass für ost-orientierte Wände die Schlagregenbelastung zu hoch ist, für west-orientierte Wände jedoch zu gering. [IBP15] zeigt dies am Beispiel von Holzkirchen. Zudem wird die lokale Topographie nicht berücksichtigt. Das IBP beurteilt die Meteonorm-Daten daher als unzureichend für hygrothermische Simulationen [IBP15].

Für flache und nur gering geneigte Dächer jedoch sollte diese Ungenauigkeit jedoch nur vernachlässigbare Auswirkungen haben.

Regendatensätze nach [DIN EN ISO 15927], Teil 3

DIN 4108-3 verweist im Anhang D, in dem auf hygrothermische Simulationen verwiesen wird, auch auf Regendatensätze nach [DIN EN ISO 15927-3].

In [DIN EN ISO 15927], Teil 3, ab S. 7 wird die Berechnung des Windfeldindex erklärt und ab S. 9 die Berechnung des Wandindex. Es handelt sich um Größen, die aus den Wetterdaten mehrerer Jahre berechnet werden, um die Gefährdung von senkrechten Fassaden durch Schlagregen zu beurteilen und vergleichen zu können. Als Datenquelle für die Berechnung dieser Indizes müssen Daten verwendet werden, die nach den festgelegten Verfahren der World Meteorological Organization (WMO) gemessen wurden. Bei den Windfeldindices und Wandindices handelt es sich nicht um stündliche Regendaten.

Wetterdaten für EnergyPlus

Für das Gebäude-Simulationsprogramm EnergyPlus sind zahlreiche Wetterdaten kostenfrei verfügbar. Diese enthalten jedoch keine Regendaten. [WUFI14], Webseite zu Wetterdaten.

Weitere Datenquellen

Auf der Website zum Programm WUFI [WUFI14] sind einige Websites mit weiteren Datenquellen für Wetterdaten verlinkt ([WUFI14], Webseite zu Wetterdaten). Diese Websites und die dort verfügbaren Wetterdaten wurden nicht recherchiert. Dieser Hinweis soll hier aber gegeben werden.

[Doggett14] beschreiben verschiedene verfügbare Wetterdaten für Standorte weltweit. Auch hier kann nur auf diese Informationsquelle hingewiesen werden.

Winddaten am Flughafen Nürnberg

Die Firma Wacker-Ingenieure war mit der strömungstechnischen Untersuchung des geplanten Membrandaches beauftragt. Hierfür wurde auch die Verteilung der Windrichtungen und der Windgeschwindigkeiten am nahegelegenen Flughafen Nürnberg untersucht (Entfernung 6,5 km Luftlinie zum Neubau der Sporthalle).

Am Standort der Sporthalle gemessene Wetterdaten

Im Zuge des Monitorings wurde an der Sporthalle in Fürth auch eine Wetterstation aufgebaut. Dort werden gemessen

- die Lufttemperatur,
- die relative Feuchte,
- die Windgeschwindigkeit,
- die Windrichtung und
- und die Solarstrahlung

Die bei der Sporthalle in Fürth aufgebaute Wetterstation umfasst jedoch nicht die Messung der atmosphärischen Wärmestrahlung (früher auch „atmosphärische Gegenstrahlung“ genannt) und keine Regenmengen.

Abschätzung der atmosphärischen Wärmestrahlung

Wenn mit gemessenen Wetterdaten ohne Angaben zur atmosphärischen Wärmestrahlung Simulationsrechnungen durchgeführt werden sollen, muss die atmosphärische Wärmestrahlung oder eine effektive Himmelstemperatur aus den Messwerten der anderen Größen abgeleitet werden. Die effektive Himmelstemperatur ist so definiert, als ob der Himmel ein schwarzer Strahler ist.

$$A = \sigma T_{sky,eff}^4$$

mit

A	=	Intensität der atmosphärischen Wärmestrahlung
$T_{sky,eff}$	=	effektive Himmelstemperatur [K]
σ	=	Stefan-Boltzmann-Konstante

D. h. der Himmel wird als schwarzer Strahler mit dieser effektiven Himmelstemperatur modelliert. Von daher brauchen bei der Berechnung der von einer Fläche absorbierten Strahlung keine Mehrfachreflexionen beachtet zu werden. Aber auch, wenn durch Messung oder Berechnung die atmosphärische Wärmestrahlung als Angabe vorhanden ist, werden in diesem Fall keine Mehrfachreflexionen berücksichtigt. Eine absorbierende Fläche ist im Vergleich zum Himmelsgewölbe immer so klein, dass nicht mit Mehrfachreflexionen zu rechnen ist, die dann wieder auf die betrachtete Fläche treffen.

[DIN 4710], Anhang A verweist auf [VDI 3789], Teil 2 wegen einer Formel zur Abschätzung der atmosphärischen Wärmestrahlung. Mit den Methoden, die langwellige Strahlung vom Himmel indirekt aus anderen Elementen von Wetterdatensätzen zu bestimmen setzen sich mehrere Literaturstellen auseinander: Dies sind z.B. [Finkenstein/Haeupl07] und [Eicker/Dalibard11]. Auch [Cekon15] befasst sich mit Modellen zur Berechnung der langwelligen Himmelsstrahlung.

[Eicker/Dalibard11] listen verschiedene Modelle für klaren und bewölkten Himmel auf. Für den „clearness index“ während der Nacht kann der Wert des vorhergehenden Nachmittages benutzt werden oder man interpoliert die Werte zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang, wie es bei der Erzeugung der neuen Hygrothermischen Referenzjahre geschah [Schoener/Zirkelbach16].

Die Möglichkeiten der Berechnung der atmosphärischen Gegenstrahlung wurden noch nicht umfassend recherchiert. Daher können an dieser Stelle nur diese Literaturhinweise gegeben werden.

Auswertung der verfügbaren Wetterdaten

Statistiken der Wetterdaten aus [DIN 4710]

Kombinationen von Lufttemperatur- und Luftfeuchtwerten

Die statistischen Häufigkeiten der Kombinationen der Temperatur- und Luftfeuchtwerte aus [DIN 4710] dienen zunächst dazu, sich einen Eindruck der Häufigkeiten von hohen und niedrigen Werten der relativen Luftfeuchte der Außenluft zu verschaffen.

Die Daten der Repräsentanzstation Passau, die am besten zum Standort der Sporthalle passen, zeigen, dass bei Außenlufttemperaturen unterhalb von 14 °C hohe Luftfeuchten von über ca. 90 % vorherrschen. Erst bei Lufttemperaturen über 16 °C werden geringere Luftfeuchtwerte häufiger als sehr hohe Luftfeuchten. In der Statistik wird nicht die Häufigkeit der relativen Luftfeuchte, sondern die der absoluten Feuchte angegeben. Daher kann die Häufigkeit der relativen Feuchte nur aus der Verteilung der Häufigkeiten der absoluten Feuchte abgeschätzt werden. Der genannte starke Trend zu hohen relativen Luftfeuchten ist aber für alle Temperaturen unterhalb von 15 °C deutlich ersichtlich.

Mit einer Jahresmitteltemperatur von ca. 10 °C liegt die Lufttemperatur im überwiegenden Teil der Zeit zwischen 0 °C und ca. 13 °C. Somit ist aus dieser Statistik auch ablesbar, dass die Werte der relativen Feuchte während der meisten Zeit im oberen Bereich über ca. 85 % liegen.

Die beschriebene Tendenz ändert sich im Laufe des Jahres nicht. D.h. auch, dass während der kühleren Jahreszeit die relative Feuchte der Außenluft fast durchgehend hohe Werte besitzt.

Im Temperaturbereich unterhalb von -15 °C lässt die Genauigkeit der Statistik keine Bewertung zu. Es ist zu vermuten, dass auch dann die Luftfeuchte meist sehr hoch ist. Solch tiefe Temperaturen herrschen jedoch selten in Deutschland, so dass dies nicht relevant ist.

Die folgende Tabelle gibt die Häufigkeiten der Kombinationen von Temperatur und Luftfeuchtwerten der Repräsentanzstation Passau wieder, wie sie in [DIN 4710], S. 46 angegeben werden. Die Temperatur wird in °C angegeben, die Luftfeuchte als Mischungsverhältnis in g / kg. Im Hauptfeld der Tabelle und in der rechten Spalte und der untersten Zeile werden die Häufigkeiten von Zehntel Stunden angegeben. Weitere Tabellen mit den Häufigkeiten für die Stunden tagsüber und für einzelne Monate sind in [DIN 4710] und im Beiblatt 1 zur [DIN 4710] enthalten. Die Datenbasis umfasst die Jahre 1961 bis 1990.

abs. Feuchte / Temperatur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Summe	
35											1											1
34											1	1										2
33											2	1	2									5
32							1	1	1	2	2	3	2	3	1							16
31				1			1	2	4	8	6	4	7	4	2							41
30							3	5	10	16	10	11	11	10	3	1						80
29					1	2	5	14	21	25	31	16	15	8	5	1						145
28					2	2	6	19	36	39	43	38	27	12	7	2						234
27					1	7	12	24	51	54	65	59	42	19	12	3						349
26					3	8	20	49	67	92	83	77	53	26	13	3	2	1			1	497
25				1	5	12	29	66	103	107	93	81	56	32	14	2	1	1				604
24				1	7	19	54	95	119	135	117	99	78	39	15	4	2					783
23				1	12	25	72	109	160	137	122	117	79	37	15	5	1					891
22				1	14	44	90	139	165	167	166	137	96	41	13	7	1					1081
21			1	4	23	61	133	168	192	190	156	150	110	50	23	8	1					1270
20			1	11	25	81	154	201	225	219	193	163	115	64	29	2						1483
19			3	15	49	108	167	216	237	202	246	196	160	82	13							1695
18		0	5	18	62	138	206	219	252	277	253	239	241	78	1							1989
17		2	6	28	71	151	213	256	284	294	302	386	286	10								2288
16		2	5	39	100	184	260	303	320	343	453	669	69									2747
15		2	13	56	122	213	293	336	374	469	931	352										3161
14		1	11	58	141	220	312	372	442	852	951	7										3368
13		1	16	62	144	227	337	445	690	1502	146											3570
12		3	15	80	159	260	394	541	1448	810												3710
11		3	27	111	191	298	448	849	1749	30												3706
10		3	43	141	207	367	533	1745	561													3601
9		5	47	146	261	395	790	1715														3361
8		8	52	181	316	492	1574	492														3115
7		11	70	196	374	779	1578															3007
6	1	13	80	248	524	1460	806															3131
5	1	14	111	314	688	1937	15															3079
4	1	19	109	421	1144	1485																3179
3	1	17	144	540	2248	356																3307
2	1	27	179	740	2608																	3556
1	1	34	253	1292	2385																	3966
0	1	43	306	3079	956																	4385
-0	1	44	358	2638																		3042
-1	0	60	585	2417																		3062
-2	0	80	893	1409																		2383
-3	0	102	1343	310																		1755
-4	1	116	1165																			1282
-5	1	153	815																			969
-6	1	173	588																			763
-7	1	249	406																			656
-8	3	415	96																			514
-9	2	401																				403
-10	2	323																				325
-11	3	249																				252
-12	2	232																				234
-13	1	172																				173
-14	7	143																				150
-15	9	91																				100
-16	44	16																				61
-17	47																					47
-18	28																					28
-19	18																					18
-20	16																					16
-21	8																					8
-22	6																					6
-23	5																					5
-24	2																					2
-25	1																					1
Summe	215	3228	7748	14560	12844	9328	8507	8382	7514	5972	4374	2805	1448	515	165	39	9	2			1	87656

Tabelle der Häufigkeiten von Kombinationen von Lufttemperatur- und Luftfechtewerten.

Daten aus [DIN 4710], S. 46, Datenbasis 1961 – 1990

Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Da die Ränder des Membrandaches der Sporthalle unterschiedlich weit offen sind ist auch die Verteilung der Windrichtungen von Interesse.

Die Statistiken zur Windgeschwindigkeit und der Häufigkeit der Windrichtungen lassen sich für die Repräsentanzstation Passau folgendermaßen zusammenfassen:

Bei den Windrichtungen sind die Häufigkeiten am größten aus Nordost und West. Auch recht häufig wehen die Winde aus Ost und Nordwest und Südwest. Diese drei westlichen Richtungen zusammengefasst ergeben eine etwas höhere Häufigkeit als die zwei genannten östlichen Richtungen.

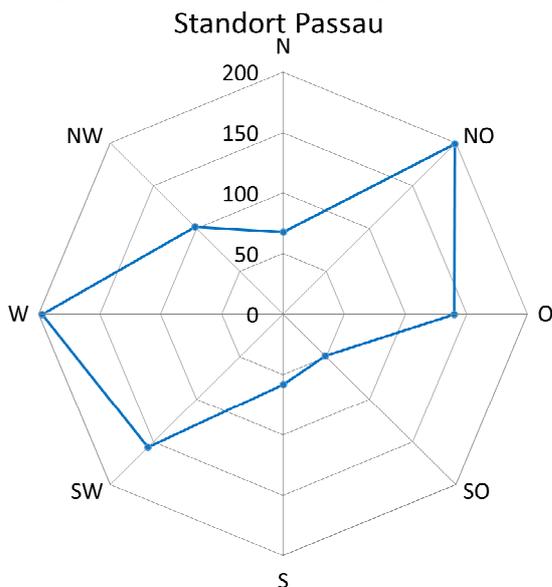
Dabei sind die mittleren Windgeschwindigkeiten bei den Westwinden höher als bei den Ostwinden. Daraus lässt sich schließen, dass der Wind aus Ost oder Nordost fast so oft weht wie aus westlicher Richtung, jedoch Westwinde tendenziell stärkere Winde sind als Ostwinde.

Die folgende Tabelle und die Diagramme geben die Häufigkeiten der Windrichtungen und die Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeiten in Passau wieder. Datenbasis sind wiederum die Jahre 1961 bis 1990. Datenquelle: [DIN 4710], S. 178 und 184.

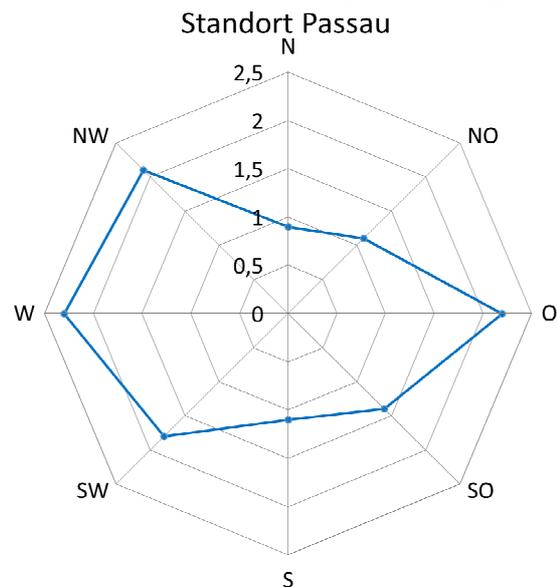
Windrichtung	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	alle
relative Häufigkeit [‰]	68	199	140	49	58	156	197	102	1000
mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0.9	1.1	2.2	1.4	1.1	1.8	2.3	2.1	1.7

Tabelle: Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten und mittlere Windgeschwindigkeiten
 Daten aus [DIN 4710], S. 184, Datenbasis 1961 – 1990

Häufigkeiten der Windrichtungen in Promille, Standort Passau



Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeiten, Standort Passau



Bilder 54 und 55: Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten und mittlere Windgeschwindigkeiten in Passau. Daten aus [DIN 4710], S. 184, Datenbasis 1961 – 1990

Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug in dem Zeitraum der Datenbasis lediglich 1,7 m/s. Dies ist verglichen mit anderen Angaben zur mittleren Windgeschwindigkeit in Deutschland relativ wenig. Z.B. gibt [Kuenzel94], S. 31 für die mittlere Windgeschwindigkeit in Deutschland 3,6 m/s an.

Windgeschwindigkeiten werden vom DWD immer 10 m über Grund gemessen.

Statistiken für den Zeitraum seit 1990

[DIN V 18599], Teil 10, S. 87 gibt monatliche und Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit der Repräsentanzstationen an. Am Standort Passau wurden im Zeitraum 1988 bis 2007 folgende mittleren Windgeschwindigkeiten gemessen.

Monat	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	2.40	2.59	3.65	2.54	1.84	2.15	1.78	1.53	1.82	1.47	2.13	2.64	2.21

Tabelle: Monatliche mittlere Windgeschwindigkeiten in Passau

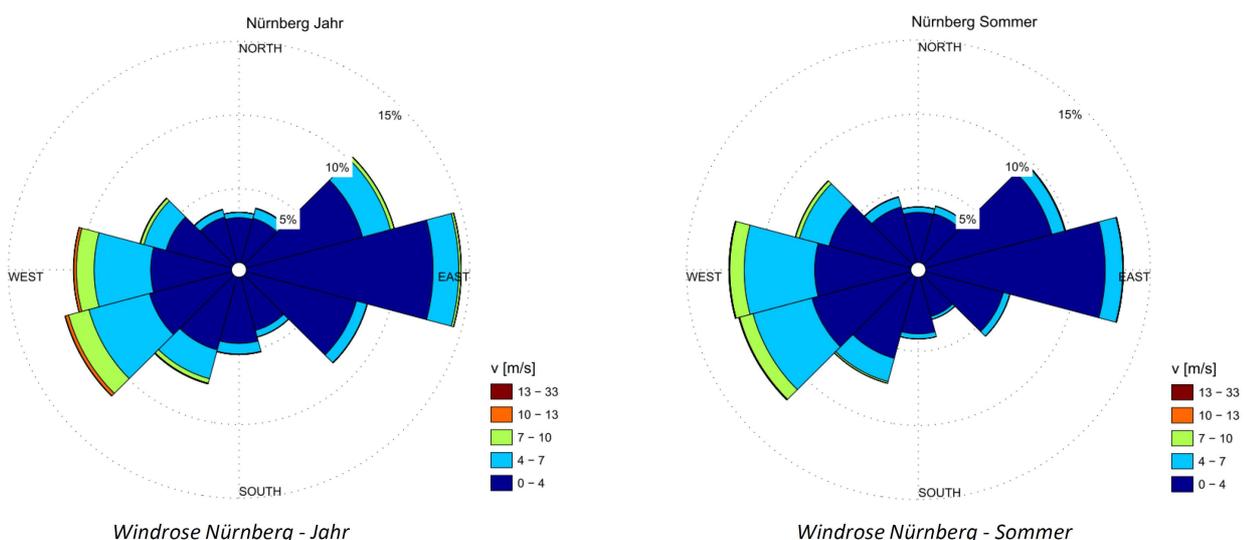
Daten aus [DIN V 18599], Teil 10, S. 87

Der Jahresmittelwert beträgt nun etwas mehr als im vorausgehenden Zeitraum vom 1961 bis 1990, liegt jedoch ebenfalls deutlich unter dem in [Kuenzel94] angegebenen Wert für Deutschland.

Winddaten am Flughafen Nürnberg

Die Firma Wacker-Ingenieure war mir der strömungstechnischen Untersuchung des geplanten Membrandaches beauftragt.

Um die Verteilungen der Windrichtungen und der Windgeschwindigkeiten zu ermitteln wurden Wetterdaten der in der Nähe liegenden Wetterstation am Nürnberger Flughafen ausgewertet (Entfernung 6,5 km Luftlinie zum Neubau der Sporthalle)



Windrose Nürnberg - Jahr

Windrose Nürnberg - Sommer

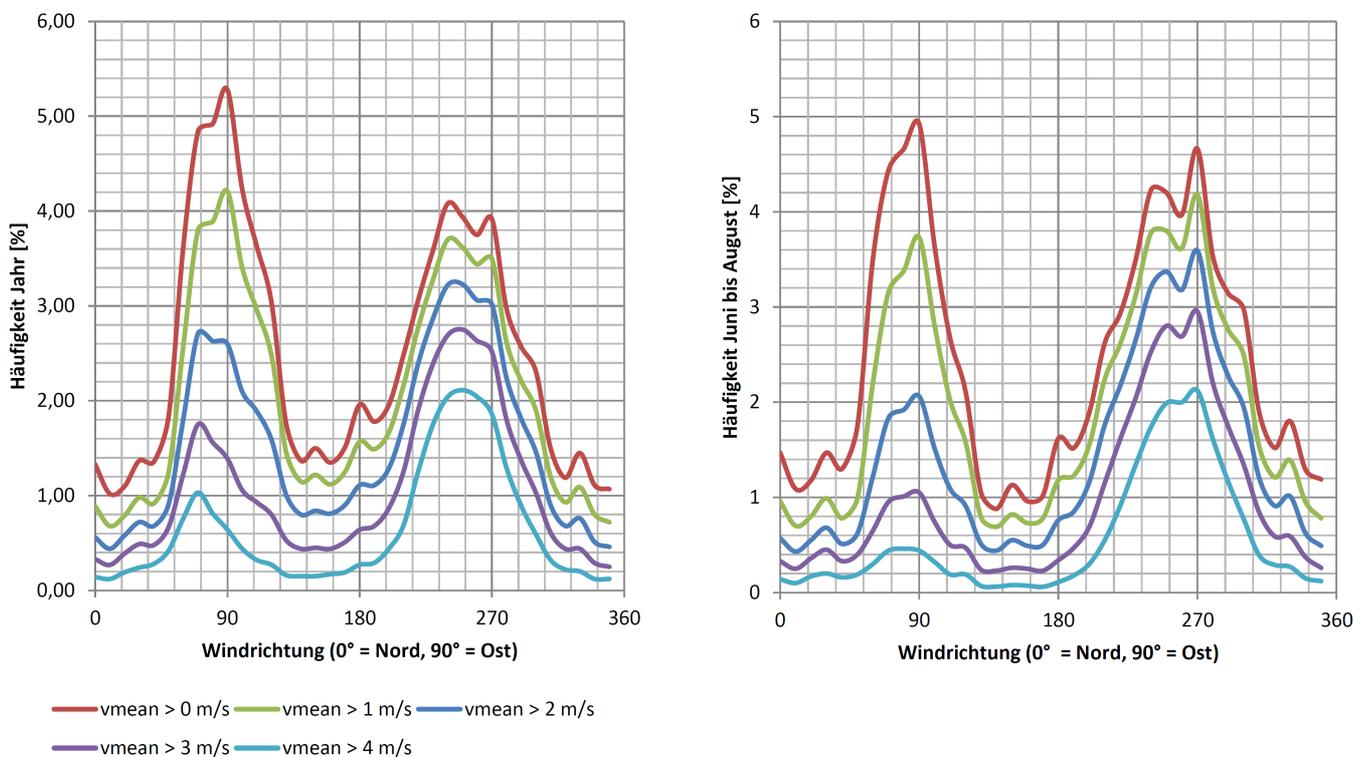
Bilder 56 und 57: Gemessene Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilungen am Flughafen Nürnberg.

Die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen und der Windgeschwindigkeiten für das Ganze Jahr und für die Sommermonate unterscheiden sich sehr wenig. Der bestehende Unterschied liegt wahrscheinlich auch unterhalb der statistischen Genauigkeit. Man kann also sagen, die Verteilungen sind im Sommer sehr ähnlich wie im ganzen Jahr.

Die Verteilung der Windrichtungen zeigt eine ausgeprägte Häufigkeit der Windrichtungen Ost und West. Dabei sind insgesamt die Windgeschwindigkeiten bei Ostwinden niedriger als bei Westwinden. Starke Winde mit Windgeschwindigkeiten über 7 m/s treten fast nur aus Westen auf.

Winde aus Osten sind zum überwiegendsten Teil mit geringen Windgeschwindigkeiten bis 4 m/s. Windgeschwindigkeiten über 7 m/s treten hier nur sehr selten auf.

Die nächsten Bilder zeigen nochmals die Verteilungen in einer anderen Darstellungsweise:



Bilder 58 und 59: Gemessene Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilungen am Flughafen Nürnberg.

Hieraus lässt sich die mittlere Windgeschwindigkeit abschätzen: Bei Westwind ist die Windgeschwindigkeit in ca. 50 % der Zeit größer als 4 m/s und in 50 % der Zeit kleiner als 4 m/s. Daraus wird eine mittlere Westwind-Windgeschwindigkeit von 4 m/s abgeschätzt.

Bei Ostwind ist die Windgeschwindigkeit nur selten größer als 4 m/s. Unterhalb von 4 m/s verteilen sich die Windgeschwindigkeiten recht gleichmäßig auf die Geschwindigkeits-Werte. Daraus wird für Ostwind eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2 m/s abgeschätzt. Aus der ungefähr gleich großen Häufigkeit von Ost- und Westwind ergibt sich dann eine Abschätzung für eine jährliche mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 3 m/s.

Dies trifft sich einigermaßen mit der Aussage von [Kuenzel94], S. 31, dass die mittlere Windgeschwindigkeit in Deutschland 3,6 m/s beträgt.

Testreferenzjahre von 2010

Für den Standort der Sporthalle in Fürth angepasste Testreferenzjahre

Nach der Einteilung der neuen Bundesrepublik in 15 Klimaregionen gehört Fürth zur Klimaregion 13, schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland. Die Repräsentanzstation dieser Klimaregion ist jetzt Mühldorf in einer Höhe über Meeresspiegel von 409 m. Aus diesem Testreferenzjahr wurden mit dem Umrechnungsprogramm an den Standort der Sporthalle angepasste Testreferenzjahre erzeugt. Hierzu sind Angaben zum Standort notwendig:

In Fürth beträgt die Höhe über Normal Null 294 m. Fürth hat ca. 120 000 Einwohner. Da Fürth mit Nürnberg praktisch ein zusammenhängendes Stadtgebiet bildet, erscheint es angebracht, als Einwohnerzahl die Größe von Nürnberg und Fürth zusammenzufassen und für die Lage der Sporthalle ein mittleres Stadtgebiet anzugeben. Die Einwohnerzahl von Nürnberg beträgt ca. 500 000 (Vergleiche Kapitel „Projektbeschreibung / Geographische Daten und Lageplan“).

Mit diesen Daten:

Stadtgebiet = „Mittleres Stadtgebiet“

Einwohnerzahl = 620000

geographische Höhe des Standortes = 294 m

wurden aus den Datensätzen für die Region 13 mehrere Datensätze erzeugt:

Dabei ist jedoch zu beachten, dass für die Repräsentanzstation Mühldorf keine Messwerte der Solarstrahlung vorlagen. Die Solarstrahlungsdaten für die Klimaregion 13 wurden berechnet und sind mit dem beschriebenen Fehler behaftet. (Vergleiche hierzu Kapitel „Außenklima / Wetterdaten / Testreferenzjahre von 2010 / Testreferenzjahre 2010, Solarstrahlung und atmosphärische Gegenstrahlung“.)

Testreferenzjahre und Feuchtereferenzjahre aus WUFI

Für die Simulationen der Wärme- und Feuchteverhältnisse des Membrandaches waren Wetterdaten notwendig, die auch Regendaten enthalten. Es konnte also nur eines der in WUFI pro enthaltenen Referenzjahre mit Regendaten verwendet werden. Die neuen Hygrothermischen Referenzjahre des Programms WUFI pro 6.0 wurden erst nach der Bearbeitung des Projektteils mit den hygrothermischen Simulationen veröffentlicht. Daher konnten sie für dieses Projekt nicht mehr berücksichtigt werden. So konnte nur eines der in WUFI pro 5.3 enthaltenen Referenzjahre, das auch Regendaten enthält (Feuchtereferenzjahr), verwendet werden. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Auswahl der verwendeten Wetterdaten beschrieben.

Auswahl des verwendeten Feuchtereferenzjahres

Von den in WUFI vorhandenen Feuchtereferenzjahren mit Regendaten stehen in der TRY-Region 13 mehrere Datensätze zur Verfügung: Würzburg, Augsburg, München, Holzkirchen und Friedrichshafen. Von diesen kamen am ehesten die Standorte Augsburg und Würzburg in Betracht. Es wurde der Datensatz für Würzburg ausgewählt, der auch räumlich am nächsten liegt. Die Standort- und Klimadaten von Würzburg passen besser zum Standort der Sporthalle in Fürth, wie im Folgenden dargelegt wird.

Vergleich der Lage der Standorte

Stadt	Höhe über NN [m] in WUFI-5	Höhe über NN [m] in Wikipedia-Eintrag zur Stadt	Entfernung von Fürth [km] (Luftlinie)
Augsburg	477	494	ca. 124
Fürth		294	0
Würzburg	259	177	ca. 98

Tabelle: Höhe über NN für die drei Städte

Das folgende Bild zeigt eine topografische Karte mit den Regionen für die deutschen Testreferenzjahre. Zusätzlich sind die Städte Fürth, Augsburg und Würzburg eingetragen.

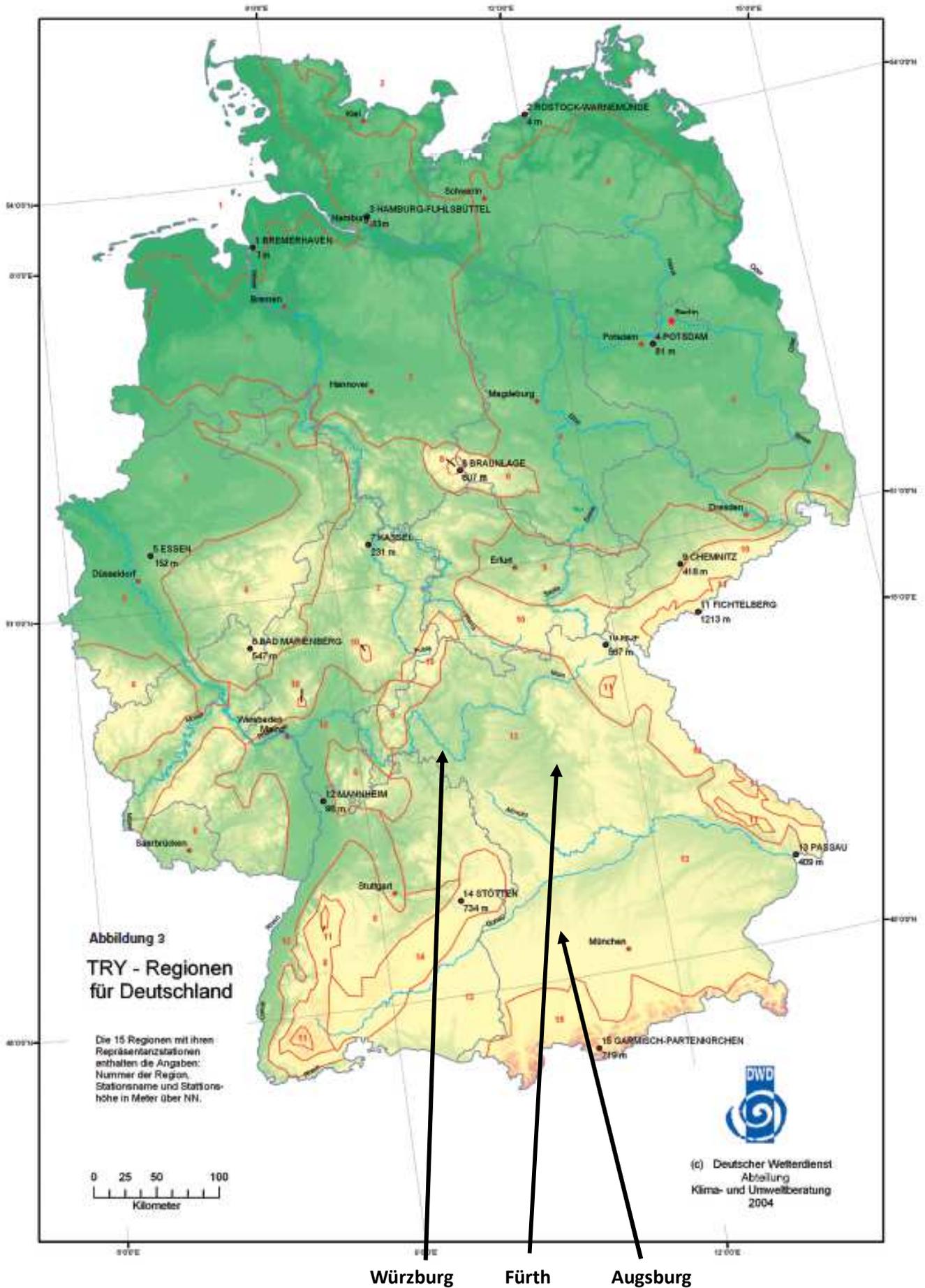


Bild 60: Regionen für die Testreferenzjahre in Deutschland. Quelle: [DWD-TRY11]

Vergleich der Solarstrahlung der Standorte



Bild 61: Jahressummen der Solarstrahlung (Globalstrahlung) auf die Horizontale.

Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland

Basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz

Mittlere Monatssummen, Zeitraum: Januar 1981 - 2010

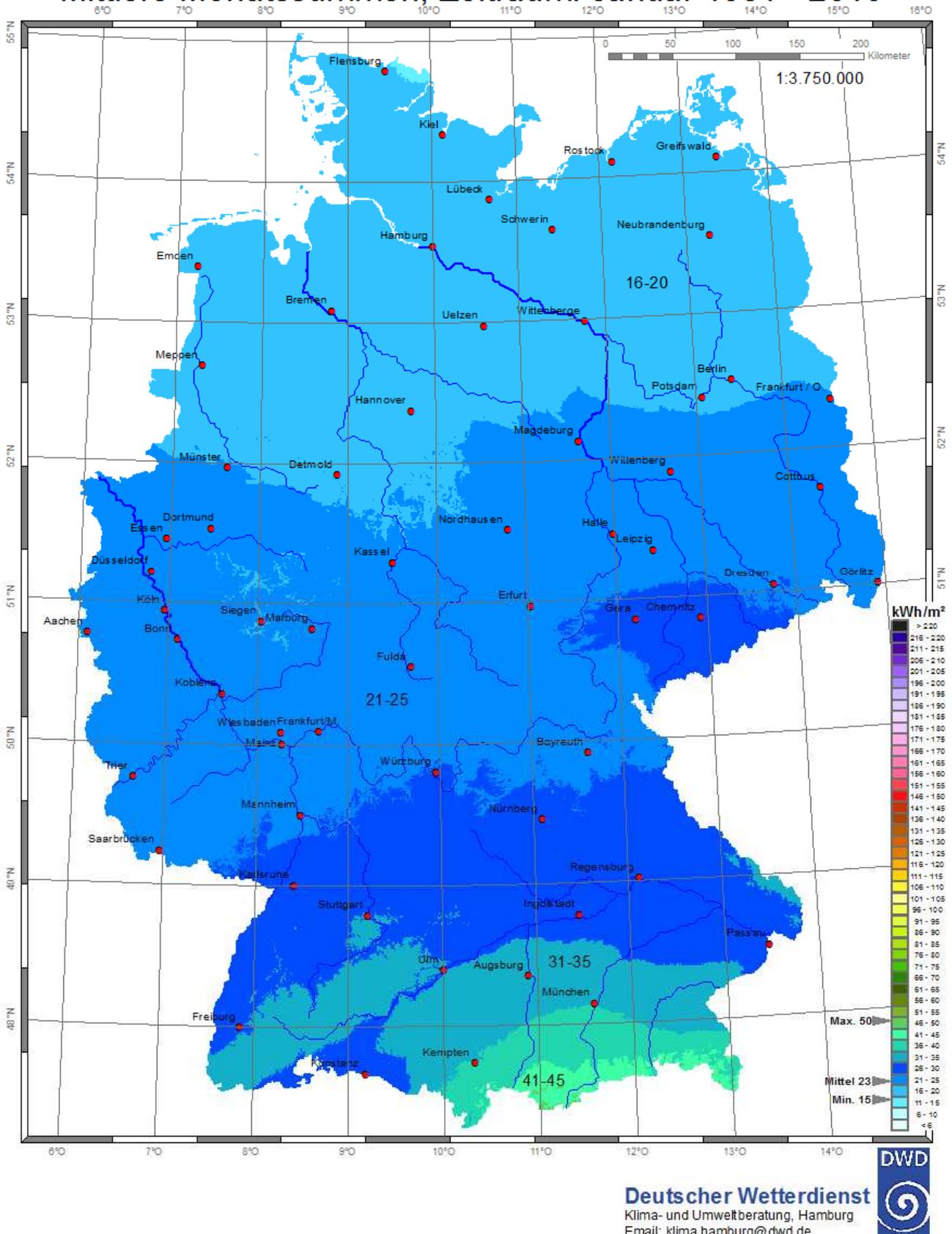


Bild 62: Jahressummen der Solarstrahlung (Globalstrahlung) auf die Horizontale. Quelle: [DWD16]

Die beiden vorigen Bilder zeigen für Deutschland die Verteilung der jährlichen Globalstrahlungssummen auf die Horizontale. Auch beim Kriterium der solaren Einstrahlung passen die Klimadaten von Würzburg besser zum Standort Fürth als die Klimadaten von Augsburg.

Vergleich der Temperaturen der Standorte

Zum Vergleich der Temperaturen der Standorte konnten nicht genügend Zahlenwerte gefunden werden. Auf der Website [PVGIS08] stehen jedoch auch Karten mit den mittleren Monatstemperaturen im Juli und im Januar zur Verfügung. Soweit aus diesen Karten ersichtlich ist, unterscheiden sich diese mittleren Monatstemperaturen nur unwesentlich voneinander. Die untenstehenden Bilder zeigen den Ausschnitt für Deutschland aus der jeweiligen Karte für Januar und Juli.

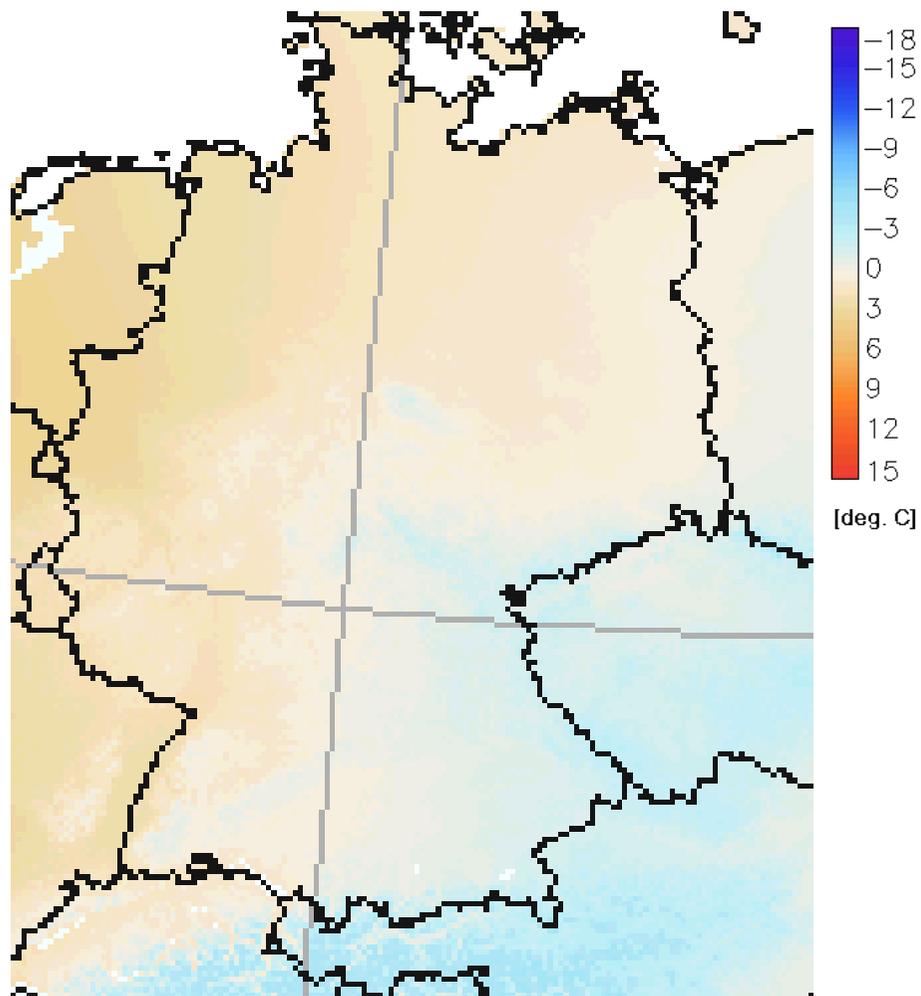


Bild 63: Mittlere Tagestemperatur im Januar
Langjähriger Mittelwert (1995 – 2003)

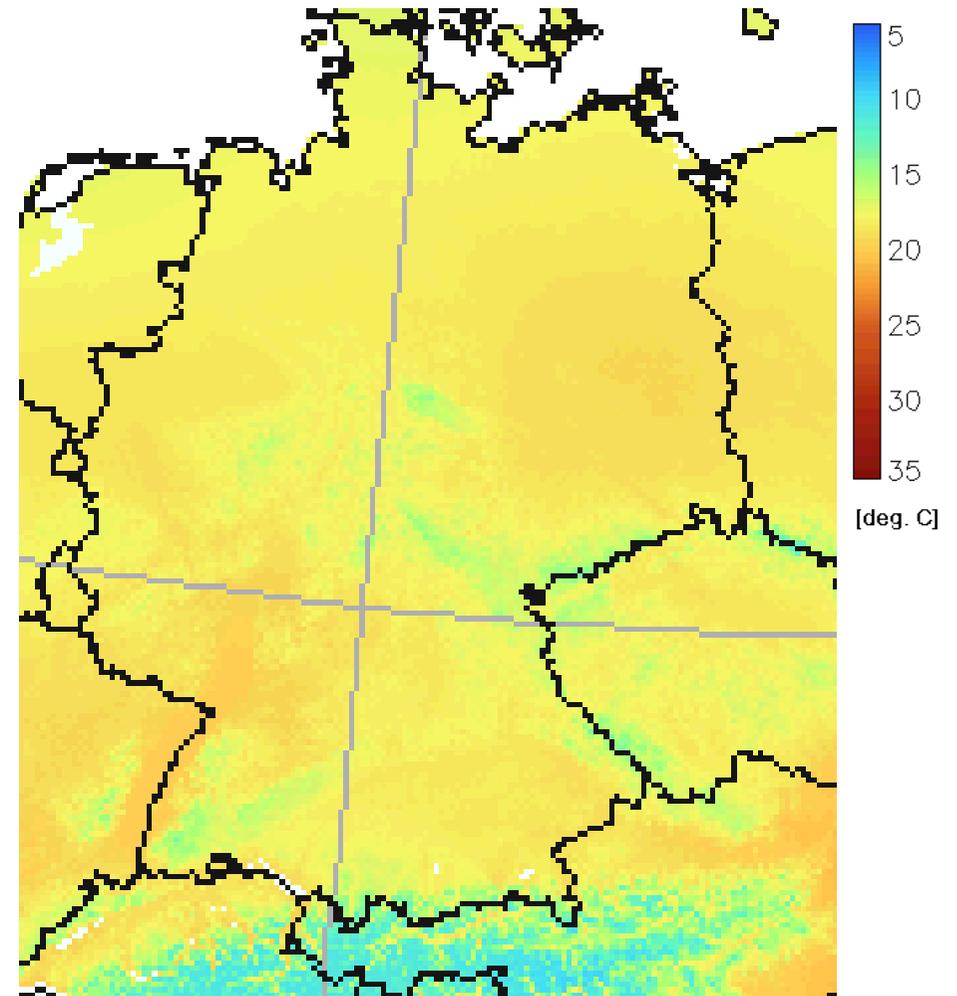
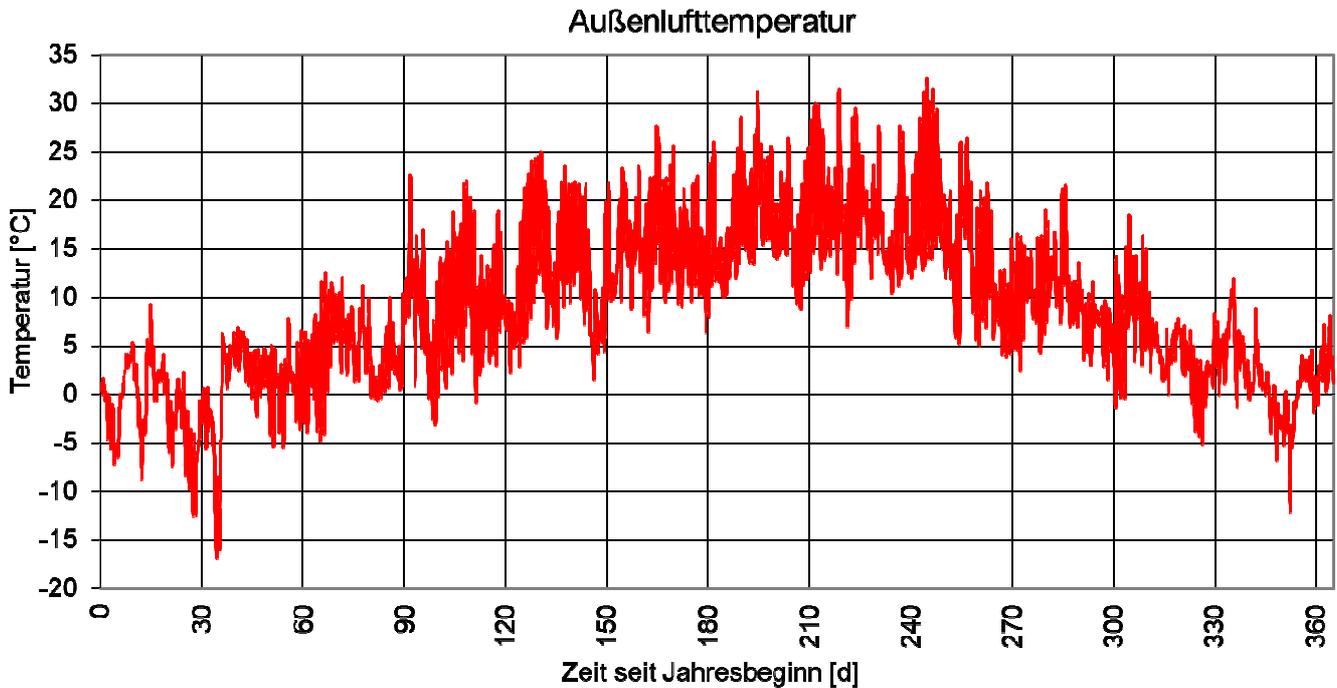


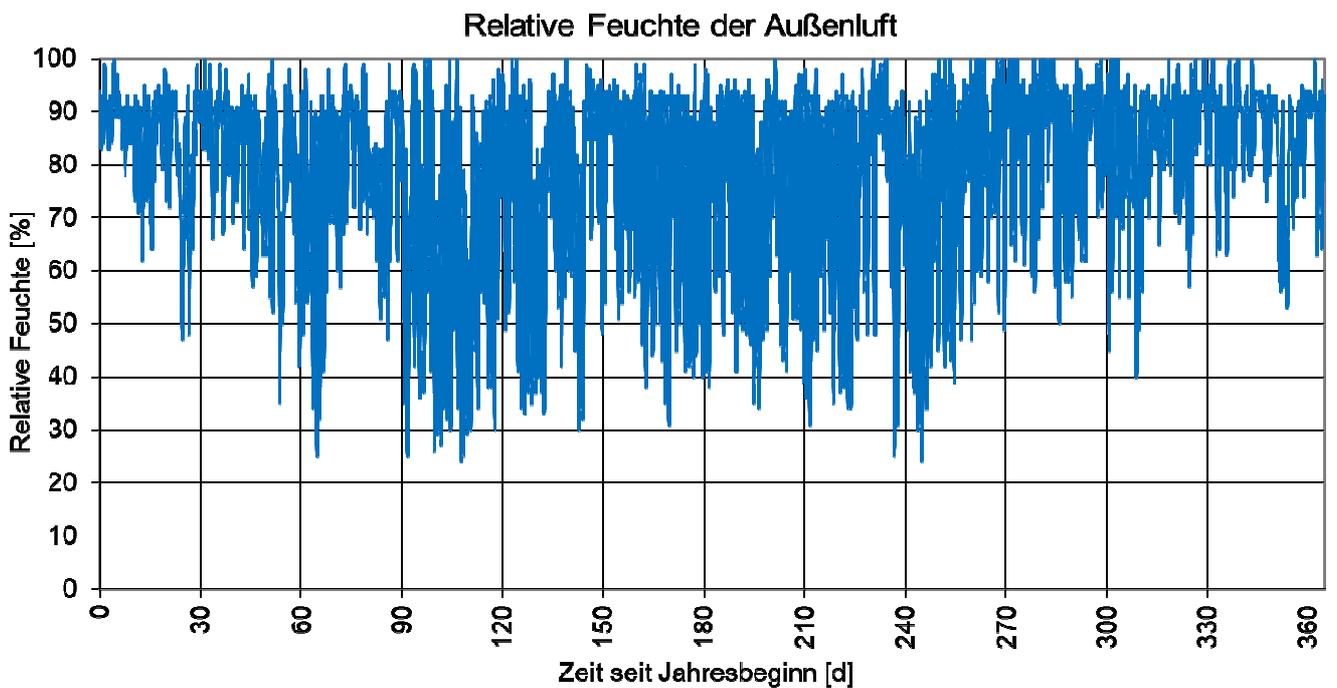
Bild 64: Mittlere Tagestemperatur im Juli
Langjähriger Mittelwert (1995 – 2003)

Auswahl des verwendeten Feuchtereferenzjahres

Aufgrund des Vergleichs der geographische Lage, der Solarstrahlung und der Temperaturen wurde beschlossen, für Simulationen den in WUFI vorhandenen Wetterdatensatz für Würzburg zu verwenden. Die Bilder stellen die wichtigsten Größen des ausgewählten Wetterdatensatzes dar.



Bilder 65: Feuchtereferenzjahr-Wetterdaten für Würzburg, Lufttemperatur



Bilder 65: Feuchtereferenzjahr-Wetterdaten für Würzburg, relative Feuchte der Außenluft

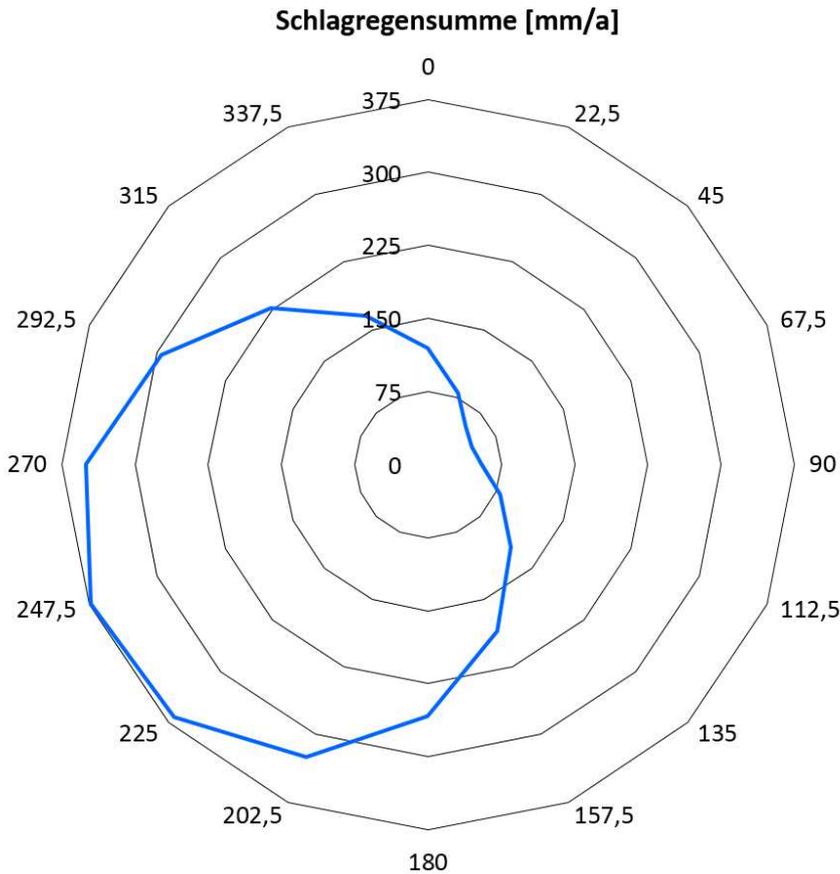


Bild 67: Feuchtereferenzjahr-Wetterdaten für Würzburg, Schlagregenbelastung

Im rechten Teil des Bildes wird die Schlagregensumme in Abhängigkeit von der Fassadenorientierung gezeigt. Weiter oben wurden die Windrichtungsverteilung und die mittleren Windgeschwindigkeiten betrachtet. Die hauptsächlichlichen Windrichtungen Südwest bis Nordwest und Ost bis Nordost und die höheren Windgeschwindigkeiten aus Westen zusammen mit der bekannten Tatsache, dass aufgrund der geographischen Lage Deutschlands vor Allem Westwinde Regen bringen, führt zu der gezeigten Verteilung des Schlagregens.

Jedoch gibt es die Möglichkeit, bei der Ausgabe der Berechnungsergebnisse in eine ASCII-Datei auch die Wetterdaten mit auszugeben. Lediglich die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung können nicht ausgegeben werden. Wird bei der Berechnung für die äußere Bauteiloberfläche ein windabhängiger Wärmeübergangskoeffizient ausgewählt, so kann aus diesem auf die Windgeschwindigkeit geschlossen werden.

Anpassung an den Standort und den bisherigen Klimawandel.

Um den Einfluss von besonders warmen oder kalten Jahren untersuchen zu können, stellt WUFI die Möglichkeit zur Verfügung, die Temperatur eines Datensatzes um einen konstanten Betrag nach oben oder nach unten zu verschieben. [DIN EN 15026] schlägt eine Verschiebung von ± 2 K vor, um warme oder kühle Jahre, wie sie ca. einmal in zehn Jahren vorkommen, zu simulieren.

Hier wurde diese Möglichkeit genutzt, um die in WUFI vorhandenen Wetterdaten, die auf den Wetterdaten von 1961 bis 1984 beruhen, an die Klimaveränderung und den vom Referenzstandort abweichenden Standort der Sporthalle in abweichender Höhenlage und in städtischem Umfeld anzupassen. Die Lufttemperatur wurde um einen konstanten Betrag erhöht, so dass die mittlere Jahrestemperatur des Wetterdatensatzes der mittleren Jahrestemperatur des an den Standort der Sporthalle Fürth angepassten Testreferenzjahres von 2010 entspricht.

Aus dem in WUFI enthaltenen Wetterdatensatz für Würzburg ergibt sich ein Jahresmittel der Außenlufttemperatur von $8,99$ °C.

Aus dem für den Standort in Fürth umgerechneten neuen Testreferenzjahr-Datensatz für ein normales Jahr mit aktuellem Klima (vergleiche Kapitel „Für den Standort der Sporthalle in Fürth angepasste Testreferenzjahre“) ergibt sich ein Jahresmittel der Außenlufttemperatur von $10,17$ °C.

Daraus ergibt sich eine Differenz von $1,18$ K im Vergleich der beiden Wetterdatensätze. Mit einer konstanten Erhöhung der Außenlufttemperatur von $1,18$ K wurden entsprechende Datensätze erzeugt: Diese werden im Kapitel „Wetterdatensätze für Simulationen“ im Einzelnen beschrieben.

Der Klimawandel hat an dieser Temperaturverschiebung einen Anteil von $0,7$ K. [DIN 4710], S. 77 gibt für die Jahre 1971 bis 1990 den Mittelwert der Außenlufttemperatur am Referenzstandort der Klimaregion 13, Passau, mit $7,9$ °C an. In den Jahren 1988 bis 2007 betrug der Jahresmittelwert dort $8,6$ °C [DIN V 18599], Teil 10. S. 86.

Bei der Verschiebung der Außenlufttemperatur werden die Werte aller anderen Größen unverändert übernommen.

Dies gilt insbesondere auch für die relative Luftfeuchte.

Bei einer Erhöhung der Lufttemperatur in den Wetterdaten, aber unveränderten Werten für die relative Feuchte, bedeutet dies, dass die daraus berechneten Werte der absoluten Feuchte und des Wasserdampfdruckes erhöht sind gegenüber den ursprünglichen Daten. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass der Klimawandel auch in der Realität mit einem Anstieg des absoluten Feuchtegehaltes der Außenluft verbunden ist [Kleber17], S 234 und teilweise auch von diesem verursacht wird [Badea09]. Die höheren Werte der absoluten Feuchte und des Wasserdampfdruckes können in Simulationen zu einer Erhöhung der Feuchtebelastung von Bauteilen führen im Vergleich zu Simulationen mit dem ursprünglichen Feuchtereferenzjahr.

Die Übernahme der Werte gilt auch für die Himmelstemperatur bzw. die vom Himmel abgegebene und auf die betrachtete Fläche auftreffende langwellige Strahlung. Jedoch ist zu vermuten, dass bei einem Anstieg der Lufttemperatur durch den Klimawandel auch die Himmelstemperatur ansteigt.

Die Tatsache, dass die Himmelstemperatur bzw. die langwellige Abstrahlung vom Himmel bei einer Erhöhung der Lufttemperatur in den Wetterdaten unverändert bleibt, bedeutet für feuchtetechnische Simulationen, dass der Temperaturunterschied zwischen der Luft und dem Himmel größer wird und somit auch die nächtliche Unterkühlung von Außenbauteilen etwas zunimmt. In Bezug auf die Beurteilung von Bauteilen führt dies zu einer leichten Überschätzung der Feuchtebelastung der Bauteile durch Kondensation.

Anpassung an den Standort und den zukünftigen Klimawandel.

Die Testreferenzjahre von 2010 beinhalten auch Datensätze, die den voraussichtlichen Klimawandel bis zum Jahr 2035 berücksichtigen.

Aus dem für den Standort in Fürth umgerechneten neuen Testreferenzjahr-Datensatz für ein normales Jahr mit zukünftigem Klima (vergleiche Kapitel „Für den Standort der Sporthalle in Fürth angepasste Testreferenzjahre“) ergibt sich ein Jahresmittel der Außenlufttemperatur von 11,47 °C.

Daraus ergibt sich eine Differenz von 2,48 K im Vergleich der beiden Wetterdatensätze.

Mit einer konstanten Erhöhung der Außenlufttemperatur von 2,48 K wurden wiederum entsprechende Datensätze erzeugt, die im Kapitel „Wetterdatensätze für Simulationen“ im Einzelnen beschrieben werden.

Anpassung an die Orientierung und Neigung des Daches

WUFI rechnet die Einstrahlungswerte der kurzwelligen Strahlung der Sonne und der langwelligen Strahlung vom Himmel, die im Wetterdatensatz für eine horizontale Fläche angegeben sind, um in die Werte für die in den Eingabedialogen des Programms angegebene Orientierung und Neigung des Bauteiles. Das Dach der Sporthalle ist gewölbt und hat somit verschiedenen Neigungen. Da die Dachkante nach Nordosten etwas höher liegt als die nach Südwesten ergibt dies eine mittlere Dachneigung von 3,8 °. Daher wurde die Neigung des Bauteils mit 4 ° angegeben. Die Orientierung des Daches beträgt 225 °.

Zur Definition der Orientierung siehe Anhang A.

In den erzeugten Wetterdatensätzen für die Simulationen wurde diese Umrechnung der Solarstrahlung auf die Orientierung und mittlere Neigung des Membrandaches bereits vorgenommen.

Klima im Membrandachzwischenraum

Der Membrandachzwischenraum zwischen der äußeren Membran und dem inneren Dachaufbau, bestehend aus innerer Membran, Wärmedämmung und Unterspannbahn, ist an allen Seiten offen. An drei Seiten wird er durch ein Lochblech vor Vogelflug geschützt. Die Löcher des Lochbleches haben Durchmesser von 2,5 cm. Ihr Flächenanteil beträgt 51 %.



Bild 68: Lochblech

In Windkanalmessungen wurde an einem Gebäudemodell der Winddruck auf die Stirnfläche des Membrandaches gemessen [Niemann&Partner10]. Mit diesen Werten wurden Strömungssimulationen durchgeführt, um die Luftgeschwindigkeiten im Membrandachzwischenraum zu berechnen [Wacker-Ingenieure14]. Diese Simulationen wurden für zwei verschiedene Vogelschutzgitter und zwei verschiedene Lochbleche durchgeführt. Die Anströmgeschwindigkeit betrug jeweils 0,85 m/s. Die Anströmrichtungen waren senkrecht zur Stirnfläche und im Winkel von 45 °.

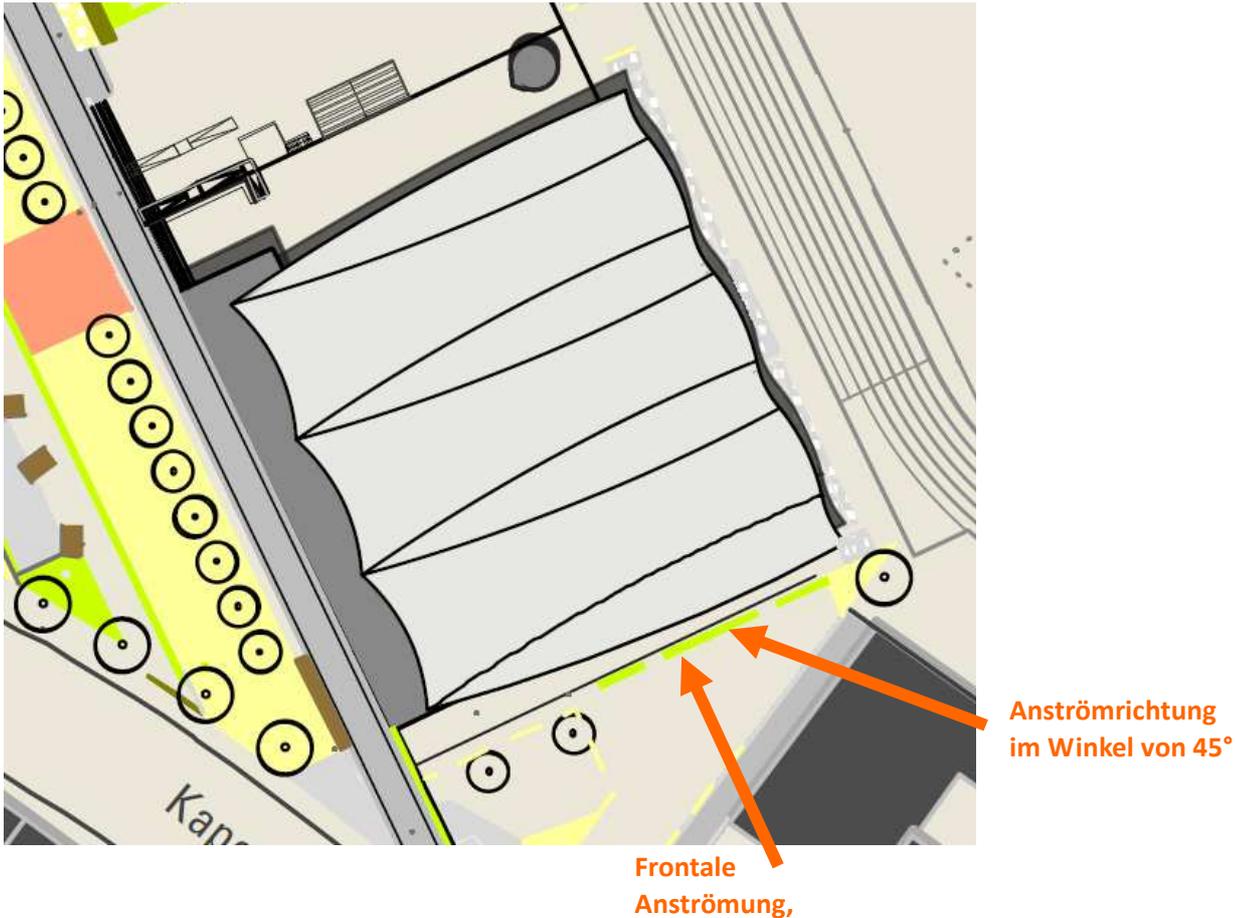


Bild 69: Ausschnitt aus Lageplan der Sporthalle

Für das verwendete Lochblech mit 3 cm großen Löchern wurden Luftwechselraten von $19,3 \text{ m}^3 / \text{s}$ und $16,8 \text{ m}^3 / \text{s}$ berechnet für frontale Anströmung und Anströmung im 45° -Winkel. Mit der Querschnittsfläche des Membrandaches von $79,97 \text{ m}^2$ ergeben sich daraus mittlere Luftgeschwindigkeiten von $0,24 \text{ m/s}$ bzw. $0,21 \text{ m/s}$.

Anströmrichtung	Windgeschwindigkeit [m/s]	Druckverlustbeiwert [-]	Querschnittsfläche [m ²]	Luftwechselrate [m ³ /s]	mittlere Luftgeschwindigkeit [m/s]	mittlere Luftgeschwindigkeit als Anteil der Anströmgeschwindigkeit [%]
senkrecht	0.85	4.2	79.97	19.3	0.24	28.4
45°	0.85	4.2	79.97	16.8	0.21	24.7

Tabelle: Abschätzung der mittleren Luftgeschwindigkeit im Membrandach-Zwischenraum. Datenquelle: [Wacker-Ingenieure14], S. 22 und eigene Berechnungen

Auf welche Weise die Luftgeschwindigkeit im Membrandachzwischenraum vom Anströmwinkel abhängt, kann aus diesen Angaben nicht abgeleitet werden. Daher wurde für Berechnungen, bei denen die Luftgeschwindigkeit eine notwendige Eingabegröße ist, diese als jeweils ein Viertel der Windgeschwindigkeit angenommen, entsprechend einem Anströmwinkel von 45° .

Für Simulationen des inneren Dachaufbaus am Membrandachrand, bei denen auch der Eintrag von Regen und Schnee berücksichtigt werden soll, stellt sich die Frage, wie die Regen- und Schneemenge berechnet werden kann. Das Lochblech hält durch seinen Öffnungsgrad von ca. 50 % die Hälfte des darauf auftreffenden Niederschlages ab.

Der Überstand der äußeren Membran hält ebenfalls einen Teil des Niederschlages ab. Wie viel vom Überstand abgehalten wird, hängt jedoch vom Anströmwinkel und von der Windgeschwindigkeit ab. Zudem variieren die Breite des Überstandes und der Abstand zwischen Überstand und innerem Dachaufbau.

Für eine Maximalabschätzung des Schnee- und Regeneintrages kann daher die Hälfte des Niederschlages auf die horizontale Fläche angesetzt werden.

Innenraumklima

Für Simulationen des hygrothermischen Bauteilverhaltens werden auch Angaben über das Innenraumklima benötigt, je nach Art der Simulation müssen diese als stündliche Werte vorliegen.

Methoden zur Ermittlung des Raumklimas

[WTA_6-2-14/D], S. 18 und [DIN EN 15026], S. 12 nennen verschiedenen Möglichkeiten, Daten für das Raumklima zu erhalten. Diese Möglichkeiten sollten mit der Präferenz entsprechend folgender Liste genutzt werden:

- Es können Messwerte, z.B. aus Messungen in ähnlichen Gebäuden mit gleicher Nutzung in ähnlichem Klima, verwendet werden, sofern solche Messwerte verfügbar sind.
- Werden hygrothermische Simulationen des ganzen Gebäudes durchgeführt so ergeben sich die Werte des Raumklimas im Laufe der Simulation.
- Bei vollklimatisierten Gebäuden können in den Simulationen die Sollwerte der raumluft-technischen Anlagen für das Innenraumklima verwendet werden.
- Aus der Feuchteentstehung im Raum, dem Luftvolumenstrom und den Außenluftwerten kann die Raumlufteuchtigkeit berechnet werden.

In vielen Fällen jedoch werden solche Daten nicht zu Verfügung stehen. Für diesen Fall gibt es weitere Ansätze, Daten für das anzunehmende Raumklima, z.B. in Sporthallen, aus anderen Größen abzuleiten.

Soll- und Auslegungstemperatur in Sporthallen

[DIN 18032-1] gibt allgemeine Anforderungen an Sporthallen an. Sie nennt auf S. 23 / 24 für die Raumtemperatur in der Halle und den Sporträumen

Empfohlene Temperatur	17 °C
Auslegungstemperatur für die Heizung	20 °C
Allgemeiner Frostschutz	>10 °C

Das empfohlene Raumklima in den Nebenräumen (Umkleiden, Duschen etc.) ist im Falle der Sporthalle Fürth nicht von Interesse, da diese nicht unter dem Membrandach liegen.

[DIN V 18599], Teil 10, Anhang A gibt Nutzungsprofile an, die für die Erstellung von Energieausweisen verwendet werden können, falls keine konkreteren Angaben für das jeweilige Gebäude und dessen Nutzungszonen vorliegen.

Tabelle A.33, S. 65 für Turnhallen und Tabelle A.25 für Zuschauerbereiche nennen

- Raum-Solltemperatur im Heizfall 21 °C
- Raum-Solltemperatur im Kühlfall 24 °C
- Mindesttemperatur im Heizfall 20 °C
- Maximaltemperatur im Kühlfall 26 °C

Sinusverlauf der Temperatur und relativen Feuchte

WUFI stellt die Möglichkeit zur Verfügung, beim Innenraumklima für die Temperatur und die relative Luftfeuchte jeweils einen Sinusverlauf vorzugeben, entsprechend der inzwischen ersetzten [WTA_6-2-01/D]. Die Parameter der Sinuskurven können vom Nutzer frei gewählt werden oder er kann eine der vordefinierten Parametersätze auswählen für niedrige, normale oder hohe Feuchtelast.

	Temperatur			relative Feuchte		
	Mittelwert	Amplitude	Tag des	Mittelwert	Amplitude	Tag des
	[°C]	[K]	Maximums	[%]	[%]	Maximums
niedrige Feuchtelast	21	1	3. Juni	45	15	16. August
normale Feuchtelast	21	1	3. Juni	50	10	16. August
hohe Feuchtelast	21	1	3. Juni	55	5	16. August

Tabelle: In WUFI vorgegebene Parameter für die Sinuskurven für Temperatur und Luftfeuchte in Innenräumen.

In [WTA_6-2-01/D] werden für die Zeitpunkte des Maximums und des Minimums lediglich Juni und August angegeben.

Die relative Luftfeuchte im Sommer bleibt also in diesen drei Szenarien jeweils gleich, nur im Winter unterscheidet sich die relative Luftfeuchte im Raum.

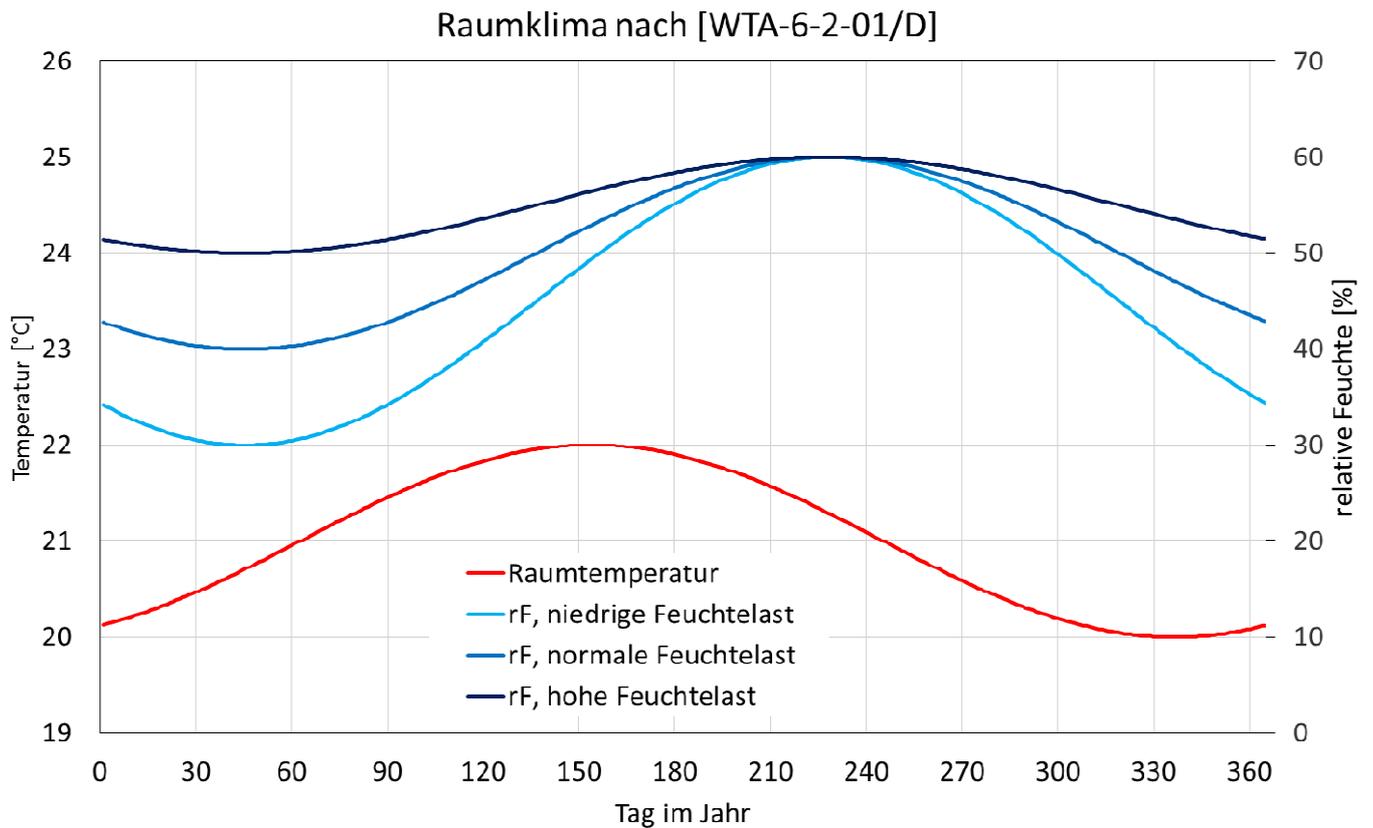


Bild 70: Sinusverläufe der Temperatur und Luftfeuchte des Innenraumklimas mit den in WUFI und [WTA-6-2-01/D] vorgegebenen Parametern

Das Merkblatt [WTA_6-2-01/D] wurde im Jahr 2013 ersetzt durch [WTA_E-6-2] und dann durch [WTA_6-2-14/D], die diesen Vorschlag für die Annahmen der Raumluftkonditionen nicht mehr enthalten.

Raumklima nach [DIN EN 15026] und [WTA_6-2-14/D]

Nach [WTA_6-2-14/D] und nach [DIN EN 15026] kann für Wohnungen und wohnähnlich genutzte Gebäude, z. B. Büros, das Innenraumklima aus der täglichen mittleren Außentemperatur abgeleitet werden.

Dabei gibt [WTA_6-2-14/D] drei Belegungsdichten an und eine Kurve für normale Belegung mit Sicherheitszuschlag von 5 %. [DIN EN 15026] gibt zur zwei Belegungsdichten (normal und hoch, durchgezogene Linien im Diagramm) an.

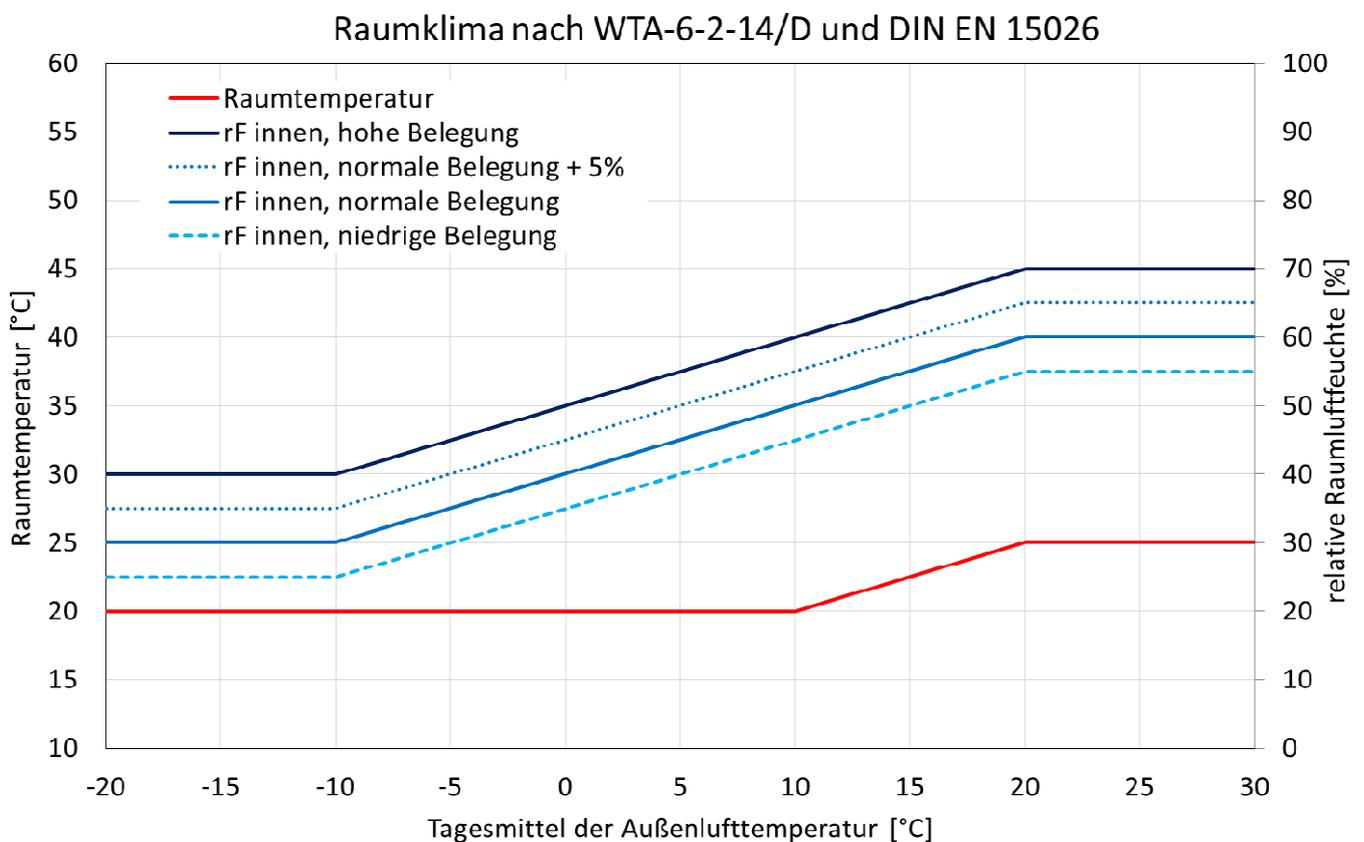


Bild 71: Abhängigkeit des Innenklimas vom Außenklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026]

Die Norm spezifiziert dabei nicht, wie die tägliche mittlere Außentemperatur zu berechnen ist. In WUFI wird hierzu der Mittelwert aus der aktuellen Stunde, den 11 vorhergehenden Stunden und eine Hälfte der wiederum vorhergehenden Stunde, den 11 auf die aktuelle Stunde folgenden Stunden und die Hälfte der wiederum nachfolgenden Stunde gemittelt.

Die Bilder 72 und 73 zeigen die Innenklimata, wie sie auch von WUFI berechnet werden,

- berechnet nach [DIN EN 15026]
- für normale und hohe Feuchtelast
- abgeleitet aus dem Feuchtereferenzjahr 1986 für Würzburg (Datenbasis 1961 – 1990)

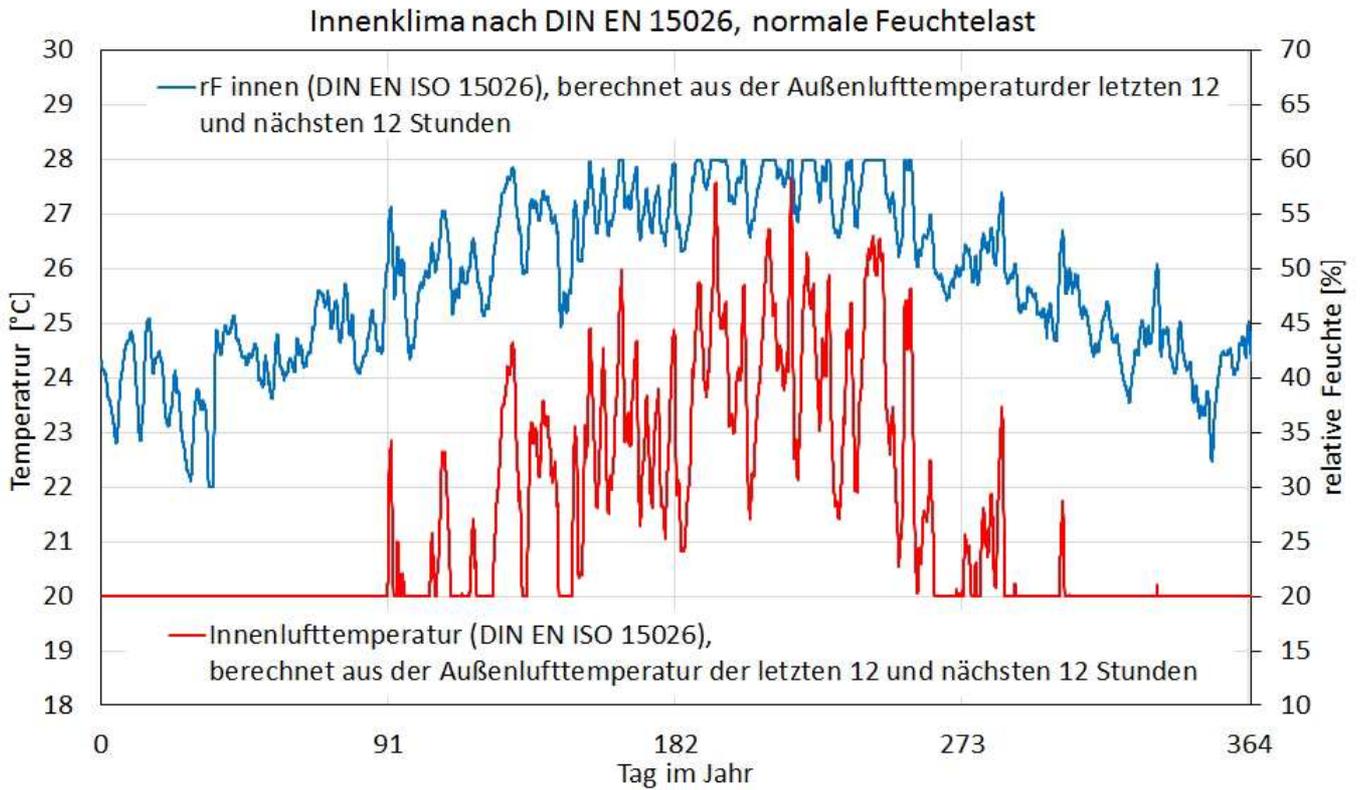


Bild 72: Innenraumklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026] für normale Feuchtelast

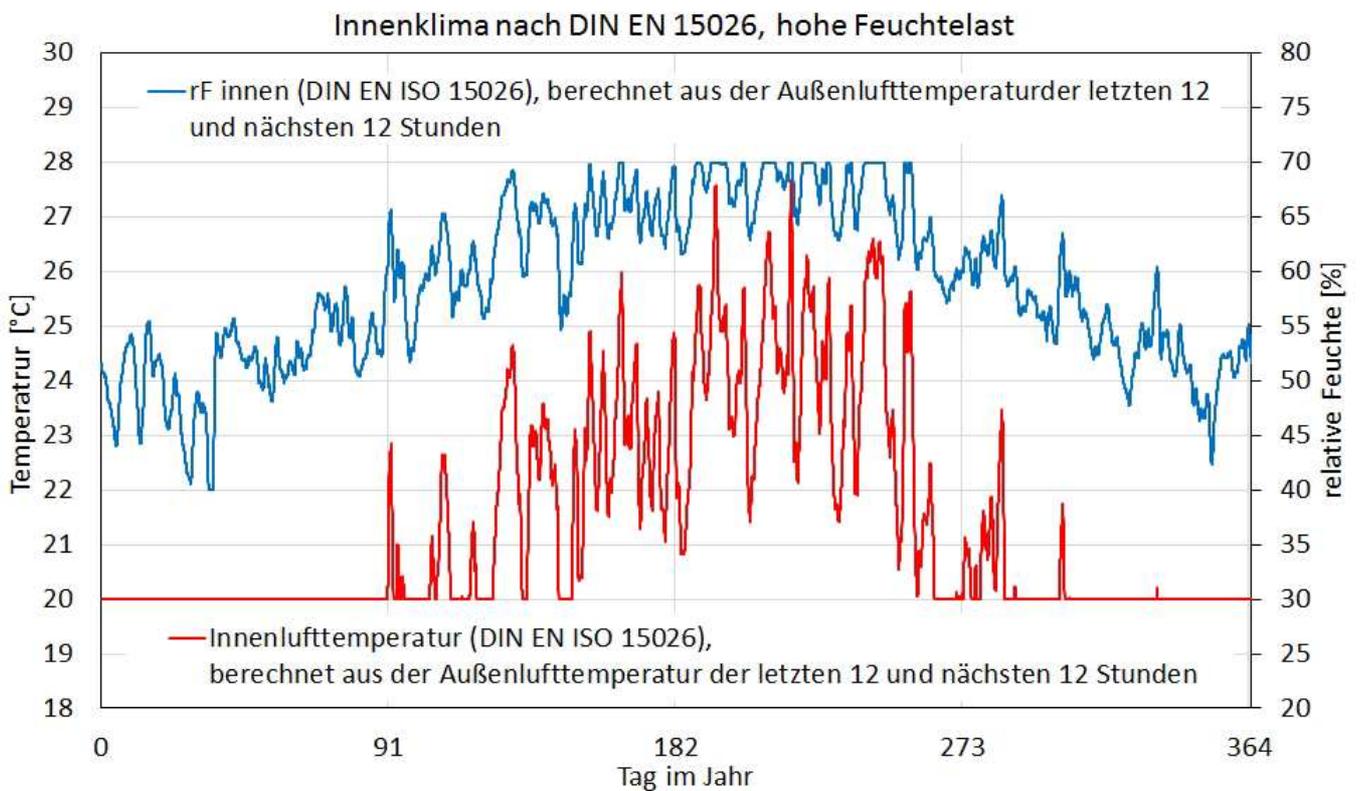


Bild 73: Innenraumklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026] für hohe Feuchtelast

Man beachte die unterschiedliche Skalierung der rechten Achse in beiden Bildern.

Im ersten Teil von Anhang A gibt [DIN EN ISO 13788] die gleiche Anleitung zur Berechnung der Raumlufthtemperatur und der Raumlufthfeuchte an. Jedoch wird hier der Geltungsbereich dieser Berechnungsmethode auf „Kontinentales“ und tropisches Klima und auf Wohn- und Bürogebäude eingeschränkt. Die Raumlufthtemperatur wird wieder wie in [DIN EN 15026] und [WTA_6-2-14/D] berechnet. Die Angaben zur Ermittlung der Raumlufthfeuchte decken sich mit der Vorschrift in [DIN EN 15026] und [WTA_6-2-14/D] im Falle hoher Belegungsdichten und im Falle normaler Belegungsdichten mit der Vorschrift für normale Belegungsdichten + 5 % in [WTA_6-2-14/D].

Raumklima nach [DIN EN 15026] und [WTA_6-2-14/D] ohne obere Grenze

Bei der Berechnungsmethode nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026] werden die Temperatur und die relative Luftfeuchte im Raum nach oben begrenzt, was jedoch für Gebäude ohne entsprechende raumluftechnische Anlagen nicht gerechtfertigt scheint. In der Sporthalle Fürth wurde eine adiabate Kühlung eingebaut. Dabei wird die Abluft befeuchtet und kühlt dadurch ab. Mit dieser gekühlten Abluft wird in einem Wärmeübertrager die Zuluft gekühlt. Diese Art der Kühlung ist sehr energieeffizient, kann jedoch nur geringe Kühlleistungen bereitstellen und nicht eine vorbestimmte Obergrenze für die Raumtemperatur sicherstellen. Eine Luftentfeuchtung gibt es dort nicht. Daher erscheint die in [WTA_6-2-14/D] und [DIN EN 15026] angegebene obere Begrenzung der Raumlufttemperatur und der relativen Feuchte im Falle der Sporthalle Fürth nicht gerechtfertigt.

Daher wurde die Vorgehensweise nach [DIN EN 15026] modifiziert und die Raumlufttemperatur und die relative Feuchte der Raumluft nicht nach oben begrenzt. Die untere Grenze für die relative Feuchte wurde beibehalten, obwohl im Gebäude keine Befeuchtung vorgesehen ist. Damit liegt man bei feuchtetechnischen Bewertungen eher auf der sicheren Seite.

Die nächsten Bilder zeigen den Zusammenhang zwischen Raumklima und Außenluftzustand entsprechend [DIN EN 15026], jedoch ohne die oberen Begrenzungen der Temperatur und Feuchte und den Jahresverlauf des Innenklimas für normale Belegung.

Die mittlere tägliche Temperatur wurde berechnet wie in WUFI: als Mittelwert aus der aktuellen Stunde, den 11 vorhergehenden Stunden und eine Hälfte der wiederum vorhergehenden Stunde, den 11 auf die aktuelle Stunde folgenden Stunden und die Hälfte der wiederum nachfolgenden Stunde.

Die untere Grenze der relativen Feuchte wird nur einmal kurzzeitig erreicht.

Raumklima nach DIN EN 15026 ohne obere Begrenzungen

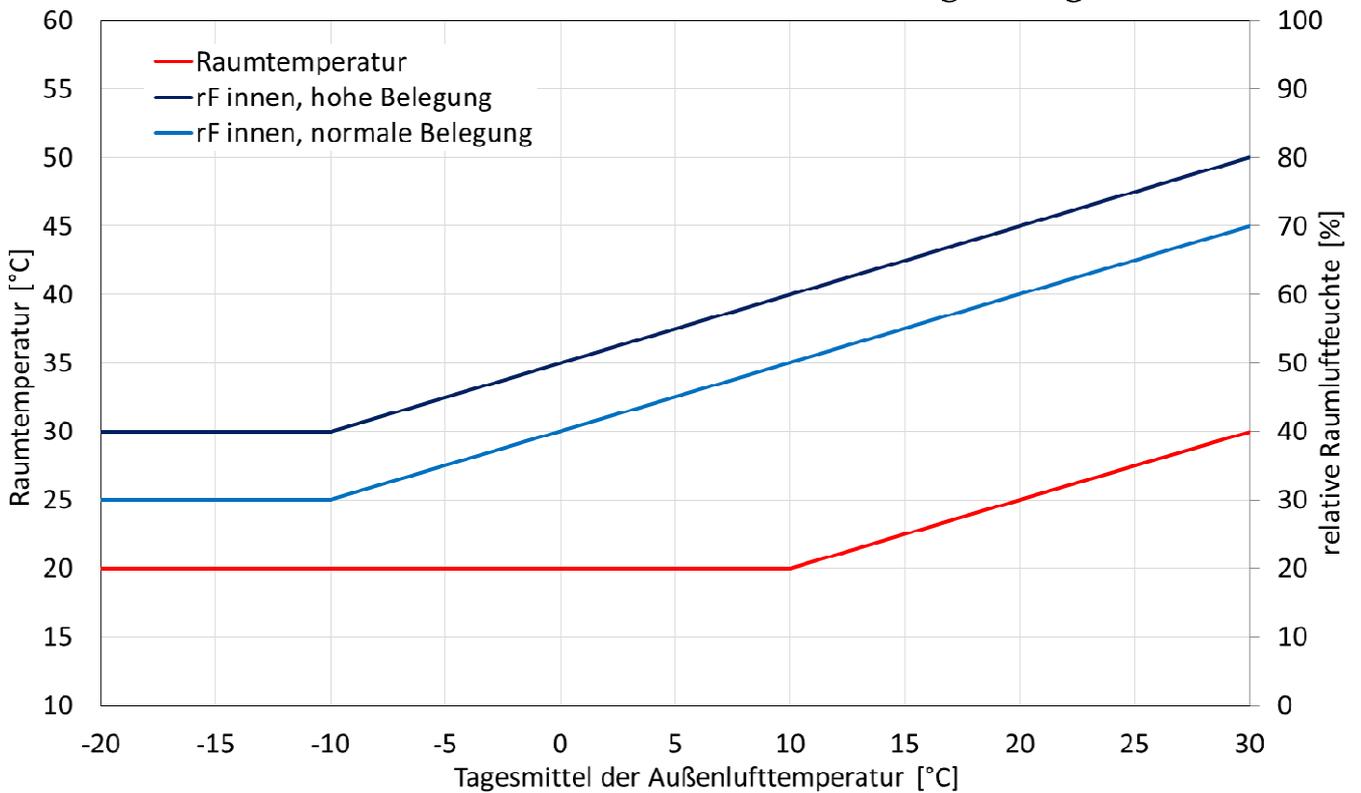


Bild 74: Abhängigkeit des Innenklimas vom Außenklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026], jedoch ohne obere Begrenzung der Raumluftfeuchte

Innenklima nach DIN EN 15026, ohne obere Begrenzungen

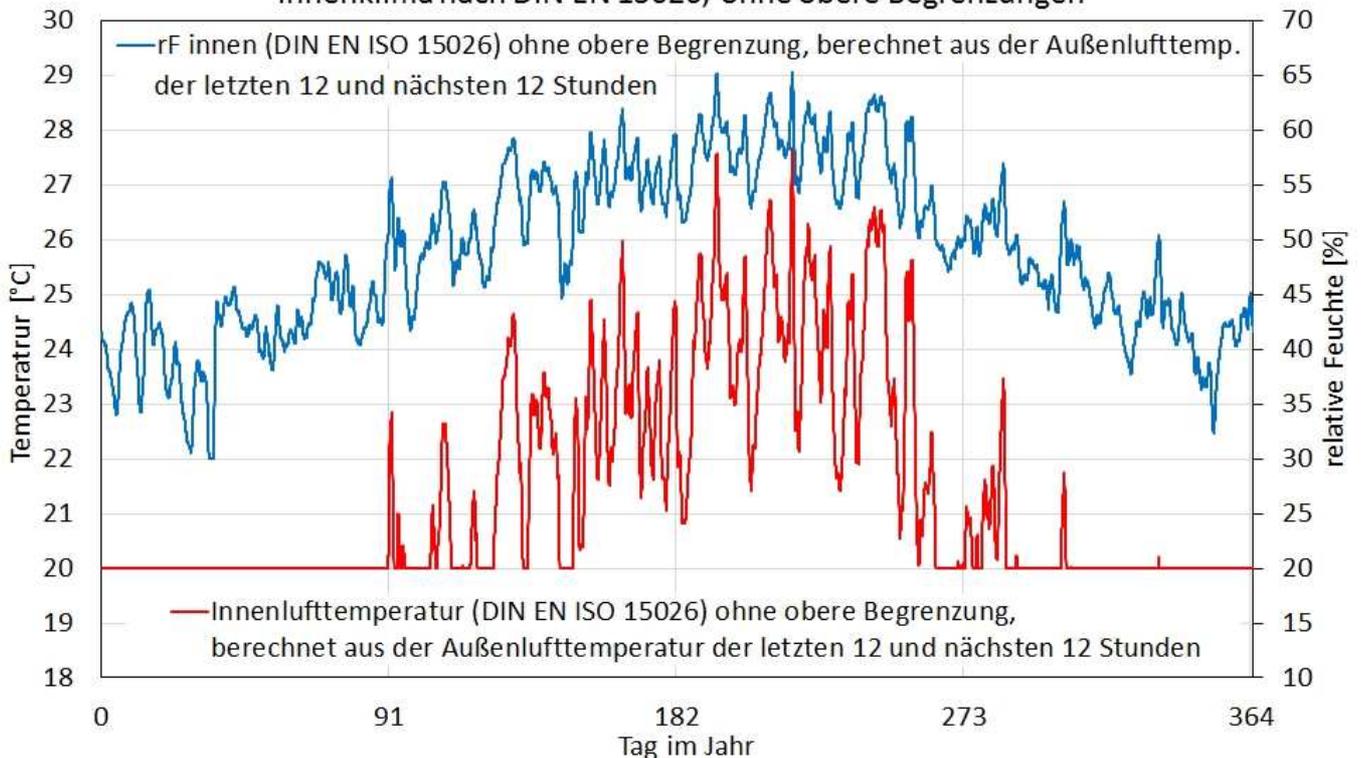


Bild 75: Innenraumklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026] für normale Feuchtelast, jedoch ohne obere Begrenzung der Raumluftfeuchte

Raumklima nach [DIN EN ISO 13788] mit geschätztem Feuchteüberschuss

[DIN EN ISO 13788], Kap. 4.3.2, S. 11 gibt für maritime Klimate eine Möglichkeit an, die Raumluftheuchte aus dem Außenklima zu bestimmen. Diese wurde von Gebäuden in Westeuropa abgeleitet. Die Norm geht davon aus, dass die Luft innerhalb des Gebäudes um einen vorgegebenen Betrag höhere Konzentration von Wasserdampf enthält als die Außenluft.

$$p_i = p_e + \Delta p$$

mit

- p_i = Wasserdampfpartialdruck im Raum
- p_e = Wasserdampfpartialdruck der Außenluft
- Δp = Erhöhung des Wasserdampfpartialdruckes gegenüber der Außenluft

Bei konstanter Innenraumtemperatur entspricht dies einer bestimmten Erhöhung der Wasserdampfkonzentration, die sich mit der allgemeinen Gasgleichung berechnen lässt.

$$c_i = c_e + \Delta c$$

mit

- c_i = Wasserdampfkonzentration im Raum
- c_e = Wasserdampfkonzentration der Außenluft
- Δc = Erhöhung des Wasserdampfkonzentration gegenüber der Außenluft

Je nach Gebäudekategorie beträgt dieser Konzentrationserhöhung des Wasserdampfes in der Raumlufte gegenüber der Außenluft:

Luftfeuchteklasse	Nutzungs-Kategorie	Feuchteüberschuss der Raumlufte im Vergleich zur Außenluft, Temp. $\leq 0^\circ\text{C}$, [g/m ³]	Wasserdampfpartialdruckerhöhung im Raum gegenüber außen, Temp. $\leq 0^\circ\text{C}$, [Pa]
1	unbelegte Gebäude, Lagerung trockener Güter	0.002	270
2	Büros, Wohnhäuser, bei normaler Belegung und Lüftung	0.004	640
3	Wohnhäuser mit unbekannter Belegung	0.006	810
4	Sporthallen, Küchen Kantinen	0.008	1080
5	besondere Gebäude, z.B. Wäschereien, Brauereien, Schwimmbäder	0.010	1360

Tabelle: Feuchteüberschuss im Raum nach [DIN EN ISO 13788]

Auch [WUFI15], S. 35 empfiehlt, für Wohnräume die Luftfeuchteklassen 1 und 2 zu verwenden.

Diese Werte gelten jedoch nur bei Außenlufttemperaturen von 0°C und darunter. Bei Temperaturen ab 0 °C geht die Norm davon aus, dass stärker gelüftet wird, so dass der Feuchteüberschuss im Raum mit zunehmender Außentemperatur geringer wird. Ab Außentemperaturen von 20°C wird die Lüftungsrate als so hoch angenommen, dass die Raumluft gegenüber der Außenluft einen nur gering erhöhten Feuchtegehalt zeigt. [WUFI15], S. 35. Zur Berechnung des Wasserdampfkonzentrationserhöhung werden jedoch nicht die aktuellen, stündlichen Werte der Außenlufttemperatur, sondern deren monatlichen Mittelwerte verwendet [DIN EN ISO 13788], Anhang A.

Über die anzunehmende Innenraumtemperatur wird bei diesem Vorschlag zur Berechnung der Raumluftfeuchte nichts ausgesagt.

Die verwendeten Begriffe des maritimen, kontinentalen und tropischen Klimas werden nicht erläutert, so dass auch unklar bleibt, zu welchem Klima Mittel- und Süddeutschland zu zählen sind.

Das Bild stellt den Feuchteüberschuss als Funktion der Außentemperatur grafisch dar.

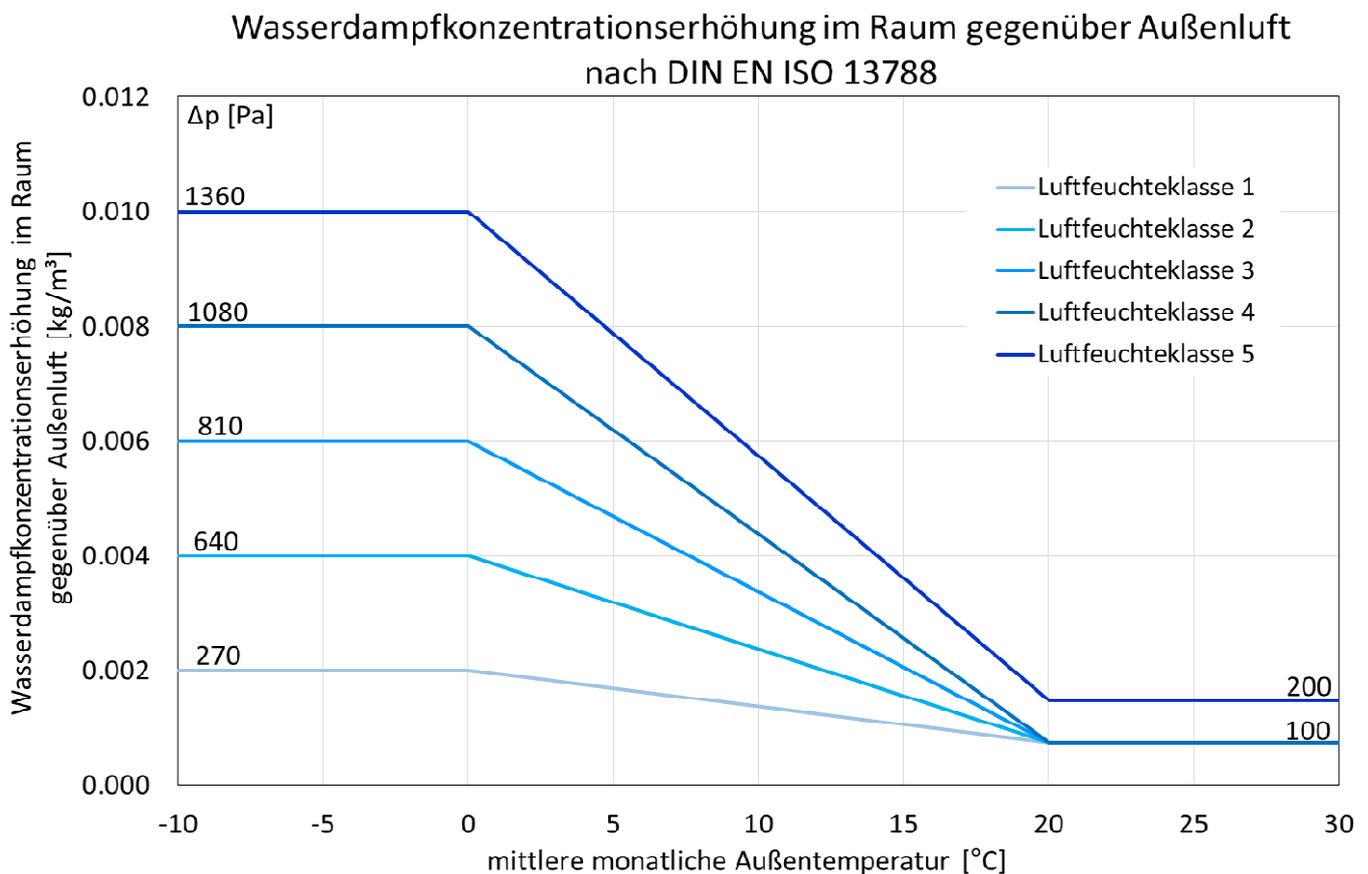


Bild 76: Feuchteüberschuss im Raum nach [DIN EN ISO 13788], Anhang A

Das nächste Bild zeigt das nach dieser Norm berechnete Innenraumklima, hier für

- eine konstante Innenraumtemperatur von 20 °C,
- und eine Innenraumtemperatur, berechnet nach [DIN EN 15026],
- die Luftfeuchtekategorie 4 für Sporthallen,
- abgeleitet wiederum aus dem Feuchtereferenzjahr von 1986 für Würzburg.

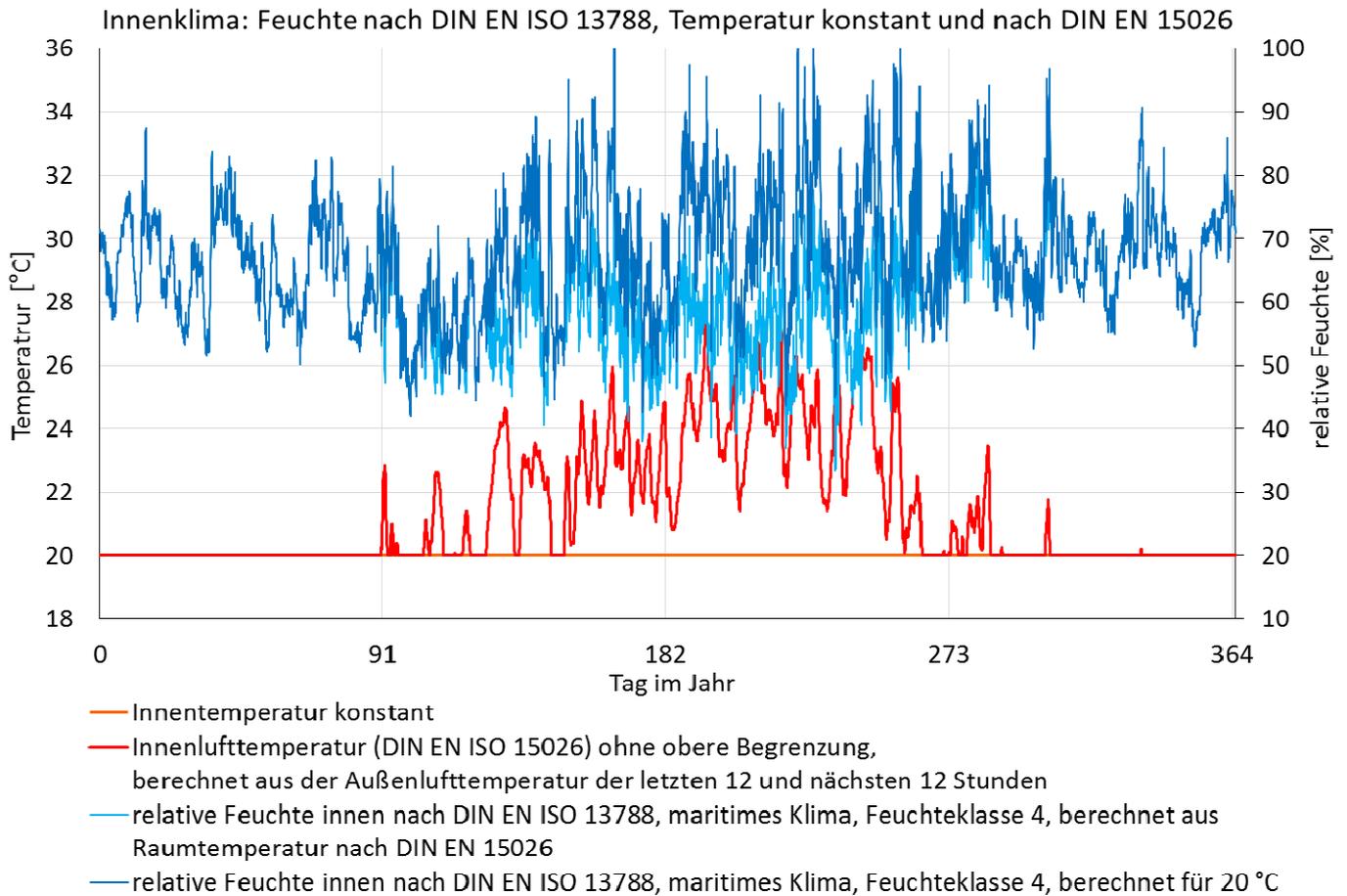


Bild 77: Innenraumklima nach [DIN EN ISO 13788]

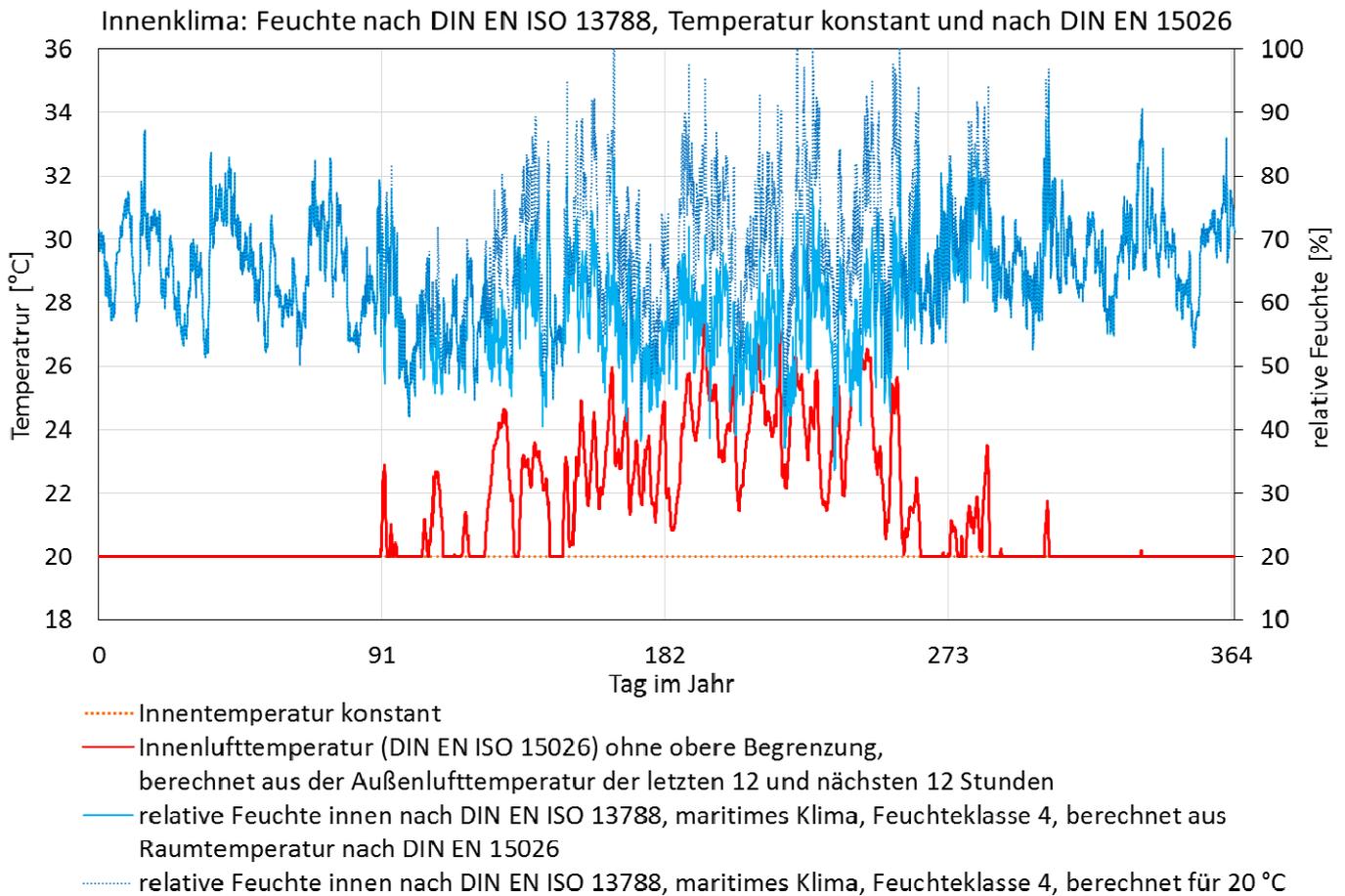


Bild 77: Innenraumklima nach [DIN EN ISO 13788]

Die Annahme, dass die Raumlufttemperatur im Sommer bei 20 °C bleibt, führt zu sehr hohen Werten der relativen Feuchte im Raum, teilweise bis zu 100 %. Diese Annahme von 20 °C Raumtemperatur ist für ungekühlte Gebäude allerdings auch unrealistisch.

Berechnung des Raumklimas aus dem Nutzungsprofil, der Luftwechselrate und dem Gebäudevolumen etc.

[DIN EN 15026], S. 12 empfiehlt, das Raumklimas aus dem Nutzungsprofil, der Luftwechselrate und dem Gebäudevolumen herzuleiten, falls weder Messwerte noch Simulationsergebnisse zur Luftfeuchte im Innenraum vorliegen. Die Berechnungsmethode wird dort nicht beschrieben, kann jedoch hergeleitet werden. Die folgende Herleitung geht von der Näherung aus, dass der Wasserdampf im Raum zu jeder Zeit gleichmäßig verteilt ist.

Herleitung

Differentialgleichung (DGL) zur Berechnung der Raumluftfeuchte aus der Lüftungsrate und der Feuchteentstehungsrate im Raum lautet

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_p + \dot{m}_{zu} - \dot{m}_{ab}$$

mit

- m_i = Menge des Wasserdampfes im Raum
- t = Zeit
- \dot{m}_p = Rate des von den Personen im Raum abgegebenen Wasserdampfes
- \dot{m}_{zu} = mit der Zuluft zugeführter Massenstrom von Wasserdampf
- \dot{m}_{ab} = mit der Abluft abgeführter Massenstrom von Wasserdampf

Mit dem Volumen des Raumes, in diesem Fall der Sporthalle ohne die Nebenräume, folgt daraus

$$V_i \frac{dc_i}{dt} = \dot{m}_p + \dot{V}_{zu/ab} c_{zu} - \dot{V}_{zu/ab} c_{ab}$$

mit

- V_i = Volumen des Raumes
- c_i = Konzentration des Wasserdampfes im Raum
- \dot{m}_p = Rate des von den Personen im Raum abgegebenen Wasserdampfes
- $\dot{V}_{zu/ab}$ = Volumenstrom der Zu- und Abluft
- c_{zu} = volumenbezogene Wasserdampfkonzentration in der Zuluft
- c_{ab} = volumenbezogene Wasserdampfkonzentration in der Abluft

Dabei ist die Wasserdampfkonzentration in der Zuluft c_{zu} gleich der Wasserdampfkonzentration in der Außenluft c_e und die Wasserdampfkonzentration in der Abluft c_{ab} gleich der Wasserdampfkonzentration in der Raumluft c_i . Die Änderung der volumenbezogenen Wasserdampfkonzentration mit der Temperaturänderung wird in dieser Gleichung nicht berücksichtigt. Sie kann jedoch bei den üblichen Randbedingungen vernachlässigt werden.

Somit schreibt sich die Differentialgleichung auch als

$$V_i \frac{d c_i}{d t} = \dot{m}_p + \dot{V}_{zu/ab} c_e - \dot{V}_{zu/ab} c_i$$

Diese DGL hat die Lösung

$$c_i(t) = c_\infty - (c_\infty - c_{i,B}) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Einsetzen der Lösung in die DGL führt zu den Formeln zur Berechnung des Asymptotenwertes c_∞ und der Zeitkonstanten τ

$$c_\infty = \frac{\dot{m}_p}{\dot{V}_{zu/ab}} + c_e$$

$$\tau = \frac{V_i}{\dot{V}_{zu/ab}}$$

mit

- c_∞ = asymptotischer Wert der Wasserdampfkonzentration im Raum, gegen die die Funktion strebt
- c_e = volumenbezogene Wasserdampf-Konzentration der Außenluft
- $c_{i,B}$ = anfängliche volumenbezogene Konzentration des Wasserdampfes in der Raumluft zur Zeit $t = 0$
- τ = Zeitkonstante der Exponentialfunktion
- V_i = Volumenstrom des Raumes
- $\dot{V}_{zu/ab}$ = Volumenstrom der Zu- und Abluft

Mit diesen Gleichungen kann für viele Zeitschritte nacheinander, z.B. für jede Stunde eines Test- oder Feuchtereferenzjahres, jeweils aus der anfänglichen Konzentration, der Wasserdampfkonzentration der Außenluft, der Zulufrate und der Feuchteentstehungsrate die Entwicklung der Wasserdampfkonzentration im Raum während eines Zeitschrittes, z.B. eine Stunde, berechnet werden. Die Feuchteentstehungsrate kann aus der Personenbelegung des Raumes und deren Aktivitätsgrad hergeleitet werden.

Als Eingangsgrößen werden also die anfänglichen Wasserdampfkonzentration im Raum, die Wasserdampfkonzentration der Außenluft, die Zulufrate und die Feuchteentstehungsrate benötigt. Das Volumen des Raumes ist dabei ein fester Parameter. Der Einfluss der Feuchtespeicherfähigkeit der Innenoberflächen kann dabei vernachlässigt werden, zumal eine Sporthalle im Verhältnis zum Volumen nur eine geringe Umfassungsfläche besitzt.

Der Mittelwert der Wasserdampfkonzentration in einem Zeitschritt ist

$$\overline{c_i(t)} = \frac{\int_0^{\Delta t} c_i(t) dt}{\Delta t} = c_\infty - \frac{\tau}{\Delta t} (c_\infty - c_{i,B}) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right)$$

mit

$\Delta t =$ Dauer des Zeitschrittes

Zur Ausgabe muss dann die Wasserdampfkonzentration am Ende jedes Zeitschrittes oder als Mittelwert des Zeitschrittes in einen Wert für die relative Feuchte umgerechnet werden. Hierzu ist die Kenntnis der Raumtemperatur notwendig.

Eingangsgrößen

Grundfläche und Volumen des Raumes

Die Grundfläche der Sporthalle (nur die Halle unter dem Membrandach) beträgt 1219 m^2 im Untergeschoss, mit dem Zuschauerraum im Erdgeschoss beträgt die Fläche 1537 m^2 . Das Innenvolumen der Halle (ohne die Nebenräume) beträgt $14476,5 \text{ m}^3$.

Der Volumenstrom der Lüftung

Die Lüftungsanlage der Halle wird für einen Volumenstrom von $12\,000 \text{ m}^3 / \text{h}$ ausgelegt [VIP13]. Der EnEV-Berechnung für die Sporthalle wurde ein Volumenstrom von $6000 \text{ m}^3 / \text{h}$ zugrunde gelegt. Das Nutzungsprofil für Turnhallen in [DIN V 18599], Teil 10, Anhang A, S. 65 und [DIN 18032-1], S. 24 veranschlagen bzw. empfehlen einen Volumenstrom von $60 \text{ m}^3 / (\text{h Person})$.

Für die hier durchgeführten Berechnungen des Raumklimas wird der Volumenstrom der Belegungsdichte angepasst mit dem empfohlenen Wert von $60 \text{ m}^3 / (\text{h Person})$.

Die Betriebszeit der Lüftung wird angenommen als täglich von morgens 6:00 Uhr bis abends um 23:00 Uhr.

Raumtemperatur

Falls keine Messwerte oder Simulationsergebnisse für die Raumtemperatur vorliegen, erscheint die Vorgehensweise nach [DIN EN 15026] am sinnvollsten zur Erzeugung von Werten für die Raumlufttemperatur. Je nach geplanter Gebäudetechnik evtl. mit der Änderung gegenüber [DIN EN 15026], so dass die Raumlufttemperatur nicht nach oben begrenzt wird, wie im vorigen Kapitel beschrieben. Diese Berechnungsmethode wird hier verwendet.

Die Wasserdampfkonzentration der Außenluft

Die Wasserdampfkonzentration der Außenluft berechnet sich mit der idealen Gasgleichung ganz analog aus der Angabe zur relativen Feuchte

$$c_{e,0} = \frac{\varphi_e p_s(\vartheta_e) m_{mol,H_2O}}{R (\vartheta_e + T_0)}$$

mit

φ	=	relative Feuchte der Außenluft
$p_s(\vartheta_e)$	=	Wasserdampf-sättigungsdruck der Raumluft in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur
m_{mol,H_2O}	=	Masse eines Mols Wasser
R	=	universelle Gaskonstante, siehe Anhang
T_0	=	Verschiebung der Temperaturskalen
	=	273,15 K

Die Wärme- und Feuchteproduktionsrate in der Halle

In der Sporthalle selbst entsteht Feuchtigkeit lediglich durch die Sportler. Der Mensch gibt ständig Feuchtigkeit an die Raumluft ab. Dies geschieht einerseits über die Atmung, andererseits über die Haut. Auch wenn man nicht das Gefühl hat, zu schwitzen, verdunstet Wasser aus der Haut. Bei körperlicher Aktivität und bei warmer Umgebungstemperatur produziert der Körper Schweiß, um sich durch dessen Verdunstung zu kühlen.

Um die Feuchteproduktionsrate in der Sporthalle abzuschätzen, wird zunächst diejenige einer Person abgeschätzt. In [DIN EN 13779] werden Aktivitätsgrade definiert und diesen der jeweilige Energieumsatz eines Menschen zugeordnet. In [VDI 2078], S. 26 werden für diese Aktivitätsgrade etwas andere Werte für den Energieumsatz angegeben. Dort werden aber auch Formeln zur Berechnung der sensiblen und der feuchten Wärmeabgabe, sowie zur Berechnung der Feuchteproduktion angegeben. Aufbauend auf diese Angaben wurden in [Buck/Beck16] für einen höheren Aktivitätsgrad 5, entsprechend zügigem Gehen mit 5 km/h, die Feuchteproduktion abgeschätzt. Dies wird nun noch gesteigert für sportliche Aktivitäten (Aktivitätsgrad 6) für die sportliche Betätigung.

Aktivität	Metabolisches Äquivalent [met]	Gesamt-Wärmeabgabe bei 24 °C [W]	Aktivitätsgrad
Zurückgelehnt	0,8	80	1
Entspannt sitzend	1,0	100	2
Sitzende Tätigkeit (Büro Schule)	1,2	125	3
Stehend. Leichte Tätigkeit (Einkaufen, Leichtindustrie)	1,6	170	4
Stehend, mittelschwere Tätigkeit, (Verkäufer, Arbeit an Maschinen)	2,0	210	
Gehend, 5 km / h	3,4	360	5
Sport			6

Tabelle: Wärmeabgabe von Personen, je nach körperlicher Betätigung

Nach [VDI 2078], S. 26 wird die Feuchteproduktion einer Person berechnet nach der Formel

$$\dot{m}_P = a + b \vartheta_{P,D}$$

Die Temperatur $\vartheta_{P,D}$ ist gleich der Raum-Solltemperatur zu setzen, falls das Gebäude über eine Kühlung mit ausreichender Kühlleistung verfügt. Für die hier durchgeführten Berechnungen wird diese Temperatur gleich der Raumtemperatur gesetzt.

Für die Aktivitätsgrade 5 und 6 wurde eine exponentielle Formel definiert.

$$\dot{m}_P = a e^{b(\vartheta_{P,D} - c)}$$

Die Tabelle und das Diagramm zeigen die Werte für die Feuchteproduktion in Abhängigkeit vom Aktivitätsgrad und der Temperatur nach [VDI 2078] und nach eigener Extrapolation. Die Parameter der Formeln a , b und c finden sich in der zweiten Tabelle.

Zusammenhang zwischen der Raumtemperatur und der Feuchteabgabe einer Person								
Raumtemperatur [°C]	15	18	20	21	22	24	26	28
	Feuchteabgabe in [g/(h P)]							
Aktivitätsgrad 1, nach [VDI 2078]	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	45.6	56.4	67.2
Aktivitätsgrad 2, nach [VDI 2078]	35.0	39.2	50.0	55.0	60.8	71.6	82.4	93.2
Aktivitätsgrad 3, nach [VDI 2078]	69.0	86.4	98.0	104.0	109.6	121.2	132.8	144.4
Aktivitätsgrad 4, nach [VDI 2078]	63.0	91.2	110.0	119.0	128.8	147.6	166.4	185.2
Aktivitätsgrad 5, abgeschätzt	75.0	100.0	125.0	142.0	160.0	200.0	260.0	320.0
Aktivitätsgrad 5, exponentielle Formel	75.0	105.0	131.3	146.9	164.3	205.5	257.1	321.7
Aktivitätsgrad 6, exponentielle Formel	80.0	121.8	161.1	185.3	213.2	282.0	373.2	493.7

Tabelle: Feuchteabgabe von Personen, je nach körperlicher Betätigung und Lufttemperatur

Aktivitätsgrad	Parameter			Bereich
	a [g/(h P)]	b [1/K] bzw. [g/(h P K)]	c [°C]	
Aktivitätsgrad 1, nach [VDI 2078]	-86	5.4		22 °C bis 28 °C
Aktivitätsgrad 2, nach [VDI 2078]	-58	5.4		18 °C bis 28 °C
Aktivitätsgrad 3, nach [VDI 2078]	-18	5.8		15 °C bis 28 °C
Aktivitätsgrad 4, nach [VDI 2078]	-78	9.4		15 °C bis 28 °C
Aktivitätsgrad 5, exponentielle Formel	75	0.112	15	15 °C bis 28 °C
Aktivitätsgrad 6, exponentielle Formel	80	0.140	15	15 °C bis 28 °C

Tabelle: Parameter zur Berechnung der Feuchteabgabe von Personen

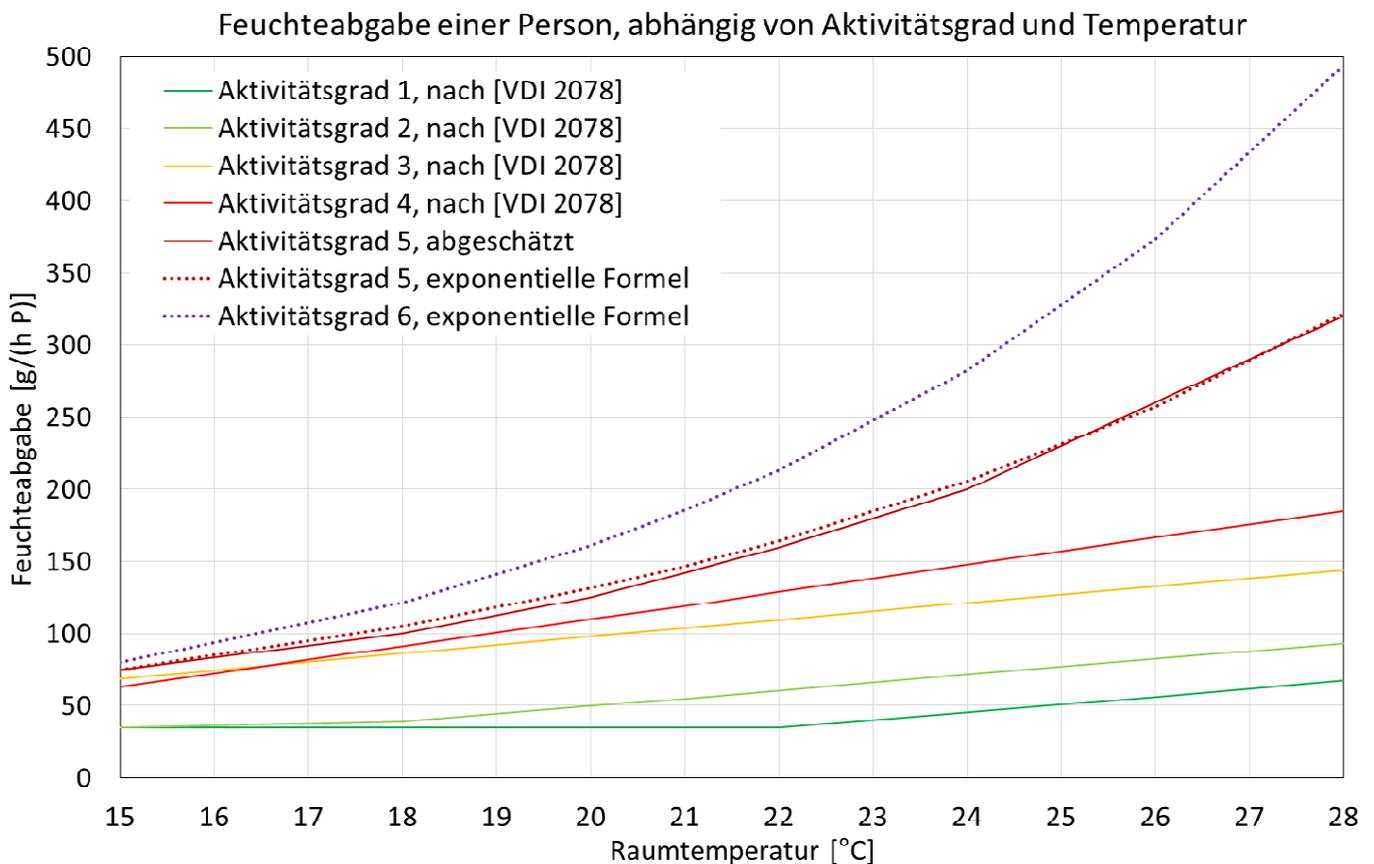


Bild 78: Feuchteabgabe von Personen, je nach körperlicher Betätigung und Lufttemperatur

Für die Personen in der Sporthalle wird Aktivitätsgrad 6 angenommen. Somit steht eine Berechnungsformel für die Feuchteproduktion einer Person zur Verfügung.

Belegungsdichte

Die Anzahl der Personen kann aus dem Nutzungsprofil einer Turnhalle in [DIN V 18599], Teil 10 ermittelt werden. Dort werden eine niedrige, eine mittlere und eine hohe Belegungsdichte angegeben mit 30 m² bzw. 20 m² bzw. 10 m² pro Person. Bei mittlerer Belegungsdichte halten sich in der Sporthalle 61 bis 62 Personen auf.

Nutzungszeiten

Die Nutzungszeiten der Halle können ebenfalls aus dem Nutzungsprofil in [DIN V 18599], Teil 10 entnommen werden. Die dort angegebenen Nutzungszeiten von 8:00 Uhr morgens bis um 23:00 Uhr abends entsprechen der vorgesehenen Verwendung der Halle für den Schul- und Vereinssport.

Obwohl es im Tagesverlauf und im Jahreslauf vermutlich auch Pausen geben wird, wird für die hier durchgeführte Berechnung des Innenklimas vereinfacht für jeden Tag des Jahres eine durchgehende Nutzung von 8:00 Uhr morgens bis abends um 23:00 Uhr angenommen. Dies entspricht auch der Maxime, die Feuchtebelastung der zu untersuchenden Bauteile eher nach oben hin abzuschätzen.

Nutzungsprofile für verschiedenen Gebäude – jedoch keine Sporthallen - wurden ebenfalls in [Buck/Beck16] hergeleitet.

Anfangswert für die Wasserdampfkonzentration im Raum

Im ersten Zeitschritt muss eine Wasserdampfkonzentration im Raum vorgegeben werden. Diese kann gewählt werden entsprechend z.B. 50% relativer Feuchte und entsprechend der Raumtemperatur von z.B. 20°C oder entsprechend den Daten für die erste Stunde einer Raumklimadatei. Dann berechnet sich die Wasserdampfkonzentration aus der relativen Feuchte und der Temperatur der Raumluft zu

$$c_{i,0} = \frac{\varphi_i p_s(\vartheta_i) m_{mol,H_2O}}{R(\vartheta_i + T_0)}$$

mit

- φ_i = relative Feuchte der Raumluft [-]
- $p_s(\vartheta_i)$ = Wasserdampf-sättigungsdruck der Raumluft in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur
- m_{mol,H_2O} = Masse eines Mols Wasser
- R = universelle Gaskonstante, siehe Anhang
- T_0 = Verschiebung der Temperaturskalen
= 273,15 K

Im hier bearbeiteten Fall wurde für die erste Stunde die anfängliche Wasserdampfkonzentration in der Raumluft entsprechend dem Raumklima nach [DIN EN 15026] gewählt. In der Wahl dieses Anfangswertes ist man recht frei. Sein Einfluss verliert sich innerhalb von zwei bis drei Tagen vollständig.

Ergebnisse

Mit diesen Angaben wurde das Innenklima berechnet für mittlere und hohe Personen-Belegungsdichte in der Halle. Die Bilder zeigen für beide Fälle den Jahresverlauf des Innenklimas und des Außenklimas. Zum Vergleich wird noch die Raumlufftfeuchte, berechnet nach [DIN EN 15026], gezeigt. Die Berechnung startete jeweils am 1. oder 2. Dezember. In den Bildern 1, 2 und 4 ist der Zeitraum von einem Jahr ab dem 1. Januar dargestellt. Der Einfluss der nur geschätzten Anfangswerte der Innenraum-Temperatur und -Luftfeuchte verliert sich in den Berechnungen innerhalb weniger Tage, sodass sie sich im dargestellten Zeitraum nicht mehr auswirken.

Die nächsten Bilder zeigen folgende Werte

Bild 79

Wetter für **Würzburg** im Jahr **1990**

Relative Feuchte nach [DIN EN 15026] für **normale** Feuchtelast

Relative Feuchte, berechnet aus dem Volumenstrom etc. für **mittlere** Belegungsdichte der Sporthalle

Bild 80

Wetter für **Würzburg** im Jahr **1990**

Relative Feuchte nach [DIN EN 15026] für **hohe** Feuchtelast

Relative Feuchte, berechnet aus dem Volumenstrom etc. für **hohe** Belegungsdichte der Sporthalle

Bild 81

Wie Bild 80

Jedoch nur für 15 Tage im August (14.8. bis 28.8.) mit recht hohen und recht niedrigen Werten für die Raumlufftfeuchte im Sommer

Bild 82

Wetter für **Fürth** im Jahr **2013**

Relative Feuchte nach [DIN EN 15026] für **hohe** Feuchtelast

Relative Feuchte, berechnet aus dem Volumenstrom etc. für **hohe** Belegungsdichte der Sporthalle

Bild 83

Wie Bild 82

Jedoch nur für 15 Tage im August (14.8. bis 28.8.) mit recht hohen und recht niedrigen Werten für die Raumlufftfeuchte im Sommer.

Bild 84

Wie Bild 82

Jedoch nur für 15 Tage Anfang Februar (31.1. bis 14.2.) mit recht hohen und recht niedrigen Werten für die Raumlufftfeuchte im Winter.

Bild 85

Wetter für **Fürth** im Jahr **2013**

Relative Feuchte nach [DIN EN 15026] für **hohe** Feuchtelast

Relative Feuchte, berechnet aus dem Volumenstrom etc. für **hohe** Belegungsdichte der Sporthalle und dem 1,5-fachen des empfohlenen Volumenstromes pro Person

Bild 86

Wie Bild 85

Jedoch nur für 15 Tage im August (14.8. bis 28.8.) mit recht hohen und recht niedrigen Werten für die Raumlufffeuchte im Sommer.

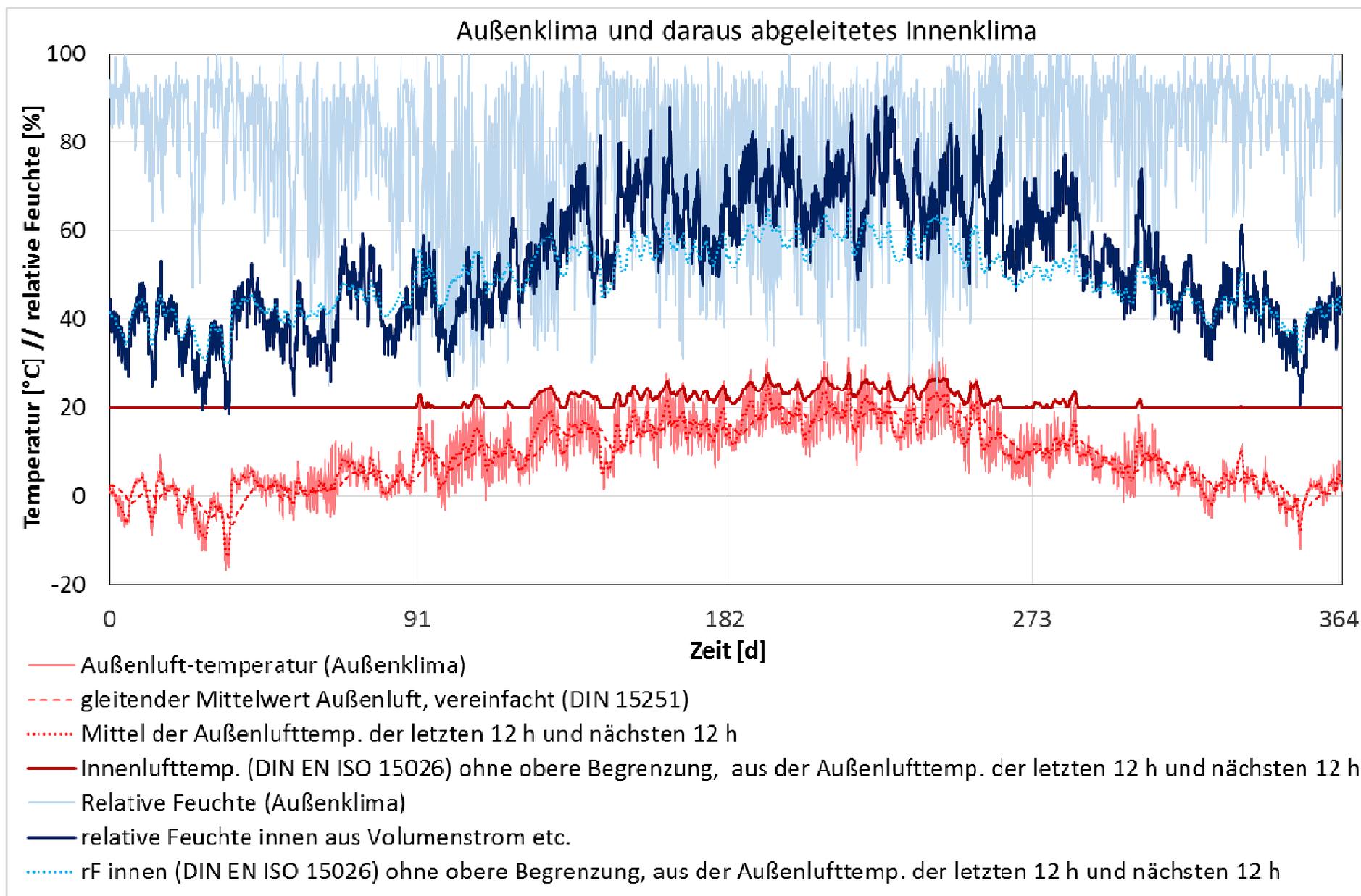


Bild 79: Für das Jahr 1990 in Würzburg, normale Feuchtelast (DIN EN 15026) und mittlere Belegungsdichte (Berechnung aus Lüftung etc.)

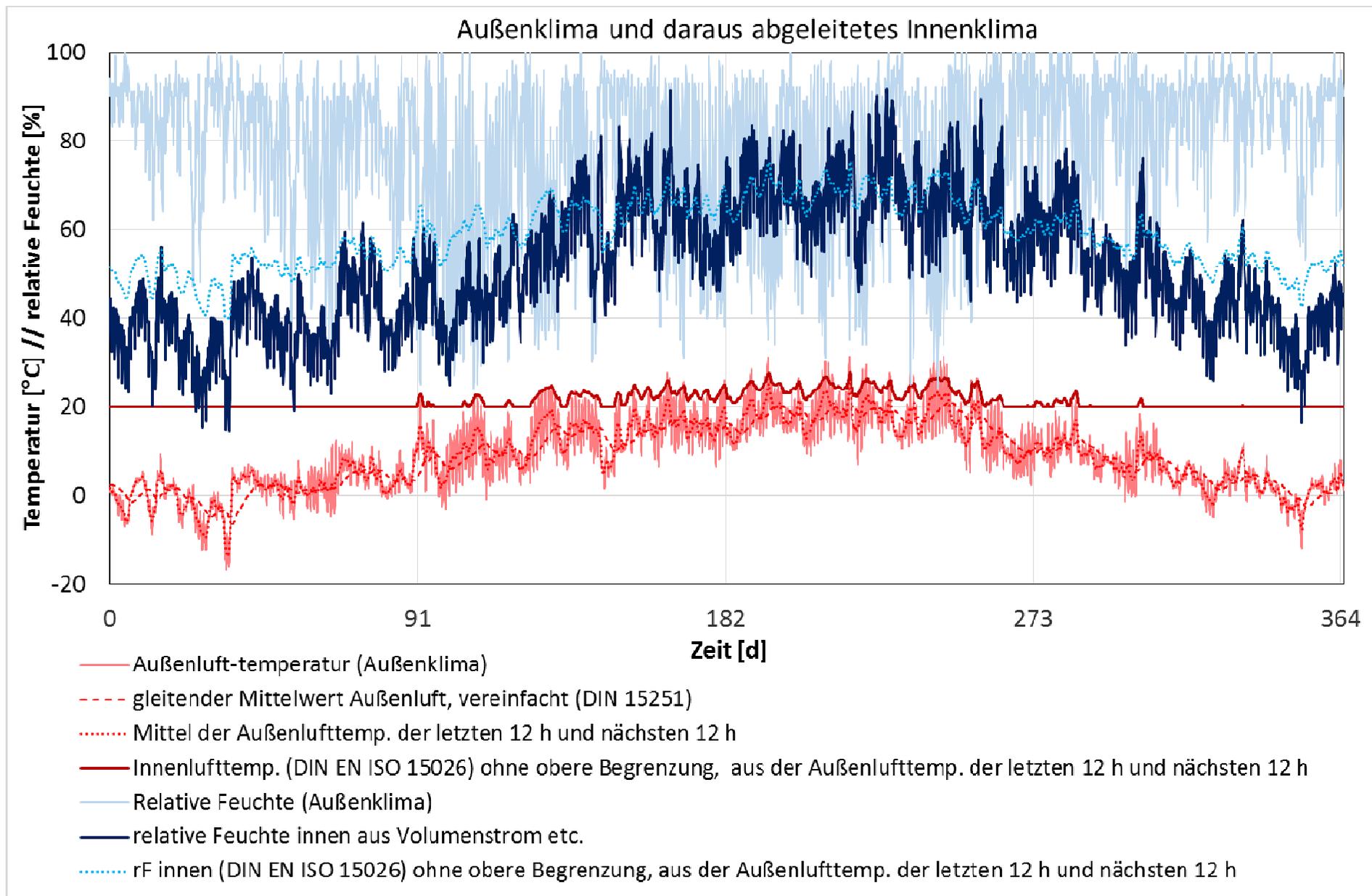


Bild 80: Für das Jahr 1990 in Würzburg, hohe Feuchtelast (DIN EN 15026) und hohe Belegungsdichte (Berechnung aus Lüftung etc.)

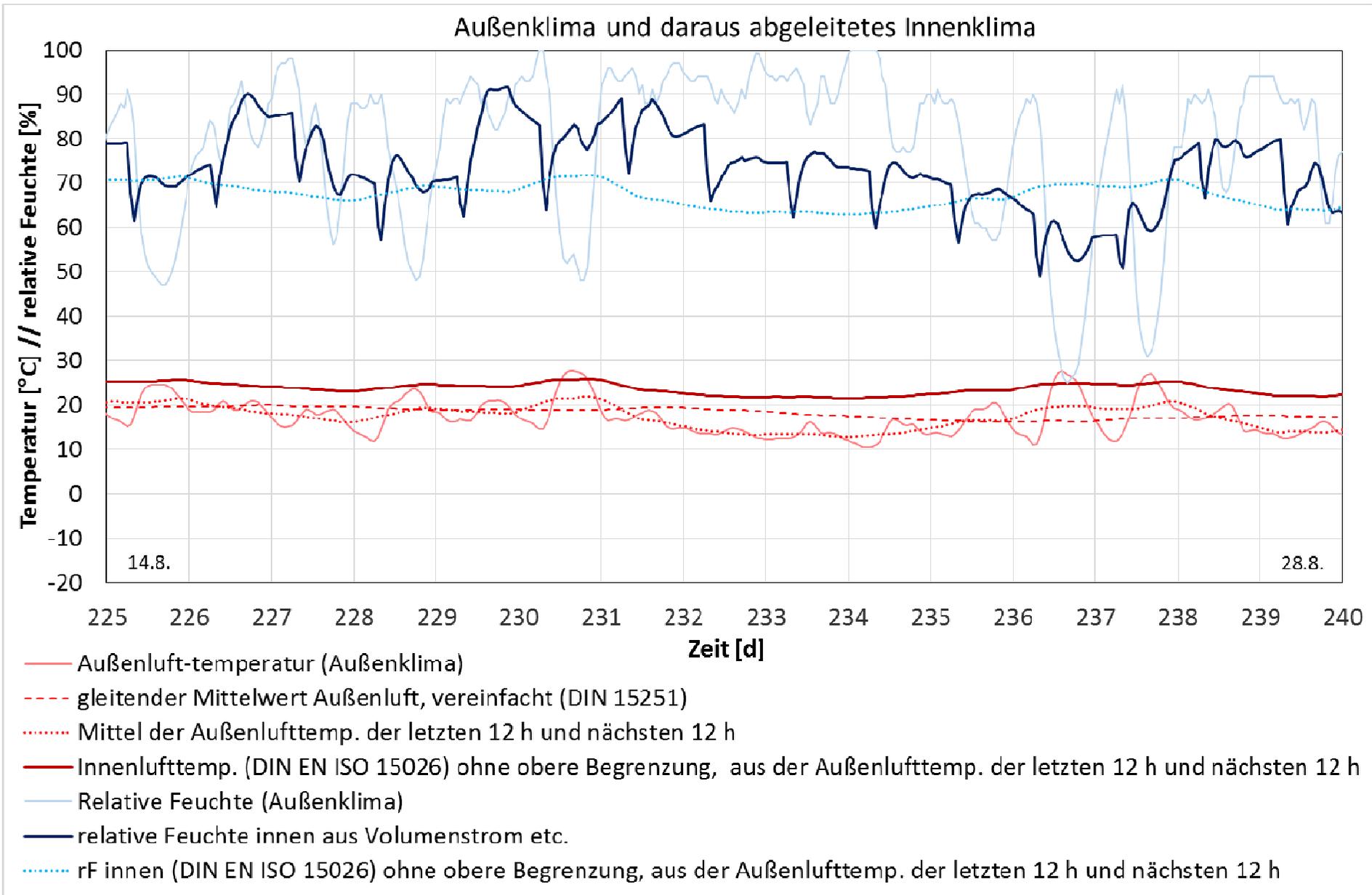


Bild 81: Für das Jahr 1990 in Würzburg, hohe Feuchtelast (DIN EN 15026) und hohe Belegungsdichte (Berechnung aus Lüftung etc.)

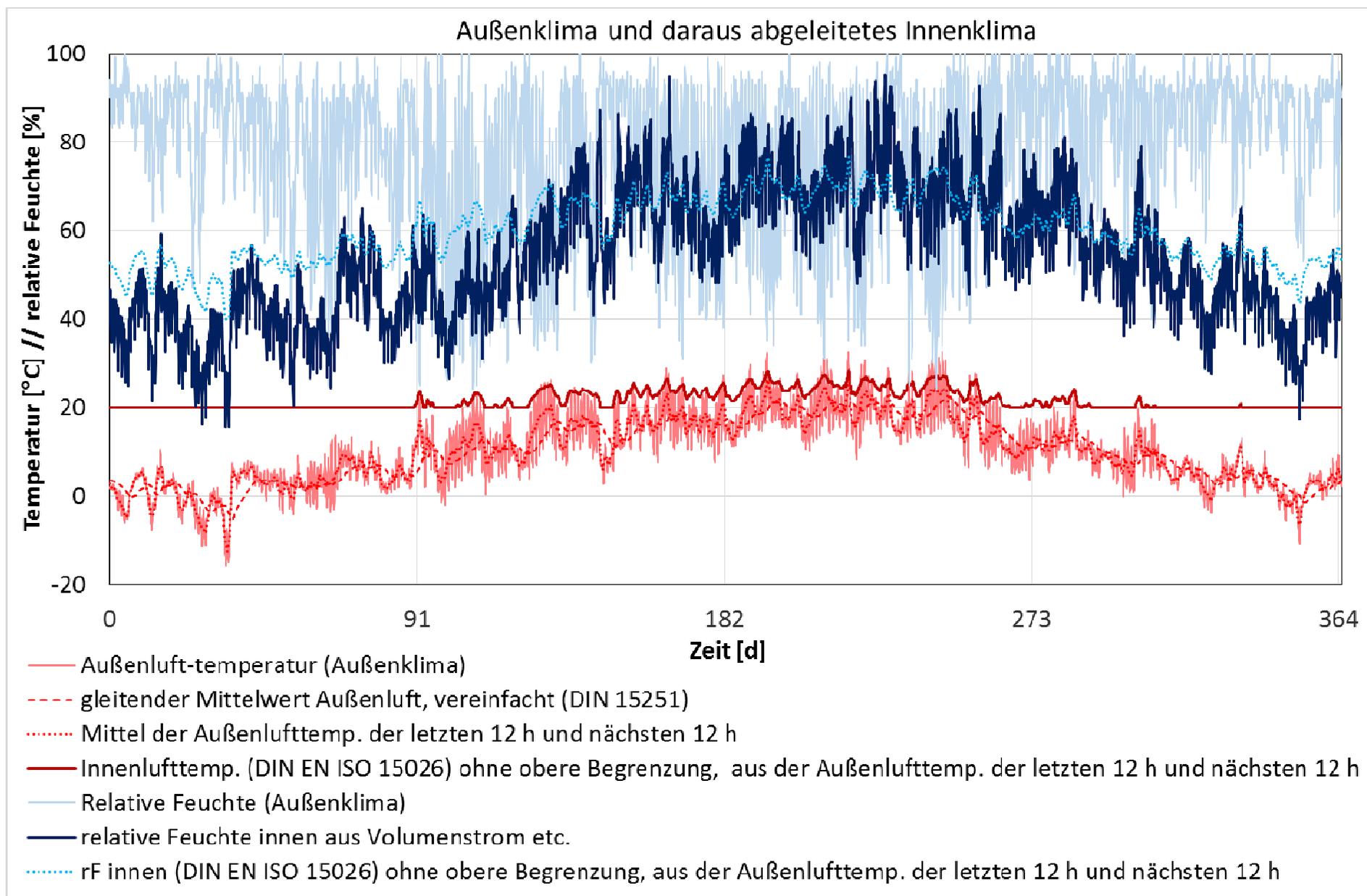


Bild 82: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte und hohe Feuchtelast

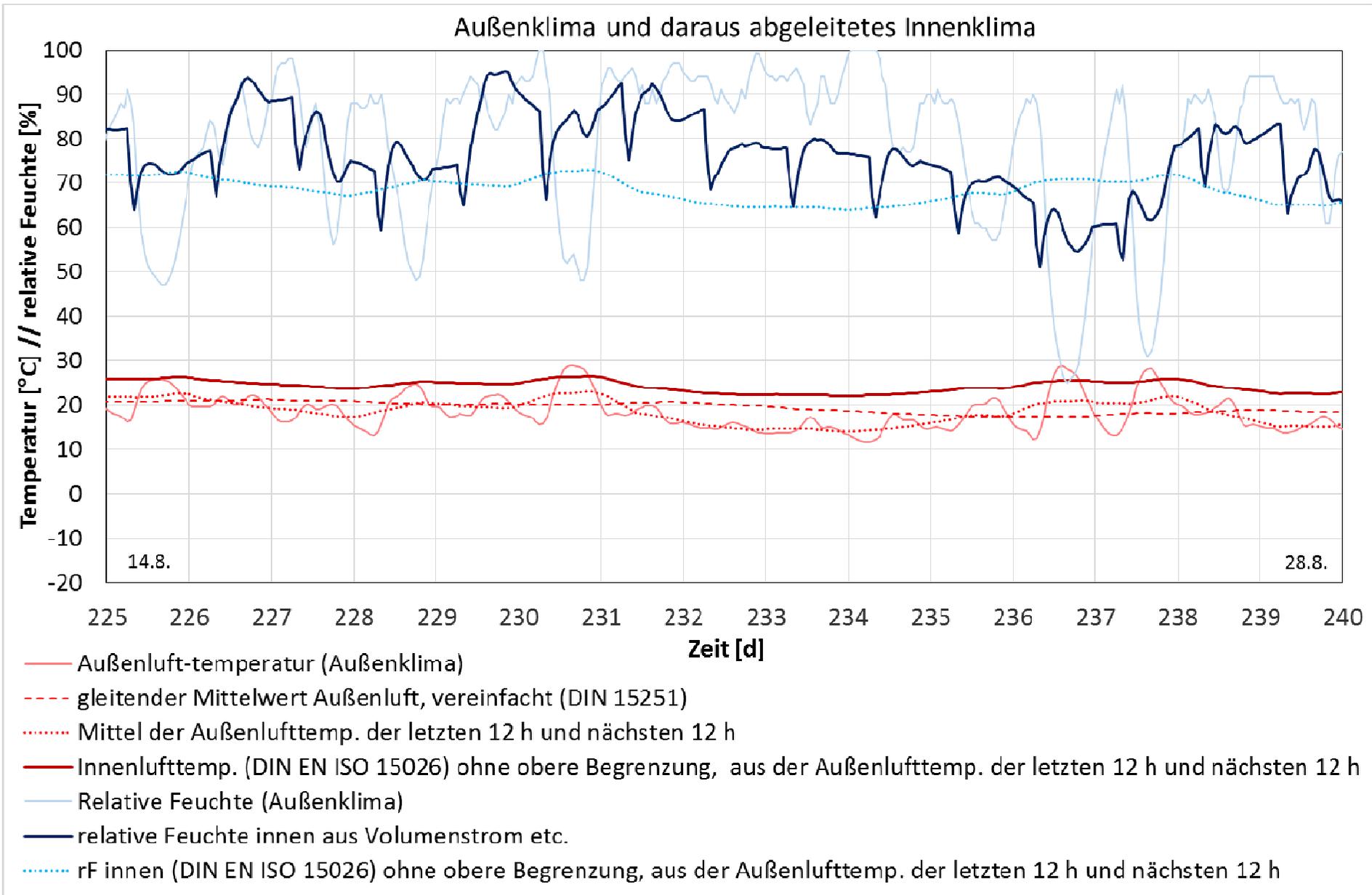


Bild 83: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte und hohe Feuchtelast

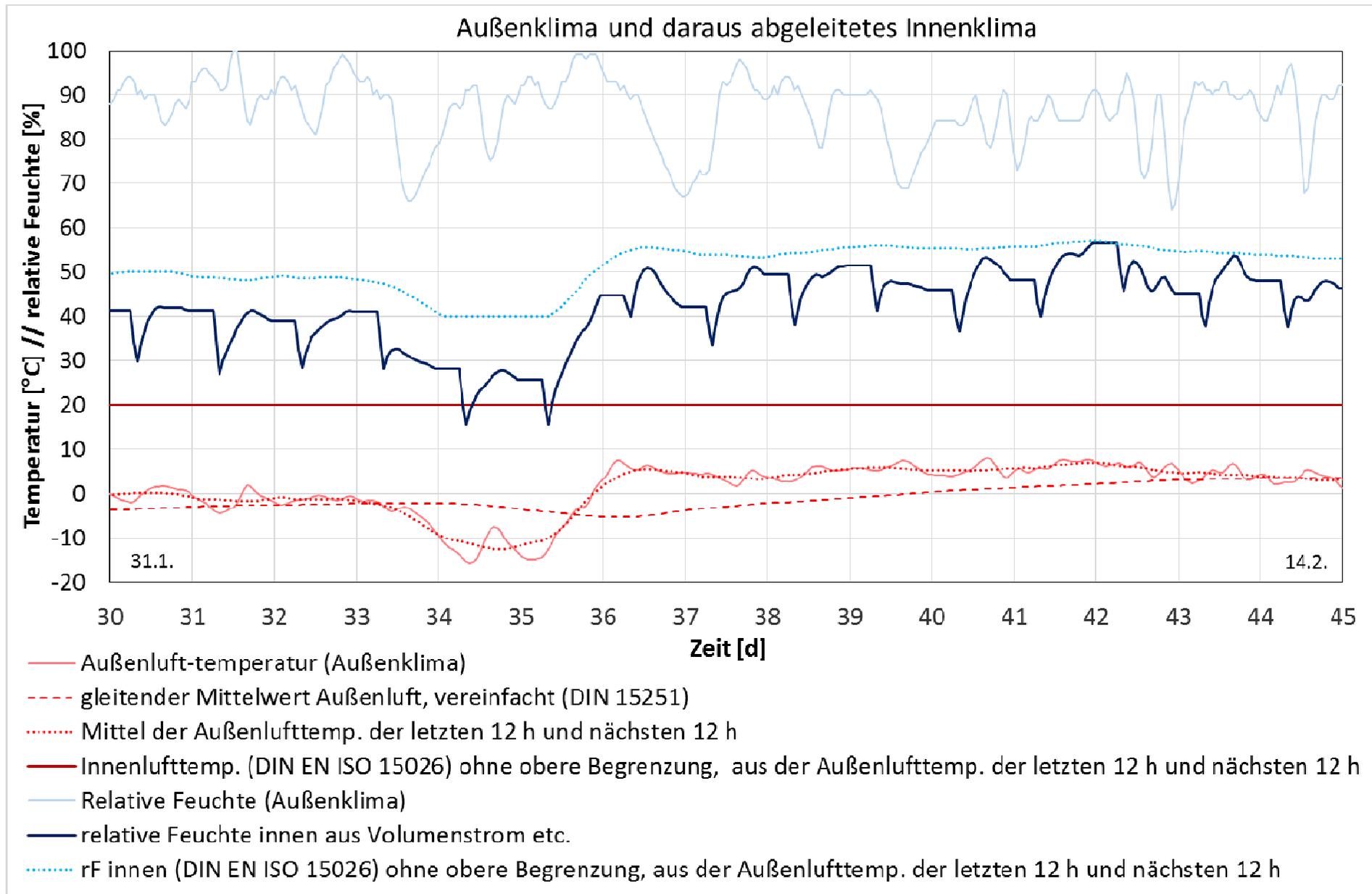


Bild 84: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte und hohe Feuchtelast

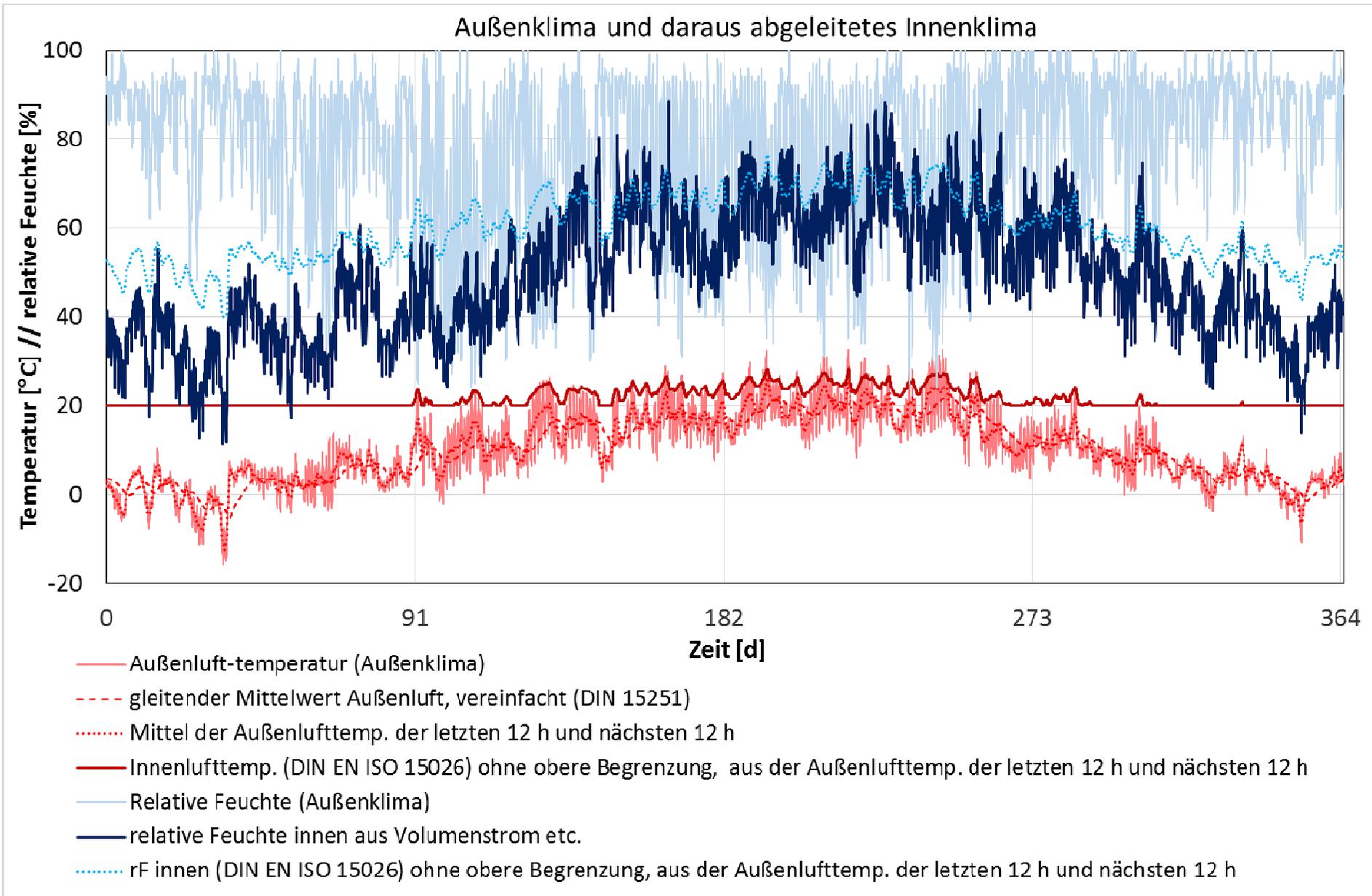


Bild 85: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte mit 1,5-fachem Volumenstrom pro Person und hohe Feuchtelast

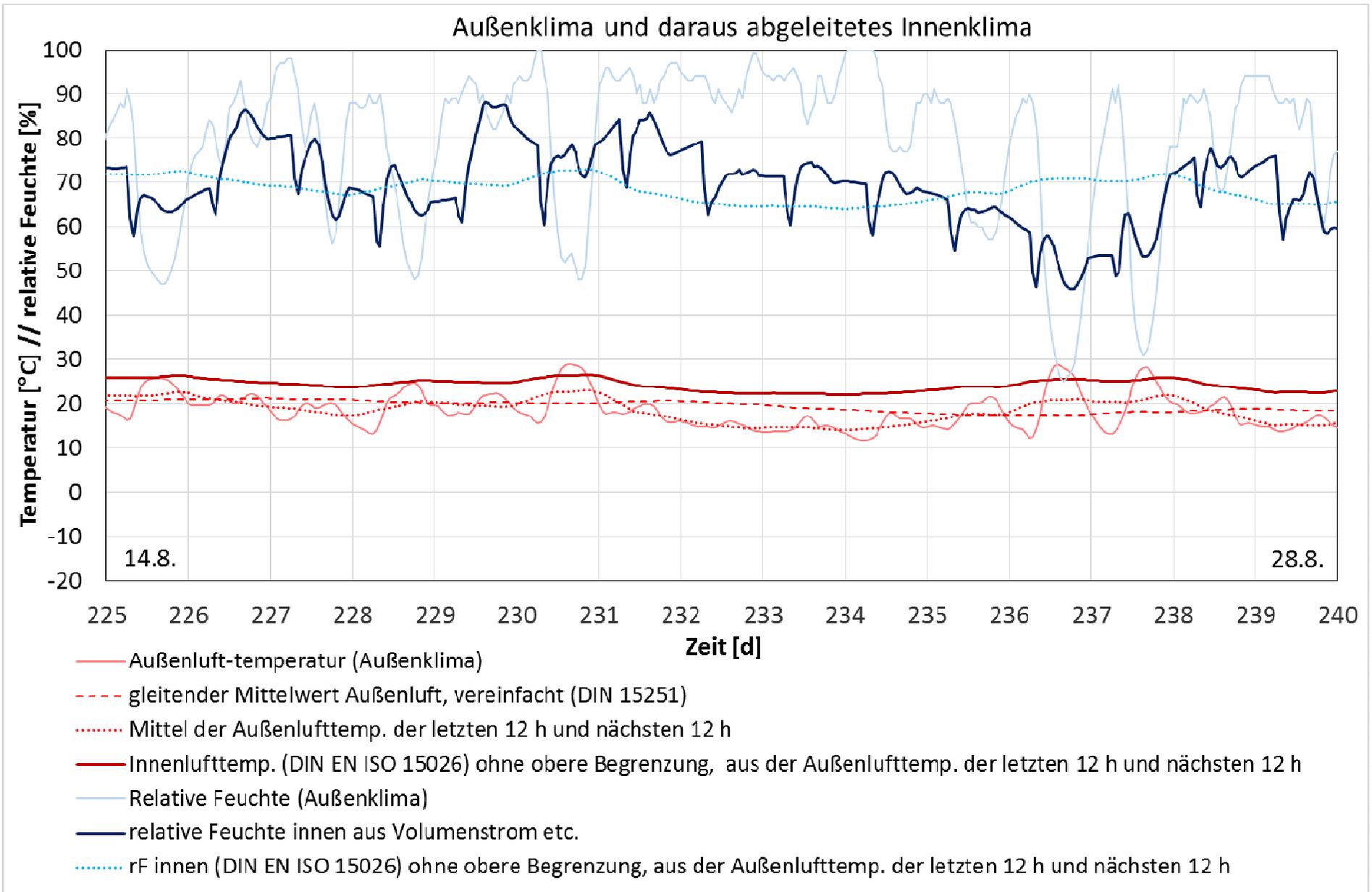


Bild 86: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte mit 1,5-fachem Volumenstrom pro Person und hohe Feuchtelast

Der Vergleich der nach beiden Methoden berechneten Raumlufffeuchte zeigt Folgendes:

- Bei der Berechnung aus dem Volumenstrom schwankt die Raumlufffeuchte stärker, sowohl im Jahresverlauf, wie auch im Tagesverlauf.
- Vergleicht man die Berechnungen für normale Feuchtelast nach [DIN EN 15026] mit den Ergebnissen der Berechnungen aus dem Volumenstrom mit mittlerer Belegungsdichte, so stimmen die Raumlufffeuchten im Winter recht gut überein. Dies gilt allerdings nur für mehrtägige Mittelwerte.
- Vergleicht man andererseits die Berechnungen für hohe Feuchtelast nach [DIN EN 15026] mit den Ergebnissen der Berechnungen aus dem Volumenstrom mit hoher Belegungsdichte, so stimmen die Raumlufffeuchten im Sommer recht gut überein. Dies gilt auch hier nur für mehrtägige Mittelwerte.
- Im Winter zeigen beide Berechnungsmethoden eine niedrigere Raumlufffeuchte bei kälterer Außenluft. Diese Abhängigkeit ist dadurch begründet, dass die Erwärmung der Außenluft und damit das Absinken des Wertes der relativen Luftfeuchte einen größeren Einfluss auf die Raumlufffeuchte hat als der Feuchtegehalt der einströmenden Außenluft.
- Im Sommer zeigen beide Berechnungsmethoden oft gegenläufige Verhalten der Raumlufffeuchte. Während bei der Berechnung nach [DIN EN 15026] auch hier per Definition die Raumlufffeuchte bei wärmerem Wetter steigt, zeigt die Berechnung aus dem Lüftungs-Volumenstrom eine deutliche Abhängigkeit der Raumlufffeuchte vom Feuchtegehalt der Außenluft. Zwar spielt auch hier die Temperaturänderung der Luft beim Einströmen in den Raum eine Rolle. Deren Einfluss ist aber weit geringer als im Winter, weil die Temperaturänderung wesentlich geringer ist. Im Sommer sind andererseits die Schwankungen der absoluten Luftfeuchte der Außenluft deutlich höher sind als im Winter. Daher überwiegt im Sommer der Einfluss der Außenluftfeuchte. Dies wird in der Berechnung der Raumlufffeuchte aus dem Lüftungs-Volumenstrom richtig wiedergegeben.
- Die täglichen Schwankungen der Raumlufffeuchte werden mit der Berechnung nach [DIN EN 15026] nicht wiedergegeben. Mit der Berechnung der Raumlufffeuchte aus dem Volumenstrom zeigen sich deutliche tägliche Schwankungen: Wenn morgens um 6:00 Uhr die Lüftung eingeschaltet wird, sinkt die Raumlufffeuchte schnell und steigt ab der Anwesenheit von Personen ab 8:00 Uhr auch schnell wieder an.

Vergleich dieser Raumklima-Modelle

Einen konstanten oder sinusförmigen Verlauf für die Raumlufttemperatur und die Raumluftfeuchte anzunehmen erscheint doch zu stark vereinfacht. Zudem liegt mit den Parametern nach [WTA_6-2-01/D] die Höchsttemperatur recht niedrig und das Temperaturmaximum zu früh im Jahr. Hier sei aber nochmals darauf hingewiesen, dass dieses Modell seit 2013 in den neuen Ausgaben des Merkblattes nicht mehr enthalten ist.

Von den beiden Annahmen nach [DIN EN ISO 13788] (nutzungsabhängiger Feuchteüberschuss im Raum) und nach [DIN EN 15026] (mit der Außenluft ansteigende relative Feuchte im Raum) erscheint letztere plausibler. Bei ausreichender Lüftung wird die Innentemperatur relativ schnell der Außentemperatur folgen. Auch liegen die Feuchtwerte beim Raumklima nach [DIN EN 15026] nicht ganz so hoch wie beim Raumklima nach [DIN EN ISO 13788]. Vor allem im Winter ist die relative Feuchte der Raumluft eher niedrig, weil die kalte Außenluft nur wenig Feuchtigkeit aufnehmen kann und nach ihrer Erwärmung im Raum eine geringe relative Feuchte besitzt. Dies wird nach [DIN EN ISO 13788] nicht wiedergegeben, bei der Berechnung nach [DIN EN 15026] zeigt sich dieser Effekt deutlich.

Auch [Holm08] empfiehlt für Simulationen die Verwendung eines nach [DIN EN 15026] berechneten Raumklimas, wenn keine Messwerte zur Verfügung stehen. Auch er hält die Feuchteklassen 3 bis 5 in [DIN EN ISO 13788] für recht hoch.

Allerdings erscheint eine Begrenzung der Raumtemperatur und der Raumluftfeuchte nach oben nicht gerechtfertigt, wenn keine (ausreichende) Kühlung und Luftentfeuchtung im Gebäude vorgesehen oder vorhanden sind. Daher wurde das Modell noch diesbezüglich variiert. Im Ergebnis steigen die Maximalwerte der Temperatur und der relativen Feuchte der Raumluft im Sommer.

Zum Modell nach [DIN EN 15026] lässt sich sagen, dass die Raumluftfeuchte im Winter vor allem durch die Erwärmung der kalten und somit, absolut gesehen, trockenen Außenluft bestimmt wird. Je kälter die Außenluft, desto stärker muss sie erwärmt werden und desto geringer ist dann ihre relative Feuchte. Daher folgt im Winter der Verlauf der relativen Feuchte der Raumluft in der Tendenz immer der Außenlufttemperatur. Verstärkt wird dieser Effekt noch dadurch, dass im Winter trockene Wetterperioden tendenziell mit kalten Temperaturen verbunden sind und feuchtes Wetter eher mit mäßig kaltem Wetter.

Im Sommer stellt sich die Situation anders dar. Die Außenluft wird nach dem Einbringen in den Raum nur wenig erwärmt oder auch gekühlt. Die Temperaturänderung ist aber in jedem Falle weit geringer als im Winter. Daher wird im Sommer die Raumluftfeuchte hauptsächlich vom Feuchtegehalt der Außenluft bestimmt. Die Außenluft wiederum ist in Mitteleuropa tendenziell bei heißem Wetter trockener und bei nur mäßig warmem Wetter feucht. In Modell nach [DIN EN 15026] wird dieser Effekt durch die Kopplung der Innenraum-Luftfeuchte an die Außentemperatur nicht berücksichtigt.

Durch die Mittelung der Außenlufttemperatur über 24 Stunden werden tageszeitliche Schwankungen geglättet. Dies betrifft sowohl die Temperatur wie auch die Luftfeuchte. Die Wirkung der Luftfeuchte auf und in Bauteilen hängt jedoch auch vom zeitlichen Verlauf von Temperatur und Feuchte ab. Dies gilt sowohl für die Wasserdampfdiffusion in

Bauteilen und die Gefahr deren Durchfeuchtung, wie auch für die Gefahr von Kondensation oder Luftfeuchten über 80 % an den Bauteiloberflächen und die Schimmelpilzgefahr [Ackermann10], [Ackermann15].

Zudem erfolgt die Mittelung der Außentemperatur über einen Zeitraum, der zur Hälfte in der Zukunft liegt. Die der aktuellen Stunde folgenden 11,5 Stunden können aber das Raumklima gar nicht beeinflussen. Der dadurch entstehende Fehler ist vermutlich nicht sehr groß, da sich der Tagesverlauf der Temperatur von einem Tag zum nächsten meist nicht sehr stark ändert. Dennoch sei hier darauf hingewiesen.

Trotz all dieser Kritikpunkte ergibt das Modell nach [DIN EN 15026] von den bis hierher besprochenen Modellen sicher die besten Ergebnisse.

Das nächste vorgestellte Modell berechnet die Innenraum-Luftfeuchte aus dem Lüftungs-Volumenstrom und weiteren Größen. In den oben vorgestellten Beispielberechnungen wurde jeweils eine mittlere Personenbelegungsdichte in der Berechnung aus dem Volumenstrom verglichen mit einer mittleren Feuchtelast nach [DIN EN 15026] und eine hohe Belegungsdichte mit einer hohen Feuchtelast.

Bei hoher Belegungsdichte und hoher Feuchtelast zeigen beide Modelle ähnliche Luftfeuchten im Sommer, aber im Winter zeigt die Berechnung aus dem Volumenstrom geringe Raumluftfeuchten.

Allgemein kann man sagen, die Berechnung aus dem Volumenstrom ergibt stärkere Schwankungen der Raumluftfeuchte sowohl über das Jahr, wie auch kurzfristig aufgrund von Wetteränderungen und noch kurzfristiger im täglichen Rhythmus aufgrund der Ein- und Ausschaltzeiten der Lüftung und der Anwesenheit der Personen. Im gezeigten Ausschnitt für den Zeitraum vom 31.1. bis 14.2. sieht man dies besonders deutlich: Ab 6:00 Uhr morgens, wenn die Lüftung eingeschaltet wird sinkt die Luftfeuchte im Raum durch die kalte Frischluft und ab 8:00 Uhr, wenn die Schulklassen zum Sportunterricht kommen, steigt die Luftfeuchte wieder an.

Eine Berechnung der Raumtemperatur mit thermischen Simulationen und darauf aufbauende Berechnung der Raumluftfeuchte würde hier sicher noch bessere Ergebnisse liefern.

Die genauesten Ergebnisse würde man mit hygrothermischen Gebäudesimulationen erzielen.

Fazit

Die Genauigkeit der Ergebnisse für den zeitlichen Verlauf des Raumluftzustandes nimmt in der Reihenfolge der vorgestellten und besprochenen Berechnungsmodelle zu. Daher sollte dasjenige Berechnungsmodell ausgewählt werden, das unter den gegebenen Voraussetzungen (Datenlage, Simulationsmöglichkeiten etc.) die genauesten Ergebnisse liefert.

Ausblick

[Ackermann10] und [Ackermann15] beschreiben Forschungsprojekte, bei denen der Raumluftzustand in vielen Innenräumen gemessen wird, um daraus Zusammenhänge zwischen Außenluftzustand und Raumluftzustand abzuleiten. Derzeit ist für diese Projekte jedoch noch kein Bericht mit Ergebnissen verfügbar.

Temperaturschichtung in der Halle

[Kuenzel94], S. 33 weist darauf hin, dass sich eine Temperaturschichtung im Raum auf den Feuchte-transport an und in Bauteilen auswirkt und bei Feuchtetransportberechnungen beachtet werden sollte.

Auch in der Sporthalle in Fürth wird sich vermutlich eine Temperaturschichtung einstellen, im Winter und vermutlich auch im Sommer. Jedoch hat die Luftfeuchtigkeit das Bestreben, sich gleichmäßig zu verteilen, und zwar derart, dass der Wasserdampfpartialdruck überall gleich ist. Andererseits: Wenn sich Luft durch die Menschen in der Halle erwärmt und dabei auch Feuchtigkeit aufnimmt, wird sie dadurch aufsteigen und diese Luft, die nicht nur wärmer ist, sondern auch feuchter ist, zum Hallendach aufsteigen. Es gibt also zwei gegenläufige Effekte. Welcher den größeren Einfluss hat, lässt sich höchstens durch Messungen oder durch CFD-Simulationen ermitteln. Beides übersteigt den Rahmen dieser Studie. Daher wird dieser Aspekt nicht in die weiteren Betrachtungen mit einbezogen.

Ausgewählte Wetterdatensätze für das Außenklima und das Raumklima

Wie bereits beschrieben standen die neu entwickelten Hygrothermischen Referenzjahre im Zeitraum der Bearbeitung der Berechnungen für diesen Projektteil noch nicht zur Verfügung. Von den zu jener Zeit verfügbaren Referenzjahren, die auch Regendaten enthalten, konnten also nur die in WUFI pro 5.3 enthaltenen Feuchtereferenzjahre verwendet werden.

Um den Einfluss von besonders warmen oder kalten Jahren untersuchen zu können, stellt WUFI die Möglichkeit zur Verfügung, die Temperatur eines Datensatzes um einen konstanten Betrag nach oben oder nach unten zu verschieben. [DIN EN 15026] schlägt eine Verschiebung von ± 2 K vor, um warme oder kühle Jahre, wie sie ca. einmal in zehn Jahren vorkommen, zu simulieren.

Hier wurde diese Möglichkeit genutzt, um die in WUFI vorhandenen Wetterdaten an die Klima- veränderung und den vom Referenzstandort abweichenden Standort der Sporthalle zu berücksichtigen.

Bei der Verschiebung der Außenlufttemperatur wird der Wert der relativen Feuchte aus der Wetterdaten-Datei unverändert übernommen (Quelle: WUFI-Hilfe Kapitel „Dialog_:Klima: Erweiterte Einstellungen“). Dies führt bei einer Temperaturerhöhung zu einem höheren Wasserdampfdruck, der sich auf die von ihm abhängigen Prozesse auswirkt, wie z.B. die Feuchteübergangsrate zwischen der Luft und Bauteiloberflächen. Dies kann zu einer Erhöhung der Feuchtebelastung durch Kondensation führen.

Auch die Werte aller anderen Größen werden unverändert übernommen. Dies gilt insbesondere auch für die Himmelstemperatur bzw. die vom Himmel und der Umgebung auf die betrachtete Fläche auftreffende langwellige Strahlung. Jedoch ist zu vermuten, dass bei einem Anstieg der Lufttemperatur durch den Klimawandel auch die Himmelstemperatur ansteigt.

Die Erhöhung der Lufttemperatur in den Wetterdaten hat zur Folge, dass der Temperaturunterschied zwischen der Luft und dem Himmel größer wird. Für feuchtetechnische Simulationen von Außenbauteilen bedeutet dies, dass auch die Unterkühlung von Bauteilen etwas zunimmt. In Bezug auf die Beurteilung von Bauteilen führt dies zu einer leichten Überschätzung der Belastung der Bauteile.

Zum Vergleich der langwelligigen Einstrahlung siehe Kapitel „Zusammenstellung und Vergleich der Wetter-Daten“.

Mit diesen Wetterdaten können mittlere Jahre mit aktuellem Klima am Standort der Sporthalle in Fürth und mittlere Jahre mit in ca. 20 Jahren zu erwartendem Klima simuliert werden.

Dabei meint der Ausdruck „mittlere Jahre“ Jahre mit mittelmäßiger Temperatur und mittelmäßiger Luftfeuchte. Jedoch können speziell Jahre, die im Vergleich zum Durchschnitt recht feuchte Jahre sind, hiermit nicht simuliert werden.

Erzeugte Wetterdatensätze für Simulationen

Mit dem in WUFI enthaltenen Wetterdatensatz für Würzburg wurden folgende Wetterdatensätze erzeugt, um diese auch außerhalb von WUFI verwenden zu können.

Es wurden verschiedenen Versionen erzeugt. Diese unterscheiden sich in der Verschiebung der Außenlufttemperatur gegenüber dem ursprünglichen Datensatz und in der Höhe der Feuchtelast im Innenraum.

Inhalt der Wetterdatensätze

Die Wetterdatensätze enthalten

- die von WUFI für die geneigte Dachfläche (Neigung 4° , Azimuth 225°) berechnete Solarstrahlung, ohne Verschattung. Die Albedo der Umgebung ist 0,2. Die Umrechnungen der einzelnen Anteile der Solarstrahlung auf geneigte Flächen werden in [Duffie/Beckman06], Kapitel 1 und in [VDI 3789] beschrieben. Verschattung wird hier nicht berücksichtigt, da für das Dach der Sporthalle keine Verschattung durch Nachbarbebauung oder Bäume zu erwarten ist.
- die von WUFI für die geneigte Dachfläche berechnete langwellige Einstrahlung vom Himmel und der Umgebung
- die Temperatur und die relative Feuchte der Außenluft
- die Regenmenge, hier Normalregen, weil das betrachtete Dach fast nicht geneigt ist.
- Die Windgeschwindigkeit aus dem Wetterdatensatz. Diese kann von WUFI nicht ausgegeben werden. Jedoch kann man in WUFI den äußeren Wärmeübergang getrennt nach konvektivem und radiativem Wärmeübergang berechnen lassen und den konvektiven Wärmeübergang als windabhängig angeben. Den äußeren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten kann man sich ausgeben lassen und daraus auf die Windgeschwindigkeit zurückrechnen.

Für die Windgeschwindigkeit am Ort des zu untersuchenden Membrandaches wurde die Windgeschwindigkeit aus dem Wetterdatensatz übernommen. Diese entspricht der Windgeschwindigkeit 10 m über Grund. Da sich das Dach der Sporthalle ca. 15 m über Geländehöhe befindet und die umliegende Bebauung nicht höher ist, erscheint dies gerechtfertigt.

- Die Temperatur und relative Feuchte der Raumluft, von WUFI berechnet nach [DIN EN 15026]. Es wurden jeweils Datensätze mit Raumluftfeuchte-Werten für normale und für hohe Feuchtelast im Raum erstellt.

Bei Nutzung der Sporthalle für den Schulsport und für Vereinstrainings, bei denen die Sportler und Lehrer / Trainer anwesend sind, aber keine Zuschauer, kann von normaler Feuchtelast ausgegangen werden. Zwar geben Personen bei körperlicher Betätigung vermehrt Feuchtigkeit ab, im Gegenzug sind aber bei dieser Nutzung nur relativ wenig Personen anwesend im Verhältnis zum großen Volumen der Halle.

Die Wetterdatensätze mit Raumlufffeuchtwerten für hohe Feuchtelast sind vermutlich bei Nutzung der Halle für Sport- oder andere Veranstaltungen mit vielen Zuschauern angemessen.

Dieser Datensatz kann auch verwendet werden, um die erhöhte Raumlufffeuchte durch die noch nicht ausgetrocknete Baufeuchte zu berücksichtigen.

Datenquelle	Beschreibung	Einheit
WUFI	Stunde seit Beginn	[h]
berechnet aus "Stunde seit Beginn"	Tag seit Beginn (ganze Zahl)	[--]
berechnet aus "Stunde seit Beginn"	Tag seit Beginn (Dezimalzahl)	[--]
berechnet aus "Tag seit Beginn"	Tag seit 1.Januar	[--]
berechnet aus "Stunde seit Beginn"	Stunde am Tag	[--]
eingefügt	Tag im Monat	[--]
eingefügt	Monat	[--]
WUFI	Regen (Außenklima)	[Ltr/m ² h]
WUFI	Totale Solarstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Direkte Solarstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Diffuse Solarstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Reflektierte Solarstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Gesamte Gegenstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Atmosphärische Gegenstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Terrestrische Gegenstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Reflektierte Atmosphärische Gegenstrahlung auf das Dach (mittlere Dachneigung)	[W/m ²]
WUFI	Außenluft-Temperatur (Außenklima)	[°C]
WUFI	Relative Feuchte (Außenklima)	[%]
WUFI	Innenluft-Temperatur (Innenklima)	[°C]
WUFI	Relative Feuchte (Innenklima)	[%]
WUFI	Luftdruck	[hPa]
WUFI	Wärmeübergangskoeffizient (Außenoberfläche)	[W/m ² K]
berechnet aus dem Wärmeübergangskoeffizienten an der Außenoberfläche	Windgeschwindigkeit	[m/s]

Tabelle: Inhalt des Excel-Blattes mit Wetterdaten

Zeitraum / Dauer der Datensätze

Alle Datensätze erstrecken sich über einen Zeitraum von 25 Monaten, beginnend mit dem 1. Dezember eines Jahres, (z.B. 1.12.2015 – 31.12.2017)

Wetterdaten für erhöhte Feuchtebelastung

Die bisher ausgewählten Wetterdaten stellen Jahre mit durchschnittlichem Wetter dar. Sie eignen sich daher zur Beurteilung des typischen Verhaltens von Bauteilen. Bauteile sollen aber auch bei erhöhter Feuchtebelastung funktionstüchtig bleiben. Daher empfiehlt [WTA_6-1-01/D], S. 6 für Tauglichkeitsbewertungen ein eher „strenges“, ungünstiges Klima anzunehmen. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass für verschiedene Bauteile mit verschiedenem Aufbau, Orientierung und Standort verschiedene Wettergrößen (Temperatur, Feuchte, Niederschlag, Solarstrahlung) eine erhöhte Feuchtebelastung für das Bauteil zur Folge haben können. Somit ist je nach Bauteil ein Jahr mit einem besonders warmen oder einem besonders kühlen und / oder regenreichen Sommer oder mit einem kalten oder milden Winter ein „strenges“ Jahr. [WTA_6-2-14/D], S. 17 gibt zudem zu bedenken, dass Jahre mit besonders „strengen“ Randbedingungen gewöhnlich nicht mehrmals nacheinander auftreten. Deshalb können in mehrjährigen Simulationen mit der wiederholten Verwendung eines „strengen“ Wetterdatensatzes Ergebnisse erzielt werden, die unrealistischerweise ein Versagen des Bauteils vorhersagen. Die Schrift empfiehlt, Wetterdaten mit durchschnittlicher Feuchtebelastung zu verwenden und eine Vergleichsrechnung mit Wetterdaten mit besonders hoher Feuchtebelastung durchzuführen.

Wetterdatensätze für „strenges“ Klima

Trotz der geschilderten Schwierigkeiten, ein geeignetes „strenges“ Klima auszuwählen, sollen hier Überlegungen dazu angestellt werden. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen den drei Problempunkten der hohen Luftfeuchte oder sogar Kondensation an den Innenoberflächen, der Feuchteansammlung im Bauteilquerschnitt durch Wasserdampfdiffusion aus dem Raum in das Bauteil hinein und der Feuchtebelastung von außen durch Niederschlag und nächtliche Unterkühlung der äußeren Schichten.

Hohe Luftfeuchte und evtl. Kondensation an den raumseitigen Oberflächen tritt eher auf, wenn die raumseitigen Oberflächen kühler sind, also in kalten Wintern und / oder wenn die Temperatur und die Luftfeuchte im Raum hoch sind. In Gebäuden ohne Vollklimatisierung, also ohne aktive Luftentfeuchtung, wie es auch in der Sporthalle Fürth der Fall ist, treten hohe Raumlufttemperaturen und -feuchten desto eher auf, je höher die Außenlufttemperatur- und -feuchte sind. Ein Vergleich der berechneten Raumluftfeuchten mit den Raumtemperaturen und daraus abgeschätzten Oberflächentemperaturen für gut gedämmte Bauteile und Wärmebrücken zeigt, dass die Gefahr hoher Oberflächen-Luftfeuchten am ehesten im Herbst besteht, wenn das Wetter kühl und feucht ist, bzw. in relativ milden, feuchten Wintern.

Hohe Feuchtegehalte in Bauteilschichten treten vor allem gegen Ende des Winters auf. Diese Feuchte stammt überwiegend aus dem Innenraum und hat sich während des Winters im Bauteil angesammelt. Problematisch wird der Feuchtegehalt im Bauteil, wenn diese Feuchte kondensiert. Dies geschieht bei niedrigen Temperaturen der äußeren Bauteilschichten, also eher bei kaltem Wetter. Für die Beurteilung der Gefahr von Feuchte innerhalb von Bauteilen sind also Wetterdaten mit besonders kaltem Winter notwendig.

Auf Außenwände, die durch Schlagregen belastet werden, soll hier nicht eingegangen werden. Diese werden in [Zirkelbach16] und in [Browne12] untersucht.

TRY für warmen Sommer und kalten Winter

In Bezug auf die Außenlufttemperatur gibt es mit den TRY von 2010 auch Klimadatensätze für Jahre mit relativ kaltem Winter und für Jahre mit relativ warmem Sommer.

Im Falle, dass auch die nächtliche Unterkühlung der äußeren Bauteilschichten und die dadurch auftretende Kondensation oder Reifbildung mit beurteilt werden soll, ist schwerlich abzuschätzen, ob diese Datensätze hierfür geeignet sind.

Im Sommer und in den Übergangszeiten sind Schönwetterperioden verbunden mit relativ hohen Temperaturen und relativ geringer Luftfeuchtigkeit. Diese Aspekte begünstigen die Trocknung von Bauteilen. Je nach Orientierung des Bauteiles wird dies noch verstärkt durch die Solarstrahlung. Andererseits ist in Schönwetterperioden der Himmel auch nachts klar, so dass die nächtliche Abstrahlung an den Himmel zu einer relativ großen Unterkühlung der Außenbauteile führt, was Kondensation begünstigt. Insgesamt zeigt die Erfahrung, dass die Aspekte, die die Trocknung beschleunigen, überwiegen.

Im Umkehrschluss stellt also ein verregneter, feuchter Sommer mit mäßigen Temperaturen eine höhere Feuchtebelastung dar. Hierfür gibt es jedoch keine Klimadatensätze.

Im Winter sind Schönwetterperioden meist verbunden mit relativ niedrigen Außentemperaturen, dazu mit klarem Himmel, auch nachts. Diese Bedingungen führen also zu einer starken Auskühlung der äußeren Schichten von Bauteilen. Zwar ist die Luftfeuchte in solchen Wetterperioden niedrig, verbunden mit der Tatsache, dass sich der Wasserdampfdruck bei niedrigen Temperaturen mit der Temperatur nur wenig ändert, jedoch zeigt die Erfahrung, dass sich hohe Feuchtegehalte in Bauteilen vor Allem in kalten Wintern einstellen. Auch hier gibt es also wieder Aspekte, die sich gegenläufig auf die Feuchtebelastung auswirken. Aus der Erfahrung lässt sich abschätzen, dass kalte Winter mit einer besonders hoher Feuchtebelastung verbunden sind.

WUFI-Feuchtereferenzjahre für feuchteres Klima

Spezielle Wetterdatensätze für relativ feuchte Jahre zur Simulation erhöhter Feuchtebelastung stehen nicht zur Verfügung. Anhand dieser Betrachtungen scheint es am ehesten angebracht zu sein, aus den in WUFI verfügbaren Feuchtereferenzjahren einen Datensatz mit ähnlicher mittlerer Jahrestemperatur, aber mit maritimem Klima auszuwählen. In maritimem Klima sind die Winter milder und die Sommer auch, also weniger heiß. Dazu ist ganzjährig die Luftfeuchtigkeit höher als im Binnenland.

Von diesen gibt es als in Frage kommende Datensätze diejenigen für Bremerhaven und für Hannover.

Die beiden Datensätze für Hannover und Bremerhaven zeigen ähnliche Jahresmitteltemperaturen wie derjenige für Würzburg. Für Simulationen sollte jeweils wieder die Temperatur angepasst werden.

Die Regensumme, das Jahresmittel der relativen Luftfeuchte nehmen von Würzburg nach Hannover nach Bremerhaven zu, wie man es aufgrund der abnehmenden Entfernung vom Meer erwartet. Diese beiden Klimadatensätze eignen sich also zur Simulation des Membrandaches bei hoher Feuchtebelastung.

Dabei stellt sich prinzipiell die Frage, unter welchen Feuchtebelastungen das Bauteil auch über Jahre hinweg funktionstüchtig bleiben muss. Entsprechend sollte der Datensatz gewählt werden.

Für Simulationen mit strengem Klima wurde auch die Verwendung des Feuchtereferenzjahres von Holzkirchen mit für Deutschland relativ kühlem, feuchtem Klima vorgeschlagen.

Gemessene Wetterdaten eines relativ feuchten Jahres

Falls langjährig gemessene Wetterdaten am Standort des Gebäudes oder dessen Nähe zur Verfügung stehen und diese auch die Niederschlagsmenge enthalten, kann aus diesen ein Zeitraum über mehrere Jahre ausgewählt werden, der auch ein besonders feuchtes Jahr enthält.

Serien von normalen und kalten Hygrothermischen Referenzjahren

Im Rahmen der Entwicklung der Hygrothermischen Referenzjahre [Schoener/Zirkelbach16] wurden für die vier für die Simulationen ausgewählten Bauteile auch Simulationen mit verschiedenen Folgen von normalen und kalten Referenzjahren durchgeführt. Die kalten Referenzjahre wurden aus den normalen Referenzjahren durch Verschiebung der Außenlufttemperatur um - 2 K abgeleitet.

Alle Simulationen wurden über einen Zeitraum von acht Jahre durchgeführt. Die Abfolgen der normalen und kalten Referenzjahre waren

- 8 normale Referenzjahre
- 2 kalte Jahre und 6 normale Jahre
- 3 normale, 2 kalte und 3 normale Jahre
- 6 normale Jahre und 2 kalte Jahre

Es zeigte sich, dass das Einschwingen des Feuchtegehaltes der Bauteile zwei bis drei Jahre dauert. Für die ersten drei Jahre der Simulationen sollten also die normalen Referenzjahre verwendet werden. Die Verwendung von zwei kalten Referenzjahren stellt bereits eine strenge Anforderung dar. Mehr als zwei aufeinanderfolgende kalte Jahre sind sehr unwahrscheinlich. Daher sollten für Simulationen nicht mehr als zwei kalte Referenzjahre in Folge verwendet werden. Um das Austrocknungspotential eines Bauteils nach einer ungewöhnlich hohen Feuchtebelastung beurteilen zu können, sollten in Simulationen auf zwei kalte noch mindestens drei normale Jahre folgen.

Die in [Schoener/Zirkelbach16] beschriebenen Simulationen zeigten gute Übereinstimmung mit Simulationen mit gemessenen Wetterdaten, die auch ein besonders kaltes Jahr enthielten. Daraus begründet sich diese Empfehlung für die Verwendung von drei normalen, zwei kalten, gefolgt von drei normalen Referenzjahren, um die Tauglichkeit von Bauteilen zu beurteilen.

Hygrothermische Berechnungen

Eine dauerhafte Funktionstüchtigkeit von Wand- und Dachaufbauten setzt voraus, dass sich nirgends im Bauteilquerschnitt dauerhaft Wasser ansammelt, sei es durch eindringendes Wasser oder durch eindringenden Wasserdampf, der innerhalb des Bauteils kondensiert.

Für das Membrandach der Sporthalle in Fürth bedeutet dies, dass sich im Wärmedämm-Material und in der Luftschicht unterhalb der Wärmedämmung nicht über längere Zeit hinweg Wasser ansammeln darf, sondern sich evtl. bildendes Kondenswasser immer wieder abgeführt wird und der Rest abtrocknet. Aber auch die Oberseite der Unterspannbahn sollte größtenteils frei von Wasser sein. Befindet sich auf der Unterspannbahn eine Wasser-, Schnee- oder Eisschicht, so herrscht dort der Wasserdampfdruck entsprechend einer relativen Feuchte von 100 %. Unter diesen Umständen kann eingedrungene Feuchtigkeit nicht nach außen abtrocknen.

Für ein hygienisches Raumklima dürfen sich an den raumseitigen Bauteiloberflächen keine Schimmelpilze bilden.

Um dies im Vorfeld beurteilen zu können, stehen verschiedenen Berechnungsmethoden zur Verfügung, auf die später eingegangen wird.

Abgrenzung dieser Studie gegen damit zusammenhängende Themen

Auf die Notwendigkeit des sachgerechten Einbaus der Membranen, so dass alle Ebenen entwässert werden, weist auch [Schmid04], Teil 2 hin. Hierfür müssen die äußere und die innere Membran und die Unterspannbahn so gespannt werden, dass sich keine Senken bilden, in denen sich Wasser ansammeln kann.

In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass alle Membranen fachgerecht eingebaut werden, so dass

- sich keine Wassertaschen oder Wasserlachen bilden,
- es keinen Eintrag von flüssigem Wasser in die Wärmedämmschicht gibt. d. h. es wird vorausgesetzt, dass alle Verbindungen der Membranen untereinander und mit anderen Bauteilen wasserdicht sind.
- alle Verbindungen zwischen Membranen und Anschlüsse von Membranen an andere Bauteile mindestens so wasserdampfdiffusionsdicht sind wie die Membranen selbst.

Für die in dieser Studie vorgenommenen Berechnungen wurde dies stets vorausgesetzt.

Die Gefahr von Korrosion und Degradation der Materialien kann nicht beurteilt werden, da die erforderlichen Kompetenzen und Kenntnisse nicht vorhanden sind und im Rahmen der begrenzten Teilaufgabe des Projektes nicht erarbeitet werden können. Laut [WTA_6-2-14/D], S. 6 werden Berechnungsmodelle zum Wachstum von Frostschäden und Korrosion derzeit entwickelt. Ebenso kann der Einfluss von Alterung und Verschmutzung nicht quantitativ bewertet werden, da keine Daten zur Alterung und Verschmutzung der Materialien vorliegen.

Berechnungsverfahren

Im Folgenden werden die Berechnungsverfahren vorgestellt. Die Berechnungen und Ergebnisse für das Membrandach der Sporthalle in Fürth werden im nächsten Kapitel angegeben.

Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach [DIN EN ISO 6946]

Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) eines Bauteiles ist nicht nur zur Beurteilung des Wärmeschutzes notwendig, sondern wird auch für die Berechnungen zum Feuchteschutz benötigt.

Bei der Berechnung des U-Wertes des Membrandaches sind einige Besonderheiten zu beachten, die bei der U-Wert-Berechnung üblicher Wände nicht auftreten. Daher wird die Berechnungsmethode nach [DIN EN ISO 6946] hier nochmals beschrieben, unter Berücksichtigung dieser Besonderheiten.

Da der Dachzwischenraum zwischen äußerer Membran und dem inneren Dachaufbau gut belüftet ist, wird zur Berechnung des U-Wertes des Daches nur der innere Dachaufbau betrachtet.

Der U-Wert des Bauteils, hier also des inneren Dachaufbaus, ist der Kehrwert dessen Wärmedurchgangswiderstandes

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Der Wärmedurchgangswiderstand des Bauteiles wiederum ist eine Summe der Wärmedurchlasswiderstände der einzelnen Schichten des Bauteils und der inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände.

$$R_T = R_{Si} + \sum R_i + R_{Se}$$

mit

R_T = Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils

R_{Si} = innerer Wärmeübergangswiderstand

R_{Se} = äußerer Wärmeübergangswiderstand

R_i = Wärmedurchlasswiderstände der Bauteilschichten

Der Wärmeübergangskoeffizient der inneren Luftgrenzschicht

Für den inneren Wärmeübergangswiderstand R_{Si} wird der in [DIN EN ISO 6946] S. 9 angegebene konventionelle Wärmeübergangswiderstand für aufsteigenden Wärmestrom von $0,1 \text{ (m}^2 \text{ K) / W}$ verwendet.

Der Wärmeübergangskoeffizient der äußeren Luftgrenzschicht

Für den äußeren Wärmeübergangswiderstand R_{Se} wird nicht der übliche Wärmeübergangswiderstand für äußere Oberflächen verwendet, da die Unterspannbahn an den Luftzwischenraum grenzt mit der äußeren Membran als gegenüberliegender Oberfläche.

Der äußere Wärmeübergangswiderstand wird nach Anhang A.1 von [DIN EN ISO 6946] berechnet.

$$R_{Se} = \frac{1}{h_c + h_r}$$

mit

h_c = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

h_r = radiativer Wärmeübergangskoeffizient

$$h_c = h_{ci}$$

mit

h_{ci} = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient innen

Für Außenoberflächen, die an eine gut belüftete Luftgrenzschicht (hier der Membrandach-Zwischenraum) angrenzen, gibt [DIN EN ISO 6946], S. 18 einen konvektiven

Wärmeübergangswiderstand $h_c = h_{ci}$ von $5 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$ an bei aufsteigendem Wärmestrom.

Der radiative Wärmeübergangswiderstand wird nach [DIN EN ISO 6946], S. 17 und S. 18 anhand der Näherungsformel als Funktion der mittleren Oberflächentemperatur berechnet.

$$h_r = \varepsilon_{eff} 4 \sigma T_m^3$$

mit

ε_{eff} = kombinierter Emissionskoeffizient der beiden Oberflächen im Strahlungsaustausch

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,6710^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$

T_m = mittlere Temperatur der Oberflächen

Die Berechnungen für die äußere Membran zeigen, dass deren Oberfläche im Mittel geringfügig unterhalb der Außenlufttemperatur liegt. Für die Temperatur der Unterspannbahn kann deren Oberflächentemperatur als geringfügig über der Temperatur der Außenluft angenommen werden. Daher wird für die mittlere Temperatur im Luftzwischenraum die Temperatur der Außenluft verwendet. Da diese nicht konstant ist, wird hier die mittlere Temperatur während der Heizperiode zu 0 °C , also $273,15\text{ K}$, abgeschätzt.

Zur Berechnung des kombinierten effektiven Emissionsgrades ε_{eff} soll nach [DIN EN ISO 6946] von 2018, S. 35 für die Oberflächen jeweils ein Wert von 0,9 verwendet werden oder alle Einflüsse der Alterung und Verschmutzung mit berücksichtigt werden. Der thermische hemisphärische Emissionsgrad der äußeren Folie liegt nach den Messungen am ZAE Bayern bei 0,89 im Neuzustand. Im langfristigen Einsatz dürfte sich dieser Wert noch etwas an den Wert annähern, den man für allgemeine Oberflächen verwendet, also 0,9. Ähnliches gilt für die Unterspannbahn. Zur Berechnung des kombinierten Einflusses der Emissionskoeffizienten wird also für beide Membranen der Wert von **0,9** für den thermischen Emissionsgrad verwendet.

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

mit

$\varepsilon_1, \varepsilon_2 =$ Emissionskoeffizienten der beiden Oberflächen im Strahlungsaustausch

Damit ergibt sich für den radiativen Wärmeübergangskoeffizienten ein Wert von

$$h_r = 3,182 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \text{ und für den äußeren Wärmeübergangswiderstand ein Wert von } R_{Se} = 0,114 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}.$$

Die Wärmedurchlasswiderstände massiver Bauteilschichten

Die Wärmedurchlasswiderstände R_{Si} massiver Bauteilschichten berechnen sich aus

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i}$$

mit

$d_i =$ Dicke der Bauteilschicht i

$\lambda_i =$ Wärmeleitfähigkeit der Bauteilschicht i

mit Werten für die Wärmeleitfähigkeiten λ_i nach [DIN EN ISO 10456] oder als Mess- oder Tabellenwerte.

Die Wärmedurchlasswiderstände von Luftschichten

Eine Luftschicht ist nach [DIN EN ISO 6946] charakterisiert durch folgende Eigenschaften:

- Sie ist begrenzt von parallelen Begrenzungsflächen.
- Die Emissionsgrade der Grenzflächen sind $> 0,8$.
- Es findet kein Luftaustausch mit dem Innenraum statt.
- Ihre Dicke ist $< 1/10$ ihrer Breite und Länge.
- Es ist eine ruhende Luftschicht.

Dicke der Luftschicht	Wärmedurchlasswiderstand		
	$m^2 K / W$		
	Richtung des Wärmestromes		
mm	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
0	0	0	0
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

Tabelle: Wärmedurchlasswiderstand von Luftschichten nach [DIN EN ISO 6946]. Für Zwischenwerte kann interpoliert werden.

Diese Kriterien sind für die Luftschicht zwischen der inneren Membran und der Wärmedämmung zutreffend. Im Membrandach der Sporthalle Fürth beträgt die Dicke dieser Luftschicht 4 cm. Ihr Wärmedurchlasswiderstand beträgt also $0,16 \frac{m^2 K}{W}$.

Korrekturen für den U-Wert

Nach [DIN EN ISO 6946] S. 27 ist der so errechnete Wärmedurchgangskoeffizient noch um einen Betrag ΔU zu korrigieren, wenn

- in der Wärmedämmschicht Luftspalte vorhanden sind
- die Bauteilschichten von Befestigungselementen durchdrungen werden oder
- bei Niederschlag auf Umkehrdächern

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r$$

mit

ΔU_g = Korrektur für Luftspalte in Bauteilschicht

ΔU_f = Korrektur für Durchdringungen

ΔU_r = Korrektur für Umkehrdächer

Die ersten beiden Kriterien treffen auf das betrachtete Membrandach zu.

Korrektur für Luftspalte in der Wärmedämmschicht

Membrandächer sind durch Winddruck und Windsog in ständiger Bewegung. Daher ist zu erwarten, dass sich selbst bei sorgfältiger Befestigung der Dämmelemente mit der Zeit Spalte zwischen diesen bilden werden. Für Luftspalte, die senkrecht zur Dämmebene verlaufen, sieht [DIN EN ISO 6946] S. 27 einen Wert $\Delta U''$ von $0,04 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ vor.

Dieser Wert gilt eigentlich für Luftspalte, die von der warmen zur kalten Seite durchgehend sind, jedoch nicht bei versetzten Fugen. Der Wert wird hier dennoch verwendet. Es ist möglich, dass sich Spalte in Richtung der Dämmebene und senkrecht zur Dämmebene bilden werden. Diese können dann auch im Luftaustausch stehen. Beide einzeln führen nach [DIN EN ISO 6946] S. 27 nicht zu einer Erhöhung des U-Wertes. Aber es ist denkbar, dass sich diese Luftspalte verbinden werden und dann so wie durchgehende Spalte wirken. Zudem liegt man mit einer Abschätzung nach oben auf der sicheren Seite. Diese Vorgehensweise folgt der üblichen Vorgehensweise der Normung, Wärmeverluste im Zweifelsfall eher als etwas zu hoch zu berechnen.

Dieser Wert $\Delta U''$ muss jedoch noch umgerechnet werden in den Wert zur Erhöhung des U-Wertes durch die Luftspalte ([DIN EN ISO 6946] S. 29), ΔU_g :

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_i}{R_{T,h}} \right)^2$$

mit

R_i = Wärmedurchlasswiderstand der Bauteilschicht mit Luftspalten,
berechnet ohne Luftspalte

$R_{T,h}$ = Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils

Korrektur für Durchdringungen

Die U-Wert-Erhöhung aufgrund der Durchdringungen ergibt sich aus der Formel ([DIN EN ISO 6946] S. 30)

$$\Delta U_f = n_f \chi$$

mit

n_f = flächenbezogene Anzahl der Durchdringungen

χ = punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Durchdringung

Anzahl der Durchdringungen

Die Anzahl der Durchdringungen der Wärmedämmschicht ergibt sich aus dem Aufbau des Daches.

Abschätzung für den X-Wert einer Durchdringung

Der χ -Wert einer Durchdringung sollte nach [DIN EN ISO 10211] berechnet werden. In [DIN EN ISO 6946] S. 30/31 wird auch ein Näherungsverfahren angegeben. Es gilt jedoch nicht, wenn beide Enden der Durchdringung mit Metallplatten verbunden sind. Nach diesem Verfahren wird der χ -Wert einer Durchdringung aus deren Abmessungen und ihrer Wärmeleitfähigkeit berechnet. Zudem wird noch berücksichtigt, welchen Anteil des gesamten Bauteils die Durchdringungen durchstoßen ([DIN EN ISO 6946] S. 30/31).

$$\chi = \alpha \left(\frac{R_i}{R_{T,h}} \right)^2 A \frac{\lambda}{d}$$

mit

α = Korrekturfaktor = 0,8 für gänzlich durchstoßene Bauteilschichten

A = Querschnittsfläche der Durchdringung

λ = Wärmeleitfähigkeit der Durchdringung

d = Dicke der durchstoßenen Schicht

Beurteilung der Gefahr von Tauwasser und Schimmelbildung an raumseitigen Oberflächen

Raumseitige Oberflächen können bei schlechtem Wärmeschutz und ungünstiger Witterung so weit abkühlen, dass dort Kondenswasser aus der Raumluft ausfällt. Dies ist dann der Fall, wenn die Raumluft, die an der Oberfläche deren Temperatur annimmt, so weit abkühlt, dass ihre relative Feuchte 100 % erreicht.

Für die meisten Bauteile wird jedoch gefordert, dass die relative Feuchte der Luft an der Oberfläche 80 % nicht überschreitet. Der Grund liegt darin, dass bereits ab Luftfeuchten von 80 % Schimmelpilzbildung auftreten kann, wenn die Bauteiloberfläche ein geeignetes Substrat für das Schimmelwachstum darstellt und diese Bedingungen über längere Zeit herrschen. Dies gilt im Besonderen für organische Materialien wie Holz, Papiertapeten etc. Man gibt eine Mindesttemperatur von 12,6 °C für die raumseitige Oberflächen vor, die bei winterlichen Außentemperaturen von - 5 °C an der Oberfläche herrschen soll. Bei einem Innenraumklima von 20 °C und 50 % relativer Feuchte ([DIN 4108], Teil 2, S. 18 und S. 19 und Teil 3, S. 38) herrscht dann an der Oberfläche eine relative Feuchte von höchstens 80 % und Tauwasser und Schimmelwachstum werden vermieden [Sedlbauer/Kiessl02], S. 5. Mit diesen Vorgaben werden dennoch bei in Deutschland selten auftretendem kälterem Wetter geringere Oberflächentemperaturen auftreten. Dies ist dann jedoch nur vorübergehend der Fall, so dass dennoch nicht mit Schimmelbefall zu rechnen ist. Schimmelpilzwachstum wurde von [Sedlbauer01] eingehend untersucht. [Sedlbauer/Kiessl02] gibt einen kurzen Überblick zum Thema.

Die genannten Randbedingungen gelten nach [DIN 4108], Teil 2, S. 18 und S. 19 für Wohnräume und wohnähnlich genutzte Räume. Für andere Nutzungen werden jedoch keine Randbedingungen angegeben. Zwar ist Sport keine wohnähnliche Nutzung, die Untersuchungen zum anzunehmenden Raumklima für die betrachtete in Fürth Sporthalle zeigen jedoch, dass in der Sporthalle im Winter nicht mit höheren Raumluftfeuchten zu rechnen ist als 50 %, eher mit niedrigeren Luftfeuchten. Daher müssen die Anforderungen an die Oberflächentemperatur nicht verschärft werden.

[DIN 4108], Teil 2, S. 18 und [DIN EN ISO 13788], S. 12 und S. 14 erlauben an Fenstern und Pfosten-Riegel-Konstruktionen mit nicht-feuchteabsorbierenden Oberflächen das vorübergehende Auftreten von Tauwasser. Als Bedingung wird hier noch gestellt, dass das Tauwasser nicht in Kontakt mit angrenzenden, empfindlichen Materialien kommen kann.

Dies begründet sich in den im Allgemeinen feuchteunempfindlichen Oberflächen (Glas, Metall, Kunststoff, lackierte Oberflächen) von Verglasungen und Rahmen. Diese Toleranz gegenüber kurzzeitigem Tauwasserauftreten ist wahrscheinlich aber auch einfach der Realität geschuldet, da kalte Oberflächentemperaturen speziell am Verglasungsrand nur schwierig zu vermeiden sind.

Die kritische Luftfeuchte an Fenstern und Pfosten-Riegel-Konstruktionen beträgt also 100 % und die Mindest-Oberflächentemperatur unter sonst gleichen Randbedingungen beträgt dann 9,3 °C .

An dieser Stelle wird auf die Behandlung von Fenstern in der Normung deswegen hingewiesen, weil es für Konstruktionen wie Membrandächer dort keine Aussagen gibt. Die Begründungen für die

großzügigeren Anforderungen an die Fenster im Vergleich zu Mauerwerk etc. können aber auch auf Membrandächer und Membranaufbauten übertragen werden:

- Die Materialien sind feuchteunempfindlich,
- sie sind kein gutes Substrat für Schimmelwachstum und
- Wärmebrücken lassen sich durch die notwendigen Befestigungen der Membranen kaum vermeiden.
- Eine weitere Gemeinsamkeit von Membranaufbauten mit Fenstern besteht in deren geringer thermischer Masse.

Nach Einschätzung der Autorin können Membranaufbauten daher in Bezug auf die Anforderungen zur Vermeidung von Tauwasser an den inneren Oberflächen wie Fenster behandelt werden. Dies gilt für Membranen aus PVC-oder PTFE-beschichtetem Gewebe, für ETFE-Folien, für Metallträger mit gutem Korrosionsschutz etc. Bei Holzträgern sollten eher die strengeren Anforderungen wie für übliche Wände zugrunde gelegt werden. Für Holzwerkstoffe gibt [DIN 68800], Teil 2 zudem eine Obergrenze für den Feuchtegehalt des Holzes von 20 % an [Sedlbauer/Kiessl02], S. 4.

Weitere Ausnahmen bilden Eissporthallen und Schwimmhallen. Bei Eissporthallen wird die innere Oberflächentemperatur zusätzlich durch den kalten Hallenboden beeinflusst und abgekühlt. Decken von Eissporthallen sind daher besonders feuchtegefährdet und müssen gesondert behandelt werden.

Bei Schwimmhallen muss von einer erhöhten Raumluftfeuchte ausgegangen werden, sofern die feuchte Hallenluft nicht durch einen hohen Lüftungsvolumenstrom ständig abgeführt oder durch eine Klimaanlage entfeuchtet wird.

Der Temperaturfaktor f_{Rsi}

Aus der Forderung, dass die Luft an der Bauteiloberfläche nicht so weit abkühlt, dass ihre relative Feuchte über den kritischen Wert (80 % oder 100 % je nach Bauteil) übersteigt, ergibt sich die Formel

$$\varphi_{cr} p_{sat}(\vartheta_{si,min}) = \varphi_i p_{sat}(\vartheta_i)$$

mit

φ_{cr}	=	kritische relative Feuchte
p_{sat}	=	Wasserdampf-Sättigungsdampfdruck
$\vartheta_{si,min}$	=	Mindesttemperatur der raumseitigen Bauteiloberfläche
φ_i	=	relative Feuchte der Raumluft
ϑ_i	=	Temperatur der Raumluft

Gleichung (3) in [DIN 4108], Teil 3 von 2018, S. 14 ist äquivalent zu dieser Gleichung.

Dabei wird der Wasserdampfdruck an der Oberfläche gleich dem Wasserdampfdruck in der Raumluft gesetzt. Dies ist gleichbedeutend mit der Annahme, dass es keinen Feuchteübergangswiderstand zwischen Raumluft und Oberfläche gibt.

Setzt man in die obige Formel für den Sättigungsdampfdruck die Magnus-Formel ein und löst die Gleichung nach der Mindest-Oberflächentemperatur $\vartheta_{si,min}$ auf, erhält man die Formel

$$\vartheta_{si,min} = \frac{b \left[\ln \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{cr}} \right) + \frac{a \vartheta_i}{\vartheta_i + b} \right]}{a - \left[\ln \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{cr}} \right) + \frac{a \vartheta_i}{\vartheta_i + b} \right]}$$

mit

$a, b =$ Parameter der Magnus-Formel

oder etwas vereinfacht

$$\vartheta_{si,min} = b \left\{ \frac{a}{a - \left[\ln \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{cr}} \right) + \frac{a \vartheta_i}{\vartheta_i + b} \right]} - 1 \right\}$$

In den Normen [DIN 4108], Teil 3, S. 36 und [DIN EN ISO 13788], S. 7 werden die oben angegebenen Kriterien für den Feuchteschutz durch den Temperaturfaktor f_{Rsi} ausgedrückt. Dieser ist definiert als

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e}$$

mit

$\vartheta_{si} =$ innere Oberflächentemperatur

$\vartheta_i =$ Temperatur im Raum

$\vartheta_e =$ Außenlufttemperatur

Bei den oben angegebenen Randbedingungen im Außen- und im Innenraum ergeben sich hiermit Mindestwerte für den Temperaturfaktor von

$f_{Rsi} = 0,7$ bei einer kritischen Luftfeuchte von 80 %

$f_{Rsi} = 0,57$ bei einer kritischen Luftfeuchte von 100 %

Für ebene, homogene Bauteile kann der Temperaturfaktor aus den Wärmeübergangswiderständen und den Wärmedurchlasswiderständen der Bauteilschichten, bzw. dem Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils berechnet werden.

$$f_{R_{si}} = \frac{R - R_{si}}{R} = \frac{R_{se} + \sum R_i}{R_{se} + \sum R_i + R_{si}}$$

mit

R = Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils

R_{si} = raumseitiger Wärmeübergangswiderstand

R_{se} = außenseitiger Wärmeübergangswiderstand

R_i = Wärmedurchlasswiderstand der Bauteilschichten

In dieser Formel zur Berechnung des Temperaturfaktors soll jedoch ein verminderter innerer Wärmeübergangskoeffizient von $4 \frac{W}{m^2 K}$ angenommen werden, also $R_{si} = 0,25 \frac{m^2 K}{W}$. Dies trägt einem eventuell verminderten Wärmeübergang in Ecken und Kanten und hinter Möbeln etc. Rechnung.

Der geforderte Mindestwert für den Temperaturfaktor von 0,7 wird von Bauteilen mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $\leq 1,2 W / (m^2 K)$, wie er in [DIN 4108], Teil 2, S. 15 gefordert wird, bereits erfüllt. Flächige Bauteile müssen also meist nicht auf ihren Temperaturfaktor hin untersucht werden. Wichtig ist die Untersuchung von Wärmebrücken.

Für inhomogene Bauteile und Wärmebrücken müssen 2D- oder bei Bedarf 3D-Finite-Elemente-Methoden zur Berechnung der niedrigsten Temperatur an der raumseitigen Oberfläche verwendet werden.

Dabei ist auch bei dieser Berechnungsmethoden für beheizte Räume ein erhöhter Wert von $0,25 \frac{m^2 K}{W}$ für den inneren Wärmeübergangswiderstand anzunehmen [DIN 4108], Teil 2, S. 19.

Die folgende Tabelle fasst nochmals alle Zahlenwerte zusammen.

	Temperatur	relative Feuchte	Wärmeübergangswiderstand
	[°C]	[%]	[m ² K / W]
Außenluft	-5		0,04
Raumluft	20	50	0.25
Mindest-Temperatur an raumseitigen Oberflächen	12.6		

	übliche Oberflächen	Fenster, Pfosten-Riegel-Konstruktionen
kritische Luftfeuchte [%]	80	100
Temperaturfaktor f_{Rsi}	0,7	0,57
Mindest-Temperatur an raumseitigen Oberflächen	9,3	

Tabelle: Zusammenstellung der Vorgaben zur Beurteilung des Schimmelrisikos an inneren Bauteiloberflächen

Beurteilung der Gefahr von Tauwasser im Bauteilquerschnitt

Tauwasser innerhalb eines Bauteils führt zu dessen Durchfeuchtung und in deren Folge zu einer Schimmelpilzbildung und zum anderen zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe. Bei Faserdämmstoffen führt dies auch zur Zerstörung des Materials, weil es in sich zusammensackt. Daher ist Tauwasser in den Bauteilen auf jeden Fall zu vermeiden.

In den Normen sind praktisch 3 Stufen zur Beurteilung der Gefahr von Tauwasser im Bauteilquerschnitt beschrieben.

Stufe 1

Bestimmte, in [DIN 4108], Teil 3 beschriebene Dach- und Wandkonstruktionen haben sich nach langjähriger Erfahrungen bewährt und bedürfen daher keines gesonderten Nachweises der Tauwasserfreiheit.

Stufe 2

Das Glaser-Verfahren ist ein relativ einfaches rechnerisches Verfahren zur Beurteilung der Tauwassergefahr in Bauteilen. Als es im Jahre 1959 entwickelt und im Jahr 1981 in die Normung aufgenommen wurde, standen Personal-Computer noch nicht zur Verfügung. Die Durchführbarkeit der Berechnungen mit einfachen Mitteln war daher sehr wichtig. Dennoch ist das Glaser-Verfahren bis heute ein wichtiges Instrument zur Abschätzung der Tauwassergefahr. Es liefert Ergebnisse, die die Tauwassergefahr eher überschätzen. Bauteile, die in den Geltungsbereich der Norm fallen und nach den Ergebnissen des Glaser-Verfahrens nicht tauwassergefährdet sind, bedürfen daher keines weiteren Nachweises.

Die begrenzte Aussagefähigkeit des Glaser-Verfahrens ist auch den Erarbeitern der Norm bewusst. Daher darf dieses Verfahren nach [DIN 4108], Teil 3 nur für flächige Außenbauteile von Gebäuden mit wohn- und wohnähnlicher Nutzung und ohne Klimatisierung angewandt werden. Das etwas detailliertere Verfahren nach [DIN EN ISO 13788] ist für alle Gebäude anwendbar.

Stufe 3

Alle anderen Bauteile und Konstruktionen sind mittels hygrothermischen Simulationen auf die Tauwassergefahr hin zu überprüfen.

Glaser-Verfahren nach [DIN 4108], Teil 3

Das Glaser-Verfahren nach [DIN 4108], Teil 3 berechnet für die winterliche Tauwasserperiode die Menge an Tauwasser, die in das Bauteil eindringt und für die sommerliche Verdunstungsperiode die Menge an Wasser, die aus dem Bauteil abtrocknet. Wenn die flächenbezogene Tauwassermenge den in der Norm festgelegten Maximalwert nicht übersteigt und während der Verdunstungsperiode im Sommer wieder austrocknet, ist das Bauteil als sicher zu betrachten. Den Berechnungen sind dabei der Bauteilaufbau und die in der Norm angegebenen Randbedingungen für das Außen- und das Innenraumklima zugrunde zu legen.

Seit der neuen Ausgabe dieser Norm von 2014 gilt dieses Verfahren jedoch nur für Wohngebäude.

Glaser-Verfahren nach [DIN EN ISO 13788]

Das Glaser-Verfahren nach [DIN EN ISO 13788] berechnet die Feuchtemengen im Gegensatz zum Verfahren nach [DIN 4108], Teil 3 nicht nur für die Winter- und Sommerperiode, sondern aufgeschlüsselt nach einzelnen Monaten.

Diese Norm gilt für alle Gebäude.

Allerdings werden keine monatlichen Werte für das anzunehmende Außenklima angegeben. Die Norm gibt Verfahren an, diese Werte zu ermitteln. Jedoch beruhen diese auf langjährig gemessenen Wetterdaten am Standort, die meist nicht zur Verfügung stehen. Zudem sind diese Verfahren so komplex und zeitaufwändig, dass dies in der Praxis nicht durchführbar ist.

Beschränkungen des Glaser-Verfahrens

Kapillarwassertransport, der Einfluss von Solarstrahlung und Luftleckagen können mit den Glaser-Verfahren nicht berücksichtigt werden. Dies gilt für beide beschriebenen Glaser-Verfahren.

Kapillarwassertransport

Bei hohen Materialfeuchtegehalten und speziell, wenn sich bereits Tauwasser im Bauteil gebildet hat, aber auch, wenn das Bauteil nass wird, z. B. durch Schlagregen, wird Wasser innerhalb des Baustoffes durch die Kapillarkräfte in den Poren des Baustoffes transportiert. Dieser Feuchtigkeitstransport kann mit den Glaser-Verfahren nicht berechnet werden.

Solarstrahlung

Für die meisten opaken Bauteile ist der Einfluss der Solarstrahlung gering und vernachlässigbar. Es gibt jedoch Fälle, in denen der Einfluss der absorbierten Solarstrahlung und die damit verbundenen Temperaturerhöhung im Bauteil sich deutlich auf das hygrothermische Verhalten des Bauteiles auswirkt. So wird in [Dregger12] und [Ennis/Kehrer13] von Flachdächern berichtet, bei denen eine dunkle Dachbahn durch eine helle Dachabdeckung ersetzt wurde. Die verminderte Absorption von Solarstrahlung führte zwar zu einer geringeren Kühllast, jedoch auch zu einer geringeren Abtrocknungsrate von Feuchtigkeit aus der Wärmedämmung des Daches. In der Folge traten Tauwasserprobleme auf. Bei den erwähnten Gebäuden scheint jedoch keine Dampfbremse zwischen Raumluft und Isoliermaterial des Daches vorhanden gewesen zu sein.

Bei transluzenten Materialien tritt auch Absorption von Solarstrahlung innerhalb des Materials auf und kann den Wärme- und Feuchtehaushalt des Bauteils deutlich beeinflussen. **Irgendwo hatte ich eine handschriftliche Berechnung dazu**

Luftleckagen

[Zirkelbach09] und [Schwaller16] weisen darauf hin, dass bei Leichtbauteilen praktisch immer, auch bei sorgfältiger Bauausführung, Luftleckagen vorhanden sind. Durch diese Leckagen wird zumindest zeitweise, abhängig von den Temperatur- und Druckverhältnissen, auch Feuchtigkeit in die Konstruktion eindringen.

[DIN 68800] zum Holzschutz, Teil 2, S. 11 verlangt für beidseitig geschlossene Bauteile - mit Ausnahmen - bei Berechnungen mit dem Glaser-Verfahren nach [DIN 4108], Teil 3 den Nachweis einer Trocknungsreserve von $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ a})$ bei Dächern und bei Wänden und Decken einer Trocknungsreserve von $100 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ a})$.

Luftspalte in der Wärmedämmung

Luftspalte in der Wärmedämmung oder um einzelne Wärmedämmplatten herum können bei der Berechnung des U-Wertes des Dachaufbaus berücksichtigt werden. Bei der Berechnung des hygrischen Verhaltens des Bauteils nach dem Glaser-Verfahren kann dieser Einfluss nicht berücksichtigt werden. Im Vergleich zum Wärmedämmstoff kann in diesen Luftspalten Luftzirkulation von der warmen zur kalten Seite der Dämmstoffebene stattfinden, welcher nicht nur den Wärmetransport, sondern auch den Feuchtigkeitstransport von der warmen Innenmembran zur kalten Unterspannbahn erhöht. Dies wird mit dem Glaser-Verfahren ebenfalls nicht abgebildet.

Temperatur- und Feuchtegehaltsabhängigkeit der Materialdaten

Das Glaser-Verfahren ist ein relativ einfaches Berechnungsverfahren. Es kann nur mit konstanten, nicht von den Temperaturen und dem Feuchtigkeitsgehalten der Baustoffe abhängigen Werten für die Eigenschaften der Baustoffe durchgeführt werden.

Hygrothermische Simulationen

Allgemeines

[DIN 4108], Teil 3 verweist für alle Anwendungsfälle außerhalb des Geltungsbereichs der Norm auf Computermodelle nach Anhang D und [DIN EN 15026] zur genaueren Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen.

Solche Computermodelle basieren meist auf der Finite-Differenzen-Methode oder auf Finite-Elemente-Methoden. Sie behandeln sowohl den Wärme- wie auch den Feuchtetransport im Bauteil. Sie sollten beide Transportphänomene möglichst gekoppelt berechnen.

Der Wärmetransport setzt sich dabei zusammen aus

- der Wärmeleitung sensibler Wärme
- dem Transport latenter Wärme durch Verdunstung von Wasserdampf an inneren Oberflächen des Baustoffes und dessen Kondensation an anderer Stelle im Bauteil.

Der Feuchtetransport setzt sich zusammen aus

- dem Transport von flüssigem Wasser durch Kapillarkräfte
- der Diffusion von Wasserdampf in den Poren der Baustoffe

Diese Transportphänomene werden gedämpft durch die Wärme- und Feuchtespeicherfähigkeit der Baustoffe.

Dabei sind alle Stoffeigenschaften, die diese Transport- und Speicherphänomene beschreiben, im Allgemeinen abhängig von der Temperatur und dem Feuchtegehalt des jeweiligen Baustoffes.

Innerhalb von Materialschichten von Bauteilen können auch Wärme- und Feuchtequellen oder –senken auftreten. Wärmequellen innerhalb eines Bauteils treten z.B. bei transluzenten Materialien auf, die einen Teil der Solarstrahlung im Inneren des Materials absorbieren. Durch die Angabe von Feuchtequellen innerhalb des Materials kann z.B. der Einfluss des konvektiven Feuchteintrages in das Bauteil angenähert werden.

An den Bauteilgrenzen sind die Wärme- und Feuchtestromdichten zur Umgebung zu berechnen. Auch diese setzen sich aus mehreren Anteilen zusammen.

Wärme:

- dem konvektiven Wärmeübergang von der / zur umgebenden Luft
- dem langwelligen Strahlungsaustausch mit den Oberflächen der Umgebung bzw. dem Himmel
- bei Außenoberflächen auch der Absorption von auftreffender kurzwelliger Solarstrahlung

Feuchte:

- dem Wasserdampfübergang von der / zur umgebenden Luft, (Kondensation, Trocknung)
- bei Außenoberflächen: Niederschlag (Regen, Schlagregen, Schnee ...)
- evtl. vom Bauteil ablaufendes oder abtropfendes Wasser.

Die zugrundeliegenden Gleichungen wurden von verschiedenen Autoren beschrieben. [Grunewald97] gibt einen Überblick über die wichtigsten Arbeiten aus dem Gebiet der Bauphysik und Bodenkunde, die maßgeblich die Entwicklung im deutschsprachigen Raum geprägt haben. Die grundlegenden Gleichungen haben seither Eingang in die Normung gefunden.

Merkblätter und Normen zu hygrothermischen Simulationen

[WTA_6-1-01/D] gibt allgemeine Hinweise zu hygrothermischen Simulationen.

[DIN EN 15026] beruht auf [WTA_6-2-01/D] aus dem Jahr 2001. Sie gibt die Mindestkriterien für hygrothermische Simulationssoftware und Validierungsbeispiele an.

[WTA_6-2-14/D] ersetzt [WTA_6-1-01/D]. Mit diesem Merkblatt sollten die Unterschiede zu [DIN EN 15026] minimiert, aber auch neue technologische Ansätze aufgenommen werden.

[WTA_6-3-05/D] beschreibt ein Verfahren zur Prognose der Gefahr von Schimmelpilzbildung in Innenräumen. Dieses beruht größtenteils auf der Arbeit von [Sedlbauer01].

[WTA_6-15-13/D] und [WTA_E-6-16-17/D] befassen sich mit der technischen Trocknung durchfeuchteter Bauteile.

Weitere Merkblätter, Richtlinien und Normen befassen sich mit Teilaspekten, die zur Entwicklung und Anwendung von hygrothermischen Simulationen notwendig sind. Diese werden in den angegebenen Merkblättern und Normen referenziert und sollen ihrer Vielzahl wegen hier nicht angegeben werden.

Simulationsprogramme

Die WUFI-Familie

Ursprünglich wurde das Programm WUFI als eindimensionales hygrothermisches Simulationsprogramm von H. Künzel am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelt. Die Grundlagen werden in [Kuenzel94] beschrieben. Seither hat das Programm diverse Weiterentwicklungen erfahren. Das IBP bietet verschiedenen Versionen des Programms an [WUFI15].

WUFI PRO

Zur eindimensionalen Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von flächigen Bauteilen

WUFI 2D

zur zweidimensionalen Berechnung von Kanten, Bauteilanschlüssen etc.

WUFI Plus

zur hygrothermischen Gebäudesimulation kombiniert die zweidimensionale Bauteilberechnung mit einem Gebäudemodell für mehrere Zonen.

WUFI Passive

kombiniert das Monatsbilanzverfahren für Passivhäuser mit der hygrothermischen Gebäudesimulation

Neben diesen kostenpflichtigen Produkten stehen zwei vereinfachte Versionen kostenfrei zur Verfügung

WUFI light

ist eine vereinfachte Version von WUFI pro mit eingeschränkten Berechnungsmöglichkeiten

WUFI plus therm / passive

ist eine rein thermische Gebäudesimulation, die auf WUFI plus beruht.

WUFI bio

ist ein Zusatzprogramm zu WUFI zur Berechnung der Gefahr von Schimmelpilzwachstum. WUFI bio steht ebenfalls kostenfrei zur Verfügung.

Delphin

ist eine Entwicklung der Technischen Universität Dresden. Damit sind ein-, zwei- und rotations-symmetrisch dreidimensionale Berechnungen möglich [DELPHIN16].

Weitere hygrothermische Simulationsprogramme

Daneben existieren diverse Eigenentwicklungen von Forschungsinstituten, die jedoch nicht veröffentlicht wurden, wie z.B. das Programm „HAM4D_VIE“ der Technischen Universität Wien [Schwaller16].

[Perschk/Meinhold07] stellen eine Erweiterung von TRNSYS um mehrere Funktionen vor. Das TRNSYS-Mehrzonen-Gebäudemodell TYPE 56 wird gekoppelt mit

- einem neu erstelltem hygrothermischen 1D-Wandmodell oder mit dem Programm Delphin
- und mit externer CFD-Software, die die Raumluftrömungen und den Luft-, Feuchte-, CO₂- und Schadstoffaustausch zwischen den Räumen berechnet,
- mit einer Berechnung des Strahlungsaustausches zwischen den Wänden,
- mit einer Berechnung der Verteilung der einfallenden Solarstrahlung auf die Wände und den Boden

Beschreibungen der Software gibt es in [Fechner08] und [Perschk00].

Multiphysics-Programme

Multiphysics-Programme wie z. B. COMSOL erlauben die Simulation verschiedener physikalischer Effekte. Dies macht sie einerseits sehr leistungsstark, erfordert jedoch auch eine sehr aufwändige Einarbeitung und Dateneingabe. Daher eignen sie sich eher zur Anwendung im Forschungsbereich. Bisher werden sie im Bereich der Bauphysik nur selten verwendet. An der Universität Innsbruck werden auch Luftströmungen innerhalb von Bauteilen und deren Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt der Bauteile mit COMSOL simuliert. [Janetti12] [Janetti12-1], [Janetti12-2] und [Janetti13].

Hinweise und Empfehlungen für hygrothermische Simulationen

[WTA_6-1-01/D] gibt allgemeine Hinweise zu hygrothermischen Simulationen. Auf manche Aspekte soll hier nochmals eingegangen werden.

Ziel der Untersuchungen

[WTA_6-1-01/D], S. 3-4 unterscheidet drei Anwendungsziele von hygrothermischen Simulationen:

- Konkrete Fallstudie
- Abschätzung des typischen Verhaltens
- Tauglichkeitsbewertung

Bei einer Fallstudie soll das Verhalten eines bestimmten Bauteils in einem konkreten Gebäude an seinem Standort während eines bestimmten Zeitraumes untersucht werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn bei einem Schadensfall dessen Ursache geklärt werden soll oder die Simulation zum Vergleich mit Messwerten dient.

Bei einer Abschätzung des typischen Verhaltens geht es eher darum, eine allgemeine Aussage über das hygrothermische Verhalten einer Konstruktionsweise zu erhalten. Hierzu können Parameter und Randbedingungen variiert werden, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu studieren.

Bei der Tauglichkeitsbewertung geht es darum, zu ermitteln, ob das zu untersuchende Bauteil auch unter ungünstigen Bedingungen, z.B. nach ein oder zwei Jahren mit ungünstiger Witterung, noch gebrauchstauglich bleibt. Im Falle des hygrothermischen Verhaltens ist die Frage also, ob die in Zeiten mit ungünstiger Witterung eingedrungene Feuchte wieder austrocknen kann.

Vom Ziel der Untersuchungen hängen einige Aspekte bei der Durchführung der Simulationen ab. Dies sind z.B.

- Annahmen und Vereinfachungen
- Notwendige Genauigkeit der Eingabedaten
- Auswahl des geeigneten Wetterdatensatzes und Randbedingungen
- Dauer des Simulationszeitraumes
- Startzeitpunkt der Simulation
- Auswahl der Simulationssoftware

Sommer- und Winterkondensation

Im mitteleuropäischen Klima, in dem die Gebäude während des größten Teil des Jahres beheizt werden müssen, liegen die Temperatur und die absolute Luftfeuchte in Innenräumen meist höher als außen. Entsprechend ist der Wasserdampfpartialdruck innen höher als außen. Dies führt zu Wasserdampfdiffusion vom Rauminnen zum Außenraum, mit evtl. auftretender Kondensation im Bauteil. Winterkondensation ist also der übliche Fall in Mittel- und Nordeuropa.

Nur bei Sommerregen mit hoher Luftfeuchtigkeit und evtl. noch hohen Außentemperaturen kehren sich diese Verhältnisse kurzzeitig um. Von Sommerkondensation gefährdet sind zudem Bauteile, die im Sommer kühler bleiben als die Außenluft. Dies sind z. B. sehr dicke Mauern in historischen Schlössern, Kirchen etc. [Kuenzel09-1]. Dies sind regelmäßig auch Wände und Böden in Kellergeschossen [Klein14]. Zukünftig ist jedoch zu erwarten, dass Sommerkondensation auch in anderen Räumen und Gebäuden eine größere Rolle spielen wird, weil durch steigende Komfortansprüche und die durch den Klimawandel ansteigenden Temperaturen verstärkt Klimageräte zur Raumkühlung eingesetzt werden [Künzel17], S. 6 .

Für die hier betrachteten Membrandächer wird in mitteleuropäischem Klima Sommerkondensation also in Allgemeinen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Vielmehr wird während des Winters Feuchtigkeit aus dem Rauminnen in das Membrandach eindringen und während des Sommers ganz oder teilweise wieder austrocknen.

Start-Zeitpunkt der Simulation

Die Simulation soll möglichst zu einem günstigen Zeitpunkt starten, d.h., zu einem Zeitpunkt, so dass Effekte aus vorherigen Zeiten möglichst gering sind [WTA_6-1-01/D], S. 7. Für die Berechnung des Verhaltens des Membrandaches wird das sicher gegen Ende des Sommers sein, wenn die Materialien trocken sind. Als Startzeitpunkt wird September oder Oktober vorgeschlagen.

Dauer der Simulation

Wenn sich Feuchtigkeit in einem Bauteil ansammelt, geschieht dies oft nur langsam und es dauert mehrere Jahre, bis diese Feuchtigkeit wirklich Schäden verursacht. Daher sollten hygrothermische Simulationen über mehrere Jahre durchgeführt werden. Erst dann kann aus den Ergebnissen beurteilt werden, ob die Feuchtigkeit, die sich jeweils im Winter ansammelt, im Sommer wieder vollständig abtrocknen wird oder ob sich im Laufe der Jahre Feuchtigkeit ansammeln wird. Der Simulationszeitraum sollte so weit ausgedehnt werden, bis eindeutig beurteilt werden kann, ob eine – wenn auch langsame – Ansammlung von Wasser im Bauteil zu erwarten ist oder nicht. Die Erfahrungen aus den hygrothermischen Simulationen, die in [Schoener/Zirkelbach16] beschrieben werden, lassen für Abschätzungen des typischen Verhaltens auf einen notwendigen Simulationszeitraum von ca. 5 Jahren schließen. Bei Tauglichkeitsbewertungen, die auch Jahre mit strengem Klima

enthalten, sollte der Simulationszeitraum acht oder mehr Jahre betragen. Auf diesen Aspekt wurde bereits im Kapitel „Wetterdaten für erhöhte Feuchtebelastung“ eingegangen. Letztlich entscheiden jedoch auch die Ergebnisse einer Simulation, ob der Simulationszeitraum ausgedehnt werden muss.

Anfangsbedingungen

In den hygrothermischen Simulationen müssen für alle Werte, die Speichereffekte beinhalten, wie die Temperatur und der Wassergehalt der Baumaterialien, Anfangswerte eingegeben werden.

Für die Temperatur empfiehlt es sich, die mittlere tägliche Lufttemperatur im Monat des Simulationsstarts zu verwenden.

Für die Bauteilfeuchte empfiehlt sich in den meisten Fällen als Anfangswert die Ausgleichsfeuchte, also den Sorptionsfeuchtegehalt des Baustoffes bei 80% relativer Luftfeuchte [WTA_6-2-14/D], S. 20. Dieser Wert wird auch von WUFI vorgeschlagen.

Bei der Baustofffeuchte ist der Gehalt an fest gebundenem Wasser (Kristallwasser, Hydratationswasser) nicht zu berücksichtigen. Dieses wird im Allgemeinen in den Simulationen nicht berücksichtigt. Ansonsten muss es als Feuchtequelle oder Feuchtesenke im Baustoff angegeben werden [WTA_6-2-14/D], S. 20.

In besonderen Fällen, z.B. wenn die Baufeuchte kurz nach Fertigstellung des Gebäudes mit berücksichtigt werden soll, kann ein höherer Wert nahe der freien Wassersättigung als Anfangswert vorgegeben werden [WTA_6-2-14/D], S. 20.

Die beiden letzten Punkte treffen bei Membrandächern nicht zu. Baufeuchte z.B. von Betonwänden kann in der ersten Zeit eine erhöhte hygrische Belastung für ein Membrandach darstellen. Daher kann sie für Simulationen interessant sein, wenn hygrothermische Simulationen für ein ganzes Gebäude durchgeführt werden sollen, um das Verhalten des Membrandaches unter diesen Bedingungen zu untersuchen.

Wetterdaten

Nach [WTA_6-1-01/D] hängt die geeignete Art der Wetterdaten vom Ziel der Untersuchungen ab.

Für eine konkrete Fallstudie sollen möglichst die gemessenen Wetterdaten am Standort oder eines nahegelegenen Standortes verwendet werden.

Zur Abschätzung des typischen Verhaltens eines Bauteils empfiehlt es sich, Wetterdaten e

Für die Tauglichkeitsbewertung empfiehlt [WTA_6-1-01/D], S. 6-7 die Verwendung von „strengen“ Randbedingungen, also von Randbedingungen, die eine eher höhere Belastung für die zu untersuchenden Bauteile darstellen. Dies kann jedoch je nach Bauteil ein besonders kühles oder besonders warmes Jahr sein und / oder ein Jahr mit viel Regen und entsprechend hoher Luftfeuchtigkeit.

Bei Bauteilen, an und in denen Kondensation vorwiegend im Sommer auftritt, wird ein warmes Jahr eine erhöhte Belastung für das Bauteil darstellen. Für Bauteile, die im Winter Tauwasser-gefährdet sind, wie bei Membrandächern, ist ein Jahr mit einem kalten Winter, eine höhere Belastung.

Es ist jedoch auch denkbar, dass ein Winter, der zwar nicht besonders kalt, aber feucht ist, eine höhere Belastung als ein kalter Winter darstellt. Geht man von einem Gebäude aus, das zwar mit mechanische Lüftung, aber ohne Anpassung der Raumluftfeuchte ausgestattet ist, so wird dann auch die Luftfeuchtigkeit im Innenraum höher sein als in einem sehr kalten Winter.

Letztlich kann dies erst durch Untersuchungen mit entsprechenden Wetterdatensätzen und deren Vergleich beurteilt werden. So schlägt z.B. auch [Zirkelbach13], S. 126 vor, die Simulation mit verschiedenen Wetterdatensätzen zu wiederholen. Dabei können auch die Wetterdaten eines kühleren Standortes aus der weiteren Umgebung verwendet werden, z.B. München anstelle Würzburg. Nach [Zirkelbach09], S. 5 gilt das Klima von Holzkirchen als für deutsche Klimaverhältnisse als repräsentativ kritisch.

[WTA_6-2-14/D], S. 17 weist jedoch darauf hin, dass Sequenzen von kritischen Jahren selten sind und die mehrjährige Simulation unter wiederholten Verwendung eines kritischen Wetterdatensatzes die Feuchtebelastung eines Bauteiles auch deutlich überschätzen kann.

Aus den Untersuchungen im Rahmen der Entwicklung der Hygrothermischen Referenzjahre [Schoener/Zirkelbach16] lässt sich die Empfehlung ableiten, eine Sequenz von drei normalen, typischen Jahren, zwei Jahren mit strengem, kühlem Klima; gefolgt von wiederum drei oder mehr Jahren mit normalem Klima zu verwenden. Hierauf wurde bereits im Abschnitt „Serien von normalen und kalten Hygrothermischen Referenzjahren“ im Kapitel „Wetterdaten für erhöhte Feuchtebelastung“ eingegangen.

Für alle drei genannten Ziele von hygrothermischen Simulationen kann man unterscheiden zwischen Untersuchungen von Bauteilen, bei denen auf das Bauteil auftreffender (Schlag-) Regen, Schnee etc. zu erwarten ist und in der Simulation berücksichtigt werden soll und Untersuchungen bei denen dies nicht der Fall ist. Entsprechend müssen die verwendeten Wetterdaten Angaben zur Niederschlagsmenge, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung enthalten oder es sind Wetterdaten ohne Angaben zur Niederschlagsmenge ausreichend.

Innenraumklima

Die verschiedenen Möglichkeiten, Daten für das Innenraumklima zu erhalten oder zu erzeugen wurden bereits im Kapitel „Randbedingungen // Außenklima / Wetterdaten // Innerraumklima“ beschrieben und miteinander verglichen.

Luftleckagen

Im Kapitel zum Glaser-Verfahren wurde bereits darauf hingewiesen, dass bei Leichtbauteilen praktisch immer, auch bei sorgfältiger Bauausführung, Luftleckagen vorhanden sind. Durch diese Leckagen dringt zumindest zeitweise, abhängig von den Temperatur- und Druckverhältnissen, auch Feuchtigkeit in die Konstruktion ein.

In Simulationsprogrammen wie WUFI kann der konvektive Feuchteeintrag durch Luftleckagen durch die Angabe einer Feuchtequelle im Bauteil berücksichtigt werden. [DIN 68800] zum Holzschutz, Teil 2, S. 11 verlangt die Berücksichtigung dieses Feuchteintrags. Dieser Feuchteeintrag soll aus der geplanten Luftdurchlässigkeit des Gebäudes abgeleitet werden.

Um diesen Feuchteeintrag durch Leckagen in hygrothermischen Simulationen realistischer zu berücksichtigen, schlagen [Zirkelbach09] einen zeitabhängigen Wert für diesen Feuchteeintrag vor, der vom Innen- und Außenklima, von der Raumhöhe und der Dichtheit des Gebäudes abhängt. Die Undichtigkeit des Gebäudes soll anhand von Gewichtungsfaktoren auf die einzelnen Bauteile aufgeteilt werden.

Aus der recherchierten Literatur können jedoch keine konkreten Handlungsempfehlungen in Form von empfohlenen Zahlenwerten oder Berechnungsformeln für den Feuchteeintrag entnommen werden.

In Multiphysics-Simulationsprogrammen wie COMSOL kann der Feuchteeintrag durch Luftleckagen explizit berechnet werden [Janetti12] und [Janetti12-1]. [Zirkelbach13] gibt jedoch zu bedenken, dass die genauen Randbedingungen und Luftpfade selten im Detail bekannt sind.

Solarstrahlung

Bei transluzenten Baustoffen, wie z. B. dem im Membrandach der Sporthalle Fürth verwendeten Glasfasergespinnst, wird Solarstrahlung innerhalb des Materials absorbiert. Dies bedeutet eine Wärmeentstehung im Baustoff. In hygrothermischen Simulationen kann dies durch die Angabe von Wärmequellen im Material berücksichtigt werden.

Die in [Kuenzel94] beschriebenen Gleichungen zur Berechnung des Feuchtegehaltes gelten für opake Materialien und berücksichtigen nicht die Absorption von Licht im Inneren von Materialien. Das Simulationsprogramm WUFI wurde seither jedoch erweitert, so dass auch Wärmequellen innerhalb von Bauteilschichten berücksichtigt werden können. Somit kann auch die Absorption von Solarstrahlung simuliert werden.

Simulation der Schimmelpilzentwicklung

Zur Beurteilung des Schimmelpilzrisikos und der Berechnung des Schimmelpilzwachstums können die von [Sedlbauer01] entwickelten Berechnungsmethoden angewandt werden. Diese wurden in ein Software-Tool „WUFI-Bio“ umgesetzt, das die Simulationsergebnisse von WUFI weiterverarbeitet und auf der WUFI-Website kostenlos zur Verfügung steht.

Aber auch das Programm WUFI pro liefert als Ergebnisse für jeden Zeitschritt den entsprechenden Punkt im Temperatur-Luftfeuchte-Koordinatensystem im Vergleich zum LIM (lowest isopleth for mould). Der LIM bezeichnet im Temperatur-Luftfeuchte-Koordinatensystem die Linie unterhalb der Schimmelpilzwachstum praktisch ausgeschlossen werden kann. Liegen die Temperatur-Luftfeuchte-Verhältnisse an den Bauteiloberflächen dauerhaft unterhalb des LIM oder nur in seltenen und kurzen Zeiträumen über dem LIM, kann von Schimmelfreiheit ausgegangen werden.

Berechnungen für die Dachfläche

Mit „ungestörte Membrandachfläche“ ist der Bereich des Membrandaches zwischen den Trägern gemeint. D. h. bei diesen Untersuchungen wird der Einfluss der Träger, der Bauteilanschlüsse und der Bauteilränder nicht berücksichtigt. Das Membrandach wird betrachtet, als ob es sich um einen Aufbau wie im nachfolgenden Bild handelt, mit den gleichen Abmessungen der Geometrie über die gesamte Fläche des Daches und mit unendlicher flächiger Ausdehnung. Das heißt:

- Die Krümmung der Membranen wird nicht beachtet.
- Die Variation der Höhe des Luftzwischenraums wird nicht beachtet.
- Randeffekte werden nicht mit betrachtet.

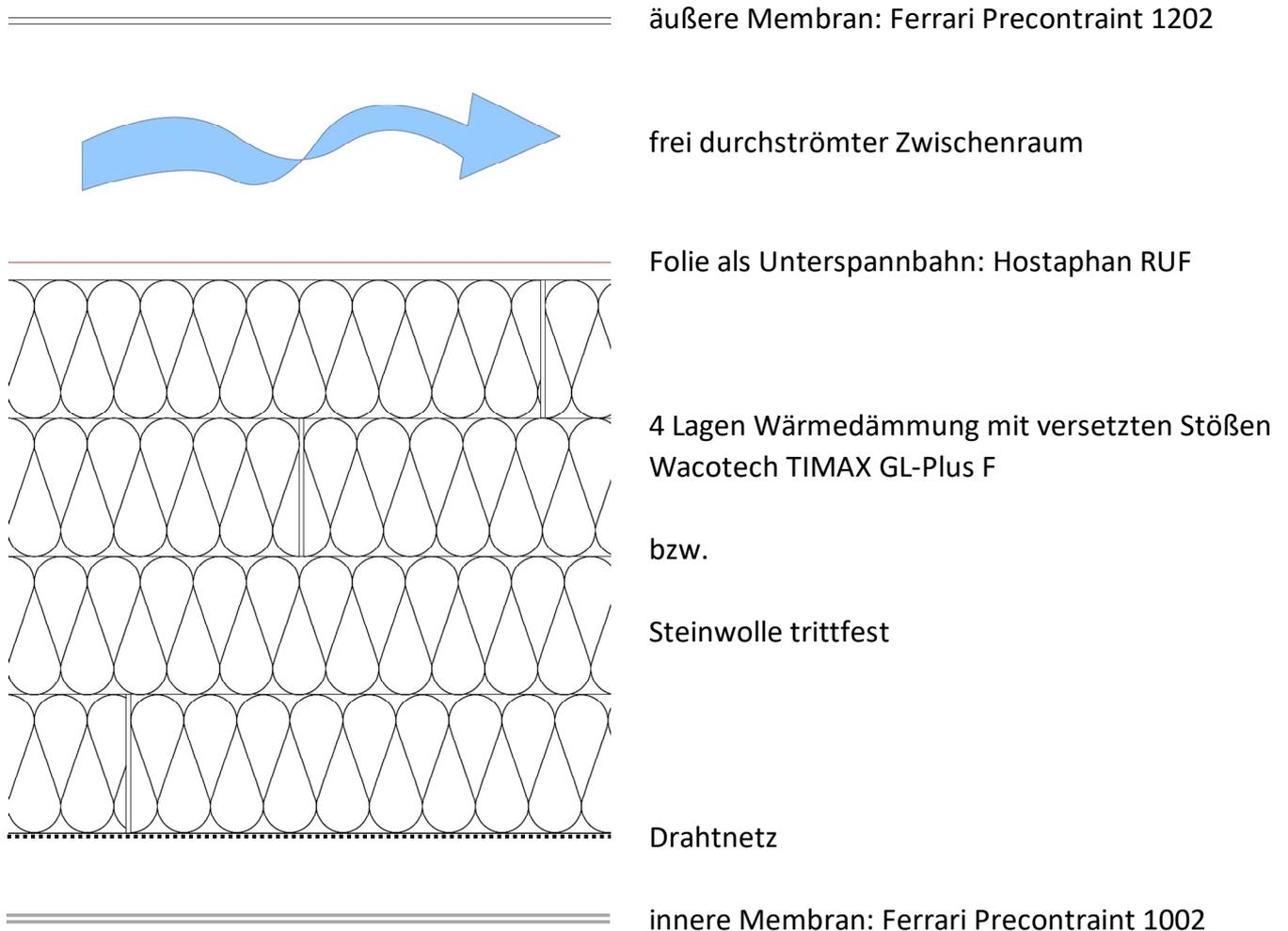


Bild 87: Aufbau des Membrandaches

Dieser Teil wird weiter unterteilt in die Untersuchung des äußeren und des inneren Teils des Dachaufbaus.

Für die feuchtetechnische Beurteilung der langfristigen Funktionstüchtigkeit des Membrandaches muss vor allem der innere Teil des Dachaufbaus, bestehend aus innerer Membran, evtl. einer Luftschicht, der Wärmedämmschicht und der Unterspannbahn untersucht werden. Dabei ist aber zu bedenken, dass sich die äußere Membran aufgrund ihres Strahlungsaustausches mit dem kalten Himmel vor allem nachts bis unter die Lufttemperatur abkühlt und dort Kondenswasser und evtl. auch Eis entsteht. Da das Dach nur wenig geneigt und teilweise horizontal ist, wird das Kondenswasser und außenseitig auch Regen nicht vollständig ablaufen.

Je nach Witterung kann an deren Innenseite auch so viel Kondenswasser entstehen, dass dieses abtropft und auf die Unterspannbahn fällt. Das gleiche gilt bei schmelzender Eisschicht auf der Innenseite der äußeren Membran.

Die anhaftenden Wasser- und Eisschichten, auf beiden Oberflächen der äußeren Membran, beeinflussen deren Temperatur- und Feuchteverhältnisse. Dieser Einfluss kann mit WUFI nicht berechnet werden. In WUFI wird aller Regen und Kondenswasser, das nicht vom Bauteil aufgenommen wird, als instantan ablaufend behandelt. Daher wird die mit dem ablaufenden Kondenswasser verbundene Kondensationsenthalpie nicht berücksichtigt.

Im WUFI Eingabedialog „Oberflächenübergangskoeffizienten“ kann man den „Anteil des anhaftenden Regens“ angeben. Dort ist damit gemeint, dass der nicht anhaftende Anteil des Regens wegspritzt, bevor er vom Bauteil aufgenommen werden kann (siehe WUFI-Hilfetext „Regenabminderungsfaktor“). Damit ist nicht gemeint, dass der anhaftende Anteil des Regens bis zum nächsten Zeitschritt der Simulation an der Oberfläche anhaftet.

Noch wichtiger als die Berücksichtigung der Kondensationsenthalpie im jeweiligen Zeitschritt ist jedoch, dass in nachfolgenden Zeitschritten die Bauteiloberflächen in WUFI als trocken angenommen werden und die Verdunstungsenthalpie, die zur Trocknung des aus einem vorigen Zeitschritt noch anhaftenden Wassers benötigt wird, ebenfalls nicht in der Berechnung der Energieströme berücksichtigt wird. Wie groß diese Einflüsse sind, ob sie vernachlässigt werden können oder die Ergebnisse sehr stark beeinflussen, kann nicht anhand einfacher Überlegungen abgeschätzt werden.

Es stellt sich also die Frage, mit welchem Simulationsprogramm hygrothermische Berechnungen dieses wenig bis nicht geneigten Membrandaches mit genügender Genauigkeit durchgeführt werden können.

Dabei interessieren vor allem die hygrothermischen Verhältnisse am und im inneren Teil des Dachaufbaus mit der Wärmedämmschicht. Diese werden von den hygrothermischen Verhältnissen auf der Unterspannbahn beeinflusst, die wiederum außer von den Wetterdaten auch von denen an der äußeren Membran abhängen. Umgekehrt beeinflussen die hygrothermischen Verhältnisse des inneren Dachaufbaus diejenigen an der äußeren Membran nur wenig.

Berechnungen für die äußere Membran

Im Gegensatz zum inneren Teil des Dachaufbaus können die hygrothermischen Verhältnisse an der äußeren Membran auch aufgrund ihrer geringen Dicke und Masse relativ einfach berechnet werden. Aus den genannten Gründen wurden zunächst die hygrothermischen Verhältnisse an der äußeren Membran untersucht.

Dabei wurden zum einen Simulationen mit WUFI durchgeführt und aus den Ergebnissen für jeden Simulationszeitschritt die anhaftenden Wasser- und Eisschichten und Mengen von abtropfendem Wasser berechnet. Zum anderen wurde ein Simulationsprogramm für die äußere Membran selbst erstellt. Anschließend wurden beide Ergebnisse miteinander verglichen.

Wärme- und Feuchteströme an der äußeren Membran

Die äußere Membran steht im thermischen Kontakt mit der Außenluft und der Luftschicht im Membrandach-Zwischenraum. Sie steht außerdem im Strahlungsaustausch nach unten hin mit der darunterliegenden Wärmedämmschicht bzw. deren Abdeckung, der Unterspannbahn und nach oben hin mit dem Himmel. Die Oberflächentemperatur der Unterspannbahn dürfte aufgrund der darunterliegenden Wärmedämmung ca. der Lufttemperatur entsprechen. Die Temperatur des Himmels liegt – je nach Bewölkungsgrad – ca. 10 bis 20 K unter der Lufttemperatur. Dadurch strahlt die äußere Membran mehr Infrarotstrahlung an den Himmel ab, als sie von diesem empfängt. Bei hoher solarer Einstrahlung kann diese die Wärmeverluste im IR-Bereich ausgleichen und auch übertreffen, so dass die Membrantemperatur über die Lufttemperatur steigt. Nachts und tagsüber bei geringer Solarstrahlung jedoch sinkt die Temperatur der äußeren Membran unter die Lufttemperatur. Bei hohem Feuchtegehalt der Luft bildet sich dann Kondenswasser an der Membran, das später wieder abtrocknet, eventuell aber auch zum Teil abtropft.

Näherungen und Annahmen

Der Strahlungsaustausch mit der Trägerstruktur wurde in dieser Betrachtung vernachlässigt. Es ist zu erwarten, dass dieser nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Wärmehaushalt der äußeren Membran hat. Dies begründet sich zum einen in der relativ geringen räumlichen Ausdehnung der Stahlträger, zum anderen in der Abschätzung für die Temperatur, die diese jeweils annehmen. Ebenso werden Randeffekte, die an den Rändern der Membran auftreten können, vernachlässigt.

Für die im Folgenden beschriebene Berechnung werden die Werte des Luftzustandes der Außenluft benutzt. Für die Oberseite der äußeren Membran ist dies für die gesamte Dachfläche gerechtfertigt. Für die Innenseite der äußeren Membran gilt dies streng genommen nur für den offenen Rand des Membrandaches, an dem die Außenluft in den Zwischenraum zwischen der äußeren und der inneren Dachmembran einströmt.

Im Laufe ihres Weges durch den Zwischenraum ändert die Luft ihre Zustandswerte, also ihre Temperatur und evtl. auch ihren Feuchtegehalt. Bei genügend hoher Luftgeschwindigkeit sind diese Änderungen im Laufe der Durchströmung gering. Bei geringer Luftgeschwindigkeit jedoch können sie größer werden. In diesen Berechnungen jedoch wird dies jedoch vernachlässigt. Dies ist in den meisten Zeitschritten einer Jahressimulation gerechtfertigt.

Zudem können mit WUFI pro nur eindimensionale Berechnungen durchgeführt werden. Auch die anderen Versionen von WUFI können die Änderung des Luftzustandes in strömender Luft nicht berechnen.

Randbedingungen

Wetterdaten für den Außenraum

Zunächst wurde das in WUFI enthaltene Feuchtereferenzjahr für Würzburg verwendet.

Wetterdaten für den Membrandach-Zwischenraum

Hier wird jeweils das gleiche Außenklima angenommen. Allerdings wird die Luftgeschwindigkeit mit einem Viertel der Luftgeschwindigkeit im Außenraum angesetzt.

Hygrothermische Berechnungen mit WUFI Pro 5.3

Anmerkung zu Begrifflichkeiten in WUFI

In WUFI pro werden die Bauteile bei der Eingabe der Schichten etc. als senkrecht stehend dargestellt. Dabei ist links vom Bauteil die Außenluft und das entsprechende Wettergeschehen, rechts vom Bauteil befindet sich der Innenraum mit dem entsprechenden Innenraumklima. Dies hat Auswirkungen auf die sprachliche Beschreibung und die Ergebnisdarstellungen. So wird ein Wärmestrom als „nach rechts“ bezeichnet, wenn er vom Außenraum in das Bauteil oder vom Bauteil in den Innenraum fließt. Entsprechend haben Wärme- und Feuchteströme „nach rechts“ in den Berechnungen, in der Ausgabe der Ergebnisse, in den daraus berechneten weiteren Ergebnissen und in den Diagrammen ein positives Vorzeichen. Wärme- und Feuchteströme „nach links“, also außen vom Bauteil weg, innen zum Bauteil hin, haben ein negatives Vorzeichen.

Dies gilt auch, falls das Bauteil horizontal liegt.

Bauteil-Aufbau

Für die Membran wurde aus der WUFI-Materialdatenbank eine Dampfsperre mit einem s_d -Wert von 1500 m ausgewählt. Später stellte sich heraus, dass die PVC-beschichteten PES-Membranen weit geringere s_d -Werte besitzen. Da dies jedoch an dieser Stelle unbedeutend ist, wurden die Berechnungen nicht wiederholt.

Orientierung und Neigung

Für das Dach wurde eine Orientierung von 225 ° angegeben, also nach Südwesten. Für dessen Neigung wurden 4 ° angesetzt. Dies entspricht der mittleren Neigung des Daches, berechnet als die Neigung der Verbindungslinie der Auflager der Stahlträger auf beiden Seiten des Gebäudes.

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außenseite

Da das Dach im Mittel nur sehr schwach geneigt ist, wurden die Regemengen-Angaben in den Wetterdaten nicht umgerechnet, sondern die dort enthaltenen Werte für eine horizontale Fläche verwendet.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wurde windabhängig angegeben, wie es den Vorgabewerten in WUFI für die Luv-Seite eines Gebäudes und für parallel angeströmte Flächen entspricht. Dies sind

$$\alpha_{conv,o} = 4,5 \frac{W}{m^2 K} + 1,6 \frac{W s}{m^3 K} \cdot v_{air,o}$$

mit

$$v_{air,o} = \text{Windgeschwindigkeit}$$

Da sich das Dach ca. 10 m über Gelände befindet, also etwa in der Höhe, in der die Winddaten gemessen werden, und die umliegende Bebauung nicht höher ist, wird keine Korrektur für geringere Windgeschwindigkeit aufgrund des baulichen Umfeldes angenommen.

Langwelliger Strahlungswärmeaustausch

Der langwellige Strahlungswärmeaustausch mit der Umgebung wird explizit berechnet. Der Emissionsgrad für die Wärmestrahlung wurde mit 0,9 angegeben und somit der langwellige Reflexionsgrad auf 0,1 entsprechend den Messwerten für die Membranen.

Absorptionsgrad und Albedo für Solarstrahlung

Der Absorptionsgrad für die Solarstrahlung wurde entsprechend den Messwerten mit 0,15 abgegeben. Für den Wert des Albedos der Umgebung wurde der Vorgabewert von WUFI mit 0,2 übernommen.

Innenseite

Auf der Innenseite erlaubt WUFI lediglich die Angabe eines konstanten Wertes für den kombinierten Wärmeübergangswiderstand aus konvektivem und radiativem Wärmeübergang. Hier wurden $0,08 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W}$ angegeben. Dies entspricht $12,5 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$, ist also höher als der für Innenräume üblicherweise verwendete Wert, um die stärkere Luftströmung im Membrandach-Zwischenraum zu berücksichtigen.

Anfangsbedingungen

Für die anfängliche Temperatur der Membran wurde 0 °C angegeben. Dies entspricht der mittleren Außentemperatur am 1.12. Die Bauteilfeuchte entsprechend 80 % relativer Luftfeuchte wurde aus dem Vorgabewert von WUFI übernommen. Der Einfluss der Anfangsbedingungen auf die Berechnungsergebnisse verliert sich aufgrund der geringen Dicke der Membran sehr schnell. Dennoch wurde die Simulation am 1.12. gestartet, aber jeweils erst ab dem 1.1. ausgewertet.

Simulationszeitraum und Zeitschritt

Der Simulationszeitraum umfasst zwei Jahre, beginnend am 1. Dezember (1.12. – 1.12. des übernächsten Jahres). Ausgewertet wurde der Zeitraum vom 1.1. – 31.12.

Der Zeitschritt der Simulation beträgt eine Stunde. Da die Wetterdaten nicht in höherer Auflösung vorliegen und die Wasseraufnahme der Membran vernachlässigbar ist, stellt dies eine ausreichende zeitliche Auflösung dar.

Weiterverarbeitung der Ergebnisse mit Excel

Aus den von WUFI berechneten Ergebnissen für die Membrantemperatur wurden weitere Größen berechnet, um den Einfluss anhaftender Wasser- und Eisschichten zu berechnen. Dabei werden jeweils flächenbezogene Größen berechnet.

Berechnung der Feuchteströme

Die Feuchtestromdichten, also flächenbezogene Kondensations- und Verdunstungsraten bzw. bei Temperaturen unter 0 °C die Sublimations- und Reif-/Eisbildungsraten wurden für beide Oberflächen innen und außen berechnet aus den jeweiligen Größen

- des Feuchteübergangskoeffizienten, berechnet von WUFI
- des Sättigungsdampfdruckes an der Oberfläche, berechnet aus der Membranoberflächentemperatur, letztere wie berechnet von WUFI
- und dem Wasserdampfpartialdruck der Luft, berechnet aus der relativen Feuchte und der Temperatur der Außenluft

Für die Sättigungsdampfdrücke an den Oberflächen und den Wasserdampfpartialdruck der Luft wird jeweils die passende Magnus-Formel nach [DIN EN ISO 13788], Anhang E benutzt, mit Parametern je nach Temperatur über oder unter 0 °C.

Dabei wird noch berücksichtigt, dass kein Wasser verdunsten kann, wenn die Oberfläche trocken ist, wenn also am Ende des vorigen Zeitschrittes keine Wasser- oder Eisschicht auf der Oberfläche vorhanden war. Bei der äußeren Oberfläche muss noch berücksichtigt werden, dass es Niederschlag geben kann. Die Trocknungsrate wird in diesem Fall also auf die Niederschlagsmenge begrenzt.

Bei trocknender Feuchtigkeitsschicht kann es vorkommen, dass es zu sehr hohen Trocknungsraten kommt, jedoch nicht für den gesamten Zeitschritt von einer Stunde, wenn das Wasser in weniger als einer Stunde abtrocknet, entsprechend für Eis. In diesen Fällen wurde eine mittlere Trocknungsrate für den Zeitschritt berechnet. Diese ist gleich der zuvor vorhandenen Feuchtigkeitsschicht. Bei der äußeren Oberfläche wird noch der in diesem Zeitschritt vorkommende Regen berücksichtigt.

Berechnung der Wasser- und Eisschichtdicken

In Zeitschritten mit einer Membranoberflächentemperatur über 0 °C wird die Wasserschichtdicke am Ende eines Zeitschrittes folgendermaßen berechnet:

- Die Wasserschichtdicke ergibt sich aus der zuvor vorhandenen Wasser- oder Eischicht und der Feuchteübergangsrate im Zeitschritt. An der äußeren Oberfläche noch zuzüglich des Niederschlages
- Bei Verdunstung wird die Wasserschichtdicke nach unten auf 0 begrenzt.
- Nach oben werden die Wasserschichtdicken auf einen geschätzten Wert für die maximal anhaftende Wasserschichtdicke begrenzt. Für die Oberseite der Membran wurden hier 0,6 mm (genauer $0,6\text{ kg / m}^2$) und für deren Unterseite $0,4\text{ kg / m}^2$, entsprechend 0,4 mm Schichtdicke, angenommen.
- Eine zuvor vorhandene Eisschicht wird als zu Beginn des Zeitschrittes instantan schmelzend behandelt.
- Bei Membranoberflächentemperaturen über 0 °C ist die Eisschichtdicke gleich 0.

Ganz analog werden bei Membranoberflächentemperaturen unter 0 °C die Eisschichtdicken an der inneren und äußeren Membranoberfläche berechnet.

- Die Eisschichtdicke ergibt sich aus der zuvor vorhandenen Wasser- oder Eischicht und der Feuchteübergangsrate im Zeitschritt. An der äußeren Oberfläche noch zuzüglich des Niederschlages
- Bei Sublimation wird die Eisschichtdicke nach unten auf 0 begrenzt.
- Nach oben werden die Eisschichtdicken nicht begrenzt.
- Eine zuvor vorhandene Wasserschicht wird als zu Beginn des Zeitschrittes instantan gefrierend behandelt.
- bei Membranoberflächentemperaturen unter 0 °C ist die Wasserschichtdicke gleich 0.

Berechnung der Abtropfrate an der Unterseite der Membran

Die Abtropfrate an der Unterseite der Membran wird berechnet aus der Wasserschichtdicke am Ende des Zeitschrittes und der Wasserschichtdicke, die sich ohne einen Maximalwert für die Wasserschichtdicke ergeben würde. Im Fall von Eis auf der Oberfläche tropft nichts ab. In der Berechnung sind beide Schichtdicken gleich und es ergibt sich automatisch 0 für die Abtropfrate.

Zusammenstellung der Eingabedaten

Die folgende Tabelle stellt die Eingabedaten in knapper Form zusammen

Eingabedaten

Eigenschaften der Membran	
Dicke [mm]	0.78 bzw. 1
Gitteraufbau	grob
s_d -Wert [m]	1500
Wärmequellen und -senken	keine
Wärmedurchlasswiderstand [(m ² K)/W]	0

Orientierung und Neigung	
Orientierung [°]	225 (SW)
Neigung [°]	4
Regenbelastung R1	1 (wie horizontal)
Regenbelastung R2	0

Oberfläche außen	
konvektiver Wärmeübergangskoeffizient: Windunabhängiger Anteil [W / (m ² K)]	4.5
konvektiver Wärmeübergangskoeffizient: Windabhängiger Anteil, Faktor zur Windgeschwindigkeit [W / (m ³ K s)]	1.6
Beschichtung	keine
kurzwellige Strahlungsabsorption	0.15
langwellige Strahlungsabsorption (nicht benutzt in WUFI, weil explizite Strahlungsbilanz)	0.89
Terrestrischer langwelliger Emissionsgrad	0.9
Terrestrischer langwelliger Emissionsgrad	0.1
Emissionsgrad gegenüberliegender Flächen [-]	1
Temperatur gegenüberliegender Flächen [°C]	entspr. Himmelstemperatur
anhaftender Regen	1
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Membran [kg / m ²]	0.6
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Eis [kg / m ²]	-----

Oberfläche innen	
Wärmeübergangskoeffizient pauschal [W / (m ² K)]	12.25
konvektiver Wärmeübergangskoeffizient: Windunabhängiger Anteil [W / (m ² K)]	-----
konvektiver Wärmeübergangskoeffizient: Windabhängiger Anteil, Faktor zur Windgeschwindigkeit [W / (m ³ K s)]	-----
Emissionsgrad gegenüberliegender Flächen [-]	-----
Temperatur gegenüberliegender Flächen [°C]	-----
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Membran [kg / m ²]	0.4
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Eis [kg / m ²]	-----

Tabelle: Eingabedaten für Simulationen der äußeren Membran, fortgesetzt ...

Anfangsbedingungen Bauteil	
Temperatur aller Materialien [°C]	0
Bauteilfeuchte [%]	80
Anfangsbedingungen äußere Oberfläche	
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht [kg / m ²]	-----
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Eisschicht [kg / m ²]	-----
Anfangsbedingungen innere Oberfläche	
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht [kg / m ²]	-----
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Eisschicht [kg / m ²]	-----
Außenklima	WUFI-Datensatz für Würzburg, entspr. 1986
Innenklima	WUFI-Datensatz für Würzburg, entspr. 1986
Simulationszeitraum & Zeitschritt	
Simulationszeitraum	1.12.2015 – 1.12.2017
Zeitschritt [h]	1

Tabelle: Eingabedaten für Simulationen der äußeren Membran, Fortsetzung von voriger Seite

Ergebnisse

Im nächsten Kapitel wird ein selbst erstelltes Berechnungsprogramm für die Temperatur, die Feuchteströme und –schichten an der äußeren Membran beschrieben.

Im übernächsten Kapitel werden die Ergebnisse beider Berechnungsmethoden dargestellt und miteinander verglichen.

Eigenes Berechnungsprogramm für die äußere Membran

Motivation

Bei den feuchtetechnischen Berechnungen des Membrandaches sollte auch berücksichtigt werden, dass sich auf der Unterspannbahn eine Wasserschicht bilden kann, die nicht vollständig abläuft und den Wärme- und Feuchtehaushalt der Wärmedämmung beeinflusst.

Je nach Witterungsbedingungen kann es zu einer Kombination von Wind und Regen oder Wind und Schneefall kommen, so dass auf der windzugewandten Seite des Membrandaches Regen oder Schnee durch das Vogelschutzgitter in den Membrandachzwischenraum geblasen wird und auf die Unterspannbahn treffen. Bei Schneetreiben kann der Schnee noch weiter in das Membrandach eingetragen werden. Der Regen oder der schmelzende Schnee werden auf der Unterspannbahn eine dünne Wasserschicht, oder einzelne Tropfen bilden. Aufgrund der nur sehr geringen Neigung des Daches, speziell des inneren Teils des Membrandaches, wird nicht das gesamte flüssige Wasser sofort ablaufen.

Die vorgesehene Unterspannbahn ist zwar gegen flüssiges Wasser dicht. Man muss jedoch bedenken, dass, solange auf der Unterspannbahn eine - wenn auch nur dünne - Schicht von flüssigem Wasser oder auch von Schnee vorhanden ist, herrscht dort der maximale Wasserdampfpartialdruck, also der Sättigungsdampfdruck. Da die Unterspannbahn diffusionsoffen ist, beeinflusst dies auch den Feuchtehaushalt in der Wärmedämmschicht.

Diese Wasserschicht beeinflusst auch den Wärmehaushalt der Unterspannbahn und Wärmedämmschicht, wenn sie trocknet oder gefriert oder Eis oder Schnee schmilzt. Beim Trocknen erniedrigt sich dadurch die Temperatur an dieser Oberfläche. Beim Fest-Flüssig-Phasenwechsel bleibt die Temperatur der Oberfläche konstant bei 0 °C, bis der Phasenwechsel abgeschlossen ist.

Diese Effekte können von WUFI nicht berücksichtigt werden, da WUFI alle auf eine Bauteil-Oberfläche auftreffende Flüssigkeit als sofort ablaufend betrachtet, sofern sie nicht vom Bauteil aufgenommen wird.

Evtl. kann eine Wasserschicht durch die Angabe einer dünnen, sehr porösen Schicht simuliert werden. Man kann dann aber nicht wirklich beurteilen, ob die Ergebnisse sinnvoll sind.

Um später beurteilen zu können, ob die rechnerische Vernachlässigung von anhaftendem Wasser und Eis und der damit verbundenen latenten Wärme die Ergebnisse für die Feuchteverhältnisse stark beeinflusst, wurde für die äußere Membran ein Programm erstellt, das die Temperatur- und Feuchteverhältnisse dieser Membran berechnet. Die äußere Membran steht bei der Untersuchung des Membrandaches in Bezug auf seine dauerhafte Funktionstüchtigkeit eigentlich nicht im Mittelpunkt. Für die äußere Membran ist das Erstellen eines eigenen Programms jedoch relativ einfach, weil die Schichtdicken und Wärmekapazitäten der Schichten und deren Wärmewiderstände vernachlässigt werden können.

Das im Folgenden beschriebene, erstellte Programm zur Berechnung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse der äußeren Membran dient also vorwiegend dazu, beurteilen zu können, ob der Einfluss von anhaftenden Wasser- und Eisschichten groß genug ist, um ihn bei den Untersuchungen des inneren Dachaufbaus berücksichtigen zu müssen, oder ob er vernachlässigt werden kann.

Kurzbeschreibung der Berechnungsmethode für die äußere Membran

Für die Berechnung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse kann die Dicke und der Wärmedurchlasswiderstand der Membran aufgrund ihrer relativ geringen Dicke vernachlässigt werden. Dies bedeutet, dass in diesem Modell die Membran an beiden Oberflächen die gleiche Temperatur besitzt.

Somit kann die Energiebilanz für die äußere Membran aufgestellt werden in Abhängigkeit von nur einer Variablen, der Membrantemperatur. Dadurch kann die Membrantemperatur berechnet werden und aus ihr alle anderen Größen ihres Wärme- und Feuchtehaushaltes im jeweiligen Zeitschritt.

Für die äußere Membran kann zudem deren Wärmekapazität vernachlässigt werden, da sie aufgrund ihrer geringen flächenspezifischen Masse schnell ins thermodynamische Gleichgewicht mit den aktuellen Randbedingungen kommen wird. Die äußere Membran wird also behandelt, als ob sie sich zu jedem Zeitpunkt im thermodynamischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung befindet.

Für die äußere Membran wird zudem angenommen, dass an beiden Oberflächen Feuchtigkeit haften kann. Für Wasser wird eine maximale Dicke der Wasserschicht vorgegeben, die für die Ober- und die Unterseite der Membran unterschiedlich sein kann. Für Eis oder Schnee gibt es keinen Maximalwert der Schichtdicken.

Die oben beschriebenen Annahmen des jederzeitigen thermischen Gleichgewichtes mit der Umgebung und des vernachlässigbaren Wärmewiderstandes der Membran gilt auch für die an der Membran befindlichen Wasser- und Eisschichten. In den meisten Fällen wird dies auch mit Wasser- oder Eisschichten noch gerechtfertigt sein. Lediglich bei dicken Eis- oder Schneeschichten wird die Berechnung dadurch ungenau.

Auf diese Weise kann der zeitliche Verlauf der Verhältnisse an der Membran aus den Wetterdaten berechnet werden. Dabei verwendet man sinnvollerweise auch für die Berechnung der Membran die Zeitschrittweite, in der die Wetterdaten vorliegen.

Aus jedem Zeitschritt wird zudem noch die Dicke der Wasser- und Eisschichten am Ende des Zeitschrittes berechnet, da dies den Wärme- und Feuchtehaushalt im nächsten Zeitschritt beeinflusst.

Eine Ausnahme bilden Zeitschritte, in denen alles vorhandene Wasser gefriert oder verdunstet, oder alles vorhandene Eis sublimiert oder schmilzt. Dann ändert sich innerhalb eines Zeitschrittes der Zustand der Membran grundlegend. Der Zeitschritt muss dann in zwei oder mehr Teilschritte zerlegt werden.

Ausführliche Beschreibung der Berechnungsmethode

Annahmen und Näherungen

Orientierung und Neigung des Daches

Das Dach wird als mit einheitlicher Neigung von 4° und einem Azimuth von 135° angenähert. Dies hat Einfluss auf die Berechnung der auftreffenden Solarstrahlung und den langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung.

Temperatur der Unterspannbahn

Die Temperatur der Unterspannbahn muss abgeschätzt werden. Wie dies geschieht, wird bei der Beschreibung des Berechnungsverfahrens erläutert.

Äußeres und inneres Membrandach als planparallel

Die äußere Membran und der innere Teil des Dachaufbaus werden als planparallel und unendlich ausgedehnt angenommen. Dies hat Einfluss auf die Berechnung des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen äußerer Membran und Unterspannbahn.

Ränder des Membrandaches

Der Einfluss der Ränder des Membrandaches und der Vogelschutzgitter, wird vernachlässigt.

Stahlträger

Der Einfluss der Stahlträger wird vernachlässigt.

Homogene Temperatur über die Dicke der äußeren Membran und ihre Wasser-, Eis- und Schneeschichten

Außerdem wird die Temperatur der Membran als homogen über die Dicke der Membran angenommen. Dies schließt auch eventuell vorhandene Eis- und Wasserschichten mit ein. Eine entsprechende Annahme treffen [Jeong10] für die Modellierung eines Abgaswärmeübertragers mit Kondensation.

Außer im Falle von dicken Schneeschichten ist diese Näherung sehr gut erfüllt, weil die Membran auch mit einer Wasser- oder Eisschicht – relativ dünn ist und ihr Wärmedurchlasswiderstand gering ist im Vergleich zu den Wärmeübergangswiderständen der Luftgrenzschichten.

Thermisches Gleichgewicht in jedem Zeitschritt

Die Membran wird während jedes Berechnungszeitschrittes als im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung angenommen. Dies rechtfertigt sich durch die geringe flächenspezifische Masse der Membran. Dies gilt auch, falls sich auf den Oberflächen der Membran eine Wasser- oder Eisschicht befindet. Im Falle einer dicken Schneeschicht ist diese Annahme nicht mehr gerechtfertigt aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Schnees. Da dies aber vermutlich nicht sehr oft vorkommt, bleibt dies unberücksichtigt.

Membran absolut inert gegenüber Wasser

Für die Membran wird angenommen, dass sie keine Feuchtigkeit aufnimmt oder durchlässt. Für die äußere Membran ist dies eine gute Näherung, da die Feuchteströme innerhalb der Membran sehr viel geringer sind als die an ihrer Oberfläche.

Niederschlag

Niederschlag (Regen oder Schnee) kann auf mehrere Arten Einfluss auf den Wärmehaushalt der Membran haben:

Wärmekapazität des Niederschlages

- Durch Erwärmen oder durch Abkühlen des Regens oder Schnees an der Membranoberfläche. Dieser Effekt wird vernachlässigt. Dies rechtfertigt sich durch den sehr geringen Einfluss der Temperaturdifferenzen zwischen Regen und Membran und der sehr viel höheren Verdunstungs- bzw. Kondensationswärme.

Dies wird auch in WUFI vernachlässigt, da ja dort aller nicht von der Membran aufgenommene Regen als sofort ablaufend betrachtet wird.

Flüssig-fest-Phasenübergang

- Durch gefrierenden Regen oder schmelzenden Schnee, wenn die Wetterbedingungen entsprechend sind.

Da in den Wetterdaten zwar eine Regenmenge angegeben wird, aber nicht zwischen Regen und Schnee unterschieden wird, muss hierfür eine Annahme getroffen werden. Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass bei Außenlufttemperaturen über 0 °C Regen fällt, und bei Außenlufttemperaturen unterhalb von 0 °C und auch bei 0 °C Schnee fällt. Die Annahme, dass bei Außenlufttemperaturen von 0 °C nicht Regen, sondern Schnee fällt, begründet sich in der Überlegung, dass sich die Wolken, in denen sich der Regen oder Schnee bilden, in höheren Luftschichten befinden, wo die Luft im Allgemeinen kühler ist als am Erdboden.

Fällt Regen auf die äußere Membran, wenn diese eine Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser hat, so wird dieser gefrieren. Fällt Schnee auf die Membran und hat diese eine Temperatur über 0 °C , so wird dieser schmelzen.

- Durch den Eintrag von Feuchtigkeit auf die Membranoberfläche, die dort eine Feuchtigkeitsschicht (Wasser- oder Eisschicht) bildet. Bei Temperaturen um 0 °C kann diese Schicht den Angleich der Membrantemperatur an ihre Gleichgewichtstemperatur verzögern, wenn dazu ein Übergang zwischen einer Membrantemperatur ober- und unterhalb von 0 °C notwendig ist. Denn dann muss zunächst das Wasser auf der Oberfläche gefrieren oder das vorhandene Eis schmelzen.

Im Berechnungsprogramm wird dies dadurch berücksichtigt, dass sich die Membrantemperatur dann zunächst auf 0 °C einstellt, so lange, bis alles Wasser gefroren oder alles Eis geschmolzen ist. Dieser Zeitpunkt, an dem eine vorhandene Eis- oder Wasserschicht „aufgebraucht“ ist, wird nicht mit dem Ende eines Zeitschrittes in der Wetterdatendatei zusammenfallen. Der entsprechende Zeitschritt in der Wetterdatendatei wird dann in mehrere Teil-Zeitschritte aufgeteilt, die zwar die gleichen Wetterbedingungen haben, aber in denen die Verhältnisse an der Membran sich unterscheiden durch vorhandene bzw. nicht vorhandene Feuchtigkeitsschichten.

Verdunstungskühlung

- Durch den Eintrag von Feuchtigkeit auf die Membranoberfläche, die dort eine Feuchtigkeitsschicht (Wasser- oder Eisschicht) bildet. Diese kann im aktuellen Zeitschritt oder zu späteren Zeitpunkten verdunsten bzw. sublimieren und die Membran abkühlen.

Maximale Schichtdicken für Wasser

Wasser bildet auf den meisten Oberflächen Tropfen. Dieses Verhalten kann nicht oder nur schwerlich modelliert werden. Vereinfacht wird hier angenommen, dass das Wasser, das an den Oberflächen haftet, eine homogene Schicht bildet mit einer maximalen Schichtdicke. Bei überschüssigem Wasser läuft dieses ab oder tropft ab. Für die äußere, also obere Oberfläche wird diese maximale Massenbelegung zu $0,6\text{ kg / m}^2$ abgeschätzt, was einer Schichtdicke von ca. $0,6\text{ mm}$ entspricht. Für die innere, also untere Oberfläche wird diese maximale Massenbelegung mit $0,4\text{ kg/m}^2$ angenommen.

Für Wasserschichten auf einer vorhandenen Eisschicht jedoch wird eine dünnere maximale Wasserschicht angenommen, weil Wasser auf Eis ein anderes Benetzungsverhalten zeigt. Die verwendeten Werte wurden aus der Alltagserfahrung abgeschätzt. Sie betragen $0,1\text{ kg/m}^2$ außen bzw. oben und $0,08\text{ kg/m}^2$ innen bzw. unten.

Übersicht über die einzelnen Beiträge zum Wärmestrom zur Membran / von der Membran

Die Wärmeeinträge und Wärmeabgaben der Membran setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen.

- Solarstrahlung
 - Die Oberseite der äußeren Membran absorbiert einen Teil der auf sie auftreffenden kurzwelligigen Solarstrahlung. Diese setzt sich zusammen aus
 - der Direktstrahlung,
 - der Diffusstrahlung vom Himmel,
 - der Diffusstrahlung von der Umgebung.
- Wärmestrahlung
 - Im langwelligen Bereich steht die Membran nach oben mit dem Himmel im Strahlungsaustausch, je nach Neigungswinkel auch mit der umgebenden Landschaft.
 - Nach unten steht sie im Infrarot-Strahlungsaustausch mit der Unterspannbahn über der Wärmedämmschicht.
- Konvektiver Wärmeübergang
 - Konvektiver Wärmeübergang von der oder zu der Luft im Außenraum, also nach oben,
 - Konvektiver Wärmeübergang von der oder zu der Luft im durchströmten Zwischenraum, also nach unten.
- Ein- oder Austrag von latenter Wärme aus der Gasphase bzw. in die Gasphase
 - Eintrag von latenter Wärme durch Kondensation von Wasserdampf oder durch Bildung einer Eis- oder Reifschicht,
 - oder Austrag von latente Wärme durch Verdunstung einer Wasserschicht oder Sublimation einer Schnee-, Reif- oder Eisschicht, die sich in einem vorherigen Betrachtungszeitraum auf der Membran bildete,
 - und / oder Austrag von latente Wärme aus der Membran durch Verdunstung von Wasser oder Sublimation von Eis (Schnee), das im aktuellen Zeitraum auf die Außenseite der Membran auftrifft.
 - Die ersten beiden Beiträge können an der Ober- und der Unterseite der Membran auftreten. Der letztgenannte Beitrag zum Wärmehaushalt der Membran kann selbstverständlich nur an der Membran-Oberseite auftreten.
- Ein- oder Austrag von latenter Wärme durch fest-flüssig-Phasenübergang
 - Durch fest-flüssig-Phasenwechsel, d. h. durch Gefrieren von an der Oberfläche befindlichem Wasser oder Schmelzen von an der Oberfläche haftendem Eis /Schnee.

Im Folgenden werden die einzelnen Anteile genauer betrachtet und mathematisch beschrieben.

Ansatz

Zunächst werden hier die Vorzeichen der Wärmeströme definiert. Die Vorzeichenkonvention wird aus WUFI übernommen: Wärmeströme vom Außenraum in Richtung des Inneren des Gebäudes haben ein positives Vorzeichen.

Die Berechnungsmethode beruht auf der Energiebilanz der äußeren Membran. Der grundlegende Ansatz ist die Kontinuitätsgleichung.

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \vec{\nabla} \vec{j} = 0$$

mit

$$\begin{aligned} u &= \text{Energiedichte} \\ \vec{j} &= \text{Energiestromdichte} \\ t &= \text{Zeit} \end{aligned}$$

Für stationäre Betrachtungen gilt, dass sich der Energieinhalt mit der Zeit nicht ändert.

$$\frac{\delta u}{\delta t} = 0$$

Für die eindimensionale Betrachtung der äußeren Membran gilt für die Divergenz der Energiestromdichten

$$\vec{\nabla} \vec{j} = \frac{\sum_k \dot{j}_{i,k} - \sum_l \dot{j}_{o,l}}{d} = 0$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{j}_{i,k} &= \text{Energiestromdichten an der Innenseite der Membran} \\ \dot{j}_{o,l} &= \text{Energiestromdichten an der Außenseite der Membran} \\ d &= \text{Dicke der Membran} \end{aligned}$$

Es muss also aus der Differenz der Wärmestromdichten auf den beiden Seiten der Membran Δj die Membrantemperatur bestimmt werden, indem die Nullstelle der Funktion

$$\Delta j = \sum_k \dot{j}_{i,k} - \sum_l \dot{j}_{o,l}$$

gesucht wird.

Die Energiestromdichten innen und außen setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Es sind dies der Wärmeeintrag durch absorbierte Solarstrahlung, der konvektive Wärmeübergang zur angrenzenden Luft, der langwellige Strahlungsaustausch mit dem Himmel und / oder anderen Oberflächen, und der Wärmeeintrag oder Wärmeverlust, der mit dem Phasenwechsel beim Feuchteübergang verbunden ist. Die einzelnen Anteile werden im Folgenden näher beschrieben.

Wärmeströme an der Außenseite der Membran

Solarstrahlung

$$\dot{j}_{sol,o} = G \alpha_{sol,o}$$

mit

- G = auf die Dachfläche auftreffende Solarstrahlung
- $\alpha_{sol,o}$ = Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung an der Außenseite der Membran

Anmerkungen zur Solarstrahlung:

In Wetterdatensätzen sind meist zwei der drei Größen Globalstrahlung, Direkt- und Diffusstrahlung angegeben, jeweils auf die Horizontale. Bei der Erstellung der Wetterdatendatei mit WUFI wird bereits die gesamte Solarstrahlung (Globalstrahlung) auf die geneigte Dachfläche ausgegeben.

Die Umrechnung der Solarstrahlungswerte für die Horizontale in Einstrahlungswerte für geneigte Flächen wird ausführlich in [Duffie/Beckman06] und in [VDI 6020] beschrieben.

Im Allgemeinen gelten für die Direkt- und die Diffusstrahlung unterschiedliche Absorptionskoeffizienten aufgrund der Winkelabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten. Hier wird nicht zwischen den Strahlungsanteilen unterschieden. Es steht auch lediglich ein Wert für den solaren Absorptionskoeffizienten zur Verfügung.

Langwelliger Strahlungsaustausch

$$\dot{j}_{IR,o} = \epsilon_{IR,o} \dot{j}_{sky} - \sigma \epsilon_{IR,o} (\vartheta_M + T_f)^4$$

mit

- \dot{j}_{sky} = Energiestromdichte der auf die Dachfläche auftreffenden langwelligen Strahlung vom Himmel und der Umgebung
- σ = Stefan-Boltzmann-Konstante
- $\epsilon_{IR,o}$ = Absorptions- und Emissionsgrad für langwellige Strahlung, Außenseite der Membran
- ϑ_M = Temperatur der Membran [°C]
- T_f = Verschiebung der Celcius- und Kelvin Temperaturskalen

Anmerkungen:

Wie bei der Solarstrahlung wird für die langwellige Strahlung der von WUFI berechnete Wert für die geneigte Dachfläche verwendet, der bereits die verschiedenen Anteile der IR-Strahlung vom Himmel und der Umgebung enthält.

Aufgrund der geringen Ausdehnung der betrachteten Fläche im Vergleich zum Himmel, werden keine Reflexionen der von der Dachfläche abgestrahlten IR-Strahlung in Betracht gezogen.

Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Anteile des langwelligen Strahlungsaustausches mit dem Himmel und der Umgebung wird auf der WUFI-Website [WUFI15] und in den WUFI Pro-Hilfetexten [WUFI-Hilfetext], Kapitel „Referenz / Klimadaten / Langwelliger Strahlungsaustausch“ gegeben.

Auch die Umrechnung der langwelligen Strahlungswerte für die Horizontale in Einstrahlungswerte für geneigte Flächen wird in [Duffie/Beckman06] Kapitel 1 und in [VDI 6020], Kapitel „Langwelliger Strahlungsaustausch an außenliegenden Bauteilen“ beschrieben.

Konvektiver Wärmeübergang von und zur Luft

$$\dot{j}_{conv,o} = \alpha_{conv,o} (\vartheta_{air,o} - \vartheta_M)$$

mit

$$\begin{aligned} \alpha_{conv,o} &= \text{konvektiver Wärmeübergangskoeffizient} \\ \vartheta_{air,o} &= \text{Außenlufttemperatur} \end{aligned}$$

Anmerkungen:

Der außenseitige konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit berechnet, entsprechend der in WUFI vorgegebenen Formel. Für Bauteilneigungen kleiner 10 ° wird dort folgende Formel vorgeschlagen.

$$\alpha_{conv,o} = 4,5 \frac{W}{m^2 K} + 1,6 \frac{W s}{m^3 K} \cdot v_{air,o}$$

mit

$$v_{air,o} = \text{Windgeschwindigkeit}$$

Für die Windgeschwindigkeit an der Dachfläche der Sporthalle wird die in den Wetterdaten enthaltene Windgeschwindigkeit angesetzt. Die Windgeschwindigkeit wird vom DWD in 10 m Höhe über freiem Gelände gemessen. D.h. die in den Wetterdaten, z.B. den Testreferenzjahren, angegebene Windgeschwindigkeit gilt für eine Höhe von 10 m über Gelände. Das Dach der Sporthalle befindet sich 10 m bis 15 m über Gelände. Die umliegende Bebauung ist nicht höher als die Sporthalle. Somit kann für die Luftgeschwindigkeit über dem Dach der Sporthalle die Windgeschwindigkeit aus den Wetterdaten angesetzt werden.

Mit dem Feuchteübergang verbundener Wärmeübergang

Zunächst wird die Feuchteübergangsrate berechnet. Das treibende Potential für den Feuchteübergang zwischen der Bauteiloberfläche und der Luft ist der Wasserdampfpartialdruck. Für die Oberfläche eines Materials, das keine Feuchtigkeit aufnimmt, geht man bei der Berechnung immer vom Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Bauteiloberfläche aus. Dies gilt auch dann, wenn auf der Oberfläche keine Feuchtigkeit vorhanden ist.

Im Falle, dass der Wasserdampfpartialdruck an der Oberfläche höher ist als derjenige in der umgebenden Luft, kann natürlich nur dann Wasser verdunsten, wenn dort auch Wasser vorhanden ist. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes gilt entsprechendes für Eis.

Die Feuchteübergangsrate ist proportional zum Feuchteübergangskoeffizienten und zur Differenz des Wasserdampfdruckes.

$$\dot{m}'_o = \beta_o (p_{air,o} - p_{M,o})^{(1)}$$

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : \text{immer} \\ - : \dot{m}'_o > 0 \text{ oder } |\dot{m}'_o| \leq \dot{m}_{rain} \end{array} \right)$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{m}'_o &= \text{Massenstromdichte für Wasserdampf} \\ \beta_o &= \text{Feuchteübergangskoeffizient,} \\ &\text{proportional zum konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten} \\ &\beta = F_\beta \alpha_{conv} \end{aligned}$$

mit

$$F_\beta = 7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg K}}{\text{s W Pa}} = 7 \cdot 10^{-9} \frac{\text{K s}^4}{\text{kg m}}$$

$$\begin{aligned} p_{air,o} &= \text{Wasserdampfpartialdruck der Außenluft} \\ p_{M,o} &= \text{Sättigungsdampfdruck an der äußeren Oberfläche der Membran} \\ \dot{m}'_o &= \text{Massenbelegung der äußeren Oberfläche mit Wasser oder Eis} \\ \dot{m}_{rain} &= \text{flächenbezogenen Regenmenge pro Zeiteinheit} \end{aligned}$$

Der Wasserdampfpartialdruck der Außenluft wird aus deren Temperatur und relativer Feuchte anhand der Magnus-Formel mit den in WUFI angegebenen Parametern berechnet. Je nach Außenlufttemperatur über oder unter 0 °C werden die jeweiligen Parameter der Magnus-Formel für den Dampfdruck über Wasser oder über Eis verwendet.

Der Dampfdruck an der äußeren Oberfläche der Membran entspricht dem Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur der Membran. Er wird wieder mit der Magnus-Formel berechnet, mit deren Parameter für den Dampfdruck über Wasser oder Eis, je nach Temperatur der Membran.

Der Ausdruck

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : \text{immer} \\ - : m'_o > 0 \quad \text{oder} \quad |\dot{m}'_o| \leq \dot{m}_{rain} \end{array} \right)$$

hat folgende Bedeutung:

Wenn es einen Feuchteübergang von der Luft zur Membranoberfläche gibt, also der Ausdruck für die Feuchteübergangsrate positiv ist, wird dieser in der Berechnung berücksichtigt. Wenn der Ausdruck für die Feuchteübergangsrate negativ ist, also ein Feuchteübergang von der äußeren Membranoberfläche zur Außenluft berechnet wird, wird dieser nur dann berücksichtigt, wenn auf der Oberfläche Wasser oder Eis vorhanden ist. Im Falle, dass auf der Oberfläche keine Feuchtigkeit vorhanden ist, es aber regnet, kann der auftreffende Regen verdunsten, jedoch maximal bis zur auftreffenden Regenmenge. Entsprechendes gilt für Niederschlag als Schnee.

Aus der so berechneten Feuchteübergangsrate wird der mit der Phasenänderung an der Oberfläche verbundene Wärmeeintrag oder Wärmeverlust für das Bauteil berechnet.

$$j_{m,o} = \dot{m}'_o h_V$$

mit

h_V = Verdunstungs- / Kondensations- / Eisbildungs- oder Sublimationsenthalpie

$$h_V = h_{V,0} + s_{hv} \vartheta_M$$

mit

h_V = Verdunstungs- / Kondensations- / Eisbildungs- oder Sublimationsenthalpie bei 0 °C

s_{hv} = Temperaturabhängigkeit der Verdunstungs- (etc.) -Enthalpie

Auch bei der Berechnung der Verdunstungs- (etc.) -Enthalpie muss wieder zwischen Temperaturen über und unter 0°C unterschieden und die entsprechenden Parameter gewählt werden. Beträgt die Temperatur der Membran 0 °C, so kann im Falle von Feuchteeintrag auf die Oberfläche der Membran teilweise Wasser, teilweise Eis entstehen. Im Falle der Verdunstung von Wasser bzw. Sublimation von Eis wird folgendes geschehen:

Ist auf der Oberfläche Wasser vorhanden, so wird dieses verdunsten. Dies gilt auch, wenn auf der Oberfläche Eis und Wasser vorhanden sind. Zusätzlich kann in einem Teil der vorhandenen Feuchtigkeit ein Phasenübergang zwischen fest und flüssig oder umgekehrt stattfinden, je nach der Größe des Wärmeeintrages.

Ist auf der Oberfläche nur Eis vorhanden, so wird dieses sublimieren oder schmelzen und verdunsten. In beiden Fällen ergibt sich der gleiche Betrag für die spezifische Enthalpie, die für den Übergang von der festen in die gasförmige Phase notwendig ist. Auch hier kann zusätzlich ein Teil des vorhandenen Eises schmelzen, je nach der Größe des Wärmeeintrages.

Insgesamt ergibt sich für den mit dem Feuchteübergang verbundene Wärmeübergang die Formel

$$\dot{m}_{o} = \beta_o \left(\varphi_o p_0 e^{\frac{a \vartheta_{air,o}}{b + \vartheta_{air,o}}} - p_0 e^{\frac{a \vartheta_M}{b + \vartheta_M}} \right) \quad (1)$$

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : \text{immer} \\ - : m'_o > 0 \quad \text{oder} \quad |m'_o| \leq \dot{m}_{rain} \end{array} \right)$$

Wobei die Parameter p_0 , a , b , $h_{V,0}$ und s_{hv} wieder danach zu wählen sind, ob die Temperatur dessen (die Außenluft oder die Membran), worauf sie sich beziehen, über oder unter 0°C liegt.

Wärmeströme an der Innenseite der Membran

Für die Innenseite der Membran gelten für die Energiestromdichten analoge Gleichungen, die jedoch teilweise angepasst werden müssen.

Solarstrahlung

Im Falle des Membrandaches der Sporthalle Fürth erreicht nur sehr wenig Solarstrahlung die Innenseite der äußeren Membran. Diese Strahlung setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen.

- Der Solarstrahlung, die durch die äußere Membran dringt und an der Unterspannbahn reflektiert wird. Für die äußere Membran ist eine Membran aus Polyestergewebe mit PVC-Beschichtung vorgesehen. Nach den Angaben in den Datenblättern und den optischen Messungen, die am ZAE Bayern durchgeführt wurden, beträgt der solare Transmissionsgrad dieser Membranen 0,06 bis 0,07. Multipliziert mit dem Reflexionsgrad der Unterspannbahne mit der darunterliegenden Wärmedämmschicht, der mit 0,85 abgeschätzt wird, ergibt sich eine solare Einstrahlung von 5 % der Solarstrahlung auf die Unterseite der äußeren Dachhaut.
- Die Solarstrahlung, die an der Umgebung der Sporthalle reflektiert wird und durch das Lochblech an die Unterseite der äußeren Membran dringt. Dies betrifft vor allem die Ränder des Membrandaches. Für die Albedo der Umgebung nimmt man für bebaute Umgebung und für Vegetation im Allgemeinen einen Wert von 0,2 an. Multipliziert mit dem Lochanteil des Lochbleches von 0,5 ergibt dies eine Strahlungsintensität von 10 % der auf die Horizontale auftreffenden Solarstrahlung.

Die kurzwellige Strahlungsintensität auf die Innenseite der äußeren Membran beträgt also 5 % bis 15 % der Solarstrahlung außen. Hiervon werden ca. 15 % absorbiert. Dies ergibt

- 5 % bis 15 % im Vergleich der Strahlung, die an der Außenseite dieser Membran absorbiert wird.
- 0,75 % bis 2,25 % der auf die Außenseite auftreffenden Solarstrahlung.

Im erstellten Berechnungsprogramm wird dieser Anteil der Solarstrahlung vernachlässigt

$$\dot{j}_{sol,i} = 0$$

Langwelliger Strahlungsaustausch

An der Innenseite der äußeren Membran erfolgt der langwellige Strahlungsaustausch hauptsächlich mit der Unterspannbahn über der Wärmedämmschicht. Zu einem geringen Teil erfolgt er auch mit den Stahlträgern und vor allem an den Rändern des Daches mit dem Lochblech und der Außenumgebung.

Für die Berechnung wird lediglich der Strahlungsaustausch mit der Unterspannbahn betrachtet. Dabei wird die Formel für den Strahlungsaustausch zwischen zwei unendlich ausgedehnten, parallelen Platten verwendet. Diese Geometrie ist hier näherungsweise gegeben.

Die Formel lautet

$$\dot{j}_{IR,i} = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{IR,i}} + \frac{1}{\epsilon_{IR,U,o}} - 1} \left((\vartheta_M + T_f)^4 - (\vartheta_U + T_f)^4 \right)$$

mit

- σ = Stefan-Boltzmann-Konstante
- $\epsilon_{IR,i}$ = langwelliger Absorptions- und Emissionsgrad der Innenseite der äußeren Membran
- $\epsilon_{IR,U,o}$ = langwelliger Absorptions- und Emissionsgrad der Außenseite der Unterspannbahn
- ϑ_M = Temperatur der äußeren Membran in °C
- ϑ_U = Temperatur der Unterspannbahn in °C
- T_f = Verschiebung der Celcius- und Kelvin-Temperaturskalen = 273,15 K

Die Temperatur der Unterspannbahn ist zunächst nicht bekannt. Sie hängt durch den Strahlungsaustausch auch von der Temperatur der äußeren Membran ab. Diese Abhängigkeit ist jedoch eher gering, besonders bei einem kleinen U-Wert der Wärmedämmschicht.

Abschätzung der Temperatur der Unterspannbahn

Für die hier angestellte isolierte Betrachtung der äußeren Membran wird die Temperatur der Unterspannbahn abgeschätzt. Hierzu werden wieder Näherungswerte verwendet:

- Die Temperatur der äußeren Membran wird für diese Abschätzung mit der Temperatur der Außenluft angenommen.
- Die Temperatur der Luft im Dachzwischenraum ist im 0-ten Flächenabschnitt gleich der Temperatur der Außenluft.

Zur getrennten Berechnung des radiativen und des konvektiven Wärmeübergangs an der Unterspannbahn wird wiederum die Temperatur der Luft im Membrandach-Zwischenraum und die Temperatur der äußeren Membran benötigt. Letztere wurde noch nicht berechnet. Sie wird für diese Abschätzung gleich der Außenlufttemperatur gesetzt.

Der radiative Wärmeübergangskoeffizient wird hiermit zu

$$\alpha_{IR,U,o} = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{IR,i}} + \frac{1}{\varepsilon_{IR,U,o}} - 1} 4 (\vartheta_{air,o} + T_f)^3$$

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Unterspannbahn und der Luft im Membrandach-Zwischenraum ist von der Luftgeschwindigkeit im Dachzwischenraum abhängig. Diese wird auf ein Viertel der Windgeschwindigkeit außen abgeschätzt. (Vergleiche hierzu das Kapitel „Luftzwischenraum des Membrandaches / Abschätzung der Luftgeschwindigkeit im Membrandach-Zwischenraum“)

$$\alpha_{conv,U} = 4,5 \frac{W}{m^2 K} + 1,6 \frac{W s}{m^2 K} \cdot \frac{v_{air,o}}{4}$$

Der Gesamt-Wärmeübergangskoeffizient für die Unterspannbahn ergibt sich aus der Summe des konvektiven und des radiativen Wärmeübergangskoeffizienten.

$$\alpha_U = \alpha_{conv,U} + \alpha_{IR,U,o}$$

Die Temperaturdifferenz zwischen Punkten in einem Bauteilaufbau ist proportional zu den Wärmedurchgangs- bzw. Wärmedurchlass- oder Wärmeübergangswiderständen. Im konkreten Fall hier

$$\frac{\vartheta_{air,i} - \vartheta_U}{\vartheta_{air,i} - \vartheta_R} = \frac{\frac{1}{\alpha_U}}{\frac{1}{U_{WD}}}$$

mit

$$\begin{aligned} \vartheta_{air,i} &= \text{Temperatur der Luft im Membrandach-Zwischenraum} \\ \vartheta_R &= \text{Lufttemperatur im Innenraum, hier der Sporthalle} \end{aligned}$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmmaterials beträgt $0,1 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ bis $0,13 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$. Die Wärmedämmschicht wurde auf einen U-Wert des inneren Dachaufbaus von $0,3 \text{ W} / (\text{m K})$ ausgelegt. Von diesem Wert wird hier ausgegangen.

Nun wird noch die Temperatur im Inneren der Sporthalle benötigt. Hierfür werden die von WUFI berechneten Werte nach [DIN EN 15026] verwendet.

Somit sind alle Größen zur Berechnung des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen der äußeren Membran und der Unterspannbahn zumindest näherungsweise bestimmt und die Temperatur der Unterspannbahn kann in jedem Zeitschritt abgeschätzt werden zu

$$\vartheta_U = \vartheta_{air,i} - \frac{U_{WD}}{\alpha_U} (\vartheta_{air,i} - \vartheta_R)$$

Konvektiver Wärmeübergang von und zur Luft

Die Wärmestromdichte durch Konvektion an der Innenseite der äußeren Membran ist

$$j_{conv,i} = \alpha_{conv,i} (\vartheta_{air,i} - \vartheta_M)$$

mit

- $\alpha_{conv,i}$ = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite der äußeren Membran
- $\vartheta_{air,i}$ = Temperatur der Luft im Membrandach-Zwischenraum

Am Lufteintritt in den Zwischenraum ist die Temperatur der Luft gleich der Temperatur der Außenluft.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist von der Luftgeschwindigkeit im Membrandach-Zwischenraum abhängig. Diese wird auf ein Viertel der Windgeschwindigkeit außen abgeschätzt. (Vergleiche hierzu das Kapitel „Luftzwischenraum des Membrandaches / Abschätzung der Luftgeschwindigkeit im Membrandach-Zwischenraum“)

$$\alpha_{conv,i} = 4,5 \frac{W}{m^2 K} + 1,6 \frac{W s}{m^2 K} \cdot \frac{v_{air,o}}{4}$$

Mit dem Feuchteübergang verbundener Wärmeübergang

Die Berechnung des Wärmeübergangs durch Feuchteübergang an der Membraninnenseite wird ganz analog zur Außenseite berechnet. Lediglich folgende Größen müssen entsprechend verwendet werden

- Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zur Berechnung des Feuchteübergangskoeffizienten
- Die Regenrate ist innen gleich Null.

$$\dot{j}_{m,i} = \beta_i \left(\varphi_i p_0 e^{\frac{a \vartheta_{air,i}}{b + \vartheta_{air,i}}} - p_0 e^{\frac{a \vartheta_M}{b + \vartheta_M}} \right) \quad (1) \quad (h_{V,0} + s_{hv} \vartheta_M)$$

$$(1) = \begin{pmatrix} + : immer \\ - : m'_i > 0 \end{pmatrix}$$

Und wieder sind die Koeffizienten p_0 , a , b , $h_{V,0}$ und s_{hv} entsprechend den jeweiligen Temperaturen über oder unter 0 °C zu wählen.

Lösung des Gleichungssystems

Setzt man diese einzelnen Terme in die Kontinuitätsgleichung ein, so führt dies zu einer Gleichung, die nicht nach der Membrantemperatur aufgelöst werden kann. Sie muss numerisch gelöst werden. Hierzu wird das Newtonsche Verfahren [Lang/Pucker98], S 157 gewählt. Man wählt einen Startwert in der Nähe der Nullstelle und legt dort an die Funktion eine Tangente an. Der Schnittpunkt der Tangenten mit der x-Achse ist der nächst beste Temperatur-Wert etc.

Als Startwert für die Membrantemperatur wird die Lufttemperatur gewählt. Im Falle von abweichenden Lufttemperaturen an den beiden Seiten der Membran könnte das mit den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten gewichtete Mittel der Lufttemperaturen benutzt werden.

$$\vartheta_{M,0} = \frac{\alpha_{conv,o} \vartheta_{air,o} + \alpha_{conv,i} \vartheta_{air,i}}{\alpha_{conv,o} + \alpha_{conv,i}}$$

Die Steigung der Tangenten berechnet sich aus der Summe der Ableitungen der einzelnen Terme nach der Membrantemperatur.

Die Tangente trifft die Abszisse

$$\vec{\nabla} \vec{j}(\vartheta_{M,n}) + s_n \Delta \vartheta_{n+1} = 0$$

Daraus berechnet sich der Korrekturwert für die Membrantemperatur

$$\Delta \vartheta_{n+1} = - \frac{\vec{\nabla} \vec{j}(\vartheta_{M,n})}{s_n}$$

Die Tangentensteigung berechnet sich aus der Summe der Ableitungen der einzelnen Terme nach der Membrantemperatur.

$$s_n = \frac{d}{d \vartheta_M} \left(\sum_k \dot{j}_{i,k} - \sum_l \dot{j}_{o,l} \right)_{\vartheta_M = \vartheta_{M,n}}$$

Die Ableitungen der einzelnen Terme sind nachfolgend aufgelistet.

Ableitungen für die Außenseite der Membran

Solarstrahlung

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{sol,o} = 0$$

Konvektiver Wärmeübergang

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{conv,o} = - \alpha_{conv,o}$$

Langwellige Strahlung

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{IR,o} = - \sigma \varepsilon_{IR,o} 4 (\vartheta_M + T_f)^3$$

Wärmeeintrag durch Kondensation

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{m,o} = \beta_o \left(- p_0 e^{\frac{a \vartheta_M}{b + \vartheta_M}} \left[\frac{a b (h_{V,0} + s_{hv} \vartheta_M)}{(b + \vartheta_M)^2} + s_{hv} \right] + \varphi_o p_0 e^{\frac{a \vartheta_{air,o}}{b + \vartheta_{air,o}}} s_{hv} \right) \quad (1)$$

$$(1) = \left(\begin{array}{l} + : \text{immer} \\ - : \dot{m}'_o > 0 \quad \text{oder} \quad |\dot{m}'_o| \leq \dot{m}_{rain} \end{array} \right)$$

Dabei ist zu beachten, dass der Term für den Wärmeübergang durch Feuchteübergang nicht immer zu berücksichtigen ist. Entsprechend ist auch seine Ableitung zu berücksichtigen oder nicht. Wird die Verdunstungsrate durch die Regenmenge beschränkt, dann gibt es eine Temperaturabhängigkeit des dadurch entstehenden Wärmeübergangs nur durch die Temperaturabhängigkeit der Verdunstungsenthalpie. Entsprechendes gilt bei Membrantemperaturen unter 0 °C für die Sublimationsrate und die Sublimationsenthalpie.

Falls also $\dot{m}'_o = - \dot{m}_{rain}$, dann gilt

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{m,o} = - \dot{m}_{rain} \frac{d}{d \vartheta_M} s_{hv} = - \dot{m}_{rain} s_{hv}$$

Ebenso müssen wieder die Koeffizienten p_0 , a , b , $h_{V,0}$ und s_{hv} entsprechend der Temperatur über oder unter 0 °C gewählt werden, auf die sie sich beziehen.

Ableitungen für die Innenseite der Membran

Solarstrahlung

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{sol,i} = 0$$

Konvektiver Wärmeübergang

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{conv,i} = -\alpha_{conv,i}$$

Langwellige Strahlung

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{IR,i} = -\alpha_{IR,U,i} = -\sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{IR,i}} + \frac{1}{\varepsilon_{IR,U,o}} - 1} 4 (\vartheta_{air,o} + T_f)^3$$

Wärmeeintrag durch Kondensation

$$\frac{d}{d \vartheta_M} j_{m,i} = \beta_i \left(-p_0 e^{\frac{a \vartheta_M}{b + \vartheta_M}} \left[\frac{a b (h_{V,0} + s_{hv} \vartheta_M)}{(b + \vartheta_M)^2} + s_{hv} \right] + \varphi_o p_0 e^{\frac{a \vartheta_{air,i}}{b + \vartheta_{air,i}}} s_{hv} \right) \quad (1)$$

(1) = $\begin{pmatrix} + : \text{immer} \\ - : m'_i > 0 \end{pmatrix}$

Wieder gilt, dass dieser Term je nach Bedingungen zu berücksichtigen ist und die Koeffizienten nach den Temperaturen zu wählen sind.

Verhalten von Membran, Wasser, Wasserdampf und Eis bei 0 °C.

Die vorgestellten Formeln erlauben die Berechnung der einzelnen Wärmeströme und der Membrantemperatur, wenn sowohl die Temperatur der Außenluft wie auch der Membran über dem Gefrierpunkt von Wasser oder beide Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes liegen.

In den Fällen, dass die Lufttemperatur und die Membrantemperatur oberhalb und unterhalb von 0 °C liegen, muss für verschiedenen Fälle unterschieden werden.

Im Falle, dass die Lufttemperatur über 0 °C liegt und die Membrantemperatur unter 0 °C, wird im Falle von Feuchteübergang zur Membranoberfläche hin, das Wasser sofort gefrieren. Es bildet sich Eis oder Reif. Auch dies wird mit diesen Formeln richtig berechnet, da der Wasserdampfdruck in der Luft und die frei werdende Enthalpie je nach der Temperatur der Luft bzw. der Membran berechnet werden. Dies gilt für Zeitschritte ohne Regen.

Ebenso werden Zeitschritte ohne Regen und mit Sublimation einer vorhandenen Eisschicht, also bei einer Membrantemperatur unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, richtig berechnet, auch dann, wenn die Lufttemperatur über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt.

Ansonsten muss der Fest-Flüssig-Phasenübergang des Wassers und die damit verbundene Erstarrungs- bzw. Schmelzenthalpie mit berücksichtigt werden.

Zunächst werden verschiedene Fälle von Randbedingungen betrachtet.

Fall 1: Kondensation und Eisbildung bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ Membrantemperatur

Betrachtet wird der Fall mit einer Lufttemperatur etwas über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, einer Himmelstemperatur die etwas unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt und einer hohen relativen Feuchte der Außenluft.

Unter diesen Randbedingungen kondensiert Wasser an den Oberflächen der Membran. Dann können folgende Zustände auftreten.

Würde aller kondensierender Wasserdampf an den Oberflächen zu Eis gefrieren, wären die frei werdende Kondensations- und Erstarrungsenthalpie zusammen so hoch, dass die Membrantemperatur über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ steigen würde. Damit wäre aber die Voraussetzung für ein Gefrieren des Kondensates nicht mehr gegeben.

Würde der kondensierenden Wasserdampf nicht gefrieren, würde die Kondensationsenthalpie nicht ausreichen, um die Temperatur der Membran auf $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erhöhen. Damit wäre aber die Voraussetzung für ein Nicht-Gefrieren des Kondensates nicht mehr gegeben.

Was also passieren wird unter solchen Wetterverhältnissen ist, dass nur ein Teil des an beiden Membranoberflächen kondensierenden Wasserdampfes zu Eis gefriert. Es wird genau so viel Wasser gefrieren, dass sich die Membrantemperatur auf $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ einstellt. Das gleiche gilt für den auf der Membran auftreffenden Regen.

Hier stellt sich dann die Frage, wie viel Eis sich an der Außen- und an der Innenseite der Membran bilden wird.

Da in diesem Modell die Näherung verwendet wird, dass über die Dicke der Membran und der anhaftenden Eis- und Wasserschichten (sofern vorhanden) die gleiche Temperatur herrscht, führt dies zur Überlegung, dass die Eisbildungsrate auf beiden Seiten der Membran gleich groß seien, sofern auf beiden Seiten genügend Wasserdampf kondensiert.

Andererseits erscheint es unlogisch, dass sich auf beiden Seiten gleich viel Eis bildet, wenn die Umgebung auf einer Seite der Membran kälter ist als auf der anderen Seite. Mit der angenommenen Näherung der homogenen Temperatur über die Dicke, kann dies jedoch nicht exakt berechnet werden. Am ehesten erscheint folgende Annahme sinnvoll:

Die Eisbildungsraten auf den beiden Seiten der Membran sind proportional zu den Wärmeverlusten auf der jeweiligen Seite.

$$\frac{\dot{m}'_{H_2O-ice,o}}{-\dot{m}'_{H_2O-ice,i}} = \frac{-\sum_l \dot{j}_{o,l}}{\sum_k \dot{j}_{i,k}}$$

mit

$$\begin{aligned}\dot{m}'_{H_2O-ice,o} &= \text{flächenbezogene Erstarrungsrate außen} \\ \dot{m}'_{H_2O-ice,i} &= \text{flächenbezogene Erstarrungsrate innen} \\ \sum_l \dot{j}_{o,l} &= \text{Summe der Wärmeströme zur Membran hin, außen} \\ \sum_k \dot{j}_{i,k} &= \text{Summe der Wärmeströme von der Membran weg, innen}\end{aligned}$$

Die Vorzeichen rühren von der Definition her, dass Wärme- und Massenströme in Richtung von außen nach innen als positiv gewertet werden. Diese Definition wurde aus WUFI übernommen.

Unter Umständen kann jedoch auf einer Seite nicht genügend Wasser zur Verfügung stehen, um diese Verteilung der Erstarrungsraten zu erfüllen. Dann wird entsprechend mehr Wasser auf der anderen Seite zu Eis erstarren.

Fall 2: Eis schmilzt an den Membranoberflächen

Für den Fall, dass sich aufgrund der Randbedingungen im aktuellen Zeitschritt eine Membrantemperatur über 0 °C einstellen würde, aber sich aus dem vorigen Zeitschritt noch Eis auf mindestens einer der Membranoberflächen befindet, stellt sich die Membrantemperatur auf 0 °C ein und der in die Membran mit ihren Oberflächenschichten strömende Wärmestrom führt zum Schmelzen weiteren Eises. Somit ist wieder die Gesamt-Schmelzrate für beide Oberflächen zusammen gegeben. Zur Aufteilung der Schmelzrate auf die beiden Oberflächen wird wieder das gleiche Prinzip angewandt: die Schmelzraten beider Seiten sind jeweils proportional zur Wärmeeintragsrate der jeweiligen Seite. Ist auf einer Seite alles Eis geschmolzen, wird der Zeitschritt unterteilt. Im nächsten Teil des Zeitschrittes schmilzt dann auf der Seite, auf der noch Eis vorhanden ist, so viel Eis, dass der auf beiden Membranseiten einströmende Wärmestrom hierfür verwendet wird. Dies geschieht so lange, bis auch dort kein Eis mehr vorhanden ist. Dann beginnt ein neuer Teil-Zeitschritt, während dem sich die Membrantemperatur auf die Gleichgewichtstemperatur einstellt.

In vielen Fällen geschieht es nicht innerhalb eines Zeitschrittes, dass das gesamte vorhandene Eis schmilzt. Dann wird bis zum Ende des Zeitschrittes gerechnet und für den nächsten Zeitschritt das Verfahren erneut angewandt.

Prüfung auf die Membrantemperatur kleiner, gleich oder größer als 0 °C

In Fall einer Membrantemperatur von 0 °C kann die Membrantemperatur nicht mit der oben vorgestellten Iteration berechnet werden. Das Starten der Iteration führt dann in eine Endlosschleife.

Daher muss für jeden Zeitschritt zuerst geprüft werden, ob der Fall vorliegt, dass sich die Membrantemperatur auf 0 °C einstellt. Dies geschieht dadurch, dass der Wert der Funktion Δj für die Membrantemperatur 0 °C zweimal berechnet wird.

Berechnung für Membrantemperatur bei -0°C

Im ersten Fall wird angenommen, dass kondensierender Wasserdampf und Regen an der Membranoberfläche gefriert. Schnee bleibt im festen Aggregatzustand. Im Falle von Verdunstung an der Oberfläche verdunstet Wasser, sofern vorhanden. Wenn kein Wasser vorhanden ist, aber eine Eisschicht vorhanden ist oder es im entsprechenden Zeitschritt Niederschlag als Schnee gibt, sublimiert Eis.

Berechnung für Membrantemperatur bei $+0^{\circ}\text{C}$

Im zweiten Fall wird angenommen, dass kondensierender Wasserdampf und Regen an der Membranoberfläche flüssig bleibt und Eis oder Schnee schmilzt. Im Falle von Verdunstung an der Oberfläche verdunstet Wasser, sofern vorhanden. Wenn kein Wasser vorhanden ist und auch kein Regen oder schmelzender Schnee auf die Membran fällt, aber eine Eisschicht vorhanden ist, schmilzt Eis.

Entscheidung über das Berechnungsverfahren

Wenn diese beiden Werte der Funktion Δj größer und kleiner als 0 sind, dann stellt sich die Membrantemperatur auf 0°C ein, indem genau so viel Wasser gefriert oder Eis schmilzt, dass die Gleichgewichtsbedingung für den Wärmehaushalt der Membran $\Delta j = 0$ erfüllt ist. Die Membrantemperatur steht somit fest. Es müssen dann die Erstarrungs- bzw. Schmelzraten von Wasser bzw. Eis für die innere und die äußere Seite der Membran berechnet werden, wie oben beschrieben.

Ansonsten, also wenn beide Werte der Funktion Δj größer als 0°C oder beide Werte kleiner als 0°C sind, stellt sich die Membrantemperatur auf ihre Gleichgewichtstemperatur ein. Diese wird dann berechnet, wie oben beschrieben.

Geteilte Zeitschritte

Zeitschritte, in denen während des Zeitschrittes eine vorhandene Wasser- oder Eisschicht „aufgebraucht“ wird (alles Eis geschmolzen oder alles Wasser verdunstet) werden in zwei oder bei Bedarf auch in mehrere Teil-Zeitschritte geteilt. Im jeweiligen Teil-Zeitschritt wird dann die noch vorhandene oder nicht mehr vorhandene Wasser- oder Eisschicht berücksichtigt. Für die Ausgabe der Berechnungsergebnisse werden die Werte aus den Teil-Zeitschritten gemittelt, jeweils gewichtet mit der Dauer der Teil-Zeitschritte.

Implementierung

Programmiersprache und Entwicklungsumgebung

Das Berechnungsprogramm wurde in Microsoft Excel und VBA implementiert. Dies erleichtert während der Programmentwicklung die Kontrolle der Berechnungsergebnisse.

Bereitstellung der Eingabedaten

Wetterdaten

Die mit WUFI erzeugten Wetterdaten-Dateien enthalten die Solarstrahlung und die langwellige Einstrahlung auf das Membrandach, die von WUFI bereits für die Neigung von 4° und den Azimuth von 225° berechnet wurden.

Angabe sonstiger Eingabedaten

Ein Tabellenblatt enthält die Parameter, wie z.B. Materialdaten, für die Simulation.

Äußere Membran

Eigenschaften Außenseite der Membran

Absorptionsgrad für Solarstrahlung	[--]	0.15
Absorptions- / Emissionsgrad für langwellige Strahlung	[--]	0.9
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Membran	[kg / m ²]	0.6
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Eis	[kg / m ²]	0.1
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht	[kg / m ²]	0
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Eisschicht	[kg / m ²]	0

Eigenschaften Innenseite der Membran

Absorptions- / Emissionsgrad für langwellige Strahlung	[--]	0.9
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Membran	[kg / m ²]	0.4
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Eis	[kg / m ²]	0.09
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht	[kg / m ²]	0
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Eisschicht	[kg / m ²]	0

Unterspannbahn

Eigenschaften Außenseite der Membran

Absorptions- / Emissionsgrad für langwellige Strahlung	[--]	0.85
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht	[kg / m ²]	0.7
maximale Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht auf Eis	[kg / m ²]	0.11
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Wasserschicht	[kg / m ²]	0
anfängliche Massenbelegung der anhaftenden Eisschicht	[kg / m ²]	0

Wärmedämmschicht

U-Wert	[W / (m ² K)]	0.3
--------	---------------------------	-----

Parameter für die Berechnung

geforderte Genauigkeit für Membrantemperatur	[K]	0,015
--	-----	-------

Validierung des Programms

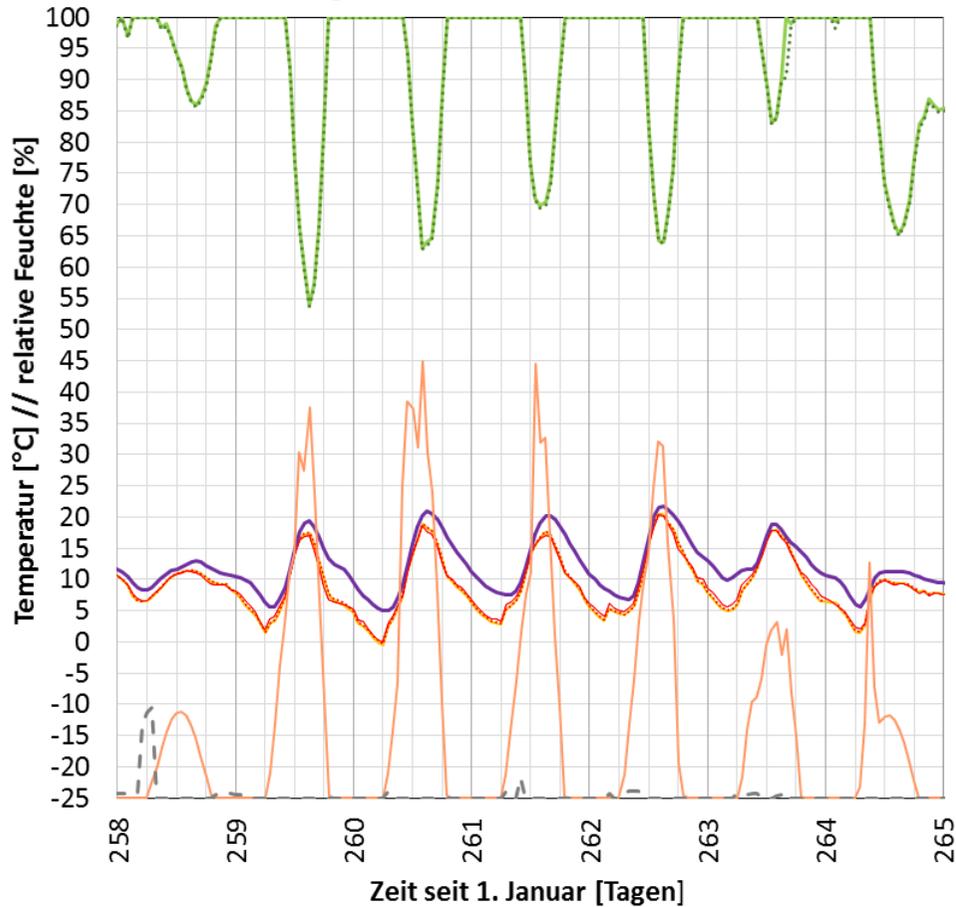
Während der Programmentwicklung wurde eine Programm-Vorversion erzeugt, die fast alle oben beschriebenen Einflüsse anhaftende Wasserschichten und von latenter Wärme absichtlich noch nicht berücksichtigt. Lediglich bei Kondensation wird die Kondensationsenthalpie berücksichtigt. Diese Vorversion wurde bezüglich der berechneten Membrantemperaturen mit den Ergebnissen der Berechnung mit WUFI verglichen. Die von beiden Programmen berechneten Membrantemperaturen stimmen gut überein. Die Differenzen zwischen den ermittelten Membrantemperaturen betragen zwischen -1,280 K und 1,717 K. Die größten Differenzen treten bei schneller Änderung der Membrantemperatur auf. Die Standardabweichung dieser Differenz beträgt 0,366 K. Dies ist recht gering im Vergleich zu Tag-Nacht-Unterschieden der Membrantemperatur von bis zu 20 K.

Insgesamt wird die Übereinstimmung als ausreichend gut angesehen. Die beiden Bilder auf der nächsten Seite zeigen exemplarisch zwei Zeitausschnitte von je einer Woche mit den Wetterdaten und der mit beiden Methoden berechneten Membrantemperatur,

Eine Validierung des vollständigen Programms, das auch die beschriebene Berechnung von sich bildenden und sich auflösenden Wasser- und Eisschichten und die Berücksichtigung der damit verbundenen latenten Wärme enthält, war innerhalb des Projektes nicht möglich.

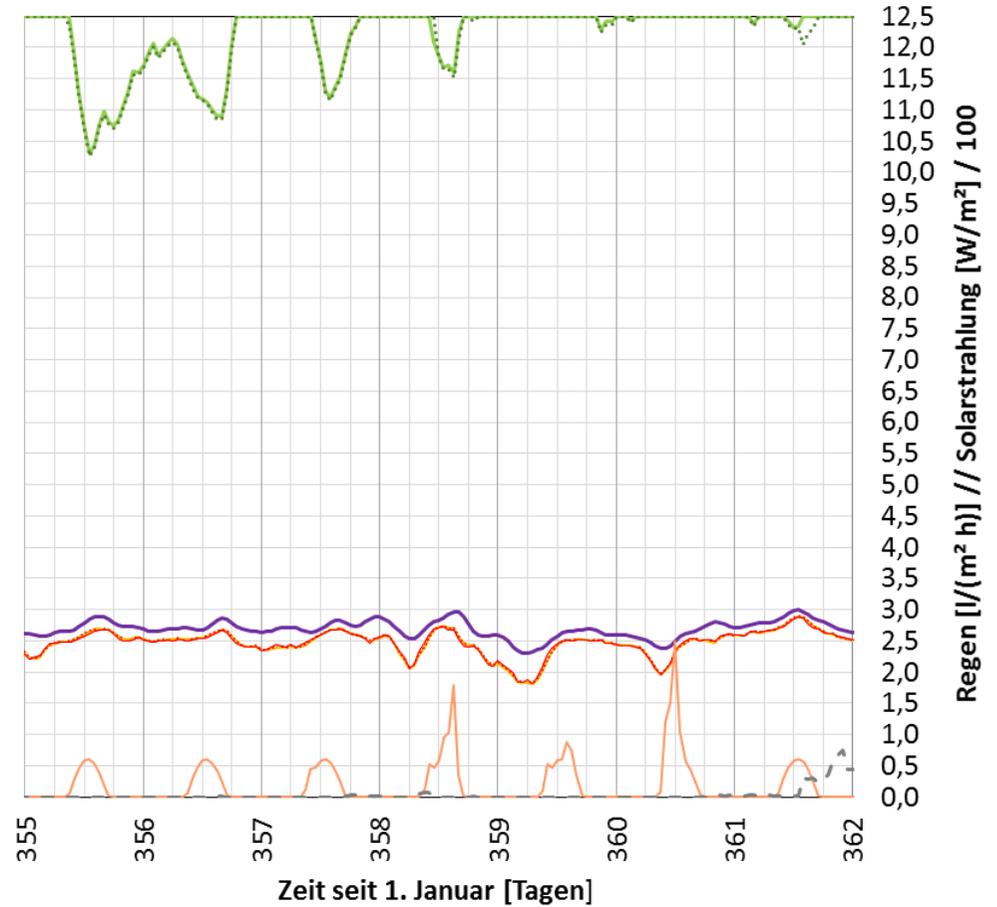
Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- ⋯ Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- ⋯ relative Feuchte, Oberfläche innen
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Außenluft-Temperatur
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Solarstrahlung / 100
- - - Regen



Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- ⋯ Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- ⋯ relative Feuchte, Oberfläche innen
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Außenluft-Temperatur
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Solarstrahlung / 100
- - - Regen



Bilder 88 und 89: Wetterdaten und Membrantemperaturen, von WUFI berechnet, sowie mit eigenem Programm, aber ohne Phasenwechsel bei 0 °C

Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen mit WUFI und Excel mit den Ergebnissen des VBA-Programms

Zunächst fällt auf, dass die Temperatur der Membran fast immer unterhalb der Lufttemperatur bleibt. Nur an sonnigen Tagen erreicht sie manchmal die Außenlufttemperatur. Dies liegt am geringen Absorptionsgrad der weißen Membran von nur 15 %, der in die Berechnungen eingeht.

Ein ähnliches Ergebnis erhielten [Ennis/Kehrer13] bei Berechnungen mit WUFI, in denen sie die Temperaturen und Feuchtegehalte von Flachdächern mit dunklen und mit hellen Abdeckbahnen (solarer Absorptionsgrad 30 %) miteinander verglichen. Im dort dargestellten Beispiel erreicht und übersteigt die Oberflächentemperatur der hellen Abdeckbahn die Lufttemperatur nur für ca. zwei Stunden um die Mittagszeit.

Für die äußere Membran des Daches der Sporthalle in Fürth wurde aus den von WUFI berechneten Membrantemperaturen und Feuchteübergangskoeffizienten sowie den Wetterdaten für jeden Zeitschritt der Sättigungsdampfdruck an der Außen- und Innenoberfläche der Membran, die Feuchteübergangsraten, die anhaftenden Wasser- bzw. Eisschichtdicken und die Rate des innen abtropfenden Wassers berechnet.

Im jeweiligen Zeitschritt können sich auf den Membranoberflächen Wasser- oder Eisschichten aus dem vorigen Zeitschritt befinden. Auf der Außenseite kann noch Niederschlag im aktuellen Zeitschritt hinzukommen.

Bei der anderen Berechnungsmethode, die im VBA-Programm implementiert ist, wird auch der Wärmeaus- und -eintrag aus der bzw. in die Membran berücksichtigt, der durch den Phasenwechsel von Wasser auf den Bauteiloberflächen stattfindet, auch wenn dieses Wasser nicht vom Bauteil, hier der Membran, aufgenommen wird. Dies gilt für den Phasenwechsel flüssig-gasförmig (Kondensation und Verdunstung), für den Phasenwechsel fest-gasförmig (Eis-/Reifbildung und Sublimation) und den Phasenwechsel fest-flüssig (Gefrieren und Schmelzen).

Bei Verdunstung von Wasser oder Sublimation von Eis auf den Membranoberflächen führt dies zu niedrigeren Werten für die Membrantemperatur und in deren Folge zu geringeren Verdunstungsraten. Im umgekehrten Fall, dass Wasser auf den Oberflächen kondensiert, führt die Berücksichtigung der latenten Wärme in den Berechnungen zu höheren Membrantemperaturen und in deren Folge zu geringeren Kondensationsraten. Der Effekt ist weniger ausgeprägt als bei der Trocknung der Membran, aber dennoch deutlich. Eine weitere Folge ist, dass somit auch geringere Abtropfraten berechnet werden.

Im Folgenden werden exemplarisch für ausgewählte Zeiträume im Spätsommer und im Winter die Ergebnisse beider Berechnungsmethoden gegenübergestellt.

Im ersten Bild sind jeweils die Wetterdaten und die mit beiden Methoden berechneten Membrantemperaturen zu sehen. Die beiden folgenden Bilder zeigen die Kondensations- / Reifbildungsraten bzw. Verdunstungs- / Sublimationsraten, die Wasser- und Eisschichtdicken und die Abtropfraten. Für die Oberseite der Membran (violette Linien) werden die Wasser- / Eisschichtdicken und die Kondensationsrate, also der Feuchtestrom zur Membran hin, mit positivem Vorzeichen dargestellt. Ein Feuchtestrom von der Membran weg, also Verdunstung, wird als negativer Wert dargestellt.

Die dargestellte Kondensationsrate beinhaltet nur die Kondensation aus der Außenluft. Niederschlag ist hier nicht enthalten. Er ist aus dem Bild links mit den Wetterdaten ersichtlich (grau gestrichelt).

Für die Unterseite der Membran (rote Linien) sind alle Werte mit entgegengesetztem Vorzeichen dargestellt. Feuchteschichtdicke und Feuchtestrom zur Membran hin haben negative Werte, Feuchteströme von der Membran weg sind positiv.

Im Juli und im Zeitraum vom 24. August bis 6. September ist das Wetter überwiegend hochsommerlich sonnig und trocken. Während den Nächten kommt es zu Kondensation von Luftfeuchtigkeit an beiden Membran-Oberflächen. Es bilden sich Wasserschichten, die dann am späten Vormittag wieder abtrocknen. Während der Zeitschritte, für die Verdunstung berechnet wird, liegt die vom VBA-Programm berechnete Temperatur unterhalb der von WUFI berechneten Temperatur. Dies liegt an der Berücksichtigung der Verdunstungsenthalpie der anhaftenden Wasserschicht im VBA-Programm. Durch die niedrigere Membrantemperatur wiederum wird ein geringerer Sättigungsdampfdruck an den Membranoberflächen und somit eine geringere Verdunstungsrate berechnet. Besonders ausgeprägt ist der Effekt im Sommer, wenn die Sonne die Membran schnell trocknet. Es gibt aber auch Zeitschritte, für die mit dem VBA-Programm Verdunstung berechnet wurde, aber nicht aus den WUFI-Ergebnissen. Das ist dann der Fall, wenn die in der WUFI / Excel-Simulation höhere Verdunstungsraten dort zu einem schnelleren Abtrocknen einer vorhandenen Wasserschicht führte, so dass dort kein Wasser mehr an der Membran haftet, in der VBA-Simulation aber noch nicht alles Wasser verdunstet ist. Ein Beispiel ist der 241. Tag, 12:00 Uhr.

Die Tabelle zeigt die Zeitschritte mit den größten Differenzen der berechneten Membrantemperaturen.

Ein Vergleich mit den folgenden Bildern zeigt, dass die großen Abweichungen in den Ergebnissen für die Membrantemperatur, die mit den beiden Berechnungsmethoden ermittelt wurden, immer zu bestimmten Zeiten auftreten. Dies ist dann der Fall, wenn mit den Membrantemperaturen aus WUFI-Ergebnissen die Membran als bereits getrocknet berechnet wurde, mit dem VBA-Programm jedoch als noch feucht berechnet wurde und somit in diesem Modell die Membran noch durch Verdunstung gekühlt wird.

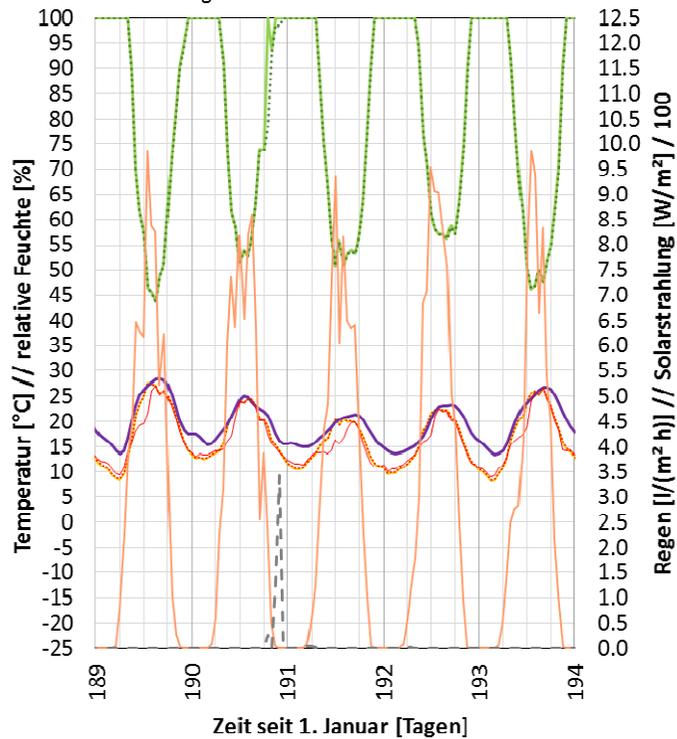
Tag seit 1. Januar [d]	Stunde am Tag	Monat	WUFI + Excel		VBA_Programm			Außenklima, Strahlung auf geneigte Fläche			
			gemittelte Membrantemperatur [°C]	Summe Feuchtestrome zur Membran hin, innen und außen [kg / (h m²)]	Differenz Oberflächen-temperatur WUFI - VBA [K]	Temperatur der Membran (VBA-Programm) [°C]	Summe Feuchtestrome zur Membran hin, innen und außen [kg / (h m²)]	Regen [kg / (m² h)]	relative Feuchte außen [%]	Außenluft-Temperatur [°C]	Solarstrahlung [W/m²]
104.50	12	4	17.12	-0.009	5.96	11.16	-0.224	0	39	18.1	736
130.50	12	5	23.89	0	5.56	18.32	-0.233	0	44	24.4	835
164.54	13	6	24.21	-0.039	5.51	18.71	-0.144	0	47	25.4	814
165.46	11	6	25.88	-0.004	5.72	20.16	-0.170	0	52	25.4	795
167.50	12	6	22.37	-0.003	6.11	16.27	-0.200	0	46	22.3	945
168.54	13	6	21.72	0	5.75	15.97	-0.177	0	46	22.2	883
169.50	12	6	22.37	-0.083	5.94	16.43	-0.155	0	41	23.5	886
189.54	13	7	27.67	0	5.98	21.69	-0.205	0	48	27.1	986
194.50	12	7	25.77	0	5.83	19.94	-0.200	0	48	27.1	842
210.50	12	7	23.87	-0.028	5.97	17.90	-0.156	0	43	25.0	821
211.46	11	7	25.13	-0.261	5.97	19.16	-0.167	0	44	26.9	784
211.50	12	7	26.51	0	6.34	20.17	-0.175	0	39	28.6	725
213.50	12	8	25.20	-0.343	5.56	19.63	-0.205	0	55	25.1	891
218.50	12	8	27.70	0	5.89	21.81	-0.250	0	47	29.2	797
220.50	12	8	18.72	-0.155	6.29	12.42	-0.224	0	40	18.6	892
220.54	13	8	19.81	0	6.52	13.30	-0.252	0	38	19.2	947
221.50	12	8	21.27	-0.215	6.16	15.11	-0.215	0	46	20.6	913
222.50	12	8	23.93	0	5.86	18.07	-0.235	0	43	25.5	784
223.46	11	8	22.15	-0.277	6.04	16.11	-0.190	0	41	24.4	710
230.54	13	8	25.68	-0.012	5.56	20.13	-0.217	0	53	26.7	513
236.46	11	8	21.92	-0.186	5.53	16.39	-0.160	0	45	23.3	562
236.50	12	8	25.45	0	6.18	19.27	-0.170	0	37	25.8	858
243.50	12	9	26.78	-0.006	6.41	20.38	-0.200	0	43	28.7	756
246.54	13	9	28.20	-0.030	7.03	21.17	-0.209	0	41	30.2	769
251.67	16	9	19.82	-0.440	5.82	13.99	-0.350	0.44	43	20.6	528
254.58	14	9	24.11	0	6.03	18.08	-0.232	0	42	25.8	611

Tabelle: Zeitschritte mit den größten Differenzen der berechneten Membrantemperaturen.

Die folgenden Bilder zeigen die Zeiträume 9. Juli bis 13. Juli, 24. August bis 6. September und 8. September bis 12. September

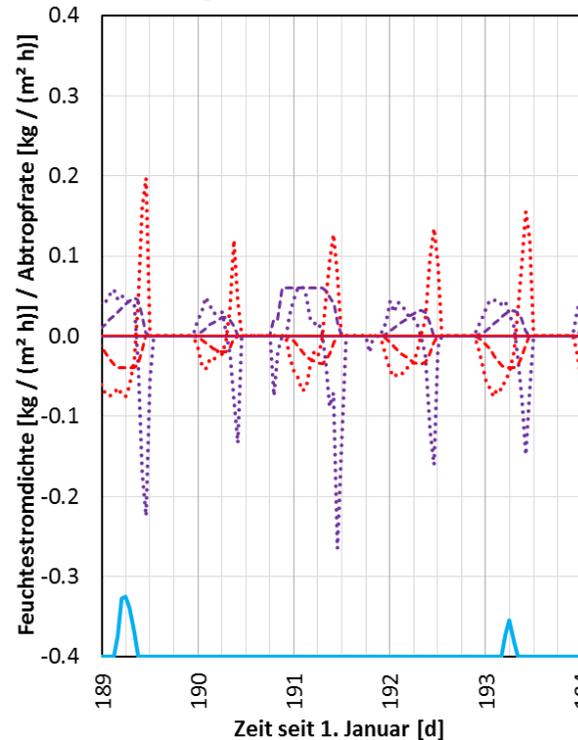
Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- ⋯ Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- ⋯ relative Feuchte, Oberfläche innen
- Außenluft-Temperatur
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Solarstrahlung / 100
- - - Regen



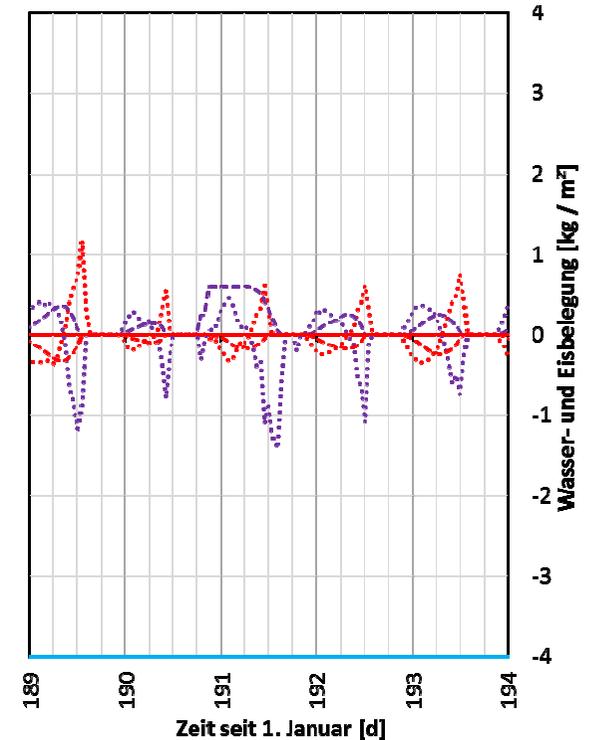
Feuchteergeb. berechnet aus WUFI-Ergebnissen

- Rate des abtropfenden Wassers
- ⋯ mittlere Feuchtestromdichte zur Luft innen
- - - Negatives der Eis- + Wasserschicht innen
- Negatives der Eisschicht innen



Feuchteergeb. berechnet mit VBA-Programm

- ⋯ Feuchtestromdichte zur Membran außen
- - - Eis- + Wasserschicht außen
- Eisschichtdicke außen



Bilder 90 bis 92: Wetterdaten und Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel und mit eigenem VBA-Programm, 9. Juli bis 13. Juli

Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- Außenluft-Temperatur
- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- ⋯ Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- ⋯ relative Feuchte, Oberfläche innen
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- ⋯ Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- ⋯ relative Feuchte, Oberfläche innen

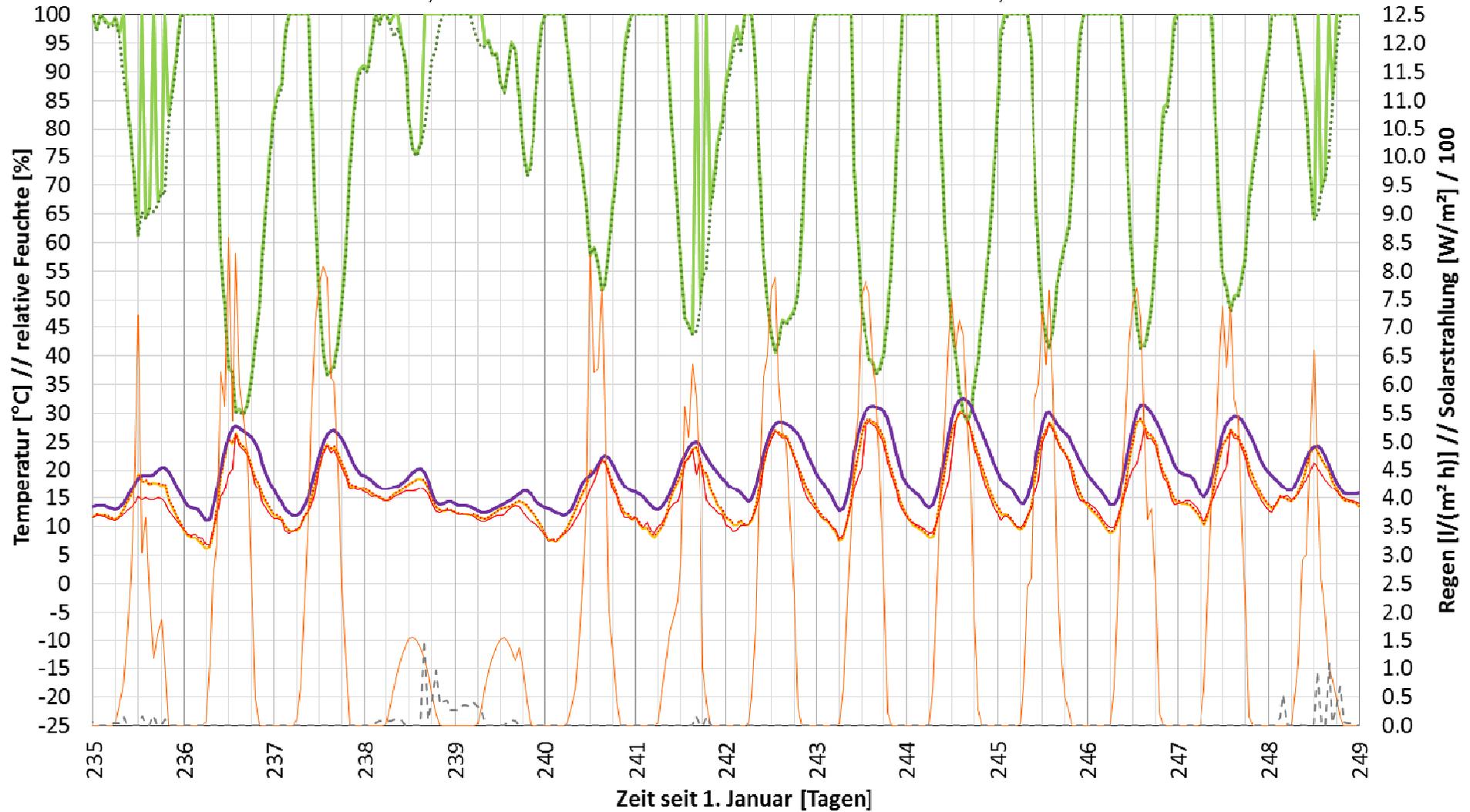


Bild 93: Wetterdaten und Membrantemperaturen, 24. August bis 6. September

Feuchteströme und -schichten berechnet aus WUFI-Ergebnissen

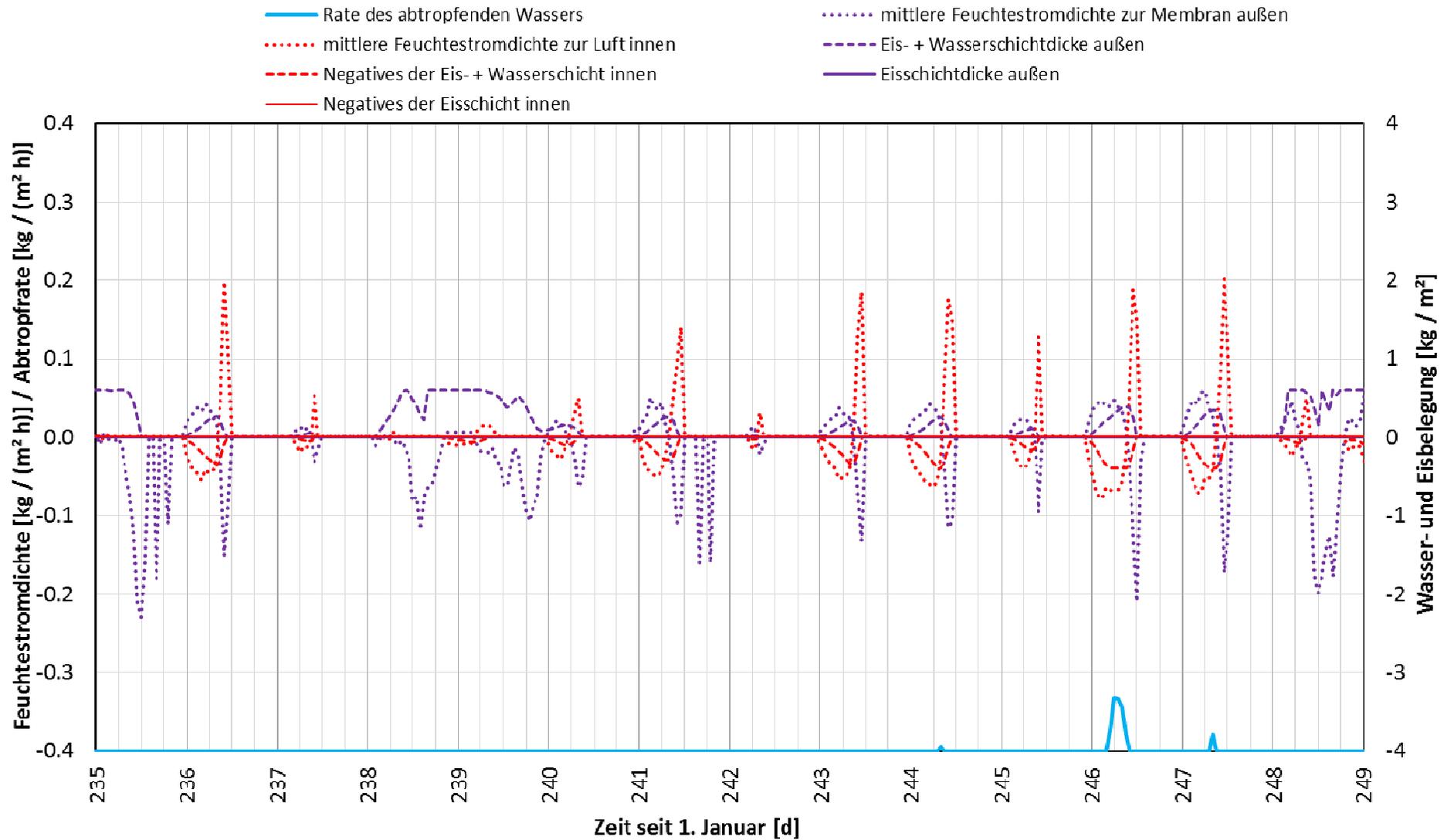


Bild 94: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, 24. August bis 6. September

Feuchteströme und -schichten berechnet mit VBA-Programm

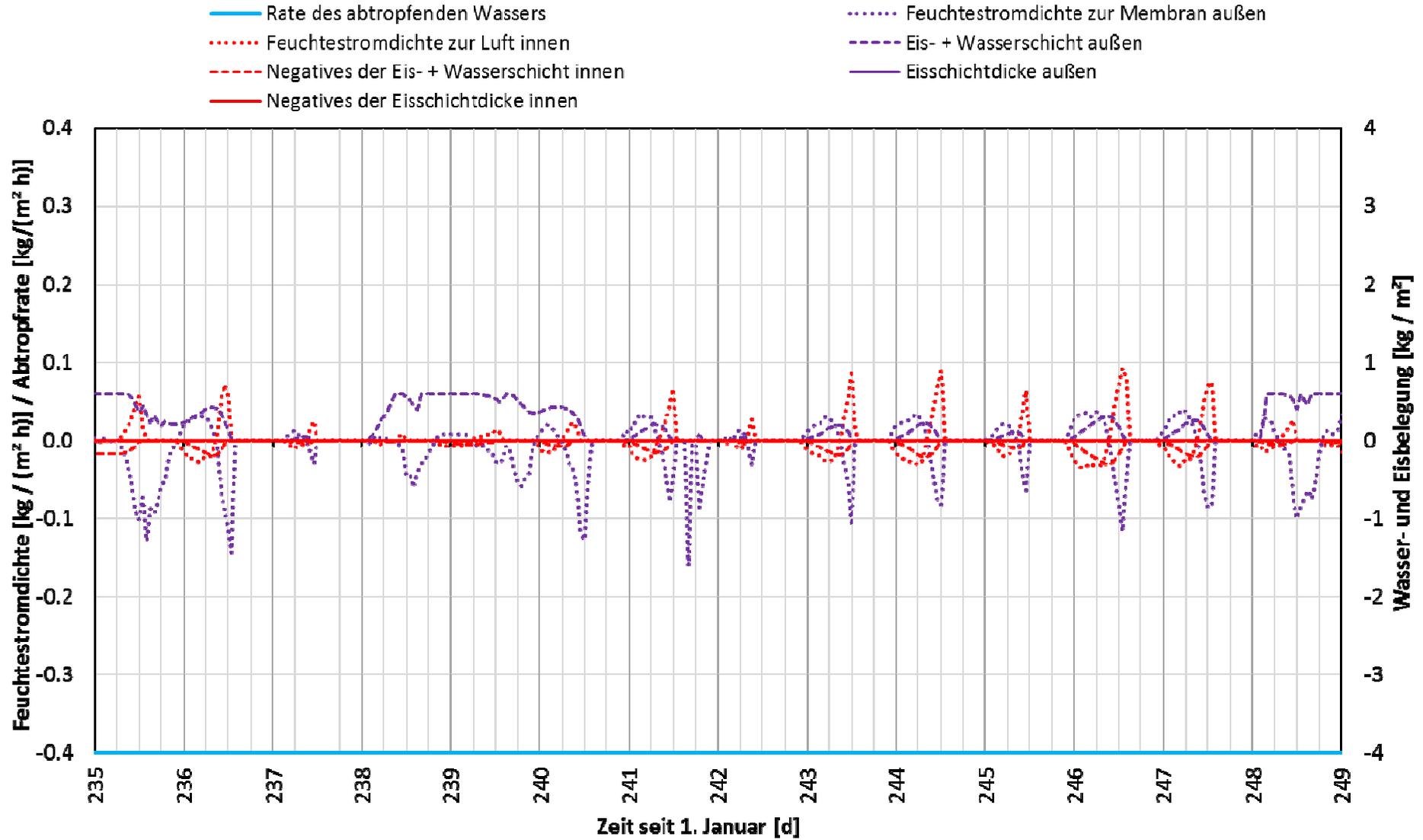
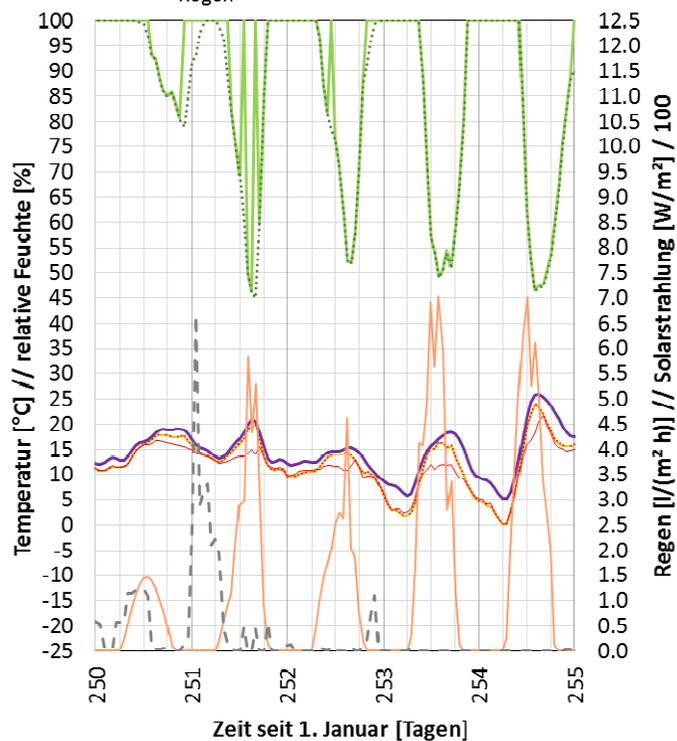


Bild 95: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, 24. August bis 6. September

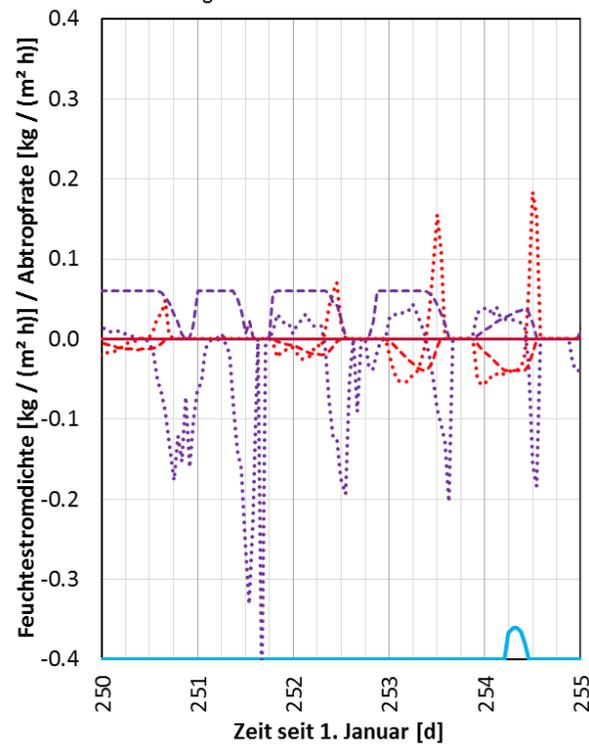
Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- relative Feuchte, Oberfläche innen
- Außenluft-Temperatur
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Solarstrahlung / 100
- Regen



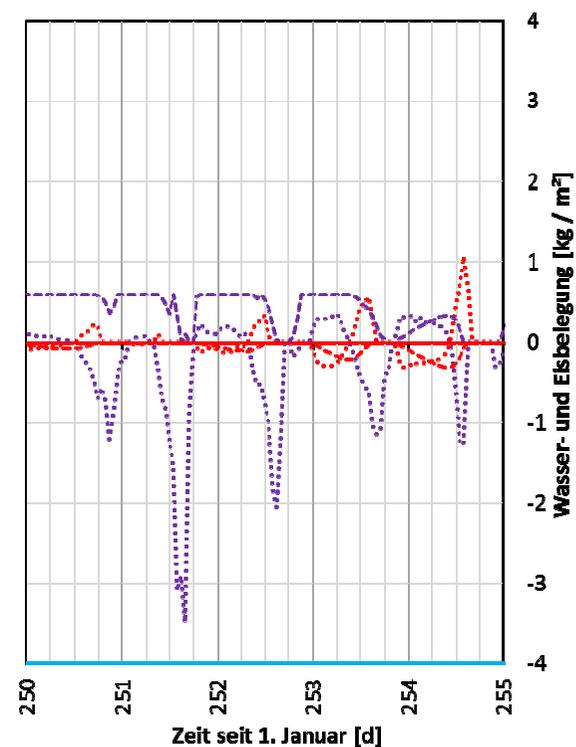
Feuchteergeb. berechnet aus WUFI-Ergebnissen

- Rate des abtropfenden Wassers
- mittlere Feuchtestromdichte zur Luft innen
- Negatives der Eis- + Wasserschicht innen
- Negatives der Eisschicht innen



Feuchteergeb. berechnet mit VBA-Programm

- Feuchtestromdichte zur Membran außen
- Eis- + Wasserschicht außen
- Eisschichtdicke außen



Bilder 96 bis 98: Wetterdaten und Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel und mit eigenem VBA-Programm, 8. September bis 12. September

Auch im Zeitraum 16. bis 29. September, der in den folgenden Bildern gezeigt wird, sieht man ebenfalls das Muster der nächtlichen Kondensation und der Trocknung tagsüber. Aufgrund der jahreszeitlich bedingten niedrigeren Temperaturen und höheren Luftfeuchte sind die Kondensationsraten höher und die Trocknungsraten geringer als im Sommer. So trocknen die Wasserschichten größtenteils nicht ab und die weitere Kondensation führt zum Abtropfen von Kondenswasser von der äußeren Membran (blaue Linie mit verschobenem Nullpunkt am unteren Rand des Bildes). Auch hier zeigen sich Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Berechnungsmethoden. Die mit dem VBA-Programm berechneten geringeren Kondensationsraten führen auch zu niedrigeren Abtropfraten.

An den Tagen 261, 268 und 269 kommt es um ca. 3 Uhr bis 4 Uhr nachts zu Membrantemperaturen am Gefrierpunkt. In den aus WUFI-Ergebnissen berechneten Feuchteschichten gefriert das Wasser auf den Membranoberflächen und schmilzt zwei bis drei Stunden später wieder. In den Ergebnissen des VBA-Programms geschieht dies ebenfalls, allerdings nur an den Tagen 261 und 268 und nur sehr kurzfristig. Der Grund liegt in den geringfügig höheren Werten für die Membrantemperatur im VBA-Programm. Dies rührt von der Berücksichtigung der latenten Wärme her.

Im danach gezeigten Zeitraum vom 30. Oktober bis 3. November sieht man beim Gefrieren und Schmelzen des Wassers, dass die vom VBA-Programm berechnete Membrantemperatur bei 0 °C bleibt.

In der Tabelle sind diejenigen Zeitschritte ausgewählt, für die das VBA-Programm eine um mindestens 0,95 K höhere Temperatur berechnete. Man erkennt, dass dies immer nachts oder am frühen Morgen der Fall ist. Dies liegt an der nächtlichen Kondensation, deren Effekt im VBA-Programm berechnet wird. Darunter sind auch drei Zeitschritte, bei denen die Membrantemperatur bei 0 °C bleibt, weil Wasser gefriert.

Tag seit 1. Januar [d]	Stunde am Tag	Monat	WUFI + Excel			VBA_Programm			Außenklima, Strahlung auf geneigte Fläche			
			gemittelte Membran-temperatur [°C]	Summe Feuchteströme zur Membran hin, innen und außen [kg / (h m²)]	Differenz Oberflächen-temperatur WUFI - VBA [K]	Temperatur der Membran (VBA-Programm) [°C]	Summe Feuchteströme zur Membran hin, innen und außen [kg / (h m²)]	Regen [kg / (m² h)]	relative Feuchte außen [%]	Außenluft-Temperatur [°C]	Solarstrahlung [W/m²]	
35.92	22	2	-0.95	0.019	-0.95	0	0.002	1.37	99	0.3	0	
164.13	3	6	9.40	0.124	-1.03	10.43	0.073	0	93	14.2	0	
164.17	4	6	9.30	0.121	-1.02	10.32	0.072	0	94	13.7	0	
164.21	5	6	9.54	0.123	-1.06	10.60	0.072	0	94	13.5	11	
188.33	8	7	11.48	0.086	-0.98	12.46	0.040	0	92	15.0	389	
189.13	3	7	10.63	0.131	-1.01	11.64	0.076	0	91	15.9	0	
189.29	7	7	9.82	0.104	-0.96	10.79	0.058	0	94	14.2	227	
193.21	5	7	9.77	0.099	-0.97	10.73	0.054	0	96	13.5	7	
194.13	3	7	11.03	0.136	-1.05	12.08	0.080	0	92	16.0	0	
208.29	7	7	7.50	0.100	-1.00	8.49	0.058	0	94	12.0	183	
211.17	4	7	10.21	0.116	-0.96	11.16	0.068	0	88	15.5	0	
213.21	5	8	9.42	0.134	-0.99	10.41	0.084	0	97	13.3	0	
213.25	6	8	8.64	0.135	-0.95	9.59	0.087	0	98	12.9	19	
213.29	7	8	9.53	0.110	-0.97	10.50	0.064	0	94	13.6	169	
229.96	23	8	13.90	0.135	-1.05	14.95	0.072	0	92	17.9	0	
247.21	5	9	12.30	0.127	-0.96	13.25	0.072	0	92	17.0	0	
247.25	6	9	11.19	0.110	-0.99	12.17	0.061	0	89	15.7	2	
298.17	4	10	-2.24	0.060	-1.01	-1.23	0.035	0	93	2.5	0	
301.96	23	10	-1.58	0.061	-1.53	-0.05	0.028	0	94	2.8	0	
302.92	22	10	-1.03	0.071	-1.03	0	0.041	0	98	3.9	0	
305.04	1	11	8.70	0.118	-1.04	9.74	0.070	0	92	13.0	0	
305.13	3	11	8.09	0.108	-0.98	9.07	0.064	0	91	12.2	0	
306.17	4	11	-1.46	0.060	-1.46	0	0.029	0	93	3.4	0	

Tabelle: Zeitschritte mit einer um mindestens 0,95 K höheren Temperatur im VBA-Programm.

Die nächsten Bilder zeigen eine Sequenz von 14 Tagen ab dem 22. Dezember. Eine anfänglich vorhandenen Eis- und Schneeschicht auf der Oberseite der Membran schmilzt im Laufe von drei Tagen, jeweils jedoch nur tagsüber. In den folgenden Tagen bildet sich nachts wieder Eis auf der Membran, das einmal tagsüber schmilzt, am fünften Tag aber nicht. Die Membrantemperatur bleibt während der Zeiten; in denen Eis schmilzt, bei 0 °C. Aus den WUFI-Ergebnissen wurde ein spontanes und vollständiges Abschmelzen der Eisschicht am ersten Tag berechnet.

Die darauf folgenden drei Bilder zeigen die gleichen Größen, jedoch dargestellt für ein ganzes Jahr. Obwohl hier keine Details erkennbar sind, liefern sie doch einen Überblick, der vor Allem für die Abtropfraten interessant ist.

Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- Außenluft-Temperatur
- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- ⋯ Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- ⋯ relative Feuchte, Oberfläche innen
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- ⋯ Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- ⋯ relative Feuchte, Oberfläche innen

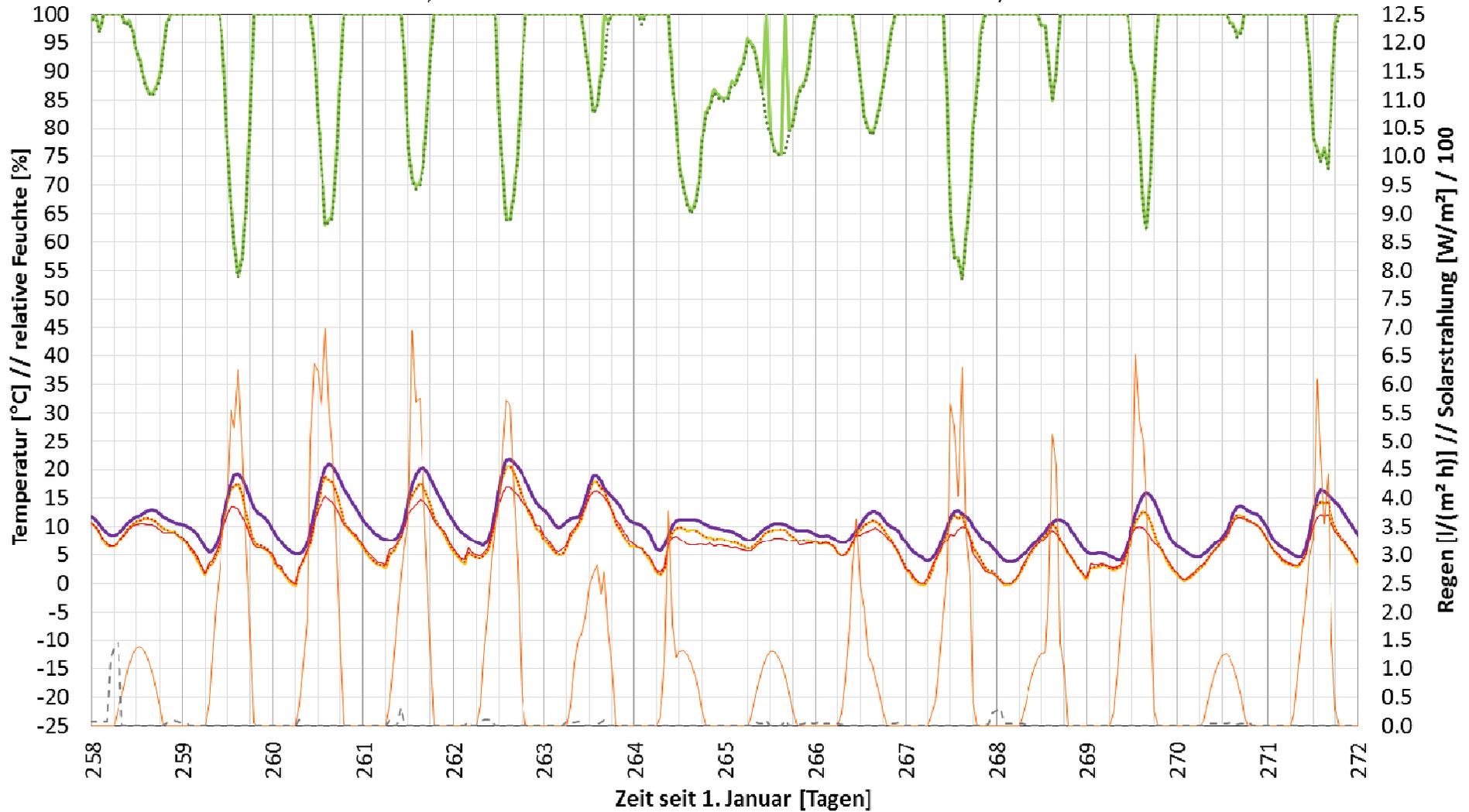


Bild 99 : Wetterdaten, 16. September bis 29. September

Feuchteströme und -schichten berechnet aus WUFI-Ergebnissen

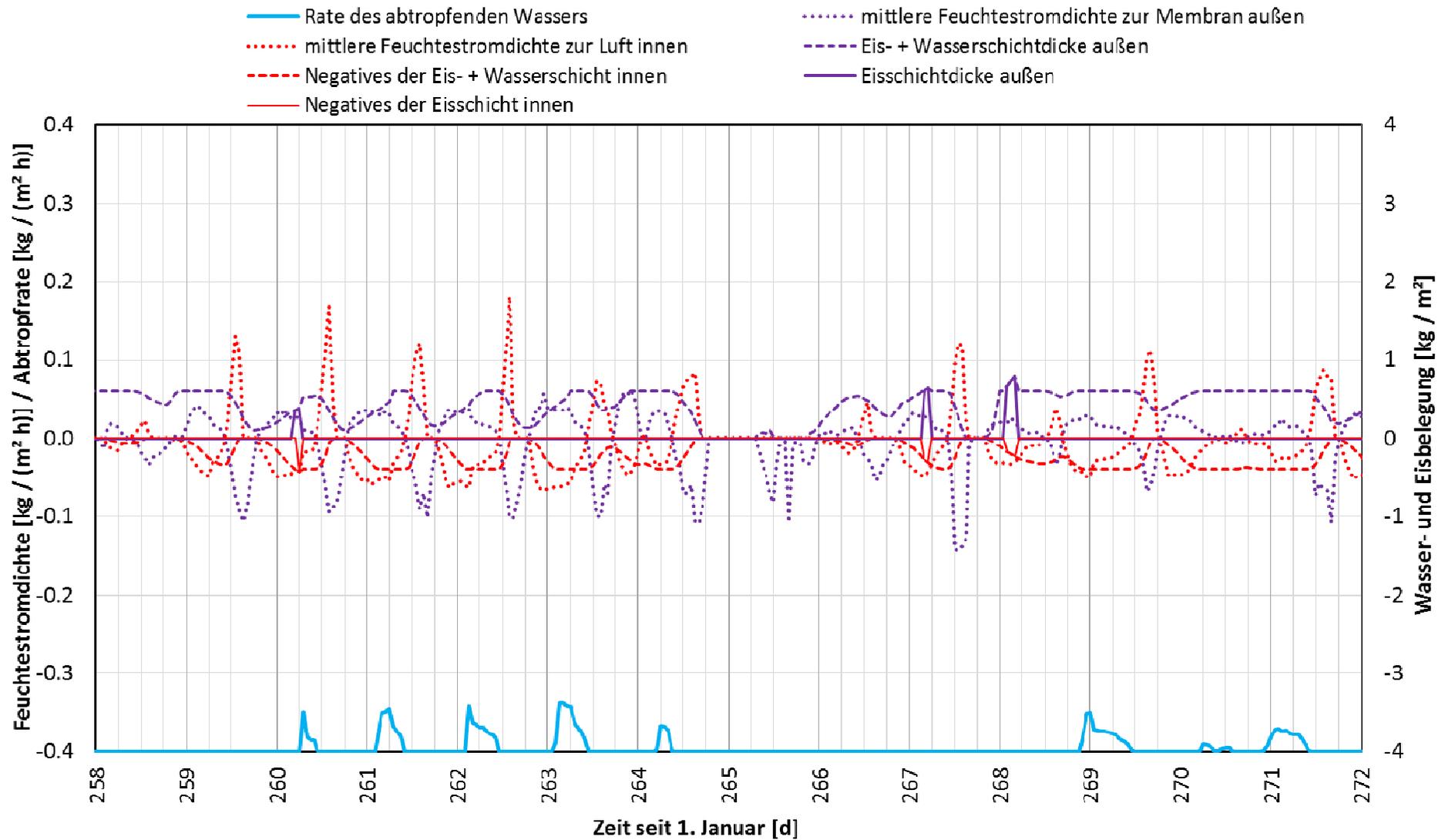


Bild 100: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, 16. September bis 29. September

Feuchteströme und -schichten berechnet mit VBA-Programm

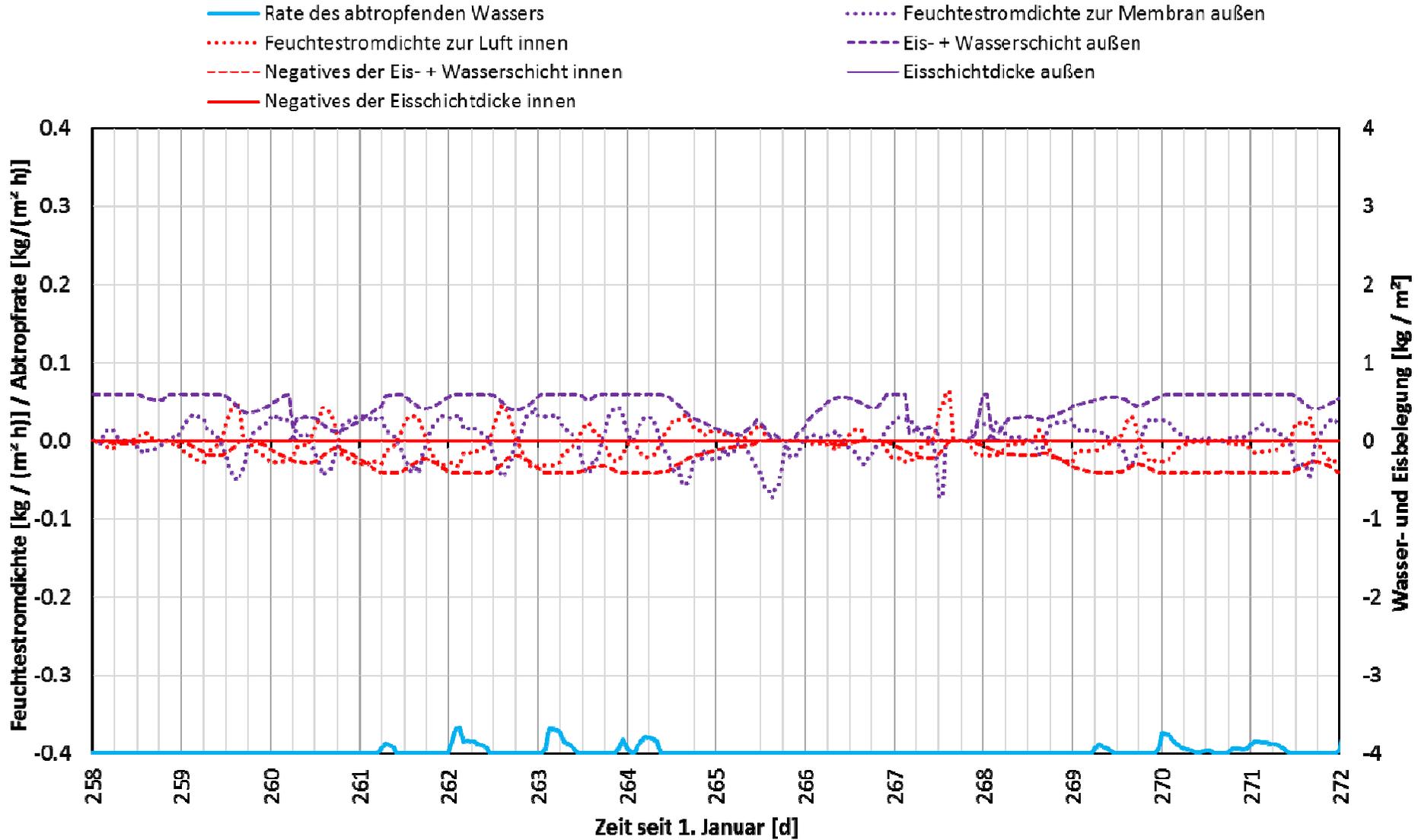
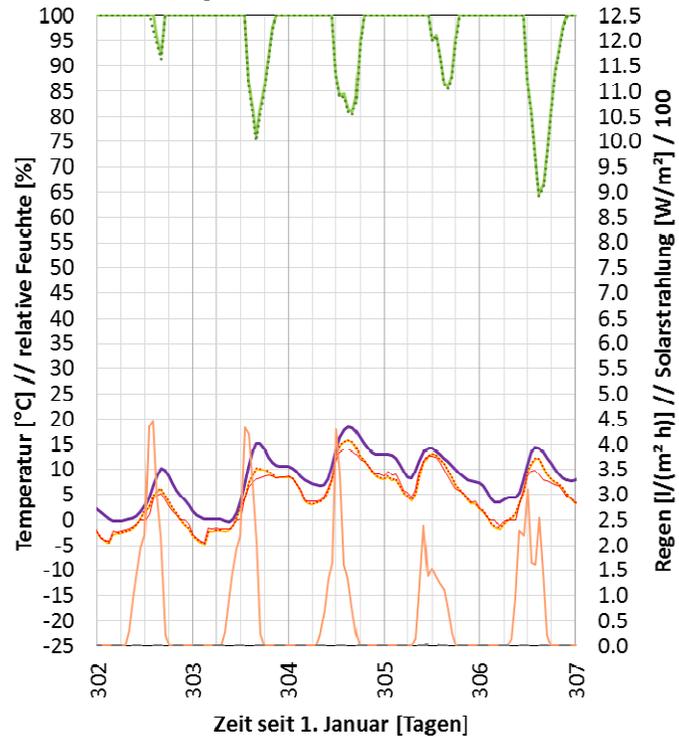


Bild 101: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, 16. September bis 29. September

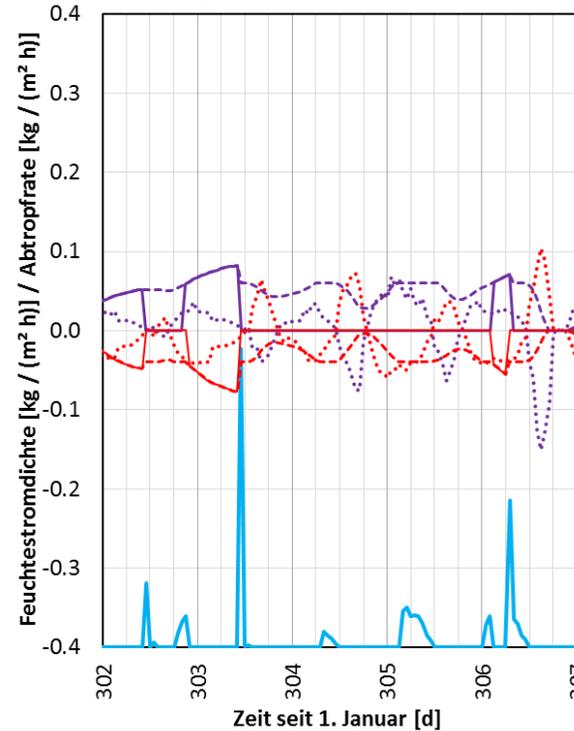
Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- relative Feuchte, Oberfläche innen
- Außenluft-Temperatur
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Solarstrahlung / 100
- Regen



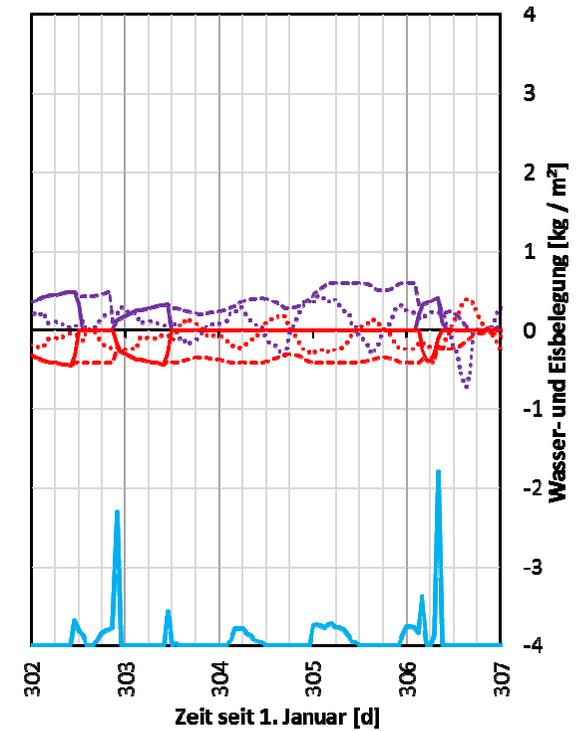
Feuchteergeb. berechnet aus WUFI-Ergebnissen

- Rate des abtropfenden Wassers
- mittlere Feuchtestromdichte zur Luft innen
- Negatives der Eis- + Wasserschicht innen
- Negatives der Eisschicht innen



Feuchteergeb. berechnet mit VBA-Programm

- Feuchtestromdichte zur Membran außen
- Eis- + Wasserschicht außen
- Eisschichtdicke außen



Bilder 102 bis 104: Wetterdaten und Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel und mit eigenem VBA-Programm, 30. Oktober bis 3. November

Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

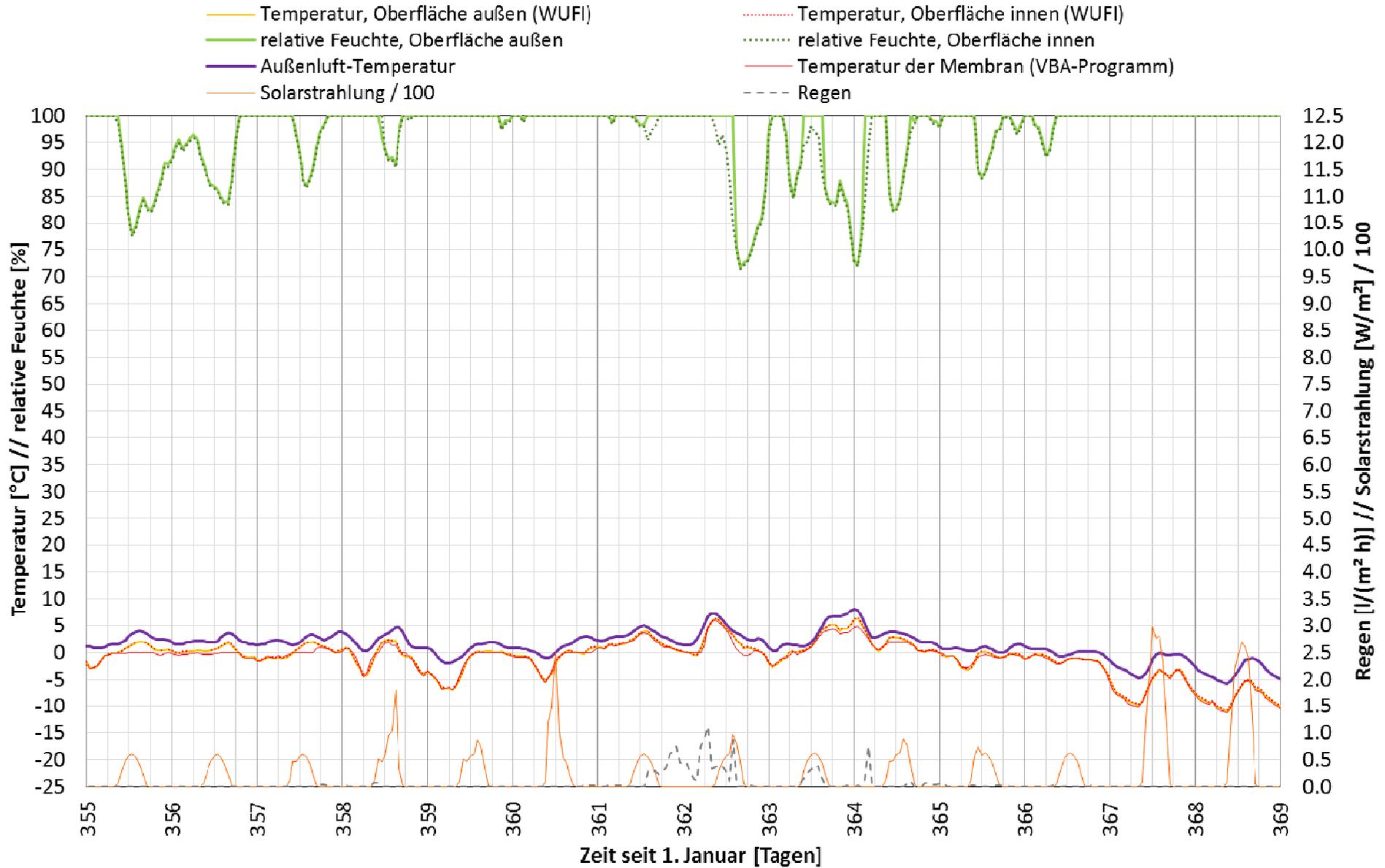


Bild 105 Wetterdaten, 22. Dezember bis 4. Januar

Feuchteströme und -schichten berechnet aus WUFI-Ergebnissen

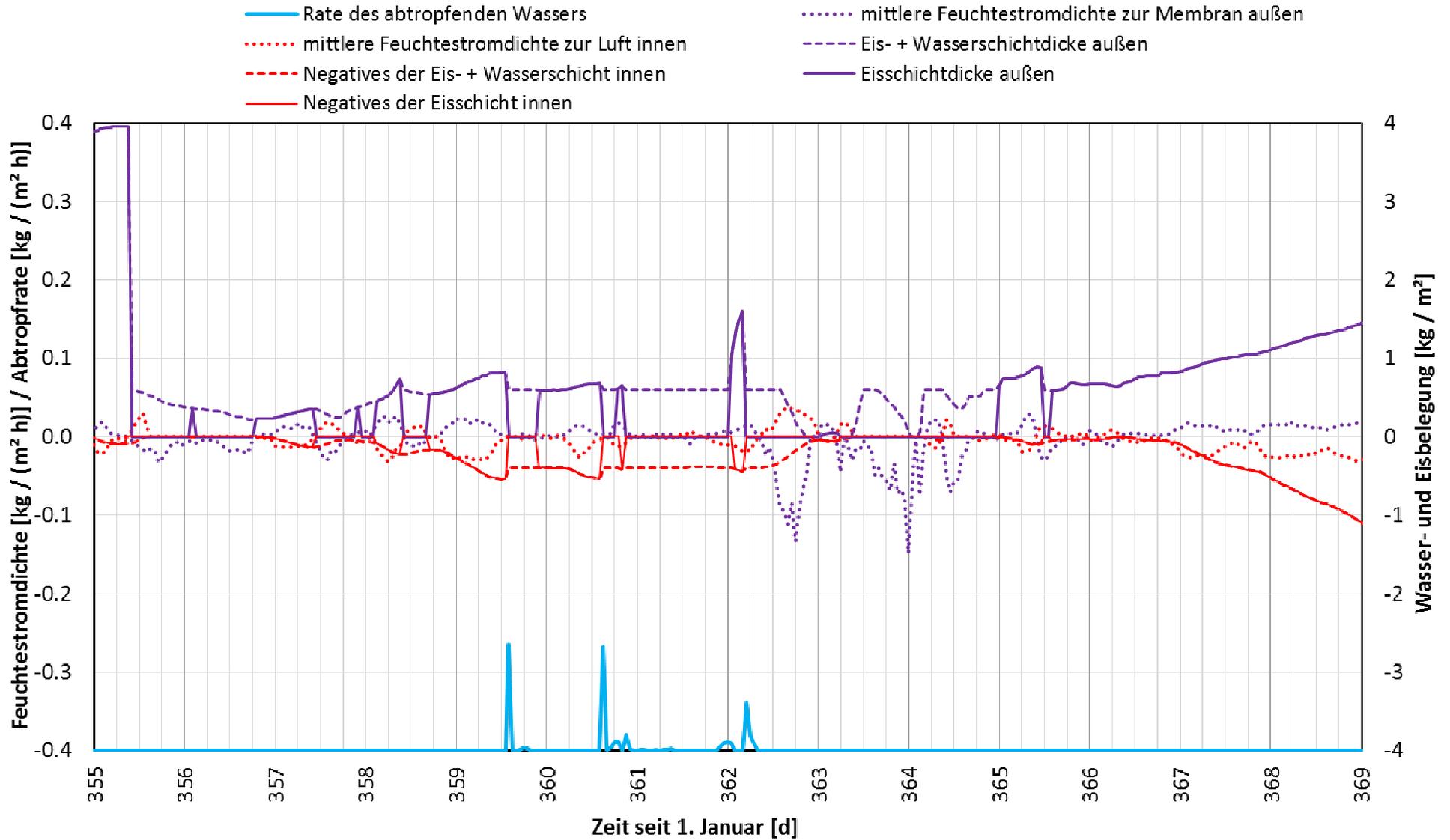


Bild 106: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, 22. Dezember bis 4. Januar

Feuchteströme und -schichten berechnet mit VBA-Programm

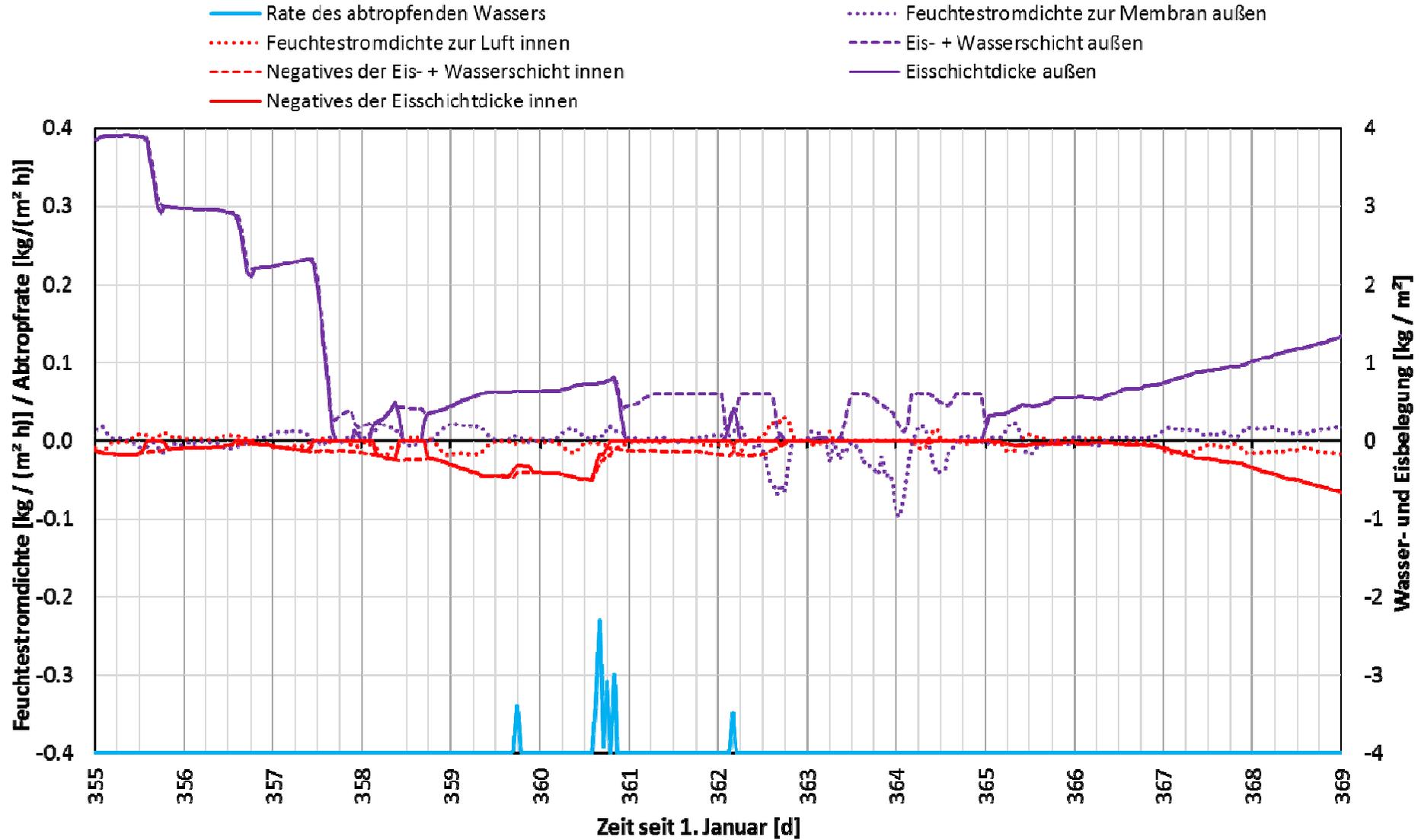


Bild 107: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, 22. Dezember bis 4. Januar

Wetterdaten und von WUFI berechnete Größen

- Temperatur, Oberfläche außen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche außen
- Außen-luft-temperatur
- Solarstrahlung / 100
- Temperatur, Oberfläche innen (WUFI)
- relative Feuchte, Oberfläche innen
- Temperatur der Membran (VBA-Programm)
- Regen

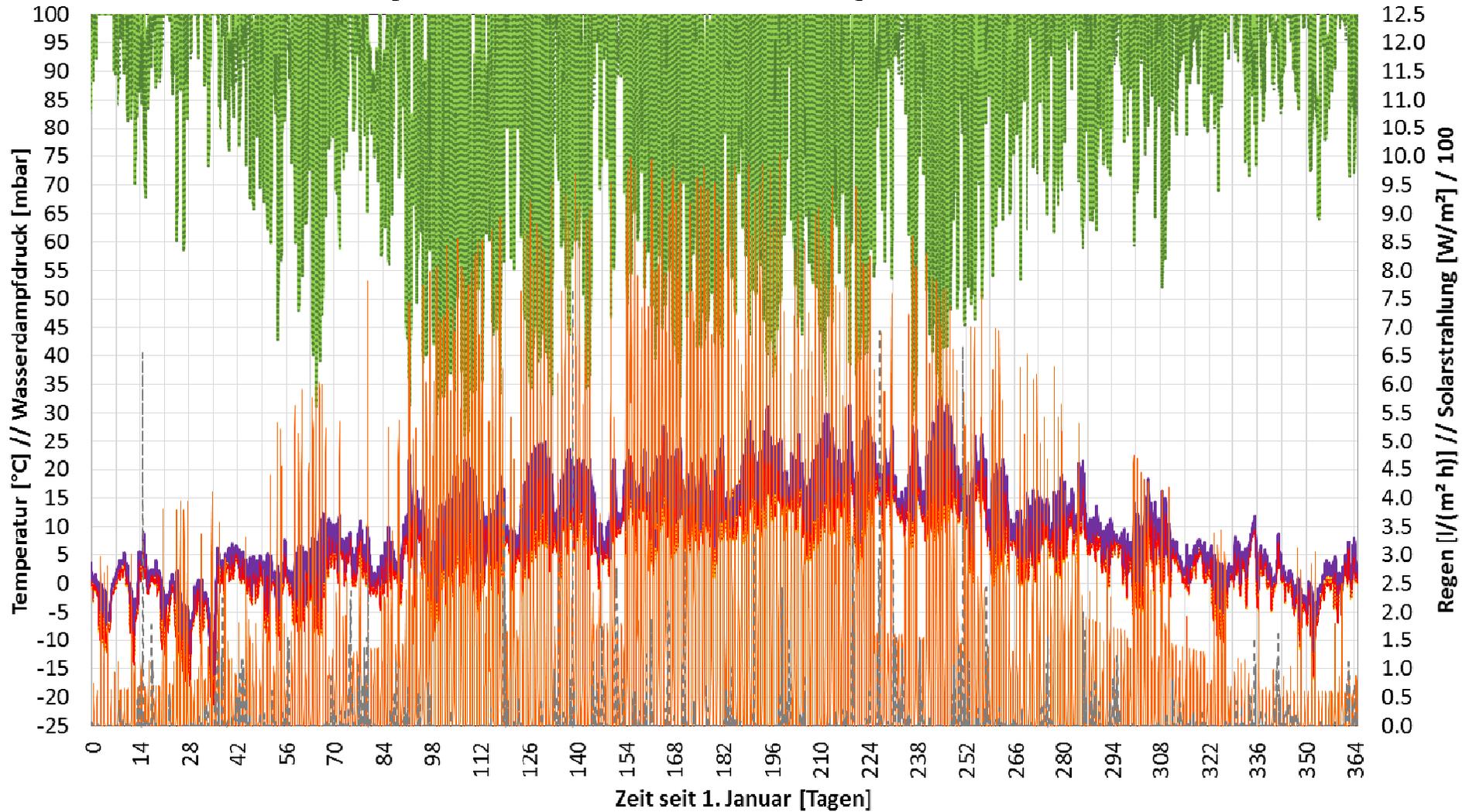


Bild 108: Wetterdaten, ganzes Jahr

Feuchteströme und -schichten berechnet aus WUFI-Ergebnissen

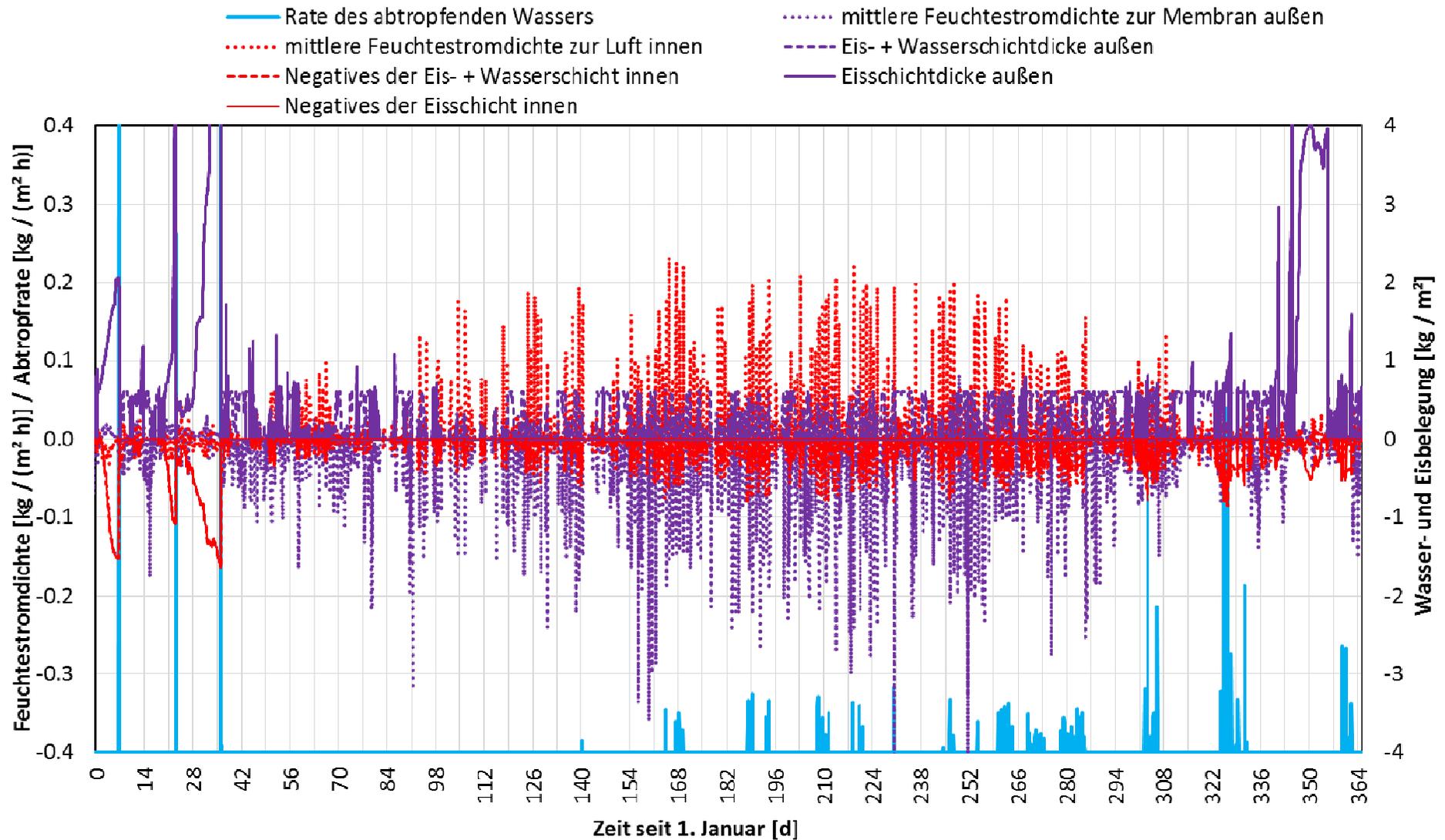


Bild 109: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, ganzes Jahr

Feuchteströme und -schichten berechnet mit VBA-Programm

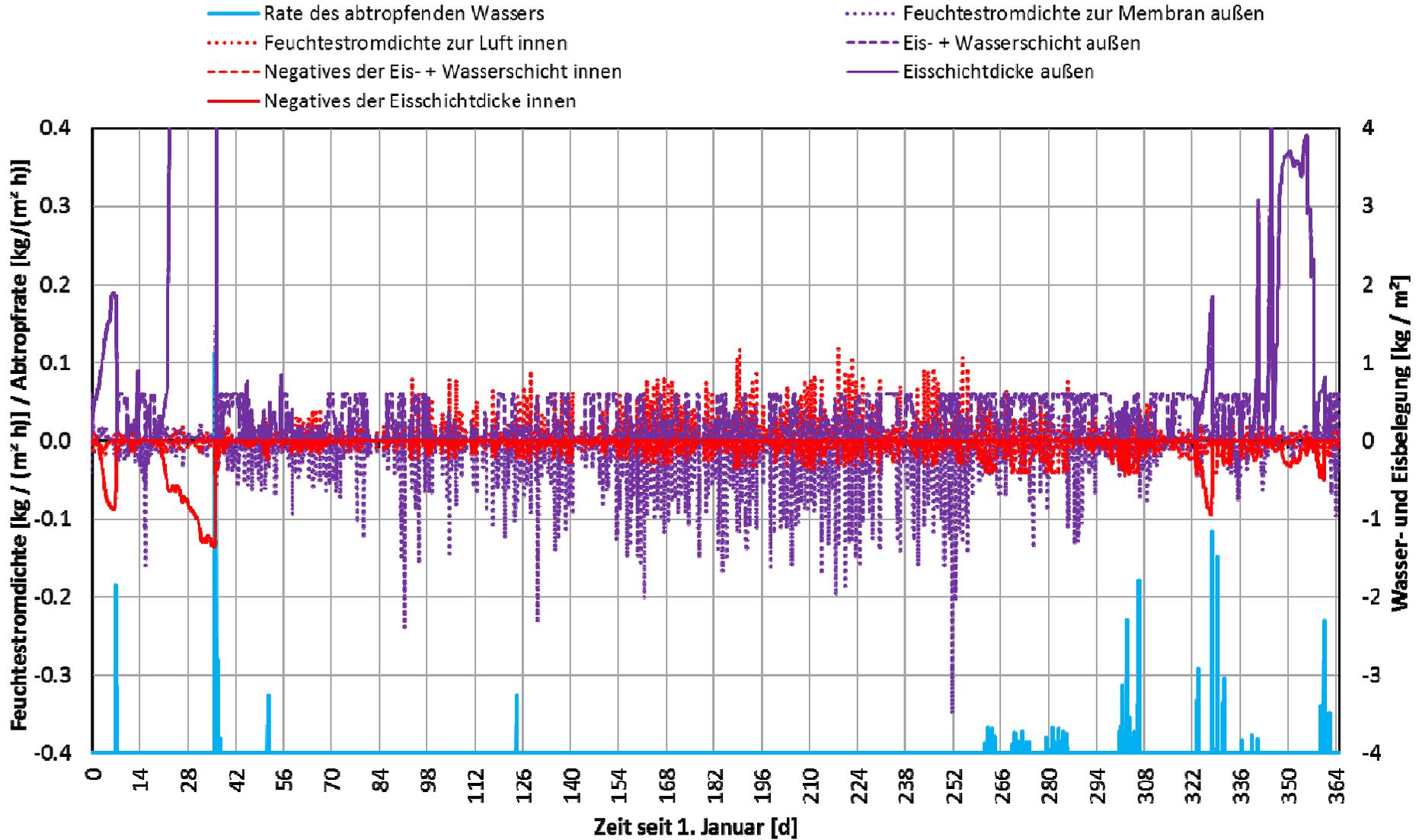


Bild 110: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, ganzes Jahr

Summe des abtropfenden Wassers

Die Berechnungen lieferten auch eine Abschätzung der Menge von Wasser, die von der oberen äußeren Membran auf die Unterspannbahn über der Wärmedämmschicht tropft. Um dies zu quantifizieren und für die beiden Berechnungsmethoden zu vergleichen wurden über einen Zeitraum im Herbst und Winter und einen Zeitraum im Frühling, Sommer und Frühherbst jeweils die Summen des abtropfenden Wassers berechnet.

Das Winterhalbjahr wurde so ausgewählt, dass dies die Zeit umfasst, in der oft Wasser von der äußeren Membran abtropft, weil Eis schmilzt.

In der hier als „Sommer“ bezeichneten Zeit kommt dies nur einmal mit relativ geringer Abtropfrate vor. Wenn Wasser abtropft, dann deswegen, weil bereits so viel Wasser kondensiert ist, dass die maximale Schichtdicke erreicht ist und das weiterhin kondensierende Wasser abtropft. (Die maximale Schichtdicke wird hier auf der Innenseite der Membran mit ca. 0,4 mm angenommen.)

	WUFI + Excel	VBA-Programm
Winter 15.10. - 28.2.	6.178	5.379
Sommer 1.3. - 14.10.	5.906	2.136

Tabelle: Summe des abtropfenden Wassers, berechnet mit beiden Methoden

Vor allem im Winter ist eine erhebliche Menge an abtropfendem Wasser zu erwarten. Dieses kann aufgrund der kühlen Witterung und der hohen Luftfeuchtigkeit zu dieser Jahreszeit kaum abtrocknen. Dabei ist noch zu bedenken, dass die äußere Membran nur einen geringen Transmissionsgrad aufweist und die Unterspannbahn daher nur in sehr geringem Ausmaß durch Solarstrahlung erwärmt wird.

Besonders kritisch zu betrachten sind diejenigen Stellen, an denen sich aufgrund ihrer Topographie Wasser auf der Unterspannbahn ansammeln kann. Im Falle des Membran-daches in Fürth dürfte dies evtl. dort zutreffen, wo die Wärmedämmschicht unter die Druckstreben geschoben und dort etwas zusammengedrückt wird.

Zusammenfassung

Der Vergleich der Ergebnisse beider Berechnungsmethoden zeigt:

Die Unterschiede in den berechneten Temperaturen der Membran erscheinen recht gering. Dennoch haben diese Unterschiede einen großen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse der Feuchteübergangsraten und somit auch der Wasser- bzw. Eisschichten und Abtropfraten.

Die Berechnungen wurden vor allem unter zwei Aspekten durchgeführt:

Zum einen sollten sie zeigen, ob die rechnerische Vernachlässigung von anhaftendem Wasser und Eis - auf der Oberseite auch Schnee - und der damit verbundenen latenten Wärme die Ergebnisse für die Feuchteverhältnisse stark beeinflusst. Dies muss bejaht werden.

Hier wurden die Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der äußeren Membran berechnet. Diese stehen in Bezug auf die dauerhafte Funktionstüchtigkeit des Membrandaches nicht im Mittelpunkt.

Für die äußere Membran kann aber die Näherung des vernachlässigten Wärmewiderstandes der Membran angewandt werden (außer bei dicken Schneeschichten). Somit können die Wärme- und Feuchteströme und die anhaftenden Feuchteschichten berechnet werden, ohne auf Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Methoden zurückgreifen zu müssen. Letzteres würde den Rahmen dieses Projektes sprengen.

Deswegen wurde für die äußere Membran das beschriebene VBA-Berechnungsprogramm erstellt. Aus dessen Ergebnissen im Vergleich mit den Ergebnissen der Berechnungen mit WUFI und den daraus berechneten Feuchteströmen und -schichten ist ersichtlich, dass der Einfluss der in WUFI nicht berücksichtigten anhaftenden Feuchtigkeits-Schichten an den Oberflächen nicht vernachlässigbar ist.

Zum anderen sollten sie eine Abschätzung der Menge von Wasser liefern, die von der oberen äußeren Membran auf die Unterspannbahn über der Wärmedämmschicht tropft. Um dies zu quantifizieren und für die beiden Berechnungsmethoden zu vergleichen wurden über einen Zeitraum im Herbst und Winter und einen Zeitraum im Frühling, Sommer und Frühherbst jeweils die Summen des abtropfenden Wassers berechnet.

Das Winterhalbjahr wurde so ausgewählt, dass dies die Zeit umfasst, in der oft Wasser von der äußeren Membran abtropft, weil Eis schmilzt. In der hier als „Sommer“ bezeichneten Zeit kommt dies nur einmal mit relativ geringer Abtropfrate vor.

Wenn Wasser abtropft, dann deswegen, weil bereits so viel Wasser kondensiert ist, dass die maximale Schichtdicke erreicht ist und das weiterhin kondensierende Wasser abtropft. (Die maximale Schichtdicke wird hier auf der Innenseite der Membran mit ca. 0,4 mm angenommen.)

Die Tabelle zeigt die Ergebnisse.

	WUFI + Excel	VBA-Pogramm
Winter 15.10. - 28.2.	6.178	5.379
Sommer 1.3. - 14.10.	5.906	2.136

Tabelle: Flächenspezifische Menge des Wassers, das von der Innenseite der äußeren Membran auf die Unterspannbahn abtropft (in kg / m²)

Kritische Betrachtung der Berechnungsmethode

Die durchgeführten Berechnungen gelten streng genommen nur für die Dachfläche nahe des Randes, an dem die Luft in den Dachzwischenraum einströmt. Während die Luft durch den Dachzwischenraum strömt, verändert sich ihr Zustand, also ihre Temperatur und ihr Feuchtegehalt.

Da in den beschriebenen Simulationen auch Wasser- und Eisschichten berechnet werden, die dann die Temperatur- und Feuchteverhältnisse im nächsten Zeitschritt beeinflussen, gelten sie eigentlich auch nur unter der Voraussetzung, dass der Wind immer am gleichen Rand in den Dachzwischenraum strömt.

Die Luftgeschwindigkeit im Membrandach-Zwischenraum ist jedoch in den allermeisten Fällen so hoch, dass die Zustandsänderung nur vernachlässigbar gering ist. Da die Luft im Zwischenraum innerhalb eines Simulationszeitschrittes von einer Stunde vielfach ausgetauscht wird, ist auch der Einfluss der noch aus dem vorigen Zeitschritt vorhandenen Luft vernachlässigbar.

Hinzu kommen die bereits zu Beginn des Kapitels beschriebenen Annahmen und Näherungen für die gewählte Berechnungsmethode.

Insofern können die Simulationen nicht den Anspruch erheben, die Wärme- und Feuchteverhältnisse an der äußeren Membran exakt vorherzusagen. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Simulationen Trends auf. Im Besonderen zeigen sie auf, wie stark die Berechnungsergebnisse differieren, je nachdem, ob Feuchtigkeitsschichten und die mit ihnen verbundene latente Wärme berücksichtigt werden oder nicht.

Für die Berechnung der Wasser- und Eisschichten bei 0 °C sind der Bearbeiterin und Autorin dieses Berichtes keine bereits in der Literatur beschriebenen vergleichbaren Methoden bekannt. Dabei können die hier beschriebenen Verfahren auch in anderen Anwendungsgebieten verwendet werden, z.B. zur Berechnung der Vereisung von Wärmeübertragern.

Schlussfolgerungen für Simulationen des inneren Dachaufbaus

Vor allem im Winter ist eine erhebliche Menge an abtropfendem Wasser zu erwarten. Dieses kann aufgrund der kühlen Witterung und der hohen Luftfeuchtigkeit zu dieser Jahreszeit kaum abtrocknen. Dabei ist noch zu bedenken, dass die äußere Membran nur einen geringen Transmissionsgrad aufweist und die Unterspannbahn daher nur in sehr geringem Ausmaß durch Solarstrahlung erwärmt wird.

Besonders kritisch zu betrachten sind diejenigen Stellen, an denen sich aufgrund ihrer Topographie Wasser auf der Unterspannbahn ansammeln kann. Im Falle des Membrandaches in Fürth dürfte dies evtl. dort zutreffen, wo die Wärmedämmschicht unter die Druckstreben geschoben und dort etwas zusammengedrückt wird.

Der Vergleich beider Berechnungsmethoden zeigt den großen Einfluss von anhaftenden Feuchteschichten auf die Temperaturen und vor Allem die Feuchteströme.

Daraus können Schlussfolgerungen gezogen werden, was dies für hygrothermische Simulationen des inneren Dachaufbaus bedeutet. Hierauf wird im nächsten Kapitel eingegangen.

Berechnungen für den inneren Dachaufbau

Der Wärmedurchgangskoeffizient des inneren Dachaufbaus

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des inneren Dachaufbaus wurde nach [DIN EN ISO 6946] berechnet, wie es auch im Kapitel „Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten nach [DIN EN ISO 6946]“ beschrieben wird.

Die Materialdaten wurden dem obigen Kapitel hierzu entnommen. Für die Membranen wird für die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_i = 0,3 \text{ W / (m K)}$ verwendet. Dies entspricht etwa dem Wert für verschiedenen Kunststoffe in der Tabelle mit Bemessungswerten von Baustoffen in [DIN EN ISO 10456], S. 13 ff.

Bei der Berechnung dieses U-Wertes wurde Konvektion innerhalb der Wärmedämmschicht berücksichtigt. Dies geschah, weil damit gerechnet werden muss, dass sich die einzelnen Lagen und die einzelnen Matten innerhalb der Lagen mit der Zeit durch die Bewegungen des Membrandaches verschieben werden und dadurch Luftspalte zwischen den einzelnen Matten entstehen werden.

Abschätzung für den χ -Wert einer Durchdringung

Zudem wurden die Durchdringungen der Wärmedämmschicht durch die Stahlstützen, an denen die Kederschiene für die innere Membran befestigt werden, berücksichtigt. Deren punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient (χ -Wert) wurde jedoch nicht, wie in der Norm empfohlen, nach [DIN EN ISO 10211] berechnet, sondern nach dem vereinfachten Verfahren in [DIN EN ISO 6946] aus der Querschnittsfläche und der Länge der Stützen und der Wärmeleitfähigkeit von Stahl abgeschätzt. Die thermische Unterbrechung durch die Iso-Körbe wurde ebenfalls nicht berücksichtigt. Der χ -Wert der Stützen wird somit überschätzt.

Anzahl der Durchdringungen

Die Anzahl der Aufhängungen der inneren Membran, also der Durchdringungen der Wärmedämmschicht wurde aus den Plänen der Stahlträger bestimmt. Es befinden sich sechs untere Längsrohre der Stahlträger innerhalb der Gebäudegrundfläche. An jedem Längsrohr sind 17 Befestigungsstützen für die innere Membran angebracht. Dabei wurden die Stützen in der Nähe der vorderen Glaswand mitgezählt, da sie noch ca. 20 bis 30 cm von dieser entfernt sind und somit nicht zum Randanschluss hinzugerechnet werden. Die Stützen, die sich ganz knapp vor der hinteren Wand befinden, wurden nicht mitgezählt. Sie sollen bei der Betrachtung der Randanschlüsse des inneren Dachteiles mit berücksichtigt werden.

Ergebnisse

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse für die Anzahl und den χ -Wert der Durchdringungen.

Anzahl der Einzelträger innerhalb des Gebäudes	6
Anzahl der Aufhängungen pro Einzelträger	17
Anzahl der Aufhängungen insgesamt	102
Fläche der inneren Membran [m ²]	1405.59
flächenbezogene Anzahl der Aufhängungen [1 / m ²]	0.072567

Abschätzung des X-Wertes einer Durchdringung

Außendurchmesser Stahlrohr [m]	0.08
Innendurchmesser Stahlrohr [m]	0.07
Querschnittsfläche [m ²]	0.001178
Wärmeleitfähigkeit (Stahl) [W / (m K)]	50
Länge = Dicke der Wärmedämmung [m]	0.4
X-Wert einer Durchdringung (Aufhängung) [W / K]	0.147262

Tabelle: Anzahl und χ -Wert der Durchdringungen

Die Ergebnisse der beschriebenen Berechnung für den Wärmedurchgangskoeffizienten des inneren Dachaufbaus sind in folgender Tabelle ablesbar:

	Dicke [m]	Wärme- leitfähigkeit [W/(m K)]	Wärmedurchlass- widerstand bzw. Wärmeübergangs- widerstand [m ² K/W]
Luftgrenzschicht außen			0.114
Unterspannbahn	0.001	0.3	0.003
Wärmedämmung	0.4	0.13	3.077
Luftschicht unter Wärmedämmung	> 0.015		0.160
innere Membran	0.001	0.3	0.003
Luftgrenzschicht innen			0.100

Wärmedurchgangswiderstand R _T [(m ² K) / W]	3.194
Wärmedurchgangskoeffizient U [W / (m² K)] ohne Korrekturen	0.313

Korrektur für Luftspalte zwischen den Schichten ΔU_g [W / (m ² K)]	0.037
Wärmedurchgangskoeffizient U [W / (m² K)] mit Korrektur für Luftspalte in Wärmedämmschicht	0.350

Korrektur für Durchdringungen ΔU_f	0.009
Wärmedurchgangskoeffizient U [W / (m² K)] mit Korrekturen für Luftspalte und Durchdringungen	0.359

Tabelle: Ergebnisse für den Wärmedurchgangskoeffizienten des inneren Dachaufbaus

Vorüberlegungen und Abschätzungen zu hygrischen Berechnungen

Vereinfachte hygrothermische Berechnung nach dem Glaser-Verfahren

Für eine Abschätzung der hygrothermischen Verhältnisse im inneren Dachaufbau wurde das einfachere Glaser-Verfahren nach [DIN 4108], Teil 3 angewandt. Zwar erstreckt sich der Geltungsbereich von [DIN 4108], Teil 3 nur auf Wohngebäude. Jedoch, da es hier lediglich um eine erste Abschätzung ging, wurde dennoch dieses Verfahren gewählt.

Der Dachaufbau und die Materialdaten wurden angegeben, wie sie in den vorigen Kapiteln beschrieben sind. Die Ergebnisse für die sich ansammelnde Menge an Kondensat und das Austrocknungspotential zeigt folgende Tabelle.

Tauwassermenge in der Tauperiode [kg/m²]	0.074
verdunstende Wassermenge in der Verdunstungsperiode [kg/m²]	0.173
Differenz [kg/m²]	-0.098

Tabelle: Ergebnisse des Glaser-Verfahrens

Das Ergebnis besagt, dass während des Sommers mehr Wasser abtrocknen kann, als sich während der Tauperiode im Winter ansammelt. Das zweite Kriterium ist, dass sich während der Tauperiode nicht mehr als 0,5 kg/m² Wasser ansammeln sollen. Dies ist ebenfalls erfüllt.

Heat Pipe-Effekt in der Wärmedämmschicht

In seiner Bachelor-Arbeit hat [Mast13] den Wärmedurchgang durch mehr oder weniger feuchte bzw. nasse Wärmedämmschichten gemessen. Dabei konnte er die Vermutung, dass es in horizontalen oder flach geneigten Wärmedämmschichten einen Heat Pipe-Effekt gibt, bestätigen. Dieser Effekt stellt sich ein, wenn der Wassergehalt in der Wärmedämmung eines Daches das Maß von ca. 0,5 l / m² übersteigt.

Wasser verdunstet an der Innenseite der Wärmedämmung. Der Dampf dringt durch die Wärmedämmung, die ja dem Dampfstrom kaum Widerstand entgegengesetzt, und kondensiert an der äußeren Begrenzung der Wärmedämmung, evtl. auch schon innerhalb der Wärmedämmung. Wenn die in der Wärmedämmschicht vorhandene Menge an Wasser nicht unerheblich ist und viel Wasser kondensiert, läuft dieses durch die Wärmedämmung zurück zur Unterseite der Dämmschicht, wo es wieder verdunstet. Bei geringen Mengen von Wasser in der Wärmedämmschicht (weniger als 0,5 kg/m²) erfolgte in den Versuchen zwar eine Umverteilung des Wassers von der unteren warmen Seite zur oberen kälteren Seite. Diese kam jedoch nach einer gewissen Zeit zum Erliegen.

[DIN 4108], Teil 3, S. 13/14 erlaubt in kapillar nicht aufnahmefähigen Schichten eine Wassereinlagerung von bis zu $0,5 \text{ kg} / \text{m}^2$ während der Tauperiode, damit diese Menge während der Verdunstungsperiode wieder abtrocknet.

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung des Wassers in der Probe und im Messgerät konnte der Wärmestrom durch diesen Effekt zwar nicht gut quantifiziert werden. Er konnte jedoch eindeutig nachgewiesen werden.

Für das Membrandach der Sporthalle Fürth ist aufgrund dieser Berechnungen jedoch nicht zu erwarten, dass sich in der Wärmedämmung eine so große Wassermenge ansammelt, dass der Heat Pipe-Effekt eintritt. Dies zeigt die im vorigen Abschnitt beschriebene Abschätzung mittels des Glaser-Verfahrens.

Absorption von Solarstrahlung in der Wärmedämmschicht

Es stellt sich die Frage, ob die Absorption von Solarstrahlung in der Wärmedämmschicht vernachlässigt werden kann oder in die Berechnungen mit aufgenommen werden sollte. Für eine erste Einschätzung der Relevanz der Solarstrahlung wird die durch die äußere Membran und die Unterspannbahn durchgelassene und in die Wärmedämmschicht eindringende Solarstrahlung verglichen mit dem Wärmestrom, der durch die Temperaturdifferenz durch die Wärmedämmschicht fließt.

Die äußere Membran lässt zwischen 3 % (Messwert des ZAE) und 17 % (Herstellerangabe für Membran duraskin B 18589 [Verseidag15]) der Solarstrahlung durch. Ende Februar, Anfang März ist eine Schönwetterperiode mit nachts -5 °C Außentemperatur und zur Mittagszeit einer solaren Einstrahlung auf die Dachfläche von $600 \text{ W} / \text{m}^2$ nicht ungewöhnlich, wie die für die Berechnungen verwendeten Wetterdaten zeigen.

Bei einer Einstrahlung von $600 \text{ W} / \text{m}^2$ auf die Dachfläche treffen dann zwischen $18 \text{ W} / \text{m}^2$ und $132 \text{ W} / \text{m}^2$ auf der Unterspannbahn auf, werden von dieser größtenteils durchgelassen werden und dringen in die Wärmedämmschicht ein. Im transluzenten Wärmedämm-Material wird von diesem Anteil wiederum der größte Teil absorbiert.

Bei -5 °C Außentemperatur und bei einer Innentemperatur von 20 °C beträgt die Temperaturdifferenz 25 K . Mit einem U-Wert des Membrandaches vom Innenraum zur Luftschicht im Membrandach von $0,32 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ beträgt dann die Wärmestromdichte $8 \text{ W} / \text{m}^2$. Tagsüber kann das Verhältnis von absorbierter Solarstrahlungsleistung und Wärmestrom von innen nach außen noch viel größer werden.

Dies zeigt, dass die in die Wärmedämmung eindringende Strahlung viel höher ist als der Wärmestrom vom Raum, also der Halle, nach draußen und auf das Abtrocknungsverhalten der Wärmedämmschicht voraussichtlich einen wesentlichen Einfluss hat.

Schlussfolgerungen aus den Simulationen der äußeren Membran

Wie die Simulationen zu den Feuchteverhältnissen an der äußeren Membran zeigten, ist vor allem im Herbst und Winter mit einer nicht unerheblichen Menge an abtropfendem Tauwasser zu rechnen. Dieses kann aufgrund der kühlen Witterung und der hohen Luftfeuchtigkeit zu dieser Jahreszeit kaum abtrocknen. Die Trocknung der Unterspannbahn wird zwar durch die durch die äußere Membran dringende Solarstrahlung unterstützt, jedoch durch die kühle Witterung und die hohe Luftfeuchtigkeit im Herbst und Winter behindert.

Besonders kritisch zu betrachten sind diejenigen Stellen, an denen sich aufgrund ihrer Topographie Wasser auf der Unterspannbahn ansammeln kann. Im Falle des Membrandaches in Fürth dürfte dies evtl. dort zutreffen, wo die Wärmedämmschicht unter die Druckstreben geschoben und dort etwas zusammengedrückt wird.

Diese Erkenntnis bedeutet für hygrothermische Simulationen des inneren Dachaufbaus, dass die Vernachlässigung von anhaftenden Feuchteschichten das Potential der Austrocknung von in die Wärmedämmschicht eingedrungener Feuchtigkeit stark überschätzt. Anders ausgedrückt: Wenn bei der Simulation die anhaftenden Feuchteschichten berücksichtigt werden, werden geringere Trocknungsraten berechnet. Daher ist es wichtig, diese Feuchteschichten und ihre gegenseitige Beeinflussung mit den Oberflächentemperaturen und den Trocknungsraten in die Berechnungen mit einzubeziehen. Ansonsten kann es vorkommen, dass ein Bauteil als feuchtetechnisch funktionsfähig berechnet wird, obwohl sich Feuchte im Bauteil ansammeln wird.

Die Berücksichtigung der anhaftenden Feuchteschichten in den Berechnungen führt bei Randbedingungen, die zu einer Trocknung einer vorhandenen Feuchteschicht führen, auch zu niedrigeren Temperaturwerten der Oberfläche und somit auch zu geringeren Ergebniswerten für die Kondensationsraten an den Oberflächen. Insofern stellt sich die Frage, ob dies die geringeren berechneten Verdunstungsraten wieder ausgleichen wird. Dies ist für die äußere Membran der Fall. Das sieht man an den geringeren Werten für die Abtropfraten, die vom VBA-Programm, das die Feuchteschichten und ihren Einfluss mit berücksichtigt, berechnet werden.

Beim inneren Dachaufbau ist jedoch kaum Kondensation auf den Bauteil-Oberflächen zu erwarten. Die Temperatur der raumseitigen Oberfläche bleibt aufgrund der großen Dämmschichtdicke auch im Winter über dem Taupunkt der Raumluft. Die äußere Oberfläche zum Membrandach-Zwischenraum hin erfährt keine oder nur sehr geringe Abkühlung bis unter die Temperatur der Außenluft. Vom kalten Himmel wird sie von der äußeren Membran weitgehend abgeschirmt. Zudem wird sie durch den – wenn auch geringen – Wärmestrom aus dem Rauminnen und zeitweise durch Solarstrahlung erwärmt.

Die Feuchtigkeit, die in die Wärmedämmschicht eindringt und von dort wieder austrocknen muss, stammt zum überwiegenden Teil aus der Raumluft. Sie diffundiert durch die innere Membran mit ihrem relativ geringen s_d -Wert von 9 bis 11 m und dringt durch evtl. vorhandene Luftleckagen, z. B. an den Anschlüssen der inneren Membran, in die Wärmedämmschicht ein. Von dort muss sie – hauptsächlich nach außen – wieder abtrocknen.

[IBP16] beschreibt Simulationen mit WUFI von Holz-Flachdächern. Auf der Oberseite anhaftende Wasserschichten werden dabei ebenfalls nicht berücksichtigt. Es wird der Einfluss der Farbe und somit des Absorptionskoeffizienten der Abdeckbahn für Solarstrahlung variiert. Dunkle Abdeckbahnen werden tagsüber, vor Allem im Sommer, deutlich wärmer als helle Abdeckbahnen. Der Vergleich der Simulationsergebnisse zeigt den großen Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Feuchteverhältnisse in der darunterliegenden Wärmedämmschicht. Im Jahresverlauf ist deren Feuchtegehalt bei heller Abdeckbahn deutlich höher als bei dunkler Abdeckbahn.

Ein entsprechender Einfluss ist durch anhaftende Feuchteschichten zu erwarten: Solange sich eine Feuchteschicht auf der Unterspannbahn des Membrandaches befindet, z.B. durch Wasser, das von der äußeren Membran abtropfte oder an den Dachrändern in den Zwischenraum eindrang, herrscht dort eine relative Luftfeuchte von 100 %. In Zeiten in denen eine vorhandene Feuchteschicht abtrocknet, sinkt dadurch die Oberflächentemperatur durch die benötigte Verdunstungsenthalpie. Beides behindert die Austrocknung der Wärmedämmschicht oder führt gar zu einem Feuchteeintrag in die Wärmedämmschicht von oben. Beide Effekte können mit WUFI nicht berücksichtigt werden.

Fazit

WUFI erscheint somit nur bedingt geeignet zur hygrothermischen Simulation von (Membran-) Dachaufbauten, wenn mit anhaftenden Feuchteschichten zu rechnen ist, z.B. wegen eindringendem Schnee und Regen an den Rändern des Membrandaches oder abtropfendem Wasser, das von der äußeren Membran auf die Unterspannbahn tropft.

Ausblick

Ausgehend von diesen Ergebnissen stellt sich die Frage, wie für den inneren Dachaufbau anhaftende Feuchteschichten und ihre Wechselwirkung mit der Temperatur und dem Feuchtestrom an der Oberfläche der Unterspannbahn in hygrothermischen Simulationen berücksichtigt werden können.

Hierzu wurden verschiedenen Ideen entwickelt, die jedoch im Rahmen des Projektes nicht mehr umgesetzt werden konnten. Sie sollen dennoch hier kurz vorgestellt werden.

Verfahren nach [Koelsch16]

In [Koelsch16] wird ein Verfahren zur hygrothermischen Simulation von Steildächern vorgestellt. Als Simulations-Programm wurde WUFI verwendet. Von der äußeren Dachabdeckung wird dabei nicht berechnet. Es geht vielmehr darum, den Einfluss der äußeren Dachabdeckung und der darunterliegenden belüfteten Luftschicht auf den inneren Dachaufbau zu berücksichtigen.

Dazu wird im WUFI-Modell nur der innere Dachaufbau eingegeben und es werden die Wetterdaten des Standortes verwendet. Zur Berücksichtigung des Einflusses der äußeren Dachabdeckung und der Dach-Belüftung werden die äußeren Übergangskoeffizienten verändert. Beispielsweise wird für ein stark belüftetes Dach der konvektive Wärmeübergangskoeffizient mit $30 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ angesetzt. Die Strahlung (kurz- und langwellig) wird explizit berechnet. Dabei gibt man für den kurzwelligen Absorptionsgrad der äußeren Oberfläche, also der Unterspannbahn das 0,7-fache des Absorptionsgrades der äußeren Dachabdeckung an. Damit erreicht man, dass die hohe Temperatur in der Belüftungsschicht entsprechend berücksichtigt wird. Die langwellige Emissivität übernimmt man von der äußeren Dachabdeckung.

Dieses Verfahren wurde für übliche Steildächer mit relativ dunkler Dachabdeckung (Ziegel) und üblicher Dicke des Luftspaltes von wenigen Zentimetern aus Versuchsreihen entwickelt. Inwiefern dieses Verfahren auf Membrandächer mit heller Abdeckung und sehr viel größerem Luftraum übertragbar ist, ist fraglich. Dennoch sollte es hier erwähnt werden.

Erste Idee mit WUFI

Vorbereitung

Das Verfahren beruht auf der Idee, aus den Ergebnissen des in den obigen Kapiteln vorgestellten VBA-Programms eine „Wetterdaten“-Datei für den Membrandach-Zwischenraum zu erzeugen und diese für WUFI-Simulationen des inneren Dachaufbaus zu verwenden.

Die Vorgehensweise wäre dann wie folgt:

Zunächst werden die Wetterdaten für den gewählten Standort aus WUFI exportiert und mit diesen Wetterdaten eine Jahres-Simulation des VBA-Programms gestartet.

Mit deren Ergebnissen wird aus der Wetterdaten-Datei für den Außenraum eine „Wetterdaten“-Datei für den Membrandach-Zwischenraum erzeugt.

- Hierzu werden die stündlichen Regenmengen ersetzt durch die berechneten Abtropfraten.
- Die Windgeschwindigkeit wird ersetzt durch eine abgeschätzte Luftgeschwindigkeit im Membrandach-Zwischenraum, z.B. 1 / 4 der Windgeschwindigkeit. Für steile Dächer können aus den Belüftungsdaten nach [Koelsch16] Luftgeschwindigkeiten berechnet werden.
- In dieser „Wetterdaten“-Datei werden zudem die Werte der langwelligen Strahlung vom Himmel ersetzt durch die Werte für die langwellige Strahlung der äußeren Membran auf die Unterspannbahn. Diese wird aus der berechneten Temperatur der äußeren Membran berechnet.
- Die kurzwellige Einstrahlung in den ursprünglichen Wetterdaten ersetzt man durch deren Multiplikation mit dem Transmissionsgrad der äußeren Membran.
- Diese „Wetterdaten“-Datei wird dann umgewandelt in ein von WUFI lesbares Format.

Iterationen mit WUFI und eigenen Berechnungen

Mit den erzeugten Wetterdaten für den Membrandach-Zwischenraum wird eine WUFI-Simulation für den inneren Dachaufbau durchgeführt. Aus deren Ergebnissen ermittelt man die Kondensation, Verdunstung und die Dicke der Feuchteschichten auf der Unterspannbahn. Hierzu kann das Verfahren angewandt werden, mit dem für die äußere Membran diese Größen aus den mit WUFI berechneten Membrantemperaturen berechnet wurden.

IM dritten Schritt wiederum passt man die Wetterdaten für den Membrandach-Zwischenraum an. Diesmal ersetzt man die relative Luftfeuchte durch den Wert von 100 % in allen Zeitschritten, in denen eine Feuchteschicht auf der Unterspannbahn berechnet wurde.

Diese drei Schritte wiederholt man, bis sich die Ergebnisse nur noch vernachlässigbar ändern.

Zweite Idee mit WUFI

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, anhaftende Feuchteschichten mittels einer zusätzlichen Materialschicht auf der jeweiligen Oberfläche, in diesem Fall die Unterspannbahn, zu berücksichtigen. So schlägt es auch [Bludau14] vor. Diese Materialschicht soll als hochporös und nicht hygroskopisch angegeben werden. Ihre Dicke gibt man an entsprechend der maximalen Dicke einer anhaftenden Feuchteschicht. Die möglicherweise größeren Dicken von Eis- und Schneeschichten können damit jedoch nicht simuliert werden.

IM WUFI-Modell gibt man wieder nur den inneren Dachaufbau ein, nun mit der beschriebenen Zusatzschicht für die möglicherweise vorhandene Feuchteschicht.

Als äußere Randbedingung kann wieder eine „Wetterdaten“-Datei für den Membrandach-Zwischenraum verwendet werden, wie sie für die „erste Idee mit WUFI“ beschrieben wurde.

Dritte Idee mit Multiphysics-Simulationsprogramm

Im Multiphysics-Programm COMSOL ist es möglich, die sich ändernde Größe von Körpern zu simulieren. [Zhao14] simulierten die Verdunstung von Wasser an der Oberfläche eines Tropfens und die damit verbundene Volumenabnahme des Tropfens. Diese Simulationsmöglichkeit in COMSOL sollte auch zur Simulation der Bildung und Trocknung von Feuchteschichten auf der Oberfläche eines Bauteils verwendet werden können.

Für die äußeren Randbedingungen kann wieder eine „Wetterdaten“-Datei verwendet werden, wie sie für die vorigen beiden Vorschläge beschrieben wurde.

Literatur

[Ackermann10]

Ackermann, Thomas: Untersuchungen zu zeitlichen Schwankungen der Feuchte in Innenräumen im Hinblick auf den Feuchtetransport durch Bauteile und die Vermeidung von Schimmelpilzbildung auf Bauteil-Innenoberflächen, Forschungsprojekt, <https://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/baufolit/projekt/Untersuchungen-zu-zeitlichen-Schwankungen-der-Feuchte-in-Innenr%C3%A4umen-im-Hinblick-auf-den-Feuchtetransport-durch-Bauteile-und-die-Vermeidung-von-Schimmelpilzbildung-auf-Bauteil-Innenoberfl%C3%A4chen/20098034595> (letzter Zugriff am 21.12.2016)

[Ackermann15]

Ackermann, Thomas: Untersuchungen zu zeitlichen Schwankungen von Temperatur und Feuchte in Innenräumen im Hinblick auf den Feuchtetransport durch Bauteile und zur Vermeidung von Schimmelpilzbildungen auf Bauteil-Innenoberflächen bei Gebäuden mit und ohne gebäudetechnische Anlagen zur Lüftung und Kühlung, Forschungsprojekt, <https://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/baufolit/projekt/Untersuchungen-zu-zeitlichen-Schwankungen-von-Temperatur-und-Feuchte-in-Innenr%C3%A4umen-im-Hinblick-auf-den-Feuchtetransport-durch-Bauteile-und-zur-Vermeidung-von-Schimmelpilzbildungen-auf-Bauteil-Innenoberfl%C3%A4chen-bei-Geb%C3%A4uden-mit-und-ohne-geb%C3%A4udetechnische-Anlagen-zur-L%C3%BCftung-und-K%C3%BChlung/20148036298> (letzter Zugriff am 21.12.2016)

[ASHRAE_74-1988]

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): Method of Measuring Solar-Optical Properties of Materials, Norm, 1988, zurückgezogen, www.techstreet.com/standards/ashrae-74-1988?product_id=14271#product (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Badea09]

Badea, Aurelian Florin: Energiesystem I - Regenerative Energien, Vorlesung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2009

[Berdahl/Martin84-2]

Berdahl, P., Martin, M.: Characteristics of infrared sky radiation in the United States. 1984, Solar Energy 33 (3/4), 321–336.

[Bludau14]

Bludau, Christian: Auswertung der Tauwassermenge, Webseite, <http://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?f=8&t=992> (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Bluemel86]

Blümel, Klaus ; Peter, R. ; Kaehler, M. ; Hollan, E. ; Jahn, A.: Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland, 1986, Förderkennzeichen: BMFT-FB-T-86-051

[BBSR-TRY11]

Bundesinstitut für Stadt-, Raum- und Bauforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse, online-Beschreibung unter: http://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/01_start.html?nn=739044

Seite mit Download-Links: http://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/01_start.html;jsessionid=3CC5A0352CDFB733DB371E35E126F5B7.live1041?nn=739044¬First=true&docId=743442 (letzter Zugriff am 17.2.2016)

[Browne12]

Browne, Dan: The SPAB Hygrothermal Modelling: Interim Report, Society for the Protection Ancient Buildings (SPAB), UK, 2012, www.spab.org.uk/sites/default/files/documents/MainSociety/Advice/SPAB%20Hygrothermal%20Modelling%20Report%2031.pdf (letzter Zugriff am 31.3.2018)

[Bubner05]

Ewald Bubner: Membrankonstruktionen – Verbindungstechniken, 2005, Verlag Wehlmann, Essen, ISBN 3-9805790-7-7

[Buck/Beck16]

Buck, Doris; Beck, Andreas: Feuchtelasten in Innenräumen, 2016, Anhang zum Projektbericht „Entwicklung innovativer Materialien und Komponenten zur energetischen Optimierung von Feuchte-, Licht- und Wärmetechnik in Gebäuden (Enotec)“ FKZ 03ET1061A bis D

[Cekon15]

M. Cekon: Accuracy analysis of longwave sky radiation models in the MZELWE module of the ESP-r program, 2015, Energy and Buildings 103 (2015) 147-158, doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.039

[Chaplin15]

Chaplin, Martin: Water Structure and Science, Webseite, http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_properties.html (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Christoffer04]

Christoffer, Jürgen; Deutschländer, Thomas; Webst, Monika.: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY, 2004, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. Main, Titel und Inhalt verfügbar unter <http://external.dandelon.com/download/attachments/dandelon/ids/DE00492CE6EAD5EC8145FC1257845002AD19C.pdf>

[DELPHIN16]

Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur, TU Dresden: DELPHIN, <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php> (letzter Zugriff am 28.4.2016)

[Deinhammer11]

Deinhammer, Anna-Vera: Zur Systematik und Struktur von Membranfassaden und Membranhüllen, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2011,
<http://permalink.obvsg.at/AC08549894> (letzter Zugriff am 18.11.2015)

[DIBt13]

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): EnEV 2013: DIBt wird Registrierstelle, Bauphysik 35 (2013) Heft 6, S. 411

[DIN 4108], Teil 2

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden –
Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, 2013, Beuth-Verlag

[DIN 4108], Teil 3

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden –
Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, 2014 und 2018, Beuth-Verlag

[DIN 4108], Teil 7

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden –
Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele , 2011, Beuth-Verlag

[DIN 4710]

Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland, 2003, Beuth-Verlag

[DIN 5031]

Normenreihe: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, 1982 – 2015, Beuth-Verlag

[DIN 18032-1]

Sporthallen – Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung - Teil 1: Grundsätze für die Planung, 2014, Beuth-Verlag

[DIN 18036]

Eissportanlagen – Anlagen für den Eissport mit Kunsteisflächen - Grundlagen für Planung und Bau, 2010, Beuth-Verlag

[DIN 53122], Teil 1

Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Teil 1: Gravimetrisches Verfahren, 2001, Beuth-Verlag

[DIN 68800], Teil 2

Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, 2012, Beuth-Verlag

[DIN EN 410]

Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, 2011, Beuth-Verlag

[DIN EN 12898]

Glas im Bauwesen – Bestimmung des Emissionsgrades, 2001, Beuth-Verlag

[DIN EN 13779]

Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme, 2007, Beuth-Verlag

[DIN EN 15026]

Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, 2007, Beuth-Verlag

[DIN EN 24920]

Textilien; Bestimmung der wasserabweisenden Eigenschaften (Sprühverfahren), 1992, Beuth-Verlag, zurückgezogen im Dez. 2012, Nachfolgedokument [DIN EN ISO 4920]

[DIN EN ISO 4920]

Textilien – Bestimmung der wasserabweisenden Eigenschaften (Sprühverfahren), 2012, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 6946]

Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); 2008, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 9346]

Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden und Baustoffen - Physikalische Größen für den Stofftransport - Begriffe; 2008, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 10211]

Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen, 2018, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 10456]

Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte, 2010, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 12572]

Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, 2015, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 13788]

Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächen-feuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, 2001, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 15026]

Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, 2007, Beuth-Verlag

[DIN EN ISO 15927]

Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 1 bis Teil 6, 2003 bis 2011, Beuth-Verlag

[DIN V 18599]

Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Normenreihe (11 Teile mit Berichtungen), 2011 – 2013, Beuth-Verlag

[Doerken16]

Firma Dörken, Herdecke: DELTA®-FOL SPF / Verlegeanleitung

<http://www.doerken.de/bvf-de/pdf/prospekt/Fol-Spf.pdf> (letzter Zugriff am 17.3.2016)

<http://www.doerken.de/bvf-de/pdf/service/Unterspannbahnen.pdf>

(letzter Zugriff am 17.3.2016)

[Dregger12]

Dregger, Phil: Fact or Fiction – "Cool" Roofs Cause Condensation - Fact or Fiction?,

www.epdmroofs.org/attachments/2012_02_cool%20roofs%20cause%20condensation%20fact%20or%20fiction_western%20roofing_phil%20dregger.pdf

(letzter Zugriff am 31.3.2015))

[Duffie/Beckman06]

Duffie, John A.; Beckman, William A.: Solar engineering of thermal processes, 3. Auflage, 2006, John Wiley & Sons

[DWD16]

Deutscher Wetterdienst (DWD), <http://www.dwd.de/>

Solarstrahlungskarte für Deutschland unter

https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html?nn=18320

(zuletzt am 18.4.2018), Nutzungsbedingungen unter

https://www.dwd.de/DE/service/copyright/copyright_artikel.html?nn=18320&lsblid=505200

[DWD-TRY11]

Deutscher Wetterdienst (DWD) Testreferenzjahre (TRY), <http://www.dwd.de/TRY> (zuletzt am 21.12.2017), Webseite nicht mehr verfügbar, wird auf neue Webseite umgeleitet),

Nutzungsbedingungen unter

https://www.dwd.de/DE/service/copyright/copyright_artikel.html?nn=18320&lsblid=505200

[DyAna15]

Website des Ingenieurbüros DyAna, www.dyana.de, (letzter Abruf. 18.2.2015, Website nicht mehr verfügbar seit 2016)

[Eicker/Dalibard11]

Ursula Eicker, Ursula; Dalibard, Antoine: Photovoltaic-thermal collectors for night radiative cooling of buildings, Solar Energy, Band 85 (2011), S. 322-1335

[Ennis/Kehrer13]

Ennis, Mike; Kehrer, Manfred: The Effects of Roof Membrane Color on Moisture Accumulation in Low-slope Commercial Roof Systems,
http://www.epdmroofs.org/attachments/effects%20of%20cool%20roofing%20on%20moisture%20condensation%20in%20cold%20regions%2025_ennis.pdf (letzter Zugriff am 26.4.2016)

[EnEV2009]

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, 2009

[EnEV2015]

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, 2015, http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/index.html (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Fechner08]

Fechner, Heiko et al.: Modellierung der Wechselwirkung des Wärme- und Feuchtehaushaltes zwischen Räumen und angrenzenden Materialien : deutsche Beteiligung an IEA-Annex 41: Whole building heat, air and moisture response "Moist-Eng" ; Abschlussbericht, Förderkennzeichen 0329663F,
www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A578694646/Modellierung-der-Wechselwirkung-des-W%C3%A4rme-und-Feuchtehaushaltes/?tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn (letzter Zugriff 25.9.2017)

[Finkenstein/Haeupl07]

Finkenstein, Claudia; Häupl, Peter: Atmospheric longwave radiation under cloudy skies for HAM simulation programs, Veröffentlichung im Rahmen des Forschungskooperation „Energy Conservation in Buildings & Community Systems Programme (ECBCS)“ der Internationalen Energieagentur (IEA), Annex 41 „Whole building heat, air and moisture response (MOIST-ENG)“
<http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex41/protected/data/TUD%20Oct%202007%20BGinf%20A41-T3-D-07-1.pdf> (letzter Zugriff am 25.4.2016)

[Fischer08]

Fischer, Heinz-Martin et al.: Lehrbuch der Bauphysik – Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand – Klima, 2008, Wiesbaden : Vieweg + Teubner,
ISBN: 978-3-8348-9467-0 (e-book); 978-3-519-55014-3 (Druck-Ausgabe)
DOI: [10.1007/978-3-8348-9467-0](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9467-0)

[form_TL15]

form TL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh: From the Hangar to the Tropical Island, Firmenbroschüre, (letzter Zugriff am 7.6.2016)
http://www.form-tl.de/fileadmin/user_upload/redakteur/download/broschuere/tropicalislands.pdf

[Frank15]

Frank, Oswald: Mündliche Mitteilung am 12.8.2015

[Gerthsen15]

Meschede, Dieter (Hrsg.): Gerthsen Physik, 2015, Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-662-45976-8 (Print-Ausgabe); 978-3-662-45977-5 (e-Book)
DOI 10.1007/978-3-662-45977-5

[Gesamthochschule_Essen_Fach_Konstruktive_Gestaltung79-85]:

Bubner, Ewald; Baier, Bernd; Oelbermann, Jobst.: Membrankonstruktionen, 5 Bände, 1979 – 1985, Gesamthochschule Essen, Fach Konstruktive Gestaltung

[Glaeser92]

Gläser, Hans Joachim: Funktions-Isoliergläser, 1992, expert-Verlag, ISBN 3-8169-0664-8

[Glueck91]

Glück, Bernd: Zustands- und Stoffwerte : Wasser, Dampf, Luft ; Verbrennungsrechnung, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, 1991, Verl. für Bauwesen, Berlin, vergriffen, der Autor stellt die noch aktuellen Teile auf seiner Website zur Verfügung:
<http://berndglueck.de/stoffwerte.php> (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Grunewald97]

Grunewald, John: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, 1997, Dissertation, Eigenverlag der TU Dresden, ISBN 3-86005-191-1

[Grunwald09]

Grunwald, Gregor; Herzog, Thomas; Sieder, Mike; Elsayad, Said: Entwicklung von ressourcenschonenden Bausystemen mit Membran, 2009,
<http://services.bibliothek.kit.edu/kvk/view-title/index.php?katalog=TIB&url=https%3A%2F%2Fgetinfo.de%2Fapp%2Fopenurl%2Fsearch%3Fcode%3D655021752&showCoverImg=1> (letzter Zugriff am 18.11.2015)

[Haase11]

Haase, Walter; Klaus, Thorsten; Knubben, Elias; Mielert, Fritz; Neuhäuser, Stefan; Schmid, Fabian; Sobek, Werner: Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen. Mit Anl. 1. Recherchebericht: Beispiele zur konstruktiven Ausführung mehrlagiger gedämmter Membranbauwerken. Anl. 2. Dokumentation: Simulationstool für mehrlagige Aufbauten, 2011,
<https://www.baufachinformation.de/literatur.jsp?bu=2011109001183>
(letzter Zugriff am 18.11.2015)

[Haeupl13]

Peter Häupl, Martin Homann, Christian Kölzow, Olaf Riese, Anton Maas, Gerrit Höfker, Christian Nocke; Wolfgang Willems: Lehrbuch der Bauphysik, Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima, 7., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, 2013., Springer eBook Collection: Computer Science and Engineering, ISBN (Print) 978-3-8348-1415-9, ISBN (Online) 978-3-8348-2101-0

[Hegger15]

Fachbereich Architektur, Entwerfen und Energieeffizientes Bauen der TU Darmstadt: Baustoffe, http://www.ee.architektur.tu-darmstadt.de/ee/links_ee/baustoffe.de.jsp
(letzter Zugriff am 13.6.2016)

[Holm08]

Holm, Andreas H.: Einfluss des Klimas (innen und außen) auf das hygrothermische Verhalten von Außenbauteilen, Bausim 2008, Zweite deutsch-österreichische IBPSA-Konferenz, Universität Kassel, Abstract unter <http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2008/47.pdf>
(letzter Zugriff am 25.4.2016)

[Hoppe07]

Hoppe, Diether S.: Freigespannte textile Membrankonstruktionen : geschichtliche, materialtechnische, konstruktive und gegenwärtige Entwicklungen, 2007, Wien [u.a.] : Böhlau, Inhaltstext und Inhaltsverzeichnis verfügbar unter <https://www.gbv.de/dms/bs/toc/512948496.pdf> (letzter Zugriff am 18.11.2015)

[IBP15]]

Meteonorm 7: Ausgabe von Klimadateien für WUFI, Präsentation, https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2014/09/Wufi_Meteonorm7.pdf (letzter Zugriff am 8.1.2018)

[IBP16]

n.a.: Flachdach in Holzbauweise, <https://wufi.de/de/2014/11/10/flachdach-in-holzbauweise/>
(letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Incropera13]

Incropera, Frank P.: Principles of heat and mass transfer, 2013, Hoboken, NJ : Wiley, ISBN: 978-0-470-64615-1

[Ineichen92]

Ineichen, Pierre; Perez, R.R; Seal, R.D; Maxwell, E.L; Zalenka, A.: Dynamic global-to-direct irradiance conversion models, ASHRAE Transactions, 1992, vol. 98, n° 1, p. 354-369. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:38583> (letzter Zugriff am 8.1.2018)

[Janetti12]

Janetti, Michele Bianchi; Ochs, Fabian; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: Hygrothermische 3D-Simulation von Bauteilen mit COMSOL Multiphysics, Bausim 2012, www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2012/BauSIM2012_154.pdf
(letzter Zugriff am 29.4.2016)

[Janetti12-1]

M. Bianchi Janetti, F. Ochs and R. Pfluger: Coupling Forced Convection in Air Gaps with Heat and Moisture Transfer inside Constructions, 2012, http://www.comsol.com/offers/conference2012papers/papers/file/id/13402/file/15443_janetti_paper.pdf (letzter Zugriff am 16.3.2015)

[Janetti12-2]

Janetti, Michele Bianchi; Ochs, Fabian; Feist, Wolfgang: 3D Simulation of Heat and Moisture Diffusion in Constructions,

www.comsol.es/paper/download/83717/janetti_paper.pdf (letzter Zugriff am 29.4.2016)

[Janetti13]

Janetti, Michele Bianchi; Ochs, Fabian; Feist, Wolfgang: On the conservation of mass and energy in hygrothermal numerical simulation with COMSOL Multiphysics, Konferenz "Building Simulation", 25. – 28. August 2013 in Chambéry, Frankreich

www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1267.pdf (letzter Zugriff am 15.4.2018)

[Jeong10]

Jeong, Kwangkook; Kessen, Michael J.; Bilirgen, Harun; Levy, Edward K.: Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer 53 (2010) 2361-2368

[Kleber17]

Kleber, Michael et al.: Leistungskriterien für Innenraumputze vor dem Hintergrund des Klimawandels und des Nutzerkomforts, Bauphysik, Band 39 (2017), Heft 4, S. 234 ff

[Klein14]

Klein, Andreas: Bewohnte Untergeschosse - technische Entfeuchtung erforderlich oder nicht?, 2014, Bachelor-Arbeit an der Hochschule für Technik Stuttgart, Studiengang Bauphysik

[Knippers10]

Knippers, Jan; Cremers, Jan; Gabler, Markus; Lienhard, Julian et al.: Atlas Kunststoff + Membranen, 2010, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-95553-003-7 eBook (pdf), 978-3-920034-41-6 (print), 978-3-95553-059-4 (print/eBook)

[Koelsch16]

Kölsch, Philipp: Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern, https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2014/09/Bel%C3%BCftete_Dachkonstruktionen_de.pdf (letzter Zugriff am 15.4.2018)

[Krischer/Kast78]

Krischer, Otto; Kast, Werner: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 1978, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-08280-8 und 0-387-08280-8

[Kuenzel94]

Künzel, Hartwig M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, 1994, Dissertation Universität Stuttgart,
http://www.hoki.ibp.fhg.de/ibp/publikationen/dissertationen/hk_dissertation.pdf (18.11.2015)
http://www.bauportal-zukunft.de/forschungsberichte/PDF/4_Dissertation_HKuenzel.pdf
(18.11.2015)

[Kuenzel09-1]

Künzel, Helmut: Bauphysik und Denkmalpflege, 2009, Fraunhofer-IRB-Verl., ISBN 978-3-8167-8047-2

[Kuenzel17]

Künzel, Hartwig: Wie feucht wird die Zukunft?, Bauphysiker_innen-Tag 2017, TU Wien, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, 5. Oktober 2017

[Lang/Pucker98]

Lang, Christian B.; Pucker, Norbert: Mathematische Methoden in der Physik, 2005, Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, ISBN 3-8274-1558-6

[Mainini14]

Mainini, Andrea G. et al.: Transparent Multilayer ETFE Panels for Building Envelope: Thermal Transmittance Evaluation and Assessment of Optical and Solar Performance Decay due to Soiling, Energy Procedia, Band 48, 2014, S. 1302-1310,
2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013),
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214004093#>
(letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Manara12]

Manara, J.: Energieoptimiertes Bauen: Membrankonstruktionen zur energetischen Sanierung von Gebäuden (MESG) - Verbundkoordination; Schlussbericht des BMWi-geförderten Projekts, Förderkennzeichen: 0327240G bis O, DOI: 10.2314/GBV:729284352, online-Ausgabe:
https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A729284352/Energieoptimiertes-Bauen-Membrankonstruktionen/?tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn
(letzter Zugriff am 25.9. 2017)

[Marquardt/Mainka08]

Helmut Marquardt , Georg-Wilhelm Mainka: Tauwasserausfall in Eissporthallen, 2008, Bauphysik, Band 30, Heft 2, S. 91-101

[Mast13]

Mast, Benjamin: Feuchteinfluss auf Faserdämmstoffe in Industriedachanlagen, 2013, Bachelor-Arbeit, Hochschule für Technik Stuttgart, Studiengang Bauphysik

[Mitsubishi16]

Datenblätter und Informationen über die Eigenschaften von Polyester (PET)Folien, speziell Wasserdampfdurchlässigkeit,

http://europe-de.m-petfilm.de/wp-content/uploads/sites/3/Europe_181GER.pdf

<http://europe-de.m-petfilm.de/service/datenvergleich-fuer-kunststoff-folien/#link36>

http://www.goba.de/pics/service_support/b/DB%20Hostaphan%20RN%2012-23%20my.pdf

http://www.goba.de/pics/service_support/b/DB%20Hostaphan%20RN%2036-350%20my.pdf

[Motro13]

Motro, René (Hrsg.): Flexible Verbundmaterialien in Architektur, Bauwesen und Innenarchitektur, 2013, Birkhäuser, Basel, ISBN 978-3-0346-1385-9 (eBook), 978-3-7643-8971-0 (print), 978-3-0346-1396-5 (print/eBook)

[Niemann&Partner10]

Ingenieurgesellschaft Niemann & Partner GbR: Sportzentrum Fürth - Statische Windersatzlasten auf Grundlage von Modelluntersuchungen im Grenzschichtwindkanal, nicht öffentlicher Bericht.

[Ochs04]

Ochs, F.; Stumpp, H.; Mangold, D.; Heidemann, W.; Müller-Steinhagen, H.: Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen, 14. Symposium Thermische Solarenergie, 2004, Bad Staffelstein

[opw17]

Oldenburger Parkettwerk. Holzausgleichsfeuchte,

http://opw-parkett.de/files/holzausgleichsfeuchte_1.pdf (4.10.2017)

[Perraudeau86]

Perraudeau, M: Climat lumineux a` Nantes, Resultants de 15 mois de Measures. 1986, CSTB EN-ECL 86.14L.

[Perschk00]

Perschk, Alf: Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden, 2000, Dissertation, Technische Universität Dresden,

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:14-993456440484-94152> (17.6.2016)

[Perschk/Meinhold07]

Alf Perschk, Uwe Meinhold: Ein Modell zur hygrisch-thermischen Gebäudesimulation mit Hilfe der Kopplung von Zonen- und Feldmodell, Bauphysik Band 29 (2007), Heft 1, S. 55ff

[PVGIS08]

Institute for Environment and Sustainability (IES): Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS),

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> für Solarstrahlungskarten

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/temper/index.htm> für Temperatur-Karten

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html

für neuere Solarstrahlungskarten, (jeweils letzter Zugriff 16.11.2016)

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eu_hor/pvgis_solar_horiz_DE.png

für Solarstrahlungskarte von Deutschland (jeweils letzter Zugriff 21.12.2017)

[Schaefer/Hiller15]

Schaefer, Kai; Hiller, Marion: TRY-Klimadatensätze - offizielles Verbot für solarthermische Simulationen!, 25. Symposium Thermische Solarenergie, 6. - 8. Mai 2014, Kloster Banz, Bad Staffelstein

[Schaube/Werner86]

Schaube, H; Werner, H.: Wärmeübergangskoeffizient unter natürlichen Klimabedingungen, IBP-Mitteilung 13 (1986), Nr. 109

http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/IBP-Mitteilung/109_tcm45-79869.pdf (letzter Zugriff am 22.10.2015)

[Saur10]

Saur, Alexandra. et al.: Einsatz innovativer Textilien und Funktionsmembranen für energetisch optimierte Fassaden- und Klimasysteme, Kurztitel: Textile Bausysteme, Projektteil: Textile Fassade, 2010, DOI: <https://doi.org/10.2314/GBV:623664690>

www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A623664690/ (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Schindel07]

Schindel, Bernd: Thermografie in der Theorie und Praxis, 2007, Österreichischer Thermographieverband, www.thermografie.co.at/files/ebs.pdf (letzter Zugriff am 25.4.2016)

[Schmid04]

Schmid, Gerd: Bauen mit Membranen, Architektur - Fachmagazin, Hefte 3, 4 und 5 in 2004, <http://www.form-tl.de/de/download/fachinformationen.html> (letzter Zugriff am 23.6.2015)

[Schmid09]

Schmid, Gerd: Neues Bauen mit ETFE-Folien,

http://dyana.de/fileadmin/dyana/Downloads/NeuesBauenETFE_1.pdf

(letzter Zugriff am 14.10.2015)

[Schoener/Zirkelbach16]

Schöner, T.; Zirkelbach, D.: Development of hygrothermal reference years for Germany, CESBP Central European Symposium on Building Physics / BauSIM 2016, 14.-16.9.2016, Dresden
<https://wufi.de/literatur/Sch%C3%B6ner,%20Zirkelbach%202016%20-%20Development%20of%20Hygrothermal%20Reference%20Years.pdf>
(letzter Zugriff am 8.1.2018)

[Schwaller16]

Schwaller, Johann et al.: Modifikation des Glaser-Verfahrens zur Berücksichtigung solarer Strahlung und konvektiver Feuchteinträge,
Bauphysik Band 38 (2016), Heft 2, S. 72 - 80

[Sedlbauer01]

Sedlbauer, Klaus: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation, 2001, Universität Stuttgart,
http://www.hoki.ibp.fhg.de/ibp/publikationen/dissertationen/ks_dissertation.pdf
(letzter Zugriff am 9.1.2018)

[Sedlbauer/Kiessl02]

Sedlbauer, Klaus; Kießl, Kurt: Neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Schimmelpilzen und Stand der Normenbearbeitung,
http://ftp.kph.de/Infos/Schimmel-pub1_34.pdf (letzter Zugriff am 9.1.2018)

[Sefar15]

Sefar AG: Sefar TENARA 4T20HF, Sefar TENARA 4T40HF, Sefar E-Line EH-35-T2, Produktdatenblätter, 2015,
http://www.tenarafabric.com/pdf/Sefar_TENARA_Specs_4T20HF_en.pdf,
http://www.tenarafabric.com/pdf/Sefar_TENARA_Specs_4T40HF_en.pdf,
<http://assets.selector.com/assets/documents/fabric-structure-systems-ltd/sefar-architectural-fabrics/sefar-technical-information.pdf> (letzter Zugriff am 30.10.2015)

[SergeFerrari14]

SergeFerrari : Ferrari Precontraint 1002 T2 backPVDF, Ferrari Precontraint 1002 Fluotop T2, Ferrari Precontraint 1002 S2, Datenblätter, 2014

[Smith96]

Smith, Joseph M. et al.: Introduction to chemical engineering thermodynamics, 1996, 5. Auflage, McGraw-Hill New York [u.a.], ISBN: 0-07-059239-X

[Steinert15]

Steinert, Roland: 3D-Simulation von Wärmebrücken - Ein Praxisbericht, Vortrag am 3.12.2015 beim ift-Expertentag Bauphysik 2015

[Tanaka/Zirkelbach16]

E. Tanaka, E.; Zirkelbach, D.: Local climate models for hygrothermal building component simulations, CESBP Central European Symposium on Building Physics / BauSIM 2016, 14.-16.9.2016, Dresden

<https://wufi.de/literatur/Zirkelbach,%20Tanaka%20-%20Local%20Climate%20Models%20for%20Hygrothermal.pdf> (letzter Zugriff am 8.1.2018)

[Tanaka17]

Tanaka, Eri; Zirkelbach, Daniel; Schöner, Tobias: Lokalklima - Modelle zur Anpassung von Referenzklimadaten auf die lokalen Verhältnisse, IBP-Mitteilung 551, 44 (2017)

<https://wufi.de/literatur/Tanaka,%20Zirkelbach,%20Sch%C3%B6ner%202017%20-%20IBP%20Mitteilung%20551.pdf> (letzter Zugriff am 8.1.2018)

[Tian11]

Tian, Di: Membrane Materials and Membrane Structures in Architecture, University of Sheffield, School of Architecture, master thesis, 2011,

<http://maad.postgrad.shef.ac.uk/maad10/files/thesis---di-tian1.pdf> (letzter Zugriff am 28.1.2016)

[TRNSYS12]

Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison: TRAnSient SYstem Simulation program (TRNSYS), Version 17.1, 2012, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/> (letzter Zugriff am 17.5.2016)

[Vajen03]

Vajen, Klaus et al.: Extended model equation for uncovered collectors, Proceedings. ISES Solar World Congress, Gothenburg (SE), 14. - 19.6.2003,

<http://solar-publikationen.umwelt-uni-kassel.de/uploads/2003%20ISES-SWC%20Vajen%20et%20al%20Extended%20Model%20Equation%20for%20Uncovered%20Collectors.pdf> (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[VBG12]

Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG) gesetzliche Unfallversicherung : Gestaltung von Sporthallen, Fachinfoblatt , www.vbg.de/SharedDocs/Medien-Center/DE/Faltblatt/Branchen/Sport/fi_sporthallen_sportvereine.pdf?__blob=publicationFile&v=3

(letzter Zugriff 14.10.2016)

[VDI 2078]

Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation), 2015, Beuth-Verlag

[VDI 3789]

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3789, Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen: Teil 2 - Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung; Teil 3 - Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich, 1994 und 2001, Beuth-Verlag

[VDI 4670-1]

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4670-1, Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen, 2016, Beuth-Verlag

[VDI 6020]

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 6020-1, Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation - Gebäudesimulation, 2001, Beuth-Verlag

[VDI-Waermeatlas13]

VDI e.V. (Hrsg.): VDI-Waermeatlas, 11., bearbeitete und erweiterte Auflage, 2013, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-19980-6 (Print), 978-3-642-19981-3 (Online), Print und eBook ISBN 978-3-642-19982-0

[Veseidag15]

VERSEIDAG-INDUTEX GmbH: duraskin[®], Datenblätter, 2015, <http://www.verseidag.de/de/duraskin/architektur/membranen> (letzter Zugriff am 11.3.2016)

[VIP13]

VIP Versorgungstechnik Ingenieur- und Planungsgesellschaft mbH, Nürnberg : Neubau Sporthalle Kapellenstraße, Fürth/Bayern – Werkplanung, interne Kommunikation

[Wacker-Ingenieure14]

Wacker Ingenieure: Neubau Sportzentrum Fürth, Deutschland - Numerische Strömungssimulation des Dachzwischenraums, 2014, interner Bericht

[wacotech15]

wacotech GmbH & Co KG: Datenblatt - TIMax[®]GL-PlusF Glasgespinst, 2015, http://wacotech.de/wacotech/wp-content/uploads/2016/01/2015_TIMaxGL_PlusF_datenblatt.pdf (letzter Zugriff am 26.4.2016)

[Wikipedia/Antoine-Gleichung14]

Antoine-Gleichung, <https://de.wikipedia.org/wiki/Antoine-Gleichung> (letzter Zugriff am 6.10.2014)

[Wikipedia/Saettigungsdampfdruck14]

Sättigungsdampfdruck, <http://de.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4ttigungsdampfdruck> (letzter Zugriff am 6.10.2014)

[Willems07]

Willems, Wolfgang M. et al.: Formeln und Tabellen Bauphysik, 2007, Vieweg Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-0303-0 (Print) 978-3-8348-9214-0 (Online)

[WTA_6-1-01/D]

Dreyer, J.; Künzel, Hartwig M. und andere: Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen, 2002, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (WTA), Pfaffenhofen

[WTA_6-2-01/D]

Bednar, Thomas: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, 2001, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA), 2002, zwischenzeitlich ersetzt durch [WTA_6-2-14/D], 2014, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (WTA), Pfaffenhofen

[WTA_E_6-2]

Künzel, Hartwig M.; Kehl, Daniel und andere: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, 2013, Entwurf, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA), Pfaffenhofen, zwischenzeitlich ersetzt durch [WTA_6-2-14/D]

[WTA_6-2-14/D]

n.a.: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, 2014, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA), Pfaffenhofen

[WTA_6-3-05/D]

Künzel, Hartwig et al.: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos, 2006, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA), Pfaffenhofen

[WTA_6-15-13/D]

n.a.: Technische Trocknung an durchfeuchteten Bauteilen, Teil 1: Grundlagen, 2013, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA), Pfaffenhofen

[WTA_E_6-16-17/D]

n.a.: Technische Trocknung an durchfeuchteten Bauteilen, Teil 2: Planung, Ausführung und Kontrolle, Entwurf, 2017, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA), Pfaffenhofen

[WUFI15]

Fraunhofer-Institut für Bauphysik: WUFI, <https://wufi.de> (letzter Zugriff am 28.4.2016)
Zum langwelligen Strahlungsaustausch: www.wufi.de/wufi/wetterdaten.html

[WUFI-Hilfetext]

Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Hilfetext zu WUFI Pro 5.3, z.B. Kapitel „Referenz / Klimadaten / Langwelliger Strahlungsaustausch“

[WUFI pro 5.3]

Fraunhofer-Institut für Bauphysik: WUFI pro, Version 5.3, <https://wufi.de> (letzter Zugriff am 28.4.2016)

[WUFI-Testreferenzjahre86]

n. a.: Wetterdaten, <https://wufi.de/de/service/downloads/> --> Reiter "Material- und Klimadaten" --> Abschnitt "Testreferenzjahre", (letzter Zugriff am 17.4.2018)

[Zhang07]

Zhang, Lingyun: Untersuchung zu mehrlagigen Membrankonstruktionen im Hinblick auf unterschiedliche Funktionen von Gebäudehüllen, Technische Universität München, Dissertation, 2007, <http://mediatum2.ub.tum.de/doc/623344/document.pdf> (letzter Zugriff am 28.1.2016)

[Zhao14]

Zhao, Lili et al.: Heat and Mass Transfer of Droplet Vacuum Freezing Process Based on Dynamic Mesh, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2014 (2014), Article ID 798040,
<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/798040> = Titel & Abstract
[downloads.hindawi.com/journals/mpe/2014/798040.pdf](http://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/798040.pdf) = Volltext
DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/798040> (alle zuletzt am 9.6.2015)

[Ziegler/heinze/ais-online15]

HACObond® - Wärmedämmstoff, Webseiten mit Produktangaben,
<https://www.ziegler.eu/produkte/hacobondr-polyestervlies-daemmstoff/>
<http://www.heinze.de/produktserie/hacobond-waermedaemmstoff/15464469/1>
<http://www.ais-online.de/firma/jh-ziegler/produktinformation/hacobond-waermedaemmstoff/15464469/1/>
<http://www.ais-online.de/media/15176210/pdf/15532489px842x595.pdf>
<http://www.heinze.de/media/15176210/pdf/15532489px842x595.pdf>
(letzter Zugriff am 30.10.2015)

[Zirkelbach09]

Zirkelbach, Daniel; Künzel, Hartwig M.; Schafaczek, Beate; Borsch-Laaks, Robert: Dampfkonvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen, 2009, „4th International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness, BUILDAIR“ und 30th AIVC Conference „Trends in High Performance Buildings and the Role of Ventilation“, 1. - 2. Oktober 2009 in Berlin
http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Konferenzbeitraege/Deutsch/Zirkelbach_2009_Dampfkonvektion-wird-berechenbar_Instation%C3%A4res%20Modell_tcm45-86530.pdf (letzter Zugriff am 26.4.2016)

[Zirkelbach13]

Zirkelbach, Daniel: Hygrothermische Simulation - Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige, Enthalten in: Fachverband der Stuckateure für Ausbau und Fassade (Hrsg.): Ausbau und Fassade, Wissen – Fakten – Erkenntnisse, 12. Internationale Baufach- und Sachverständigentagung Ausbau und Fassade ISK 2013 in Regensburg, 11.–12. Oktober 2013 – Tagungsband, 2013, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN (Print): 978-3-8167-9072-3, ISBN (E-Book): 978-3-8167-9073-0
http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/ibp/publikationen/konferenzbeitraege/ISK_2013_Zirkelbach_Druck.pdf und <https://wufi.de/literatur/Zirkelbach%20-%20Hygrothermische%20Simulation.pdf>
(letzter Zugriff am 26.4.2016)

[Zirkelbach16]

Zirkelbach, Daniel; Schöner, Tobias; Tanaka, Eri; Stöckl, Beate; Kölsch, Philipp; Marra, Eleonora;
Schiessl, Christian; Schmidt, Thomas; Hevesi-Toth, Timo; Flucke, Yasmin; Künzel, H. M.:

Kurztitel: Klimamodelle, IBP-Bericht-HTB-021/2016, FKZ: 0329663M;

<https://www.tib.eu/suchen/id/TIBKAT:872137287/> (letzter Zugriff am 8.1.2018)

Liste der Abbildungen & Bildquellen

Bild 1: Außenansicht der Sporthalle nach der Fertigstellung. Foto: HfT Stuttgart

Bild 2: Olympia-Schwimmhalle München

Bildquelle: Ausschnitt aus Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Gras-Ober](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Olympiapark_GO13.jpg

Lizenz CC BY-SA 3.0 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

Bild 3: Olympia-Schwimmhalle München

Bildquelle: Foto bei Wikipedia, Benutzer [Fritz Geller-Grimm](#)

URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Olympia_stadion_fg03.jpg

Lizenz CC BY-SA 2.5 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/legalcode>

Bild 4: Olympia-Schwimmhalle München

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Bbb-Commons](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Muc_OlympiaSchwimmhalle_2013.jpg

Lizenz CC BY-SA 3.0 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Bild 5: Kurklinik Masserberg

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Rainer Lippert](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Masserberg,_Rennsteig_Hotel.jpg?uselang=de

Lizenz: gemeinfrei, <https://de.wikipedia.org/wiki/Gemeinfreiheit?uselang=de>

Bild 6: Stage Theater Hamburg,

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [User:Petra15](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lion_King_Hamburg.jpg

Lizenz: GNU Free Documentation License,

https://commons.wikimedia.org/wiki/Commons:GNU_Free_Documentation_License_version_1.2

Bild 7: Gaudi Musical Dome, Köln

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Raimond Spekking](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Musical_Dome_Gesamtansicht_%289300-02%29.jpg

Lizenz CC BY-SA 3.0 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Bild 8: Odate Jukai Dome Park

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [kent404_japan](#)

URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oodatedome.jpg>

Lizenz: public domain, https://en.wikipedia.org/wiki/Public_domain

Bild 9: Odate Jukai Dome Park

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Ebiebi2](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Odate_Jukai_Dome1.JPG

Lizenz CC BY-SA 3.0 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Bild 10: Stage Metronom Theater im Jahr 2004

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Raimond Spekking](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neue_Mitte_Oberhausen_-_Kino_und_Metronom_Theater.jpg

Lizenz CC BY-SA 3.0 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>

Bild 11: Stage Metronom Theater im Jahr 2015

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [giggel](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oberhausen_-_Blick_von_der_Knappenhalde_auf_das_Metronom_Theater_-_panoramio.jpg

Lizenz CC BY-SA 3.0 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>

Bild 12: Andreas-Peter-und-Paul-Kirche in Maassluis, Niederlande

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Quistnix](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sydney_aan_de_Waterweg_juni_2006.jpg

Lizenz CC BY-SA 2.5 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/legalcode>

Bild 13: Andreas-Peter-und-Paul-Kirche in Maassluis, Niederlande

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Quistnix](#)

URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Petrus_en_Pauluskerk_Maassluis_juni_2007.jpg

Lizenz CC BY-SA 2.5 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/legalcode>

Bild 14: Andreas-Peter-und-Paul-Kirche in Maassluis, Niederlande

Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [Quistnix](#)

URL:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Petrus_en_Pauluskerk_Maassluis_vanaf_de_weg.jpg

Lizenz CC BY-SA 2.5 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/legalcode>

Bild 15: Faltenbalg zum Anschluss der Äußeren Membran an feste Gebäudeteile

Bild 16: Anschluss der äußeren Membran an das Lochblech mittels einer Membranfalte, von außen gesehen. Foto: HfT Stuttgart

Bild 17: Anschluss der äußeren Membran an das Lochblech mittels einer Membranfalte, von innen gesehen. Foto: HfT Stuttgart

Bild 18: Anschluss der äußeren Membran an das Lochblech mittels einer Membranfalte, von innen gesehen. Foto: HfT Stuttgart

Bild 19: Computergrafik der Sporthalle. Quelle: fab architekten, Mannheim

Bild 20: Ansicht von der Straßenseite. Foto: HfT Stuttgart

Bild 21: Seitliche Ansicht nach dem Einbau der oberen Membran. Foto: HfT Stuttgart

Bild 22: Zeichnung eines Stahlträgers. Graphik: fab architekten

Bild 23: Ansicht des Halleninnenraumes mit der Stahlträgerstruktur und der äußeren Membran. Der innere Dachaufbau fehlte zum Zeitpunkt der Aufnahme noch.
Foto: HfT Stuttgart

Bild 24: Ansicht vom Sportplatz aus nach Einbau der oberen Membran. An den Rändern des Daches sieht man das Lochblech (rote Pfeile). Foto: HfT Stuttgart

Bild 25: Schemazeichnung des Dachaufbaus
Graphik: HfT Stuttgart unter Verwendung einer Graphik von fab-Architekten

Bild 26: Detail der Trägerstruktur zur Befestigung der inneren Membran.
Foto: HfT Stuttgart

Bild 27: Bild 26: Querschnitt des Dachaufbaus mit Drahtnetz als Halterung der Wärmedämmschicht (grün). Quelle: fab architekten

Bild 28: Anschluss der Stahlträgerstruktur, der inneren Membran und der Wärmedämmung an die rückwärtige Wand. Graphik: fab architekten

Bild 29: Anschluss der Stahlträgerstruktur an die rückwärtige Wand. Foto: HfT Stuttgart

Bild 30: Anschluss der Stahlträgerstruktur, der inneren Membran und der Wärmedämmung an die seitliche Wand. Graphik: fab architekten

Bild 31: Anschluss der Stahlträgerstruktur, der inneren Membran und der Wärmedämmung an die vordere Glasfassade. Graphik: fab architekten

Bild 32: Lageplan der Sporthalle
Quelle: Ausschnitt aus Lageplan von fab architekten

Bild 33: Foto von Fürth mit Kirche und Sportplatz im Hintergrund.
Bildquelle: Foto bei Wikimedia Commons, Benutzer [September9](#), umbenannt in [ADK](#) URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuerth_aus_der_Luft.jpg
Lizenz CC BY-SA 2.5 unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/legalcode>

Bilder 34 und 35: Nord-West- und Süd-Ost-Rand des Membrandaches: Außenansicht und im Dach-Zwischenraum. Fotos: HfT Stuttgart

Bild 36: Lochblech-Abschluss am Nord-Ost-Rand des Membrandaches . Foto: HfT Stuttgart

Bilder 37 und 38: Entrauchungsöffnungen. Links mit Anschluss an die innere Membran, die Wärmedämmung war zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht eingebracht. Rechts vom Halleninnenraum aus gesehen. Fotos: HfT Stuttgart

Bild 39: Wind- bzw. luftgeschwindigkeitsabhängiger konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Bild 40: Sorptionsisotherme von Holz bei verschiedenen Temperaturen

Datenquelle: Prof. R. Keylwert und Angaben des U.S.Forest Products Laboratory, Madison 1951, übernommen aus [opw17]

Bild 41: Vergleich verschiedener Angaben zu den inneren und äußeren Feuchteübergangskoeffizienten

Bild 42: Vergleich der Werte für den Sättigungsdampfdruck, berechnet mit verschiedenen Formeln und Parametersätzen. Hier: Temperaturbereich 0 °C bis 60 °C.

Bild 43: Vergleich der Werte für den Sättigungsdampfdruck, berechnet mit verschiedenen Formeln und Parametersätzen. Hier: Temperaturbereich 60 °C bis 100 °C

Bild 44: Vergleich der Werte für den Sättigungsdampfdruck, berechnet mit verschiedenen Formeln und Parametersätzen. Hier: Temperaturbereich -30 °C bis 0 °C

Bild 45: Verdampfungsenthalpie, berechnet auf unterschiedliche Weise

Bild 46: Temperaturabhängigkeit des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten

Bild 47: Wassertropfen auf Oberflächen, Randwinkel

Bild 48: Spektraler Emissionsgrad, berechnet aus $\varepsilon = 1 - r$, der Proben in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ im Bereich von $\lambda = 1,4 \mu\text{m}$ bis $18 \mu\text{m}$.

Bildquelle: ZAE Bayern

Bild 49: Messung der wellenlängenabhängigen Transmission verschiedener transparenter Baumaterialien im Infrarot-Bereich, gemessen innerhalb des Projektes „MESG“

Bildquelle: [Manara12], S. 41

Bild 50: Spektraler Transmissionsgrad der Proben HACObond in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ von $0,4 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m}$. Bildquelle: ZAE Bayern

Bild 51: TWD-Strukturen. Graphik von HFT Stuttgart nach [Glaeser92], S. 148

Bild 52: Winkelabhängigkeit der Transmission verschiedener TWD-Strukturen

Graphik von HFT Stuttgart nach [Zhang07], S. 59 und [Glaeser92], S. 191

Bild 53. Transmission von TWD als Funktion der Schichtdicke.

Graphik von HFT Stuttgart nach [Glaeser92], S. 153, erweitert bis zu einer Dämmstoffdicke von 40 cm.

Bilder 54 und 55: Häufigkeiten der Windgeschwindigkeiten und mittlere Windgeschwindigkeiten in Passau. Daten aus [DIN 4710], S. 184, Datenbasis 1961 – 1990

Bilder 56 und 57: Gemessene Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilungen am Flughafen Nürnberg. Quelle: [Wacker-Ingenieure14]

Bilder 58 und 59: Gemessene Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverteilungen am Flughafen Nürnberg. Quelle: [Wacker-Ingenieure14]

Bild 60: Regionen für die Testreferenzjahre in Deutschland.
Quelle: [DWD-TRY11]

Bild 61: Jahressummen der Solarstrahlung (Globalstrahlung) auf die Horizontale. Quelle: [PVGIS08]

Bild 62: Jahressummen der Solarstrahlung (Globalstrahlung) auf die Horizontale.
Quelle: [DWD16]

Bild 63: Mittlere Tagestemperatur im Januar. Langjähriger Mittelwert (1995 – 2003)
Quelle: Ausschnitt aus <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/temper/images/01/tavg01.png>
© PVGIS European Communities, 2001-2008, siehe [PVGIS08] und [Huld06]

Bild 64: Mittlere Tagestemperatur im Juli. Langjähriger Mittelwert (1995 – 2003)
Quelle: Ausschnitt aus <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/temper/images/07/tavg07.png>
© PVGIS European Communities, 2001-2008, siehe [PVGIS08] und [Huld06]

Bilder 65: Feuchtereferenzjahr-Wetterdaten für Würzburg, Lufttemperatur
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bilder 66: Feuchtereferenzjahr-Wetterdaten für Würzburg, relative Feuchte
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bilder 67: Feuchtereferenzjahr-Wetterdaten für Würzburg, Schlagregenbelastung
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 68: Lochblech. Foto: HfT Stuttgart

Bild 69: Ausschnitt aus Lageplan der Sporthalle
Quelle: fab architekten

Bild 70: Sinusverläufe der Temperatur und Luftfeuchte des Innenraumklimas mit den in WUFI und [WTA-6-2-01/D] vorgegebenen Parametern

Bild 71: Abhängigkeit des Innenklimas vom Außenklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026]

Bild 71: Feuchteüberschuss im Raum nach [DIN EN ISO 13788]

Bild 72: Innenraumklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026] für normale Feuchtelast

Bild 73: Innenraumklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026] für hohe Feuchtelast

Bild 74: Abhängigkeit des Innenklimas vom Außenklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026], jedoch ohne obere Begrenzung der Raumluftfeuchte

- Bild 75: Innenraumklima nach [WTA-6-2-14/D] und [DIN EN 15026] für normale Feuchtelast, jedoch ohne obere Bergrenzung der Raumluftfeuchte
- Bild 76: Feuchteüberschuss im Raum nach [DIN EN ISO 13788]
- Bild 77: Innenraumklima nach [DIN EN ISO 13788]
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 78: Feuchteabgabe von Personen, je nach körperlicher Betätigung und Lufttemperatur
- Bild 79: Für das Jahr 1990 in Würzburg, normale Feuchtelast (DIN EN 15026) und mittlere Belegungsdichte (Berechnung aus Lüftung etc.).
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 80: Für das Jahr 1990 in Würzburg, hohe Feuchtelast (DIN EN 15026) und hohe Belegungsdichte (Berechnung aus Lüftung etc.).
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 81: Für das Jahr 1990 in Würzburg, hohe Feuchtelast (DIN EN 15026) und hohe Belegungsdichte (Berechnung aus Lüftung etc.).
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 82: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte und hohe Feuchtelast
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 83: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte und hohe Feuchtelast
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 84: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte und hohe Feuchtelast
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 85: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte mit 1,5-fachem Volumenstrom pro Person und hohe Feuchtelast.
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 86: Für das Jahr 2013 in Fürth, hohe Belegungsdichte mit 1,5-fachem Volumenstrom pro Person und hohe Feuchtelast.
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bild 87: Aufbau des Membrandaches
Graphik: HfT Stuttgart unter Verwendung einer Graphik von fab-Architekten
- Bilder 88 und 89: Wetterdaten und Membrantemperaturen, von WUFI berechnet, sowie mit eigenem Programm, aber ohne Phasenwechsel bei 0 °C
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3
- Bilder 90 bis 92: Wetterdaten und Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel und mit eigenem VBA-Programm, 9. Juli bis 13. Juli
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 93: Wetterdaten und Membrantemperaturen, 24. August bis 6. September
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 94: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, 24. August bis 6. September
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 95: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, 24. August bis 6. September
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bilder 96 bis 98: Wetterdaten und Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel und mit eigenem VBA-Programm, 8. September bis 12. September
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 99 : Wetterdaten, 16. September bis 29. September
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 100: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, 16. September bis 29. September
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 101: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, 16. September bis 29. September
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bilder 102 bis 104: Wetterdaten und Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel und mit eigenem VBA-Programm, 30. Oktober bis 3. November
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 105 Wetterdaten, 22. Dezember bis 4. Januar
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 106: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, 22. Dezember bis 4. Januar
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 107: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, 22. Dezember bis 4. Januar
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 108: Wetterdaten, ganzes Jahr
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 109: Feuchteergebnisse, berechnet mit WUFI und Excel, ganzes Jahr
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 110: Feuchteergebnisse, berechnet mit eigenem VBA-Programm, ganzes Jahr
Datenquelle für verwendete Wetterdaten: WUFI pro 5.3

Bild 111: Definition der Winkel für die Himmelsrichtungen in der deutschen Normung

Alle weiteren Bilder ohne Quellenangabe wurden im Verlaufe der Projektbearbeitung an der Hochschule für Technik Stuttgart erstellt.

Anhang A

Jahresverlauf

Nummerierung der Tage im Jahr

Für die Verarbeitung von Wetterdaten und für Simulationen werden teilweise die Nummern der einzelnen Tage im Jahresverlauf benötigt.

Eine Tabelle mit dem jeweiligen Datum und der Nummer des Tages im Jahr wird untenstehend wiedergegeben.

Die Tabelle gilt für normale Jahre, also nicht für Schaltjahre.

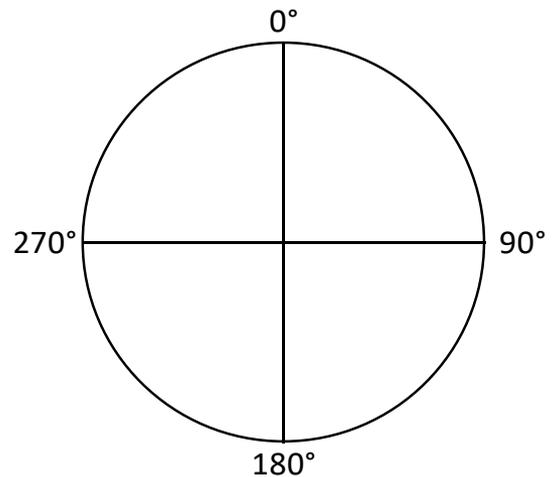
Januar			Februar			März			April			Mai			Juni			Juli			August			September			Oktober			November			Dezember		
Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat	Tag seit 1. Januar	Tag im Monat	Monat			
1	1	1	32	1	2	60	1	3	91	1	4	121	1	5	152	1	6	182	1	7	213	1	8	244	1	9	274	1	10	305	1	11	335	1	12
2	2	1	33	2	2	61	2	3	92	2	4	122	2	5	153	2	6	183	2	7	214	2	8	245	2	9	275	2	10	306	2	11	336	2	12
3	3	1	34	3	2	62	3	3	93	3	4	123	3	5	154	3	6	184	3	7	215	3	8	246	3	9	276	3	10	307	3	11	337	3	12
4	4	1	35	4	2	63	4	3	94	4	4	124	4	5	155	4	6	185	4	7	216	4	8	247	4	9	277	4	10	308	4	11	338	4	12
5	5	1	36	5	2	64	5	3	95	5	4	125	5	5	156	5	6	186	5	7	217	5	8	248	5	9	278	5	10	309	5	11	339	5	12
6	6	1	37	6	2	65	6	3	96	6	4	126	6	5	157	6	6	187	6	7	218	6	8	249	6	9	279	6	10	310	6	11	340	6	12
7	7	1	38	7	2	66	7	3	97	7	4	127	7	5	158	7	6	188	7	7	219	7	8	250	7	9	280	7	10	311	7	11	341	7	12
8	8	1	39	8	2	67	8	3	98	8	4	128	8	5	159	8	6	189	8	7	220	8	8	251	8	9	281	8	10	312	8	11	342	8	12
9	9	1	40	9	2	68	9	3	99	9	4	129	9	5	160	9	6	190	9	7	221	9	8	252	9	9	282	9	10	313	9	11	343	9	12
10	10	1	41	10	2	69	10	3	100	10	4	130	10	5	161	10	6	191	10	7	222	10	8	253	10	9	283	10	10	314	10	11	344	10	12
11	11	1	42	11	2	70	11	3	101	11	4	131	11	5	162	11	6	192	11	7	223	11	8	254	11	9	284	11	10	315	11	11	345	11	12
12	12	1	43	12	2	71	12	3	102	12	4	132	12	5	163	12	6	193	12	7	224	12	8	255	12	9	285	12	10	316	12	11	346	12	12
13	13	1	44	13	2	72	13	3	103	13	4	133	13	5	164	13	6	194	13	7	225	13	8	256	13	9	286	13	10	317	13	11	347	13	12
14	14	1	45	14	2	73	14	3	104	14	4	134	14	5	165	14	6	195	14	7	226	14	8	257	14	9	287	14	10	318	14	11	348	14	12
15	15	1	46	15	2	74	15	3	105	15	4	135	15	5	166	15	6	196	15	7	227	15	8	258	15	9	288	15	10	319	15	11	349	15	12
16	16	1	47	16	2	75	16	3	106	16	4	136	16	5	167	16	6	197	16	7	228	16	8	259	16	9	289	16	10	320	16	11	350	16	12
17	17	1	48	17	2	76	17	3	107	17	4	137	17	5	168	17	6	198	17	7	229	17	8	260	17	9	290	17	10	321	17	11	351	17	12
18	18	1	49	18	2	77	18	3	108	18	4	138	18	5	169	18	6	199	18	7	230	18	8	261	18	9	291	18	10	322	18	11	352	18	12
19	19	1	50	19	2	78	19	3	109	19	4	139	19	5	170	19	6	200	19	7	231	19	8	262	19	9	292	19	10	323	19	11	353	19	12
20	20	1	51	20	2	79	20	3	110	20	4	140	20	5	171	20	6	201	20	7	232	20	8	263	20	9	293	20	10	324	20	11	354	20	12
21	21	1	52	21	2	80	21	3	111	21	4	141	21	5	172	21	6	202	21	7	233	21	8	264	21	9	294	21	10	325	21	11	355	21	12
22	22	1	53	22	2	81	22	3	112	22	4	142	22	5	173	22	6	203	22	7	234	22	8	265	22	9	295	22	10	326	22	11	356	22	12
23	23	1	54	23	2	82	23	3	113	23	4	143	23	5	174	23	6	204	23	7	235	23	8	266	23	9	296	23	10	327	23	11	357	23	12
24	24	1	55	24	2	83	24	3	114	24	4	144	24	5	175	24	6	205	24	7	236	24	8	267	24	9	297	24	10	328	24	11	358	24	12
25	25	1	56	25	2	84	25	3	115	25	4	145	25	5	176	25	6	206	25	7	237	25	8	268	25	9	298	25	10	329	25	11	359	25	12
26	26	1	57	26	2	85	26	3	116	26	4	146	26	5	177	26	6	207	26	7	238	26	8	269	26	9	299	26	10	330	26	11	360	26	12
27	27	1	58	27	2	86	27	3	117	27	4	147	27	5	178	27	6	208	27	7	239	27	8	270	27	9	300	27	10	331	27	11	361	27	12
28	28	1	59	28	2	87	28	3	118	28	4	148	28	5	179	28	6	209	28	7	240	28	8	271	28	9	301	28	10	332	28	11	362	28	12
29	29	1				88	29	3	119	29	4	149	29	5	180	29	6	210	29	7	241	29	8	272	29	9	302	29	10	333	29	11	363	29	12
30	30	1				89	30	3	120	30	4	150	30	5	181	30	6	211	30	7	242	30	8	273	30	9	303	30	10	334	30	11	364	30	12
31	31	1				90	31	3				151	31	5				212	31	7	243	31	8				304	31	10				365	31	12

Tabelle: Nummerierung der Tage im Jahr

Winkel der Himmelsrichtungen

In der deutschen Normung, z.B [VDI 6020], S. 17/18 sind die Azimuth-Winkel der Himmelsrichtungen folgendermaßen festgelegt:

0 °	Norden
90 °	Osten
180 °	Süden
270 °	Westen



Der Stundenwinkel jedoch wird vom Meridian aus zum Nachmittag positiv und zum Vormittag negativ gezählt. [VDI 6020-1], S. 17

Bild 111: Definition der Winkel für die Himmelsrichtungen in der deutschen Normung

In TRNSYS, vermutlich in USA allgemein, ist der Azimuth anders definiert:

Für die Nordhalbkugel	
0 °	Süden
90 °	Westen
180 °	Norden
270 °	Osten

Für die Südhalbkugel	
0 °	Norden
90 °	Westen
180 °	Süden
270 °	Osten

Quelle: TRNSYS 17-Handbuch, Teil 5 „Multizone Building ...“, S. 14

Anhang B

Physikalische Konstanten

Alle Werte entnommen aus [Gerthsen15]

Angaben nach CODATA, vgl. <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>)

Universelle Gaskonstante

$$R = 8,31447 \pm 2 \frac{J}{K mol}$$

Die universelle Gaskonstante ist das Produkt aus Avogadro-Konstante und Boltzmann-Konstante

$$R = k_B N_A$$

Avogadro-Konstante

$$N_A = (6,0221420 \pm 5) \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$$

Boltzmann-Konstante

$$k_B = (1,380650 \pm 2) \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

Stefan-Boltzmann-Konstante

$$\sigma = \frac{2 \pi^5 k_B^4}{15 c^2 h^3}$$

mit

- σ = Stefan-Boltzmann-Konstante
- k_B = Boltzmann-Konstante
- c = Lichtgeschwindigkeit in Vakuum
- h = Plancksches Wirkungsquantum

Stefan-Boltzmann-Konstante aus [Gerthsen15]

Angaben nach CODATA, vgl. <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>)

$$\sigma = (5,67040 \pm 4) \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$