

**Abschätzung der Feuchtezusläge
auf die Wärmeleitfähigkeit von
Umkehrdachdämmungen auf Basis
von Objektuntersuchungen und
hygrothermischen Berechnungen**

T 3304

T 3304

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9199-7

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



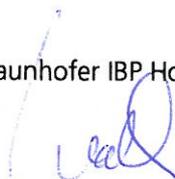
Forschungsbericht
ZP 52-5-5.99-1349/10 (DIBt)

**Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) Holzkirchen
und
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. (FIW) München**

Abschätzung der Feuchtezuschläge auf die
Wärmeleitfähigkeit von Umkehrdachdämmungen
auf Basis von Objektuntersuchungen und
hygrothermischen Berechnungen

Holzkirchen, 22. November 2013

Fraunhofer IBP Holzkirchen


Dipl.-Ing. Daniel Zirkelbach


Dipl.-Ing. Beate Stöckl

FIW München


Dipl.-Ing. Wolfgang Albrecht

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Analyse des Status quo	4
2.1	Untersuchungen und Literatur zu Umkehrdachdämmungen	4
2.2	Zusammenstellung der bisher verwendeten Zuschläge	13
3	Objekt- und Freilanduntersuchungen	17
3.1	Freilanduntersuchungen des IBP	17
3.2	Objektuntersuchungen des FIW München	23
3.3	Nachberechnung der Objekt- und Freilanduntersuchungen	26
4	Feuchte- und wärmetechnische Materialkennwerte von XPS-Dämmstoffen	38
4.1	Wasserdampfdiffusionswiderstand	38
4.2	Wärmeleitfähigkeit und Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt	41
5	Definition neuer Wärmeleitfähigkeits-Zuschläge auf Basis langfristiger hygrothermischer Simulationen	44
5.1	Simulation des langfristigen hygrothermischen Verhaltens typischer Umkehrdachkonstruktionen	44
5.2	Vorschlag für pauschale Zuschlagswerte und Randbedingungen für systemspezifische Simulationen	46
6	Zusammenfassung	48
7	Literatur	51
8	Bilder	54

1 Einleitung

Umkehrdachdämmungen sind gegen einwirkende Witterung nicht durch zusätzliche Abdichtungen geschützt. Die für die Beschwerung der Dämmung erforderlichen Deckschichten aus z.B. Gehwegplatten, Kies oder Pflanzsubstrat sorgen zusätzlich für eine Speicherung von Niederschlagsfeuchte und gegebenenfalls nur kurze trockenere Perioden oberhalb des Dämmmaterials. Infolge dieser Einbausituation können auch stärker diffusionshemmende Dämmplatten durch den im Temperaturgradienten unter der Dämmung vorhandenen Feuchtefilm langfristig eine Feuchteakkumulation aufweisen, die insbesondere dann zu berücksichtigen ist, wenn die Deckschichten nicht austrocknen. Dieser Tatsache wird bei der Zulassung bereits seit einigen Jahren über einen Zuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit der Materialien Rechnung getragen. Mit Hilfe des Zuschlags soll die sich im Mittel der Einbaudauer ergebende Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden.

Die Zuschläge werden bisher basierend auf Freilandversuchen pauschal und unabhängig von den genauen Materialeigenschaften der Dämmstoffe festgelegt. Vor dem Hintergrund immer niedrigerer Wärmeleitfähigkeiten und einer Eingruppierung der Materialien in mW-Abstufungen erscheint diese Einteilung nun als zu grob. Neuere und langfristige Untersuchungen an den insgesamt sehr gut bewährten Systemen sowie die Beurteilung des Langzeitverhaltens mit Hilfe hygrothermischer Simulationen sollen jetzt eine genauere Quantifizierung und Differenzierung der Zuschlagswerte in Abhängigkeit der Materialkennwerte (nicht nur des Materialtyps) sowie der genauen Einbausituation des Dämmstoffs (Schichtenaufbau, Trennlage etc.) ermöglichen.

2 Analyse des Status quo

2.1 Untersuchungen und Literatur zu Umkehrdachdämmungen

Im Gegensatz zum konventionellen Flachdach wird beim Umkehrdach die Dämmschicht auf die Dachhaut aufgelegt und anschließend mit Kies oder anderen Aufbauschichten (z.B. Gehwegplatten, Ortbeton, Begrünung) beschwert und fixiert. Umkehrdächer kamen erstmals 1940 in den USA zur Anwendung. Seit etwa 1965 werden sie auch in Deutschland ausgeführt. Vorteile dieses „umgekehrten“ Aufbaus sind die niedrigen Kosten und der Schutz der häufig kritischen Dachabdichtung vor mechanischen Einwirkungen, UV-Strahlung und großen Temperaturschwankungen. Nachteilig sind zusätzliche Wärmeverluste durch das Unterströmen der Dämmplatten bei Regen sowie die starke Feuchtebelastung der Dämmung.

Da die Dämmschicht unmittelbar der Witterung ausgesetzt ist, müssen die eingesetzten Materialien feuchte- und frostbeständig sein und sollten auch langfristig keine größeren Feuchtemengen aufnehmen. Aufgrund dieser Anforderungen kommt hier meist extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS) zum Einsatz. Dieser weist aufgrund seines geschlossenen Zellgefüges und der noch diffusionsdichteren Schäumhäute nur eine sehr geringe Wasseraufnahmefähigkeit auf. Während flüssiges Wasser gar nicht absorbiert wird, ist es jedoch möglich, dass Feuchte durch Diffusionsvorgänge in das Material eindringt.

Die Probleme der Unterströmung und der Feuchtezunahme der Dämmplatten sowie deren energetische Auswirkungen sind bereits seit den 70er Jahren Gegenstand der Forschung. Im Folgenden wird versucht einen Überblick über die Forschungsarbeiten und deren Ergebnisse zu geben, der mit den für die bisherige Zuschlagsdefinition in Deutschland maßgeblichen deutschen Publikationen abschließt.

Problem der Unterströmung der Dämmplatten

Bei Umkehrdächern kann das Niederschlagswasser durch die Fugen der Dämmschicht bis auf die Dachabdichtung gelangen und anschließend unter der Dämmung abfließen. Während des Abfließens im warmen Bereich unter der Dämmung erwärmt sich das Wasser, was zu entsprechenden Wärmeverlusten aus der Konstruktion führt.

Bereits in den Jahren 1974 und 1975 wurden in der Freiland-Versuchsstelle des Fraunhofer IBP in Holzkirchen Untersuchungen an Umkehrdächern durchgeführt, um die Wärme- und Feuchteverhältnisse im Vergleich zu herkömmlichen Flachdächern zu erfassen. In [1] werden sowohl diese Ergebnisse als auch Untersuchungen anderer Institute ausgewertet, so dass dieser Bericht den damaligen Stand der Kenntnis über den Wärmeschutz und die Feuchteverhältnisse bei Umkehrdächern darstellt. Dabei wurde festgestellt, dass die Wärmeverluste durch das Unterströmen der Dämmplatten hauptsächlich von der Regenintensität, der Temperatur des Regenwassers sowie von der Wärmedämmung der Unterkonstruktion abhängen, die Dicke

der Dämmschicht jedoch keine große Rolle spielt. Da einige Parameter wie z.B. die Temperatur des Regenwassers nicht gemessen wurden, konnte der Wärmeverlust nur ohne diese Einflussfaktoren in Abhängigkeit von der Dicke der unter der Dachabdichtung liegenden Materialschichten abgeschätzt werden. Erschwerend kam eine große Streuung der ausgewerteten Messdaten hinzu. Bei einer angenommenen mittleren Niederschlagsmenge von 2 mm/d in Deutschland wurde für den ungünstigsten Fall von nur 5 % der Gesamtdämmung unterhalb der Dachabdichtung ein Zuschlag auf den Wärmedurchgangskoeffizient (damals Δk) von 0,08 W/m²K ermittelt.

Im Zuge einer umfangreichen Studie der Chalmers University of Technology in Göteborg [2] wurden Ergebnisse von Feldmessungen und Laboruntersuchungen zum wärme- und feuchteschutztechnischen Verhalten des Umkehrdaches ausgewertet. Dabei wurde festgestellt, dass auch der Wind einen signifikanten Einfluss auf die Wärmeströme und somit auf den Δk -Wert hat, abhängig von der Windgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Luftströmung durch die Dämmplatten, beziehungsweise durch die Spalten zwischen den einzelnen Dämmplatten. Demnach können die Wärmeverluste durch Wind um die Hälfte reduziert werden, wenn einlagig verlegte Platten mit durchgängigen Spalt ersetzt werden durch zweilagig verlegte Platten mit versetztem Spalt. Bei der Verlegung der Dämmplatten ohne Stufenfalz wird in der Studie für Schweden ein Zuschlagswert von $\Delta k = 0,05$ W/m²K bis 0,07 W/m²K für ein Umkehrdach vorgeschlagen. Wird die Wärmedämmung zweilagig mit Versatz verlegt, kann Δk auf 0,04 W/m²K bis 0,06 W/m²K verringert werden. Wie groß der Anteil der windbedingten Wärmeverluste am gesamten Zuschlag ist, wird nicht explizit angegeben – aus der genannten Reduktion des Zuschlags um 0,01 W/m²K (50 % Reduktion der windbedingten Wärmeverluste, aber parallel auch geringer Verluste durch ablaufendes Regenwasser) kann jedoch abgeleitet werden, dass der Anteil maximal 0,02 W/m²K im Jahresmittel betragen könnte.

Bezug nehmend auf den in [1] festgelegten Zuschlag von $\Delta k = 0,08$ W/m²K wird in [3] dieser Zuschlag überprüft, da sich in der Zwischenzeit vor allem die Dämmdicken von zuvor etwa 5 bis 6 cm auf dann bereits etwa 10 cm geändert haben. Ein weiterer Grund waren die bei der ersten Untersuchung nicht erfassten Niederschlagstemperaturen und -mengen, deren Einfluss doch signifikant zu sein schien. Im Winter 1982/83 erfolgte daher die Ermittlung der Δk -Zuschläge in einem neuen Versuch unter geänderter Messmethode: Anstelle der Oberflächen- bzw. Schichtgrenztemperaturen wurden nun die Niederschlagstemperatur sowie die Menge und die Temperatur des vom Dach ablaufenden Wassers gemessen. Damit wurden auch die Unsicherheiten im Hinblick auf die Auswirkungen des Wärmespeichervermögens der Dachunterkonstruktionen weitgehend eliminiert und die Verlust-Wärmemenge durch Unterströmen der Dämmplatten unmittelbar bestimmt. Für Deutschland ergaben sich so Werte zwischen 0,04 und 0,06 W/m²K. Vereinfachend wurde daraus ein einheitlicher mittlerer Korrekturzuschlag für die Unterströmung von $\Delta k = 0,05$ W/m²K vorgeschlagen. Dieser Zuschlag wurde allerdings nicht differenziert nach mehrlagiger Verlegung der Dämmung (in Deutschland bis dahin nicht zugelassen), nach einer Verteilung der Dämmung ober- und unterhalb der Abdichtung (nicht untersucht) oder den lokal unterschiedlichen

Niederschlagsmengen. Dieser Wert wurde in der Folge für die Zulassung von begrünten Umkehrdächern in Deutschland durch das DIBt herangezogen.

In den zeitlich parallel stattfindenden Untersuchungen in [4] wird der Δk -Wert in Abhängigkeit von der sich auf dem Umkehrdach befindlichen Schüttung sowie von der Anordnung der Dämmung über und unter der Abdichtungsebene angegeben. Demnach beträgt $\Delta k = 0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ bzw. $0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$, wenn bei einem Kiesdach oder einem Dach mit Betonplatten bis zu 40 % bzw. 40 – 60 % der Dämmung unterhalb der Dachhaut angeordnet sind. Je mehr Dämmung sich unterhalb der Dachhaut befindet, desto geringer sind die Wärmeverluste. Sind mehr als 60 % der Dämmung unter der Dachhaut werden die Wärmeverluste so gering, dass sie bei einer Bemessung nicht mehr berücksichtigt werden müssen. Die Unterströmung darf ebenfalls vernachlässigt werden, wenn dichte Deckschichten eingesetzt werden, bei denen der Niederschlag im Wesentlichen an der Oberfläche abläuft – hierzu werden vom Autor auch intensive Dachbegrünungen gezählt, bei denen vermutlich aufgrund der großen Schichtdicke von einem vollständigen Niederschlagsrückhalt ausgegangen wird.

Bei einem Vergleich mehrerer Untersuchungen bezüglich des Δk -Wertes an Umkehrdächern in Schweden, Norwegen und Deutschland in [5] wurde festgestellt, dass die Streuung der Messergebnisse ziemlich groß ist. Den Grund dafür sieht der Autor in den Unsicherheiten bei den Messmethoden sowie bei den über das Dach ungleichmäßig verteilten Wärmeverlusten. Diese Fehlerquelle wird laut [5] nur bei der Untersuchung des IBP [3] größtenteils ausgeschlossen, indem der Temperaturanstieg des unter der Wärmedämmung abfließenden Regenwassers gemessen wurde. Auf Basis der schwedischen Untersuchungen in [2] leitet der Autor den Zuschlag mit einem einfachen Faktor aus den Niederschlagsmengen ab: $\Delta k = 0,04 * i_d$, wobei i_d den durchschnittlichen Niederschlag pro Tag während der Heizzeit darstellt. Dieser kann ungefähr angenommen werden als $i_d = 0,0025 * \text{jährlicher Niederschlag}$. Die Ergebnisse stimmen dabei recht gut mit den Messungen aus [3] überein, welche seiner Einschätzung nach aufgrund der Messmethode am realistischsten erscheinen. Allerdings merkt der Autor an, dass diese Gleichung nur die Wärmeverluste aus den Niederschlägen berücksichtigt, und Δk wegen der Verluste durch Konvektion in den Fugen nicht kleiner als $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt werden sollte. Weitere Untersuchungen zur Quantifizierung des Windeinflusses waren allerdings nicht verfügbar. Eine Unterscheidung bezüglich der Dämmung der Unterkonstruktion wie in [4] wurde auch in dieser Betrachtung nicht vorgenommen.

Der Autor von [6] analysiert die verschiedenen europäischen Untersuchungen und stellt fest, dass der Einfluss des Unterströmens auf den Wärmeschutz der Dachkonstruktion unterschiedlich berücksichtigt wird. Meistens wird ein Zuschlag in Form eines Δk -Wertes benutzt, so auch in Deutschland. Hierbei wird auf die Ergebnisse aus [1] und [3] verwiesen. Der Autor stellt sich jedoch die Frage, ob ein Mittelwert der täglichen Niederschlagsintensität für Deutschland den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen hinreichend gerecht wird oder ob es nicht realistischer wäre, die Niederschlagsmengen regional zu ordnen, da die Streuung der für verschiedene Orte in Deutschland ermittelten Δk -Zuschläge sehr groß ist. In Frankreich wird der Zuschlag z.B. für

die Departements spezifisch festgelegt. Einen konkreten Vorschlag zur Umsetzung in Deutschland stellt der Autor allerdings nicht vor.

In [7] werden die Zusatzverluste infolge Unterströmung der Dämmplatten auf der Basis einer Energiebilanz bestimmt, welche den Wärmeeintritt, den Wärmeentzug, den Wärmeaustritt sowie den Wasserwärme-Abfluss berücksichtigt. Zudem wird nach der Art des Oberflächenbelags differenziert, welcher durch einen Reduktionsfaktor erfasst wird. Es wird unterschieden zwischen Kies, Humus oder Fertigplatten in Splitt, Fertigplatten in Sand und Ort betonplatten. Die Ergebnisse sind in Form von Diagrammen für Leicht- bzw. Massivdächer aufbereitet, mit Hilfe derer der Zuschlagswert Δk ermittelt werden kann. Die Werte für den Zuschlag liegen zwischen maximal $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ an sehr kalten und niederschlagsreichen Standorten der Schweiz bis zu nur $0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$ in den wärmeren und trockeneren Regionen.

Die Untersuchungen in [8] haben gezeigt, dass die zusätzlichen Wärmeverluste beim Umkehrdach durch zwei Grenzbetrachtungen abgeschätzt werden können. Für kurze, heftige Niederschläge kann dieser nur unter Berücksichtigung der Wassererwärmung beschrieben werden, für den Standort Hamburg ergab sich ein Δk von $0,079 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei lang andauernden Niederschlägen werden neben der Dachgröße und der Niederschlagsituation auch die Art der Dachentwässerung berücksichtigt. Unter diesen Bedingungen schwankt Δk für Hamburg zwischen $0,061 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $0,073 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die Erstellung eines möglichst realitätsnahen Berechnungsmodells, welches systematisch verschiedene Einflussparameter auf die zusätzlichen Wärmeverluste eines Umkehrdaches während der Unterströmung der Dämmplatten variiert, war die Zielsetzung der Untersuchungen nach [9]. Als wesentliche Einflussparameter stellen sich die Niederschlagsmengen, der Dachaufbau und die Bauteilschichtung über der Dämmung heraus. Für seinen Bemessungsvorschlag definierte der Autor zum einen Niederschlagsklassen (Niederschlagsmenge in der Heizperiode) für Deutschland und zum anderen drei verschiedene Dachkategorien: Kategorie I ist für Dächer mit nur einer homogenen Deckschicht (z.B. Kies) bis 7 cm Dicke; Kategorie II sind mehrlagige Deckschichten von 7 bis 15 cm und Kategorie III deckt dann mehrlagige Deckschichten ab 15 cm ab. Je nach Niederschlagsmenge werden dann für die verschiedenen Dachkategorien Δk -Werte angegeben. Für ein bekiestetes Umkehrdach (Kategorie I) wird beispielsweise bei einer Niederschlagsmenge von 450 mm - 600 mm während der Heizperiode ein Δk -Wert von $0,069 \text{ W/m}^2\text{K}$ vorgeschlagen, für die Kategorien II und III wird der Δk -Wert geringer angesetzt, da hier mehr Niederschlagswasser von der Deckschicht zurückgehalten und gespeichert wird.

Der in [7] beschriebene Vorschlag zur Berechnung des Δk -Zuschlags anhand eines energetischen Gleichgewichtsmodells wird vom Autor in [11] aus Gründen der Praktikabilität vereinfacht. Beispielsweise werden für die Niederschläge nur noch zwei mittlere Regenintensitäten veranschlagt. Die Ergebnisse der Zuschlagsberechnung sind vom Autor in sogenannten Resultattabellen in Abhängigkeit von den sensitiven Einflüssen und den Rahmenbedingungen zusammengestellt worden. Die Bandbreiten liegen dabei

für geringen Niederschlag zwischen 0,04 für Ortbeton und 0,082 W/m²K für Kies und bei normalem Niederschlag zwischen 0,06 und 0,123 W/m²K.

[12] stellt 1997 Untersuchungen an verschiedenen Umkehrdächern im Vergleich zu einem konventionellem Flachdach am Standort Holzkirchen dar. Dabei werden sowohl die Wärmeströme erfasst als auch parallel dazu die Δk -Werte direkt aus den niederschlagsbedingten Wärmeverlusten (Enthalpieentzug) bezogen auf die Lufttemperaturdifferenzen zwischen Raum und Umgebung abgeleitet. Somit ergibt sich der niederschlagsbedingte Zuschlag auf den Wärmedurchgangskoeffizienten Δk für Flachdächer mit außenliegender Wärmedämmung durch folgende Beziehung in Abhängigkeit vom mittleren Niederschlag während der Heizperiode R [mm/d]: $\Delta k = 0,03 * R$

Die mittlere Niederschlagsmenge für Deutschland wird wie in [1] und [9] für eine Heizperiode von neun Monaten (September bis Mai) mit 2 mm/d angegeben. Aufgrund der bereits besser wärmedämmten Gebäude wird in [12] von einer Heizperiode von fünf Monaten (November bis März) ausgegangen, so dass sich für Neubauten mit entsprechender Dämmung in Deutschland die mittlere Niederschlagsmenge auf 1,7 mm/d reduziert. Eingesetzt in die oben genannte Gleichung resultiert daraus ein Δk -Wert von 0,05 W/m²K. Eine regionale Differenzierung des Δk -Wertes, bezogen auf standortabhängige Niederschlagsmengen scheint den Autoren von [12] nicht sinnvoll, da der Wärmeverlust durch das Dach bei den meisten Gebäuden nur einen kleinen Teil der Gesamtenergiebilanz ausmacht. Zudem ist die niederschlagsbedingte Wärmeabfuhr bei Umkehrdächern nur dann möglich, wenn die Dachoberflächentemperatur über 0 °C liegt, das bedeutet, dass insbesondere in kalten, schneereichen Wintern der niederschlagsbedingte Wärmeentzug zu Zeiten stattfindet, in denen er energetisch keine große Rolle spielt, beispielsweise bei der Schneeschmelze aufgrund starker Sonnenstrahlung.

Die Autoren in [13] schließen an die Ergebnisse von [12] an und ermitteln die Dauer der Heizperiode sowie die durchschnittliche Niederschlagsmenge für unterschiedliche Regionen in Europa. Dabei wurden nur die Niederschlagsmengen der Monate während der Heizperiode berücksichtigt, bei denen die mittlere Außenlufttemperatur < 15 °C war. Somit beträgt die mittlere Regenmenge zwischen 0,8 und 5 mm/d. Es ergeben sich in Europa also teilweise rechnerische Wärmeverluste während der Heizperiode, die nicht mehr auf sinnvolle Weise durch eine Erhöhung der Dämmschichtdicke kompensiert werden können. Aus diesem Grund wird in [13] die Verwendung einer wasserableitenden Trennlage unterhalb der Kiesschicht empfohlen, wodurch der Regen vermehrt oberhalb dieser Trennlage abfließen kann und somit der ΔU -Wert auf 0 W/m²K reduziert werden darf.

In der DIN EN ISO 6946 [14] ist im Anhang D.4 ein Korrekturverfahren für Umkehrdächer angegeben. Dieses sieht die Berücksichtigung eines ΔU_r -Zuschlags vor, welcher wie folgt berechnet werden kann:

$$\Delta U_r = p * f * x * (R_1 / R_T)^2$$

Dabei ist p [mm/d] die durchschnittliche Niederschlagsmenge in der Heizperiode und f [-] der Entwässerungsfaktor als Anteil des Niederschlagswassers, welches

tatsächlich auf der Dachabdichtung abläuft. Der Faktor $x [(W \cdot d) / (m^2 \cdot K \cdot mm)]$ steht für den gestiegenen Wärmeverlust durch auf der Dachabdichtung ablaufendes Niederschlagswasser, $R_i [m^2 \cdot K/W]$ ist der Wärmedurchlasswiderstand der XPS-Dämmschicht und $R_T [m^2 \cdot K/W]$ der Wärmedurchlasswiderstand des gesamten Dachaufbaus ohne ΔU_r -Zuschlag. Für eine einlagige Dämmschicht mit Stumpfstößen und offener Abdeckung (z.B. Kiesschüttung), die in Deutschland bis dahin die Regel darstellte, ist $f \cdot x$ mit 0,04 angegeben. Niedrigere Werte für $f \cdot x$ können für Dachkonstruktionen, durch die eine geringere Entwässerung durch die Dämmung erzielt wird, bei entsprechendem Nachweis verwendet werden. Beispiele dafür sind andere Fugenarten oder andere Dachaufbauarten. Konkrete Werte für diese Aufbauarten fehlen jedoch und dürften anhand der verwendeten Größen auch nur schwer individuell ermittelbar sein. Entsprechend der nationalen Fußnote in D4 der DIN EN 6946 sowie DIN 4108-2 kommt das Verfahren in Deutschland zudem gar nicht zur Anwendung.

Zusammenfassung U-Wert-Zuschlag

Die verschiedenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Unterströmung der Dämmplatten mit Niederschlagswasser in der kalten Jahreszeit mit durchaus nennenswerten Wärmeverlusten verbunden sein kann. Die vorgeschlagene Bandbreite der U-Wert-Zuschläge reicht dabei von etwa 0,02 bis 0,10 W/m^2K wobei bei den skandinavischen Untersuchungen auch der negative Einfluss einer konvektiven Luftdurchströmung der Dämmebene betont wird. Dieser Aspekt wurde bei den anderen Untersuchungen vernachlässigt bzw. als weniger wichtig eingeschätzt.

Der tatsächlich auftretende Wärmeverlust hängt vor allem von drei Faktoren ab: das Verhältnis der Dämmschichtdicke über und unter der Dachabdichtung, der Niederschlagsmenge und dem Typ der Deckschichten. Da die Menge der abfließenden Wärme kaum genau gemessen werden kann, ergeben sich bei den verschiedenen Untersuchungen auch eine entsprechend große Bandbreite an Ergebnissen. In [12] werden die Schwierigkeiten von genauen und niederschlagsabhängig differenzierten Zuschlagswerten zusammengefasst und die Autoren kommen zu dem Schluss, dass ein pauschaler Zuschlag auf Basis der bisherigen Erkenntnisse der praktikabelste Weg sein sollte. Als Zuschlagswert wurden die bereits verwendeten 0,05 W/m^2K vorgeschlagen.

Im Zuge der immer besseren U-Werte und damit dickeren Dämmschichten ist der Zuschlagswert in den letzten Jahren gegenüber dem U-Wert der Gesamtkonstruktion so dominant geworden, dass in der Praxis nun fast ausschließlich die in [12] vorgeschlagene zusätzliche Trennlage eingebaut wird, um den Zuschlag ganz oder zumindest teilweise zu vermeiden. Diese sinnvolle und inzwischen auch bereits bewährte Vorgehensweise macht eine von verschiedenen Autoren angemahnte genauere Differenzierung der Zuschlagswerte aus heutiger Sicht eigentlich nicht mehr erforderlich. Auch der bisher in Deutschland ggf. nur unzureichend berücksichtigte Einfluss einer Luftdurchströmung wird bei Verwendung einer Trennlage soweit eliminiert, dass hier keine weiteren Untersuchungen erforderlich scheinen, wobei der bei den Dachöffnungen praktisch immer vorgefundene Feuchtefilm unter den Dämmplatten dabei auch ein Indiz ist, dass eine regelmäßige

Luftdurchströmung, die ja auch zu einer Trocknung dieser Bereiche führen müsste, auch bei durchlässigen Kiesdeckschichten häufig nicht oder in nur geringem Umfang stattfindet.

Abschließend kann also festgestellt werden, dass mit dem sehr starken Trend zur Verwendung einer Trennlage unter der Deckschicht sowohl die Unterströmung mit Niederschlagswasser als auch der konvektive Wärmeverlust durch Wind soweit unterbunden werden kann, dass die diesbezüglichen Wärmeverluste vernachlässigbar gering bleiben. Bei fehlender Trennlage sollten die bisher verwendeten pauschalen Zuschläge entsprechend der Verteilung der Wärmedämmung oberhalb und unterhalb der Dachhaut weiterhin verwendet werden. Bei Verwendung einer Trennlage sollte der Zuschlag generell wegfallen. Eine Unterscheidung der Zuschläge zwischen Kiesdach und Gründach erscheint nicht sinnvoll, da die Unterströmung beim Gründach aufgrund der größeren Wasserrückhaltekapazität der Deckschicht eher geringer ausfällt als beim Kiesdach.

Eine darüber hinausgehende Differenzierung der Zuschlagswerte für die Unterströmung ist nicht zu empfehlen, da nur ein kleiner Teil der neuen Dachflächen ohne Trennlage ausgeführt wird und dies zudem mit unverhältnismäßig großem Forschungsaufwand verbunden wäre.

Feuchtezunahme durch Feuchtefilm unter den Dämmplatten

Den zweiten wichtigen Feuchteeinfluss bei Umkehrdächern stellt die beobachtete Zunahme der Feuchte in den Dämmplatten dar, die auch mit einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit verbunden ist. Der Niederschlag führt – sei es durch die zuvor beschriebene Unterströmung oder auch nur durch geringe Sickerwassermengen bei vorhandener Trennlage – in der Regel zu einem mehr oder weniger permanent vorhandenen dünnen Feuchtefilm unter den Dämmplatten. Völlig trockene Verhältnisse wurden bisher bei keiner Umkehrdachöffnung dokumentiert – der Feuchtefilm reicht jedoch vom stehenden Wasser bis hin zu einer nur sehr geringen Kondensatmenge, die innerhalb weniger Minuten abtrocknen kann. Die Temperaturen auf der Oberfläche der Dachhaut liegen bei deutschen Klimaverhältnissen abgesehen von kurzen sehr warmen Perioden im Sommer im Tagesmittel praktisch immer höher als die Außenlufttemperatur, wodurch sich ein Temperatur- und analog dazu ein Wasserdampfpartialdruckgefälle und somit auch ein Diffusionsstrom in die Dämmebene hinein einstellt. In Abhängigkeit von den Materialeigenschaften der Dämmung selbst aber auch vom Feuchtegehalt der darüber befindlichen Deckschicht kann der Diffusionsstrom entweder ohne eine nennenswerte Zunahme des Wassergehalts in der Dämmung nach oben ausdiffundieren oder es kommt zur Kondensation innerhalb der Dämmstoffporen und zu einer Akkumulation von Feuchte in den Platten und damit verbunden zu einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit.

Bei den in [1] ausgewerteten Untersuchungen wurde in der Regel ein Feuchtegehalt von unter 1 Vol.-% in den extrudierten Polystyrol-Hartschaumplatten gemessen. Aufgrund dieser geringen Feuchtegehalte und der eher großzügig bemessenen Zuschläge auf die gemessene Wärmeleitfähigkeit erschien eine

Berücksichtigung der Feuchte bei der wärmetechnischen Bemessung damals nicht erforderlich.

In [4] wurden mehrere Umkehrdächer in Norwegen in Bezug auf den Wassergehalt in der Dämmung untersucht. Bereits bei dieser Untersuchung zeigte sich, dass die zuvor genannten Einflussfaktoren Materialkennwerte und Deckschichtfeuchte die beiden maßgeblichen sind. In Bestandsobjekten wurden bei EPS unter sehr guten Trocknungsbedingungen (sauberer Kies, keine Beschattung, einlagige Verlegung der Dämmung) Wassergehalte um 12 - 15 Vol.-%, bei weniger günstigen Bedingungen bis zu 30 Vol.-% festgestellt. Bei XPS sind die Wassergehalte wesentlich geringer und liegen bei nur 1 Vol.-% für Kiesschüttung auf einlagiger Verlegung der Dämmung, 3 Vol.-% bei Betonplatten auf Abstandhaltern und zweilagiger Verlegung, 5 Vol.-% bei Betonplatten und Ortbeton im Kiesbett oder bei komplett beschatteten Dächern sowie 8 Vol.-% bei Betonplatten und Ortbeton im Sandbett oder direkt auf der Wärmedämmung sowie bei Gründächern. Die Standzeiten der Dächer sind dabei nicht angegeben. Bei eigenen Untersuchungen über einen Zeitraum von zwei Jahren lagen die Werte je nach Deckschicht für EPS bei 2 bis 6 Vol.-% und für XPS bei maximal 1,5 Vol.-%.

Der Autor von [5] kommt 1987 zu dem Schluss, dass der Erkenntnisstand über Feuchtegehalte in kiesbedeckten Umkehrdächern mit einlagiger Wärmedämmung ausreichend belegt, dass ohne permanente Verschattung die Platten so trocken bleiben, dass kein Zuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit erforderlich ist. Bei Konstruktionen mit zweilagiger Wärmedämmung und bei Dächern mit einer Abdeckung aus Gehwegplatten oder Ortbeton sieht er zwar noch Untersuchungsbedarf, schlägt aber auf Basis der bisherigen Erkenntnisse vorläufig folgende Korrekturzuschläge vor: 3 Vol.-% bei Gehwegplatten mit Abstandhaltern und bei zweilagiger Wärmedämmung, 5 Vol.-% bei Gehwegplatten auf einer Lage aus feinem Kies oder Splitt, 8 Vol.-% für im Sandbett verlegte oder unmittelbar auf der Wärmedämmung liegende Gehwegplatten und 10 Vol.-% für Ortbeton. Für andere Deckschichten und Begrünungen werden keine Angaben gemacht.

In [6] bezieht sich der Autor zunächst auf die Ergebnisse der norwegischen Untersuchungen [4] und die darin vorgeschlagenen Korrekturwerte für $\Delta\lambda$. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass die bauaufsichtlichen Zulassungen für Umkehrdächer in Deutschland bei einer Abdeckung mit Kies oder einem Betonplattenbelag in Kiesbettung bzw. auf Abstandhaltern ausdrücklich eine einlagige Verlegung fordern und im Gegenzug – aus Sicht des Autors gerechtfertigt - auf eine feuchtebedingte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten verzichten. Begrünte und befahrbare Konstruktionen werden durch die Zulassungen damals nicht erfasst, da noch keine hinreichend gesicherten Erkenntnisse über deren Feuchteverhalten vorliegen.

Der Autor von [7] hat ein Berechnungsmodell entwickelt, welches einen sog. „ideellen“ λ -Wert (λ_{id}) als Funktion der Nutzungsdauer, der maximalen Kondensatmenge im Dämmstoff je nach Dämmdicke und der jährlichen deckschichtabhängigen Trocknungsmenge der kondensierten Feuchte beschreibt und somit einen feuchtebedingten Zuschlag bereits enthält. Die vorgeschlagenen Berechnungsformeln sollen dabei ähnliche Zuschläge ergeben

wie bei den in [4] beschriebenen Versuchen – allerdings wird eine Standzeit von 30 anstelle der in Norwegen angenommenen 20 Jahren bei gleichen Endfeuchtegehalten zu Grunde gelegt, was etwas günstigere Ergebnisse bedingt. Die Werte für $\Delta\lambda$ können für verschiedene Konstruktionstypen, Dämmdicken und Deckschichten aus komplexen Diagrammen abgelesen werden und liegen zwischen etwa 4 und 30 %. Die Vorgehensweise erscheint allerdings eher kompliziert.

In [10] stellt der Autor den damaligen Erkenntnisstand zum Umkehrdach zusammen. Bei den bisher verwendeten FCKW bzw. HFCKW geschäumten extrudierten Polystyrol-Hartschaumplatten wird neben einem allgemeinen Zuschlag von 5 % ein Alterungszuschlag von 10 % - insgesamt also 15 % - bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des neuen Materials bei 10 °C erhoben. Bei Untersuchungen an langjährig in Umkehrdächern eingebauten Extruderschaumplatten wurde festgestellt, dass die Alterung in Wirklichkeit geringer ist, so dass nach 30 Jahren noch ein Feuchtegehalt von 4 Vol.-% zulässig wäre, ohne den Rechenwert von 0,035 W/mK zu überschreiten. Ein weiterer Feuchtezuschlag erscheint daher nur erforderlich, wenn höhere Feuchtegehalte als 4 Vol.-% auftreten oder wenn andere Treibgase mit unterschiedlichem Alterungsverhalten verwendet werden. Durch das damals neu entwickelte Rechenverfahren zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® kann bei bekannten Feuchteverhältnissen über und unter der Dämmung nach [10] nun je nach Dämmschichtdicke und Dachaufbau der Zeitverlauf der Dämmstofffeuchte ermittelt werden. Die dadurch zu erwartende Minderung der Wärmedämmung kann somit durch einen spezifischen $\Delta\lambda$ -Zuschlag auf den Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden.

Aufgrund der Umstellung des Treibgases von FCKW auf das umweltfreundlichere CO₂ wird das in [7] vorgestellte Berechnungsmodell für den $\Delta\lambda$ -Zuschlag in [11] angepasst. Denn CO₂-geschäumte Dämmstoffe haben gegenüber den FCKW-geschäumten eine um ca. 0,005 W/mK höhere Wärmeleitfähigkeit, wodurch sich der Rechenwert λ_r auf 0,035 W/mK erhöht. Weiterhin ist der Wasserdampfdiffusionswiderstand bei CO₂-geschäumten Dämmstoffen geringer, so dass die Feuchtigkeitsaufnahme unter dampfbremsenden oder feuchten Deckschichten erhöht wird. Bei FCKW-geschäumten Dämmplatten wird ein μ -Wert von minimal 120 und maximal 200 angenommen, bei CO₂-geschäumten Platten zwischen 80 und 120.

Basierend auf einer Auswertung von zahlreichen Bestandsobjekten mit unterschiedlichen Dämmstofftypen, Deckschichten, Außenklimaten und Innenraumtemperaturen wird in [15] ein empirisches Berechnungsverfahren entwickelt, das in Abhängigkeit von den o.g. Variationen und der Standzeit den zu erwartenden Feuchtegehalt in der Dämmung sowie den Zuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Dazu werden die mittleren Feuchtegehalte in vergleichbaren Objekten herangezogen. Alle Faktoren können entsprechend den spezifischen Bedingungen angepasst werden. Der Ansatz ist äußerst umfassend und berücksichtigt die wesentlichen Einflussfaktoren (Raumklima, Diffusionswiderstand der Dämmstoffe, Außenklima, Niederschlag), birgt aber den Nachteil, dass die resultierenden Feuchtegehalte stark von den jeweiligen Messwerten der einzelnen Objekte abhängen – so sind beispielsweise die

Zuschläge für Dachbegrünungen mit niedrigen Innenraumtemperaturen geringer als bei Plattenbelägen – bei höheren Innentemperaturen verhalten sich dagegen die Plattenbeläge günstiger, was physikalisch kaum begründbar ist. Bei 20 °C im Innenraum und 50 Jahren Standzeit wird für eine Jahresmitteltemperatur von 8 °C (vergleichbar Holzkirchen) bei Plattenbelägen für 10 cm dicke CO₂-geschäumte Dämmplatten ein Zuschlag von 0,026 W/mK und für HFKW-geschäumte Platten von 0,015 W/mK ermittelt, was einer Erhöhung um etwa 70 % bzw. 40 % entspricht. Bei extensiver Begrünung liegen die Zuschläge nur bei 0,009 und 0,005 – also 25 % bzw. 14 % Zuschlag.

Zusammenfassung $\Delta\lambda$ -Zuschlag

Die verschiedenen Untersuchungen und Ansätze zeigen jeweils, dass bei sauberen Kiesdeckschichten und einlagiger Verlegung der Dämmplatten nur mit geringen Feuchteanstiegen in der Dämmung gerechnet werden muss, da eine Trocknung nach oben immer wieder möglich ist. Aufgrund der länger feuchten Bedingungen über der Umkehrdämmung ergeben sich höhere Feuchtegehalte in den Dämmplatten unter Begrünungen und Gehwegplatten im Splittbett und noch höhere bei Gehwegplatten im Sandbett oder Ortbetondeckschichten, bei denen gar keine Trocknung mehr zu erwarten ist. Ebenfalls wird deutlich, dass der Diffusionswiderstand der eingesetzten Dämmstoffe maßgeblich über den sich einstellenden Feuchtegehalt entscheidet – besonders deutlich wird dies bei den Untersuchungen mit EPS in den skandinavischen Ländern, aber auch der Unterschied z.B. infolge von verschiedenen Treibmitteln bei XPS-Dämmungen kann ins Gewicht fallen. Generell gilt hier, dass höhere Diffusionswiderstände niedrigere Feuchtegehalte bedingen. Damit haben die CO₂-geschäumten Platten in der Regel nicht nur eine höhere Ausgangs-Wärmeleitfähigkeit sondern weisen aufgrund des niedrigeren μ -Werts auch eine stärkere Feuchtezunahme und damit eine Verschlechterung des Dämmwerts auf. Die meisten Autoren schlagen pauschale Zuschläge für ein- oder zweilagig verlegte Dämmplatten und die verschiedenen Deckschichten vor – andere fordern zusätzlich eine Berücksichtigung des Außen- und Innenklimas. Die umfassendste Bewertungsmöglichkeit bietet [15] – allerdings mit dem Nachteil des rein empirischen Ansatzes.

[10] schlägt dagegen eine Simulation der physikalischen Prozesse zur Ermittlung der Feuchtegehalte in den Dämmplatten vor, wobei die Feuchte-Randbedingungen über und unter der Dämmung zum damaligen Zeitpunkt noch vorgegeben und damit abgeschätzt werden müssen. Eine Erweiterung des Simulationsmodells WUFI® in den vergangenen Jahren erlaubt mittlerweile auch die Simulation der Deckschichten (Kies, Begrünung) selbst sowie eine Speisung des Feuchtefilms unter der Dämmung in Form eines Anteils des Niederschlags, so dass auch hier klimaabhängige instationäre Randbedingungen verwendet werden können.

2.2 Zusammenstellung der bisher verwendeten Zuschläge

Betrachtet man die bisher verwendeten Zuschläge für das Umkehrdach, so folgen diese den veröffentlichten Forschungsarbeiten und den Erfahrungen mit

Praxisobjekten. Weiterhin wird die Historie der Treibmittelumstellungen und die Weiterentwicklung der Verlegung und Dämmschichtdicken deutlich.

Umkehrdächer mit Bekiesung und dem Treibmittel FCKW 12

Die erste Zulassung für das bekieste Umkehrdach wurde am 01.08.1978 gemeinsam für die XPS-Hersteller BASF Aktiengesellschaft und die DOW Chemical Handels- und Verwaltungsgesellschaft mit einer Gültigkeitsdauer von 3 Jahren ausgestellt.

Als Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit wurden damals die Rechenwerte nach DIN 18164 mit 5 mW/(m·K) Abstufungen verwendet inkl. einem Zuschlag zur Wärmeleitfähigkeit von 5 %.

Die Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten für das Unterströmen der XPS-Dämmplatten durch Niederschlagswasser wurde 1978 auf die in Tabelle 1 dargestellten Werte festgelegt.

In der nächsten Reihe von Umkehrdachzulassungen ab 2. Juli 1985 (nur bekiestes Umkehrdach) wurde der Δk -Wert auf die Werte aus Tabelle 2 herabgesetzt.

Der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit wurde in 5 mW/(m·K)-Stufen auf 0,030 und 0,035 W/(m·K) festgesetzt.

In den weiteren Umkehrdach-Zulassungen 1990 bis ca. 1995 (alle Zulassungen betreffen noch das Treibmittel FCKW 12) wurden die Δk -Werte und die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit beibehalten.

Tabelle 1: Auszug aus der Zulassung Z-23.2-22 vom 1. August 1978 (BASF AG und DOW Chemical)

Anteil des Wärmedurchlasswiderstands unterhalb der Dachhaut in %	Erhöhung des k-Wertes Δk [W/(m²·K)]
0 - 5	0,08
5,1 - 20	0,06
20,1 - 40	0,04
40,1 - 60	0,02
> 60	0

Tabelle 2: Auszug aus der Zulassung Z-23.4-101 vom 2. Juli 1985 (BASF AG)

Anteil des Wärmedurchlasswiderstands unterhalb der Dachhaut in %	Erhöhung des k-Wertes Δk [W/(m²·K)]
0 - 10	0,05
10,1 -50	0,03
> 50	0

Umkehrdächer mit Erweiterung für die Begrünung und die Treibmittel HFCKW 142b und HFCKW 22/142b

Ab etwa dem Jahr 1994 wurden erstmals Zulassungen für das Umkehrdach in der Ausführung mit Begrünung ausgestellt. Etwa zur gleichen Zeit wurden die Zulassungen für das Umkehrdach auf das Treibmittel HFCKW 142b umgestellt. Die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit blieben bei 0,030 W/(m·K) und bei 0,035 W/(m·K). Ebenso bleiben die Δk -Werte unverändert.

Etwa im Jahr 1999 wurden die Umkehrdachzulassungen auf das Treibmittelgemisch HFCKW 22/142b umgestellt. Die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit und die Δk -Werte blieben weiterhin gleich.

Ab dem Jahr 1999 wurde die erste Zulassung der Firma DOW mit der wasserableitenden, diffusionsoffenen Trennlage "ROOFMATE MK", die das Unterströmen der Dämmplatten weitgehend verhindert, für das UK-Dach mit Bekiesung ausgestellt. Deshalb entfällt der Δk -Wert bzw. wird auf $\Delta k = 0$ gesetzt. Für BASF wurde diese Zulassungsvariante ab dem Jahr 2009 gültig.

Umkehrdächer mit XPS-Platten und dem Treibmittel HFCKW 134a

Nach dem Wirksamwerden der HFCKW-Verbotsverordnung wurde im Jahr 2000 eine Umkehrdachzulassung mit dem Treibmittel HFCKW 134a ausgestellt. Mit diesem Treibmittel konnten die gewohnten Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit von 0,030 und 0,035 W/(m·K) beibehalten werden. Die Δk -Werte blieben ebenfalls unverändert.

Umkehrdächer mit XPS-Platten und dem Treibmittel CO₂/Einführung von ΔU

In den Jahren 2000 und 2001 wurden die UK-Dachzulassungen auf die Treibmittelgeneration CO₂ und CO₂ mit Hilfstreibmitteln umgestellt. Damit konnten die alten Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit nicht mehr erreicht werden.

Die neuen Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit lauteten 0,035; 0,040 und 0,045 W/(m·K). Gleichzeitig wurde der Δk -Zuschlag, den europäischen Regeln folgend, in ΔU (Wärmedurchgangskoeffizient) umbenannt. Die Höhe des ΔU -Zuschlags und die Einheit blieben gleich, also eine reine Namensänderung.

Einführung der mW-Stufen/Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit (seit 2004)

In der Zulassungsreihe 2006 und 2007 wurden den europäischen Dämmstoffnormen folgend die mW/(m·K)-Stufen in allen Zulassungen eingeführt. Damit ergab sich eine sehr viel feinere Abstufung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit (die seit etwa 2004 die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit, der europäischen Nomenklatur folgend, in den Zulassungen ablösen).

In dem feiner abgestuften mW-System, das deutlich weniger Sicherheitsspielraum zur nächsten mW-Grenze aufweist als bei den früher üblichen 5 mW/(m·K)-Stufen, wurde für die Anwendung im Gründach ein anteiliger ΔU -Zuschlag und ein $\Delta \lambda$ -Zuschlag von 1-2 mW/(m·K) berücksichtigt. Diese Zuschläge decken die höhere Feuchteaufnahme der XPS-Dämmplatten durch den höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand der Vegetations-, Filter- und Dränschicht über Zeiträume von etwa 25 Jahren ab. Im Gegensatz dazu wurde bei der Ausführung mit Bekiesung auf einen Zuschlag verzichtet, da bei dieser Verlegungsart die Wasseraufnahme in Praxisobjekten langfristig (bis über 30 Jahren) kleiner 2 Volumenprozent betrug.

Zweilagige Verlegung

Seit April 2011 wurde die zweilagige Verlegung von XPS-Platten erstmals in einer Umkehrdachzulassung geregelt.

Diese Verlegeart gilt nur für Plattendicken ≥ 120 mm bei der unteren Lage und für die Ausführung mit Bekiesung. Zur Berücksichtigung der höheren Wasseraufnahme der unteren Lage wurde ein Zuschlag zur Wärmeleitfähigkeit von 3 mW/(m·K) für beide Lagen eingeführt.

3 Objekt- und Freilanduntersuchungen

3.1 Freilanduntersuchungen des IBP

Am Standort des Fraunhofer IBP in Holzkirchen wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts ab 1985 auf einem quadratischen Versuchsdach mit einer Größe von 12 m auf 12 m verschiedene Umkehrdachvarianten aufgebracht und bezüglich ihres hygrothermischen Verhaltens untersucht.

Einige Versuche endeten nach vier bzw. sieben Jahren, andere wurden durch neue Systeme ersetzt oder unterteilt. Regelmäßige Messungen des Feuchtegehalts der Dämmschichten fanden im Abstand von einigen Monaten bis 1992 statt. Neben der Erfassung des normalen Außenklimas mit der Wetterstation des IBP (Lufttemperatur, relative Feuchte, Niederschlag, Diffus- und Globalstrahlung, Luftdruck sowie Windgeschwindigkeit und -richtung) wurden teilweise auch die Temperaturen unter den Deckschichten erfasst – 1995 und 1996 für ein gesamtes Jahr unter einer Bekiesung und unter einer Begrünung. Anlässlich dieser Klimamessung unter den Deckschichten wurden 1996 auch erneut die Feuchtegehalte der Dämmplatten in den noch vorhandenen Dächern ermittelt. Da einige der Versuchsflächen erst 2004 für neue Versuche benötigt wurden, konnte an diesen abschließend noch einmal der Feuchtegehalt nach 19 Jahren Einbauzeit gemessen werden – ein für Freilandversuche ungewöhnlich langer Testzeitraum, was aber gerade für die spezielle Fragestellung der langsamen Feuchteakkumulation einen besonders günstigen Umstand darstellt.

Eine Auswertung des gesamten Datenbestands inklusive der Messungen aus 2004 hinsichtlich einer Bewertung von Umkehrdächern mit hygrothermischen Simulationen erfolgt nun im Rahmen dieses Projekts – gegliedert nach den einzelnen Versuchsabschnitten.

Versuchsdach ab 1985

Das Versuchsdach aus einer 12 cm dicken gefällelosen Massivbetondecke über einem beheizten Laborraum (16 – 22 °C) wurde in verschiedene Bereiche unterteilt (Bild 1) und mit unterschiedlichen Systemen belegt. Als Referenz- und Vergleichsdach wurde ein Bereich als Warmdach ausgeführt. Der Aufbau wurde im November 1985 fertig gestellt und im Frühjahr 1986 eingesät sowie zusätzlich mit Sprossen von Wasser speichernden Trockenpflanzen (Sedum) bepflanzt, um den Bewuchs zu beschleunigen [16].

Bei den Dächern 1 – 4 bestand die Wärmedämmung jeweils zur Hälfte aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum des Herstellers A und des Herstellers B. Die Platten von Hersteller A sind hier bei allen Versuchen um etwa den Faktor 1,8 diffusionshemmender als die Platten des Herstellers B. Als Vegetationssubstrat wurde ein mineralisches Schüttstoffgemisch mit geringem Anteil an organischer Substanz auf der Basis von Schieferschlacke eingesetzt. Der Aufbau der verschiedenen Dachvarianten ist im Folgenden beschrieben:

Dach 1: Konventionelles Warmdach als Vergleichsdach

- Betondecke
- Trennlage
- Dampfsperre
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- Dachbahn
- 5 cm Kies 16/32

Dach 2: begrüntes Umkehrdach mit Dränschicht (Bild 2)

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- 2 cm Dränmatte
- 5 bis 8 cm Substrat + extensive Bepflanzung

Dach 3: begrüntes Umkehrdach mit Blähton-Dränschicht (Bild 3)

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- 5 cm Blähton
- Geotextilvlies
- 5 bis 8 cm Substrat + extensive Bepflanzung

Dach 4: begrüntes Umkehrdach ohne Dränschicht (Bild 4)

- Betondecke
- Trennlage
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- Geotextilvlies
- 5 bis 8 cm Substrat + extensive Bepflanzung

Dach 5: begrüntes Umkehrdach mit Dränrillen im Dämmstoff (Bild 5, links)

- Betondecke
- Trennlage
- 8 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff mit oberseitigen Dränrillen
- Geotextilvlies
- 5 bis 8 cm Substrat + extensive Bepflanzung

Dach 6: begrüntes Umkehrdach mit Polystyrol-Dränelement (Bild 5, rechts)

- Betondecke
- Trennlage
- 6 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- 5 cm bitumengebundene Dränplatte
- Geotextilvlies
- 5 bis 8 cm Substrat + extensive Bepflanzung

In den ersten sieben Jahren wurde an den Umkehrdächern in der Regel im Frühjahr und im Herbst der Feuchtegehalt der Dämmschichten bestimmt. An Dach 1 (Warmdach) und am Dach 2 wurden kontinuierlich die Temperatur-

profile und die Wärmeströme ermittelt. Außerdem wurde der Wasserabfluss über je einen Abfluss in der Mitte der beiden Dächer aufgezeichnet. Bei Dach 1 handelt es sich um ein konventionelles bekiestes Warmdach, bei dem die Dachabdichtung auf der Dämmung angebracht wurde, so dass keine Feuchte in die Dämmung eindringen kann. Die kontinuierliche Erfassung der Temperaturprofile, der Wärmeströme und des Wasserabflusses sowohl in Dach 1 als auch in Dach 2 (repräsentativ für die untersuchten Umkehrdächer) diente dem quantitativen Vergleich zwischen Warmdach und Umkehrdach bezüglich Niederschlagsrückhaltung und thermischem Verhalten. Der thermische Vergleich ist allerdings nur eingeschränkt möglich, da sich unter den beiden Dächern zwei verschiedene Räume mit doch leicht unterschiedlichem Klima befanden. Sowohl für das begrünte Umkehrdach (Dach 2) als auch für das bekieste Warmdach (Dach 1) sind für einen Zeitraum von einer Woche im Winter und im Sommer jeweils ohne und mit Niederschlag die Verläufe von Wasserabfluss, Oberflächentemperaturen an der Deckenober- und -unterseite und der Wärmestromdichte auf der Betondecke in Bild 6 bis Bild 9 aufgetragen. Zudem sind die Verläufe der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung dargestellt.

Bild 6 zeigt, dass es sich bei der ausgewählten niederschlagsfreien Winterwoche um eine sehr kalte Periode handelt, die einige strahlungsreiche Tage enthält. Die Temperaturen unter der Wärmedämmung („unten“) liegen jeweils nahezu konstant bei 20 °C (UK-Dach) bzw. 22 °C (Warmdach). Die Temperaturen unter dem Kies auf dem Warmdach („oben“) liegen ebenfalls relativ konstant bei -1 °C und unter der Begrünung etwas höher bei +1 °C. Im Vergleich zur Schwankung der Außenlufttemperatur zwischen -5 °C und -30 °C weisen die beiden Deckschichten eine erstaunliche thermische Trägheit auf, da auch der Wärmestrom in diesem Zeitraum nahezu konstant bei 5 bzw. 6 W/m² liegt. Bild 7 stellt eine Winterwoche mit Niederschlägen dar – teils als Schnee und teils als Regen. Aus der Darstellung der Wasserabflüsse (unten) geht hervor, dass, abgesehen von kurzfristigen geringeren Spitzenwerten bei der Begrünung, bei beiden Dacharten Niederschlagsablaufmengen recht ähnlich liegen – das Substrat erlaubt hier also nur eine vergleichsweise geringe Rückhaltung des Wassers. Mangels weiterer Informationen über die Niederschlagsverhältnisse vor der betrachteten Woche kann allerdings nicht mehr festgestellt werden, ob dies eventuell dadurch begründet ist, dass die Substratschicht bereits zu Beginn des dargestellten Zeitraums weitgehend wassergesättigt war.

Bei trockenen und warmen Bedingungen im Sommer sind Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichten beider Dacharten erwartungsgemäß weitgehend identisch, wie aus Bild 8 hervorgeht. Im Verlauf der ausgewählten Schönwetterperiode - gekennzeichnet durch Globalstrahlungswerte von in der Spitze über 600 W/m² und Außenlufttemperaturen von bis zu 28 °C - ist jeweils Mittags eine temporäre Umkehrung der Wärmestromrichtung von außen in den Raum festzustellen. Während sich die Globalstrahlungs- und Außenlufttemperaturschwankungen auf die Temperatur der Deckenunterseite kaum auswirken, treten in der Substrat- bzw. Kiesschicht deutliche Temperaturschwankungen zwischen ca. 10 °C und 40 °C auf. Die in Bild 9 dargestellte Sommerwoche ist dagegen durch mehrere Regentage und eher niedrige Außenlufttemperaturen gekennzeichnet. Beim Wasserablauf ist hier allerdings

jeweils zu erkennen, dass die Ablaufspitzen beim Warmdach immer höher liegen als beim Umkehdach – wenngleich auch hier die Unterschiede insgesamt nur gering ausfallen. Wärmegewinne treten unter diesen Randbedingungen keine auf, die Wärmeströme verlaufen von innen nach außen.

Im Folgenden werden die gemessenen Feuchtegehalte in den Dämmplatten der verschiedenen Versuchsdächer beschrieben. Dach 2 wurde nur über vier Jahre untersucht und danach ersetzt. Die Messergebnisse über diesen Zeitraum sind in Bild 10 dargestellt. Die blauen Messpunkte stellen den Feuchtegehalt der Dämmplatte des Herstellers A und die roten Messpunkte die des Herstellers B dar. Beide Messwertverläufe zeigen einen Anstieg, wobei die Variante des Herstellers B aufgrund des niedrigeren Diffusionswiderstands erwartungsgemäß etwas höhere Feuchtegehalte aufweist als die Platten von Hersteller A. Während der Verlauf der Messpunkte bei Hersteller A einigermaßen kontinuierlich verläuft ist bei Hersteller B im Jahr 1988 ein deutlicher Abfall des Wassergehalts zu beobachten. Da jeweils nur eine Platte pro Dachvariante gemessen wurde und lokale Einflüsse wie Unebenheiten in der Dachabdichtung, stehendes Wasser unter der Dämmung oder auch mechanische Beschädigungen der Schäumhaut einen deutlichen Einfluss auf den Wassergehalt der Platte haben können, werden bei solchen Messungen in der Regel sehr starke Streuungen der Feuchtegehalte auch in ein und demselben Dach vorgefunden. Dies ist bei der Bewertung einzelner Messwerte dementsprechend zu berücksichtigen.

An den Dächern 3 – 6 wurde in den ersten sieben Jahren (bis 1992) jeweils im Frühjahr und im Herbst der Feuchtegehalt der Dämmschicht bestimmt. Im Jahr 2004, als das Versuchsdach abgebaut wurde, fand noch eine abschließende Messung statt, wobei allerdings die Unterteilung in Dach 3 und 4 aufgrund des fast identischen Aufbaus übersehen (in den Aufzeichnungen von 2004 ist nur die Unterteilung in die beiden Plattentypen vermerkt) und in der Folge nur Messwerte für Dach 3, 5 und 6 ermittelt wurden. In Bild 11 sind die gemessenen Feuchtegehalte von Dach 3 getrennt für die beiden Dämmstofftypen dargestellt. Bei dem Dämmstoff des Herstellers B fallen (rot) besonders die Messwerte vom August 1991 und November 1992 „aus der Reihe“, da diese wesentlich niedriger liegen als der Wert im Mai 1996. Da in diesem Zeitraum - auch in Anbetracht des gleichzeitigen Feuchteanstiegs in den Platten von Hersteller A - nicht von einer so starken Trocknung ausgegangen werden kann, sind diese Messwerte wiederum ein Beleg für die u.U. extreme Streuung der Wassergehalte in den verschiedenen Platten eines Daches. Tendenziell ergeben sich wieder etwas höhere Feuchtegehalte für den etwas weniger diffusionshemmenden Dämmstoff des Herstellers B – der letzte Messwert in 2004 liegt hier bei knapp 9 Vol.-% gegenüber nur 5 Vol.-% in den Platten von Hersteller A. Auch die Feuchteverläufe der Dämmplatten der Dächer 5 (Bild 13) und 6 (Bild 14) verzeichnen einen Anstieg und erreichen nach 19 Jahren beide etwa 7 Vol.-%. Trotz zwischenzeitlich vor allem bei Dach 6 stark schwankender Werte ist in beiden Dächern eine mehr oder weniger kontinuierlich steigende Tendenz der Messwerte erkennbar. Die Zufälligkeit der einzelnen Werte wird z.B. anhand der ersten drei Messungen der Jahre 1989 und 1990 erkennbar – in Dach 5 steigen diese langsam um 0,5 Vol.-% an, in Dach 6 dagegen sinken sie bei gleichen Außen- und

Innenklimabedingungen um etwa 1 Vol.-% ab. Die Messwerte für Dach 5 und 6 vom November 1994 waren nicht mehr ganz sicher zuzuweisen - daher stehen diese in Klammern und wurden jeweils dem Dach zugeordnet, wo sie weniger stark vom tendenziellen Verlauf abweichen. Während sich der Messwert im Dach 5 gut in den Verlauf einfügt, liegt der Wert in Dach 6 bereits sehr hoch im Vergleich zum Messwert von 2004. Die etwas höheren Feuchtegehalte der Dächer 5 und 6 im Vergleich zu den übrigen Dachvarianten sind auf die geringeren Plattendicken und bei Dach 5 zusätzlich auf die Dränrillen zurückzuführen. Bei geringerer Plattendicke verteilt sich eine ähnlich große absolute Feuchtemenge auf ein geringeres Volumen der Dämmplatten während die Dränrillen die untere Schäumhaut verletzen und damit den Diffusionswiderstand herabsetzen und einen höheren Feuchteeintrag erlauben.

Zur Ermittlung der feuchtebedingten Änderung der Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten extrudierten Polystyrolplatten wurden im Juni 1991 von Dach 4 sechs Proben entnommen und die Wärmeleitfähigkeit gemessen. Bei einem Feuchtegehalt von ca. 1 Vol.-% wurde ein Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von 0,024 W/(m·K) festgestellt. Mit diesem Wert bleibt die Wärmeleitfähigkeit nach sechs Jahren und trotz der Feuchtezunahme noch um 25 % unter dem Rechenwert von 0,03 W/(m·K).

Versuchsdach ab 1989

Im November 1989 wurde das Dach 2 abgebaut und durch zwei neue begrünte Umkehrdächer Dach 7 und Dach 8 ersetzt, welche wiederum jeweils zur Hälfte mit XPS-Dämmplatten der Hersteller A und B gedämmt wurden [17]. In Bild 15 ist die Anordnung der Versuchsfelder im Herbst 1989 dargestellt. Die beiden neu erstellten Versuchsfelder sind wie folgt aufgebaut:

Dach 7: begrüntes Umkehrdach mit Dränschicht

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- 3 cm Blähschiefer-Dränschicht
- Geotextilvlies
- 7 cm Substrat + extensive Bepflanzung

Dach 8: begrüntes Umkehrdach ohne Dränschicht

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- Geotextilvlies
- 7 cm Substrat + extensive Bepflanzung

In Bild 16 und Bild 17 sind die gemessenen Feuchtegehalte der Dächer 7 und 8 für den nur drei Jahre währenden Versuchszeitraum bis 1992 dargestellt. Bei Dach 7 zeigt die Feuchte in der Dämmung des Herstellers B einen recht deutlichen Anstieg, während in der Dämmung des Herstellers A die Feuchte sinkt – da wiederum eine Trocknung über diesen Zeitraum nicht plausibel ist, bleibt nur die starke Streuung der Messwerte bei der Entnahme von nur einer

Platte als Erklärung für das Absinken. Beim Dach 8 steigen die Feuchtegehalte dagegen erwartungsgemäß in beiden Varianten über den Messzeitraum an. Die Feuchtegehalte in der etwas stärker diffusionshemmenden Dämmung von Hersteller A liegen erneut in beiden Dächern niedriger als bei Hersteller B.

Versuchsdach ab 1994

Im Dezember 1994 wurden anstelle der Dächer 7 und 8 vier neue Varianten aufgebaut. Zwei davon wurden als Gründächer ausgeführt (Dach 9 und Dach 10), die beiden anderen als Umkehrdächer mit Verbundsteinpflaster bzw. Betonglattestrich (Dach 11 und Dach 12) [18]. Die neue Anordnung der Versuchsfelder ist in Bild 18 schematisch dargestellt. Bild 19 zeigt eine fotografische Aufnahme der Versuchsdaches. Der Aufbau der vier neuen Versuchsdächer ist wie folgt:

Dach 9: begrüntes Umkehrdach mit Kiesschicht

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- 5 cm Sickerschicht aus Kies
- Geotextilvlies
- 8 cm Substrat + extensive Bepflanzung

Dach 10: begrüntes Umkehrdach mit Blähton

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- 5 cm Sickerschicht aus Blähton
- Geotextilvlies
- 8 cm Substrat + extensive Bepflanzung

Dach 11: Umkehrdach mit Verbundsteinpflaster

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- Geotextilvlies
- 5 cm Splitt
- 10 cm Verbundsteinpflaster

Dach 12: Umkehrdach mit Betonglattestrich

- Betondecke
- Trennlage
- Dachbahn
- 10 cm extrudierter Polystyrol-Hartschaumstoff
- Geotextilvlies
- 5 cm Splitt
- 10 cm Betonglattestrich

Für die beiden Gründächer (Dach 9 und Dach 10) wurden unter der Begrünung über einen Zeitraum von einem Jahr die stündlichen Temperaturwerte und im folgenden Sommer – also zu einem Zeitraum, wo am ehesten eine Durchtrocknung des Substrats zu erwarten wäre - über etwa 6 Wochen zusätzlich die Taupunkttemperaturen und damit indirekt die Feuchteverhältnisse im unteren Bereich des Substrats gemessen. Für die Umkehrdächer mit Verbundsteinpflaster bzw. Betonglatterstrich liegt nur ein einziger Messwert vom Zeitpunkt des Abbaus der Versuchsdächer im November 2004 vor. Eine Zuordnung der Messwerte zu den beiden Varianten ist zwar nicht mehr möglich, allerdings liegen die beiden Messwerte mit 2,11 Vol.-% und 2,18 Vol.-% so nahe beieinander, dass eine Unterscheidung hier gar nicht erforderlich ist. Der Anstieg des Feuchtegehalts auf nur gut 2 Vol.-% über einen Zeitraum von 10 Jahren liegt für diese Art von Deckschicht ungewöhnlich niedrig – die meisten anderen Freiland- und Objektuntersuchungen zeigten für Pflaster- oder Betondeckschichten sogar noch höhere Feuchteakkumulationen als bei Gründächern. In Anbetracht der bereits mehrfach erwähnten Streuung der Messwerte erscheint eine Bewertung und Nachberechnung auf Basis von nur einer einzigen Messung, die sich zudem deutlich von anderen Erfahrungen unterscheidet, nicht sinnvoll.

3.2 Objektuntersuchungen des FIW München

Aus der Vergangenheit sind einige Objektuntersuchungen bekannt, bei denen Umkehrdachaufbauten als Gründach mit XPS-Dämmstoffen ausgeführt und über lange Zeiträume beobachtet wurden [19], [20], [21].

Diese Untersuchungen wurden allerdings noch an Umkehrdachaufbauten mit FCKW- und HFCKW-getriebenen XPS-Dämmstoffen durchgeführt. Auch waren damals noch Dämmschichtdicken von 50 bis 100 mm üblich. Nach mehreren Treibmittelumstellungen nach der FCKW-Verordnung Anfang der 1990er Jahre und der HFCKW-Verbotsordnung Ende der 1990er Jahre sind heute nur noch XPS-Platten auf dem Markt, die mit CO₂, CO₂ und Isobutan, CO₂ und Additiven oder in weit geringerem Umfang mit HFKW 134a oder HFKW 152a getrieben werden. Weiterhin haben sich die Dämmschichtdicken deutlich erhöht. Heute sind Dämmschichtdicken von 140 bis 180 mm im Umkehrdach üblich - bei weiter steigender Tendenz.

Um mehr Erkenntnisse über die heute üblichen XPS-Dämmstoffe in Gründächern zu erlangen, wurde das FIW München von einem XPS-Hersteller beauftragt, einige Gründächer mit den heute üblichen XPS-Dämmstoffen zu untersuchen.

Weiterhin wurde ein begrüntes Umkehrdach und ein bekiestetes Umkehrdach in der Schweiz, die beide von der EMPA Dübendorf untersucht wurden, in die Auswertung mit einbezogen. Die Ergebnisse sind im Folgenden in Tabelle 3 - Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 3: Praxisobjekte: Extensives Gründach als Umkehrdach und zum Vergleich ein bekiestes Umkehrdach (Untersuchungen durch die EMPA/Schweiz). Dämmstoff/Treibmittel ROOFMATE SL-A mit CO₂ getrieben.

Name:	Mehrfamilienhaus, Thuranstraße 12, Wil / Schweiz	Pflegezentrum J.J. Werferstraße 12, Schaffhausen/Schweiz	
Beschreibung:	einschichtiges Gründach mit MK-Trennlage	Umkehrdach bekiest	
Aufbau: (von oben nach unten)	<ul style="list-style-type: none"> • ca. 7 cm Kies-/ Sand-/ Humusschicht • MK-Trennlage • 140 mm XPS • Dachabdichtung: 2-lagig, bituminös • Betondecke ohne Gefälle 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 cm Kies • MK Trennvlies 16-32 mm • 140 mm XPS • Dachabdichtung: 2-lagig, bituminös • Betondecke ohne Gefälle 	
Einbau:	Herbst 1998	Herbst 1997	
Ausbau:	27.04.2005	27.04.2005	
Winter:	7	8	
Nutzung / Temperatur innen:	Büro / Wohnraum 20-22 °C ganzjährig	Pflegeheim 22 °C (ganzjährig)	
Feuchtegehalt (mittel):	Vol.-%	2,1	0,2
$\lambda_{\text{feucht } 10\text{ °C}}$	W/(m·K)	0,0354 (2,1 Vol.-%)	0,0360 (0,2 Vol.-%)
λ_{trocken}	W/(m·K)	0,0347	0,0357
Rohdichte	kg/m ³	--	-
Beobachtungen Ausbau			

Tabelle 4: Praxisobjekte: Extensives Gründach als Umkehrdach.
Dämmstoff/Treibmittel ROOFMATE SL-A mit CO₂ getrieben.

Name:	Georg-Ledebour-Schule 90473 Nürnberg		Bürogebäude (IBM) 81829 München
Beschreibung:	zweischichtiges Gründach mit MK-Trennlage		zweischichtiges Gründach mit MK-Trennlage
Aufbau: (von oben nach unten)	<ul style="list-style-type: none"> • ca. 5 cm Pflanzensubstrat • Trennvlies 300 g/m² • ca. 5 cm Drainschicht (Blähton 3-8 mm) • MK-Trennlage • 160 mm XPS • Dachabdichtung: SK Bit 105 • Wurzelschutzbahn: PYE GG 200 S4 • Betondecke leichtes Gefälle 		<ul style="list-style-type: none"> • ca. 8 cm Substrat mit Sedum • Vlies 300 g/m² • EPS-Drainageplatten mit 7 mm Noppen • MK Trennvlies • 140 mm XPS • Dachabdichtung: 2-lagig Wilotekt • Betondecke ohne Gefälle
Einbau:	Sommer 2003		Mitte 2003
Ausbau:	28.03.2007		03.05.2007
Winter:	4		4
Nutzung / Temperatur innen:	Büro 21-22 °C ganzjährig		Büro 22,5 °C klimatisiert, ganzjährig
Feuchtegehalt (mittel):	Vol.-%	1,0	1,1
Feuchtegehalt in Schichten (Dicke)			
oben	Vol.-%	-	2,6 (33 mm)
Kern oben	Vol.-%	-	2,3 (34 mm)
Kern unten	Vol.-%	-	0,1 (34 mm)
Unten	Vol.-%	-	0,04 (32 mm)
$\lambda_{\text{feucht } 10\text{ °C}}$	W/(m·K)	0,0391 (0,8 Vol.%)	0,0362 (1,0 Vol.%)
λ_{trocken}	W/(m·K)	0,0372	0,0351
Rohdichte	kg/m ³	34,1	29,4
Beobachtungen Ausbau			

Tabelle 5: Praxisobjekte: Extensives Gründach als Umkehrdach. Dämmstoff/Treibmittel ROOFMATE SL-X mit HFKW 134a getrieben

Name:	Bürohaus CITY West, Elsenheimerstraße 49, München	Bürogebäude, Elsenheimerstraße 45, München
Beschreibung:	einschichtiges Gründach mit MK-Trennlage	einschichtiges Gründach mit MK- Trennlage
Aufbau: (von oben nach unten)	<ul style="list-style-type: none"> • ca. 12 cm Mineralsubstrat / Ziegelsplitt • MK-Trennlage • 160 mm XPS • Dachabdichtung: 2-lagig WIROBIT • Betondecke ohne Gefälle 	<ul style="list-style-type: none"> • ca. 12 cm Mineralsubstrat / Ziegelsplitt • MK Trennlage • 160 mm XPS • Dachabdichtung: 2-lagig WIROBIT • Betondecke ohne Gefälle
Einbau:	Mitte 2003	Mitte 2003
Ausbau:	03.05.2007	03.05.3007
Winter:	4	4
Nutzung / Temperatur innen:	Büro 21-22 °C (ganzjährig)	Büro 21°C - 22 °C (ganzjährig)
Feuchtegehalt (mittel):	Vol.-%	1,1
Feuchtegehalt in Schichten (Dicke in mm)	Vol.-%	
oben		2,1 (39 mm)
Kern oben	Vol.-%	1,1 (40 mm)
Kern unten	Vol.-%	1,2 (40 mm)
Unten	Vol.-%	0,3 (39 mm)
	Vol.-%	0,6 (40 mm)
	Vol.-%	0,1 (41 mm)
	Vol.-%	0,3 (37 mm)
$\lambda_{\text{feucht } 10^\circ\text{C}}$	W/(m·K)	0,0298 (1,0 Vol. %)
λ_{trocken}	W/(m·K)	0,0284
Rohdichte	kg/m ³	37,0
Beobachtungen Ausbau		

3.3 Nachberechnung der Objekt- und Freilanduntersuchungen

Basierend auf den zuvor beschriebenen Aufbauten und Randbedingungen der Freiland- und Objektuntersuchungen von IBP und FIW werden die verschiedenen Untersuchungen im Folgenden mit Hilfe hygrothermischer Simulationen nachberechnet und dabei die Feuchteverhältnisse unter und über den Dämmplatten durch geeignete einheitliche Quellfunktionen so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Wassergehalten in den XPS-Dämmstoffplatten erzielt werden kann.

Die Berechnungen werden mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen, entwickelten und vielfach experimentell validierten Verfahrens zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® [22] untersucht. Das Programm entspricht den Anforderungen

des WTA-Merkblatts [23] sowie der europäischen Norm DIN EN 15026 [24] für hygrothermische Simulationen.

Die Grundlage des Berechnungsmodells WUFI® bildet ein geschlossenes Differentialgleichungssystem, welches sich aus den in [22] beschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Feuchtetransports sowie der Wärme- und Feuchtespeicherung entwickeln lässt. In WUFI® werden die für bauphysikalische Betrachtungen maßgeblichen Transport- und Speichermechanismen von Wärme und Feuchte realitätsnah berechnet. Beim Feuchtetransport ist dies zum einen die Dampfdiffusion, welche auf den thermischen Eigenbewegungen der Moleküle im gasförmigen Zustand beruht sowie der Flüssigtransport, der sich aus der Oberflächendiffusion (Flüssigtransport im Sorbatfilm hygroskopischer Stoffe in Richtung der geringeren relativen Feuchte) und der Kapillarleitung (Flüssigtransport in der gefüllten Pore in Richtung des Kapillardruckgefälles) zusammensetzt. Auch Lösungsdiffusion in organischen Polymeren kann berücksichtigt werden. Beim Wärmetransport werden die Wärmeleitung in Abhängigkeit vom jeweiligen Wassergehalt der Materialien, aber auch der Latentwärmetransport (Wasserdampfdiffusion mit Phasenwechsel) berücksichtigt. Die Feuchtespeicherung setzt sich zusammen aus der Sorptionsisotherme, der Feuchtespeicherung im Kapillarwasserbereich und der Übersättigung – wobei nicht-hygroskopische Materialien entweder gar keine Feuchtespeicherung (dampfdicht) oder nur den Übersättigungsbereich aufweisen.

Für die Klimarandbedingungen werden stündlich gemessene Werte für Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Wind, Sonnen- und atmosphärische Gegenstrahlung verwendet. Dies erlaubt sowohl die Beurteilung der Aufnahme von Schlagregen, als auch Umkehrdiffusion bei Erwärmung der Außenoberfläche durch die Sonne oder nächtliche Unterkühlung durch langwellige Abstrahlung. Im Innenraum können Messwerte oder vereinfachte Modelle für das Raumklima verwendet werden.

Für die Berechnung wird das Bauteil mit seinen verschiedenen Schichten in das Modell eingegeben, das Bauteil entsprechend der realen Situation orientiert und geneigt, und die Einwirkung der Klimabedingungen über die Oberflächenübergangskoeffizienten festgelegt. Das Ergebnis der Berechnung liefert die Zeitverläufe der Temperatur- und Feuchtefelder über den berechneten Querschnitt, also die Temperaturen, Wassergehalte und relativen Feuchten für jeden Zeitschritt und jede Position innerhalb der Konstruktion. Die Berechnungsergebnisse sind anhand von zahlreichen Freiland- und Laboruntersuchungen weltweit umfassend validiert. Bei genauer Kenntnis der Randbedingungen und Materialkennwerte ist eine Wiedergabe der realen Verhältnisse mit sehr guter Genauigkeit möglich. Für die Betrachtung der Umkehrdächer sind trotzdem erneute Validierungsberechnungen der Freilandversuche erforderlich, da weder die Materialeigenschaften der Substrat- und Kiesdeckschichten noch die Ablaufsituation des Regenwassers in der Deckschicht und zwischen den Plattenfugen genau bekannt sind.

Wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben, führen bei Umkehrdächern vor allem zwei Faktoren zur Auffeuchtung der verwendeten Dämmplatten. Der erste Einflussfaktor ist der sich durch Sickerwasser bildende Feuchtefilm unterhalb

der Dämmplatten, welcher aufgrund des Temperaturgefälles einen Diffusionstransport in die Dämmplatten und somit einen möglichen Tauwasserausfall zur Folge hat. Zum anderen haben die Feuchteverhältnisse, die sich über den Dämmplatten einstellen, einen großen Einfluss, da bei ständig feuchten Deckschichten kein Austrocknen des in den Dämmplatten ausfallenden Tauwassers nach außen möglich ist. Ist die Deckschicht zeitweise trocken, so kann Feuchte aus den Dämmplatten nach oben wegtrocknen. Da Außen- und Innenklima bekannt sind, ist für eine Nachrechnung der Objekt- und Freilanduntersuchungen die Ermittlung der Materialparameter der Deckschichten sowie eine Quantifizierung der niederschlagsabhängigen Feuchtequellen zur Speisung des Feuchtefilms unter den Dämmplatten notwendig.

Im Folgenden wird zuerst allgemein das iterative Vorgehen bei der Anpassung der Materialparameter für Kies und Substrat sowie der Randbedingungen beschrieben. Die Nachrechnung der Wassergehalte in den Dämmplatten der verschiedenen Dächern erfolgte parallel, wird aber hier vereinfacht am Beispiel des Daches 3 aufgezeigt. Anschließend werden die Nachrechnungen der anderen untersuchten Dachaufbauten des IBP und des FIW dargestellt.

Anpassung der Materialparameter der Kiesschicht

Auf Basis von Freilandversuchen an bekiesten Umkehrdächern konnten für die Kiesschicht geeignete Kennwerte zur Berechnung ermittelt werden.

Kies ist nicht kapillaraktiv, da die Porenstruktur des Haufwerks viel zu grob ist. Die Deckschicht ist aber auch nicht wasserdicht, sondern das Regenwasser kann entsprechend der Gravitation durch den Kies durchsickern und dann auf der Trennlage oder auf und teilweise unter der Dämmebene ablaufen. Auch im Modell darf daher kein Flüssigtransport im Kies verwendet werden, da dieser meist zu einer homogenen Verteilung der Feuchte in der Kiesschicht führt, während sich real nicht abgelaufene Feuchte eher im unteren Bereich auf der Dämmung oder Trennlage absetzt und von dort auch nicht so schnell wieder verdunstet. Daher wird in der Simulation eine Feuchtequelle über die gesamte Schichtdicke angesetzt, die 40 % des Niederschlags direkt in den Kies einbringt und den bis zur freien Sättigung befeuchtet. Bei Betonrezepturen wird die freie Wassersättigung von Kies mit etwa 3 M.-% angegeben, was in etwa einer vollständigen Benetzung der Kieseloberflächen mit Wasser entspricht – die Steine selbst nehmen in der Regel kein Wasser mehr auf.

Bei der Nachberechnung wird mit einer freien Wassersättigung des Kieses von 50 kg/m³ die beste Übereinstimmung mit der Messung bezüglich der Feuchte im unteren Bereich des Kieses erzielt. Die weiteren Materialparameter sind im Wesentlichen der Literatur entnommen und in Tabelle 6 aufgelistet. Auf der Dachaußenoberfläche wird die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl (a) in einem für hellen Kies realistischen Bereich von 0,3 bis 0,6, die langwellige Strahlungsemission (ϵ) im Bereich von 0,9 bis 0,98 variiert. Gute Ergebnisse werden bei der Nachberechnung mit $a = 0,5$ und $\epsilon = 0,93$ erreicht.

Mit diesem Ansatz wird ein Kiesdach am Standort Holzkirchen nachgerechnet, für welches der Verlauf der Temperatur unterhalb der Kiesschicht über ein Jahr (1. April 1995 bis 31. März 1996) gemessen wurde. Bild 20 stellt die

stündlichen Messwerte (hellgrau) sowie die Nachrechnung (hellgrüne Kurve) dar. Die beiden Kurven zeigen bis auf ein paar Abweichungen im Winter, welche auf die in der Simulation nicht berücksichtigte Schneedecke zurückzuführen sind, eine sehr gute Übereinstimmung. Auch die beiden dargestellten Verläufe des gleitenden Monatsmittel (dunkelgraue und dunkelgrüne Kurve) bestätigen die geringen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung.

Tabelle 6: Materialkennwerte für die Kiesschicht.

Rohdichte	1400	kg/m ³
Porosität	0,7	
Wärmekapazität trocken	1000	J/kgK
Wärmeleitfähigkeit, 10°C	0,7	W/mK
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	1,0	
Freie Wassersättigung	50	kg/m ³
Flüssigtransportkoeffizient Saugen	-	
	-	
Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen	-	
	-	

Anpassung der Materialparameter der Substratschicht

Gründach in Holzkirchen

Als Grundlage für die Anpassung der Materialparameter der Substratschicht dient zunächst eine Messung des Temperaturverlaufs vom 1. April 1995 bis zum 31. März 1996 unter dem Begrünungsaufbau des in Kapitel 3.1 beschriebenen Daches 9 am Standort Holzkirchen. Die Nachberechnung erfolgt mit stündlich gemessenen Klimadaten vom Standort Holzkirchen sowie mit einem Innenklima nach dem WTA-Merkblatt mit normaler Feuchtelast. Durch Anpassung der Substrateigenschaften sollen in der Berechnung wenn möglich dieselben Temperaturen wie in der Messung erzielt werden. Um auf der hygrothermisch sicheren Seite zu liegen, wurde darauf geachtet, dass die berechneten Temperaturen die gemessenen im Zweifel unter-, nicht aber überschreiten dürfen. Für die Feuchte unter dem Substrat standen nur kurzfristige Messungen im Sommer zur Verfügung. Dabei wurde allerdings festgestellt, dass hier auch in der warmen Jahreszeit und nach längeren niederschlagsfreien Perioden trotzdem permanent hohe Feuchten herrschen und somit kaum eine Austrocknung der Dämmplatten nach außen möglich ist.

Diese Anpassung der Kennwerte der Substratschicht gestaltet sich zunächst nicht ganz einfach, da mehrere Einflussparameter wie Feuchtespeicherung, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Flüssigtransport parallel optimiert

werden müssen, um eine gute Übereinstimmung mit der einzelnen Messung in Holzkirchen zu erzielen.

Da die Niederschlagsfeuchte vom Substrat nicht nur durch dessen Kapillarleitung aufgenommen wird, sondern auch mit der Schwerkraft durch die Deckschicht nach unten durchsickert, können die Feuchteverhältnisse nicht allein über die Kapillarleitung simuliert werden. Es muss zusätzlich ein Teil des Niederschlagswasser über eine Feuchtequelle direkt ins Substrat eingebracht werden. Die Berechnungen ohne eine solche Feuchtequelle ergeben entweder eine zu geringe Wasseraufnahme bei Niederschlag oder eine zu schnelle Trocknung der Deckschichten in wärmeren Perioden. Die Quelle im Substrat beschränkt sich auf die unteren zwei Zentimeter der Schicht, da im unteren Bereich immer die höchsten Feuchten vorherrschen und sich das durchsickernde Wasser hier ggf. länger staut. In diesen Bereich werden 40 % des auftreffenden Niederschlags bis zum Erreichen der freien Sättigung des Materials eingebracht.

Der farbliche Eindruck der Dächer ist je nach Bepflanzungsdichte grün bis braun. Dies lässt zunächst auf eher hohe Strahlungsabsorptionszahlen der Dachoberfläche zwischen etwa 0,6 und 0,8 schließen. Da die Substratschichten thermisch sehr träge sind, bleibt der Einfluss der kurzfristigen nächtlichen Unterkühlung aufgrund der Strahlungsemission gering. Da bei den Klimadaten häufig auch gar keine gemessenen Gegenstrahlungsdaten zur Verfügung stehen, werden die Simulationen ohne direkte Berücksichtigung der Strahlungsemission durchgeführt. Die langwellige Abstrahlung wird stattdessen über eine pauschale Reduktion der kurzwelligen Strahlungsabsorption mit erfasst. Bei der Nachberechnung kann eine gute Übereinstimmung mit den Temperaturmesswerten nur erzielt werden, wenn die Strahlungsabsorptionszahl im Bereich zwischen 0,3 und 0,4 liegt, was eigentlich einer hellen Oberfläche entspricht. Diese niedrigen Werte können nicht nur auf die implizit mit berücksichtigte langwellige Strahlungsemission zurückgeführt werden, vielmehr scheinen sie auch zu bestätigen, dass ein signifikanter Teil der Strahlung an der Oberfläche der Pflanzen absorbiert wird und die Wärme von da aus nur teilweise an die eigentliche Substratoberfläche weitergegeben wird.

Das Ergebnis für die Temperaturberechnung in Holzkirchen ist in Bild 21 im Vergleich mit den Messdaten dargestellt. Die hellen Kurven zeigen jeweils die stündlichen Werte, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel. Der Vergleich der stündlichen Mess- und Rechenwerte zeigt, dass beide Kurven über weite Teile des Jahres weitgehend parallel verlaufen – nur im Winter weichen die berechneten Temperaturen nach oben wie nach unten erkennbar von der Messung ab. Grund dafür ist die in der Simulation nicht berücksichtigte Schneedecke, unter der meist Temperaturen um den Gefrierpunkt herrschen, die nur bei längeren Kälteperioden unterschritten und erst nach vollständigem Abschmelzen überschritten werden. Die gleitenden Monatsmittel der gemessenen und berechneten Werte zeigen im Frühjahr und im Herbst eine sehr gute Übereinstimmung, im Sommer und im Winter liegt das gleitende Monatsmittel der Berechnung unterhalb der Messung und somit auf der sicheren Seite. Die Jahresmitteltemperatur der Messung liegt bei 9,15 °C, bei der Rechnung bei 8,71 °C.

Gründächer in Leipzig und Wien

Durch die Zusammenarbeit mit der MFPA Leipzig und der Holzforschung Austria im Rahmen anderer Forschungsprojekte stehen dem IBP Messdaten zweier Freilandversuche zu begrünten Holzdachkonstruktionen in Leipzig [25] und in Wien [26] zur Verfügung. Auch wenn es sich hierbei nicht um Umkehrdächer handelt, dienen die Informationen doch der verbesserten Abbildung einer generischen Gründacheindeckung. Denn insbesondere Leipzig weist ein deutlich trockeneres Klima auf als Holzkirchen und Wien, so dass anhand der Austrocknungsperioden dort die Feuchtespeicherung der Substratschicht genauer angepasst werden kann.

In Leipzig und Wien wurden die Gründächer auf Dachkonstruktionen aus Holz aufgebracht, wobei verschiedene Konstruktionsvarianten untersucht wurden. Im Folgenden wird nur jeweils eine Konstruktionsvariante mit möglichst vollständigen Messwerten zur Nachberechnung herangezogen. In Wien ist auf der Raumseite eine 16 mm dicke MDF-Platte sowie eine feuchtevariable Dampfbremse und auf der Außenseite eine 20 mm dicke OSB-Platte angeordnet. Die Dämmung ist aus Mineralwolle und 28 cm dick. Auf der OSB-Platte befindet sich eine Abdichtungsbahn und darüber eine 8 cm dicke Substratschicht. Das in Leipzig betrachtete Versuchsfeld hatte eine beidseitige Beplankung aus OSB – 15 mm auf der Raumseite und 22 mm auf der Außenseite – mit 22 cm Zellulosefaserdämmung zwischen den Sparren. Die 6 cm dicke Substratschicht liegt auf einer PVC-Dachbahn. An beiden Standorten wurden während des Versuchszeitraums die Innen- und Außenklimabedingungen mit allen relevanten Elementen inklusive Niederschlag aufgezeichnet und werden im Folgenden für die Nachberechnung der Versuche verwendet.

Die Material- und Übergangsbedingungen werden mit den neuen Messdaten nun iterativ soweit optimiert, dass für alle drei Freilandversuche (Holzkirchen, Wien und Leipzig) eine insgesamt möglichst optimale, aber auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielt wird.

Bild 22 zeigt die mit den angepassten Eigenschaften nochmals berechneten Temperaturverhältnisse unter der Begrünung in Holzkirchen. Eine genauere Auswertung ergibt in Holzkirchen für das Gesamtjahr eine in der Berechnung im Mittel um $-0,87$ K niedrigere Temperatur bei einer Abweichung von $-1,66$ K im Sommer und $-1,3$ K im Winter. In Wien (Bild 23) ist die Übereinstimmung von Messung und Rechnung noch besser: die Abweichung beträgt im Jahresmittel nur $-0,02$ K bei $-0,55$ K im Sommer und $0,46$ K im Winter. In Leipzig (Bild 24) beträgt die mittlere Differenz $-0,15$ K im Gesamtjahr bei $0,26$ K im Sommer und $-0,49$ K im Winter.

Die Abweichung der Temperaturen ist somit in Holzkirchen etwas größer als an den beiden anderen Standorten. Hier wäre mit einer Strahlungsabsorptionszahl von $0,4$ eine bessere Übereinstimmung zu erzielen gewesen (siehe Bild 21). Grund dafür ist, dass die Pflanzendeckschicht auf dem Dach in Holzkirchen nur gering ausgebildet und in großen Teilen der Dachfläche das dunklere Substrat sichtbar war. Da an den beiden anderen Standorten die berechneten Temperaturen mit einer Absorptionszahl von $0,4$ jeweils höher liegen würden

als in der Messung, wird für den Modellansatz einheitlich der Wert von 0,3 verwendet. Dies ist auch deswegen sinnvoll, weil eine nicht deckende Bepflanzung bei einem solchen Dach einen allenfalls vorübergehenden Zustand darstellen sollte.

Insgesamt kann damit für die Temperaturverhältnisse an allen Standorten von einer guten Übereinstimmung der Berechnungs- mit den Messwerten gesprochen werden, die eine Beurteilung von Dachbegrünungen mit dem neuen Modell auf der sicheren Seite liegend ermöglicht. Die genauen Materialeigenschaften sind in Tabelle 7 dargestellt. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt $19 \text{ W/m}^2\text{K}$ und die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl 0,3. Die langwellige Strahlungsemissionszahl wird wie oben beschrieben nicht direkt berücksichtigt, also zu Null gesetzt.

Aufbau der XPS-Platten

XPS-Dämmplatten weisen produktionsbedingt über den Querschnitt keine homogenen Materialkennwerte auf – insbesondere beim Diffusionswiderstand ist ein Gefälle von den sehr dichten Schäumhäuten zum diffusionsoffeneren Kern der Platte festzustellen. Um diese Verteilung abbilden zu können werden die Schäumhäute bei der Messung häufig mit einer Deckschicht von 5 oder 10 mm Dicke (dünnere Deckschichten sind schwierig abzunehmen) von der Platte abgenommen und die Eigenschaften separat bestimmt. Im Zuge der Nachberechnung der Feuchtegehalte und Verteilungen in den Dämmplatten war festzustellen, dass die 5 oder 10 mm dicken Deckschichten mit moderat erhöhtem Diffusionswiderstand die realen Verhältnisse nicht gut wiedergeben – deutlich besser ist die Übereinstimmung, wenn die Platte in einen dickeren homogenen Kern und in nur 1 mm dicke Schäumhäute mit entsprechend höherem μ -Wert unterteilt wurde. Auf Basis der Messungen ergeben sich hier im Vergleich zum Kern um den Faktor 20 (Hersteller A) bzw. Faktor 15 (Hersteller B) dichtere Schäumhäute. Eine weitere Abstufung der Eigenschaften in Richtung Plattenmitte erzielte dagegen nur noch vernachlässigbar bessere Ergebnisse in der Simulation. Eine nur 1 mm dicke Schäumhaut entspricht auch am ehesten den in Realität optisch erkennbar verdichteten Bereichen direkt an der Plattenoberfläche und wird für alle weiteren Berechnungen in dieser Form angesetzt.

Nachrechnung der Versuchsdächer am Standort Holzkirchen

Von den in Kapitel 3.1 beschriebenen Versuchsdächern werden im Folgenden die nachberechnet, für die auch 2004 noch einmal ein Wassergehalt in der XPS-Dämmplatte gemessen werden konnte. Dies sind das Dach 3 mit den zwei verschiedenen Dämmplattentypen sowie die Dächer 5 und 6.

Für die Nachrechnung von Dach 3 am Standort Holzkirchen wird der folgende Bauteilaufbau in WUFI® betrachtet (von innen nach außen):

- Beton	12 cm
- Dachabdichtung	
- wasserführende Schicht	
- XPS-Schäumhaut	0,1 cm
- XPS-Kern	9,8 cm
- XPS-Schäumhaut	0,1 cm
- Blähton (Kies)	5 cm
- Substrat	6 cm

Für die Betondecke werden die Kennwerte von „Beton C35/45“ aus der WUFI®-Materialdatenbank verwendet. Die Kennwerte des XPS-Kerns und der XPS-Schäumhaut werden zunächst ebenfalls der WUFI®-Materialdatenbank entnommen, aber entsprechend den Herstellerangaben für Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und μ -Wert den damals eingesetzten Dämmplatten angepasst. Die Schäumhäute werden hierfür, wie oben beschriebenen, mit einer Dicke von 1 mm angesetzt. Für die Berechnungen wird der Blähton vereinfachend durch die Kennwerte der Kiesschicht (Tabelle 6) abgebildet, da der Versuch die Feuchtespeicherung dieser Schicht zu erhöhen nicht zu besseren Übereinstimmungen mit der Messung geführt hat. Die Materialkenndaten für die zuvor optimierte Substratschicht werden entsprechend Tabelle 7 verwendet.

Tabelle 7: Materialkennwerte für die Substratschicht.

Rohdichte		1500	kg/m ³
Porosität		0,5	
Wärmekapazität trocken		1500	J/kgK
Wärmeleitfähigkeit, 10°C	0 kg/m ³	0,9	W/mK
	300 kg/m ³	1,5	W/mK
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		5,0	
Bezugsfeuchtegehalt		12	kg/m ³
Freie Wassersättigung		300	kg/m ³
Flüssigtransportkoeffizient Saugen	12 kg/m ³	10e-10	m ² /s
	300 kg/m ³	10e-6	m ² /s
Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen	12 kg/m ³	10e-10	m ² /s
	300 kg/m ³	10e-7	m ² /s

Die Berechnungen werden über den Untersuchungszeitraum vom 28. November 1985 bis zum 30. November 2004 mit Hilfe der über die gesamte Zeit erfassten Außenklimadaten durchgeführt. Die Räumlichkeiten unter dem Versuchsaufbau wurden vor allem als Labor- und Lagerräume

genutzt. Daher wird das Innenklima mit einem sinusförmigen Verlauf der Temperatur zwischen 16 °C und 22 °C und der relativen Feuchte zwischen 40 % und 60 % angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient an der Außenseite beträgt 19 W/m²K und an der Innenseite 8 W/m²K. Die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl wird mit 0,3 berücksichtigt, die langwellige Strahlungsemissionszahl wird zu Null gesetzt – wie oben bei der Optimierung der Substratschicht beschrieben.

Der bereits beschriebene Feuchtefilm unter den Dämmplatten wird in WUFI® durch eine 1 mm dicke Wasserschicht simuliert, in welche ein geringer Prozentsatz des Niederschlags als Feuchtequelle eingebracht wird. In der zu Beginn des Projekts noch verwendeten Version 4.2 von WUFI® war zunächst noch keine Begrenzung der Feuchtequellen möglich – zu große Quellmengen, die eine Übersättigung des Materials zur Folge haben, führten allerdings zu einem Absturz des Programms. Somit musste die Quellmenge soweit reduziert werden, dass beim stärksten Niederschlagsereignis während der 20 Jahre der eingebrachte Anteil nicht zu einer Übersättigung führt. Damit lag das Feuchteniveau aber in den übrigen Zeiten des Messzeitraums zu niedrig – insbesondere im Jahr 2003 konnte in dem warmen und trockenen Sommer ein Großteil der Feuchte der Vorjahre wieder austrocknen, was im Kontext der Messungen sehr unrealistisch erscheint. In WUFI® 5 wurde daher die Quellfunktion entsprechend erweitert, so dass bei geringeren Regenereignissen der Feuchtefilm bereits „gesättigt“ wird, bei größeren Regenmengen das überschüssige Wasser aber einfach ablaufen kann – sprich in der Berechnung ignoriert wird. Mit diesem Ansatz wird der Feuchtefilm über einen Großteil des Berechnungszeitraums aufrecht erhalten. Für die Simulation wird nun 1 % des Niederschlags in die wasserführende Schicht eingebracht und auf einen Wert für die freie Wassersättigung von 850 kg/m³ begrenzt – dieser hat sich bei Vergleichsberechnungen als gut geeignet herausgestellt.

Bild 26 zeigt die Nachrechnung des Daches 3 mit den Dämmplatten des Herstellers A. Die Feuchteverläufe in den Dämmplatten lassen sich dabei gut nachberechnen, wobei die Berechnung leicht auf der sicheren Seite liegt. Bis auf den Messwert von 1991, der direkt auf der Berechnungskurve liegt, sind die berechneten Werte jeweils etwas höher als die gemessenen. In 2004 wird bei der Berechnung ein Wassergehalt von etwa 6 Vol.-% erreicht, während bei der Messung nur 5 Vol.-% ermittelt wurden. Bild 27 zeigt die Feuchtegehalte von Dach 3 in den Dämmplatten des Herstellers B. Die Dämmung wird aufgrund der geringeren μ -Werte erwartungsgemäß sowohl in der Messung als auch in der Berechnung deutlich feuchter. Auch hier liegen die berechneten Werte meist über den gemessenen – nur der Messwert im Frühjahr 1991 ist mit 4 Vol.-% etwa 0,3 Vol.-% höher als der berechnete Wert. Gegen Ende des Versuchszeitraums werden in der Berechnung knapp 11 Vol.-% gegenüber knapp 9 Vol.-% in der Messung erreicht. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind bei den Feuchtemessungen der Dämmplatten allgemein große Streuungen der Werte zu beobachten – dies fällt vor allem in Bild 28 auf. Diese Streuung erfordert bei der Beurteilung eines solchen Daches durch eine hygrothermische Simulation eine etwas größere Sicherheit – so dass die hier erzielte Übereinstimmung am oberen Rand der tendenziell ebenfalls klar steigenden Messwerte als zufriedenstellend bezeichnet werden kann.

In Dach 5 wurde mit 8 cm eine etwas dünnere Dämmung mit Dränrillen eingebaut. Die nachträglich gefrästen Dränrillen beschädigen die oberseitige Schäumhaut und reduzieren dadurch deren Diffusionswiderstand. Sie werden in der Berechnung daher durch eine Reduktion des μ -Wertes der Schäumhaut berücksichtigt. Bild 28 zeigt den Verlauf des Wassergehalts in Abhängigkeit von der Reduktion des μ -Wertes der oberen Schäumhaut. Wird dieser halbiert, ergibt sich der Wassergehaltsverlauf nach der roten Kurve. Wird nur ein Viertel des ursprünglichen μ -Wertes angesetzt, ergibt sich der Verlauf nach der grünen Kurve. Da die rote Kurve sowohl den Messwert von 1994 als auch den von 2004 besser abbildet als die grüne Kurve wird dieser Ansatz gewählt. Damit liegen der berechnete Endwassergehalt nach 19 Jahren bei etwa 7,5 Vol.-% gegenüber 7 Vol.-% in der Messung.

Die Nachrechnung der Wassergehalte in den XPS-Dämmplatten des Daches 6 sind in Bild 29 dargestellt. Der berechnete Verlauf des Wassergehalts liegt hier nicht wie bei den anderen Dächern meist auf der sicheren Seite, sondern vor allem in den letzten 15 Jahren immer um etwa 1 Vol.-% unterhalb der Messwerte. Die Abweichung von der Messung in 1994 ist noch größer – hier ist aber die Zuordnung des Messwerts zu diesem Dach nicht sicher möglich, so dass dies vernachlässigt wird. Der Grund für die Abweichung könnte hier sein, dass keine genauen Materialkennwerte für die bitumengebundene Dränplatte ermittelt werden konnten. Schlechtere Dämmeigenschaften als angenommen führen bereits wieder zu höheren Wassergehalten in der XPS-Dämmung.

Nachrechnung der Objektuntersuchungen des FIW

Auch die in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsdächer des FIW werden mit dem zuvor beschriebenen Ansatz ohne weitere Anpassungen simuliert. Der Aufbau der Unterkonstruktion wird entsprechend den Objektbeschreibungen berücksichtigt. Da für diese Dächer jedoch keine gemessenen Außenklimadaten vorliegen, werden jeweils drei verschiedene Außenklimadatensätze verwendet: die für den jeweiligen Zeitraum stündlich gemessenen Klimadaten vom Standort Holzkirchen ohne Veränderung; die gleichen Daten mit einem pauschalen Höhen-Korrekturfaktor für die Temperatur nach [27] (0,7 K Korrektur pro 100 m Höhenunterschied) oder das jeweils für den Gebäudestandort gültige Testreferenzjahr des DWD.

Bild 30 zeigt die Nachrechnung des Wassergehalts in den XPS-Dämmplatten einer Schule in Nürnberg. Die blaue Kurve stellt den Wassergehalt unter Verwendung des gemessenen Klimas in Holzkirchen für die Jahre 2003 bis 2007 dar. Das Außenklima der grünen Kurve ist ebenfalls das gemessene Klima in Holzkirchen, jedoch mit einer pauschalen Temperaturkorrektur von +2,6 K, da Nürnberg etwa 370 m tiefer liegt als Holzkirchen. Bei der Berechnung werden also in jedem Zeitschritt 2,6 K zu der in Holzkirchen gemessenen Temperatur addiert, die relative Feuchte ändert sich dabei nicht. Die orange Kurve zeigt den Wassergehalt bei Ansetzen des Testreferenzjahres von München. Es wird deutlich, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen Klimaansätzen sehr gering ist. Im Vergleich zum Messwert liegen alle berechneten Verläufe des Wassergehalts um etwa 0,3 Vol.-% höher als der Messwert und damit etwas mehr auf der sicheren Seite.

Bei einem Bürogebäude (IBM) in München wurden neben dem Wassergehalt in der gesamten XPS-Dämmstoffplatte auch die Wassergehalte in einzelnen Schichten bestimmt. Die Nachrechnung des Wassergehalts in der gesamten Schicht ist in Bild 31 dargestellt und zeigt für alle drei Außenklimate eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Messwert. Für das in Holzkirchen gemessene Klima mit einer Korrektur von +1,05 K sind in Bild 32 die Wassergehalte in den einzelnen Schichten (jeweils 35 mm dick) dargestellt. Es zeigt sich, dass zwar der Wassergehalt in der gesamten Schicht sehr gut mit dem Messwert übereinstimmt, die Verteilung der Feuchte über den Querschnitt jedoch nicht genau abgebildet werden kann (Bild 32). Für eine genaue Abbildung der Feuchteverteilung innerhalb der Platte scheint die Unterteilung in Schäumhaut und Kern zu grob zu sein. Da für die Bewertung der erhöhten Wärmeleitfähigkeit nur der Gesamtwassergehalt der Platte erforderlich ist, erscheint eine genauere Differenzierung nicht erforderlich.

Auch für die Nachberechnung eines Mehrfamilienhauses im schweizerischen Wil (Bild 33) werden drei verschiedene Außenklimabedingungen angesetzt. Neben den Klimadaten vom Standort Holzkirchen ohne (blaue Kurve) und mit Höhenkorrektur (mittelgrüne Kurve) wird ein repräsentatives kaltes Züricher Jahr verwendet (orange Kurve). Da dieses Dach nur sehr spärlich begrünt war, werden zusätzlich Berechnungen mit dem korrigierten Holzkirchener Klima und einer höheren Strahlungsabsorptionszahl von $a = 0,4$ (hellgrüne Kurve) und $a = 0,5$ (dunkelgrüne Kurve) durchgeführt. Diese höheren Strahlungsabsorptionszahlen berücksichtigen, dass bei einem schwach begrüntem Dach ein Großteil der Strahlung direkt auf die Dachoberfläche gelangt und nicht an der Oberfläche der Pflanzen absorbiert wird. Mit der höheren Strahlungsabsorption liegen die Berechnungsergebnisse etwas näher an der gemessenen Feuchte, der Einfluss ist allerdings eher gering. Bei der Bemessung sollte zudem eher von einer tatsächlich vorhandenen Begrünung als von einer dunklen Substratoberfläche ausgegangen werden.

Bei dem Dach des Pflegezentrums in Schaffhausen (Schweiz) handelt es sich um ein reines Kiesdach, das 1997 erstellt wurde und bei dem die Dämmstofffeuchte nach 8 Jahren in Frühjahr 2005 ermittelt wurde. Neben den beiden Holzkirchener Klimadatensätzen wird hier je ein repräsentatives kaltes und warmes Züricher Jahr bei der Berechnung verwendet. Bild 34 zeigt die Ergebnisse der Wassergehaltsverläufe für die verschiedenen Klimadaten, die nur geringfügig voneinander abweichen. Sie liegen mit im Mittel etwa 1,2 Vol.-% nach 5 Jahren allerdings alle deutlich über dem im Jahr 2005 gemessenen Wert von etwa 0,2 Vol.-%. Allerdings ist am Verlauf der Berechnungswerte auch bereits erkennbar, dass sich auch langfristig Werte unter 2 Vol.-% - und damit nur sehr geringe Feuchtezuschläge ergeben werden.

Bild 35 zeigt den Anstieg des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Dach eines Bürohauses in München, das 2003 errichtet und 2007 für die Messung geöffnet wurde. Die Klimarandbedingungen sind die gleichen wie in Bild 32. Der Unterschied im Feuchtegehalt der Dämmung für die einzelnen Außenklimate ist wiederum nur gering. Die Nachberechnung liegt allerdings mit 1,5 Vol.-% etwas deutlicher über dem Messwert von 1,1 Vol.-% als bei dem vorigen Bürogebäude. Wie bei dem anderen Bürogebäude liegen auch hier Messwerte für die Verteilung der Feuchte innerhalb der Dämmung vor (Bild

36). Die Übereinstimmung ist hier zwar etwas besser als in Bild 32, die fehlende Abstufung der Diffusionswiderstände über die Dämmdicke geht aber auch hier auf Kosten einer genauen Verteilungskurve.

Zusammenfassung

In Anbetracht der großen Streuung und Abweichung bei den Messwerten untereinander, der Erfordernis mit einem Berechnungsmodell verschiedene Begrünungs- bzw. Bekiesungssituationen abzubilden sowie der gerade bei den Objektuntersuchungen nur dünnen Datenbasis mit unbekanntem Nutzungs- und Außenklimadaten führt der gewählte Ansatz zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

Die Feuchtezunahme kann mit dem gewählten Modell in Abhängigkeit von der lokalen Niederschlagsbelastung, den Außenluftbedingungen, der Nutzung, den Materialeigenschaften des Dämmstoffs und den gewählten Konstruktionen und Deckschichten bestimmt werden. Die Ergebnisse liegen in den meisten Fällen moderat auf der sicheren Seite.

4 Feuchte- und wärmetechnische Materialkennwerte von XPS-Dämmstoffen

Für die XPS-Dämmstoffe mit den ursprünglichen Treibmitteln FCKW 12 und der Nachfolgenerationen HFCKW 22 und HFCKW 142b lagen eine ganze Palette von Messwerten der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ sowie für die Abhängigkeit der Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt vor.

Für die nachfolgenden Generationen von XPS-Dämmstoffen lagen nahezu keine öffentlich zugänglichen Messwerte vor. Hinzu kommt, dass in den letzten Jahren die Dämmschichtdicken stark angestiegen sind. Erfahrungsgemäß besitzt die Schäumhaut eine deutlich höhere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl als der XPS-Kern. Durch den Anstieg der Dämmschichtdicken sinkt der Anteil der Schäumhaut am gesamten Wasserdampfdiffusionswiderstand (s_d), die "mittlere Wasserdampfdiffusionszahl μ " wird also kleiner.

Darüber hinaus sind die Umrechnungsfaktoren für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt in DIN EN ISO 10456 f_m mehr als 20 Jahre alt. Aus all diesen Gründen ist eine Überprüfung der Materialkennwerte von XPS-Dämmstoffen dringend notwendig.

4.1 Wasserdampfdiffusionswiderstand

Bei der Auswahl der zu untersuchenden XPS-Dämmstoffe wurde der Schwerpunkt auf die heute verwendeten Treibmittel gelegt, die auch heute im Umkehrdach (Ausführung als Gründach) verwendet werden. Ausgewählt wurden XPS-Dämmstoffe mit den folgenden Treibmitteln in jeweils 2 Nenndicken:

- CO₂, Nenndicke 50 mm und 120 mm
- CO₂/Isobutan, Nenndicke 50 mm und 140 mm
- HFCKW 134a, Nenndicke 100 mm und 160 mm.

Diese Messwerte der Zellgaszusammensetzung sind in Tabelle 8 dargestellt. Die angegebenen Treibmittel wurden wiedergefunden und damit bestätigt.

Tabelle 8: Zellgaszusammensetzung der untersuchten Proben.

Treibmittel	CO ₂	CO ₂ /Isobutan	HFKW 134a
Luft CO ₂	99 < 1		
Luft Isobutan Ethanol CO ₂		88 9 2 < 1	
Luft HFKW 134a CO ₂			73 26 < 1

Es sollte jeweils eine kleine Nenndicke 50 mm und eine große Nenndicke 120 mm bis 160 mm geprüft werden. Da das Treibmittel HFKW 134a normalerweise nur eingesetzt wird, wenn die niedrige Wärmeleitfähigkeitsstufe aus Gründen der Aufbauhöhe oder der Dickenbeschränkung bei der Produktion notwendig ist, werden die Dämmplatten mit Schäumhaut normalerweise nur in Dicken von mindestens 100 mm oder größer hergestellt. Deshalb konnten auch nur diese Dicken geprüft werden.

In Tabelle 9 bis Tabelle 14 sind die gemessenen Werte der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-] und der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke s_d nach aufgeschnittenen Schichten getrennt dargestellt.

Tabelle 9: μ -Wert einer XPS-Platte, mit CO₂ getrieben, Dicke 50 mm

mm	d [mm]	μ	$s_d = \mu \cdot d$ [m]
Rand [mm]	5,45	350	1,9
Kern [mm]	35,25	155	5,5
Rand [mm]	5,4	340	1,8
Gesamt			9,2
mittl. äquiv. μ-Wert:		200	

Tabelle 10: μ -Wert einer XPS-Platte, mit CO₂ getrieben, Dicke 120 mm

	d [mm]	μ	$s_d = \mu \cdot d$ [m]
Rand [mm]	5,4	380	2,1
Kern [mm]	107,75	107	11,5
Rand [mm]	5,4	356	1,9
Gesamt			15,5
mittl. äquiv. μ-Wert:		131	

Tabelle 11: μ -Wert einer XPS-Platte, mit CO₂ und Isobutan getrieben, Dicke 50 mm

	d [mm]	μ	$s_d = \mu \cdot d$ [m]
Rand [mm]	5,3	175	0,9
Kern [mm]	37,5	91	3,4
Rand [mm]	5,3	175	0,9
Gesamt			5,3
mittl. äquiv. μ-Wert:		110	

Tabelle 12: μ -Wert einer XPS-Platte, mit CO₂ und Isobutan getrieben, Dicke 140 mm

	d [mm]	μ	$s_d = \mu \cdot d$ [m]
Rand [mm]	10,1	165	1,7
Kern_außen [mm]	30,1	126	3,8
Kern innen [mm]	54,8	108	5,9
Kern außen [mm]	29,8	129	3,8
Rand [mm]	10,1	174	1,8
Gesamt			17,0
mittl. äquiv. μ-Wert:		126	

Tabelle 13: μ -Wert einer XPS-Platte, mit HFKW 134a getrieben, Dicke 100 mm

	d [mm]	μ	$s_d = \mu \cdot d$ [m]
Rand [mm]	5,1	295	1,5
Kern_außen [mm]	20	186	3,7
Kern innen [mm]	44,1	147	6,5
Kern außen [mm]	19,9	183	3,6
Rand [mm]	5	293	1,5
Gesamt			16,8
mittl. äquiv. μ-Wert:		179	

Tabelle 14: μ -Wert einer XPS-Platte, mit HFKW 134a getrieben, Dicke 160 mm

	d [mm]	μ	$s_d = \mu \cdot d$ [m]
Rand [mm]	5	374	1,9
Kern_außen [mm]	34,8	148	5,1
Kern innen [mm]	76,7	114	8,8
Kern außen [mm]	34,8	144	5,0
Rand [mm]	4,9	374	1,8
Gesamt			22,6
mittl. äquiv. μ-Wert:		145	

Bei allen XPS-Platten mit 3 Treibmitteln zeigt sich, dass die Schäumhaut einen deutlich höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand als der Kern aufweist.

Bei der Darstellung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke in Abhängigkeit der Dicke (Bild 37) scheint der s_d -Wert für die Treibmittel CO_2 und HFKW 134 geringfügig höher zu sein, als für das Treibmittel CO_2 /Isobutan. Für eine allgemeine Aussage sind aber 2 Messwerte sicher zu wenig.

4.2 Wärmeleitfähigkeit und Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt

Der wichtigste feuchte- und wärmeschutztechnische Kennwert eines Wärmedämmstoffs ist die Wärmeleitfähigkeit und im Hinblick auf die zu untersuchenden Dächer die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Da die veröffentlichten Literaturwerte (z. B. DIN EN ISO 10456) mehr als 20 Jahre alt sind und sich vor allem auf andere Treibmittel und Gaszusammensetzungen bezogen, waren neue Untersuchungen dringend notwendig.

Befeuchtung

Die künstlich beschleunigte Wasseraufnahme der zu messenden Wärmeleitfähigkeitsproben mit den Abmessungen Dicke 500 mm x 500 mm erfolgte im Diffusionsversuch nach EN 12088. Dazu wird ein Probekörper in Originaldicke mit Schäumhaut über einem Wasserbad von 50 °C eingebaut. Auf der Kaltseite befindet sich eine Kühlplatte mit einer Temperatur von +1 °C.

Damit herrscht an der XPS-Probe ein extrem hohes Wasserdampfdruckgefälle, das die Wasseraufnahme beschleunigen soll. Damit die Wasseraufnahme von beiden Seiten erfolgen kann und damit eine möglichst gleichmäßige Feuchteverteilung erreicht wird, wird der Probekörper einmal wöchentlich gewendet, so dass der Probekörper einmal von einer Schäumhautseite beansprucht wird und in der nächsten Woche von der anderen Schäumhautseite.

Als Ausgangsmessung für die künstlichen Befeuchtungsversuche wurden an XPS-Probekörpern mit den Abmessungen 500 mm x 500 mm Dicke, die Abmessungen, die Masse, die Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C Mitteltemperatur nach EN 12667 bestimmt, bei einer Temperaturdifferenz von 15 K.

Die Probekörper wurden im 1. Befeuchtungszyklus 8 Wochen im Diffusionsversuch nach EN 12088 bei wöchentlichem Wenden befeuchtet. Trotz der sehr langen Befeuchtungszeit stellte sich vor allem bei den 100 mm dicken XPS-Probekörpern nur eine sehr geringe Feuchtezunahme von 0,49 bis 0,63 Vol.-% ein. Anschließend wurden die Probekörper in 0,2 mm dicke Polyethylenfolie (quasi wasserdampfdicht) verpackt und 3 Wochen zum Erreichen der möglichst gleichmäßigen Feuchteverteilung bei Raumtemperatur gelagert.

Nach der 3-wöchigen Lagerung wurde die Wärmeleitfähigkeitsmessung mit dem 500 mm Wärmestrommessplattengerät nach EN 12667 mit einer Temperaturdifferenz von 9,5 K erneut gemessen.

Im Anschluss daran erfolgte der 2. Befeuchtungszyklus von 8 Wochen im Diffusionsversuch, mit 3-wöchiger Lagerung in Polyethylenfolie und anschließender Wärmeleitfähigkeitsmessung bei ca. 9,5 K.

Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen im feuchten Zustand wurden bei einer geringeren Temperaturdifferenz durchgeführt, um ein „Wandern“ der aufgenommenen Feuchte durch Wasserdampfdruckgefälle zu verhindern. Die Ergebnisse der Wasseraufnahme und der Wärmeleitfähigkeitsmessungen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Änderung der Wärmeleitfähigkeit nach Befeuchtung durch Diffusion

Treibmittel		CO ₂	CO ₂ /Isobutan	HFKW 134a
	[mm]	50	100	100
Herstelldatum		15.07.2009	06.06.2010	31.03.2008
Alter der Proben zum Zeitpunkt der Trockenmessung	[Wochen]	79	32	146
Wärmeleitfähigkeit "trocken"	[W/(m·K)]	0,0332	0,0358	0,0279
Wasseraufnahme durch Diffusion	[Vol.-%]	2,38	0,63	0,49
Wärmeleitfähigkeit "feucht 1"	[W/(m·K)]	0,0355	0,0375	0,028
Wasseraufnahme durch Diffusion	[Vol.-%]	4,39	1,64	1,33
Wärmeleitfähigkeit "feucht 2"	[W/(m·K)]	0,0361	0,0376	0,0281
Änderung Wärmeleitfähigkeit "feucht 1" zu "trocken"	[W/(m·K)]	0,0023	0,0017	1E-04
Änderung Wärmeleitfähigkeit "feucht 1" zu "trocken"	[%]	6,9%	4,7%	0,4%
Änderung Wärmeleitfähigkeit "feucht 2" zu "trocken"	[W/(m·K)]	0,0029	0,0018	0,0002
Änderung Wärmeleitfähigkeit "feucht 2" zu "trocken"	[%]	8,7%	5,0%	0,7%
mittl. Änderung der Wärmeleitfähigkeit pro Vol.-% Feuchte	[(W/(m·K))]/%	2,0%	3,0%	0,5%

Bewertung der Wärmeleitfähigkeitsmessungen

Trotz der extrem langen Befeuchtungszeiträume (insgesamt 16 Wochen im Diffusionsversuch, Gesamtdauer der Versuchsreihe ca. 6 Monate) betrug die Feuchteaufnahme bei den 50 mm dicken CO₂-getriebenen XPS-Platten 4,39 Vol.-% und bei den 100 mm dicken XPS-Platten mit dem Treibmittel CO₂ / Isobutan bzw. HFKW 134a 1,33 Vol.-% bis 1,64 Vol.-%.

Die Feuchteaufnahme bei den 100 mm dicken HFKW 134a getriebenen XPS-Platten ist zu gering, um deutlich messbare Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit feststellen zu können. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von 0,0002 W/(m·K) oder 0,7 % liegt im Bereich der Messunsicherheit von ca. ±3 % nach EN 12667 für Messungen im feuchten Zustand.

Eine Überprüfung der Feuchteverteilung ergab, dass sowohl bei der CO₂ / Isobutan getriebenen XPS-Probe als auch bei der HFKW 134 getriebenen Probe eine ziemlich gleichmäßige Feuchteverteilung vorlag. Die Feuchteverteilung scheidet damit als Ursache für den geringen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit aus.

Eine Verlängerung der Feuchteaufnahme im Diffusionsversuch nach EN 12088 war aus Zeitgründen und Kapazitätsgründen nicht möglich. Eine Verringerung der Nenndicke von 100 mm auf z.B. 50 mm hätte durch das Abschneiden der diffusionsdichteren Schäumhäute die Eigenschaften der Probekörper verändert. In kleineren Dicken wird HFKW 134a getriebener XPS-Schaum in Deutschland nicht hergestellt, so dass diese Dicken auf dem Markt und in der Praxis nicht verfügbar sind.

Lässt man die wegen zu geringer Wasseraufnahme und Änderung der Wärmeleitfähigkeit HFKW 134a getriebenen XPS-Probe aus der Bewertung heraus, dann ergibt sich für die CO₂- und CO₂ / Isobutan getriebenen XPS-Proben eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit von 2,0 bis 3,0 % pro Vol.-% Feuchte. Diese Änderungen der Wärmeleitfähigkeit korrelieren ziemlich gut mit dem Umrechnungsfaktor der DIN EN ISO 10456 für den volumenbezogenen Feuchtegehalt $f_{\psi} = 2,5$.

Dem Benutzer dieser Feuchteumrechnungsfaktoren muss allerdings bewusst sein, dass diese Umrechnungsfaktoren selbstverständlich mit Fehlern behaftet sind (Messunsicherheit, Feuchtwanderung usw.). In der Praxis hängt die Änderung der Wärmeleitfähigkeit nicht nur vom mittleren Feuchtegehalt einer Dämmstoffplatte ab, sondern auch von der Feuchteverteilung in der Platte. Es ist z.B. denkbar, dass nur die äußeren 5 % einer XPS-Dämmstoffplatte stark mit Feuchte gesättigt sind, die anderen 95 % aber weitgehend trocken sind. Dabei ergibt sich sicher ein anderes Feuchteverteilungsintegral und eine andere Wärmeleitfähigkeit, wie bei gleichmäßig verteilter Feuchte.

Aus all diesen Überlegungen heraus wird empfohlen, weiterhin mit dem Umrechnungsfaktor $f_{\psi} = 2,5$ für die neuen Treibmittel und aktuellen Dicken zu rechnen.

5 Definition neuer Wärmeleitfähigkeits-Zuschläge auf Basis langfristiger hygrothermischer Simulationen

5.1 Simulation des langfristigen hygrothermischen Verhaltens typischer Umkehrdachkonstruktionen

Auf Basis der in Kapitel 3 ermittelten feuchtetechnischen Randbedingungen in den Deckschichten und unter den Dämmplatten können nun für übliche Dachkonstruktionen, Dämmstofftypen und -dicken rechnerische Langzeituntersuchungen über deren hygrothermisches Verhalten durchgeführt werden.

Folgende Umkehrdachkonstruktionen werden untersucht, um eine realistische Bandbreite für die Feuchtezunahme über eine Standzeit von 25 Jahren zu bestimmen.

Umkehrdach 1: Gründach ohne Kiesdränschicht (Bild 38)

- 15 cm Beton
- Dachbahn
- XPS-Dämmung
- 8 cm Substrat

Umkehrdach 2: Gründach mit Kiesdränschicht (Bild 39)

- 15 cm Beton
- Dachbahn
- XPS-Dämmung
- 5 cm Kies
- 5 cm Substrat

Umkehrdach 3: Kiesdach (Bild 40)

- 15 cm Beton
- Dachbahn
- XPS-Dämmung
- 6 cm Kies

Für jedes Dach werden Dämmschichtdicken von 140 mm und 180 mm untersucht, da diese beiden Dicken die Bandbreite der heute üblichen Ausführungen bei einlagiger Verlegung am ehesten abdecken. Für den Diffusionswiderstand der XPS-Dämmung werden aus der verfügbaren Bandbreite beispielhaft jeweils das am stärksten und am schwächsten diffusionshemmende Material ausgewählt. Die Diffusionswiderstände werden aus den in Kapitel 4 beschriebenen Messwerten abgeleitet und bei der Berechnung verwendet. Dabei werden für die Berechnung die μ -Werte, welche für 5 mm bzw. 10 mm dicke Schäumhäute gemessen wurden, auf eine 1 mm dicke Schäumhaut konzentriert. Die Verteilung der Diffusionswiderstände auf einen vereinfachend homogenen Kern und eine sehr viel stärker diffusionshemmende Schäumhaut ist in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Diffusionswiderstände der bei der Berechnung verwendeten Platten A und B.

	μ -Wert gesamt		$\mu_{\text{Schäumhaut, 1mm}}$	μ_{Kern}	Faktor zwischen Schäumhaut und Kern	s_d -Wert [m]	
	14 cm	18 cm				14 cm	18 cm
Platte A	102,95	100,29	928	91	10	14,4	18,1
Platte B	179,4	173,98	1863	155	12	25,1	31,3

Die Rohdichte der XPS-Dämmung wird mit 33 kg/m^3 angenommen. Für die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit werden zwei verschiedene Ansätze miteinander verglichen. Bild 41 zeigt die beiden Kurven der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt in der Dämmung. Die dunkelgrüne Kurve basiert auf Messwerten aus dem Jahre 1984 [28]. Die hellgrüne Kurve stellt den linearen Ansatz nach DIN EN ISO 10456 dar, wonach die Wärmeleitfähigkeit um 2,5 % pro 1 Vol.-% Wassergehalt zunimmt. Die aktuellen Untersuchungen des FIW haben gezeigt, dass der Zusammenhang zwischen Wassergehalt der Dämmplatten und deren Wärmeleitfähigkeit auch bei den Platten mit aktuellen Treibmitteln im Prinzip den bereits bekannten Zusammenhängen folgt. Damit sind beide Kurven weiterhin gültig. Im typischen Bereich bis etwa 150 kg/m^3 verlaufen die beiden Kurven weitgehend analog – wodurch der vereinfachte Ansatz nach Norm im überwiegenden Teil der Anwendungen problemlos angewendet werden kann. In den wenigen Fällen, in denen Wassergehalte über 150 kg/m^3 oder 15 Vol.-% erreicht werden, sollte allerdings auf den nicht linearen Ansatz von Cammerer und Achtziger zurückgegriffen werden, da die Wärmeleitfähigkeit des wassergesättigten Materials sich dem Wert von Wasser selbst annähert ($\lambda_{\text{Wasser, } 20^\circ\text{C}} = 0,6 \text{ W/mK}$) und nicht nur bis auf $0,1 \text{ W/mK}$ steigt, wie der lineare Ansatz suggeriert.

Für die Langzeituntersuchungen werden stündlich gemessene Klimadaten von Holzkirchen aus den Jahren 2005 / 2006 angesetzt, die vom IBP für den Standort als feuchtetechnisches Referenzjahr zusammengestellt wurden. Im Innenraum werden Wohnraumbedingungen mit normaler Belegung nach DIN EN 15026 angenommen. Die Berechnungen werden über einen Zeitraum von 25 Jahren durchgeführt.

Ausgewertet wird jeweils der Wassergehalt in Vol.-% in der gesamten XPS-Dämmung, also nach der Berechnung gemittelt über Schäumhäute und Kern. In Bild 42 ist der Wassergehalt für das Gründach ohne Kiesdränschicht mit einer 140 mm dicken Dämmung dargestellt. Die roten Kurven zeigen die Feuchteaufnahme der Platte A, die blauen Kurven die Feuchteaufnahme der Platte B. Es zeigt sich, dass bei einem geringeren Diffusionswiderstand die Feuchteanreicherung in der Dämmplatte höher ausfällt als bei einem größeren Diffusionswiderstand. Zudem ist hier der Unterschied der beiden verschiedenen Ansätze für die Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Die dunklen Kurven sind das Ergebnis der Berechnung mit den gemessenen λ -Werten, die hellen Kurven ergeben sich beim linearen Ansatz. Der Unterschied der beiden Ansätze in diesem Feuchtebereich bleibt sehr gering, so dass im Folgenden nur noch die

Wärmeleitfähigkeitszunahme anhand der Messwerte berücksichtigt wird. Bei der Platte A ergibt sich nach 25 Jahren ein Wassergehalt von 11,3 Vol.-% (dunkelrote Kurve), bei der Platte B ein Wassergehalt von 6,9 Vol.-% (dunkelblaue Kurve). In Bild 43 ist der Wassergehalt für eine 180 mm dicke Dämmplatte dargestellt. Dieser ist geringer als bei der Variante mit 140 mm Dämmdicke und liegt bei 7,3 Vol.-% für Platte A und bei 4,6 Vol.-% für Platte B. Auch hier ergibt sich wiederum ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Diffusionswiderstandsbereichen.

Die Berechnungen des Gründachs mit einer Kiesdränschicht ergeben geringfügig niedrigere Wassergehalte als beim Gründach ohne Kiesdränschicht - der Unterschied beträgt jedoch maximal nur 0,3 Vol.-%. Bild 44 zeigt den Wassergehalt für die Variante mit 140 mm Dämmdicke. Die Wassergehalte steigen hier auf 11,0 Vol.-% bei der diffusionsoffeneren Platte A und auf 6,7 Vol.-% bei der diffusionsdichteren Platte B. Bei einer 180 mm dicken Dämmung ergeben sich Wassergehalte von 7,2 Vol.-% bzw. 4,6 Vol.-% (siehe Bild 45). Eine Unterscheidung der Feuchtezunahme bei Begrünungen mit und ohne Dränschicht erscheint aufgrund dieser Ergebnisse nicht erforderlich.

Das hygrothermische Langzeitverhalten eines bekiesten Umkehrdachs stellt sich wie erwartet als deutlich günstiger heraus. Die Variante mit 140 mm Dämmdicke ist in Bild 46 dargestellt. Die Wassergehalte in der XPS-Dämmung des Kiesdaches sind erwartungsgemäß deutlich geringer als bei einem Gründach, da bei einer Deckschicht aus Kies Feuchte auch nach oben austrocknen kann. Nach 25 Jahren stellt sich in der Platte A ein Wassergehalt von 3,3 Vol.-% ein, bei der Platte B ein Wassergehalt von 2,3 Vol.-%. Etwas geringere Wassergehalte ergeben sich bei der Variante mit 180 mm Dämmdicke. Die diffusionsoffenerere Dämmung erreicht Werte von 2,8 Vol.-%, die diffusionsdichtere 2,0 Vol.-% (Bild 47).

In Bild 48 ist für die Variante Gründach ohne Kiesdränschicht (Platte A, 180 mm Dämmdicke) der Einfluss des Innenraumtemperaturniveaus auf die Feuchteakkumulation in den Platten dargestellt. Während die zuvor verwendeten Innenklimabedingungen nach DIN EN 15026 im Winter meist bei 20 °C liegen, werden hier zusätzlich konstant 15 °C und 25 °C betrachtet. Bei 15 °C steigt der Wassergehalt in 25 Jahren nur auf 4 Vol.-%, bei 25 °C dagegen auf 12 Vol.-%. Die bedeutet also in etwa eine Zunahme um 70 % pro 5 °C höheren Temperaturniveau.

5.2 Vorschlag für pauschale Zuschlagswerte und Randbedingungen für systemspezifische Simulationen

Die in Kapitel 5.1 vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass bei der berechneten Feuchtezunahme vor allem der Deckschichttyp und die Diffusionseigenschaften des Dämmstoffs maßgeblich sind. Bei permanent feuchten oder dichten Deckschichten sind dabei ebenso wie bei niedrigeren Diffusionswiderständen höhere Wassergehalte in den Dämmplatten zu erwarten. Die Berechnungen wurden jeweils für normales Wohnraumklima durchgeführt – da abweichende Temperaturen über den unter der Dämmplatte herrschenden Wasserdampfpartialdruck ebenfalls einen großen Einfluss auf die

Feuchteaufnahme haben, sollten deutlich anders genutzte Räume eigens beurteilt werden.

Damit ergeben sich aus den in Kapitel 5.1 untersuchten Varianten die in Tabelle 17 dargestellten pauschale Zuschlagswerte.

Tabelle 17: Pauschale Zuschlagswerte aus den in Kapitel 5.1 untersuchten Varianten

Deckschichttyp Dämmschichtdicke	Mittl. Feuchtegehalt Vol.-%	WLG-Feuchtezuschl. % / mW (035)
Dachbegrünung 140 mm Dämmschichtdicke	6 %	15 % / 5 mW
Dachbegrünung 180 mm Dämmschichtdicke	4 %	10 % / 3,5 mW
Dachbekiesung	1,5 %	4 % / 1,5 mW

Bei der Zulassung sollte es möglich sein, durch geeignete Untersuchungen und rechnerische Nachweise die jeweiligen Materialdicken, -eigenschaften und ggf. auch Einsatzbereiche spezifisch zu berücksichtigen und geeignete Zuschläge zu ermitteln.

6 Zusammenfassung

Die Auswertung von Literatur und Versuchsdaten zeigt, dass Feuchte einen maßgeblichen Einfluss auf das thermische Verhalten von Umkehrdächern hat, was bei der Zulassung durch geeignete Zuschläge berücksichtigt wird.

Die zusätzlichen Wärmeverluste bei Unterströmung der Dämmplatten (Ausführung ohne Trennlage) mit Niederschlagswasser summieren sich entsprechend den verschiedenen Untersuchungen auf Werte von etwa $\Delta U = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ (bei Dämmung vollständig oberhalb der Dachhaut). Bei Verwendung einer zugelassenen wasserableitenden, diffusionsoffenen Trennlage kann der Zuschlag für die Unterströmung generell wegfallen.

Bestehen bleibt die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch eine Feuchtezunahme in der Dämmung. Der meist permanent unter den Dämmplatten vorhandene Feuchtefilm sorgt für einen signifikanten Wasserdampfpartialdruckgradienten und einen nachfolgenden Diffusionsstrom in die Dämmplatten hinein. Abhängig von der Trocknungssituation an der Oberseite der Dämmplatten – also unter den verschiedenen Deckschichten – ergibt sich aus diesem Diffusionsstrom eine mehr oder weniger starke Feuchtezunahme der Dämmplatten und damit verbunden eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Die o.g. Trennlagen reduzieren zwar den Wasserabfluss unter den Dämmplatten – bezüglich des Partialdrucks ist allerdings keine Veränderung der Situation zu erwarten, da geringe Sickerwassermengen trotzdem über den Großteil des Jahres zu konstant hohen Feuchten in diesem Bereich führen (Kapitel 2.1).

Im Rahmen des Projekts wurde in Kapitel 3 eine Vorgehensweise für die Berechnung der Feuchteverhältnisse unter und auf Umkehrdachdämmungen mit verschiedenen Deckschichten erarbeitet, mit Hilfe derer auch die Feuchtegehalte in den Dämmplatten möglichst realitätsnah und auf lange Zeiträume ermittelt werden können. Dazu wird im Modell unter der Dämmebene eine dünne Speicherschicht eingebracht, die sich bei Niederschlag regelmäßig wieder mit Wasser füllt und dieses danach in begrenztem Maß speichern kann. Oberhalb der Dämmung werden die Deckschichten (Begrünung, Kies) so mitberechnet, dass deren Feuchtehaushalt in Abhängigkeit vom einwirkenden Außenklima abgebildet und der Einfluss auf die darunter liegende Dämmung berechnet werden kann. Die Optimierung und Validierung dieses Modells erfolgt anhand von mehreren Freiland- und Objektuntersuchungen von FIW und IBP (Kapitel 3.1 und 3.2), wobei das Modell gegenüber den Messwerten jeweils leicht auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse erzeugen soll. Der Vergleich mit den Messungen zeigt entsprechend dieser Zielstellung zufriedenstellende Ergebnisse – vor allem in Anbetracht der sehr stark streuenden Messergebnisse, die von den genauen lokalen Verhältnissen (z.B. Unebenheiten in der Dachbahn mit länger stauender Feuchte) beeinflusst werden. Hier ist ggf. in Betracht zu ziehen, die Sicherheiten etwas zu reduzieren, indem beispielsweise eine Anpassung nicht auf den ungünstigsten der Messwerte sondern auf mittlere Messwerte angestrebt wird. Da es sich nicht um Versagensgrenzen sondern um Zuschläge für die

Wärmeleitfähigkeiten handelt, sind ja tatsächlich die Mittelwerte eher repräsentativ für die realen Verhältnisse als die Extremwerte. Es sollte aufgrund der großen Streuung der Messwerte immer angestrebt werden, möglichst mehrere und nicht nur einzelne Platten zur Bestimmung der Feuchtegehalte zu entnehmen.

Die Untersuchungen des FIW zu Diffusionswiderstand, Wärmeleitfähigkeit und Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt haben gezeigt, dass die neuen Treibmittel teilweise doch zu etwas anderen Eigenschaften der Dämmungen führen als die früher üblichen. Vor allem der Diffusionswiderstand und in der Folge auch die Wasseraufnahme der Platten variiert mit den verschiedenen Treibmitteln doch recht deutlich. Dagegen bleibt die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt in einer Bandbreite, die ein Beibehalten des bisherigen Umrechnungsfaktors der DIN EN ISO 10456 von $f_{\psi} = 2,5$ nahelegt.

Die Langzeit-Simulation von zusammen mit dem DIBt festgelegten Beispieldachaufbauten über eine typische Standzeit von 25 Jahren mit dem zuvor validierten Ansatz in Kapitel 5 zeigt, dass bei Dachbegrünungen die Feuchtezunahmen etwas höher liegen, als bisher allein durch die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeitszuschläge berücksichtigt ist – dies wurde bisher durch die Beibehaltung des ΔU -Zuschlags auch bei begrünten Dächern mit Trennlage kompensiert. Wird dieser künftig weggelassen, ist eine entsprechende Erhöhung der Zuschläge auf die Wärmeleitfähigkeit erforderlich. Bei einer 140 mm dicken Dämmplatte wird bei einem Diffusionswiderstand am unteren Rand der festgestellten Bandbreite eine Feuchteakkumulation auf gut 11 Vol.-% nach 25 Jahren bzw. 5,5 Vol.-% im Mittel über die Standzeit ermittelt. Daraus ergibt sich ein λ -Zuschlag von knapp 5 mW. Bei der 180 mm dicken Dämmplatte bleibt der Zuschlag allerdings bei 3 mW im Mittel über die Standzeit. Ebenso wird anhand des Vergleichs mit einer diffusionsdichteren Platte deutlich, dass dieser Materialkennwert einen sehr deutlichen Einfluss auf die Feuchtezunahme hat. Die erforderlichen Zuschläge liegen hier nur bei 3 bzw. 2 mW.

Bei den bekiesten Dächern liegen die Feuchtezunahmen deutlich niedriger – es werden auf 25 Jahre Feuchtegehalte von im Mittel 1,5 Vol.-% erreicht, was in einer Wärmeleitfähigkeitszunahme von 1,5 mW resultiert. Bei den Messwerten stand im Rahmen des Projekts hier nur eine einzige Objektuntersuchung mit einer einzelnen gemessenen Platte zur Verfügung. Dabei wurde ein Feuchtegehalt von unter 0,5 Vol.-% gemessen im Vergleich zu etwa 1 Vol.-% in der Simulation. Die Kiesschicht wurde allerdings bereits vorher bei Vergleichsberechnungen mit bekiesten Umkehrdächern im Rahmen von anderen Untersuchungen validiert - dabei konnten die Feuchtegehalte in den Dämmplatten nach 9 Jahren Versuchszeitraum in der Simulation mit dem gleichen Ansatz exakt wiedergegeben werden. Auch hier wirkt sich ein höherer Diffusionswiderstand der Platte auf den ermittelten Endwassergehalt positiv aus – es werden nur 2 anstelle von 3 Vol.-% Feuchtegehalt erreicht. Die mit diesen Wassergehalten erreichten Wärmeleitfähigkeiten liegen somit auch langfristig unterhalb der Bemessungswerte. Die auftretenden Feuchtegehalte sind also durch die Standardzuschläge bereits soweit berücksichtigt, dass für Kiesdächer keine zusätzlichen Zuschläge erforderlich werden.

Aufgrund des starken Einflusses des Diffusionswiderstands der Materialien auf den Feuchtegehalt sollte allerdings künftig eine stärkere Berücksichtigung der genauen Materialeigenschaften bei der Festlegung der spezifischen Zuschläge erwogen werden. Auch für andere Dämmstofftypen (z.B. EPS) sollten mit Hilfe des entwickelten Berechnungsansatzes realistische Aussagen zur Feuchtegehaltsentwicklung möglich sein – es werden lediglich die Kennwerte der verschiedenen Materialien sowie ggf. die Verteilung des Diffusionswiderstands auf die verschiedenen Plattenbereiche benötigt. Bei EPS ist allerdings eher eine homogene Verteilung des Diffusionswiderstands zu wählen, da hier keine Schäumhäute vorhanden sind. In Kapitel 5 wurde zudem der deutliche Einfluss der im Innenraum auftretenden Temperaturen dargestellt. Eine im Mittel um 5 K höhere Temperatur führt in 25 Jahren zu etwa 70 % höheren Wassergehalten. Die vorgeschlagenen pauschalen Zuschläge sind damit für Wohn- und Bürogebäude gut geeignet – bei abweichenden Innenklimabedingungen sollte dagegen eine gesonderte Ermittlung der Zuschlagswerte erfolgen.

7 Literatur

- [1] Künzel, H.: Feuchtigkeitsverhältnisse, Temperaturverhältnisse und Wärmeschutz bei nicht belüfteten Flachdächern mit über der Abdichtung angebrachter Wärmedämmung aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum. Gesundheits-Ingenieur. 99. Jahrgang (1978), H. 12, S. 361-376.
- [2] Petersson, B.-A.: The upside-down roof. Field and laboratory studies of thermal insulation, moisture conditions and performance. Chalmers University of Technology, publication 80:6, Göteborg (1980).
- [3] Mayer, E.; Künzel, H.: Neue Untersuchungen und Überlegungen zur Frage des Zuschlags Δk bei Umkehrdächern. IBP-Bericht B Ho 2/84. Holzkirchen (April 1984).
- [4] Nielsen, A. F.; Paulsen E. M.: Thermal design of highly insulated inverted roofs. Norwegian Building Research Institute (1984).
- [5] Fabricius, O.: Die Feuchtigkeitsverhältnisse in Umkehrdächern. Originalfassung in Schwedisch. Bygginindustrin Nr. 28.87 (September 1987).
- [6] Zapke, W.: Der Einfluss von Niederschlägen auf den Wärmeschutz von Umkehrdachkonstruktionen. DAB 21 (1989), H. 4, S. 549-552.
- [7] Bangerter, H.: Bemessung des Wärmeschutzes bei Umkehrdächern und ähnlichen Systemen. Bauphysik 13 (1991), H. 1, S. 10-18.
- [8] Franke, L.; Deckelmann, G.: Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz. Bauforschung für die Praxis, Bd. 4. IRB-Verlag Stuttgart (1994).
- [9] Pernette-Heim, U.; Diebold, F.: Neubewertung des Δk -Wertes bei Umkehrdächern. Ergebnisse computergestützter instationärer Modellrechnungen mit stündlichen Klimadaten. Bauphysik 17 (1995), H. 6, S. 170-178.
Fortsetzung: Bauphysik 18 (1996), H. 1, S. 11-20.
- [10] Künzel, H.: Zum heutigen Stand der Kenntnisse über das UK-Dach. Bauphysik 17 (1995), H. 1, S. 1-7.
- [11] Bangerter, H.: Grundlagen zur Neubewertung der Bemessung des Wärmeschutzes bei Umkehrdächern und ähnlichen Systemen, (1996). Sonderdruck mit Ergänzungen/Vervollständigungen des Autors aus der Bauphysik 13 (1991), H. 1, S. 10-18.
- [12] Künzel, H. M.; Kießl, K.: Quantifizierung der niederschlagsbedingten Wärmeverluste bei Umkehrdächern. Bauphysik 19 (1997), H. 1, S. 7-11.

- [13] Leimer, H.-P.; Bednar, T.; Dreyer, J.; Künzel, H. M.; Palier, P.; Rode, C.; Tejchmann-Konarzewski, J.: Anforderungen an Umkehrdächer mit Trennlage. Erläuterungen zur Anwendung von EN ISO 6946. Bauphysik 26 (2004), H. 5, S. 233-239.
- [14] DIN EN ISO 6946:2008-04: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung. April 2008.
- [15] Pernette, U.: Wärmeschutz von Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten aus Dachbegrünungen, Gehwegplatten und Ort betonbelägen. Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags und Quantifizierung des ΔU_r -Zuschlags. PWI-Bericht Nr. 538500. Stand 04.01.2006.
- [16] Mayer, E.; Conrad, W.: Langzeituntersuchungen an begrünten Umkehrdächern. IBP-Bericht RB-17/1993.
- [17] Mayer, E.; Conrad, W.: Langzeituntersuchungen an begrünten Umkehrdächern. Teilbericht 2: Wärmebilanzmessungen. IBP-Bericht RB-18/1993.
- [18] Künzel, H.M.; Holz, D.: Feuchteverhältnisse in Umkehrdächern mit verschiedenen Deckschichten. IBP-Bericht HTB-2/1996.
- [19] Merkel, H.; Boy, E.: Langzeitverhalten von extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoffen im Umkehrdach, Erfahrungen aus Praxisobjekten; Deutsches Architektenblatt Heft 9/1996.
- [20] Es grünt so grün ... auf den Umkehrdächern, ein Erfahrungsbericht von DOW; DOW Deutschland Inc., Schwalbach 1997.
- [21] Cziesielski, E.; Fechner, O.; Merkel, H.; Grundsätze zur Planung von Umkehrdächern; Bauphysik-Kalender 2001, Verlag Ernst & Sohn, 13086 Berlin.
- [22] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [23] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002.
- [24] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 2007.
- [25] Winter, S.; Fülle, C.; Werther, N.: Forschungsprojekt MFPA Leipzig und TU München "Flachdächer in Holzbauweise". 2007-2010.

- [26] Teibinger, M.; Nusser, B.: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen. Herausgegeben von Holzforschung Austria. Wien. (Forschungsbericht, HFA-Nr.: P412), 2010.
- [27] Liljequist, G.H.; Cihak, K.: Allgemeine Meteorologie. 3. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden. 1984.
- [28] Cammerer, J.; Achtziger, J.: Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Bericht zu BmBau Forschungsvorhaben BI 5-800883-4. 1984.

8 Bilder

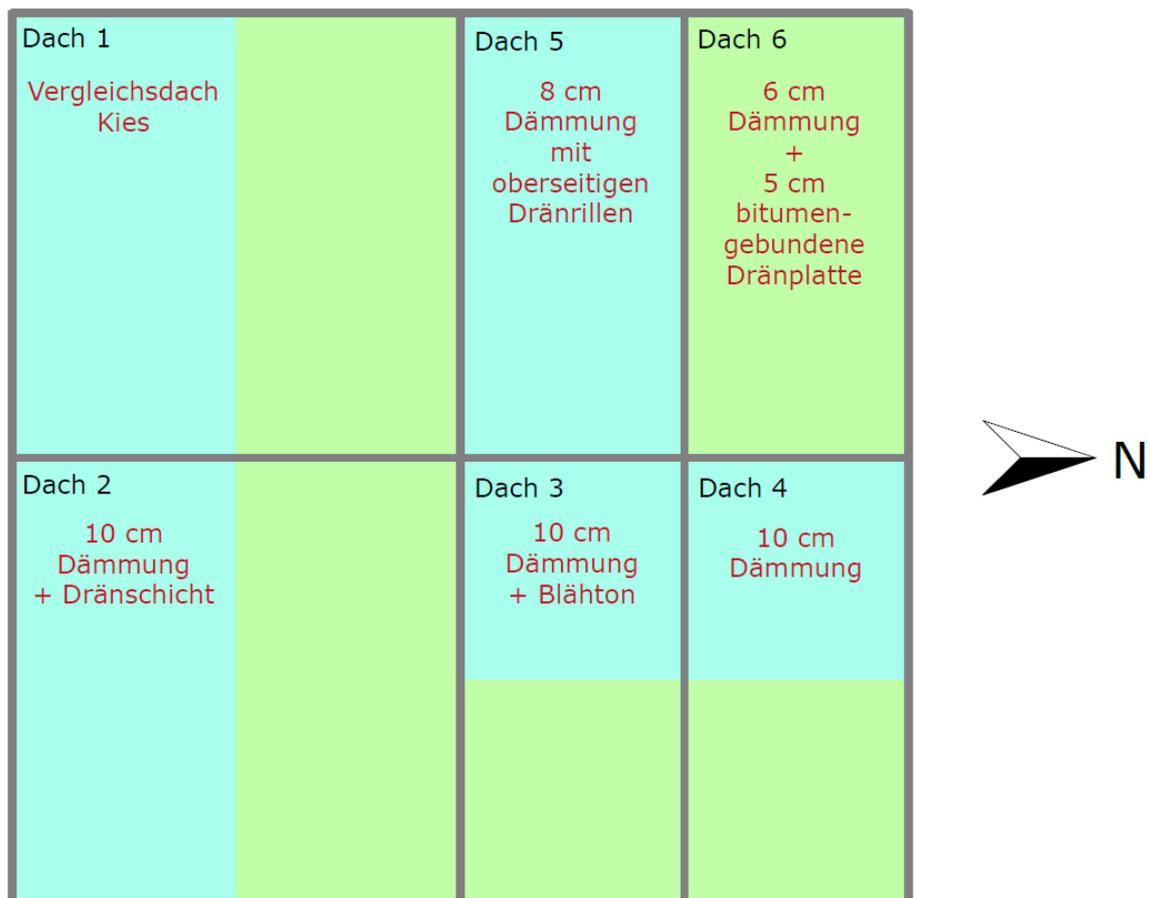


Bild 1: Anordnung der Versuchsfelder im November 1985. Die blauen Felder sind mit XPS-Dämmung des Herstellers A, die grünen mit der des Herstellers B gedämmt.



Bild 2: Fotografische Aufnahmen von Dach 2 bei der Entnahme der extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoffe (Hersteller A und B) für die Messung der Feuchtegehalte.



Bild 3: Fotografische Aufnahmen von Dach 3 bei der Entnahme der extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoffe (Hersteller A und B) für die Messung der Feuchtegehalte.



Bild 4: Fotografische Aufnahmen von Dach 4 bei der Entnahme der extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoffe (Hersteller A und B) für die Messung der Feuchtegehalte.

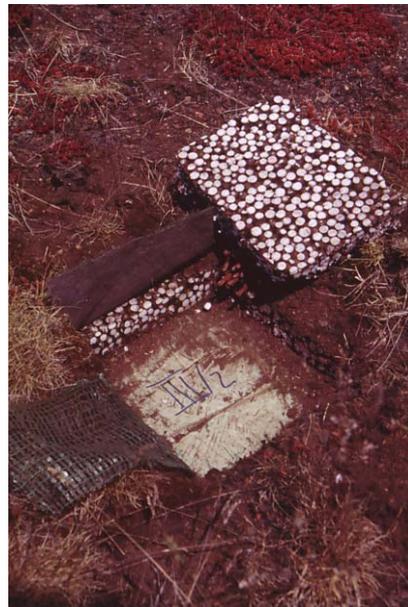


Bild 5: Fotografische Aufnahmen von Dach 5 (links) und Dach 6 (rechts) bei der Entnahme des extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoffes für die Messung der Feuchtegehalte.

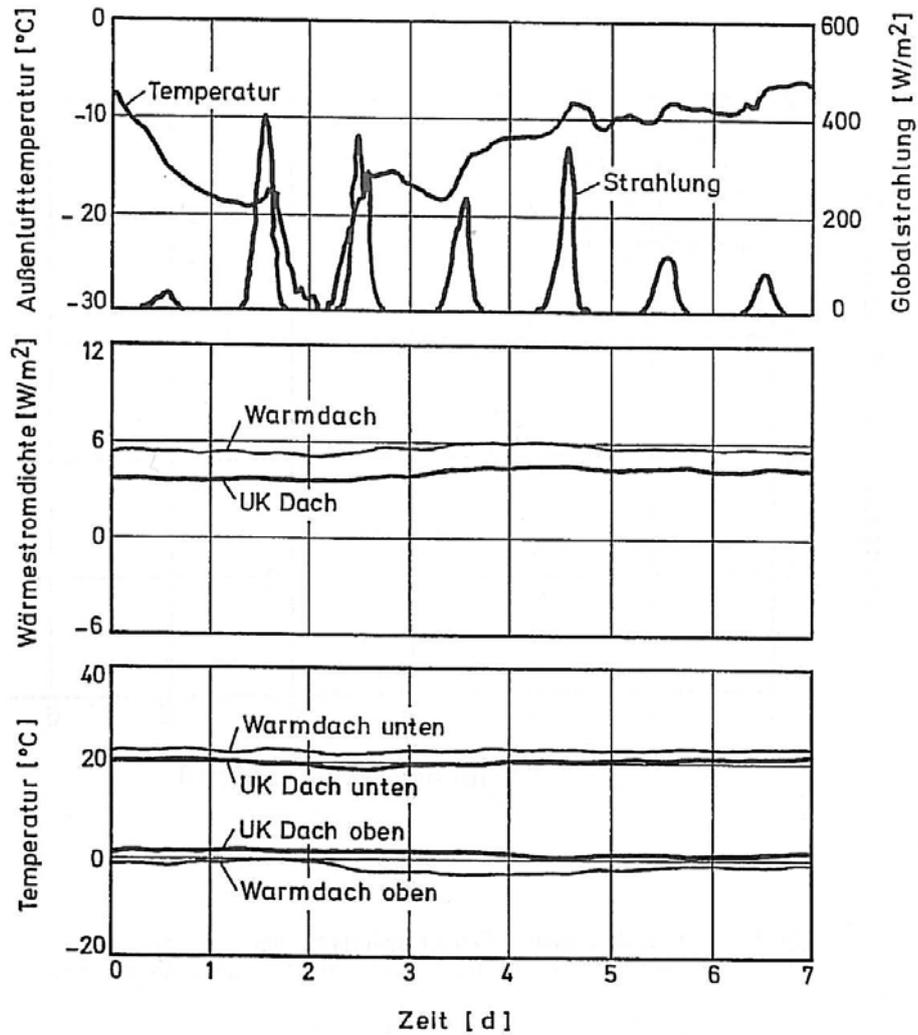


Bild 6: Verläufe von Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichte des begrünten Umkehrdaches 2 und des beheizten Warmdaches 1 während einer kalten niederschlagsfreien Winterwoche sowie Verläufe der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung.

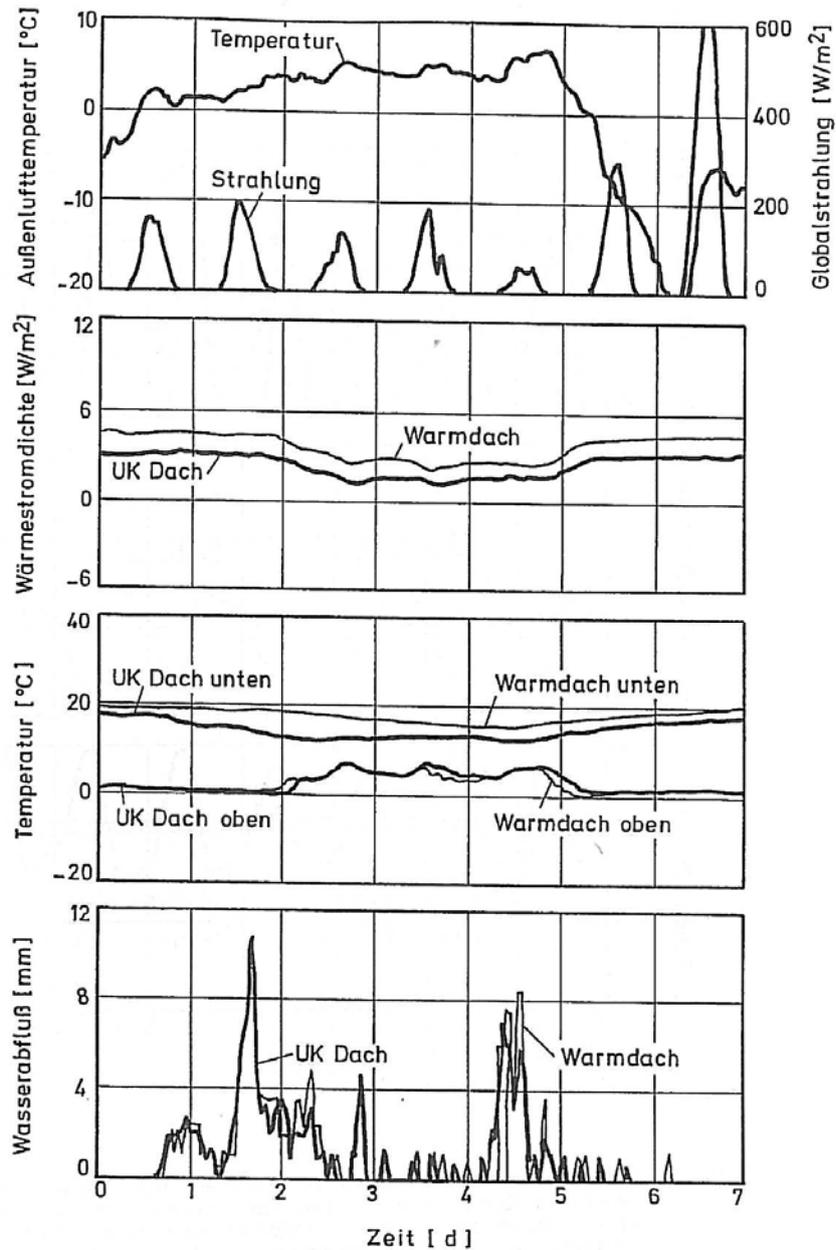


Bild 7: Verläufe von Wasserabfluss, Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichte des begrüntem Umkehrdaches 2 und des bekiesten Warmdaches 1 während einer niederschlagsreichen Winterwoche sowie Verläufe der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung.

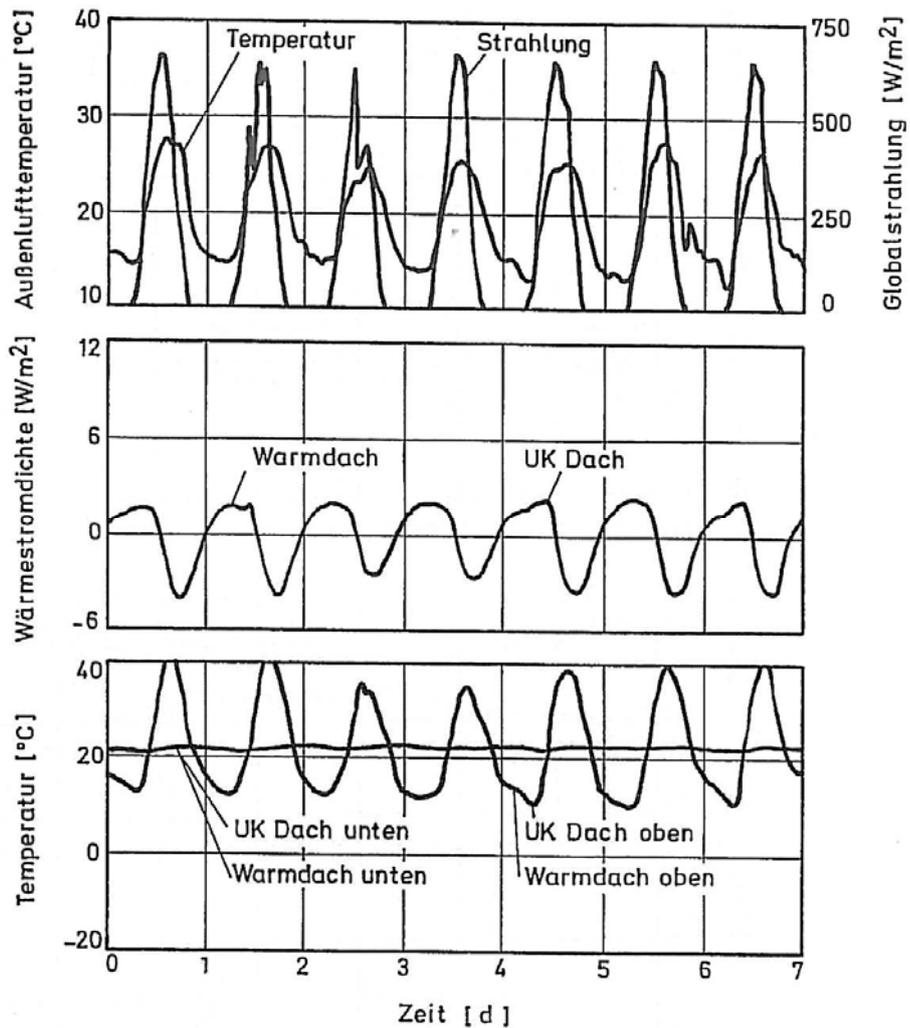


Bild 8: Verläufe von Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichte des begrünten Umkehrdaches 2 und des bekiesten Warmdaches 1 während einer strahlungsreichen, niederschlagsfreien Sommerwoche sowie Verläufe der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung.

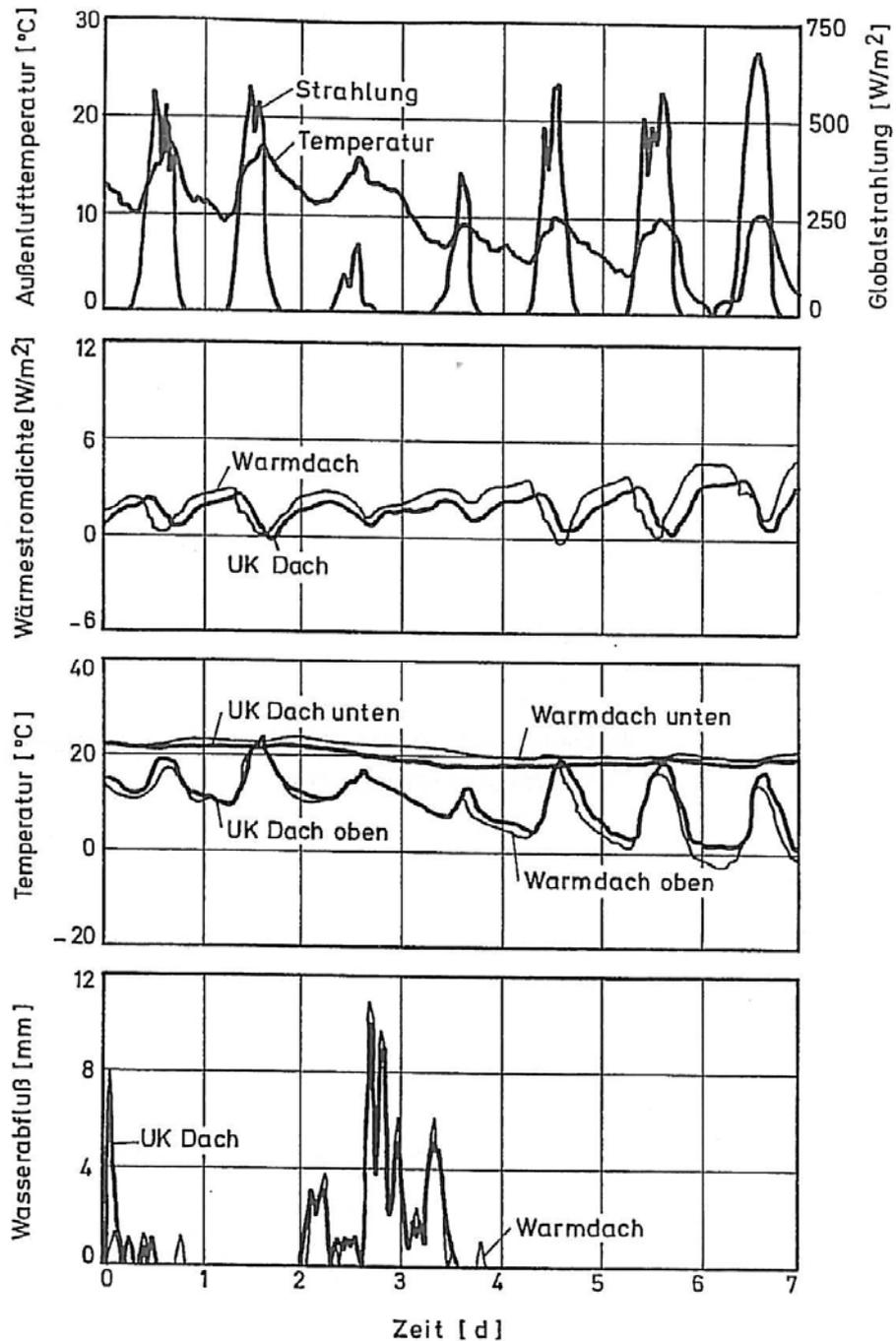


Bild 9: Verläufe von Wasserabfluss, Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichte des begrünten Umkehrdaches 2 und des bekiesten Warmdaches 1 während einer Sommerwoche mit Niederschlag sowie Verläufe der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlung.

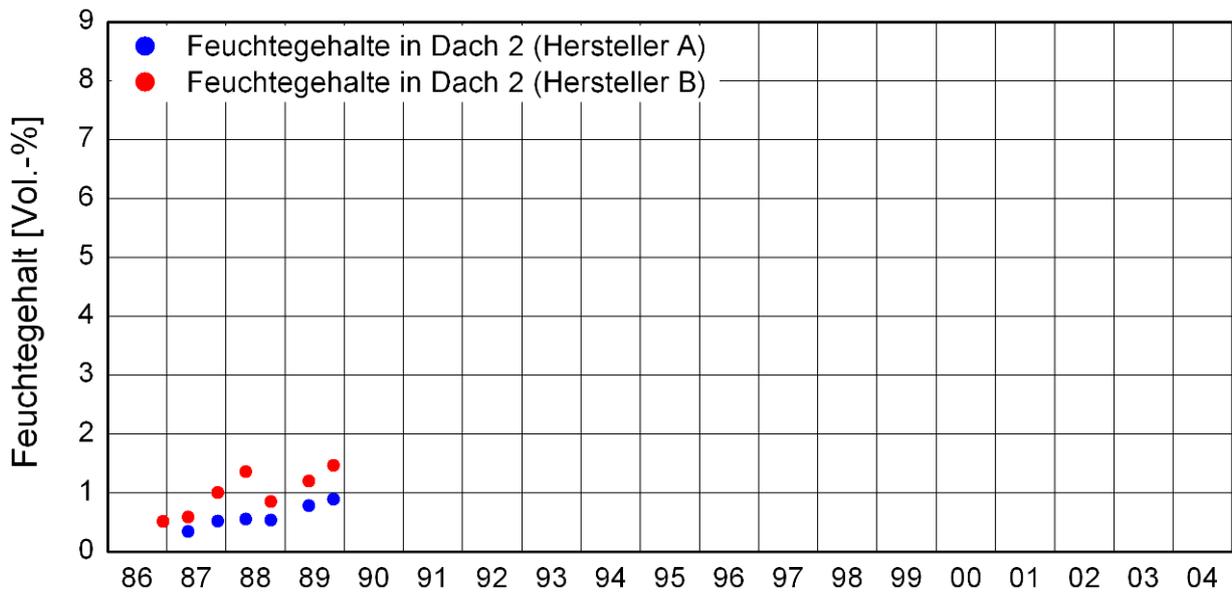


Bild 10: Messwerte der Feuchtegehalte im extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff zweier unterschiedlicher Hersteller im Dach 2.

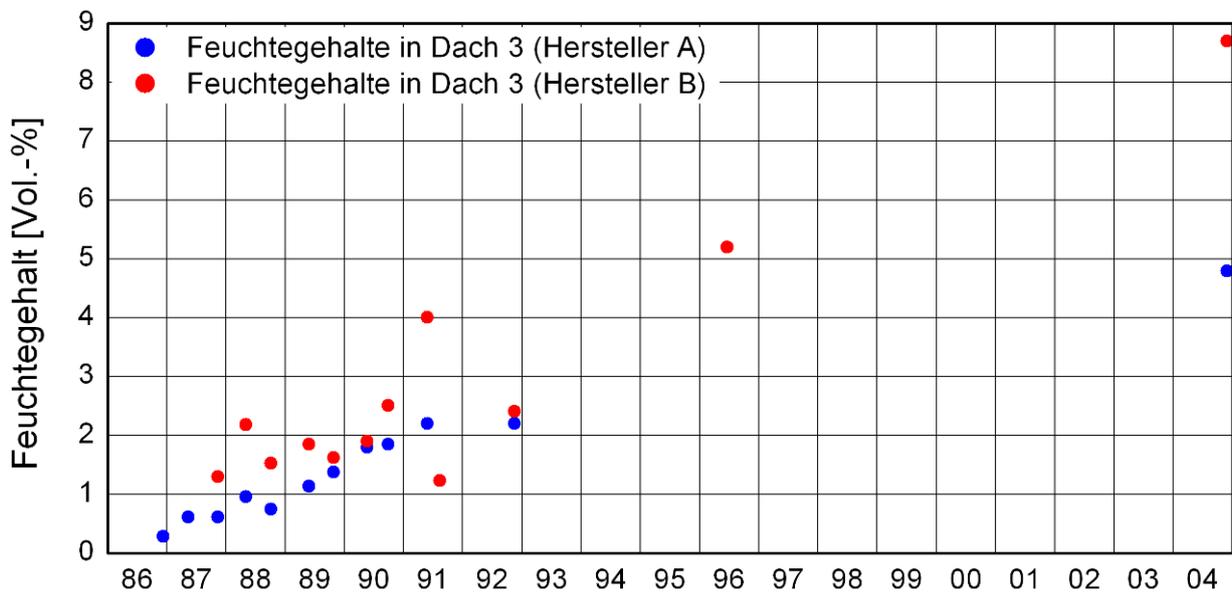


Bild 11: Messwerte der Feuchtegehalte im extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff zweier unterschiedlicher Hersteller im Dach 3.

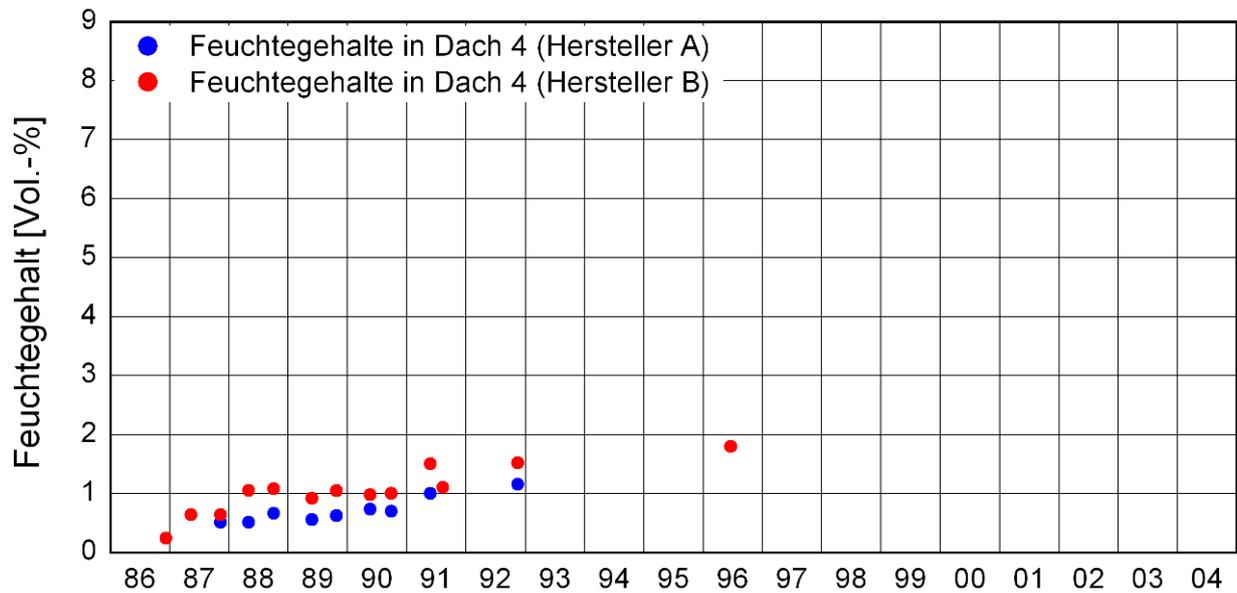


Bild 12: Messwerte der Feuchtegehalte im extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff zweier unterschiedlicher Hersteller im Dach 4.

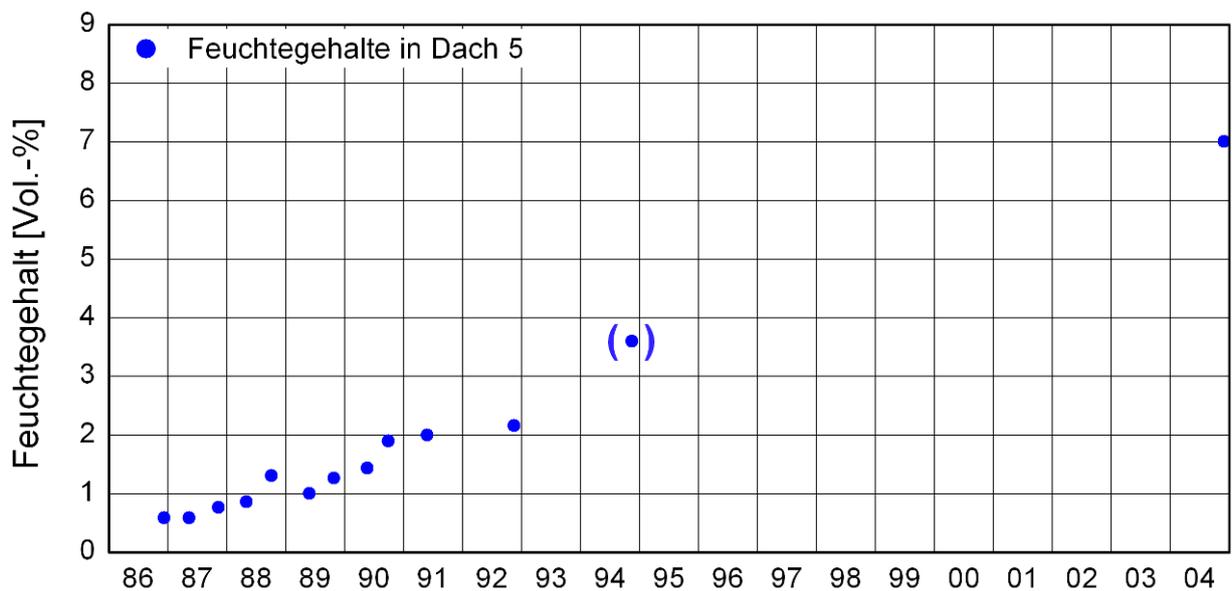


Bild 13: Messwerte der Feuchtegehalte im extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff im Dach 5. Der in Klammern gesetzte Messwert im November 1994 kann nicht mit Sicherheit dem Dach 5 zugewiesen werden.

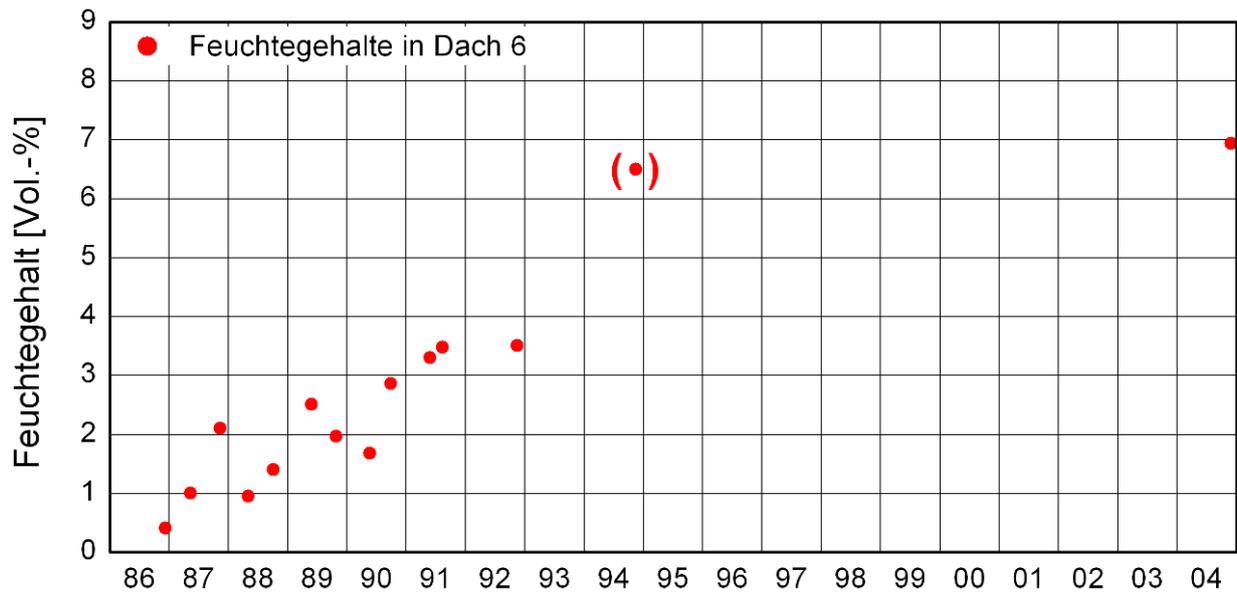


Bild 14: Messwerte der Feuchtegehalte im extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff im Dach 6. Der in Klammern gesetzte Messwert im November 1994 kann nicht mit Sicherheit dem Dach 6 zugewiesen werden.



Bild 15: Anordnung der Versuchsfelder im November 1989. Die blauen Felder sind mit XPS-Dämmung des Herstellers A, die grünen mit der des Herstellers B gedämmt.

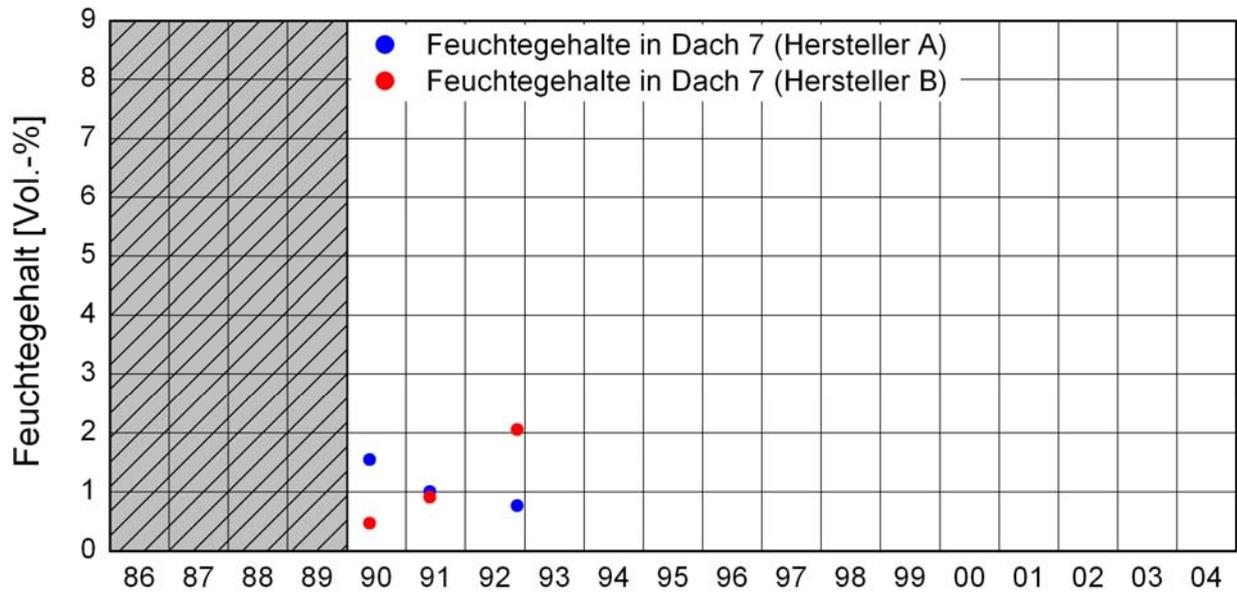


Bild 16: Messwerte der Feuchtegehalte im extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff zweier unterschiedlicher Hersteller im Dach 7.

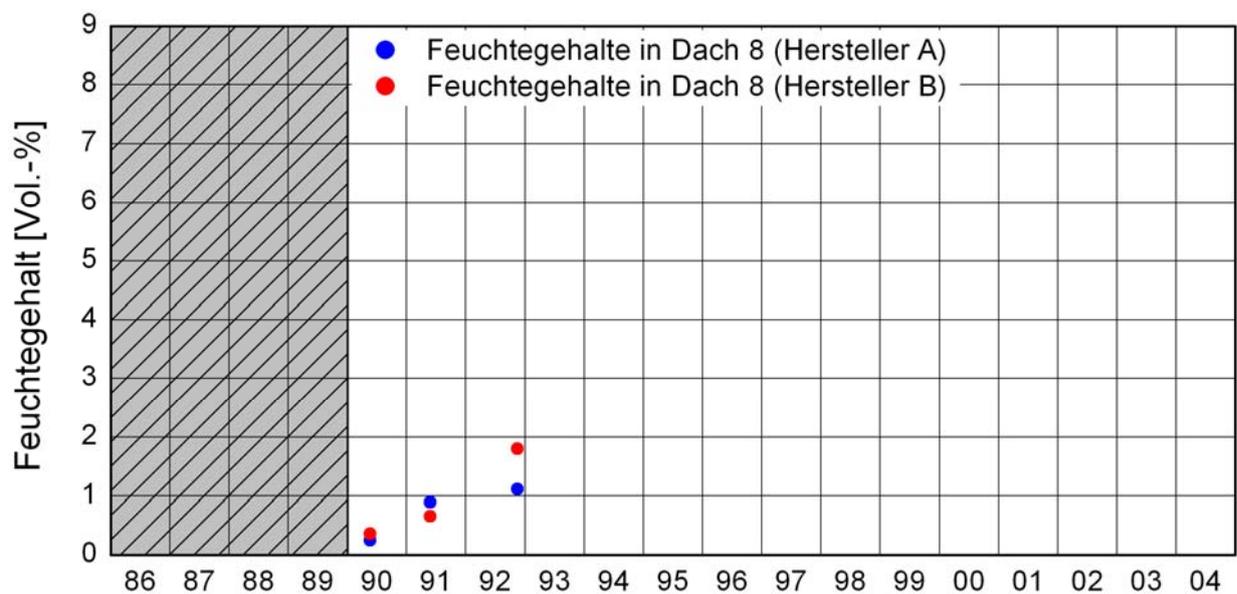


Bild 17: Messwerte der Feuchtegehalte im extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoff zweier unterschiedlicher Hersteller im Dach 8.

Dach 1 Vergleichsdach Kies			
		Dach 5 8 cm Dämmung mit oberseitigen Dränrillen	Dach 6 6 cm Dämmung + 5 cm bitumen- gebundene Dränplatte
Dach 9 10 cm Dämmung + 5 cm Kies	Dach 10 10 cm Dämmung + 5 cm Blähton	Dach 3 10 cm Dämmung + Blähton	Dach 4 10 cm Dämmung
Dach 11 10 cm Dämmung + Verbund- pflastersteine	Dach 12 10 cm Dämmung + Beton- glattestrich		



Bild 18: Anordnung der Versuchsfelder im November 1994. Die blauen Felder sind mit XPS-Dämmung des Herstellers A, die grünen mit der des Herstellers B gedämmt.

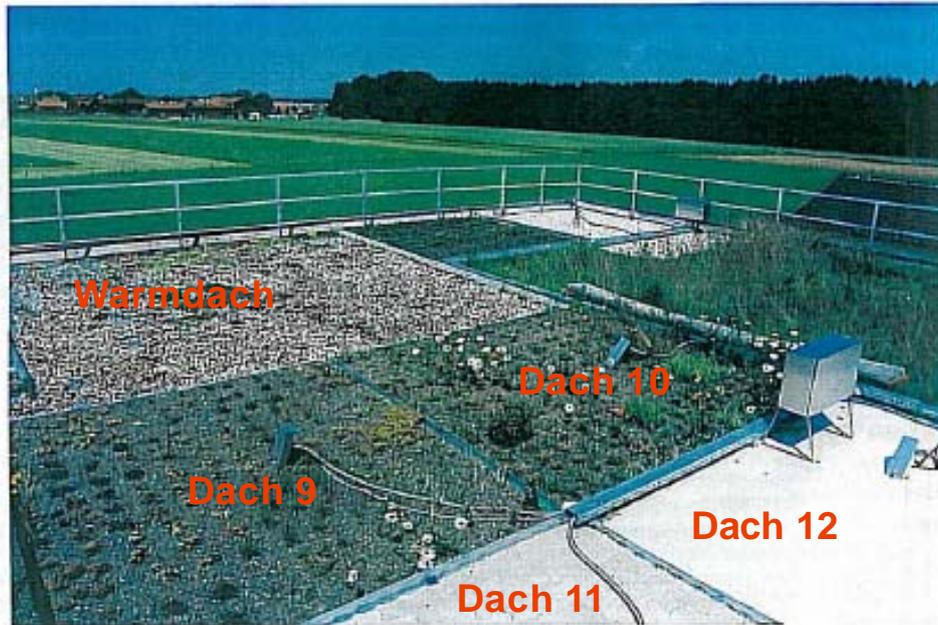


Bild 19: Fotografische Aufnahme der Versuchsfelder nach 1994.

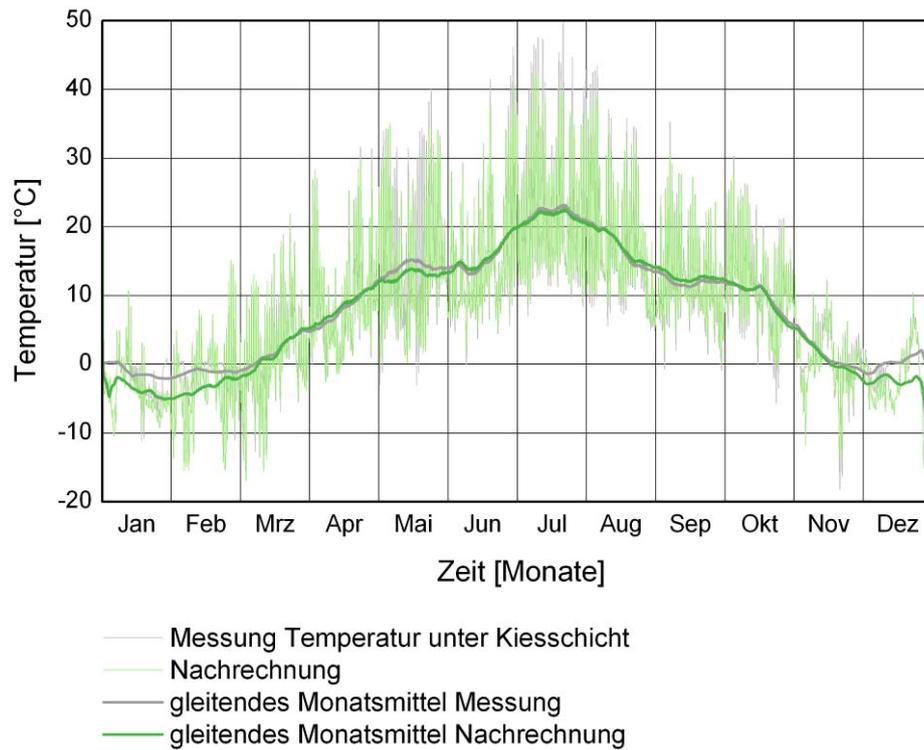


Bild 20: Vergleich der 1995/1996 gemessenen Temperaturen unter einem Kiesdach (hellgraue Kurve) mit den berechneten Temperaturen nach Anpassung der Kiesschicht (hellgrüne Kurve). Die hier zugrundeliegenden Materialkennwerte sind in Tabelle 6 dargestellt. Die dunklen, dickeren Kurven stellen jeweils das gleitende Monatsmittel dar.

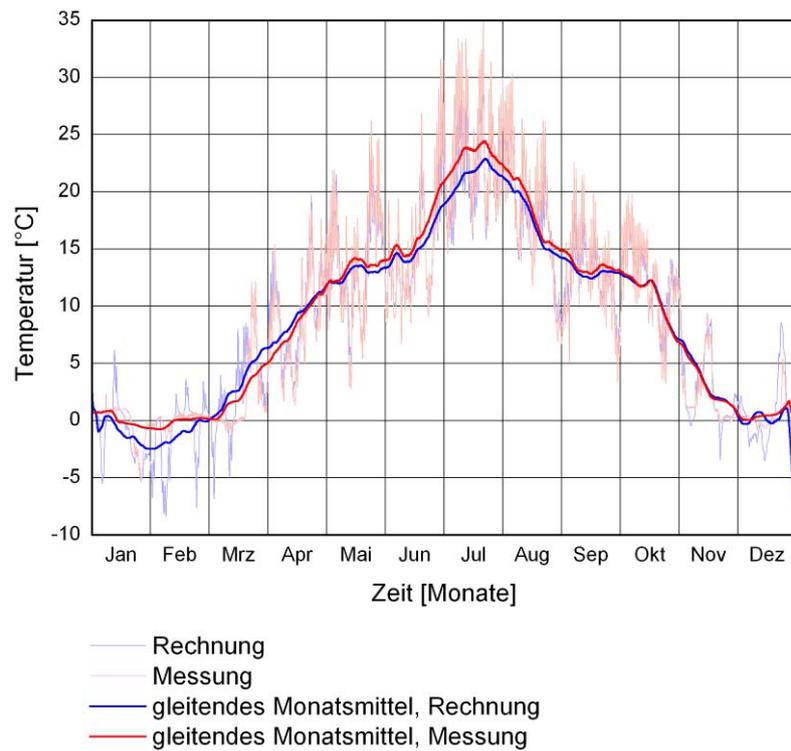


Bild 21: Vergleich der 1995/1996 gemessenen Temperaturen unter einem Gründach (hellblaue Kurve) mit den berechneten Temperaturen nach Anpassung der Substratschicht (hellrote Kurve). Die hier zugrundeliegenden Materialkennwerte sind in Tabelle 7 dargestellt. Die dunklen, dickeren Kurven stellen jeweils das gleitende Monatsmittel dar.

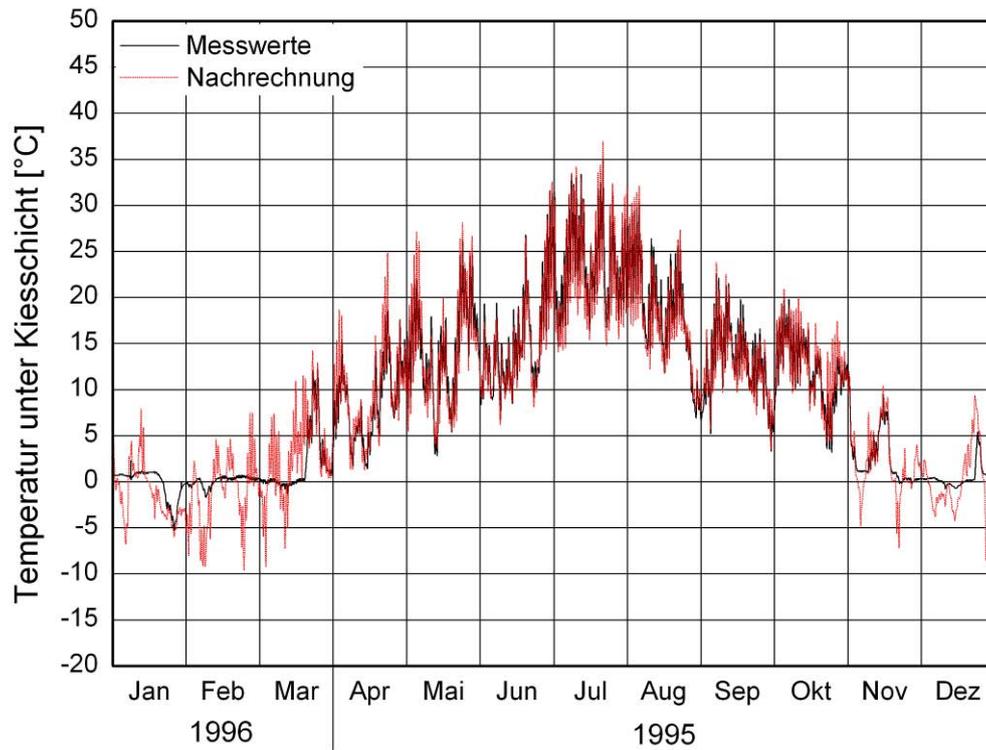


Bild 22: Vergleich der gemessenen (schwarz) und berechneten Temperaturverhältnisse (rot) an der Oberfläche der XPS-Dämmplatten unter der Kies- und der Substratschicht des Gründachaufbaus in Holzkirchen nach der Anpassung anhand der Datensätze von Wien und Leipzig.

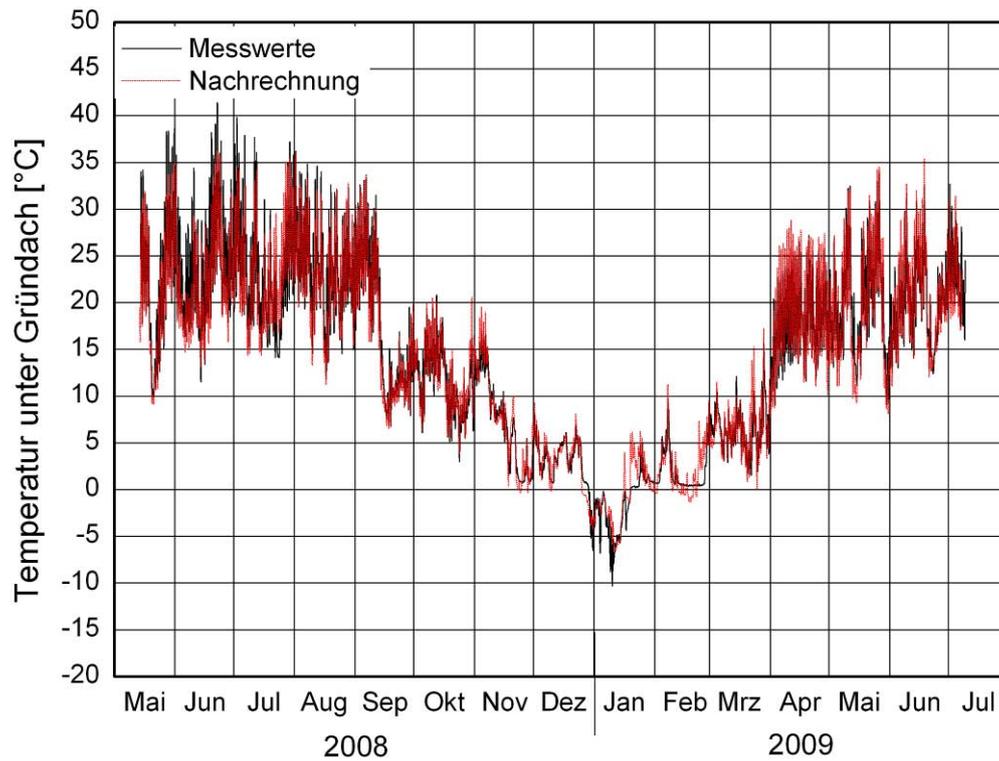


Bild 23: Vergleich der gemessenen (schwarz) und berechneten Temperaturverhältnisse (rot) auf der Dachbahn unter der Substratschicht des Gründachaufbaus in Wien.

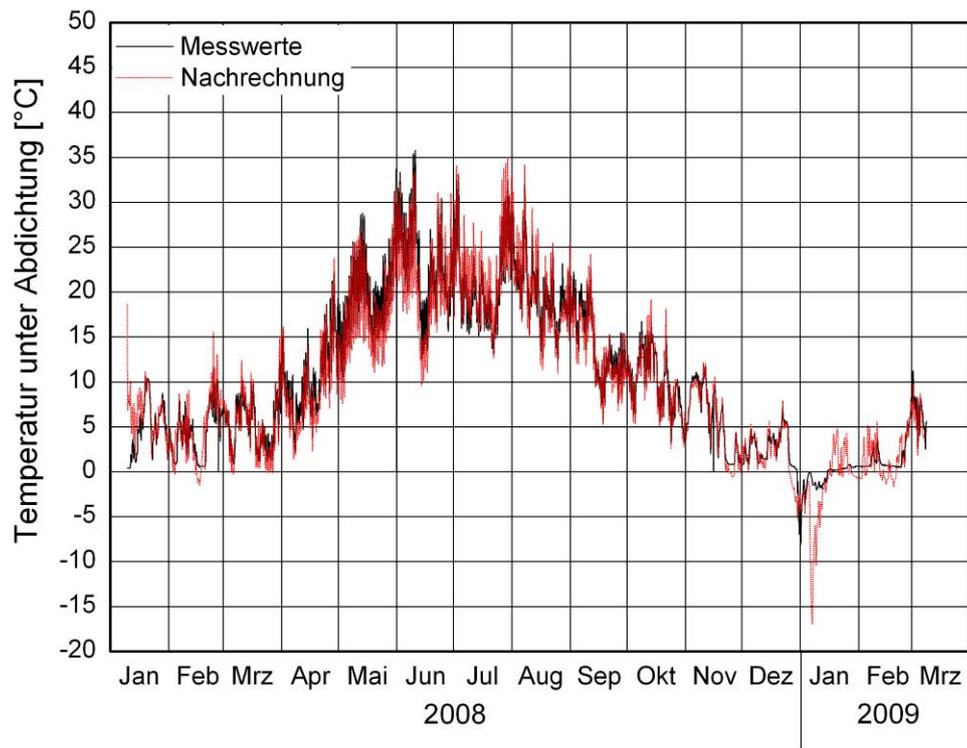


Bild 24: Vergleich der gemessenen (schwarz) und berechneten Temperaturverhältnisse (rot) auf der OSB-Platte unter der Substratschicht des Gründachaufbaus in Leipzig.

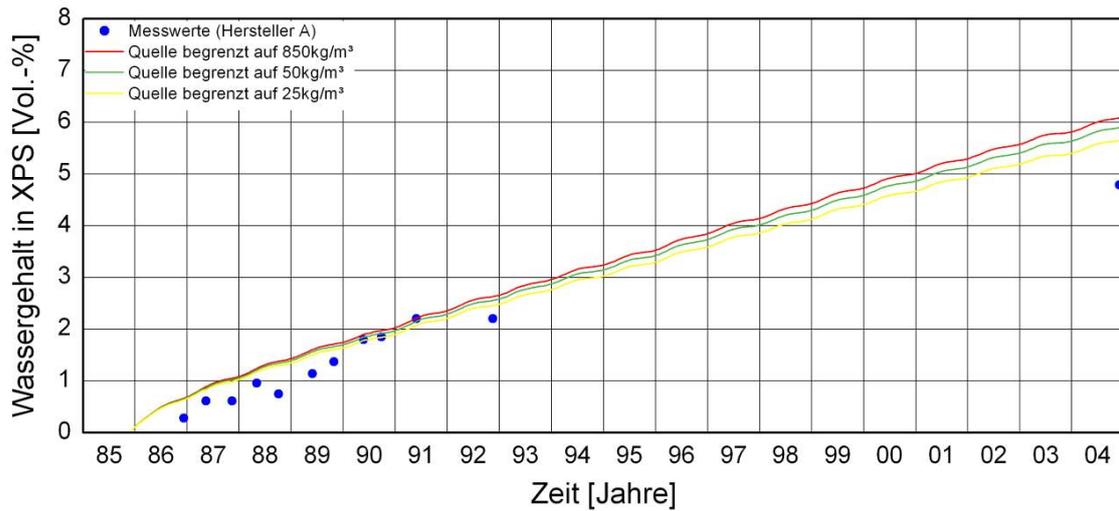


Bild 25: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte des Herstellers A im Dach 3 am Standort Holzkirchen.
 Variation: Begrenzung der Quelle in der wasserführenden Schicht

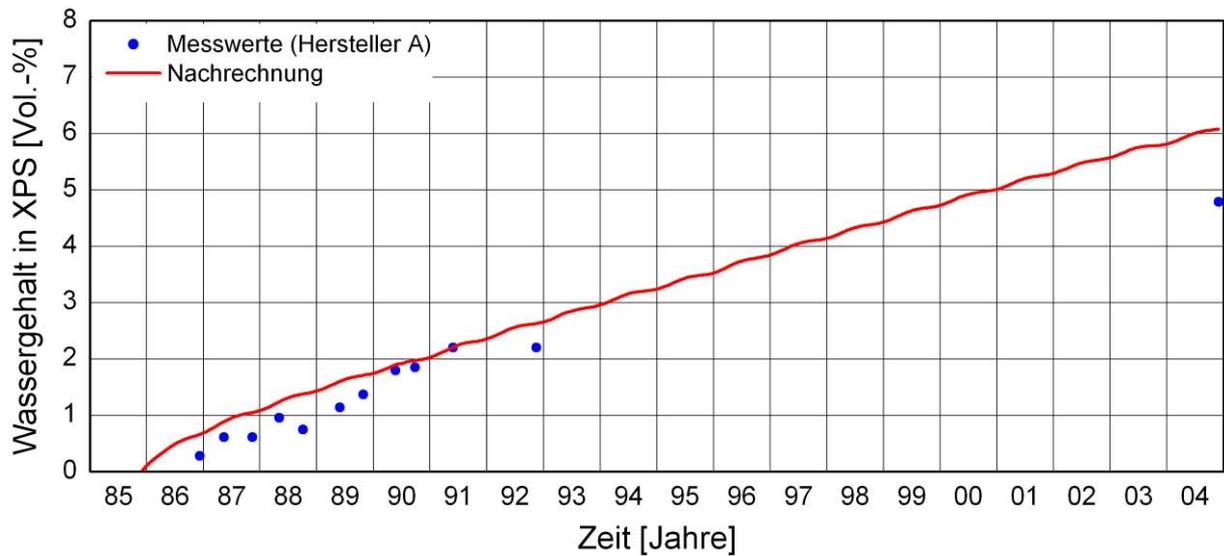


Bild 26: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte des Herstellers A im Dach 3 am Standort Holzkirchen.

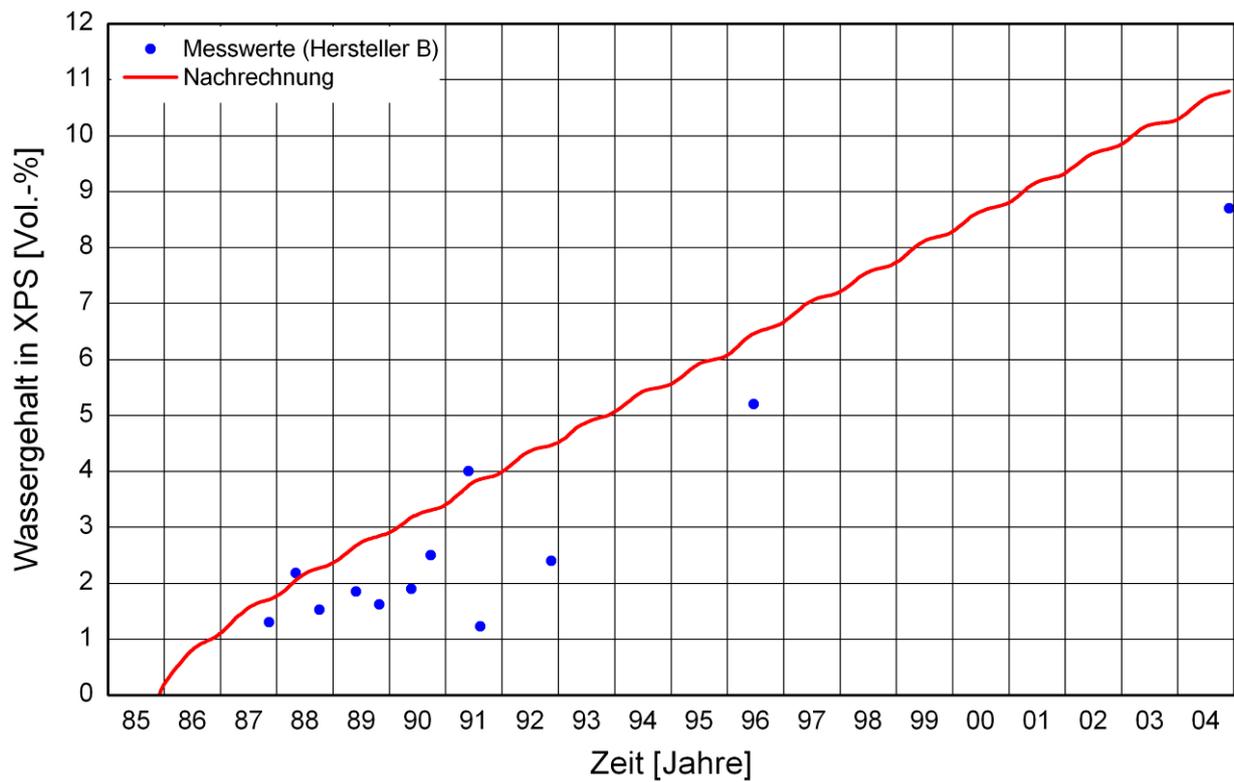


Bild 27: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte des Herstellers B im Dach 3 am Standort Holzkirchen.

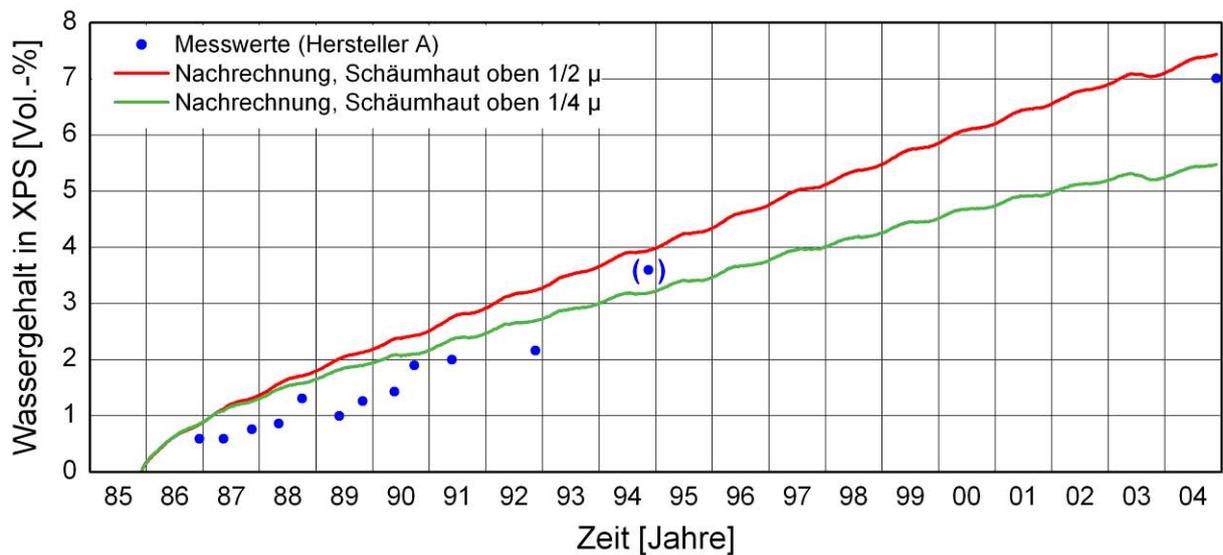


Bild 28: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte des Daches 5 am Standort Holzkirchen.

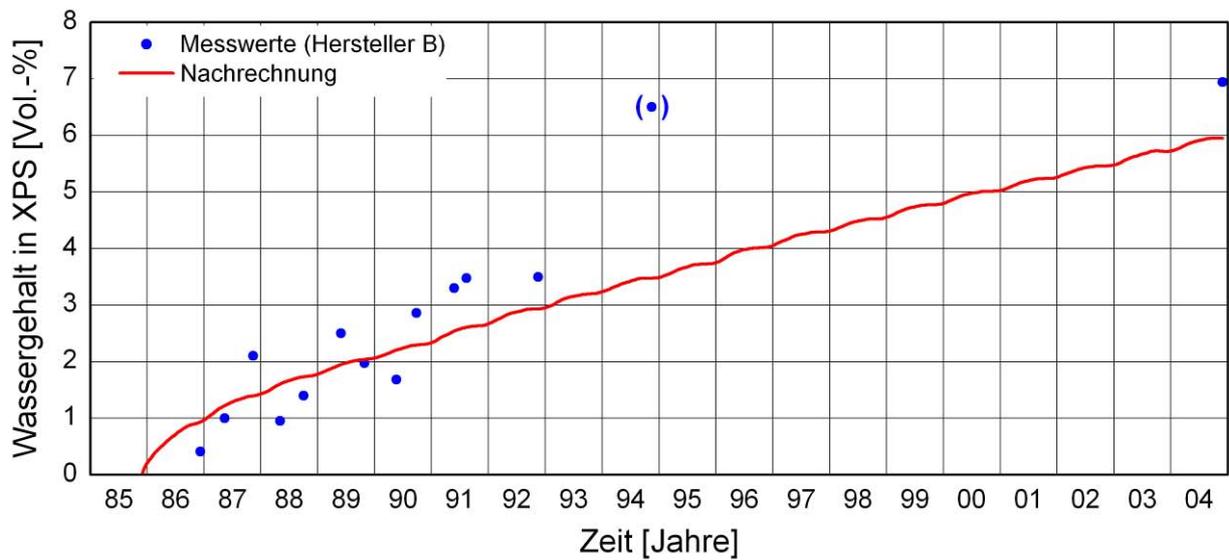


Bild 29: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte des Daches 6 am Standort Holzkirchen.

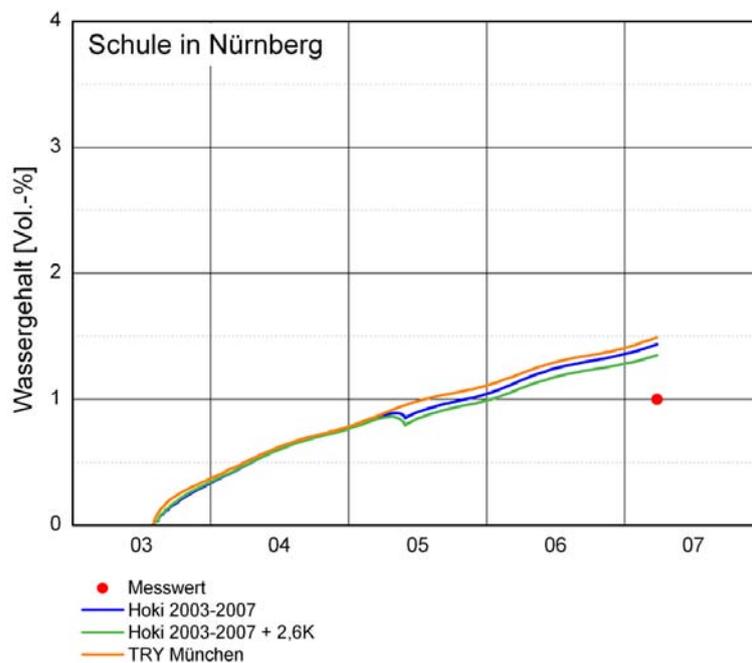


Bild 30: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte im Dach einer Schule in Nürnberg (Gründach mit Dränschicht) mit Variation des Außenklimas.

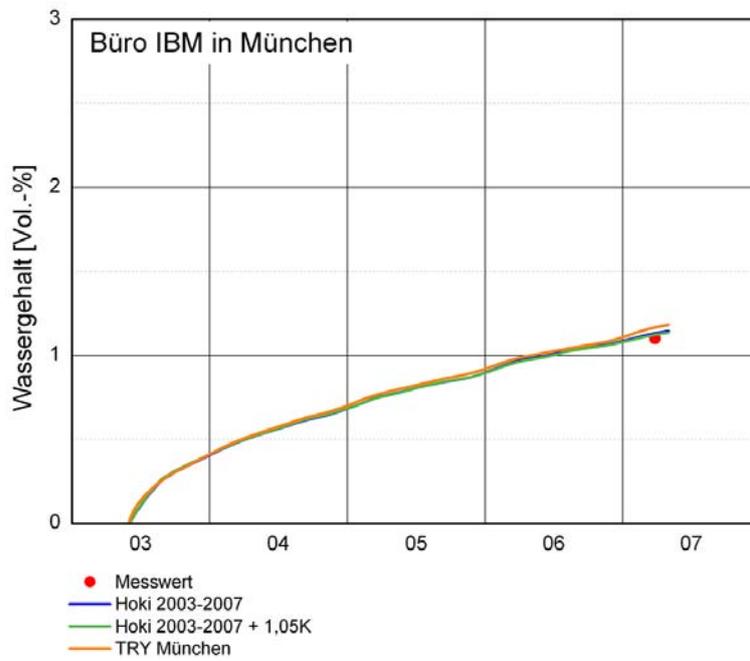


Bild 31: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte im Dach eines Bürogebäudes in München (Gründach mit Drainageplatte) mit Variation des Außenklimas.

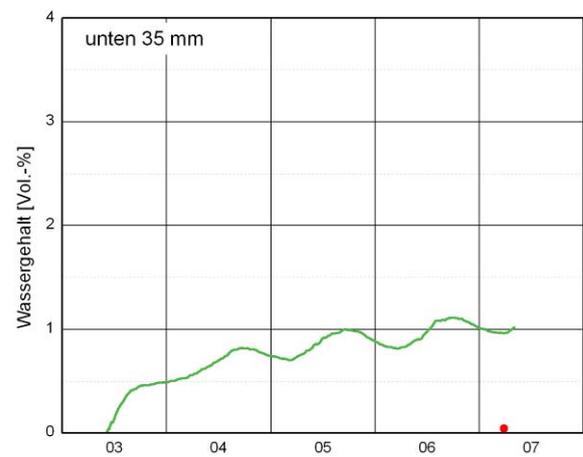
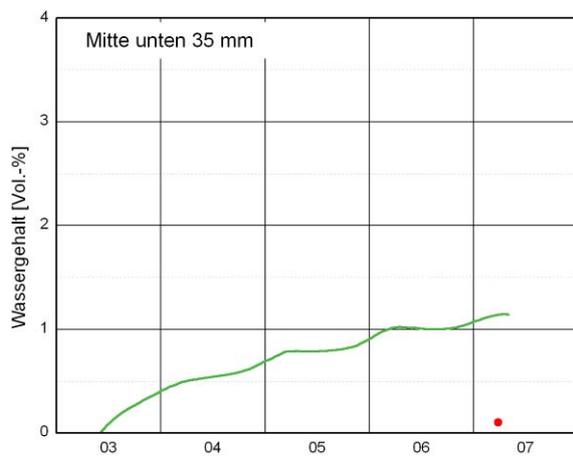
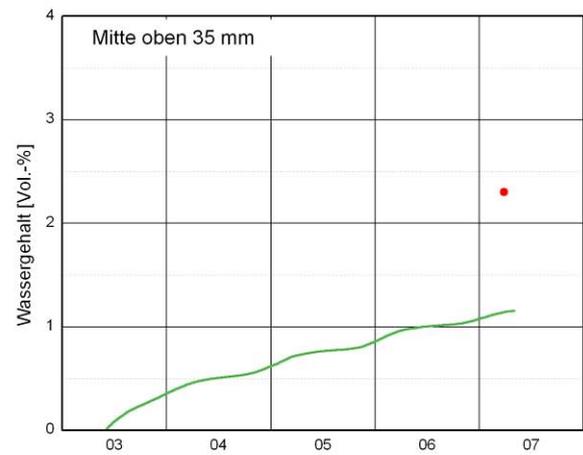
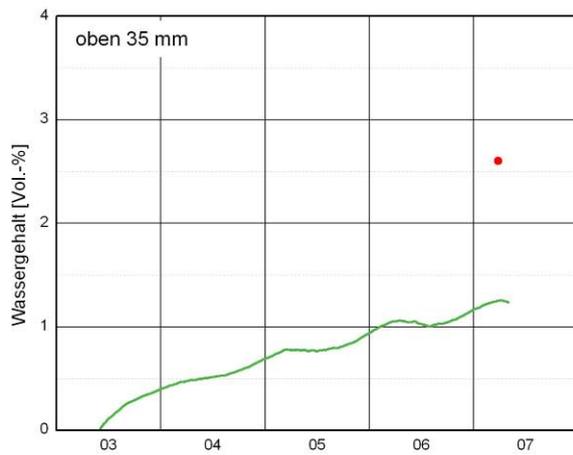


Bild 32: Nachrechnung der Wassergehalte in den einzelnen Schichten der XPS-Dämmstoffplatte im Dach eines Bürogebäudes in München (Gründach mit Drainageplatte) mit den um 1,05 K korrigierten gemessenen Klimadaten vom Standort Holzkirchen.

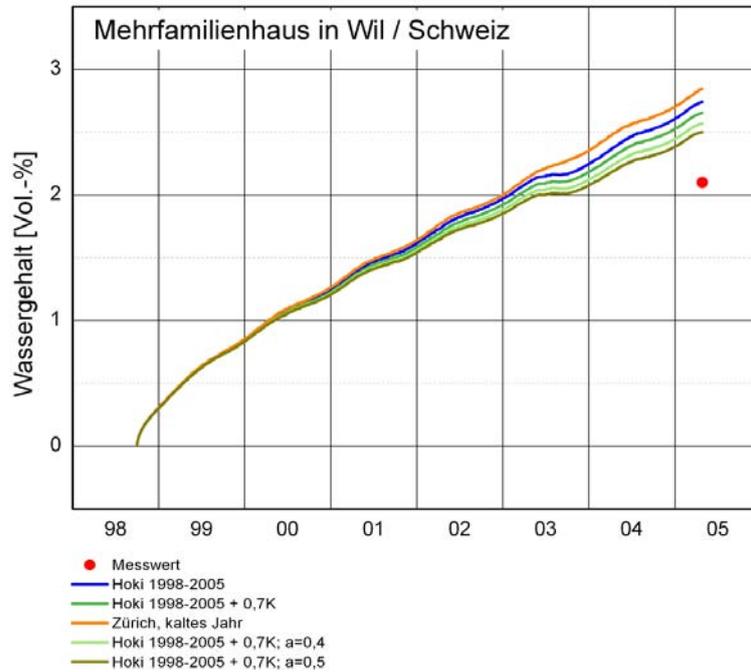


Bild 33: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte im Dach eines Mehrfamilienhauses in Wil / Schweiz (Gründach) mit Variation des Außenklimas sowie der Strahlungsabsorptionszahl.

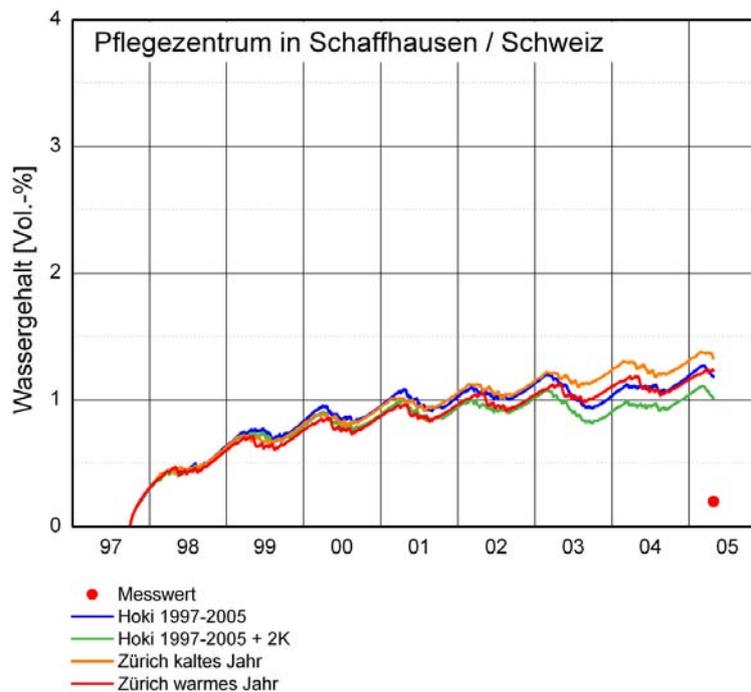


Bild 34: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte im Dach eines Pflegezentrums in Schaffhausen / Schweiz (Kiedach) mit Variation des Außenklimas.

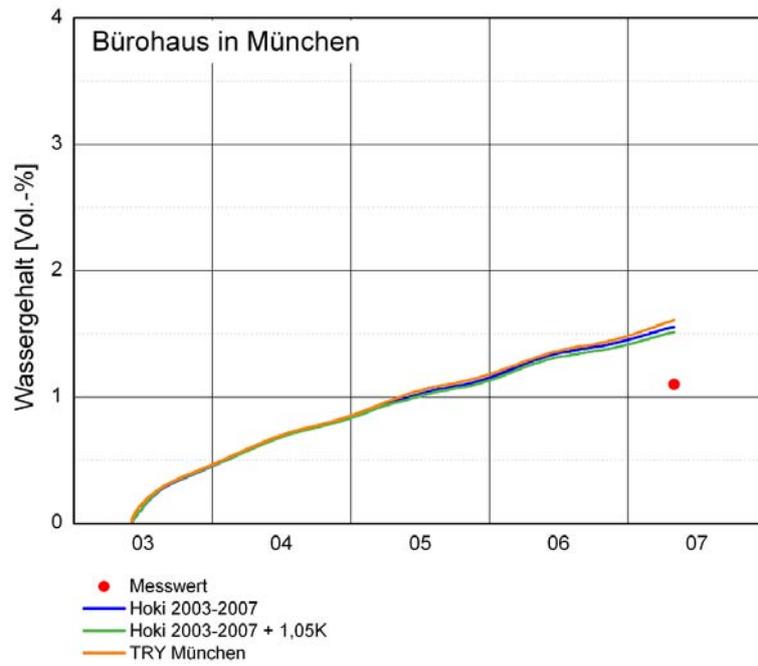


Bild 35: Nachrechnung der Wassergehalte in der XPS-Dämmstoffplatte im Dach eines Bürohauses in München (Gründach) mit Variation des Außenklimas.

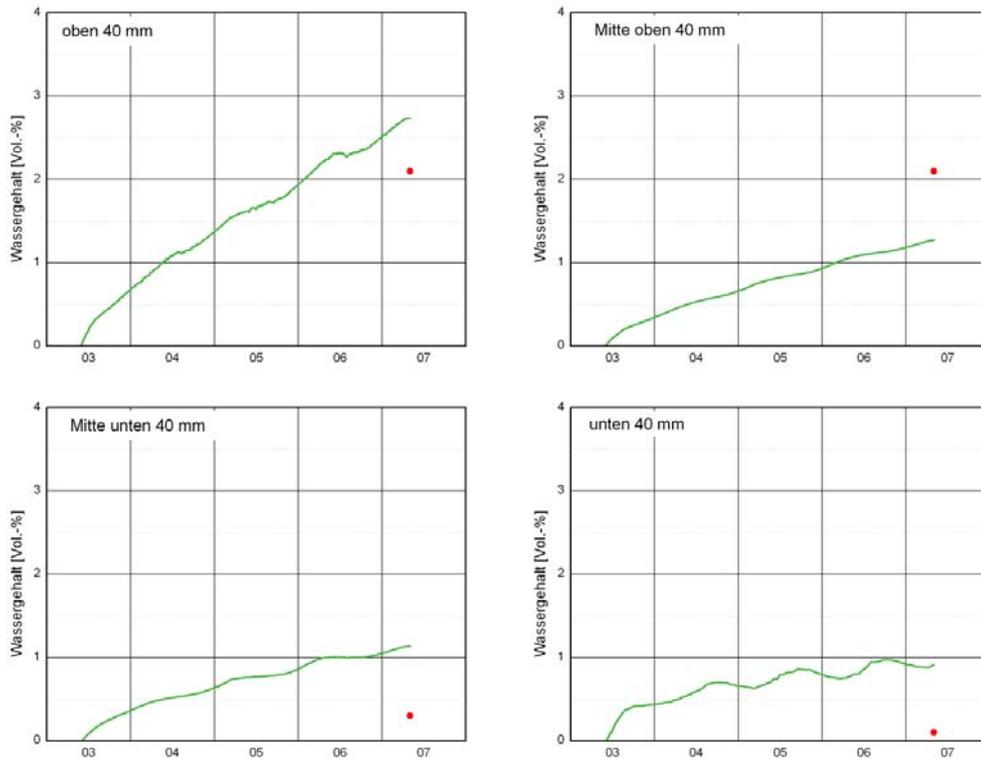


Bild 36: Nachrechnung der Wassergehalte in den einzelnen Schichten der XPS-Dämmstoffplatte im Dach eines Bürohauses in München (Gründach) mit den um 1,05 K korrigierten gemessenen Klimadaten vom Standort Holzkirchen.

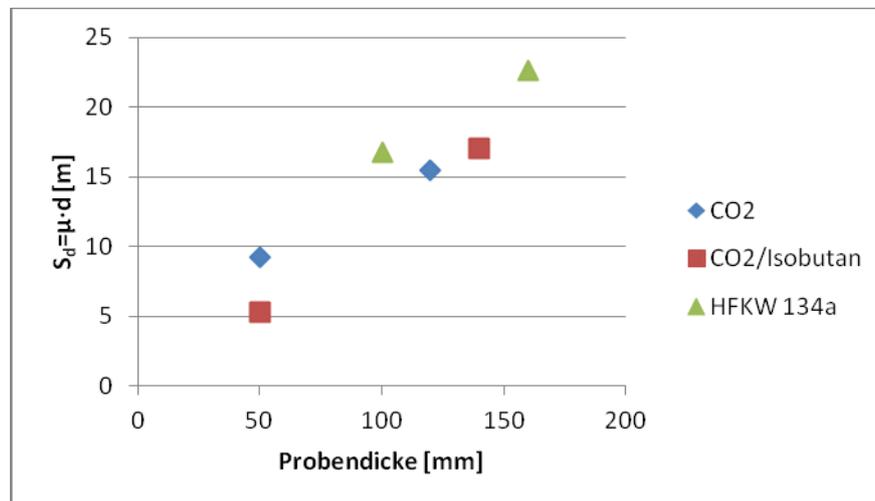
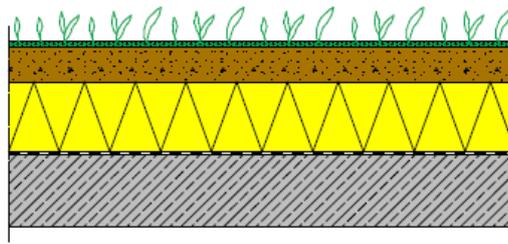
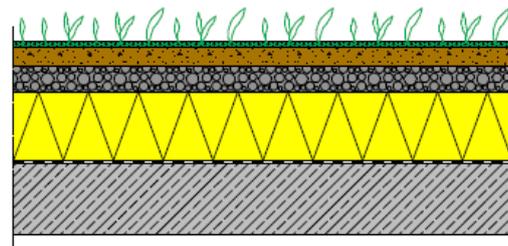


Bild 37: Wasserdampf-Diffusionswiderstand in Abhängigkeit der Dicke.



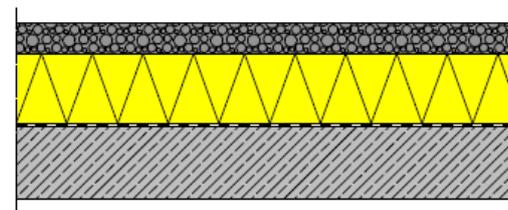
Substrat	8 cm
XPS-Dämmung	14 cm / 18 cm
Dachbahn	
Beton	15 cm

Bild 38: Schematische Darstellung des Umkehrdachs 1 (Gründach ohne Kiesschicht) für die rechnerische Langzeituntersuchung über das hygrothermische Verhalten.



Substrat	5 cm
Kies	5 cm
XPS-Dämmung	14 cm / 18 cm
Dachbahn	
Beton	15 cm

Bild 39: Schematische Darstellung des Umkehrdachs 2 (Gründach mit Kiesschicht) für die rechnerische Langzeituntersuchung über das hygrothermische Verhalten.



Kies	6 cm
XPS-Dämmung	14 cm / 18 cm
Dachbahn	
Beton	15 cm

Bild 40: Schematische Darstellung des Umkehrdachs 3 (Kiesdach) für die rechnerische Langzeituntersuchung über das hygrothermische Verhalten.

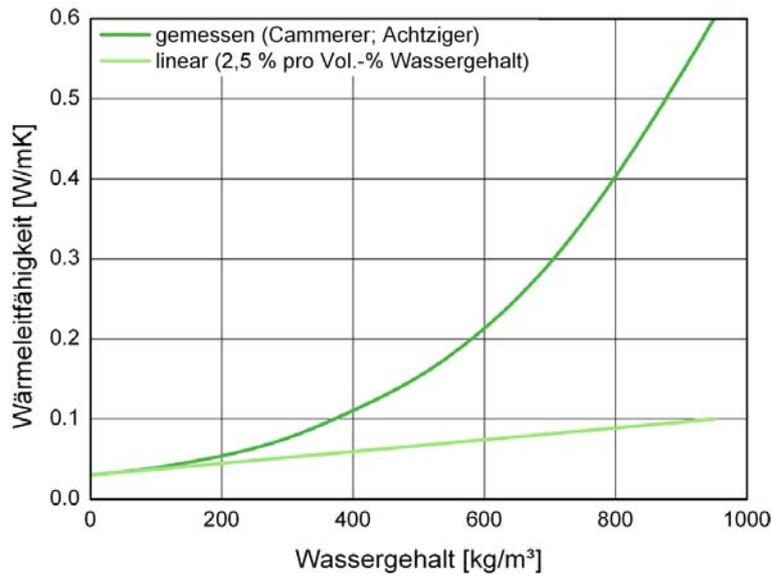


Bild 41: Verlauf der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit.

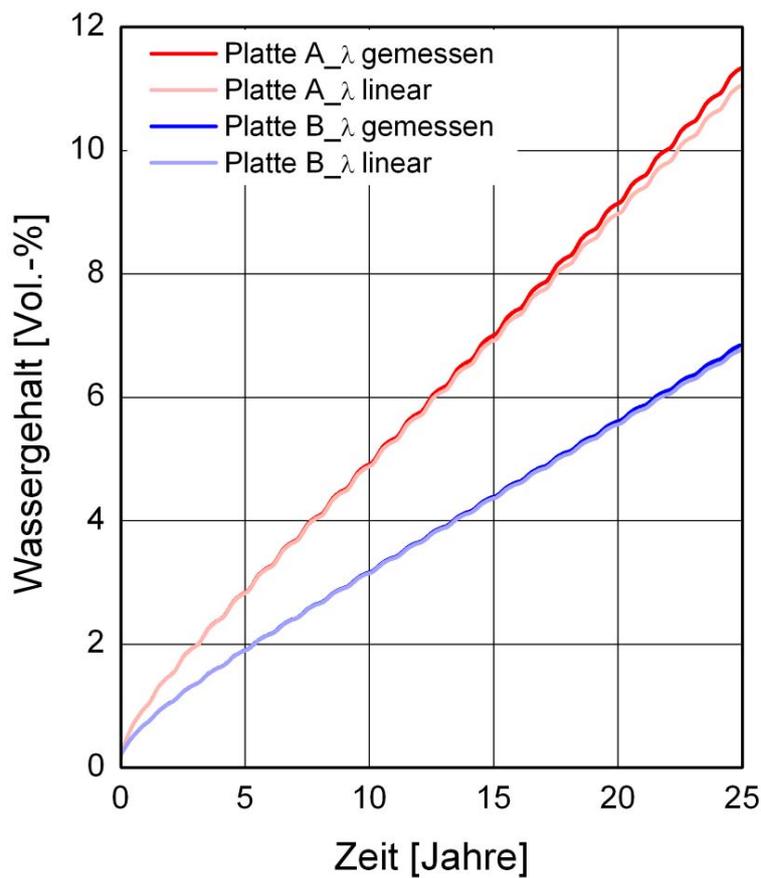


Bild 42: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Umkehrdach 1 (Gründach ohne Kiesschicht) mit einer Dämmdicke von 140 mm für die Platten A und B und der Wärmeleitfähigkeit über einen Berechnungszeitraum von 25 Jahren.

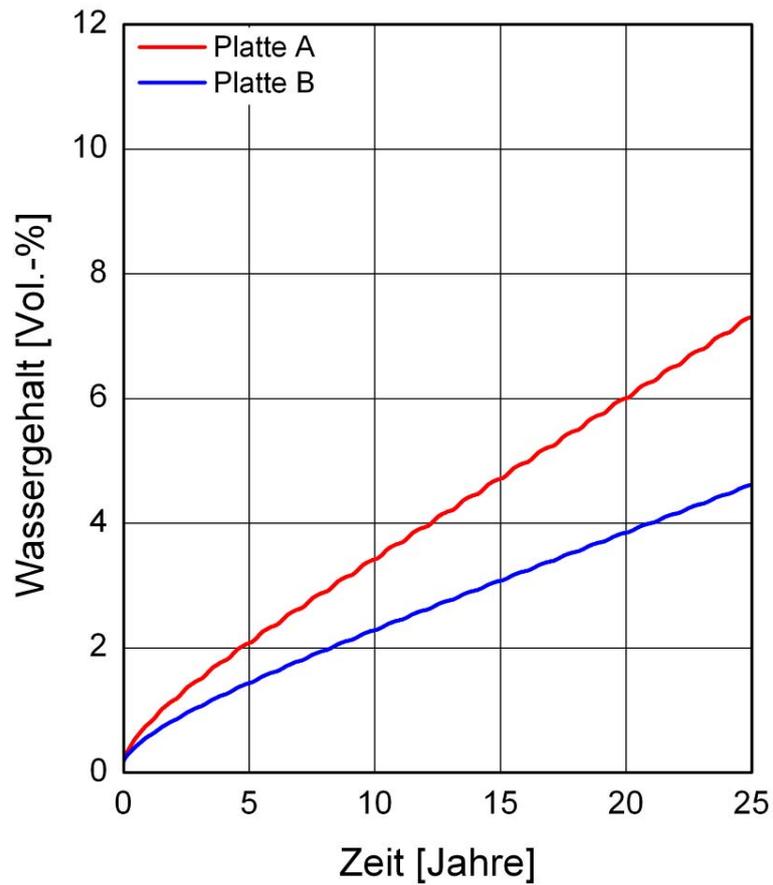


Bild 43: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Umkehrdach 1 (Gründach ohne Kiesschicht) mit einer Dämmdicke von 180 mm für die Platten A und B über einen Berechnungszeitraum von 25 Jahren. Für die Wärmeleitfähigkeit werden die gemessenen Werte nach [28] angesetzt.

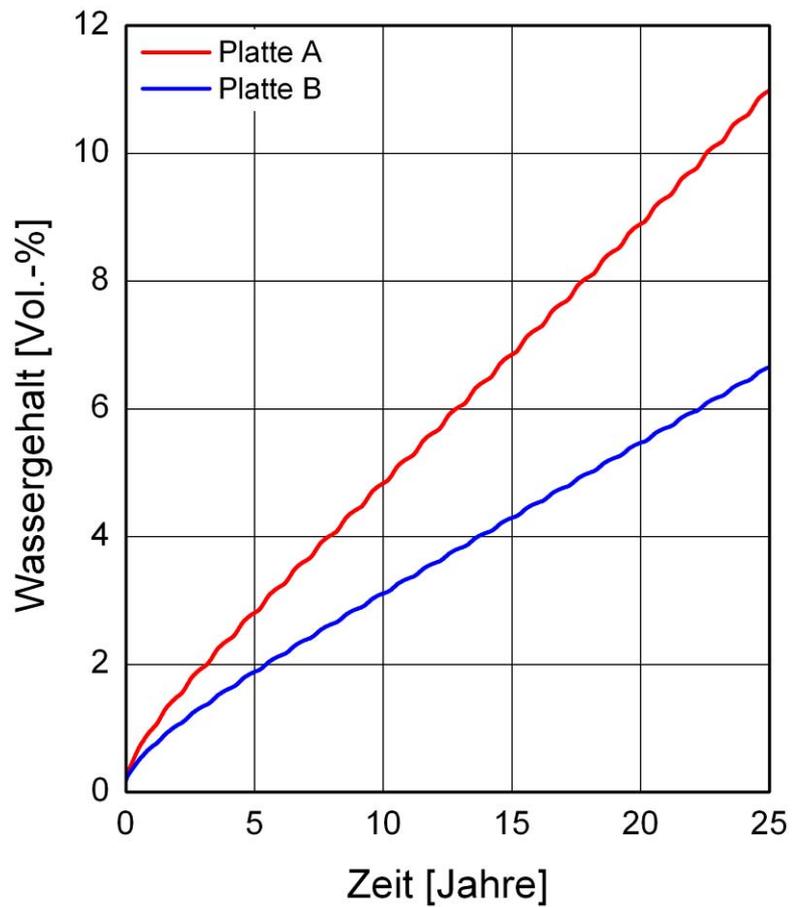


Bild 44: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Umkehrdach 2 (Gründach mit Kiesschicht) mit einer Dämmdicke von 140 mm für die Platten A und B über einen Berechnungszeitraum von 25 Jahren. Für die Wärmeleitfähigkeit werden die gemessenen Werte nach [28] angesetzt.

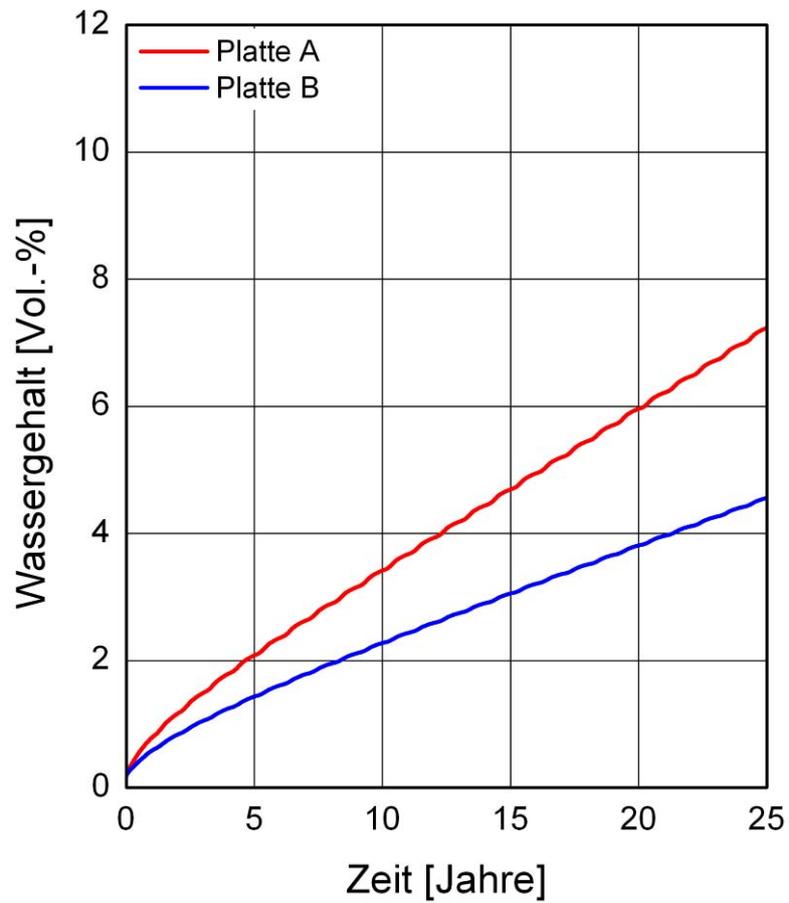


Bild 45: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Umkehrdach 2 (Gründach mit Kiesschicht) mit einer Dämmdicke von 180 mm für die Platten A und B über einen Berechnungszeitraum von 25 Jahren. Für die Wärmeleitfähigkeit werden die gemessenen Werte nach [28] angesetzt.

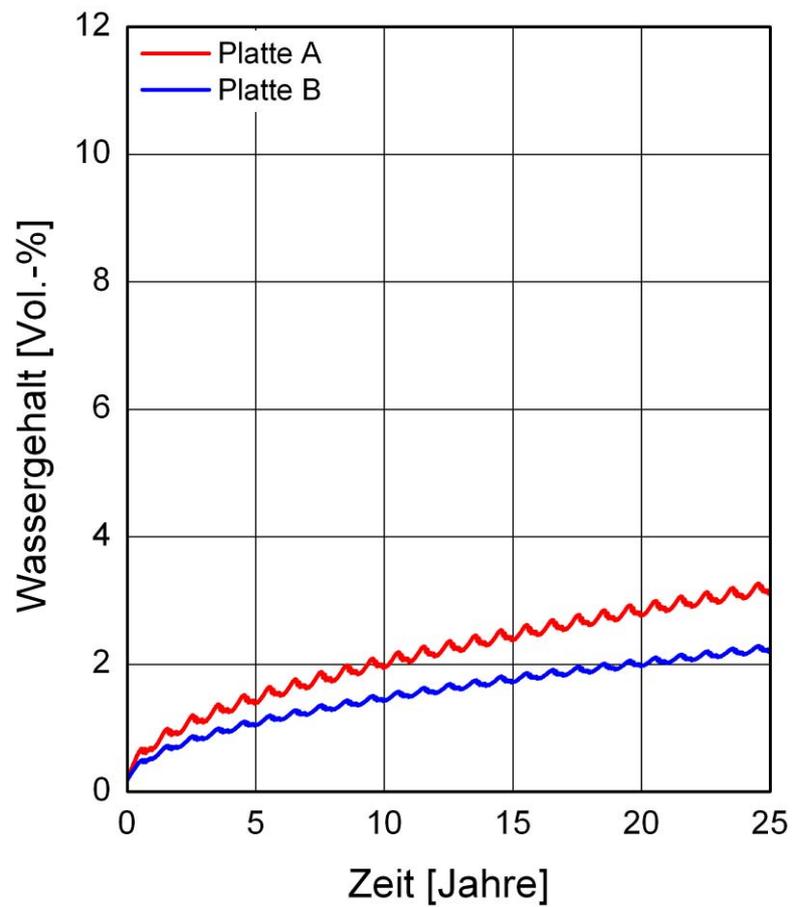


Bild 46: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Umkehrdach 3 (Kiesdach) mit einer Dämmdicke von 140 mm für die Platten A und B über einen Berechnungszeitraum von 25 Jahren. Für die Wärmeleitfähigkeit werden die gemessenen Werte nach [28] angesetzt.

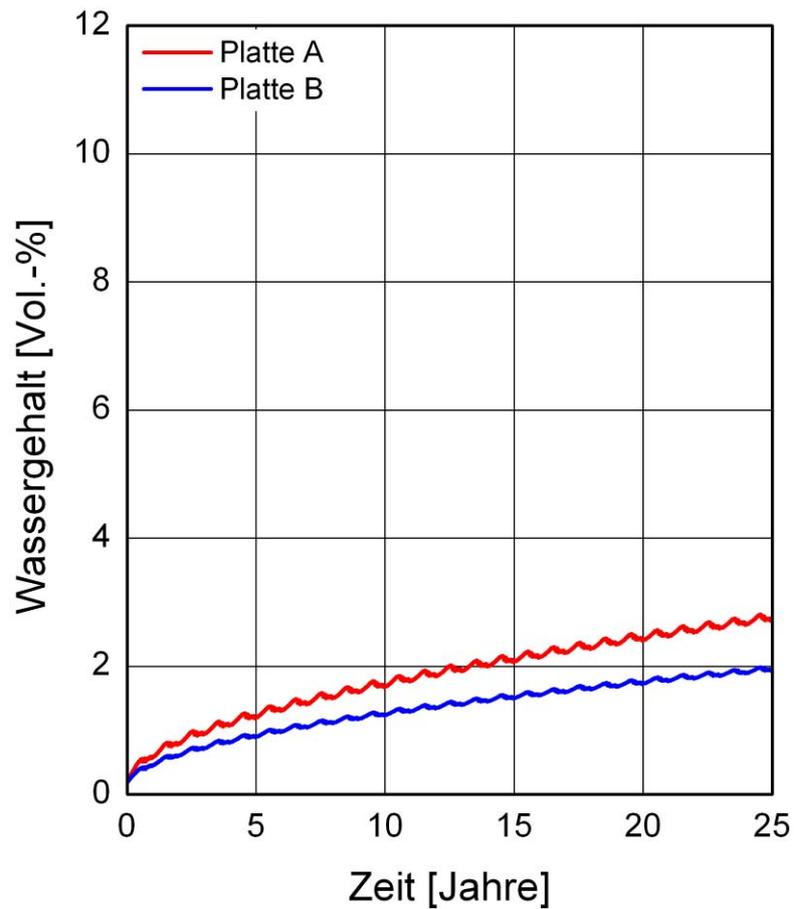


Bild 47: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Umkehrdach 3 (Kiesdach) mit einer Dämmdicke von 180 mm für die Platten A und B über einen Berechnungszeitraum von 25 Jahren. Für die Wärmeleitfähigkeit werden die gemessenen Werte nach [28] angesetzt.

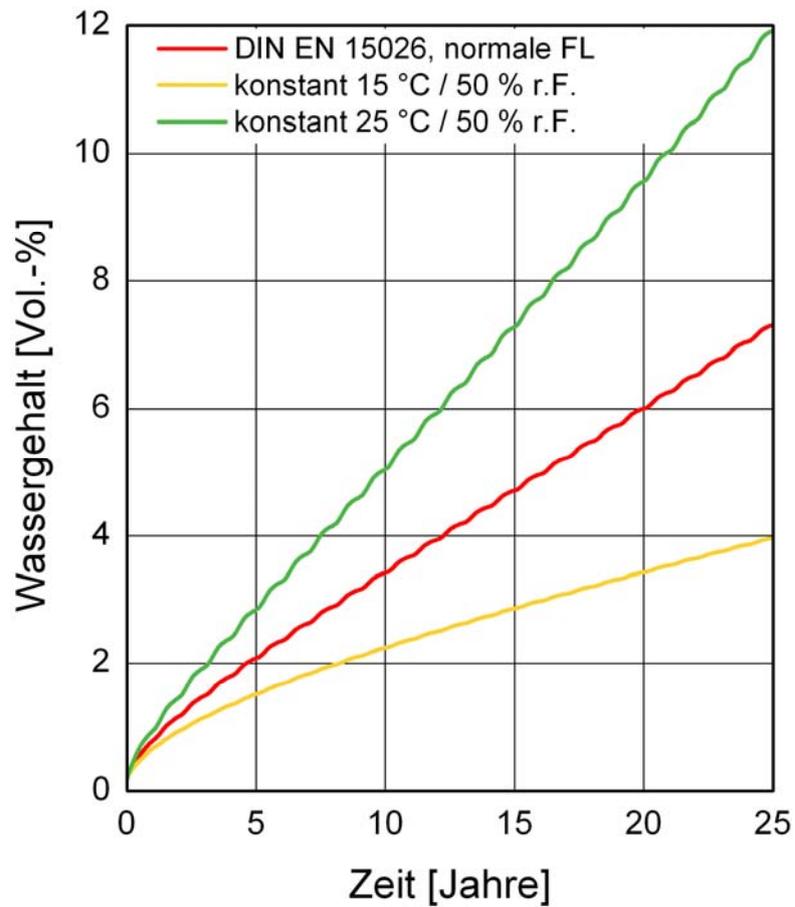


Bild 48: Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Umkehrdach 1 (Gründach ohne Kiesschicht) mit einer Dämmdicke von 180 mm für Platte A über einen Berechnungszeitraum von 25 Jahren in Abhängigkeit von den Innenklimabedingungen. Für die Wärmeleitfähigkeit werden die gemessenen Werte nach [28] angesetzt.