

UNIV.-PROF. DR.-ING HARALD BUDELMANN
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau

iBMB
MPA

TU Braunschweig

Vergleichsuntersuchungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit von Unterdeck- und Unterspannbahnen und Dampfsperren

von

Herrn Peter Steben

Braunschweig

26.06.2005

Verzeichnisse

Inhaltsverzeichnis:

1.	Einleitung	7
2.	Unterspannbahnen, Unterdeckbahnen, Dampfsperren.....	9
2.1.	Struktur, Aufbauformen und Herstellung von Unterspann- Unterdeckbahnen	9
2.1.1.	Vliese und Vliesstoffe	12
2.1.2.	Filme und Beschichtungen	14
2.2.	Anforderungen und Anwendungen von Unterdeck- und Unterspannbahnen.....	19
2.2.1.	Anwendung von USB/USB.....	19
2.2.2.	Unterschiede zwischen Unterdeck- und Unterspannbahnen	22
2.3.	Dampfsperren	24
2.4.	Diffusions- und Konvektionsanforderungen an UDB und Dampfsperren im geneigten Steildach	25
3.	Physikalische Grundlagen der Diffusion.....	30
3.1.	Sorption	32
3.2.	Diffusion	34
3.3.	Lösungsdiffusion	36
3.4.	Wasserdampfdiffusion - Effusion.....	37
3.5.	Oberflächendiffusion	39
3.6.	Thermodiffusion und Gasströmung	40
3.7.	Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstände.....	41
4.	Normen und Methoden zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusion.....	44
4.1.	Deutsche und Europäische Normen	44
4.2.	Internationale Normen.....	49
4.3.	Alternative Messtechniken	50
4.3.1.	Lyssy-Methode	50
4.3.2.	Gravitest.....	57

Verzeichnisse

4.3.3.	Diodenlaserspektrometer	58
4.3.4.	Genormtes Elektrolyse- und Infrarotverfahren	60
4.3.5.	Mocon Testmethode.....	62
4.3.6.	Erweitertes gravimetrisches Messverfahren – Mehrlagenverfahren	63
4.4.	Stand der Diskussion	67
5.	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	70
5.1.	Verwendete Materialien ,Struktur und Aufbau.....	70
5.2.	Bestimmung der WDD mittels des gravimetrischen Verfahrens nach [N14].....	73
5.2.1.	Herstellung der Proben	73
5.2.2.	Versuchsdurchführung	75
5.2.3.	Ergebnisse der Normversuche.....	77
5.2.4.	Ausbau und Entnahme der Proben	78
5.3.	Ergebnisermittlung der Kennwerte für baupraktische Anwendungen mit den in der Norm aufgeführten Berechnungsgleichungen.....	79
5.4.	Bestimmung der WDD - Werte mittels Lyssy- Methode	82
5.4.1.	Prüfungsergebnisse nach Lyssy	84
5.5.	Vergleich der Prüfungsergebnisse	85
6.	Bewertung	90
7.	Fazit und Ausblick	93
8.	Literaturverzeichnis	95
8.1.	Normen	95
8.2.	Literatur	96
8.3.	Befragte Personen	99
8.4.	Abkürzungen und Einheiten	101
Anhang A – Fotodokumentation der Versuchsdurchführung des Normverfahrens		
Anhang B – Fotodokumentation der Versuchsmaschine des Lyssy-Verfahrens		
Anhang C – Auswertung der Normversuche nach DIN EN ISO 12572		

Verzeichnisse

Anhang D – Auswertung der Wasserdampfdiffusionsversuche nach dem Lyssy-Verfahren

Anhang E – Mathematische Berücksichtigung der Luftschicht unterhalb der Proben

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Spezifische Filamentoberfläche zu Filamentfeinheit nach [1]	13
Abbildung 2 Vliesoberfläche in Abhängigkeit der Filamentfeinheit und des Vliesflächengewichtes nach [1]	13
Abbildung 3 Blasfilm-Extrusion.....	15
Abbildung 4 Flach- oder Castfilm-Extrusion	15
Abbildung 5 Film nach Extrusion und nach dem Verstrecken aus [7]	16
Abbildung 6 Funktionsweise des mikroporösen Films	17
Abbildung 7 Herstellung von perforierten Filmen	18
Abbildung 8 Sperrwert in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte aus [26]	25
Abbildung 9 Tauwassermenge im Dach nach DIN 4108-3 aus [26].....	29
Abbildung 10 Zustandsdiagramm des Wassers nach [49]	31
Abbildung 11 Zusammenhang zwischen Sorption Hygroskopie und Porengrößenverteilung	32
Abbildung 12 Sorptionisotherme eines a) hygroskopisch porösen Baustoffs nach [49] b) hydrophoben Kunststoffs nach [19]	33
Abbildung 13 Zusammenhang zwischen Oberflächendiffusion und Sorption	40
Abbildung 14 Ort der Übergangsteilwiderstände.....	42
Abbildung 15 Querschnitt durch den Aufbau des Messgerätes der Firma Lyssy.....	51
Abbildung 16 Querschnitt durch den Aufbau des Messgerätes der Firma Lyssy mit Erweiterung für Dry-Cup- Messmethode	52
Abbildung 17 Messkarten zur Probenaufnahme	53
Abbildung 18 (links) konditionierte Prüfkammer, in der die gravimetrischen Messungen stattfinden	58
Abbildung 19 (rechts) Einbausituation der Einzelprobenschalen innerhalb eines Drehtellers	58

Verzeichnisse

Abbildung 20 Aufbau des Diodenlaser- Absorptionsspektrometers zur räumlichen Wasserdampfdetektion.....	59
Abbildung 21 Experimentelle Anordnungen nach [35]	60
Abbildung 22 Schematische Darstellung aus [N8]	61
Abbildung 23 Modifiziertes, kontinuierliches Mehrlagenmessverfahren nach [28].....	66
Abbildung 24 Allgemeines Diffusionsverhalten unterschiedlicher Polymerfolien	72
Abbildung 25 Dickenabhängigkeit	72
Abbildung 26 Dichteabhängigkeit.....	72
Abbildung 27 Induktionsmessgerät Abbildung 28 Induktionsmessung	73
Abbildung 29 Prüfschalen	74
Abbildung 30 Schema der Einbausituation bei der Normprüfung	79
Abbildung 31 Probenumströmung.....	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der Aufbau- und Herstellungsarten mit einigen Vor- und Nachteilen	12
Tabelle 2 Zuordnung von Zusatzmaßnahmen nach [6] Tabelle 1	20
Tabelle 3 Einstufungen von Unterdach, Unterdeckung und Unterspannung nach [32]	22
Tabelle 4 unterschiedliche Klassifizierungen des Begriffs der Diffusionsoffenheit.....	28
Tabelle 5 Größenverhältnisse, Porenradien, Diffusions- und Sorptionsarten	36
Tabelle 6 Normenübersicht zur Bestimmung von Dampfdurchlässigkeit bei Baustoffen	45
Tabelle 7 Vergleich der Prüfnormen zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit	47
Tabelle 8 Untersuchte Materialien.....	70
Tabelle 9 Unregelmäßigkeiten bei der Prüfung.....	76
Tabelle 10 Ergebnisse der Wasserdampfdurchlässigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 12572	77
Tabelle 11 Zeitspannen zur Gewichtsreduktion von 1mg bei Goretex	78
Tabelle 12 Geräteeinstellungen während der Messung	83
Tabelle 13 Lyssy-Ergebnisse Eichstandard Goretex	84

Verzeichnisse

Tabelle 14 Prozentuale Abweichung der Ergebnisse zwischen Normprüfung und Lyssy-Methode.....	85
Tabelle 15 Korrigierte Lyssy-Messwerte	86
Tabelle 16 Vergleich der Lyssy- und Norm- Ergebnisse (Eichung durch Herstellereichstandard) an denselben Probenstücken.....	87
Tabelle 17 Vergleich zwischen korrigierten Lyssy- Ergebnissen und den Normergebnissen an den selben Probenstücken	87
Tabelle 18 Vergleich der Norm- und Lyssy- Werte nach der Maschineneichung mit den WDD-Werten der Goretexmembran aus der MPA- Normmessung.....	88
Tabelle 19 Lyssy- Messwerte der Proben bei unterschiedlichem Eichstandard	88

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund der weltweit immer weiter sinkenden Energievorräte und der gegenläufigen Entwicklung beim Energieverbrauch werden in Deutschland die Vorschriften für das Haushalten mit Energieträgern jeglicher Art immer restriktiver. Im Bereich des Bauwesens zeigte sich durch die Einführung des Energieeinsparungsgesetzes 1976 und der daraus resultierenden Wärmeschutzverordnung im Jahre 1977 zum ersten Mal das Bestreben den Aufbau und die Struktur von Bauobjekten dahingehend zu ändern, dass neben Erfüllung der Mindestanforderung aus Sicht der Gebrauchstauglichkeit auch der Energieverbrauch bei Benutzung dieser Objekte zu begrenzen ist. Diese bis heute weitergeführte Entwicklung brachte zwei Novellierungen der Wärmeschutzverordnung. Sie wurde im Jahr 2002 durch die Energie-Einsparverordnung ersetzt welche 2004 novelliert wurde und stellt die zurzeit gültige Richtlinie dar.

Im „normalen“ Steildachbereich führte diese Entwicklung zu immer mehr Ausgedämmten Sparrenquerschnitten. Die heutzutage gängige Vollsparrendämmung, bei der unter Beibehaltung der Sparrenhöhe die Dämmung in voller Höhe in den Sparrenzwischenraum eingebracht wird, konnte Probleme bezüglich der Kondensatbildung innerhalb der Dachkonstruktion mit sich bringen. Um diese Kondensatbildung und die damit einhergehenden Bauschäden zu vermeiden, wurden für den Außenbereich hochdiffusionsfähige, bahn- oder planenförmige Produkte entwickelt.

Des Weiteren wird auch die Abdichtung der Innenseite im Steildachbereich fast ausschließlich mit folienartigen Produkten ausgeführt, auch wenn im Bereich der ausgebauten Dachgeschosse zusätzlich noch verspachtelte Gipskartonbauplatten zum Einsatz kommen. Durch die Folienschicht soll neben der Konvektion auch der Wasserdampfeintrag durch Diffusion in die Konstruktion unterbunden werden.

Um Bauprodukte aller Art auf ihren Diffusionswiderstand zu prüfen, gibt es zurzeit eine Reihe gültiger Normen. Neben diesen normierten Verfahren haben sich aber auch andere Methoden und Systeme zur Bestimmung dieser Eigenschaft etabliert. Gerade in Bezug auf die Qualitätskontrolle bei der Produktion von den oben genannten Folienprodukten sind die normierten Verfahren nicht geeignet, da die Durchführung zeitaufwendiger ist als es eine moderne wirtschaftliche Produktion zulässt.

Vor diesem Hintergrund kommt es aber nicht nur aufgrund der unterschiedlichen normierten Prüfungsarten immer wieder zu Abweichungen bei den ermittelten Werten, sondern auch mit den bei Herstellern solcher Bahnen eingesetzten, nicht normierten Verfahren ergeben sich häufig Differenzen zwischen den Ergebnissen.

In dieser Arbeit werden die unterschiedlich normierten und ein häufig zur Produktionskontrolle genutztes Mikroprozessor - gesteuertes Verfahren verglichen. Neben den Grundlagen der Wasserdampfdiffusion und den Funktionsmechanismen der Messverfahren, wird ein

Überblick über den derzeitigen Stand der Diskussion innerhalb der Fachwelt gegeben. Gleichzeitig wird durch eine Messreihe an verschiedenen Produktmustern ein direkter Vergleich zwischen der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach der DIN EN ISO 12572 [N14] und dem in der Qualitätskontrolle eingesetzten „Lyssy“- Verfahren durchgeführt. Ziel ist es, entweder eine Korrelation zwischen den Ergebnissen herzustellen oder eine Möglichkeit aufzuzeigen, die gemessenen Werten des „Lyssy“ Verfahrens an die nach bauaufsichtlichen und normierten Verfahren gemessenen Werte anzupassen.

2. Unterspannbahnen, Unterdeckbahnen, Dampfsperren

Bei Unterspann- und Unterdeckbahnen sowie Dampfsperren handelt es sich um folienartige Produkte, die vorwiegend aus polymeren Stoffen hergestellt werden. Bei den eingesetzten Kunststoffen herrschen Polyethylen, Polypropylen, Polyamid, Polyester, Polytetrafluorethylen, Polyurethan und Polyacryl vor. Diese Kunststoffe werden auf verschiedenste Weise verarbeitet und teilweise in einem Produkt miteinander kombiniert. Die Herstellung der einzelnen Bahnen ist ebenso unterschiedlich wie die verarbeiteten Materialien.

Während es sich bei Unterspann- und Unterdeckbahnen im Allgemeinen um Kombinationen aus Vliesstoffen und so genannten aktiven Funktionsschichten handelt, bestehen Dampfsperren im Allgemeinen nur aus einer Filmschicht bestehend, wobei es auch hier Vliesstoffkaschierungen gibt.

2.1. Struktur, Aufbauformen und Herstellung von Unterspann- Unterdeckbahnen

Grundsätzlich kann man bei den Unterspann- und Unterdeckbahnen heutzutage drei Arten im Aufbau unterscheiden.

- Vlies- Filmkombinationen mit unterschiedlicher Lagenanzahl
- Beschichtete Vliese
- Flash-Spun-Bond Produkte (siehe Kapitel 2.1.1)

Als die häufigste Art kann hier die Schichtenkombination aus Vliesstoffen und diffusionsoffenen Filmen genannt werden. Hierbei werden die Filme mit einem oder mehreren Vliesen kombiniert und durch Klebstoffe, thermische Behandlung, Druck oder Schallwellen miteinander verbunden. Diese Verfahren können bei der Herstellung auch kombiniert werden. Durch Zusätze wie Flammenschutzmittel, UV-Stabilisatoren, Hydrophobierungsmitteln oder anderen chemischen Zusätzen werden diese Kombinationen vor den in der Praxis auftretenden Umweltbelastungen geschützt.

Oftmals werden Zusatzmittel bereits bei der Vliesstoffproduktion mitverarbeitet und sind dann in den Vliesen enthalten. Da diese Filme die eigentliche Funktionsschicht darstellen, werden sie durch beidseitig aufkaschierte Vliese geschützt. Die Verbindung wird wie bereits erwähnt, mittels Klebstoffen oder einer thermischen Bondierung hergestellt. Bei den Klebstoffen ist darauf zu achten, dass sie zu keiner Beeinträchtigung des Diffusionsverhaltens des Films führen. Da die verbundenen Materialien unterschiedliches Verhalten bei der Temperaturerhöhung zeigen, die Klebetechnologie aber zu einem vollflächigen Kontakt der Materialien Vlies und Film führt, ergeben sich Falten oder Spannungen innerhalb des Produktaufbaus. Dies kann auf zwei Arten zu Undichtigkeiten gegen Wasser in flüssiger Form führen. Zum einen können sich die Spannungen innerhalb des Produktes dahingehend erhöhen, dass die Filmschicht beschädigt wird und es zu einem Versagen des Produktes kommt. Zum anderen

kann es aber durch das Zusammenziehen des Produktes an den Verbindungspunkten mit der Unterkonstruktion zu Rissen kommen. Diese bilden dann Leckagen in der wasserleitenden Schicht.

Diese Schwierigkeiten ergeben sich beim Kaschieren durch Bondierung nicht. Bei diesem Prozess werden die Vliese und der Film übereinander gelegt und durch kurzzeitigen Druck und Erhitzung miteinander verschmolzen. Bei dem Verschmelzungsvorgang wird der Film aber nicht auf- oder angelöst, sondern nur so weit erwärmt, dass die Vliesstofffasern an den Oberflächen anhaften und durch den sofort wieder einsetzenden Erstarrungsprozess mit dem Film verbunden werden. Diese Art des Kaschierens erfordert eine vorsichtige Dosierung der zugeführten Temperatur, weil sonst die Mikroporen in dem Film „zuschmelzen“ könnten und dieser dann seine Diffusionsfähigkeit verliert.

Bei der Bondierung kann der Film vollflächig oder nur Punktweise mit den Vliesstoffen verbunden werden. Entscheidend für die Art der Bondierung sind die Oberflächenstruktur des Vlieses und die Dehungeigenschaften der beiden zu verbindenden Materialien. Um den Film, gegen die in der Baupraxis rauen Bedingungen noch besser zu schützen, ist es von Vorteil, wenn die Bondierung der Komponenten eine nicht zu starre Verbindung darstellt. Der Film ist nämlich prozentual dehnbarer als die Vliesstoffe, doch gleichzeitig besitzt er eine wesentlich geringere Krafteraufnahme [44]. Dies ist ein weiterer Grund, warum Filme mit Vliesen kaschiert werden. Hierbei erfüllen die Vliese nicht nur den oben genannten Schutz vor Beschädigungen, sondern sollen dem Produkt auch die notwendigen Festigkeiten geben (siehe 2.2). Ein gleichzeitiger Vor- und Nachteil für die Bondierung stellt die Tatsache dar, dass nur gleiche Kunststoffe miteinander bondiert werden können, d.h., dass nur ein Polypropylenfilm mit einem Polypropylenvlies bondiert werden kann. Der Vorteil ist, dass es sich bei dem Produkt um ein Einkomponentenmaterial handelt, wodurch es zu keinen Materialunverträglichkeiten zwischen den Einzelschichten kommen kann. Der Nachteil ist, dass die Vorteile der unterschiedlichen Materialien nicht kombiniert und miteinander ergänzt werden können.

Die Aufbauvariante der beschichteten Vliese besteht nicht aus einem mikroporösen Film, sondern die Funktionsschicht wird mittels Extrusion auf das Vlies aufgebracht und mit ihm verbunden. Diese mikroporöse Beschichtung kann und wird auch als Film bezeichnet, doch ist die Funktionsweise bezüglich der Diffusion eine andere (siehe 2.1.2 und [A]).

Als Nachteil dieses Aufbaus können nach [43] die kürzere Freibewitterung und die höheren s_d -Werte angeführt werden. Bezüglich der Handhabung wurde auf Rücksprache mit einem ausführenden Handwerker [E] die Tatsache genannt, dass durch das „Hochleitern“ auf dem fertig gestellten Unterdach mit aufgebrachter Konter- und Dachlattung die außenliegende Beschichtung oftmals durch Abrieb mit den Schuhen verletzt oder beschädigt wird. Diese Fehlstellen müssen dann aus Gründen der Wasserdichtheit nachgeklebt und ausgebessert werden. Bei Untersuchungen nach [2] konnte festgestellt werden, dass die Beschichtung sich bei längerer Hitzeeinwirkung über 85°C vom Vlies löst.

Nach [18] können im geneigten Steildach, ohne Dacheindeckung auf den Oberflächen der Unterdeck- und Unterspannbahnen Temperaturen bis 94°C entstehen, insbesondere dann,

wenn die Beschichtung dunkel eingetönt ist. Der Vorteil bei diesem Schichtenaufbau der Bahnen liegt in der Kombination der unterschiedlichen Polymere.

Die letzte Aufbauvariante ist die Flash-Spun-Bond - Methode. Weltweit gibt es nur einen Hersteller, der nach dieser Produktionsart diffusionsfähige und gleichzeitig Wasserabweisende Unterspan- und Unterdeckbahnen herstellt. Laut Herstellerangaben gibt es für dieses Produkt keine wesentlichen Nachteile.

Als vorteilhaft hat sich diese sehr dicke Funktionsschicht erwiesen. Dadurch wird die Unverträglichkeit zwischen den Einzelkomponenten innerhalb des Produktaufbaus oder eine Delaminierung der Einzelschichten ausgeschlossen. Des Weiteren sind nach [E] und [B] diese Bahnarten im Baustellenalltag leichter zu reparieren, haben allerdings nach [E] den Nachteil, dass sie durch die sehr glatte Oberfläche keinerlei Halt bei der Dachbegehung bieten. Diese Eigenschaft ist auch für die Handhabung bei der Verlegung von Nachteil, da die Bahn leichter von den Holzwerkstoffen oder der Dämmung abrutscht.

Nach [2] konnte beim Vergleich unterschiedlicher, handelsüblicher Bahnen nach der DIN EN 13859-1 festgestellt werden, dass die Belastbarkeit dieser Aufbauart hinsichtlich der Wasserdichtigkeit und der Festigkeitseigenschaften genauso hoch und teilweise höher ist als bei den anderen Aufbauarten.

Die Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der verschiedenen Aufbauarten und möglichen Herstellungsverfahren, wobei sie keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Bei den heutzutage vielfältigen, produktionstechnischen Möglichkeiten kann dies nur eine grobe Übersicht der am häufigsten am Markt angebotenen und in der Praxis verbauten Dachunterspannbahnen sein.

Tabelle 1 Übersicht der Aufbau- und Herstellungsarten mit einigen Vor- und Nachteilen

Aufbau	Herstellungsart	Vorteile	Nachteile
Vlies-Film-Kombinationen	Thermische Bondierung	Größere Temperaturstabilität des Gesamtproduktes	Es können nur gleiche Materialien verwendet werden
		Es können nur gleiche Materialien verwendet werden	Nur durch chemische Zusätze kann die notwendige Brandklassifikation erreicht werden
			Teilweise leichte Delamination der Schichten
	Kleben	Fehlstellen/Beschädigungen nur durch Klebstoffe reparabel[B]	Einfache Delamination der Schichten
		Brandklassifikation kann ohne Zusätze erreicht werden	Geringe Temperaturbeständigkeit
		Einsatz verschiedener Materialkomponenten	Fehlstellen/Beschädigungen nur durch Klebstoffe reparabel
Beschichtete Vliese	Mikroporöse Beschichtung durch Extrusion	Fehlstellen/Beschädigungen auch durch Klebebänder reparabel	eingeschränkte Freibewitterungszeit[43]
		Es können verschiedene Polymere miteinander kombiniert werden	Kratzempfindlichkeit[43][E]
			Geringe Temperaturbeständigkeit
Flush-Spun-Bond	Thermische Extrusion und Pressung	monolithischer Film	Eingeschränkte Handhabung[E]
		einzelne Schicht	
		nicht luftdurchlässig	

2.1.1. Vliese und Vliesstoffe

Bei den meisten und gängigsten Bahnen werden als Basis Vliese verwendet, die ebenfalls aus Kunststoff hergestellt werden. Zur Herstellung der Vliesstoffe werden die drei Verfahren Trockenvlies-, Nassvlies- und Spinnvliesverfahren verwendet. Als Rohstoffe kommen die oben bereits aufgeführten Polymere zum Einsatz. Bei den im Dachbereich eingesetzten Vliesen handelt es sich nur um Vliese, die durch das Nassverfahren oder nach dem Spinnvliesverfahren hergestellt werden. Beim Nassverfahren werden Fasern in Wasser dispergiert und durch Ablage auf einem Förderband bei gleichzeitiger Filtration zum Vlies geformt. Neben den unterschiedlichen Zugaben von verschiedenen Bindemitteln in die Dispersion wird die Morphologie der Vliese von der Fließbandgeschwindigkeit und der aufgelegten Polymermasse bestimmt.

Die Spinnvliesherstellung kann aufgrund der zu erzeugenden Filamentfeinheit (Faserfeinheit) nochmals in Spinnvliesherstellung durch Düsenteknik und in die Meltblown-Technik unterteilt werden. Die Düsenteknik produziert mittels Schmelze und Extrusion chemische Fasern, die durch spiralenförmige Ablage auf einem Förderband zu einem Vlies versponnen werden. Durch Bohrungsdurchmesser der Düsen von 0,15 mm können Filamentdurchmesser von 0,5 dtex, was einem Durchmesser von 8µm entspricht, erreicht bzw. produziert werden. Bei den so entstandenen Vliesen ergibt sich je nach Filamentdurchmesser und ausgebrachter Polymermasse eine bestimmte Vliesstoffoberfläche. Die Zusammenhänge zwischen Ober-

fläche, Filamentfeinheit und aufgebracht Polymermasse können den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

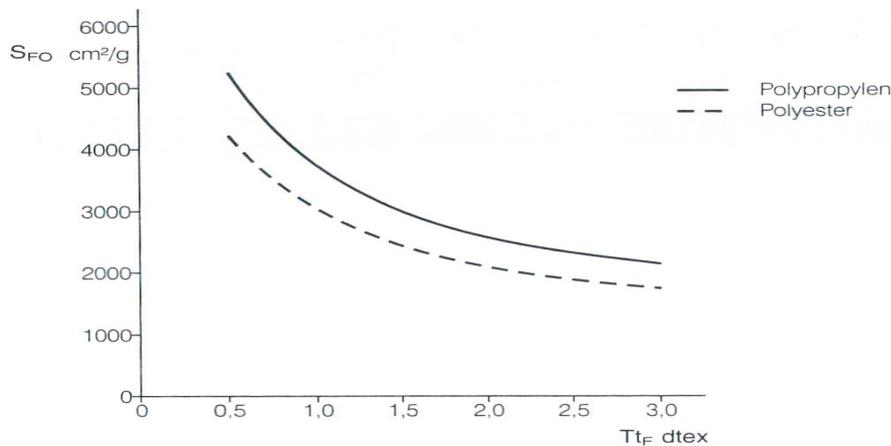


Abbildung 1 Spezifische Filamentoberfläche zu Filamentfeinheit nach [1]

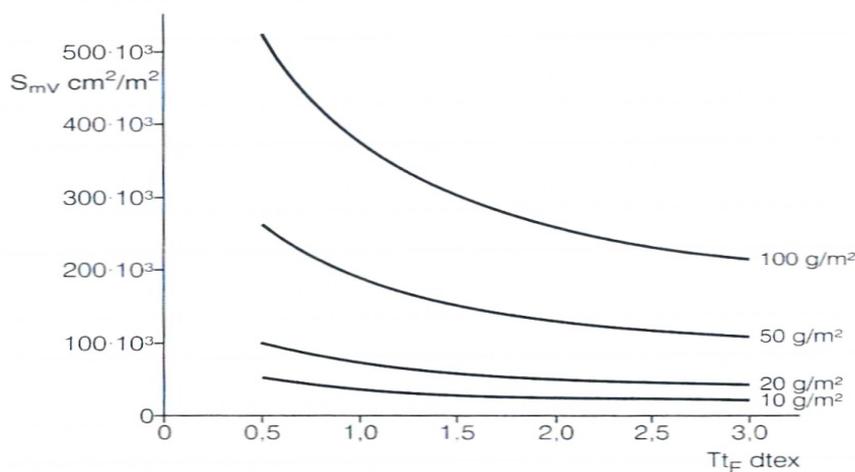


Abbildung 2 Vliesoberfläche in Abhängigkeit der Filamentfeinheit und des Vliesflächengewichtes nach [1]

Neben der Düsenteknik ist die Meltblown-Technik im Bereich der Vliesstoffe im Unterdeck- und Unterspannbahnbereich sehr weit verbreitet. Hierbei werden Vliese mit noch größerem Feinheitsgrad produziert und es können Filamentdurchmesser von 0,4 μm erreicht werden. Diese Art der Vliese kann durch das Schmelzblas-Spinnvliesverfahren, bei dem neben einer Polymerdüse auch Luftdüsen- bzw. -schlitze angeordnet sind, oder durch das Verdampfungsverfahren hergestellt werden. Mit der Verdampfungsverfahren hergestellt werden die oben bereits genannten Flash-Spun-Bond Produkte hergestellt, sie ist in Kapitel 2.1.2 näher beschrieben.

Der Vollständigkeit halber soll noch das Elektrostatisches-Verfahren erwähnt werden mit dem die geringsten Filamentdurchmesser von 40 – 500 nm erzeugt werden können.

Die von der Herstellungsart abhängige Größe der Vliesstoffoberflächen beeinflusst die Sorption und Diffusion von Wassermolekülen. Je größer die Oberfläche, desto mehr Wassermoleküle können adsorbiert werden.

leküle können sich auch bei diesen wasserabweisenden Rohstoffen an der Oberfläche anlagern. Des Weiteren beeinflusst die Filamentfeinheit der Vliese auch den Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstand der Dachbahn. Die physikalischen Zusammenhänge zwischen Oberflächengröße und Sorptionsverhalten sowie Vliesfeinheit und Diffusionsübergangswiderstand sind in Kapitel 3 erläutert.

Neben der Herstellungsart sind auch die Verfestigungsarten der Vliese für deren mechanisches Verhalten und die Vliesdichte mitbestimmend. Hierbei kommen neben den physikalischen Verfahren wie Vernadeln, Wasserstrahlen, Kalandern oder Schweißen auch chemische Verfahren wie Sprühen zur Anwendung. Alle bisher in diesem Kapitel zusammengefassten Eigenschaften und Herstellungsverfahren sind aus [1] entnommen.

Die Aufgaben des Vliesstoffes sind vielfältig. Neben den Trägereigenschaften für chemische Zusätze und der mechanischen Schutzfunktion gegenüber dem Film, sollen sie auch die Handhabung der Unterspann- und Unterdeckbahnen verbessern. Bei dem Unterspann- und Unterdeckbahnenaufbau der beschichteten Vliese dienen sie auch als Trägermaterial für den eigentlichen Film. Je nach der eingesetzten Vliesart und Vliesdicke wird mehr eine Schutzfunktion (Nadelvlies) oder eine Erhöhung der Festigkeitseigenschaften (Spinnvlies) avisiert.

Im Allgemeinen besteht die Hauptaufgabe aber darin, den Film vor mechanischen Beanspruchungen und Umwelteinflüssen zu schützen. Von vielen Herstellern wird ebenfalls die Wasserabsorption als ein Vorteil von Vliesen vermarktet. Dies ist im Bezug auf [N1] richtig, da der Film, wie nachfolgend erläutert, keine Kapillarleitende Schicht ist und es bei Kondensation auf seiner Oberfläche nicht zum Abtropfen oder Abfließen der anfallenden Wassermenge kommt. Trotzdem sollte die Dachkonstruktion auch so bemessen sein, dass die durch Kondensation ausfallende Wassermenge in der Verdunstungsperiode wieder durch Diffusion ausgetrocknet werden kann [N1].

2.1.2. Filme und Beschichtungen

Bei den eigentlichen Funktionsschichten gegen Wasser in flüssiger Form handelt es sich um mikroporöse oder geschlossene Filme, Beschichtungen oder um thermisch verfestigte Mikrovliese, die alle aber gleichzeitig diffusionsoffen sind. Die mikroporösen Filme sind die häufigste Variante bei Unterspannbahnen und haben ihren Ursprung im Bereich der Hygiene und der Medizin. Sie wurden Mitte bis Ende der 80er Jahre für den Einsatz im Baubereich entdeckt. Die nachfolgende Beschreibung des Herstellungsprozesses von mikroporösen Filmen stellt nur einen groben Umriss dar und kann als repräsentativ, aber in keinem Fall als umfassend angesehen werden.

Die Herstellung der mikroporösen Filme erfolgt abhängig von den eingesetzten Kunststoffen durch Walzen oder Blasen mittels Extrusion von den eingeschmolzenen Kunststoffmassen. Gängige Extrusionsverfahren sind in den nachfolgenden Abbildungen aus [7] aufgezeigt.

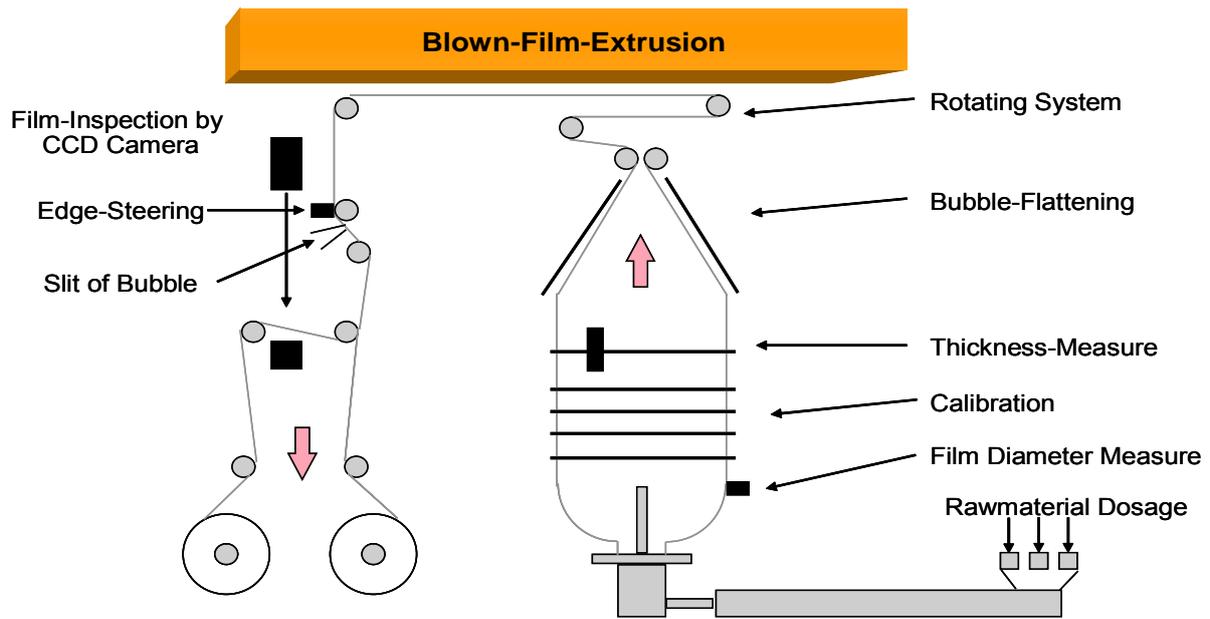


Abbildung 3 Blasfilm-Extrusion

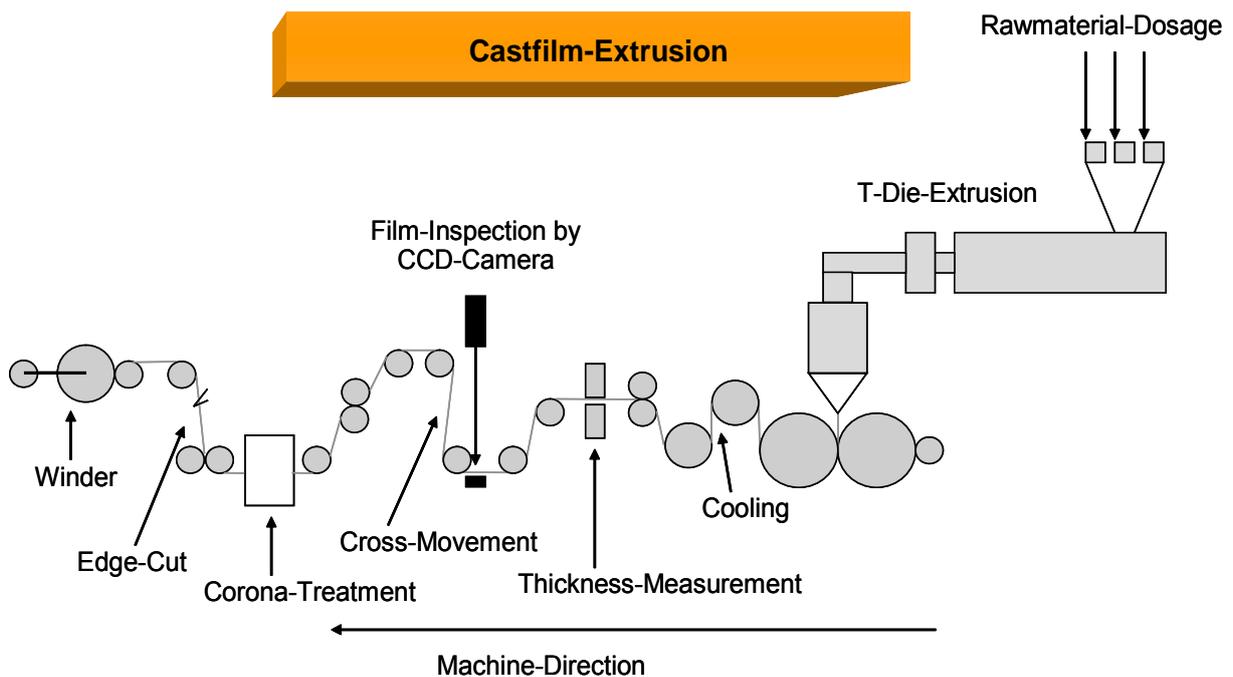


Abbildung 4 Flach- oder Castfilm-Extrusion

Vor der Extrusion werden diese Polymermassen je nach späterem Einsatzgebiet mit Inertmaterial angereichert. Bei dieser zugefügten Substanz handelt es sich um sehr feines Kalkpulver, dass in den meisten Fällen Calciumcarbonat (CaCO_3) ist. Dieser Stoff wird bei der Herstellung von so genannten „atmungsaktiven“ Filmen im hygienischen, textilen und medizinischen Bereich eingesetzt wird. Je mehr CaCO_3 zugesetzt wird, desto offenerporiger wird der Film, allerdings verliert er durch den gleichzeitig sinkenden Polymergrad an Stabilität gegenüber Temperatur und UV-Strahlung [43].

Beim Herstellen der Filme verteilt sich dieses feine Kalkpulver gleichmäßig über die Dicke und Fläche der Filmschicht. Die durchschnittliche entstehende Dicke des Films beträgt 9 – 45 µm. Der in dieser Untersuchung und in Kapitel 5.1 beschriebene Film wurde nach diesem Prinzip hergestellt und wies bei der Bestimmung der Dicke mittels Induktionsmessung eine durchschnittliche Dicke von 15 µm auf.

Nach dem Aufrollen der Filme werden diese nach der Abkühlung mit oder ohne Wärmezufuhr gereckt. Diese Reckung des Films erfolgt in Längsrichtung, wobei der Film beim Herstellen mit der Blas-Extrusion bereits bidirektional gestreckt wurde. Gemäß [43] wird dadurch die Dehnbarkeit des Produktes bei Verformung in beiden Richtungen positiv beeinflusst. Diese Reckung erfolgt, damit sich um das eingeschlossene Inertmaterial feine Risse bilden. Die Risse verbinden sich zum Teil und stellen so eine Verbindung zwischen den Folienseiten dar. Hierdurch wird die Dampfdurchlässigkeit des Films erzeugt. Das nur zum Teil herausfallende Kalkpulver wird durch Abblasen des Film entfernt. Die bei dieser Produktionsart entstehenden Porenräume besitzen rechnerisch nach [7] einen Querschnitt von ca. 1µm. Nach [A] können bei den modernsten Anlagen heutzutage durchschnittliche Durchmesser von 0,3 – 0,5 µm bei einer gleichzeitigen Anzahl von 1,0 - 1,2 Millionen Poren pro Quadratzentimeter erreicht werden. In Abbildung 5 ist die Entstehung dieser Mikrorisse aufgezeigt.

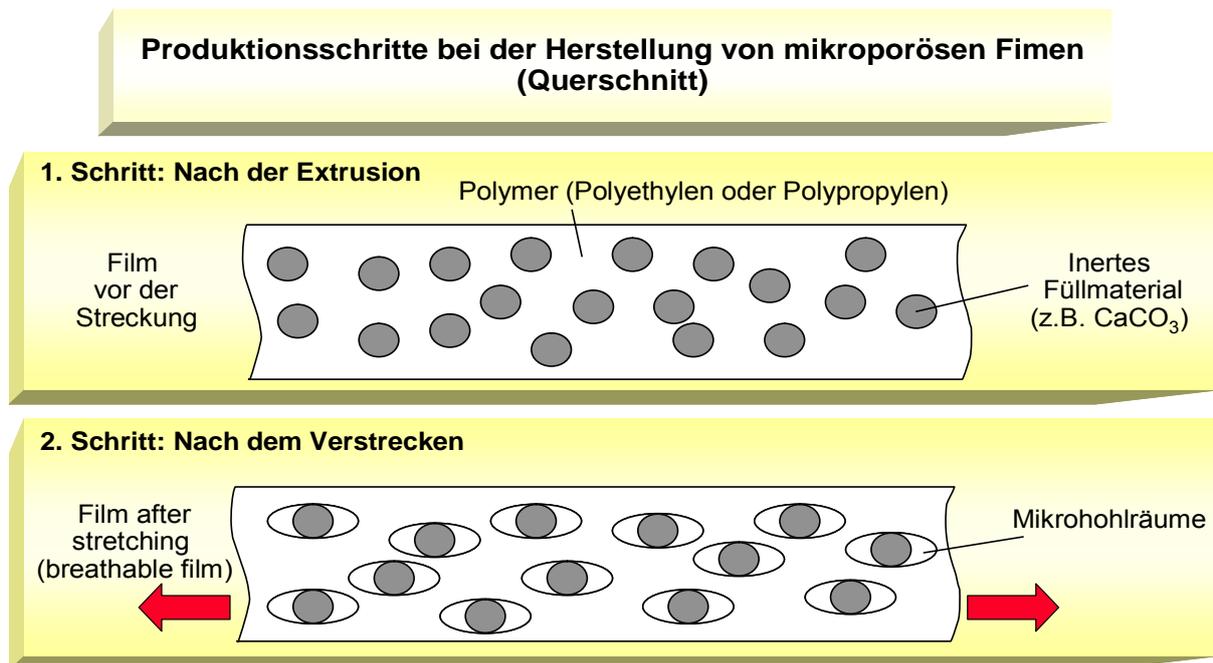


Abbildung 5 Film nach Extrusion und nach dem Verstrecken aus [7]

Je nach eingesetzter Menge an CaCO₃, der Verteilung innerhalb der Polymermasse und der Mahlfineinheit des eingesetzten Pulvers variieren die Porenanzahl und die Porendurchmesser.

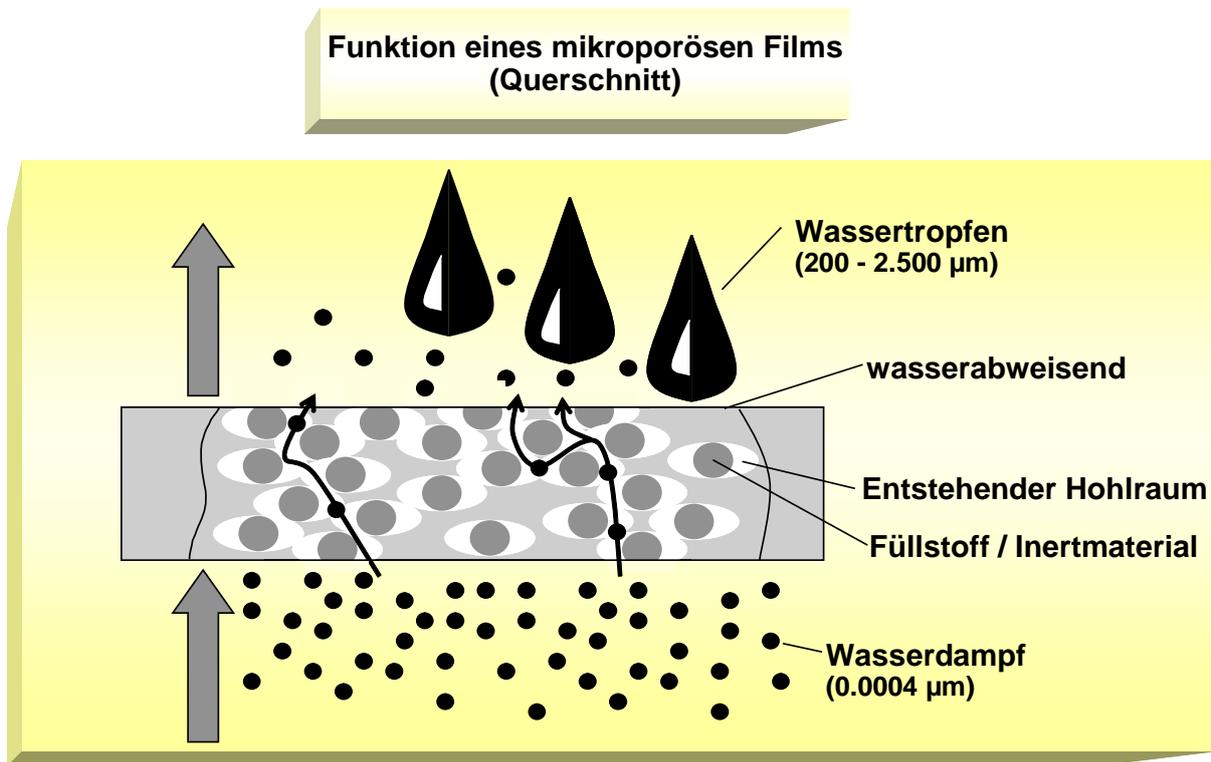


Abbildung 6 Funktionsweise des mikroporösen Films

Bei dem Gespräch mit einem Produzenten [A] betonte dieser, dass es aufgrund des Herstellungsprozesses auch innerhalb des Films geschlossene Poren gibt, die keine Verbindung zur Außenluft besitzen und trotzdem zum Wasserdampftransport beitragen. Trotz Nachfrage und freundlicher, ausführlicher Auskunft von [A] konnte eine genauere, detailliertere Darstellung für die Entstehung der Poren und deren Größe bzw. Durchmesser aufgrund von Patentrechten nicht abschließend geklärt werden.

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich ist kann trotz der erzeugten „Durchlöcherung“ des Films kein Wasser in flüssiger Form durch den Film hindurch treten. Da die oben beschriebenen feinen Poren nur einen Durchmesser von maximal 1 µm besitzen und Wasser- respektive Regentropfen einen minimalen Querschnitt von 200 µm besitzen, können diese nicht in die Poren eindringen. Auch wenn die gesamte Filmoberfläche mit Wasser benetzt ist, kann dieses aufgrund seiner Kohäsion, bzw. der daraus resultierenden Oberflächenspannung, nicht mehr in die Poren eindringen. Für Wasser, in gasförmigem Zustand wiederum ist es möglich diese feinsten Porenräume und auch Zellwände zu durchdringen, da die einzelnen Moleküle kleiner sind als die erzeugten Porenradien (siehe Kapitel 3).

Eine weitere Methode Filme mit kleinen Poren zu erzeugen ist die Perforation mittels mechanischer, akustischer oder optischer Einwirkung. Hierbei werden Mikroporen, die im Bereich von 2-70 µm liegen, durch Nadeln, die auf Kalandervalzen aufgeschweißt sind, hergestellt. Weiter ist es möglich die Poren mittels Laserstrahlen, Schallwellen oder Vakuumtechnik, wobei die Löcher durch Mikrobohrungen in den noch schmelzflüssigen Kunststoff hineinziehen, herzustellen. Ein schematischer Ablauf ist in der nachfolgenden Abbildung 7 aufge-

zeigt, wobei anstatt des Perforationswerkzeugs auch ein Nadelkalender oder Ultraschallwandler eingesetzt werden kann.

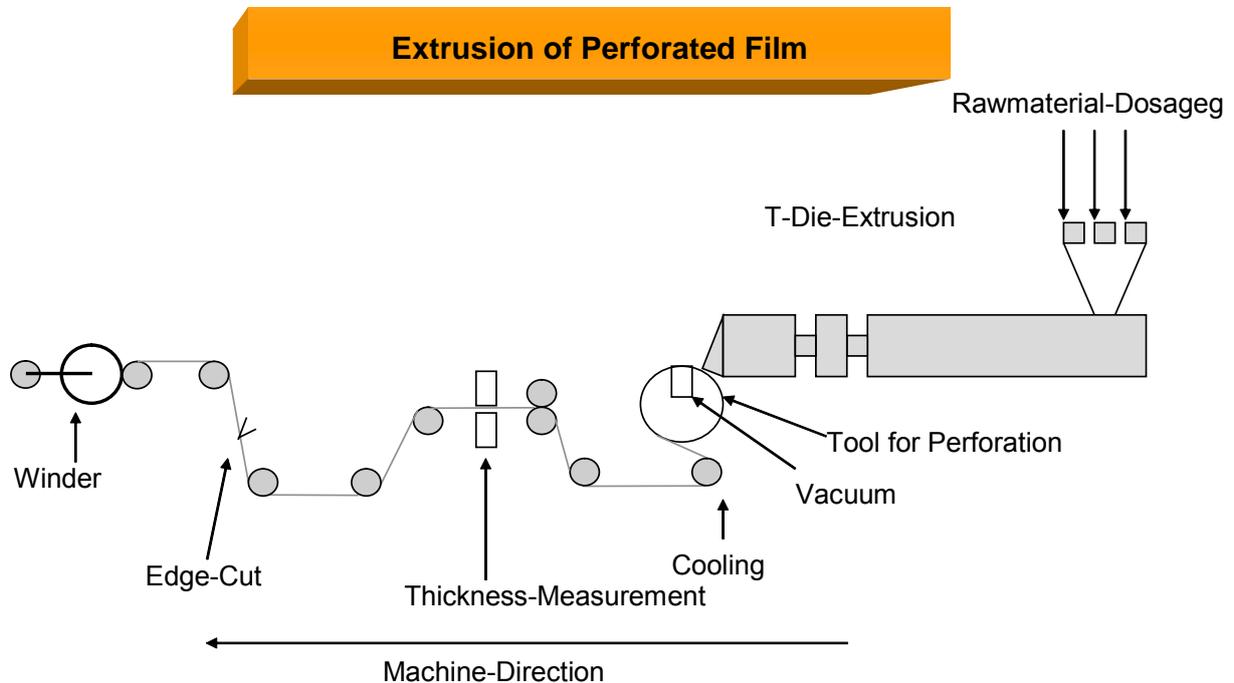


Abbildung 7 Herstellung von perforierten Filmen

Zwei weitere Systeme um diffusionsfähige Folien oder Schichten zu erzeugen sind zum einen die Anwendung von hydrophilen Polymeren, zum anderen die Herstellung eines thermisch verfestigten Mikrovlieses.

Die nach der zweiten Methode aufgebauten Bahnen besitzen nur eine Schicht, die aber bis zu einer Dicke von 220µm hergestellt werden kann. Somit haben diffusionsfähige Schichten nach dieser Herstellungsart eine bis zu 5-fach größere Dicke als die in Vlieskaschiereten Bahnen eingesetzten Filme bei gleicher Wasserdampfdurchlassrate [43]. Bei der Herstellung wird der Kunststoff Polyethylen in Butan gelöst und unter hohen Temperaturen sowie hohem Druck soweit erhitzt, dass bei plötzlicher Druckentlassung das Spinnmedium (Butan) verdampft und sich das Polyethylen zu Endlosfasern zusammenzieht. Diese Fasern kommen aus Spinndüsen und werden, nachdem sie statisch entladen wurden, auf einem Förderband abgelegt. Von diesen Schichten werden mehrere übereinander abgelegt. Dieser Aufbau durchläuft zum Abschluss noch eine Verfestigungsanlage, bei der unter Zufuhr thermischer Energie die Lagen miteinander verbunden bzw. „verbacken“ werden.

Beim Einsatz von hydrophilen, also wasseraufnehmenden und wasseranziehenden Polymeren, wird diese Eigenschaft des Kunststoffes ausgenutzt. Hierbei werden Wassermoleküle aufgenommen und aufgrund eines anliegenden Dampfdruckgefälles durch das Polymer transportiert und auf der gegenüberliegenden Seite wieder in die Luft abgestoßen bzw. abgegeben. Zu den hydrophilen Kunststoffen gehört z.B. Polyamid.

2.2. Anforderungen und Anwendungen von Unterdeck- und Unterspannbahnen

Unterspann- Unterdeckbahnen sind Baunebenprodukte und dienen als Zusatzmaßnahme bei der Planung und Ausführung von Steildächern [6]. Nach [1] sind Unterdächer, Unterspannungen und Unterdeckungen wie folgt definiert:

„Unterdächer, Unterdeckungen und Unterspannungen werden als zusätzliche Maßnahmen unterhalb von Dachdeckungen angeordnet, um vor eindringender Feuchtigkeit, Flugschnee und Staub zu schützen.“

Die im Außenbereich des Steildaches eingesetzten Bahnen dienen als Schutzschicht gegen von außen zutretender Feuchtigkeit in Form von Treibregen oder Flugschnee, werden aber auch in der Baupraxis üblich als Notdach oder Noteindeckung benutzt, obwohl nach [6] Behelfsdeckungen möglichst mit Bitumen- oder Kunststoff-Dachbahnen auszuführen sind.

Die Unterspann- und Unterdeckbahnen gelten als moderner Ersatz für die Abdichtungsschichten in früheren belüfteten Steildachkonstruktionen wie z.B. aufgetragenen Holzschalungen mit aufliegender Bitumenbahn oder die Vermörtelung der einzelnen Dachziegel/Dachsteine miteinander. Bei dieser althergebrachten Bauweise war es nach einschlägiger Fachliteratur [ZDVH/ DIN 4108] aufgrund der Diffusionsdichteren Bauprodukte als Schutz vor Tauwasserausfall in der Konstruktion aber notwendig, eine Belüftungsebene im Sparrenzwischenraum anzuordnen. Diese diente dazu die anfallende Feuchtigkeit aus der Konstruktion (z.B. durch Einbau feuchter Sparren) oder die durch Konvektion und Diffusion in die Dämmebene eingedrungene Raumlufftfeuchte abzuführen, so dass es zu keinem Tauwasserausfall unterhalb dieser zweiten Abdichtungsebene und somit innerhalb der Konstruktion kommen konnte. Diese Belüftungsquerschnitte müssen nach [31] Abschnitt 3.2 und 5.2 sowie [N1] Absatz 4.3.3.3 bestimmte Mindestanforderungen erfüllen. Aufgrund der heutigen Richtlinien (z. B. EnEV) wird diese Belüftungsebene aber zu Gunsten einer Vollsparrendämmung immer häufiger eingespart, dies ist aufgrund von Forschungsergebnissen gemäß [24] für die Feuchtentwicklung im Steildachbereich als positiv anzusehen. Somit müssen die Werkstoffe unter und oberhalb der Dämmung entsprechende Eigenschaften aufweisen und so ausgewählt werden, dass diese neuen Konstruktionen unter gleichen Randbedingungen keinen Schaden nehmen [31][N1].

2.2.1. Anwendung von USB/UDB

Dacheindeckungen müssen immer regensicher sein. Dies sind sie aufgrund ihrer Geometrie und ihres Aufbaus nur bis zu einer bestimmten Dachneigung (Regeldachneigung) und bei normalen Witterungs- und Nutzungsverhältnissen. Da diese Randbedingungen nicht immer gegeben sind, kann der Einsatz einer zweiten Deckungsebene durch flexible oder starre Abdichtungen dann notwendig werden, wenn die Regeldachneigung für die eigentliche Dacheindeckung unterschritten wird oder zusätzliche Anforderungen an die Konstruktion gestellt werden.

Als zusätzliche Anforderungen gelten nach [6] Absatz 1.3:

- Konstruktive Besonderheiten (zerklüftete Dachlandschaften, besondere Dachformen, große Sparrenlänge > 8m)
- Nutzung des Dachgeschosses zu normalen Wohnzwecken
- Klimatische Verhältnisse (exponierte Lage, extreme Standorte, besondere Witterungen)
- Örtliche Baubestimmungen

Diese zweite Deckungsebene kann als Unterdach, Unterdeckung oder Unterspannung ausgebildet werden. Auch bei Einhaltung der Regeldachneigung und ohne erhöhte Anforderungen haben sich aufgrund von [1] Unterspannungen und Unterdeckungen in der Baupraxis durchgesetzt. Zum einen gibt es dem ausführenden Betrieb mehr Sicherheit im Bezug auf die Gewährleistung, zum anderen hat der Bauherr mehr Schutz seiner Gebäudekonstruktion vor Umwelteinflüssen.

Bei welchen Randbedingungen welche zusätzliche Maßnahme zum Erreichen der Regensicherheit eingebracht werden muss, ist in [6] beschrieben und kann der nachfolgenden Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2 Zuordnung von Zusatzmaßnahmen nach [6] Tabelle 1

Erhöhte Anforderung ²⁾				
Dachneigung	Nutzung – Konstruktion – klimatische Verhältnisse			
	keine weitere erhöhte Anforderung ²⁾	eine weitere erhöhte Anforderung ²⁾	zwei weitere erhöhte Anforderungen ²⁾	drei weitere erhöhte Anforderungen ²⁾
≥ Regeldachneigung RDN	–	Unterspannung	Unterspannung	überlappte oder verfalzte Unterdeckung
≥ (RDN – 6°)	Unterspannung	Unterspannung	überlappte oder verfalzte Unterdeckung	verschweißte oder verklebte Unterdeckung
≥ (RDN – 10°)	regensicheres Unterdach	regensicheres Unterdach	regensicheres Unterdach	wasserdichtes Unterdach
< (RDN – 10°)	regensicheres Unterdach	wasserdichtes Unterdach	wasserdichtes Unterdach	wasserdichtes Unterdach

¹⁾ Die in der Tabelle genannten Zusatzmaßnahmen sind Mindestmaßnahmen.
²⁾ Bei besonders hohen Anforderungen und/oder besonderen örtlichen Bestimmungen ist eine höherwertige Zusatzmaßnahme zu wählen (siehe „Merkblatt für Unterdächer, Unterdeckungen, Unterspannungen“, Tabelle. 1). Grundsätzlich können höherwertigere Zusatzmaßnahmen auch anstelle der Mindestmaßnahme eingesetzt werden.

Im Bereich der Unterdeckungen und Unterspannungen darf die Regeldachneigung um bis zu 6° unterschritten werden. Auch bei Einhaltung der Regeldachneigung können durch zusätzliche erhöhte Anforderungen an die Dachkonstruktion diese Zusatzmaßnahmen notwendig

werden. Bei diesen erhöhten Anforderungen kann es sich zum einen um klimatische Randbedingungen oder konstruktive Besonderheiten handeln, zum anderen können diese erhöhten Anforderungen aus dem Nutzungsverhalten des Gebäudes entstehen. Nach [6] Absatz 1.1.3.3 besitzen ausgebaute Dachgeschosse mit normaler Nutzung höhere Anforderungen an die Dachdeckung bzw. Dachabdichtung. Aus diesem Grund müssen Unterdächer, Unterdeckungen oder Unterspannungen mit in die Dachkonstruktion eingebaut werden. Nach Tabelle 2 sind Unterspannungen nur bei Einhaltung der Regeldachneigung und zwei weiteren erhöhten Anforderungen oder bei einer maximalen Unterschreitung der Regeldachneigung von 6° bei zusätzlich einer erhöhten Anforderung einsetzbar. Unterdeckungen können bis maximal 6° Regeldachunterschreitung und drei zusätzlichen Anforderungen an die Konstruktion als zusätzliche Schutzschicht eingebaut werden.

Außer zur Erreichung der Regensicherheit können Unterspann- und Unterdeckbahnen zum baulichen und feuchtetechnischen Holzschutz herangezogen werden. Bereits in [38] und zwei Jahre später in [37] verwies Prof. H. Schulze darauf, dass durch den Einbau von diffusionsoffenen Bahnen die Dachkonstruktion entscheidend vor Feuchtigkeit und Insektenbefall geschützt werden kann. Nach der DIN 68800 Teil 2 und 3 ist die Insektenundurchlässigkeit mit Folien oder dergleichen bei Verklebung der Überlappungen herstellbar und bei gleichzeitiger Erfüllung der Anforderungen zum klimabedingten Feuchteschutz nach [N1] führt dies zur Einstufung der so eingeschlossenen Holzbauteile in die Gefährdungsklasse GK 0. Im Bezug auf die Feuchtigkeit haben die diffusionsoffenen Bahnen den Vorteil, so Prof. Schulze, dass eingeschlossene oder durch Leckagen in die Dachkonstruktion eingedrungene Feuchtigkeit besser austrocknen kann. Dies konnte durch umfangreiche Versuche innerhalb eines Forschungsvorhabens vom DIBt nachgewiesen werden.

Neben der verbesserten Ab- bzw. Austrocknung der Konstruktion wird diese nach [24] im Gegensatz zu belüfteten Dachquerschnitten auch vor konvektivem Feuchtezutritt durch die Außenluft geschützt. Dieser Luftaustausch unterhalb von Unterspannbahnen (auch Unterdeckbahnen müssen freihängend nach [42] als Unterspannbahnen eingestuft werden) kann dazu führen, dass sich an deren Unterseite Tauwasser bildet und bei vermehrtem Anfall auf die Holzkonstruktion oder in die Dämmung abtropfen kann. Bei Untersuchungen diesbezüglich [24] konnte 1988 und 1989 eine anfallende Tauwassermenge von rund 100g/m^2 nachgewiesen werden. Somit kam man zu dem Schluss:

Zur Reduzierung der Feuchtebelastung von außen ist generell eine Minderung der Außenluftzufuhr im Bereich unterhalb der Unterspannbahn und Vordeckung notwendig, sowie eine Minderung des Luftaustausches in diesen Bereichen zwischen klimatisch unterschiedlich beanspruchten Dachflächen (z.B. unterschiedliche Orientierung).

Auch wenn wie in 2.1.1 beschrieben, Vliese dieses Tauwasser aufnehmen und damit ein Kriterium des Tauwasserschutzes nach DIN 4108-3 erfüllen, kann es im Bereich der Sparren zur Feuchteakkumulation kommen. Neben dem dort anfallenden Tauwasser, das über den Kontakt mit der Unterspannbahn in den Sparren gelangt, wird über die Außenluft Luftfeuchtigkeit nachgeführt, die durch Sorption ebenfalls vom Holz in nicht unwesentlichem Maße aufgenommen wird. Hierdurch könnte dann mehr als die zulässige Menge von $1,0\text{ kg/m}^2$

Kondensat anfallen, insbesondere vor dem Hintergrund, dass nach [37] bei der Kontaktfläche Holz/Folie nur eine ca. 2cm dicke Schicht des betroffenen Holzbauteils berücksichtigt werden sollte.

2.2.2. Unterschiede zwischen Unterdeck- und Unterspannbahnen

Die Abstufung zwischen Unterdach, Unterdeckung und Unterspannung und die einzusetzenden Werkstoffe sind in [32] geregelt und in Tabelle 3 aufgeführt. Da in dieser Arbeit lediglich die Unterdeckung und Unterspannung von Relevanz ist, sollen an dieser Stelle die Unterdächer nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Tabelle 3 Einstufungen von Unterdach, Unterdeckung und Unterspannung nach [32]

Tabelle 1: Einstufung von Unterdach, Unterdeckung und Unterspannung				
	Art	Ausführung	Konterlatten-einbindung	Naht- und Stoßausbildung
1	Unterdach			
1.1	Wasserdichtes Unterdach	<ul style="list-style-type: none"> – Kunststoff-Dachbahn – Kunststoff-Dichtungsbahn – Bitumen-/ Polymerbitumen-Dachdichtungsbahn – Bitumen-/ Polymerbitumen-Schweißbahn 	über Konterlatte	verschweißt oder verklebt
1.2	Regensicheres Unterdach	Wie 1.1	unter Konterlatte	verschweißt oder verklebt
2	Unterdeckung			
2.1	Verschweißte oder verklebte Unterdeckung	Unterdeckplatte Unterdeckbahn	unter Konterlatte	verschweißt oder verklebt
2.2	Überdeckte Unterdeckung mit Bitumenbahnen	<ul style="list-style-type: none"> – Bitumen-/ Polymerbitumen-Dachdichtungsbahn – Bitumen-/ Polymerbitumen-Schweißbahn – Bitumen-Dachbahn 	unter Konterlatte	überdeckt und genagelt
2.3	Überlappte oder verfalzte Unterdeckung	Unterdeckplatte Unterdeckbahn	unter Konterlatte	lose überlappend oder verfalzt
3	Unter-spannung	Gespannte Unterspannbahn Frei hängende Unterspannbahn	unter Konterlatte	lose überlappend

Die Bahnen, die zur Herstellung von Unterdeckungen und Unterspannungen vorgesehen sind, dürfen nicht zum Aufbau von Unterdächern herangezogen werden. Die Anforderungen an die Werkstoffe für Unterdächer sind wesentlich höher, so dass die Bahnen für Unterspannungen und Unterdeckungen dafür nicht geeignet sind. Obwohl bereits bei [32] auf ein Produktdatenblatt für Unterspann- und Unterdeckbahnen hingewiesen und in [4] zum Teil sogar

zitiert wird, ergab die Nachfrage beim ZVDH [G], dass sich diese Vorschrift / Richtlinie immer noch in der Prüfungsphase befindet und voraussichtlich nicht vor Ende des Jahres 2005 bzw. Anfang 2006 herausgegeben werden kann. Auf Rückfrage nach der sehr langen Erstellungs-dauer wurde lediglich ausgesagt, dass sich die Hersteller solcher Bahnen mit den technischen Gremien nicht früher auf verbindliche Richtlinien einigen konnten.

Die Unterschiede von Unterdeckbahnen und Unterspannbahnen liegen in der Montage. Die Zweitgenannte darf nur freihängend und nur mit Hinterlüftung ausgeführt werden [32]. Aus diesem Grund muss die Bahn auch vor dem First enden und bietet somit keinen sicheren Schutz vor Treibregen oder Flugschnee [32]. Auch sollte Sie aufgrund der Freigespannten Lage nach [48] bessere mechanische Eigenschaften als eine Unterdeckbahn besitzen.

Die Unterdeckbahnen hingegen dürfen direkt auf Schalung oder ausreichend fester Wärmedämmung verlegt werden und müssen oder können je nach Anforderung an die Unterdeckung in den Naht- und Stoßstellen verklebt oder verschweißt werden. Die überwiegend am Markt angebotenen Unterdeckbahnen sind nicht miteinander verschweißbar, da es sich in den wenigsten Fällen um bituminös gebundene Bahnen, sondern um textile Flächengebilde auf Vliesbasis mit den unter 2.1 genannten Aufbauarten handelt. Auch müssen Sie bei vollgedämmtem Sparrenquerschnitt nicht vor dem First enden, sondern dürfen laut [32] Abschnitt 4.4 unter Einhaltung der Randbedingungen nach [31] Abschnitte 3.1.2 und 3.3 über den First auf die andere Dachseite hinweggeführt werden. Wenn eine Unterdeckung hinterlüftet ausgeführt wird, muss auch diese ca. 30 cm vor dem First enden, aber die dadurch entstandene Öffnung ist nachträglich abzudecken. Dies ist laut [32] Abschnitt 3.3 notwendig, da es sich bei einer Unterdeckung immer um eine regensichere Ausführung handeln muss. Obwohl es sich nun um eine regensichere Ausführung handelt, kann durch Anordnung dieser Lüftungen eine Wasserdichtigkeit nicht mehr gewährleistet werden, da durch Treibregen oder Flugschnee Feuchtigkeit in die Konstruktion eindringen könnte.

Übereinstimmung bei der Ausführung mit Unterdeck- und Unterspannbahnen gibt es hinsichtlich der ersten Belüftungsebene oberhalb der Bahnen. Diese sollte nach [32] Absatz 1.2 immer mindestens 24 mm betragen um z.B. die Deckung zu unterlüften und durch sie eindringendes Wasser sicher abzuleiten. Nach [38] wiederum kann allerdings gerade bei Unterspannbahnen, welche mit einem Durchhang in Sparrenfeldmitte aufgebracht sind, auf diese Konterlattung verzichtet werden. Ist eine Konterlattung in die Konstruktion mit aufgenommen, müssen beide Bahnen unterhalb der Konterlatte verlegt sein [32]. Nach [4] sollen beide Bahnarten wasserdicht und gleichzeitig wasserdampfdurchlässig sein. Für beide Anforderungen ist lediglich in der DIN EN 13859-1 eine Prüfmethode und eine Klassifizierung festgeschrieben, doch hierin werden keine eindeutigen Anforderungen an die Bahnen gestellt. Die Wasserdichtigkeit betreffend werden drei Klassen unterschieden. Bei der Wasserdampfdurchlässigkeit sind zwei unterschiedliche Prüfmethode in Abhängigkeit der Durchlässigkeit vorgegeben. Bei einer wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von mehr als 0,2 m ist die Durchlässigkeit nach der DIN EN 1931 [N10] zu bestimmen. Bei höherer Durchlassrate wird die DIN EN ISO 12572 [N14] zur Bestimmung des genauen Wertes herangezogen. Somit kann zurzeit noch keine Unterscheidung in Unterdeckbahnen und Unterspannbahnen anhand von festgelegten Werten getroffen werden.

Die Prüfung aller Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen sollten nach der genannten DIN EN 13859-1 stattfinden, wobei hier keine definierten Anforderungen aufgeführt sind. Unterschiede bei den Prüfungen zwischen Unterdeck- und Unterspannbahnen gibt es nur hinsichtlich der Brandprüfung. Hierbei müssen aufgrund ihrer Einsatzbeschreibung (freihängend) Unterspannbahnen nur ohne Hinterlegung nach [N1] oder [N12] geprüft werden. Bei den Unterdeckbahnen erfolgt die Brandprüfung nach denselben Normen [N1] [N12], muss hier aber, da dies ihrer praktischen Anwendung entspricht, auch mit einer Hinterlegung aus Mineralfaser geprüft werden. Neben der umfangreicheren Brandprüfung müssen die Unterdeckbahnen bei der Prüfung auf Wasserdurchlässigkeit höhere Anforderungen erfüllen als Unterspannbahnen [32] [33]. Wie hoch diese Anforderungen sein werden ist bisher noch nicht bekannt. Beide Bahnarten müssen aber nach [4] wasserdicht sein und sollen nach [42] auch im Anschlussbereich, die für die Fläche vorgesehenen Anforderungen erfüllen.

Welche Anforderungen bezüglich der Wasserdampfdurchlässigkeit an Unterdeck- und Unterspannbahnen gestellt werden ist bisher noch nicht festgelegt, da die entsprechenden Produktdatenblätter noch nicht veröffentlicht sind (siehe oben).

Unterspannbahnen dürfen nach [32] Abs.3.4(4) nur in belüfteten Steildachkonstruktionen eingesetzt werden. Daher müssen sie nur soweit diffusionsoffen sein, dass entweder die Anforderungen in DIN 4108-3 Absatz 4.3.3.3 erfüllt sind oder der rechnerische Tauwasser nachweis ebenfalls nach DIN 4108-3 erfüllt ist. Unterdeckbahnen hingegen müssen mindestens diffusionsoffen im Sinne nach [31] Abs. 2.3 sein. Hiernach müssen alle Deckwerkstoffe die direkt auf der Dämmung angeordnet werden einen diffusionstechnischen Sperrwert von $< 0,3$ m besitzen. Des Weiteren müssen diese so diffusionsfähig sein, dass der Tauwasser nachweis der Konstruktion nach DIN 4108- Teil3 erfüllt wird. Weitergehende Anforderungen nach dem Stand der Forschung hinsichtlich der Diffusionsfähigkeit von Unterspann-, Unterdeckbahnen und Dampfsperren und wie diese definiert wird, sind in Kapitel 2.4 beschrieben.

2.3. Dampfsperren

Bei Dampfsperren handelt es sich meistens um geschlossene Kunststofffilme, bei denen nicht mehr die Dicke, sondern nur das spezifische Flächengewicht angegeben wird und die im Steildach aber auch im Holztafelbau Anwendung finden. Die Grundstoffe für die Herstellung sind die gleichen wie bei den Unterspannbahnen, wobei auch hier unterschiedliche Kunststoffe miteinander kombiniert werden können. Zusätzlich werden bei einigen Bahnen noch Vliese aufkaschiert, die aber vorwiegend zur Erhöhung der Festigkeiten beitragen sollen. Bei anderen Bahnen wird diese Festigkeitssteigerung dadurch erzeugt, dass vorgefertigte Kunststoffgitter bei der Produktion mit in den Film eingelegt werden.

Die neueren Generationen von Dampfsperren haben einen variablen, so genannten „flexiblen“ Diffusionswiderstand. Diese Bahnen können aufgrund ihrer Funktionsweise in die zwei Typen kapillaraktive und feuchteadaptive Dampfbremsen eingeteilt werden. Die Zweitgenannte passt ihren s_d -Wert der Umgebungsfeuchte an (siehe Abbildung 8). Sie „adaptiert“ sich an die sie umgebende Feuchte. Dies ist aus zwei Gründen vorteilhaft. Zum einen im Hinblick auf den Holzschutz, da die Feuchtigkeit leichter aus der Konstruktion zum Raumin-

neren entweichen und somit die Holzfeuchtigkeit unterhalb der Grenzwerte nach [39] gehalten werden kann. Zum anderen wegen der im Sommer möglichen Umkehrdiffusion, bei der sich das Partialdampfdruckgefälle umkehrt. Hierbei dringt feuchtwarme Luft (schwüler Sommertag) von außen in die Konstruktion ein und wandert bis zur Dampfbremse weiter. Bei darunter liegenden klimatisierten (gekühlten) Räumen kann es dazu führen, dass die Luftfeuchtigkeit unterhalb der Wärmedämmung und oberhalb der Dampfsperre extrem ansteigt und es zu einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur kommt, was ein Kondensatausfall zu Folge hätte. Dies wird durch die gute Wasseraufnahmefähigkeit des Kunststoffes Polyamid, der bei dieser Art Dampfbremse eingesetzt wird, und die damit verbundene Erhöhung der Permeabilität für Wasserdampf verhindert. Im Winter steigt bei einem nach außen gerichteten Partialdampfdruck der Sperrwert der Dampfbremse aufgrund der trockenen Umgebungsfeuchte an und sichert so die Konstruktion vor Zutritt von feuchtwarmer Raumluft.

Die kapillaraktive Dampfbremse besteht aus einem stark Wassersaugenden Vlies, welches eine einseitige oder wechselseitige Polymerbeschichtung besitzt. Das Vlies nimmt die anfallende Feuchtigkeit auf und gibt sie langsam an die Raumluft ab.

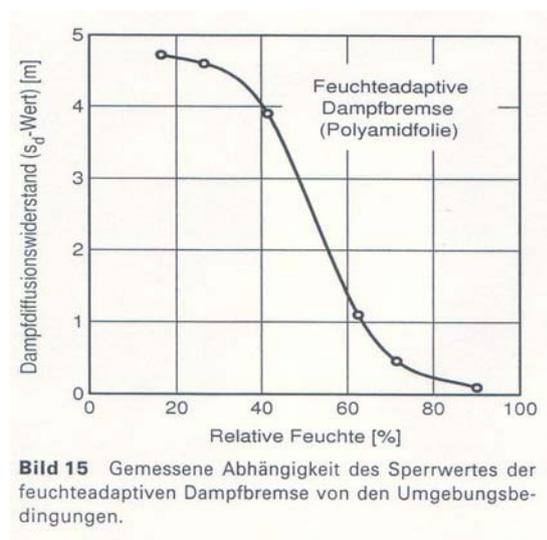


Abbildung 8 Sperrwert in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte aus [26]

2.4. Diffusions- und Konvektionsanforderungen an UDB und Dampfsperren im geneigten Steildach

Die oben beschriebenen folienartigen Werkstoffe werden vor allem im konventionellen Steildach und in der Holztafelbauweise verarbeitet. Die Anforderungen, die an diese Baustoffe gestellt werden, betreffen nur die Bereiche Wärme- und Feuchteschutz. Sie sollen neben der Wasserdichtheit und Luftdichtheit auch die Diffusion durch und Konvektion in die Konstruktion hinein be- und verhindern.

Um die Aufgaben, die die Bahnen im Außen- und Innenbereich haben zu trennen und die Definitionen und Anforderungen klar zu formulieren, werden zunächst einmal die Begrifflichkeiten, die in der Praxis häufig verwechselt werden, geklärt.

Bei der Winddichtheit kommt es öfter zu kontroversen Diskussionen, da die Ebene der Winddichtigkeit und ihre Wirkung nicht eindeutig definiert sind. Nach [40] und [52] ist die Dichtigkeit gegen Wind in den äußeren Bereich eines Bauteils zu legen, um ein Durchströmen der Wärmedämmung zu verhindern. Keine Aussage diesbezüglich, aber eine Begründung hierfür, kann aus [49] entnommen werden. Hier wird gesagt, dass es durch höhere Windgeschwindigkeiten zu größeren Druckdifferenzen kommen kann, die bei Undichtigkeiten in der Luftdichtheitsebene eine verstärkte Sogwirkung hätten und feuchtwarme Raumluft in die Konstruktion hineinziehen würden.

Nach [13] wird die Luftsperrung mit der Windsperre gleichgesetzt, wobei ihr hier nur die Aufgaben einer Luft- bzw. Konvektionssperre zu geschrieben werden und sie auf der Innenseite des Bauteils anzuordnen ist. Nach [45] sollte die Winddichtigkeit auf jeden Fall auf der Innenseite der Konstruktion erfolgen, um „eine sichere Lösung der Winddichtigkeit zu erlangen“. Nach dem Funktionsprinzip der zweistufigen Dichtung, wie es für Mauerwerk in [49] beschrieben ist, würde eine Übertragung auf den Dachbereich die Windsperre ebenfalls im Innenbereich der Dachkonstruktion angeordnet werden. Hiermit sollte dann die Regensicherheit und auch die Luftdichtheit erhöht werden. Das Funktionsprinzip der zweistufigen Dichtung ist, dass die äußere Schicht lediglich die Regensicherheit erzeugen soll und sie dies sicherer gewährleisten kann, wenn sie gleichzeitig luftdurchlässig ist. Dies wiederum hat zwei Vorteile. Zum einen verliert das windgetriebene Wasser an Durchschlagskraft, da die äußere Dichtung für den Wind kein Hindernis darstellt und zum anderen, dass sich durch die dahinter liegende luftdichte Schicht innerhalb der Konstruktion (also hinter der Regendichtheitsschicht) ein Luftpolster aufbauen kann, wodurch die Regensicherheit wiederum unterstützt wird. Ob dieses Funktionsprinzip bei den heutzutage eingesetzten Bahnen im Unterdachbereich übertragbar, ist kann vom Verfasser nicht endgültig geklärt werden. Hierzu sollen nur folgende zwei Anmerkungen gemacht werden:

- Einige der Messverfahren vom Diffusionsverhalten für diese Bahnen beruhen auf der Messung der Luftdurchlässigkeit und sind in der Produktion von dampfdurchlässigen Filmen weit verbreitet.
- Warum werden dann nach der DIN EN 13859-2 für Unterspann- und Unterdeckbahnen im Wandbereich eine Luftdurchlässigkeitsprüfung verlangt? Sollen diese Bahnen möglichst luftdurchgängig oder luftdicht sein?

Auch wenn die Argumentation mit der zweistufigen Dichtung schlüssig ist, sollte unter der Winddichtigkeit die Behinderung von kontinuierlichen oder stoßartigen Luftbewegungen in die Wärmedämmebene hinein verstanden werden. Durch die in [49] beschriebenen Großversuche konnte nachgewiesen werden, dass hierdurch die gesamte Luftkonvektion in der Dachkonstruktion abgemindert wird. Somit würde diese Aufgabe den Unterspann- und Unterdeckbahnen zufallen, die hierzu durch Verklebung eine durchgängige Ebene bilden sollten.

Die Luftdichtheit im Dach- oder auch im Wandbereich ist immer auf der Innenseite der Konstruktion herzustellen. Sie ist in [N1] wie folgt definiert:

Beschaffenheit der Konstruktion zur Vermeidung von Wärmeverlusten durch unkontrollierten Luftaustausch und zur Vermeidung von Tauwasserbildung infolge Konvektion feuchter Luft. Bei luftdichten Konstruktionen findet bei den praktisch auftretenden Luftdruckdifferenzen kein Luftdurchgang im Sinne eines Luftaustausches mit der Außenluft statt.

Anforderungen, Planungs- und Ausführungsbeispiele für alle Baubereiche sind in [N4] aufgeführt. Die wichtigste Aufgabe der Luftdichtheitsebene, so die einhellige Meinung der Fachleute, ist die Konvektion in das Bauteil hinein zu verhindern.

Eine weitere Aufgabe, die diese Bahnen erfüllen sollen, ist die Diffusionsfähigkeit- bzw. Diffusionsdichtheit. Leider gibt es die Diffusion betreffend zu viele unterschiedliche (siehe Kapitel 4) und nach [25] zu ungenaue Messmethoden und auch in der Literatur sind keine wertebezogenen Abstufungen zu finden. Daher wird die Diffusionsfähigkeit, meist als s_d -Wert ausgedrückt und ist nach Art des Baustoffs oder der Anforderungen klassifiziert. In Tabelle 4 sind vom Verfasser aufgefundene Diffusionswerte mit den zugehörigen Gründen für die Einteilung aufgelistet.

Tabelle 4 unterschiedliche Klassifizierungen des Begriffs der Diffusionsoffenheit

Autor/ Veröffentlichung	s _d -Werte [m]	Bezeichnung der Diffusionsoffenheit	Material	Anwendung und Bemerkungen
ZVDH [31]	0,3	diffusionsoffen	diffusionsoffene Werkstoffe	Über Wärmedämmung
DIN 4108-3	≤ 0,5	diffusionsoffen	-	die Wasserdampfdiffusion betreffende Schicht
	0,5 - 1500	diffusionshemmend		
	≥ 1500	diffusionsdicht		
DIN 68800-2 Prof. Schulze [N9][39]	≤ 0,2	diffusionsoffen	Verschiedene Baustoffe	Schichten die Holzquerschnitte umgeben zur Einteilung in Gefahrenklassen den Holzschutz betreffend
	≤ 0,02	extrem diffusionsoffen		
Dr. Künzel [25]	< 0,1	extrem diffusionsoffen	Unterspann- Unterdeckbahnen	Dachbereich Bauphysikalische Betrachtung
	< 0,3	diffusionsoffen		
Prof. Gertis [9]	≤ 0,5	diffusionsoffen	Dichtungsbahnen	-
Prof. Hens [13]	2-5	-	Dampfsperren	Im Dachbereich - Einteilung erfolgte nach Dachaufbau, Belüftung, und Feuchteproduktion innerhalb des Gebäudes
	5-25	-		
	25-200	-		
	>200	-		
Wagner [45]	< 0,1	diffusionsoffen	Unterspannbahnen	Holzschutz betreffend
Klopfer [30]	0,1 - 0,3	diffusionsoffen	Gilt für Beschichtungen, Abdichtungen, Bodenbeläge; Bereich zw. 0,3 - 10 m Bereich f. konventionelle Bauteile	
	0,3 – 10	Keine spezielle Bezeichnung		
	10 – 100	Dampfbremsen		
	100 - 1000	Dampfsperren		
Worch [51]	0,2	diffusionsoffen	Kalkzementputz	Genannte Kategorien bei Versuchsbeschreibung
		extrem diffusionsoffen	Mineralwolldämmstoff	
WTA Merkblatt	< 0,5	diffusionsoffen	Beschichtungen	Fachwerkh Holzbauteilen betreffend
Weber [50]	< 0,1	wasserdampfdurchlässig, mikroporös	Beschichtungen	Einsatz auf mineralischen Untergründen
	0,1 – 0,5	wasserdampfdurchlässig		
	0,5 – 2,0	wasserdampfbremsend		
	>2,0	wasserdampfdicht		
Walter [47] WDD[g/m²h]	< 5,5	sperrend	Anstriche	Einsatz auf mineralischen Untergründen
	< 13,3	hemmend		

Meistens wird die Konvektionssperre in der Baupraxis zugleich als Diffusionssperrschicht angesehen und auch so eingeplant. Wie wasserdampfdicht die Konvektionssperre ausgebildet werden soll, wurde von den Fachleuten lange diskutiert.

Aus Holzschutzsicht, so Prof. Schulze in [37] [40], sollte die Dampfdichtigkeit auf allen Seiten des Bauteils so hoch wie möglich gehalten werden, und er geht sogar soweit, dass bei einer im Außenbereich extrem diffusionsoffenen Unterdeckbahn und einer im Innenbereich verspachtelten Gipskartonplattenebene bei normalem Raumklima auf eine Dampfsperre verzichtet werden sollte. Dies hat den Vorteil, dass Baufeuchte oder unkontrolliert zutretende Feuchtigkeit zu beiden Seiten des Bauteils besser verdunsten kann und somit die Holzbauteile weniger belastet. Gleichzeitig sagt er aber auch, dass die Luftdichtheit auf der inneren Seite sichergestellt sein muss.

Nach Ansicht des Autors von [25] und [26] sollte aus feuchteschutztechnischer Sicht grundsätzlich auf der Außenseite von Nichtbelüfteten Steildächern kein s_d -Wert von kleiner als 0,1m in der Berechnung angesetzt werden. Dies wird so erklärt, dass auch wenn Bahnen die einen messtechnisch kleineren s_d -Wert als 0,1m haben, im Laufe der Zeit verschmutzen können und sich somit der Widerstand gegen Wasserdampfdurchgang erhöht. Des Weiteren wird darauf verwiesen, dass bei dem in der Holzschutznorm angegebenen s_d -Wert für extrem diffusionsoffene Bahnen von 0,02 m bereits die Oberflächenübergangswiderstände für Wasserdampf in dieser Größenordnung liegen und es somit bei ungünstigen Umwelteinflüssen (schneebedecktes Dach, Verschmutzung, mangelnde Hinterlüftung unterhalb der Dacheindeckung usw.) zu einem erhöhtem Diffusionswiderstand kommen würde. Dies mag einer der Gründe sein, dass in der DIN 4108 Teil 3 für nicht belüftete Steildächer die äußere wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke mindestens zu 0,1 m gesetzt werden muss. Die Verhältnisse zwischen innenseitiger Dampfsperre und außen liegender Unterdeckung und den nach DIN 4108-3 erlaubten, maximal anfallenden Tauwassermengen sind in Abbildung 9 dargestellt. Daher wird in [26] auch vorgeschlagen bei Unterdeckungen mit einem Diffusionssperrewert von s_d -Wert $< 0,1$ m raumseitig immer eine Dampfbremse von mindestens 1 m wasserdampfdiffusionsäquivalenter Luftschichtdicke einzubauen. Bei dichteren Unterdeckungen sollten Dampfsperren von >2 m gewählt werden.

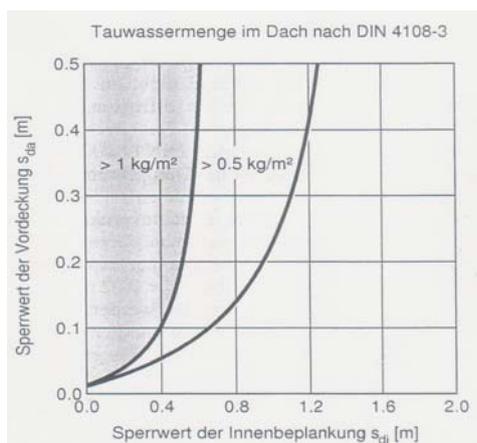


Abbildung 9 Tauwassermenge im Dach nach DIN 4108-3 aus [26]

3. Physikalische Grundlagen der Diffusion

Die Transportmechanismen des Wassers in Bauteile hinein oder durch sie hindurch können unterschiedlicher Art sein und hängen von dem vorliegenden Aggregatzustand des Wassers ab. Der Transport des Wassers benötigt eine Antriebskraft. Diese kann als potentielle, kinetische, elektrostatische, sorptive, druckabhängige oder thermische Energie auf das Wasser einwirken. Wasser fließt z.B. durch potentielle Energie von Berghängen oder steigt entgegen der gravimetrischen Anziehungskraft der Erde durch elektrostatische Energie in Kapillaren hoch. Im gasförmigen Zustand vollzieht Wasser aufgrund von Dampfdruckunterschieden einen Positionswechsel. Ebenfalls kann durch Erwärmung und der damit verbundenen Änderung der Dichte des Transportmediums Luft, der Wasserdampf in andere Medien eindringen bzw. durch sie hindurch wandern.

Durch Zufuhr oder Entzug von Energie verändert sich der Zustand des Wassers und dessen Reaktion mit der Umgebung. Zum Beispiel führt der Entzug von Umgebungsdruck bei einer konstanten Raumtemperatur von 20°C dazu, dass das Wasser erst siedet und dann gefriert. Durch den geringeren Druck wird der Luft Energie entzogen und von der im Wasser enthaltenen ersetzt. Hierdurch verringern sich die Bindungsenergien zwischen den einzelnen Wassermolekülen und das Wasser beginnt bereits bei Raumtemperatur zu kochen. Gleichzeitig wird dem Wasser durch die sich lösenden Moleküle kontinuierlich Energie entzogen, wodurch es in den festen Phasenzustand übergeht. Dies Gefrieren erfolgt ebenfalls bei Raumtemperatur, allerdings bei einem wesentlich geringeren Luftdruck als dem normalen atmosphärischen Druck von 1012 hPa. Hierdurch soll veranschaulicht werden, wie stark Wasser in seinen Eigenschaften von den physikalischen Parametern Luftdruck und Temperatur beeinflusst wird.

Je nach Luftdruck und Temperatur kann Wasser in den drei Aggregatzuständen fest, flüssig oder gasförmig vorliegen. Alle drei Zustände sind in Abbildung 10 mit den jeweiligen Übergangsbereichen dargestellt. Der Punkt, an dem Wasser in allen Phasen gleichzeitig vorliegen kann, nennt man Tripelpunkt.

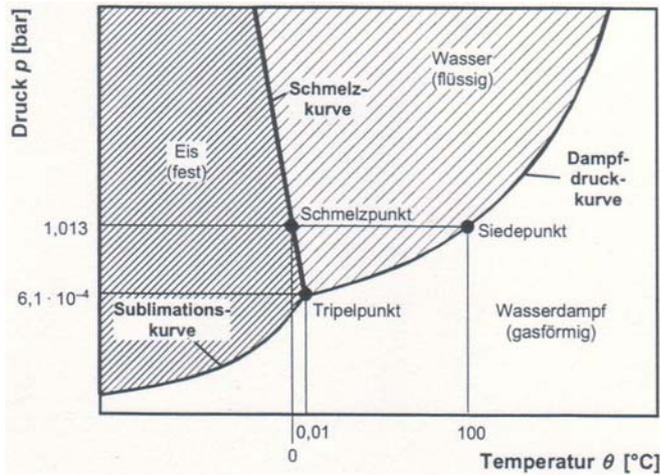


Abbildung 10 Zustandsdiagramm des Wassers nach [49]

Zu den im Bauwesen wichtigsten Transportmechanismen des Wassers in den unterschiedlichen Aggregatzuständen zählen:

- Sorption oder Adsorption / Desorption
- Diffusion
- Kondensation, Verdunstung
- Konvektion, Wassertransport durch Luftbewegungen
- Osmose, Elektrokinese
- Kapillare Wasserleitung
- Strömung von flüssigem Wasser

Im Bezug auf die maximal beförderbaren Wassermengen durch die o.g. Transportmechanismen würde sich die hier aufgeführte Reihenfolge umkehren. Da durch Strömung größere Wassermengen als durch Konvektion und hierdurch wiederum mehr als mit Diffusion und Sorption bewegt werden kann.

Die beiden erstgenannten Wassertransportmechanismen bilden zusammen die Permeation. Dies ist ein dreistufiger Vorgang bei dem auf molekularer Ebene zuerst durch Sorption der diffundierende Stoff an die kontaktierende Oberfläche des Diffusionsmediums, durch das die Diffusion stattfindet, angelagert oder aufgenommen wird. Danach werden die einzelnen Moleküle mittels der verschiedenen Arten der Diffusion durch das Medium hindurch transportiert und im Anschluss daran durch Desorption von dem Diffusionsmedium wieder an die Umgebung abgegeben. Beide Mechanismen laufen im hygroskopischen Bereich ab. Die anschließenden Wassertransporte erfolgen in porösen Medien über Kapillarität, nach [15] also im überhygroskopischen Bereich. Die Neudefinition des Feuchtepotentials, dargestellt in Abbildung 11 nach [15], verbindet die Transportmechanismen mit den Feuchtegehalten und der Porengröße und grenzt somit den hygroskopischen und überhygroskopischen Feuchtebereich eindeutig voneinander ab.

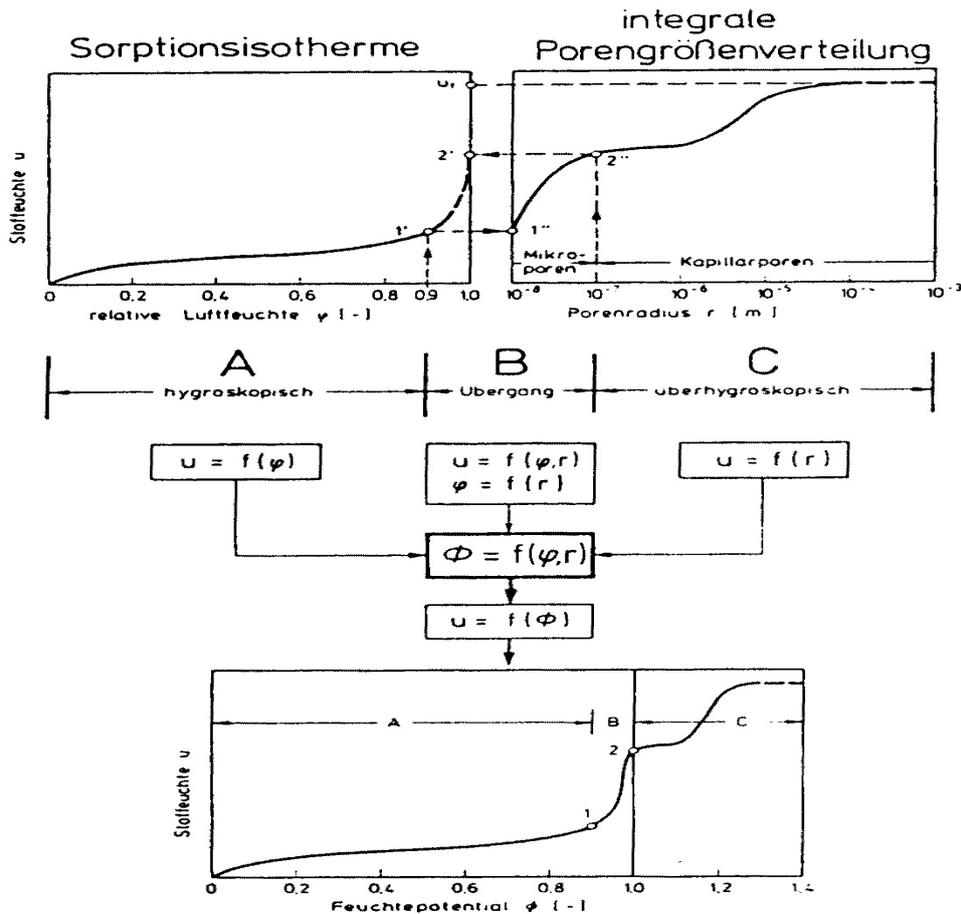


Abbildung 11 Zusammenhang zwischen Sorption Hygroskopie und Porengrößenverteilung

Im Folgenden sollen nur die durch Druck und Temperatur beeinflussten Transportarten der Sorption und Diffusion genauer erläutert werden und hierbei insbesondere die Zweitgenannte, da die in Kapitel 5 durchgeführten Versuche im Wesentlichen auf diesem Transportmechanismus beruhen. Des Weiteren wird kurz die Feuchtebewegung der Konvektion, die mittels Strömung entsteht, beschrieben.

3.1. Sorption

Sorption, auch als Adsorption bezeichnet, ist die Anlagerung von Wasser aus der umgebenden Luftfeuchte an einen Stoff. Bis zum Erreichen des natürlichen Wassergehaltes, der so genannten Gleichgewichtsfeuchte, wird Wasser in Molekülform an das Material angelagert. Diese Anlagerung kann an der Außenseite des Materials oder auch im Inneren des der Feuchtigkeit ausgesetzten Stoffes geschehen. Anlagerungsebene ist bei porösen Stoffen die Oberfläche der Poren, bei Polymeren (Grundstoff der untersuchten Bauprodukte in Kapitel 5) wird das Wasser auf molekularer Ebene an den Stoff angelagert. Mit zunehmender Umgebungsfeuchte löst sich das Wasser im Kunststoff auf.

Diese Art der Wasseraufnahme kann nach [19] als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit bei konstanter Temperatur dargestellt und als Sorptionsisotherme bezeichnet werden (siehe Abbildung 12).

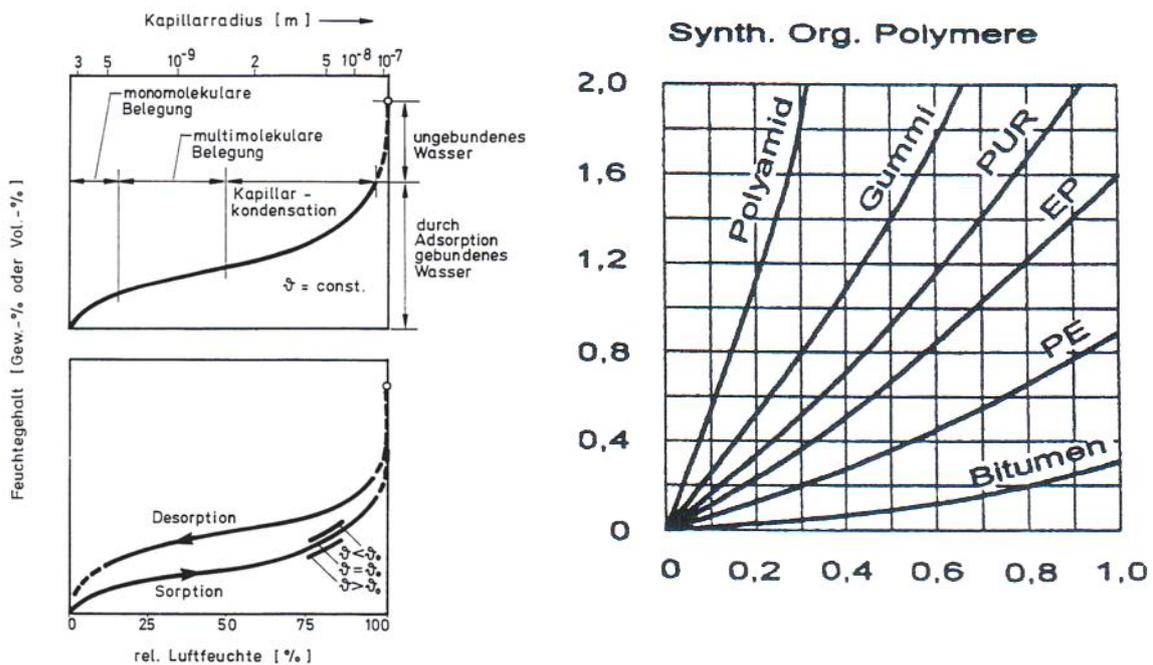


Abbildung 12 Sorptionisotherme eines
 a) hygroskopisch porösen Baustoffs nach [49] b) hydrophoben Kunststoffs nach [19]

Bei porösen Stoffen lagert sich das Wasser unter einem exothermen Vorgang, also bei Wärmeabgabe, in mono- oder multimolekularen Schichten an der Oberfläche an, und ist von der relativen Luftfeuchtigkeit, der Oberfläche des Materials sowie dem Durchmesser der Poren abhängig. Diese Anlagerung von Wassermolekülen erfolgt nach [19] nur solange bis ein Gleichgewicht zwischen der Wasseraktivität in der Luftfeuchtigkeit und der Wasseraktivität der mono- oder multimolekularen Schichten an der Materialoberfläche herrscht. Diese Art der Sorption verläuft nach der BET-Theorie, die im Jahre 1938 von Brunauer, Emmett und Teller veröffentlicht wurde. Aufgrund ihrer Wirklichkeitsnähe kann mit Hilfe von Edelgasen auch die Oberfläche von porösen Festkörpern oder Pulvern gemessen werden [19]. Unter der Oberfläche sind nicht nur die nach außen gerichteten Oberflächen, sondern auch die inneren, von Gas erreichbaren Porenoberflächen gemeint. Nach [14] werden die ersten drei Schichten, die sich nach dieser Theorie an diese Oberfläche anlagern, als strukturiertes Oberflächenwasser bezeichnet, dadurch kann es in den Gelporen zur Kapillarkondensation kommen, sodass die Pore mit flüssigem Wasser gefüllt wird. Dies geschieht bereits im Luftfeuchtebereich zwischen 0 – 50 %. Bei welcher Porengröße welche Art von Sorption vorliegt und wie das vorliegende Wasser bezeichnet wird, kann Tabelle 5 in Kapitel 3.2 entnommen werden.

Der Sorptionsvorgang bei Polymeren beruht nicht auf der BET-Theorie, sondern auf der Löslichkeitstheorie und findet nur unter Energiezufuhr statt. Nach [49] sind die Polymere Polyethylen und Polypropylen wasserabweisend (hydrophil), nehmen aber bei höherer Umgebungsfeuchte Wasser an der Oberfläche auf. Polyamide und Polyurethane nehmen dagegen Wasser in molekularer Form auf und „lösen“ es in sich. Das Maß der Anlagerung hängt bei allen Polymeren von der umgebenden Luftfeuchtigkeit ab und steigt mit dieser exponentiell

an (siehe Abbildung 12). Beim Vergleich der Sorptionsisothermen ist der prozentuale Anteil des Wassers bei den Stoffen, die nach der BET-Theorie Wasser anlagern, wesentlich größer als bei Stoffen nach der Löslichkeitstheorie.

Der umgekehrte Prozess, bei dem Wasser von Stoffen an die Umgebung abgegeben wird, bezeichnet man als Desorption. Hierbei verringert sich der Wassergehalt des Stoffes solange bis die Wasseraktivitäten im Stoff und in der Umgebung gleich groß sind.

3.2. Diffusion

Die im Weiteren behandelte Diffusion in Gasen und Flüssigkeiten soll den drei folgenden Definitionen entsprechen:

Wasserdampfdiffusion ist ein langsam ablaufender Vorgang. Als Diffusion wird der Stofftransport im molekularen Bereich infolge der Eigenbewegung der Moleküle bezeichnet [49].

Stofftransport, der auf der Eigenbewegung von Molekülen infolge ihres Energieinhalts beruht (Brown'schen Molekularbewegung) und nur durch den Impulsaustausch der Moleküle untereinander gekennzeichnet ist [15].

Die auf der Wärmebewegung (Brown'schen Molekularbewegung) der Moleküle beruhende, selbstständige Vermischung von Gasen, Lösungen oder mischbaren Flüssigkeiten [49].

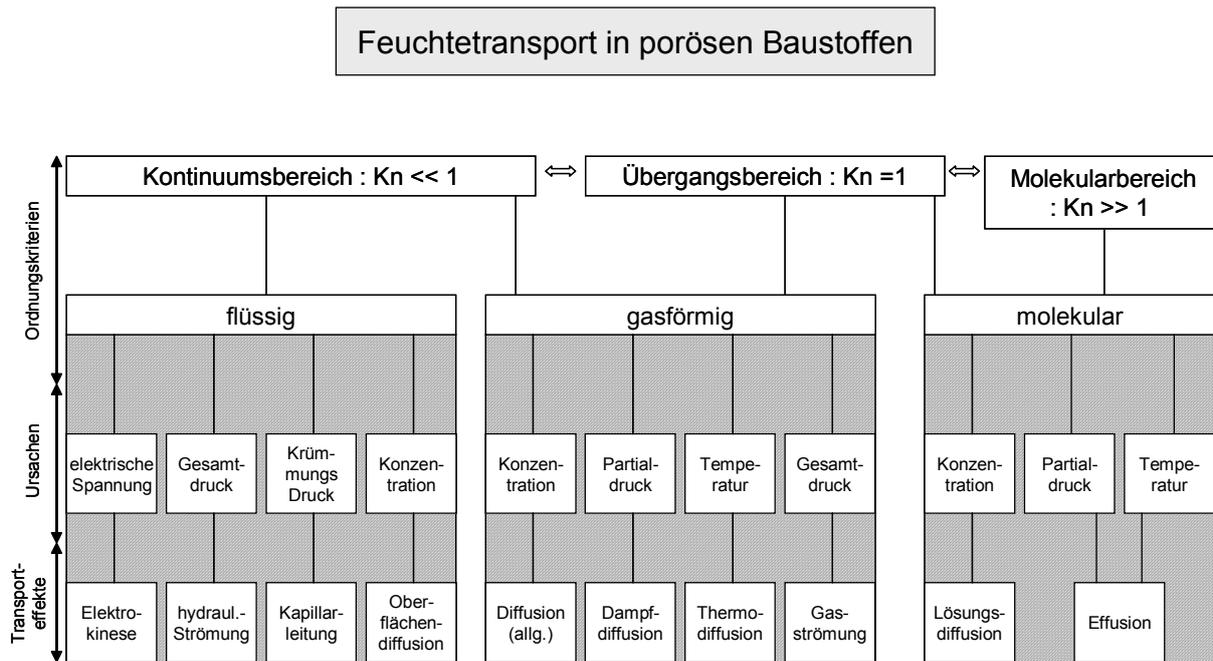
Die Diffusion ist ein Transportvorgang beim molekularen Bereich und wird angetrieben durch Wärmeenergie, die den einzelnen Molekülen innewohnt, und durch räumliche Molekülkonzentrationsunterschiede. Beide Faktoren sind im 1. Fick'schen Gesetz formuliert.

$$J = D \frac{c}{x} \quad [\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)] \quad (1.)$$

J= Massenstromdichte oder Diffusionsstromdichte
D= Diffusionskoeffizient [cm^2/s] Definition nach [N16]
c= Konzentration [g/cm^3]
x= Wegstrecke [cm]

Die Stromdichte der wandernden Moleküle ist das Produkt aus dem Konzentrationgefälle (c/x) und dem Diffusionskoeffizienten, dieser stellt das Maß der Beweglichkeit der diffundierenden Teilchen dar. Die Beweglichkeit der Teilchen hängt von der vorhandenen Wärmeenergie, der Teilchengröße des diffundierenden Stoffes und vom Diffusionsmedium ab.

Nicht zu den treibenden Kräften im Transportvorgang Diffusion gehört die Strömung. Diese entsteht durch Unterschiede im Gesamtdruck. Die verschiedenen Arten der Diffusion und deren Ursachen werden nachfolgend erläutert, und können dem Diagramm 1 entnommen werden. Zur Einteilung in die unterschiedlichen Diffusionsarten dient die in Kapitel 3.4 beschriebene Knudsen-Zahl, welche sich gemäß [16] als geeignete Kennzahl zur Charakterisierung der Transportvorgänge erwiesen hat.



Schematische Übersicht über die Feuchtetransportmechanismen in porösen Baustoffen,

Knudsen-Zahl $Kn = \lambda/2r$

λ : mittlere freie Weglänge der Wassermoleküle

r : Porenraumabmessung (Radius)

Diagramm 1 Feuchtetransportarten in porösen Baustoffen nach Kießl [15]

Jeder der Transporteffekte ist neben der Zustandsform der Feuchte auch von der Art des Diffusionsmediums abhängig. Dies kann ein fester Stoff, mit einer eventuell vorhandenen Porosität, eine Flüssigkeit oder ein Gas sein. Eine Einteilung der Porengröße nach [49], die Porenart und Materialdicke der untersuchten Materialien in Kapitel 5.1, der Durchmesser eines Wassermoleküls sowie die mögliche Diffusionsart und Sorptionsart sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5 Größenverhältnisse, Porenradien, Diffusions- und Sorptionsarten

Nr	Durchmesser	Porenart / Bezeichnung	Transportart- /prozess		Materialart mit dieser Porengröße
1	< 1nm	Mikrogelporen	Effusion / Lösungsdiffusion	Beginn der Sorption mit Bildung von strukturiertem Oberflächenwasser und Kapillarkondensation	Polymer(keine Poren), Gummi, Bitumen, Zementstein, (Zementgel)
2	1 nm – 30 nm	Mesogelporen	Effusion		Gips, Putze, Zement, Holz
3	0,28 – 0,40 nm	Durchmesser des Wassermoleküls		-	-
4	0,3 – 1,0 µm ~ 300 – 1000 nm	Porengröße bei diffusionsoffenen Filmen	Wasserdampfdiffusion kann stattfinden	-	-
5	30 nm – 1 µm	Mikrokapillarporen	Oberflächendiffusion > 100nm Wasserdampfdiffusion	beginnendes kapillares Saugen	Sandstein, Ziegel, gebrannter Ton, Gips, Putze, Zement
6	1 µm – 30 µm	Mesokapillarporen	Kapillare Saugeschwindigkeit nimmt mit Zunahme des \varnothing der Poren ab	-	-
7	30 µm – 1mm	Makrokapillarporen			
8	>1 mm	Grobporen			
9	7 – 480 µm	Dicke der USB/USB	-	-	-

Nach [14] gehen die Transportprozesse bei den unter Nummer 1 und 2 genannten Diffusionsarten überwiegend in die Sorption über, da das Bindungsbestreben von den Wassermoleküle groß ist und sich diese bei längerer Verweildauer an die Oberflächen der Pore anlagern. Die Sorption ist dominant gegenüber der Effusion.

3.3. Lösungsdiffusion

Obwohl es sich bei den in dieser Arbeit untersuchten Unterspannbahnen und deren Funktionsschicht um mikroporöse Polymerfilme handelt, kann auch neben oder außerhalb dieser Poren eine Diffusion stattfinden. Die Diffusion durch ein Polymer hindurch nennt man Lösungsdiffusion. Nur Stoffe die Wasser auf molekularer Ebene in ihre eigene Struktur aufnehmen können sind als Diffusionsmedium geeignet. Bei Polymeren wird nach [19] dieser Vorgang als Quellung bezeichnet. Bei hydrophilen und polaren Polymeren findet diese Quellung stärker statt als bei hydrophoben.

Die Stärke der Quellung hängt auch mit der Sorption von Wassermolekülen an die Oberfläche des Polymers zusammen. Diese wiederum ist abhängig von der umgebenden Luftfeuchtigkeit. Je höher die umgebende Luftfeuchtigkeit ist, desto stärker ist die Sorption und desto höher wird die Wasserkonzentration innerhalb des Kunststoffes.

Die Lösungsdiffusion spielt bei den in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Filmen zwar eine untergeordnete Rolle, da ihre Struktur für die nachfolgend beschriebene Wasserdampfdiffusion aufgebaut ist, trotzdem findet auch diese Art des Wassertransportes statt, die von zwei Parametern beeinflusst wird. Zum einen durch die Höhe des Pigmentanteils, der nach der Herstellung noch in dem Kunststoffilm enthalten ist sowie in den ihn umgebenden Luftraum und zum anderen durch die Art des Polymers.

Je geringer der Pigmentanteil ist, desto höher wird der Anteil den die Lösungsdiffusion zur Gesamtdiffusionsrate beiträgt, da verstärkt Diffusion durch den Kunststoff stattfindet. Obwohl dies der Fall ist nimmt die Lösungsdiffusion selber wiederum mit dem Pigmentanteil zu. Hierfür liefert [19] folgende Erklärung: die Lösungsdiffusion findet nur durch das Polymer und nicht durch den Pigmentanteil statt. Da sich aber Wasserschichten um die Pigmente bilden und die Wassermolekültransporte in diesen Schichten schneller ablaufen als im Polymer selber, wird die Diffusionsstromdichte durch die Pigmente erhöht. Diese Wasserschichten bilden sich durch Anlagerung an den Füllstoff. In den Bereichen, wo Luftschichten um die Pigmente durch die Streckung entstanden sind, werden sich zwar auch Anlagerungen bilden, jedoch findet in diesen Bereichen Wasserdampfdiffusion statt, welche um mehrere 10er Potenzen größere Massenstromdichten aufweist als es bei der Lösungsdiffusion der Fall ist.

Die Polymerart beeinflusst wie o.g. die Quellung des Diffusionsmediums. Bei hydrophoben Polymeren steigt die Wasserkonzentration genau wie bei hydrophilen Polymeren mit der umgebenden Luftfeuchte an. Dies bewirkt aber bei den erstgenannten, dass die „gelösten“ Wassermoleküle aufgrund der geringeren Bindungsneigung zum Polymer untereinander so genannte Cluster bilden und miteinander „verkleben“. Dadurch sinken die Beweglichkeit der einzelnen Wassermoleküle innerhalb des Polymers und somit auch der Diffusionskoeffizient sowie die Diffusionsrate des Wassers.

Diese Art der Diffusion ist unabhängig von Strömungen der umgebenden Luft. Sollte sich bei Messungen von reiner Lösungsdiffusion (wie sie bei den in Kapitel 5.1 beschriebenen PET-Folien stattfindet) in Abhängigkeit zur umgebenden Strömung die Diffusionsfähigkeit ändern, müsste dies auf die veränderten Sorptionsbedingungen und die Beeinflussung des Übergangswiderstandes vom Wasserdampf zurückgeführt werden.

3.4. Wasserdampfdiffusion - Effusion

Die Wasserdampfdiffusion findet im Medium Gas (Luft) statt. Da Luft für die in der Baupraxis benötigten Genauigkeiten als ideales Gas bezeichnet werden kann, bedeutet dies, dass sich der Wasserdampfpartialdruck und die Wasserdampfkonzentration proportional zueinander verhalten. Das heißt, wenn die Konzentration steigt, wächst auch der Partialdruck des Wasserdampfes an. Somit folgt die Luft der idealen Gasgleichung:

$$p = c \times R \times T \quad (2.)$$

p = Wasserdampfpartialdruck [Pa]
c = Wasserdampfkonzentration [g/cm³]
R = Gaskonstante [KJ/kmol*K]
T = Temperatur [C°]

Bei Zusammenführung der Gleichungen (1.) und (2.) mit dem von Schirmer in [36] veröffentlichten und in der DIN EN ISO 12572 [N14] aufgenommenem Diffusionskoeffizient D_D für Wasserdampf in Luft

$$D_D = 0,083 \times \frac{p_o}{p} \times \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,81} \quad (3.)$$

ergibt sich die Massenstromdichte für Wasserdampf durch ein Körper zu:

$$m_D = \frac{D_D}{R \times T} \times \frac{\Delta p_D}{d} \quad (4.)$$

- D_D = Diffusionskoeffizient für Wasserdampf in Luft [m^2/h]
- p_o = normaler Luftdruck (atmosphärischer Normzustand des Drucks) [Pa]
- p = vorhandener Luftdruck (bei Messung) [Pa]
- Δp_D = vorhandene Wasserdampfpartialdruckdifferenz [Pa]
- R = Gaskonstante für Wasserdampf [$N \cdot m / (kg \cdot K)$]
- T = vorhandene Temperatur [K]
- T_o = absolute Temperatur (273 K) [K]
- d = Dicke des Körpers (bei Fick'schem Gesetz ist es der zurückgelegte Weg siehe (1.))

In Medium Luft besitzen die Moleküle die größte Bewegungsfreiheit und können deshalb auch am schnellsten einen definierten Weg zurücklegen. Die, durch die Wärmeenergie angetriebenen Moleküle können nach [19] im gasförmigen Zustand eine mittlere freie Weglänge von 40 nm zurücklegen. Im flüssigen Zustand können sie lediglich eine freie Weglänge von 0,3 nm zurücklegen. Die Ursache kann zum einen darin liegen, dass innerhalb der flüssigen Phase die Molekülabstände untereinander geringer sind und sich somit eine Art „Platzmangel“ einstellt. Hierbei kommt es durch die Platzwechsel der Moleküle häufiger zu Zusammenstößen untereinander, wodurch die Energie der Moleküle aufzehrt und die Strecke jeder Bewegung verkürzt wird. Zum anderen ist die dem Wassermolekül innewohnende Energie im gasförmigen größer als im flüssigen Zustand. Dies spiegelt sich gemäß [19] in der Platzwechselanzahl (Schwingung) innerhalb einer Zeiteinheit wieder.

Einfluss auf die mittlere freie Weglänge λ haben nur die Temperatur (je höher, desto höher die Bewegungsenergie des Wassermoleküls) und der umgebende Luftdruck (je niedriger, desto weniger Widerstand bei der Bewegung). Damit reine Wasserdampfdiffusion vorliegen kann, müssen die Porenräume mindestens 100 nm groß sein [30]. Sollten die Porenräume kleiner sein als die freie Weglänge, dann erfolgt nach [19], [22] und [16] die Knudsen'sche Molekularbewegung, auch Effusion genannt. Hierbei stoßen die Moleküle häufiger mit den inneren Oberflächen des Diffusionsmediums zusammen als mit anderen Wassermolekülen. In Diagramm 1 sind die beiden Transportarten des Wassers aufgrund der Größe der Knudsenzahl in unterschiedliche Zustandsbereiche (flüssig, gasförmig, molekular) des Wassers eingeteilt. Die Knudsenzahl ist nach [22] wie folgt definiert:

$$Kn = \frac{\lambda}{2r} \quad [-] \quad (5.)$$

- λ [m] mittlere freie Weglänge
- r [m] Porenradius

Der zugehörige Massenstrom für die Diffusionsart Effusion ist nach [30] wie folgt definiert:

$$m = \frac{8}{3} \times r \times \sqrt{\frac{M}{2\rho RT}} \times \frac{d\rho}{dx} \quad (6.)$$

r [m] Porenradius

M [g] Molmasse der diffundierenden Teilchen

R [KJ/molK] Gaskonstante

T [K] Temperatur

Da beide Wasserbewegungen, Wasserdampfdiffusion und Effusion, größtenteils gleichzeitig auftreten und die Mengen, die durch die Zweitgenannte transportiert werden, relativ gering sind, werden diese nach [30] im Allgemeinen der Erstgenannten zugeschlagen. Wobei nach [14] aufgrund des im Anschluss an Tabelle 5 genannten Effektes die Effusion wesentlich langsamer abläuft als die Wasserdampfdiffusion.

Die Antriebsart der beiden Wasserdampfdiffusionsarten ist aber immer ein Partialdampfdruckgefälle, beziehungsweise ein Temperaturgefälle bei gleicher relativer Luftfeuchte. Nach [21] sind beide Diffusionsarten zwar temperaturabhängig, nicht aber druckabhängig. Während sich die Diffusion durch Verringerung des Luftdrucks beliebig verstärken lässt verhält sich die Effusion neutral.

Eine Methode zur Messung der Diffusion durch Bauteile oder Baustoffe und die Verwertung der hieraus gewonnenen Werte für praxisnahe Berechnungen wird in Kapitel 4 erläutert.

3.5. Oberflächendiffusion

Die Oberflächendiffusion findet ausschließlich in porösen Materialien statt und ist mit der durch sie transportierten Wassermenge stark von der inneren Oberfläche des Diffusionsmediums abhängig. In den untersuchten Stoffen in Kapitel 5.1 kann theoretisch auch diese Art der Diffusion vorkommen (gerade bei den Diffusionsdichteren Stoffen), doch soll sie an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Ihr Antrieb besteht nach [22] und [19] aus der unterschiedlichen Schichtdicke des Sorbatfilms auf den inneren Porenoberflächen (siehe Abbildung 13) und folgt dem Fick'schen Gesetz nach Gleichung (1.). Die Dicke dieser Sorbatschicht folgt aufgrund der Gleichgewichtstheorie dem Partialdruckgefälle. Weiterführende Informationen hierzu können [22] entnommen werden.

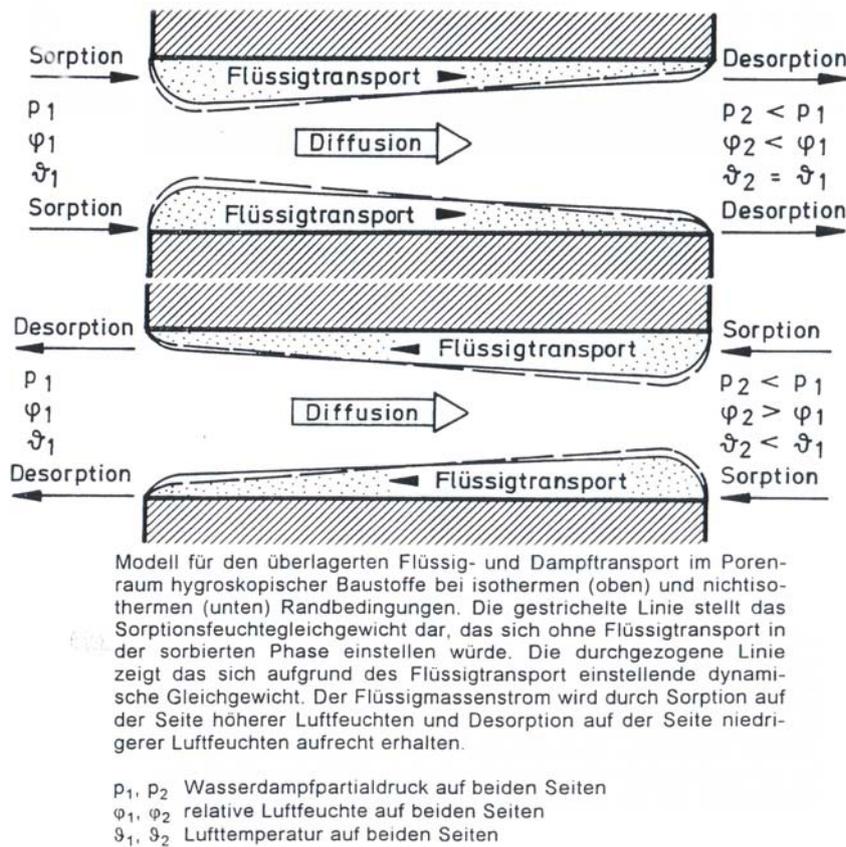


Abbildung 13 Zusammenhang zwischen Oberflächendiffusion und Sorption

3.6. Thermodiffusion und Gasströmung

In Diagramm 1 sind neben den bereits beschriebenen Diffusionsarten noch zwei weitere Arten mit den dazugehörigen Antriebsmechanismen aufgeführt. Während die Gasströmung durch einen Gesamtdruckunterschied angetrieben wird und auch Einfluss auf die Messverfahren aus Kapitel 5 hat, erfolgt die Thermodiffusion durch einen nichtisothermen Zustand über den betrachteten Querschnitt.

Die Gasströmung entsteht, wie der Name schon sagt, infolge Strömung. Die durch diese Transportmöglichkeit bewegten Feuchtigkeitsmengen übersteigen nach verschiedenen Quellen [19][22][16] die durch den Partialdruck angetriebenen Dampfdiffusionsmengen um ein Vielfaches. Ihr Einfluss auf die Messungen bei der Bestimmung des Diffusionswiderstandes wird im Folgenden erläutert.

Die Thermodiffusion bedarf eines Temperaturgefälles bei den Diffusionsmessungen. Dies ist allerdings nicht bei allen Normprüfverfahren zulässig, denn diese müssen in einer isothermen Umgebung stattfinden. Des Weiteren können bei dünnen Materialien, wie es Unterspann- und Unterdeckbahnen sind, anlagen- bzw. messtechnisch keine Temperaturgefälle über die Dicke des Baustoffs hergestellt werden. Darüber hinaus ist es schlecht vorstellbar die Prüfkammern, die nur durch die Materialien bei den Messungen getrennt sind, unterschiedlich zu temperieren. Dies könnte, wie in [22] beschrieben zu einem „Sturm im Wasserglas“ führen, denn sobald sich Temperaturdifferenzen in den Luftschichten über oder unter

den Materialien ergeben, kommt es zu „Turbulenzen“ innerhalb der Kammern mit Einfluss auf den Gesamtdruck und somit könnte eine Gasströmung durch die dünnen Materialien hervorrufen werden.

Nach [49] ist der Massenstrom durch reine Thermodiffusion vernachlässigbar klein, unterliegt aber einem Zusammenspiel mit der Sorptionseigenschaft des Diffusionsmediums. Bei den untersuchten Materialien handelt es sich um Polymere und diese besitzen einen geringen hydrophilen Charakter und gelten somit nur als gering sorptiv. Aufgrund dieser Tatsache und den bisher beschriebenen Eigenschaften soll die Thermodiffusion im Weiteren als Transportmechanismus ausgeschlossen.

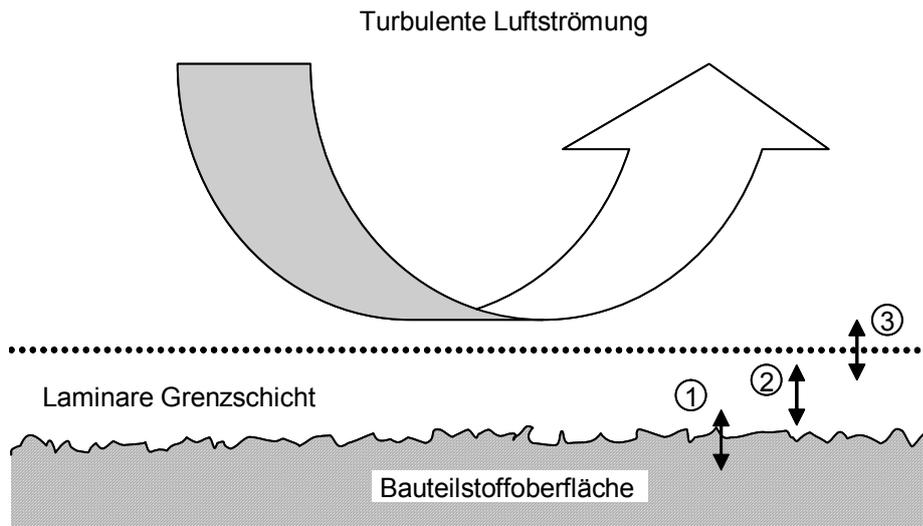
3.7. Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstände

Der Wasserdampfdurchgang durch ein Material oder Baustoff besteht nicht nur aus den oben beschriebenen Transportvorgängen im Stoff, sondern vor und nach diesem Prozess muss die Feuchtigkeit von den Baustoffoberflächen an- bzw. abtransportiert werden. Hierbei ergibt sich beim Übergang der Wassermoleküle auf beiden Seiten des Diffusionsmediums ein Widerstand. Im Folgenden wird der nach der Diffusion stattfindende Übergang von der Oberfläche des Materials in die umgebende Luft erläutert, wobei auch beim Anlagern von Wasserdampf an die Entgegengesetzte Oberfläche ein solcher Widerstand auftritt.

Das vom Stoffinneren an der Oberfläche anfallende Wasser kann in flüssiger oder gasförmiger Phase vorliegen. Um nun aber in die Luft überzugehen muss es verdunsten. Dies geschieht ausschließlich über den Vorgang der Wasserdampfdiffusion. Somit handelt es sich bei dem zu erläuternden Widerstand um einen reinen Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstand. Dieser lässt sich nach [51] in drei nacheinander auftretende Transportteilwiderstände aufteilen, wobei der größte dieser drei maßgeblich wird. Zu diesen drei gehören:

- Der Übergang von der Oberfläche des Diffusionsmediums zur Grenzschicht
- Die Diffusion durch die laminare Grenzschicht
- Der Übergangswiderstand zwischen der Grenzschicht und der umgebenden Luft

Ihre Räumliche Anordnung an der Bauteiloberfläche kann Abbildung 14 entnommen werden.



- ① Übergang Oberfläche/Grenzschicht
- ② Durchgang Grenzschicht
- ③ Übergang Grenzschicht/Luftströmung

Abbildung 14 Ort der Übergangsteilwiderstände

Die Ausbildung dieser Grenzschicht und ihre Dicke sind abhängig von der Oberflächenstruktur des Baustoffes, bzw. bei der prüftechnischen Erfassung der Wasserdampfdiffusion von der Oberfläche des Diffusionsmediums.

Da alle drei Teilwiderstände in Reihe geschaltet sind wird der größte von ihnen der Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstand. Nach [19] ist er nur von der Luftströmung und dem Partialdruckgefälle zwischen der Gasphase des diffundierten Wasserdampfes und dem Umgebungsdruck abhängig. Der Autor von [51] hat diesen Vorgang genauer betrachtet und die folgenden Ursachen als treibende Kräfte beschrieben:

- Strömungsverhältnisse in der umgebenden Luft
- Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) des Baustoffs
- Längenquotient der betrachteten Oberfläche
- Luftbewegungsgeschwindigkeit
- Nachgeführte Wassermenge durch den Baustoff
- Verdunstungsmenge
- Wärmestromrichtung und -masse inklusive eventueller Strahlung
- Wärmekapazität und -leitung des Baustoffs
- Wasserdampfpartialdruckgefälle zw. Oberfläche und Atmosphäre(Luft)

Um diese Übergangswiderstände bei der Wasserdampfdiffusion rechnerisch zu erfassen wurde bereits in [15] [3] [19] [16] und letztendlich auch in [51] die Analogie zur Berechnung des Wärmetransports herangezogen. Nach [51] kann der Diffusionsstrom für die bauphysikalische Anwendung wie in Gleichung (7.) mathematisch erfasst werden, allerdings mit dem Hinweis, dass der Wasserdampfdiffusionsübergang komplexer ist als der Wärmeübergang und daher dies nur näherungsweise als Ansatz betrachtet werden darf.

$$m = \frac{\delta}{s_{d,gesamt}} \times \Delta p = \frac{\delta}{s_{di} \sum_n s_n \times \mu_n + s_{da}} \times (p_i - p_a) \quad (7.)$$

bzw. analog zu Gleichung (4.) für Luft

$$m = \beta' \times \Delta p$$

δ	= Diffusionsleitkoeffizient für Wasserdampf in Luft [kg/m ² hPa]
β'	= Stoffübergangskoeffizient [kg/(m ² hPa)]
Δp	= Partialdampfdruckgefälle [Pa]
s_d	= wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
s_{di}	= Stoffübergangswiderstand innen [m]
s_{da}	= Stoffübergangswiderstand außen [m]
s_n	= Schichtdicke [m]
μ_n	= Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]
p_i	= Partialdruck innen
p_a	= Partialdruck außen

Gleichzeitig kann der in [N16] angegebene Wärmeübergangskoeffizient h mit dem Stoffübergangskoeffizienten β gleichgesetzt werden. Hierzu wird in [51] auf die in der Literatur angegebenen unterschiedlichen Analogien (hier wird noch die alte Schreibweise α für h angewandt)

von Illig	$\beta [m/h] = 3,5\alpha [W/m^2K]$	bei natürliche Strömungsverhältnissen
von Werner	$\beta [m/h] = 4,0\alpha [W/m^2K]$	bei Außenwänden (versuchstechnisch belegt)
von Gertis	$\beta [m/h] = 4,7\alpha [W/m^2K]$	nach energetischer Betrachtungsweise
β	= Stoffübergangskoeffizient [m/h]	

hingewiesen.

Wie der Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstand an den Oberflächen bei der Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ durch gravimetrische Messung zu berücksichtigen ist, beziehungsweise sich ein Außeracht lassen bei den ermittelten Werten bemerkbar macht, wird in den Kapiteln 4.3.6 und 4.4 beschrieben.

4. Normen und Methoden zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusion

Um Baukonstruktion bauphysikalisch schadenfrei zu planen und alle rechnerischen Nachweise durchführen zu können, bedarf es neben dem fachlichen Wissen und den notwendigen Berechnungsmethoden auch der materialtechnischen Eigenschaften der zu verarbeitenden Baustoffe. Diese werden zwar meistens bereits von den Hersteller bestimmt und veröffentlicht, doch um produktneutral planen und beraten zu können, sind in [N3] und [N11] wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte von den gängigsten Materialien im Bauwesen aufgelistet. Zum Bestimmen dieser Werte wird meistens auf erprobte, über die Jahre weiterentwickelte und bewährte Prüfmethode zurückgegriffen. Die überwiegende Zahl von Prüfmethoden sind in Normen vom DIN- Institut oder in anderen Richtlinien verschiedener staatlicher oder privater Organisation schriftlich fixiert. Sie spiegeln somit den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik dar.

Aufgrund von wirtschaftlichen Zwängen und um auch bei großen Herstellmengen eine gleichbleibende Produktqualität garantieren zu können, werden innerhalb von Qualitätsüberwachungen in Herstellerbetrieben zum Teil nicht normierte Prüfmethode eingesetzt.

Bei den unter Kapitel 2 beschriebenen Produkten werden zur Überwachung der Wasserdampfdurchlässigkeit häufig andere wie die in der Eigenschaftsnorm aufgeführten Prüfverfahren angewendet. Im Folgenden sollen nun die für diese Materialien geltenden und normierten Prüfverfahren erläutert sowie ein Überblick über weitere Prüfnormen gegeben werden. Im Vergleich dazu sind verschiedene, gängige Verfahren der Qualitätssicherung in Produktionsbetrieben aufgeführt. Als Abschluss dieses Kapitels soll der derzeitige Stand der Literatur und die daraus hervorgehende Meinung von Sachverständigen zu diesem Thema dargelegt werden.

4.1. Deutsche und Europäische Normen

Mit der Einführung der DIN 53413 im Jahre 1940 und ihrem Ersatz 1958 durch die DIN 53122 [N7] begann die Überprüfung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Flächengebilden aus verschiedenen Stoffen in Deutschland.

Als erste in Deutschland geltende Norm zur Überprüfung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Baustoffen wurde 1973 die DIN 52615 [N6] eingeführt. Heute gilt die DIN EN ISO 12572 [N14] als Normprüfmethode für Baustoffe und Bauprodukte.

Speziell im Bereich der Baustoffe sind umfangreiche Prüfmethode zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit vorhanden. In Tabelle 6 sind weitere vom Deutschen Institut für Normung übernommene und einige Internationale Prüfverfahren aufgeführt. Die Grauschattierten Prüfmethode werden bei verschiedenen Herstellern von Unterdeck- und Unterspannbahnen als Referenzverfahren genannt.

Tabelle 6 Normenübersicht zur Bestimmung von Dampfdurchlässigkeit bei Baustoffen

Norm	Beschreibung
DIN 53122 Teil 1	Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier Pappe und andere Flächengebilde – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Teil 1: Gravimetrisches Verfahren
DIN 53122 Teil 2	Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier Pappe und andere Flächengebilde – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Teil 1: Elektrolyse- Verfahren
DIN 55431-3	Packmittel; Kombidosen, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Gravimetrisches Schnellverfahren
DIN EN 772-15	Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 15: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Porenbetonsteinen
DIN EN 927 -4	Lacke – und Anstrichstoffe – Beschichtungen und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich – Beurteilung der Wasserdampfdurchlässigkeit
DIN EN 1015-19	Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 19: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Festmörteln aus Putzmörteln
DIN EN 1931	Abdichtungsbahnen – Bitumen-, Kunststoff und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
DIN EN 12023	Klebebänder – Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit in feuchtwarmer Atmosphäre
DIN EN 12086	Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
DIN EN 13469	Wärmedämmstoffe für die Haustechnik und für betriebstechnische Anlagen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
DIN EN 31092 – ISO 11092	Textilien – Messung des Wärme- und Wasserdampfdurchgangswiderstandes unter stationären Bedingungen (hotplate-test)
DIN EN ISO 6179	Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Elastomerfolien und Elastomerbeschichtete Gewebe – Bestimmung der Durchlässigkeitsrate von flüchtigen Flüssigkeiten
DIN EN ISO 7783 Teil 1	Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte, Schalenverfahren für freie Filme
DIN EN ISO 7783 Teil 2	Lacke – und Anstrichstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich – Bestimmung und Einteilung der Wasserdampf- Diffusionsstromdichte (Permeabilität)
DIN EN ISO 14268	Leder – Physikalische und mechanische Prüfungen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
ISO 1663	Harte Schaumstoffe – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeitseigenschaften
ISO 2528	Flächenbeschichtete Werkstoffe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – gravimetrisches Schalenverfahren
ISO 9932	Papier und Pappe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Einzelblättern
ISO 15106 - 1	Kunststoffe; Filme und Folien - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Feuchtenachweis-Sensorverfahren
ISO 15106 – 2	Kunststoffe; Filme und Folien - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Infrarotnachweis-Sensorverfahren
ISO 15106 - 3	Kunststoffe; Filme und Folien - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Elektrolytnachweis-Sensorverfahren

Die Unterdeck- und Unterspannbahnen sind je nach Ihrer Durchlässigkeit nach der DIN EN ISO 12572 oder DIN EN 1931 zu prüfen. Bei Dampfsperren hingegen wird nur nach der Zweitgenannten geprüft. Bei dem folgenden Vergleich werden diese beiden Standards mit der Vorgängernorm von der DIN EN ISO 12572, der DIN 52615 und der zurzeit noch gültigen DIN 53122 Teil-1 verglichen. Alle in diesen Normen beschriebenen Prüfungen erfolgen nach

dem gravimetrischen Prinzip, bei dem durch aufzeichnen der Massenänderung je Zeit und Flächeneinheit die Wasserdampfdiffusionsstromdichte WDD bestimmt wird.

Während bei der DIN 52615 homogene, annähernd homogene und senkrecht zur Diffusionsstromrichtung geschichtete Stoffe und bei ihrer Nachfolgenorm [N14] hygroskopische sowie nicht hygroskopische Stoffe oder Produkte, und diese mit und ohne Beschichtungen einen weiten Anwendungsbereich definierten, sind die DIN EN 1931 auf Dachabdichtungen und die DIN 53122 auf Flächengebilde (Kunststoff, Elastomer, Papier, Pappe usw.) beschränkt. Allerdings trägt die EN ISO 12572 den unterschiedlichen Stoffarten durch die in ihren Anhängen aufgeführten Prüfungsaufbauten Rechnung. Dies war in der DIN 52615 noch nicht der Fall.

Prinzipiell folgen alle Normen den gleichen Prüfschemata. Die zu prüfenden Proben werden auf ein dampfundurchlässiges Gefäß aufgelegt und mit genau spezifizierten Dichtungsmitteln verschlossen. Die Proben werden mit dem Gefäßrand so dampfdicht verbunden, dass nur noch eine, ebenfalls genau definierte, dampfdurchlässige Fläche den Gefäßinnenraum von der Umgebungsluft trennt. Vor dem Verschließen wird innerhalb des Prüfgefäßes mittels Trocknungsgranulat oder einer gesättigten Salzlösung eine konstante Luftfeuchtigkeit erzeugt.

Hier ergeben sich bereits die ersten Unterschiede, denn alle Prüfnormen setzen im Gefäßinneren Trockenmittel ein, aber nur die [N14] und ihre Vorgängernorm lassen auch gesättigte Salzlösungen zu. Dies bedingt auch den Unterschied zwischen den offiziell geläufigen Begriffen der Wet-Cup und Dry-Cup Methode, auf die sich auch die Angaben in den Normen [N3] [N11] beziehen. Bei der Dry-Cup Methode befindet sich die Probe im Trockenbereich zwischen 0 und 50 % relativer Feuchtigkeit. Um das in den Normen aufgeführte Klima im Trockenbereich auszubilden, muss immer ein Trocknungsmittel verwandt werden, mit dem die Luftfeuchtigkeit innerhalb des Prüfgefäßes auf nahezu 0 % reduziert werden kann. Gleichzeitig ist die Umgebungsfeuchte des Prüfgefäßes auf 50 % eingestellt und es ergibt sich ein Diffusionsstrom ins Gefäßinnere hinein. In diesem Bereich ergeben sich Hinweise zum Verhalten von Stoffen, wenn die Feuchteübertragung vorwiegend durch Diffusion geschieht.

Beim Einsatz gesättigter Salzlösungen im Inneren, oder bei Umgebungsfeuchten im Bereich ab 50 % aufwärts, befindet man sich im Feuchtbereich, dem o. g. Wet-Cup. Hier findet neben der Diffusion durch den Probekörper auch Sorption an dessen Oberfläche statt. Deshalb kommt es vermehrt durch das konstant anliegende Partialdruckgefälle zum Wassertransport in flüssiger Form (z.B. Oberflächendiffusion). Im Wet-Cup -Bereich sind in der DIN EN ISO 12572 drei Partialdruckgefälle angegeben, allerdings können zur detaillierteren Bestimmung des Diffusionsverhaltens noch weitere Zwischenstufen mittels den in [N15] angegebenen Salzlösungen hergestellt werden. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen, wodurch nur das Partialdampfdruckgefälle als Antrieb für die Diffusionsvorgänge dient. Auch die in [N7] angegebenen Bereiche sind alle in den Feuchtbereich einzuordnen, obwohl auch hier im Inneren des Prüfgefäßes eine relative Luftfeuchtigkeit von 0 % erzeugt wird.

Bei der zu durchströmenden freien Fläche stimmen alle Normen überein und setzen diese mit mindestens 50 cm² fest. Bei runden Flächen, die in allen Normen zumindest empfohlen,

wenn nicht sogar verbindlich vorgeschrieben ergibt sich die Fläche bei einem Radius von mindestens 4 cm. Auch die Anzahl der Prüflinge ist mit mindestens 3 Proben nach unten hin begrenzt, wobei die Normen nach unterschiedlichen Kriterien die Anzahl auch erhöhen. Alle Prüfungen finden unter isothermen Bedingungen statt. Als Referenztemperatur gilt 23°C, wobei bis auf in der DIN EN 1931 in allen Normen auch andere Prüftemperaturen angegeben sind.

Eine genaue Übersicht über die Randbedingungen, Prüfungsvorbereitungen, Anwendungsgrenzen und Ergebnisdokumentation der einzelnen Normen können der nachfolgenden Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7 Vergleich der Prüfnormen zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit

1	2	3	4	5
	DIN EN ISO 12572	DIN 52615	DIN EN 1931	DIN 53122-Teil1
Geltungsbereich (können auch darüber hinaus verwendet werden)	S _d -Wert 0,1-1500m ³	k.E. ¹	WDD [kg/(m ² s)] von 1,1574*10 ⁻⁸ bis 5,7870*10 ⁻⁹	WDD [g/(m ² d)] von 0,5 bis 200 Stoffe bis 3mm Dicke
Prinzip	Prüfgefäß mit aufgebrachtener Probe in Klimaraum	Prüfgefäß mit aufgebrachtener Probe in Klimaraum	Prüfgefäß mit aufgebrachtener Probe in Klimaraum	Prüfgefäß mit aufgebrachtener Probe in Klimaraum
Verfahren	A= WetCup B= Dry-Cup	A= WetCup B= Dry-Cup	Zwei Verfahren A und B beide Wet-Cup-Methode	Wet-Cup Dry-Cup
Bestimmung der Dicke	Auf 0,1mm oder 0,5%	-	0,05 mm	Nach gültiger Stoffnorm, o.E. ¹
Wägegenauigkeit	Auf 0,001g(1mg) genau	-	0,1 mg	0,1mg
Prüfgefäße	Dampfdicht Glas/Alu	k.A. ²		
Prüfklimate	A= 23°C – 0/50% B= 23°C – 0/85% C= 23°C – 50/93% D= 38°C – 0/93%	A= 23°C – 0/50% B= 23°C – 0/85% C=23°C – 50/93% D= 38°C – 0/90%	B= 23°C – 0/75 %	A= 25°C – 0/90% B= 38°C – 0/90% C= 25°C – 0/75% D= 23°C – 0/50% E= 20°C – 0/85%
Zulässige Abweichungen der Klimate	r.F. = ± 3% °C = ± 0,5 K	r.F. = ± 2 - 5% °C = ± 0,5 K	r.F. = ± 2% °C = ± 1,0 K	r.F. = ± 2% °C = ± 1,0 K
Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der Prüfkörper	0,02 – 0,3 m/s bei hochdurchlässigen Stoffen >2,0 m/s	0,02 – 0,3m/s	0,02 – 0,3m/s	k.A. ² , obwohl Luftumwälzung beschrieben ist
Abdichtungsmittel	90%Wachs + 10% Weichmacher oder 60% Wachs + 40% Paraffin	k.A. ²	Butyl, Polyisobutyl oder Bitumen 35/50% nach DIN EN 12591	80% Paraffin + 20% Polyisobutyl oder 60%Wachs + 40% Paraffin
Prüffläche A	mind. 0,005 m ² ± 3%	50 cm ² = 0,005m ²	0,005m ² Ø 80mm	Ø 80mm
Anzahl der Proben	5 bei A < 0,02 m ²	5 bei homogenen	mind. 3 und 1 Refe-	mind. 3 bis 5

4 - Normen und Methoden zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusion

1	2	3	4	5
	DIN EN ISO 12572	DIN 52615	DIN EN 1931	DIN 53122-Teil1
	3 bei A > 0,02 m ²	Proben nur 3	renzprobe	
Vorkonditionierung	23°C 50% r.F. gravimetrische Überprüfung der Probe bis Abweichung innerhalb 3 Tagen < 5% Ergänzungsbeschreibung in den Anhängen	Ausreichende Lagerung bei zu erwartenden Änderungen	Verfahren A = Beginn der Messung nach Einbau 90 Tage bei 23°C/75% Verfahren B = keine Vorkonditionierung	k.A. ²
Einfüllmenge der Trocknungsmittel/Salzlösung	mind. 15mm hoch	k.A. ²	mind. 12mm hoch	k.A. ²
Abstand zw. Probe und Trocknungsmittel/Salzlösung	15mm ± 5mm	10 mm	3 - 4mm	3 – 4mm
Zu messende Größen	Gewicht, Luftspalt, Luftdruck, Temperatur, r.F., Luftgeschwindigkeit oberhalb der Proben	Gewicht, Luftdruck, Temp. r.F.	Luftdruck auf 1hPa genau Gewicht, Temp., r.F.	Gewicht
Messintervall	² k.A., variable	² k.A., variable	Mehrmals wöchentlich	Alle 24 Stunden
Abbruchkriterium	5 Messungen infolge mit Abweichungen die kleiner als < 5% vom arithmetischen Mittelwert der WDD Bei Dry-Cup wenn Trocknungsmittel 1,5g/25ml schwerer geworden ist Bei Wet-Cup wenn 50% der Lösung verdampft ist	Bis WDD konstant ist – konstant ist nicht definiert	Bei 4 Messungen infolge darf die Abweichung zum Mittelwert nur 5 % betragen Trocknungsmittel darf 1,5g/25cm ³ Gewichtszunahme nicht überschreiten	3 Pkt. Auf einer Geraden in der Masse-Zeit-Kurve bzw. Änderung (mind. 5mg) zw. zwei Messungen auf 5% konstant
Ergebnisdokumentation	WDD Durchlasskoeff. W Durchlasswiderstand Diffusionsleitkoeff. δ Diffusionswiderstandszahl μ S _d -Wert	Diffusionswiderstandszahl μ S _d -Wert	Diffusionswiderstandszahl μ Standardabweichung WDD	WDD
Bemerkungen	Trägt allen Stoffarten und Zustandsformen durch Angaben in den Anhängen Rechnung Sehr detaillierte,	Allgemein gehaltene Beschreibung Luftspalt zw. Probe und Lösung bleibt bei S _d -Wert > 1,0m unberücksichtigt	Genauer Prüfbericht Luftspalt zw. Probe und Lösung bleibt bei S _d -Wert > 1,0m	Genauer Prüfbericht Luftspalt zw. Probe und Lösung bleibt bei WDD- Ermittlung unberücksichtigt

1	2	3	4	5
	DIN EN ISO 12572	DIN 52615	DIN EN 1931	DIN 53122-Teil1
	teilw. umständliche Versuchsbeschreibung Luftspalt zw. Probe und Lösung bleibt bei S_d -Wert > 0,2m unberücksichtigt			
¹ k.E. = keine Einschränkung ² k.A. = keine Angaben ³ höhere Durchlassraten sollen mit dieser Norm aufgrund von Messunsicherheiten nicht geprüft werden				

Wie aus den so gemessenen Werten die feuchtetechnischen Kennwerte ermittelt werden können und wie sie in Beziehung mit den Randparametern stehen, ist in Kapiteln 5.3 und 5 erläutert.

4.2. Internationale Normen

In den meisten europäischen Ländern gibt es für flexible Bahnen im Baubereich Eigenschaftsnormen, die wiederum auf Prüfmethoden verweisen. Die Wasserdampfdurchlässigkeit wird meistens mit dem gravimetrischen Messverfahren, also durch Gewichtszu- oder abnahme der Probenschalen, bestimmt. Hierbei verweist z.B. die ÖNorm B3690 [N23] auf die DIN 53122-1. Der Normvorentwurf in England nach [N20] unterteilt anhand der Durchlässigkeit der zu untersuchenden Bahnen die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit in zwei unterschiedliche Messverfahren. Bei Wasserdampfdurchlassraten von größer 600 [g/m²*24h] sollte die Permeabilität mittels einem gravimetrischen Verfahren bestimmt werden. Bei höheren Dichtigkeiten sollte ein dynamisches Sensorverfahren eingesetzt werden, welches in etwa dem Elektrolyse-Verfahren nach DIN 53122- Teil 2 entspricht. Heutzutage gibt es in England bzw. bei den Britischen Standards ebenso wie in Deutschland mehrere Messverfahren. Neben den auch in Deutschland zulässigen, aber noch nicht in den DIN-Katalog aufgenommenen Normen [N16], [N17], [N18], wird in England neben diesen drei Sensormethoden auch noch das gravimetrische Verfahren auf drei unterschiedlichen Arten [N14], [N19] angewandt. Ein Vergleich dieser gravimetrischen Normen mit der DIN EN ISO 12572 wurde an dieser Stelle nicht durchgeführt.

In den ASTM – Standards, herausgegeben von der American Society for Testing and Materials, wird hinsichtlich der Prüfung auf Wasserdampfdurchlässigkeit in jeder anderen Norm auf die als Referenznorm anzusehende E-96 aus dem Jahre 2000 verwiesen, in ihr wird das gravimetrische Verfahren beschrieben.

In Japan, wo nach Aussage von [D] die Lyssy-Methode noch häufiger zur Qualitätskontrolle eingesetzt wird als in Deutschland, ist bis zum Jahr 2002 auf die JIS A 1324 verwiesen worden. Ob diese zurzeit noch Gültigkeit besitzt konnte nicht abschließend geklärt werden, allerdings wird in [N20] bereits auf die ISO 12571 eingegangen, so das es nahe liegt, dass

auch in Japan bereits mit dem Internationalen Standard [N14] gearbeitet wird. Zusätzlich wird die Wasserdampfdurchlässigkeit in Japan noch nach der JIS K-7129 bestimmt, wobei es sich hier nicht um eine gravimetrische Messmethode, sondern eher um die Versuchsmethode nach Kapitel 4.3.4 handelt.

4.3. Alternative Messtechniken

Durch die ständig ansteigende Produktionsgeschwindigkeit sind die Hersteller gezwungen immer neue Methoden zur Qualitätssicherung zu entwickeln und zu erproben. Als neueste Art der Produktionsüberwachung hinsichtlich der Wasserdampfdurchlässigkeit gilt nach [F] die Messung der Luftdurchlässigkeit. Es wird versucht sie bereits innerhalb der Produktionslinie zu messen und dadurch auf Abweichungen schnell reagieren zu können. Hierzu finden gerade Untersuchungen im Rahmen einer Diplomarbeit an der FH Rosenheim und bei einem Produzenten von diffusionsoffenen Filmen statt. Über eine Korrelation der Luftdurchlässigkeit zur Diffusionsdurchlässigkeit soll der Widerstand gegen Wasserdampf bestimmt werden können. Nach [17] ist dieser Zusammenhang zwischen Luftdurchlässigkeit und Diffusionswiderstand aber nur indirekt möglich.

Zu den bisherigen Prüfmethoden zählen die nachfolgend aufgeführten und beschriebenen Methoden.

4.3.1. Lyssy-Methode

Das Messprinzip dieser Methode besteht darin, die zu untersuchenden Proben in räumlich abgeschlossener Umgebung und damit frei von Strömungseinflüssen, mit einem vorher nach dem gravimetrischen Methoden bestimmten Referenzmaterial zu vergleichen. Der Vergleich erfolgt anhand des Zeitbedarfs für die Änderungen der Luftfeuchtigkeit in der oberhalb der Probe liegenden Kammer. Hierbei wird die Dauer der Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in der oberen Kammer vom Eichstandard mit der des zuprüfenden Materials verglichen. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass, je länger die Messzeit bei den Einzelmessungen ist, desto dichter ist das Material und desto geringer ist dessen Permeabilität.

Die Änderung der Luftfeuchte wird mittels eines sehr empfindlichen Sensors bestimmt. Der Sensor ist mikrochip-gesteuert und besitzt eine vom Hersteller erzeugte Kalibrationskurve (siehe Diagramm 2), die durch unterschiedliche Salzlösungen bestimmt wurde.

Bevor eine Prüfung durchgeführt wird, eicht man das Gerät mit einer Test-Standard-Folie. Hierbei wird durch Auswahl eines geeigneten Materials den im Anschluss zu prüfenden Stoffen und Produkten Rechnung getragen. Das bedeutet, je diffusionsoffener die zu untersuchenden Stoffe sind, desto offener sollte auch der Eichstandard sein. Bei den in Kapitel 5.4 durchgeführten Messungen wurde für die diffusionsoffeneren Stoffe ein Goretex-Material als Teststandard eingesetzt, welches als diffusionsoffenes und „atmungsaktives“ Material aus der Bekleidungsindustrie bekannt ist. Bei den Diffusionsdichteren Stoffen erfolgte die Eichung mittels einer PET- Folie.

Der grundsätzliche Standardaufbau des Gerätes mit den Einzelbauteilen ist in Abbildung 15 dargestellt. Bilder von der Prüfmaschine während einer Kalibrierung sind im Anhang B beige-fügt. Die Handhabung der Maschine lässt sich wie folgt beschreiben. Zu Beginn der Prüfung wird in der unteren Kammer destilliertes Wasser eingefüllt. Durch eine Öffnung in der Kammerwand direkt unterhalb der Probenauflagefläche kann sich auch bei verschlossener Kammer (beim späteren Probenwechsel) kein Überdruck von unten auf der Prüffläche aufbauen. Da dies dem Standardaufbau des Prüfgerätes entspricht, zeigt sich, dass das Gerät nur im Feuchtbereich messen kann. Somit wird immer gegen eine Luftfeuchtigkeit von ca.95%-98% (Festgestellt bei der Kalibrierung der Maschine in Zusammenarbeit mit [D]) gemessen.

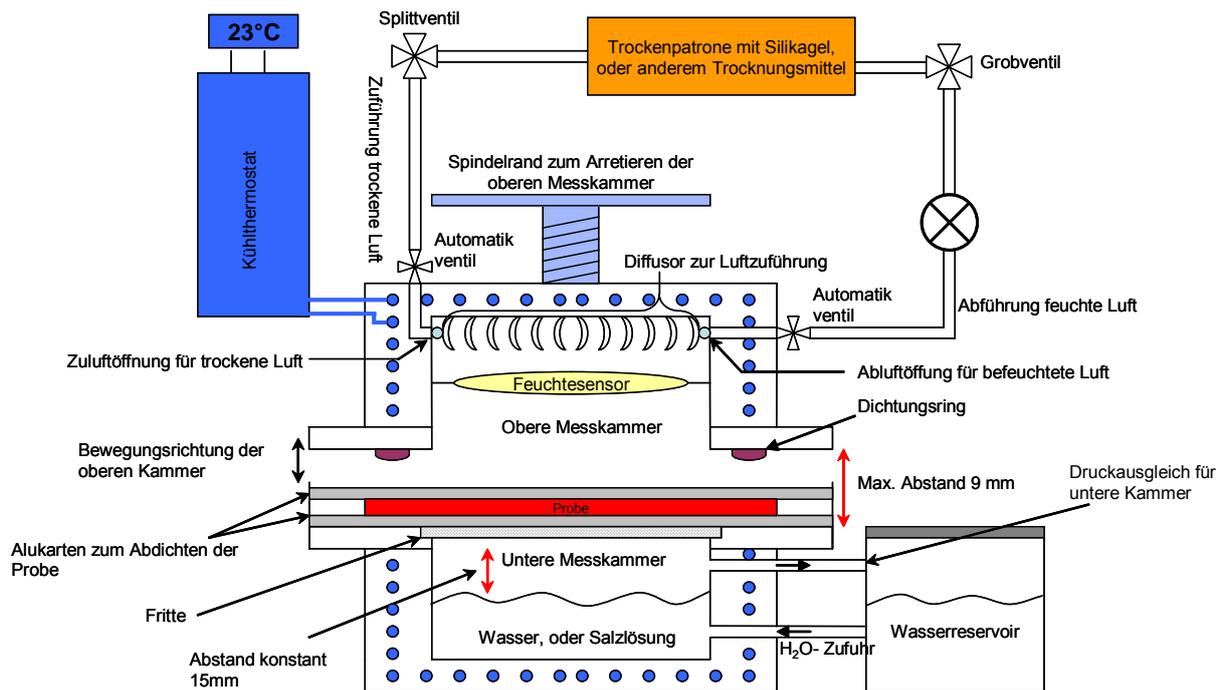


Abbildung 15 Querschnitt durch den Aufbau des Messgerätes der Firma Lyssy

Vom Hersteller gibt es noch Erweiterungsmöglichkeiten für das Gerät, sodass auch im Trockenbereich gemessen werden könnte. Hierzu ersetzt man das Wasserreservoir durch einen Sättiger der die Luft mit Feuchtigkeit anreichert (siehe Abbildung 16). Die nun Wassergesättigte Luft wird durch ein Splittventil, mit dem man den Fluss begrenzen kann, geleitet. Neben der Leitung mit der feuchten Luft gibt es noch einen Strang mit trockener Luft. Diese entsteht aus der feuchten Luft, die aus der oberen Messkammer während des Heruntertrocknens entnommen wird. Sie wird zur Trocknung durch eine Kammer oder Patrone mit Silikagel hindurchgeführt. Diese beiden Luftströme werden anschließend in einer Leitung zusammengefasst. Bevor diese gemeinsame Leitung in die untere Kammer eingeführt wird, strömt die Luft noch an einem Feuchtesensor vorbei, der die vorhandene Luftfeuchte misst. So kann mit Hilfe des Splittventils in der Feuchtezufuhr die gewünschte relative Feuchtigkeit in der unteren Kammer realisiert werden. Diese Art der Messung des Diffusionswiderstandes hat aber den Nachteil, dass sie nicht strömungsfrei abläuft. Hierdurch kann es aufgrund der in 3.7 beschriebenen Änderung des Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstandes zu Abweichun-

onsfläche ist bei diffusionsoffenen Stoffen nötig, weil die Trocknungskapazität der Maschine gegenüber dem Diffusionsstrom durch das Material aus der unteren Kammer zu gering ist um die Messkammer herunter zu trocknen Ausschließlich durch die in diesen Öffnungen liegenden Materialflächen des zu prüfenden Stoffes findet die Diffusion statt. Durch die gesamte Restfläche, welche ebenfalls dem Partialdruckgefälle ausgesetzt ist, kann eine Durchströmung nicht erfolgen, da Aluminium als diffusionsdicht gilt (siehe auch [N1], [N10]). Bei dichteren Stoffen bedarf es einer größeren Fläche, da die Einzelmessungen sonst zu lange dauern würden. Hier werden die Muster innerhalb einer Pappkarte so fixiert, dass sie durch deren Abmaße beim einlegen in die Prüfhaltung der Maschine genau zwischen den Kammern zum Liegen kommen und der Durchmesser des Dichtrings die Durchströmungsfläche abgrenzt. Der Dichtring hat einen Durchmesser von 8cm und besitzt somit die nach der DIN EN ISO 12572 mindestens geforderten 50 cm² Diffusionsfläche, wobei die Fläche bei dieser Messmethode, wie nachfolgend noch erläutert wird, nicht in die Messergebnisse mit hinein spielt.



Abbildung 17 Messkarten zur Probenaufnahme

Nach Einlegen einer Eichfolie oder einer Probe in die Halterung der Maschine wird die obere Messkammer durch eine Spindelvorrichtung mittels eines Kurbelrades langsam nach unten gedreht. Sobald der Dichtungsring von der Messkammer auf der unteren Kammer bzw. auf der Probenhalterung oberhalb der unteren Kammer aufliegt, kann durch zwei bis drei kurze Drehungen der Spindelvorrichtung die Messkammer ventilations- und dampfdicht verschlossen werden. Im Anschluss daran ist die Programmierung des μ -Prozessors durchzuführen.

Je nachdem, in welchem Feuchtebereich gemessen werden soll, muss auf der Kalibrierungskurve der betreffende Bereich des Sensors ausgewählt werden.

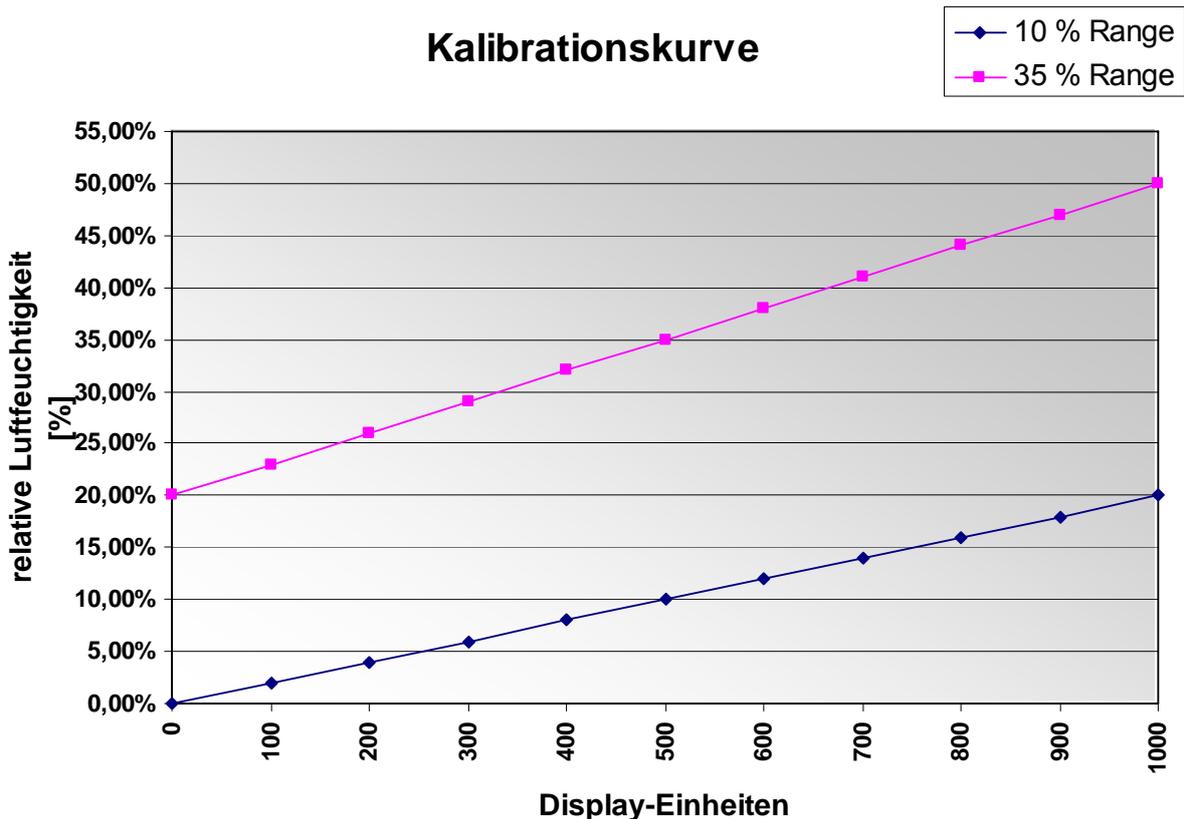


Diagramm 2 Kalibrationskurve des Sensors im Lyssy-Gerät

Wie das Diagramm 2 zeigt hat dieser zwei Teilbereiche, die jeweils auf eine interne Einheitskala von 0 bis 1000 bezogen sind. Die Feuchtigkeitsteil- oder auch Rangebereiche sind mit ihrer Bezeichnung an den Schnittpunkt zwischen der Geraden mit dem Mittelpunkt dieser internen Einheitskala gebunden. Die erste Range verläuft im relativen Feuchtebereich zwischen 0 und 20 %. Hier entspricht der Schnittpunkt der Geraden mit dem Wert 500 auf der Einheitskala genau 10 % relativer Feuchte in der oberen Kammer. Bei der zweiten Range liegt der Schnittpunkt bei einer relativen Feuchte von 35 %. Die untere Gerade (10 % Range) besitzt eine prozentuale Steigung von 2 %. Jede Skaleneinheit spiegelt eine Feuchteänderung in der oberen Kammer von 0,02 % wieder. Bei der oberen Gerade sind es 0,03 %. Dies ist für Feuchtemessungen eine sehr hohe Auflösung.

Zur Eichung wird ein Material, dessen Wasserdampfdurchlässigkeit durch einer der oben genannten gravimetrischen Normprüfungen bestimmt wurde, in die Maschine eingelegt. Nach Festlegung der folgenden Parameter,

1. Obere Messgrenze
2. Untere Messgrenze
3. Untertrocknungszyklen (No. of Underdrys)
4. Untertrocknungsbereich (Underdry)
5. Leckagerate
6. Toleranz für Ergebnisbereich

7. Anzahl der Wiederholungen
8. Feuchtekompensation
9. Temperatur

ist die bekannte Diffusionsstromdichte in Gramm pro m² und Tag in die Software einzugeben. Während der Eichung errechnet der μ -Prozessor aus den gemessenen Zeitintervallen einen Faktor, der den anschließenden Messungen zugrunde gelegt wird. Die Berechnung erfolgt vereinfacht nach:

$$K = PTS \times CTS \quad (8.)$$

$$PSA = \frac{K}{CSA} \left(\frac{g}{m^2 \times d} \right) \quad (9.)$$

CTS = Pulszahl (gemessene Zeiteinheiten) des Eichstandards

CSA = Pulszahl (gemessene Zeiteinheiten) der Materialprobe

PTS = Permeabilität des Eichstandards

PSA = Permeabilität der Materialprobe

K= Umrechnungsfaktor der bei der Eichung vom μ -Prozessor berechnet wird

Die Genauigkeit dieses Faktors hängt von den manuellen Einstellungen der Luftzuführung während der Trocknung, den Wiederholungszyklen bei der Untertrocknung und den eingestellten Toleranzgrenzen ab. Eine Verbesserung der statistischen Aussage kann durch Erhöhung des Parameters der Nummer 7 erzeugt werden, da hiermit die Stichprobenanzahl erhöht wird. Durch Parameter 6 wird die Abweichungstoleranz zwischen den Einzelmessungen vorgegeben, womit auch zur Ergebnisverbesserung beigetragen wird. Zusätzlich enthält die Software noch eine Trendanalyse, die für die einzelnen Messwerte eine Ausgleichsgrade errechnet. Somit kann es passieren, dass, obwohl die Abweichungstoleranz (Pkt.7) innerhalb der vorgegebenen Wiederholungen (Pkt.6) eingehalten worden ist, die Eichung noch weiter durchgeführt wird. Hierbei beobachtet die Trendanalyse, ob die Abweichungen nur in eine Richtung (nach oben oder unten) stattgefunden haben. Bevor die Eichung beendet wird, müssen die Schwankungen um den gemessenen Mittelwert erfolgen und innerhalb der Toleranz bei der vorgegebenen Wiederholungsfrequenz bleiben.

Mit den Messgrenzen (Parameter 1+2) wird der Bereich der Luftfeuchtigkeit, bei der gemessen werden soll, begrenzt. Die Zeit, die benötigt wird, um die Luftfeuchtigkeit mittels dem durch das Prüfmaterial hindurch dringenden Wasserdampf in der Messkammer von der unteren bis zur oberen Grenze ansteigen zulassen wird gemessen und protokolliert. Die Zeitmessung kann dabei wahlweise in ganzen oder zehntel Sekunden erfolgen. Durch die Umrechnung mit dem bei der Eichung bestimmten K-Faktor wird die Diffusionsstromdichte in g/m²*d für die Einzelmessung berechnet und ebenfalls protokolliert. Den genauen Ablauf eines Messzyklus zeigt das nachfolgende Diagramm 3. Neben den Messgrenzen des zu observierenden Bereiches gibt es noch eine weitere Schranke, welche die Messung und auch das Ergebnis beeinflusst. Bei der Abgrenzung handelt es sich um den einstellbaren Parameter 4, der mit der unteren Grenze zusammen den Untertrocknungsbereich bildet.

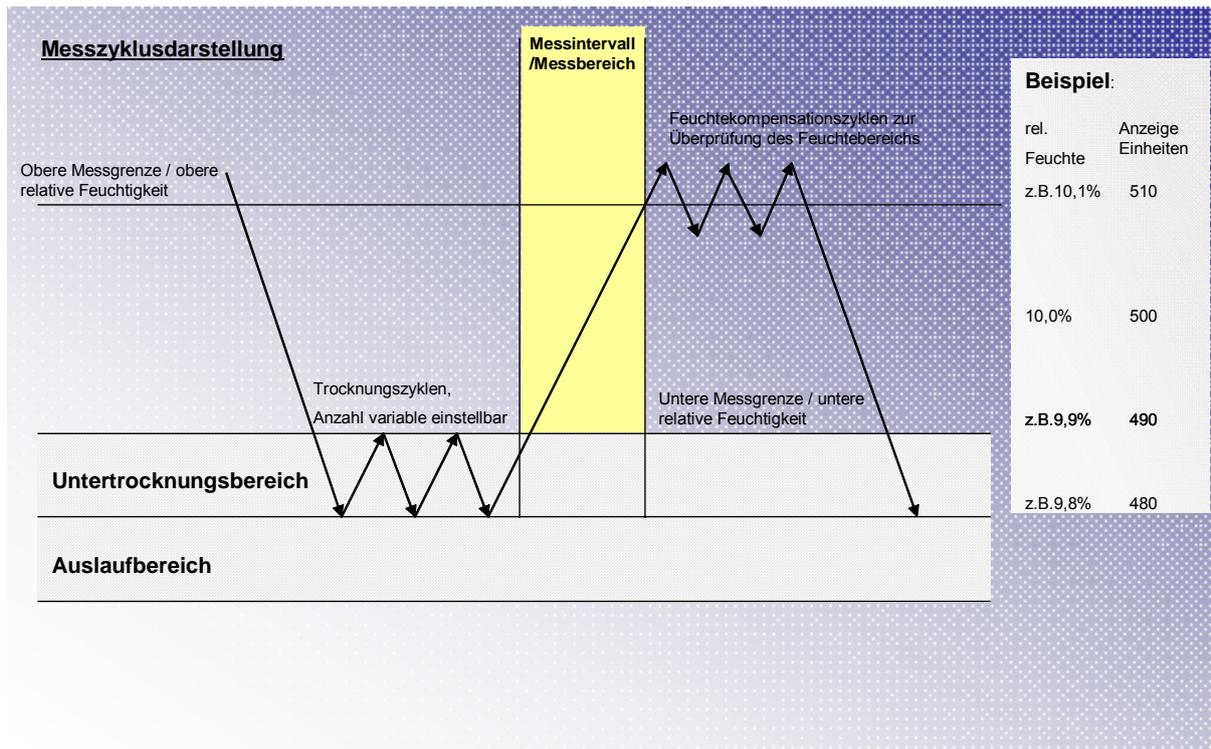


Diagramm 3 Messzyklusdarstellung

Nach Angaben von [D] ist es aus Erfahrung sinnvoll die Größe des Untertrocknungsbereiches bei diffusionsoffenen Materialien mit 25 Anzeigeeinheiten und bei Dichteren mit 10 Einheiten zu beschränken, da der Sensor ansonsten einen zu großen Bereich durchlaufen muss und sich dadurch nur unnötige Abweichungen ergeben könnten. Des Weiteren sollte auch die Anzahl der Zyklen im Untertrocknungsbereich nicht zu groß gewählt werden, da sich sonst die Messung zu sehr in den unteren Feuchtebereich verlagern würde. Dies führt dazu, dass der Sensor zu trocken wird und dies zu einer Ungenauigkeit innerhalb der Messung führen würde. Zur Verdeutlichung ist in Diagramm 3 ein Beispiel der Relation zwischen der relative Feuchte, Anzeigeeinheiten und den Grenzeinstellungen aufgeführt.

Bei der Einstellung des Gerätes obliegt es dem Anwender, ob die Feuchtekompressionszyklen zu durchlaufen sind oder nicht. Sie dienen dazu, die obere Grenze nach jeder Messung nochmals genau einzustellen und verhindern somit bei längeren Messungen ein „abdriften“ des Sensors. Ihre Anwendung ist eigentlich nur sinnvoll bei sehr dichten Stoffen, bei denen die Messung (also die Zeitspanne des Durchlaufens von der unteren zur oberen Grenze) sehr lange dauert. Nachdem bei dichten Stoffen die Kompensation nach der Einzelmessung stattgefunden hat, wird, wenn eine Abweichung festgestellt wurde, die Abweichung bei der nächsten Messung ausgeglichen bzw. angepasst.

Um Undichtigkeiten der Prüfkammer vorzubeugen, ist der Dichtungsring mittels einer 40 µm dicken, aber noch flexiblen Aluminiumfolie zu überprüfen. Hierzu wird die Kammer herunter getrocknet und mit der eingelegten Alu-Folie eine Messung durchgeführt. Falls hierbei eine Durchströmung festgestellt wird, sollte diese als Leckagerate (siehe o.g. Pkt. 5) bei der

nächsten Messung berücksichtigt und die Dichtung so schnell wie möglich ausgetauscht werden.

Die Temperatureinstellung innerhalb der Messkammer erfolgt durch die Messkammertemperatur. Diese kann durch im Außenbereich angebrachte Heizelemente und Lüfter gleichmäßig hoch geheizt oder durch ein zusätzliches Thermostat ebenfalls erhitzt oder gekühlt werden. Das Thermostat ist durch Kühlmittelschläuche mit der Messkammer verbunden. Durch sie läuft die Kühlflüssigkeit in die Hohlräume der Messkammer, durchströmt sie und gibt ihre Wärme an die Kammerwände durch Wärmeleitung ab (siehe Abbildung 15). Die Temperaturüberwachung findet in der Kammer selber durch den Sensor statt und besitzt eine Genauigkeit von $0,5^{\circ}\text{C}$. Mit der kontinuierlich überwachten Temperatur erfolgt auch eine Kompensation der relativen Luftfeuchte.

Während der Messung kann der Anwender die Einhaltung der zuvor eingegebenen Grenzen nur mit der Trockenluftzufuhr beeinflussen. Hierzu gibt es zwei unterschiedliche Ventile. Das Grobventil sitzt vor der Trockenpatrone und reguliert die Zufuhr der Luft ins System. Das Fein- oder auch Splittventil liegt vor dem Einlass in die obere Messkammer und reguliert den Strom der Trockenluft in die obere Kammer. Sie beeinflusst im Wesentlichen die Abnahme der relativen Luftfeuchte und steuert somit auch die Anzeigeeinheiten im Steuerungsdisplay der Maschine. Wenn eine zu weite Öffnung des Ventils erfolgt, wird der Untertrocknungsbereich zu schnell durchquert und die relative Feuchte unterschreitet auch noch den Auslaufbereich (siehe Diagramm 3). Dieser dient dazu den Anwender davor zu schützen die Luftzufuhr „etwas lieblos“ einzustellen. Die Größe des Bereiches wird ebenfalls mit der Software festgelegt, und ist meistens so groß wie der Untertrocknungsbereich, kann aber je nach geforderter Genauigkeit verringert werden.

Wenn der Auslaufbereich unterschritten wird, meldet das Gerät einen Fehler, somit weiß der Bediener, wann er die Ventile weiter zu schließen hat. Dies ist auch ein Sicherheitsmerkmal, das bei der Qualitätskontrolle von großem Nutzen ist. Denn gerade im Einsatzgebiet als Qualitätssicherungsmaßnahme schafft diese Meßmethode Sicherheit, ebenso auch bei wechselndem Bedienungspersonal, wie es bei Produktion solcher Flächengebilde häufig der Fall ist. Es sind alle Bediener gezwungen nahezu dieselbe Luftzufuhr zur Messkammer einzuregulieren, da sonst eine Fehlermeldung im Messprotokoll auftaucht.

4.3.2. Gravitest

Beim Aufbau des nach dem gravimetrischen Verfahren arbeitenden Systems wurde sich an die in der Chemie und Pharmazie schon länger im Betrieb befindlichen Messsysteme angelehnt. Mit den dort messenden Systemen wird vorwiegend das Sorptionsverhalten von Stoffen wie Granulaten, Pillen, Pulvern u.a. bestimmt. Die Messung mit dem Gravitest erfolgt nicht nur in Anlehnung an die DIN EN ISO 12572 sondern, genau nach den dort beschriebenen Rahmenbedingungen. Hierbei werden die Proben in Schalen eingebaut und mit Hilfe einer mechanischen Dichtung, wie in [N14] Anhang C dargestellt, verschlossen. Die in das Prüfgerät eingelegten Proben können ohne Störung des Umgebungsklimas gemessen werden, da die Waage in der Messapparatur integriert ist. Mittels eines Drehtellers werden die

Einzelproben langsam umgeschichtet und zyklisch durch absenken des Drehtellers auf der Wägeinrichtung abgesetzt, wo dann das Gewicht bestimmt wird. Sollte es durch die einstellbaren Luftgeschwindigkeiten oberhalb der Proben zu Strömungsunterschieden innerhalb der Umgebungskammer kommen, werden diese aufgrund der Rotation der Proben in der Messkammer ausgeglichen und so kann es zu keinen Differenzen zwischen den Proben kommen. Auch mit diesem System lassen sich Materialien mit beiden gravimetrischen Arten, dem Wet-Cup- und dem Dry-Cup-Verfahren prüfen. Vorteil ist, dass die Proben nach einem normierten Verfahren getestet werden, und dass es zu keinen Abweichungen durch Ablese- oder Übertragungsfehler der Messwerte kommen kann. Des Weiteren ist es vorteilhaft die Messkammer auf die Größe eines Exsikkators zu beschränken, da hierbei konstantere Strömungsverhältnisse oberhalb der Proben herrschen. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Maschine und die Einbausituation der Prüfgefäße dargestellt.



**Abbildung 18 (links) konditionierte Prüfkammer, in der die gravimetrischen Messungen stattfinden
Abbildung 19 (rechts) Einbausituation der Einzelprobenschalen innerhalb eines Drehtellers**

4.3.3. Diodenlaserspektrometer

Bei diesem Verfahren, das seinen Ursprung in der allgemeinen Gasanalytik hat, wird die Wasserdampfkonzentration ober- und/oder unterhalb der Folie gemessen. Das Verfahren ist vom Grundgedanken bereits fertig entwickelt und stellt auch ein System für die industriell begleitende Produktionskontrolle dar. Hinsichtlich der Prüfungsanordnung und der Probenpräparation sind noch weitere Entwicklungen notwendig und gibt es auch noch zu wenig Erfahrung mit den Schwankungsbreiten der Messtechnik. Die Messung erfolgt mittels eines Diodenlaser-Absorptionsspektroskops, dessen Aufbau in Abbildung 20 dargestellt ist.

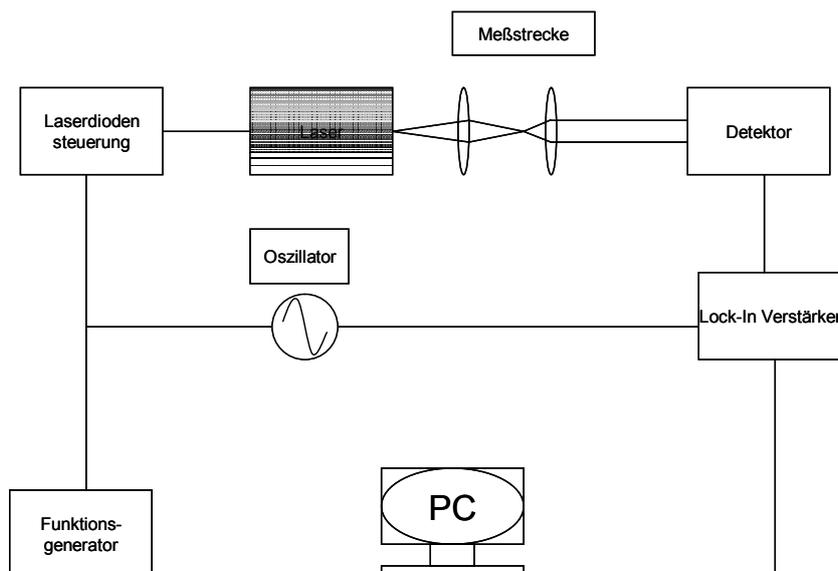


Abbildung 20 Aufbau des Diodenlaser- Absorptionsspektrometers zur räumlichen Wasserdampfdetektion

Der Vorteil dieser Methode ist, dass das System schnell die an der Folie anliegenden Wasserdampfgefälle bestimmen kann. Es handelt sich nach [34] um ein kalibrierfreies System. Das Messprinzip beruht auf der Absorption des Lichts durch Wasserdampf. Da beim Einsatz des Lasers mit einer Diode gearbeitet wird, dessen Wellenbereich sich gut mit der Absorptionslinie von Wasserdampf im Infrarotbereich deckt, kann die Absorption als proportional zum Messsignal ausgewertet werden. Durch die messbare Intensität des Lichts (Laserstrahl) nach dem Durchstrahlen des Wasserdampf-Luftgemisches kann die Konzentration des Wasserdampfs bestimmt werden. Da die Messeinrichtung senkrecht zur Folienoberfläche beweglich ist, kann ein vollständiges Abbild des Wasserdampfkonzentrationsverlaufs ober- und unterhalb der Folie abgebildet werden.

Mittels des mit diesem Verfahren festgestellten Wasserdampfkonzentrationsgefälles an der Ober- und Unterseite der Folie, lässt sich über die eindimensionale Konzentrationsgleichung, unter Ansatz des Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in dem zu bestimmenden Folienmaterial das dort vorhandene Konzentrationsgefälle. Mit dem in Gleichung (1.) aufgeführten Fick'schen Gesetz lässt sich mit dem so bestimmten Gefälle und der Foliendicke die Diffusionsstromdichte durch das Material hindurch bestimmen.

In den mit diesem Messsystem durchgeführten Versuchen in [35] wurden unterschiedliche Prüfanordnungen gewählt siehe Abbildung 21. Zum einen handelte es sich um einen Prüfaufbau wie in der DIN EN ISO 12572 mit kleineren Abmaßen, zum anderen wurde ein ähnlicher Aufbau wie bei dem Verfahren von Lyssy gewählt, wobei hier nicht mittels Sensor und Trockenmittel die Luftfeuchtigkeit oberhalb des Prüflings gesteuert wurde, sondern nur ein Trockenmittel in einem Molekularsieb oberhalb der Probe installiert wurde. Somit unterscheiden sich die Prüfanordnungen, wie es auch vom Prüfer gewollt war, in ein flussfreies und ein strömungsabhängiges System. Im Hinblick auf die auszuwählende Probenanordnung, sollen dem Autor von [35] nach noch weitere Versuche durchgeführt werden.

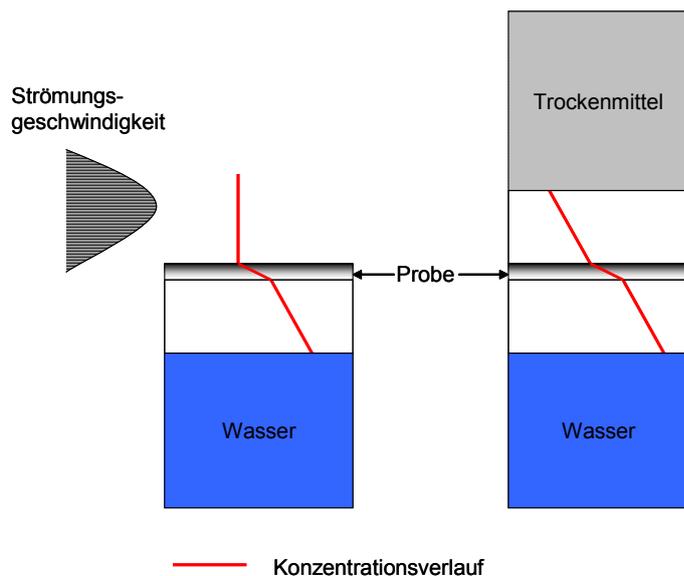


Abbildung 21 Experimentelle Anordnungen nach [35]

4.3.4. Genormtes Elektrolyse- und Infrarotverfahren

Das Elektrolyseverfahren ist bereits in der DIN 53122- Teil 2 [N8] beschrieben und normiert, und dient bei vielen gerätetechnisch vermarkteten Messmethoden als Prinzipvorlage. Hierin wird auf das elektrolytische Hygrometer nach Keidel verwiesen. Es ist vorgesehen für die Überprüfung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Folien im Bereich von $0,01 - 5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, wobei auch höhere Durchlässigkeiten messbar sind.

Die im Testgerät anzuwendenden Prüfklimare stimmen mit den in Tabelle 6 Spalte 5 überein. Während es sich hier um einen ähnlichen Aufbau des Prüfgerätes wie bei der Methode nach Lyssy handelt, arbeitet das Gerät nach einem anderen Messprinzip. Hier wird nicht der Anstieg der relativen Feuchte in Abhängigkeit der Zeit gemessen, sondern die Diffusionsmenge wird durch abführen der feuchten Luft in eine Elektrolysezelle bestimmt. Im Einzelnen ist der Aufbau in der [N8] beschrieben und die Messapparatur nachfolgend in Abbildung 22 dargestellt. Die Messgröße ist hier nicht die Feuchtigkeitsänderung oder Masse des Wasserdampfes, die von einem trockenen, wasserfreien Trägergas aus der unteren Messkammer mitgeführt wird, sondern der von der Feuchtigkeit abhängige Elektrolysestrom, der in der Elektrolysezelle entsteht. Je mehr Feuchtigkeit anfällt, desto mehr Strom fließt durch die Zelle.

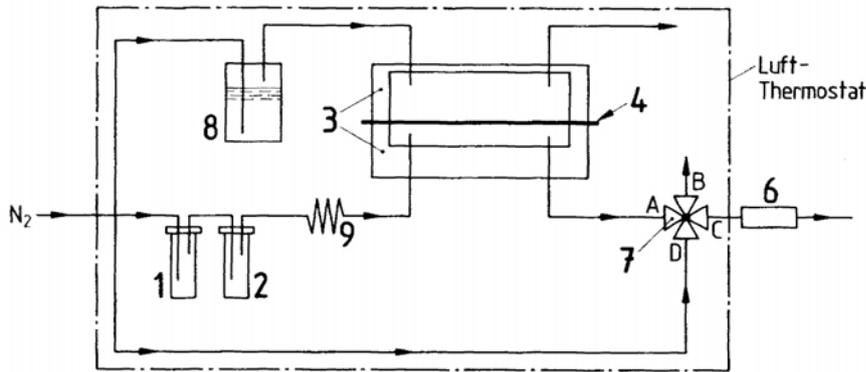


Abbildung 22 Schematische Darstellung aus [N8]

Die Berechnung des WDD aus dem Elektrolysestrom erfolgt nach dem Faradayschen Gesetz. Hiernach ist die Menge der erzeugten Elektrizität durch die Faradaysche Konstante zu ermitteln.

$$Q = I \times t = \frac{m_{H_2O} \times F}{M(0,5 \times H_2O)} \quad (10.)$$

- Q = Elektrizitätsmenge
- I = gemessene Stromstärke [Ampere]
- t = Zeit[s]
- m_{H_2O} = Masse des elektrolytisch zersetzten Wassers [g]
- F = Faradaysche Konstante = $9,65 \times 10^4$ (A*s/mol)
- M = molare Masse eines Äquivalents H_2O (9,01g/mol)

mit

$$m_{H_2O} = WDD \times A \times \frac{t}{86400} \quad (11.)$$

- WDD = Wasserdampfdiffusionsstromdichte [g/m²d]
- A = Querschnittsprüffläche der Probe [m²]
- t = Zeit [s]

Durch zusammenführen der Gleichungen (10.) und (11.) lässt sich die Wasserdampfdurchlässigkeit nach folgender Gleichung berechnen:

$$WDD = \frac{I}{A} \times 8,07 \quad (12.)$$

Die normierte Messfläche beträgt bei diesem Verfahren 100 cm², dies entspricht dem doppelten der in [N14] geforderten Fläche. Mit ihr können Durchlässigkeiten von 0,01 – 5 g/(m²*d) bestimmt werden. Da diese Messmethode durch die Kapazität der Messzelle beschränkt ist, sind Folien mit höheren Durchlässigkeiten nur durch Verringerung der Prüffläche zu bestimmen. Wenn aber als Obergrenze der Kapazität 5 g WDD bei 100 cm² Prüffläche angenommen wird, sind erst ab einer Flächenverringerng um das 40-fache die ersten, in Abschnitt 2 beschriebenen, Bahn- und Folientypen nach dieser Prüfmethode prüfbar. Für den in 4.3.1 erwähnten Eichstandard für offene Folien müsste die Prüffläche auf ein 150stel der angegebenen Normprüffläche verringert werden. Somit kann dieses Verfahren zur Prüfung der in dieser Arbeit behandelten diffusionsoffenen Unterspan- und Unterdeckbahnen

als nicht passend angesehen werden. Bei den in 2.3 behandelten Dampfsperren kann dieses Verfahren hingegen zur Anwendung kommen.

4.3.5. Mocon Testmethode

Für das Messsystem nach Kapitel 4.3.4 werden am Markt verschiedene Messapparaturen angeboten. Zu den am weitest verbreiteten zählt das Mocon-Prüfsystem. Mit diesem Gerät können aber neben den hier behandelten Filmen auch kleine Verpackungen auf ihre Wasserdampfdurchlässigkeit geprüft werden. Im Aufbau ist es ähnlich konstruiert wie das in Abbildung 21 dargestellte System, wobei in die untere Kammer destilliertes Wasser eingefüllt, oder mit Salzlösung gesättigte Pads eingelegt werden. Empfohlen wird von dem Hersteller die Messung mit destilliertem Wasser da, sonst die metallischen Bauteile sowie die Messkammer mit der Zeit korrodieren könnten.

Die ersten Testgeräte bestanden aus zwei Messzellen mit einer Prüffläche von 50 cm² und sind in den neuen Gerätegenerationen auf 6 Testzellen erweitert worden. Hier beträgt die Prüffläche dafür aber nur noch 10 cm² je Testzelle.

Die Arbeitsweise des Gerätes kann wie folgt beschrieben werden. Durch das Einlegen des Probenstücks wird die Messzelle in zwei Teile aufgeteilt. Während in der unteren Hälfte durch das destillierte Wasser, oder die Pads eine relative Luftfeuchtigkeit erzeugt wird, wird die obere Kammer mit trockener Luft durchspült. Die Luft aus der oberen Kammer wird nach einer bestimmten Zeit nicht wieder dem Trocknungskreislauf zugeführt, sondern über ein Ventil durch die Infrarotdetektorzelle umgeleitet. Hier kann dann durch Infrarotmessung die Feuchtigkeit der durchgeführten Luft bestimmt werden. Die Auflösung des Systems erreicht 0,05 bis 500 (g/m²d) Gramm pro Quadratmeter und Tag. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse liegt bei ±3 % mit einer Genauigkeit von ± 2 % bei Messungen über 1 g/m²d. Bei darunter liegenden Durchlässigkeiten wird die Abweichung größer und kann bei Werten kleiner als 0,1 g/m²d bis zu 30 % betragen. Die Messtemperaturen können zwischen 20 und 65°C betragen.

Auch dieses System muss vor der Permeabilitätsprüfung der Proben geeicht werden. Hierzu dient, wie bereits bei der Lyssy Methode eine Referenzfolie als Eichmaßstab. Von der Herstellerfirma werden verschieden durchlässige Folien zur Eichung mitgeliefert, um den gesamten Permeationsbereich von 0,05 – 500 (g/m²d) abbilden zu können. Die Durchlässigkeiten dieser Eichfolien sind ebenfalls, wie die bei Lyssy, mit der gravimetrischen Methode bestimmt worden.

Als Problem bei dieser Messmethode kann der Feuchtebereich angesehen werden. Laut dem Hersteller soll möglichst mit reinem destilliertem Wasser in der unteren Kammer als Prüfflüssigkeit gearbeitet werden. Hierbei stellt sich eine Feuchtigkeit von nahezu 100% ein (Herstellerangaben, wobei vom Verfasser nicht geklärt werden konnte ob zwischen den Proben und der Wasseroberfläche noch ein Luftraum besteht, indem sich ein Wasserdampfgefälle ausbildet). Da aber der Luftstrom in der oberen Kammer immer 0 % Feuchte (trockene Luft) besitzt, muss bei dem dann vorliegenden Partialdampfdruckgefälle von 100 % auf die gewünschte Druckdifferenz umgerechnet werden. Dies ist laut Herstellerangaben durch ein-

fache Multiplikation mit dem gewünschten Faktor für die zu bestimmende Luftfeuchte umzurechnen. Das heißt wenn die Durchlässigkeit bei 75 % Partialdampfdruckgefälle bestimmt werden soll, muss der gemessene Wert einfach mit 0,75 multipliziert werden um das endgültige Resultat zu bekommen. Diese Handhabung kann für produktionsbegleitende Prozesse vielleicht als ausreichend betrachtet werden, doch zur grundlegenden Bestimmung des Diffusionsverhaltens von Baufolien aller Art erscheint diese Methode zu ungenau, vor allem vor dem Hintergrund, dass bei den diffusionsoffenen Folien und Unterspannbahnen ein Messfehler sich dementsprechend stark auswirken würde.

Aus diesem Grund ist es sinnvoll bei diesem System auch mit den verschiedenen Pads zu arbeiten, auch wenn bei häufiger Benutzung die Gefahr einer Korrosion des Prüfgerätes besteht. Die Pads waren früher durch einlegen in einer aufgewärmten, gesättigten Salzlösung durch den Prüfer herzustellen. Diese wurden dann als Auskleidung für die untere Feuchtekammer benutzt und mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Somit sollte sich je nach dem benutzten Salz eine bestimmte Feuchtigkeit unterhalb der Proben einstellen. Heutzutage können diese Pads vom Hersteller bezogen werden.

4.3.6. Erweitertes gravimetrisches Messverfahren – Mehrlagenverfahren

Um die im Dachbereich eingesetzten Unterspann- und Unterdeckbahnen in ihrem Diffusionsverhalten richtig einzuschätzen, wurde bereits in [25] auf eine zu ungenaue Bestimmung der Dampfdurchlässigkeit mittels der damaligen Prüfungsmodalitäten hingewiesen.

Aus diesem Grunde wurde neben den normierten Prüfverfahren und den industriell genutzten, meist Maschinen- oder Sensor- gestützten Verfahren im Jahr 1996 von Prof. Dr. Liersch an der Technischen Universität in Cottbus eine weitere Methode zur Bestimmung der Diffusionsfähigkeit, bzw. zur Feststellung des s_d -Wertes von besonders diffusionsoffenen Folien entwickelt. Die von der Wirtschaft geförderte Entwicklung hatte das Ziel auch Folien mit einem kleineren s_d -Wert als 0,2 m in ihrem Diffusionsverhalten genau zu bestimmen. Das neue Verfahren ist unter dem Namen Mehrlagenverfahren bekannt geworden. Bereits in [27] wurde ein ähnlicher Versuchsaufbau für homogene Materialien beschrieben, wobei hier nicht mehrere Lagen des gleichen Baustoffs übereinander angeordnet wurden, sondern das Material in unterschiedlichen Dicken hergestellt und geprüft wurde.

Da in den normierten Verfahren die Stoffübergangswiderstände und die Prüfungsrandbedingungen keine Berücksichtigung fanden, dies war bei den bis dahin am Markt befindlichen Folien auch nicht zwingend erforderlich, sollten mit dem neuen Verfahren genau diese Widerstände erfasst und rechnerisch von den eigentlichen Diffusionswiderständen getrennt werden. Denn bei den neuartigen Folien und Bahnen konnten diese Widerstände nicht mehr unberücksichtigt bleiben, da sie zum Teil in derselben Größenordnung lagen wie die Diffusionsdurchlasswiderstände der Folien selber.

Bei der Entwicklung dieses neuartigen Verfahrens sollte durch den theoretischen Ansatz

$$WDD = k_d \times \Delta p \quad (13.)$$

k_d = Diffusionsdurchgangskoeffizient
 Δp = Partialdruckdifferenz

mit

$$k_d = \frac{1}{\beta_p} + \frac{1}{\Delta i} + \frac{1}{\beta_s} \quad (14.)$$

$\frac{1}{\beta}$ = Übergangswiderstände im Proben und Sorptionsbereich

und

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{s}{\delta} = \frac{R_d \times T}{D} \times s \times \mu = N \times s \times \mu = N \times s_d \quad (15.)$$

δ = Diffusionsleitfähigkeit des untersuchten Stoffes

$1/\Delta$ = Diffusionsdurchlasswiderstand

R_d = Gaskonstante des Wasserdampfs

s = Schichtdicke des untersuchten Stoffes

D = Diffusionsleitwert der Luft

μ = Diffusionswiderstandszahl

N = Bewegungsbeiwert

sowie

$$WDD = \frac{dm}{dt \times A} \quad (16.)$$

A = Prüffläche

folgendes Ergebnis erzielt werden:

$$s_{d(\text{Probe})} = s_{d(\text{Gesamt})} - s_{d\beta_p} - s_{d\beta_s} \quad (17.)$$

Bei den normierten Prüfungen nach [N6] [N7] [N14] treten drei Übergangswiderstände im Sinne des Kapitels 3.7 auf

- Übergangswiderstand zwischen Sorptionsmittel und Luftschicht unterhalb der Probe
- Übergangswiderstand der Luftschicht unterhalb der Probe und der Probenoberfläche an der Unterseite
- Übergangswiderstand zwischen der Probenoberfläche und der Luftschicht oberhalb

Nach den Untersuchungen von Liersch können die Übergangswiderstände bei einem s_d -Wert von $>0,2$ m unberücksichtigt bleiben. Wenn die Proben allerdings diffusionsoffener werden, darf der Übergangswiderstand zwischen Sorptionsmittel und Luftschicht, und die Luftschicht selber nicht mehr unberücksichtigt bleiben. Die Dicke der Luftschicht hat, im Gegensatz zum Übergangswiderstand, bei dünnen und/oder diffusionsoffenen Membranen, Folien und Bahnen bereits in der DIN EN ISO 12572 [N14] Anhang G Berücksichtigung gefunden. Die Übergangswiderstände von der Bahn an die sie umgebenden Luftschichten sind auch mit dem Mehrlagenverfahren nach Liersch nicht zu eliminieren. Dies wäre auch nicht sinnvoll, da diese Widerstände auch in der Praxis vorhanden sind.

Grundsätzlich folgt die Prüfmethode denselben Prüfaufbauten wie sie die Normen [N6] und [N14] vorgeben, mit dem Unterschied, dass bei jeder Materialprobe die Lagenanzahl schrittweise um eine Lage erhöht wird. Beim Vergleich der Proben mit zwei und drei Materiallagen ergibt sich eine Differenz in der Durchlässigkeit. Da bei beiden Messungen die Randbedingungen gleich gewesen sein sollten, sind die Nebeneinflüsse auf den Diffusionswert

ebenfalls gleich. Bei der Differenzbildung von beiden Prüfaufbauten bleibt also nur noch der reine Diffusionswiderstand des Materials übrig, da der Übergangswiderstand des Sorbens sowie der Luftspalt unterhalb der Probe bei beiden Messungen in der selben Höhe und im gleichen Ausmaß vorhanden war, und somit bei der Differenzbildung auf beiden Seiten der Gleichung heraus fällt.

Bildlich lässt sich die Differenz in einem x/y-Diagramm darstellen. Wenn die einzeln gemessenen s_d -Werte über der Anzahl der Lagen aufgetragen werden (vergleiche Diagramm 4) ergibt der Ordinatenabschnitt die Summe der Widerstände und die Geradensteigung den s_d -Wert des Materials. Nach Liersch :

Dieses Verfahren liefert realitätsnahe s_d -Werte und ist gegenüber dem gravimetrischen Verfahren nach DIN 52615 nicht durch das Verhalten des Sorptionsmittels beeinflusst.

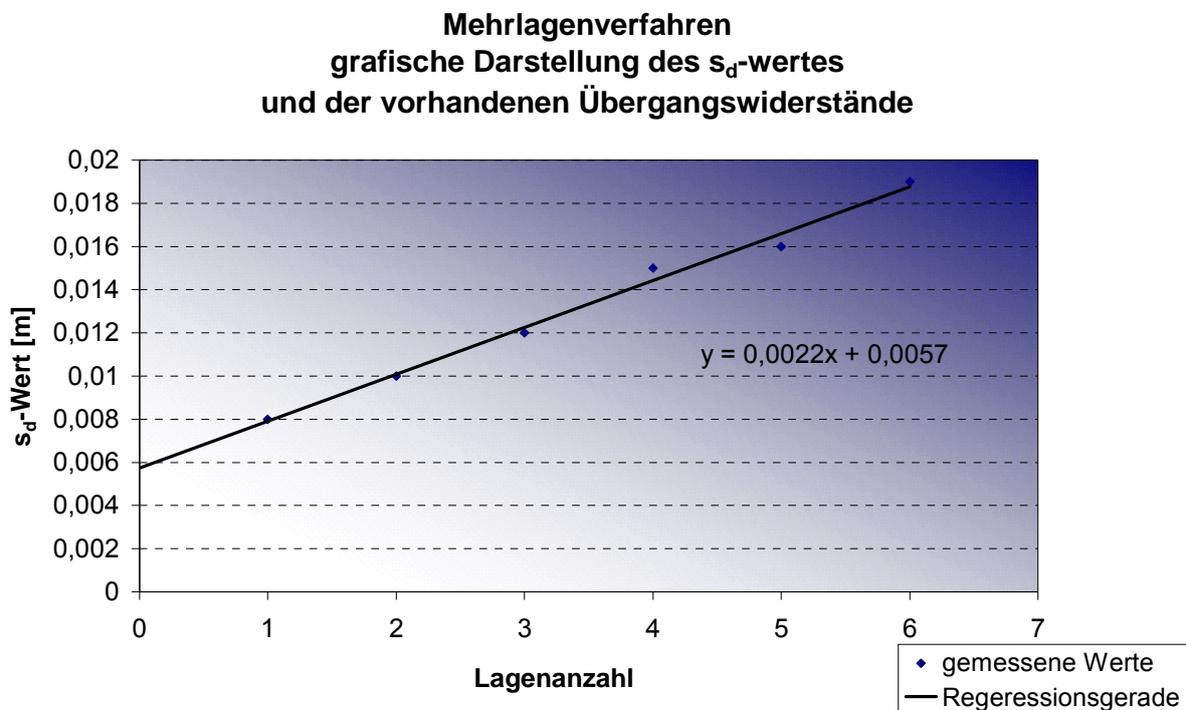


Diagramm 4 Grafische Darstellung der s_d -Wert-Ermittlung mit Hilfe des Mehrlagenverfahren

Bei allen vom Verfasser gefundenen Artikeln und Versuchsbeschreibungen über das Mehrlagenverfahren wird im Versuchsaufbau nur von Sorptionsmittel gesprochen. Hierbei kommt in Anlehnung an die DIN 52615 immer Calciumchlorid CaCl_2 zur Anwendung. Der Ansatz von Liersch zielt darauf ab, dass sich im Verlaufe des Versuchs das Wasserdampfaufnahmeverhalten des Sorptionsmittels verschlechtert. Das Sorptionsmittel kann die von ihrer Oberfläche absorbierten Feuchtigkeit nicht so schnell in den Kern transportieren bzw. aufnehmen wie Wasserdampf durch das diffusionsoffene Muster aufgrund des anliegenden Partialdampfdruck in die Probenschale nachgeführt wird. Somit entsteht eine Verwässerung des Randbereiches des Sorptionsmittels. Der daraus resultierende Anstieg des Übergangswiderstandes

vom Sorptionsmittel wird beim Auswerten des Versuchs dem s_d -Wert der Probe zugeschlagen.

Das beschriebene Mehrlagenverfahren wurde von Liersch selbst noch einmal dahingehend modifiziert, dass zwischen Sorptionsmittel und Probe ein weiterer Messfühler für die dort vorhandene Luftfeuchtigkeit platziert wurde. Hierdurch sollte die real vorhandene Partialdruckdifferenz besser dargestellt werden können. Es zeigte sich, dass neben der Diffusionsstromdichte aufgrund der Sättigung des Sorptionsmittels im Randbereich auch die anliegende Partialdruckdifferenz im Laufe der Messungen geringer wurde. Bei Quotientenbildung zu den einzelnen Messzeitpunkten zwischen Partialdruckdifferenz und Diffusionsstromdichte zeigt sich, dass die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke einen konstanten Wert annimmt.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Versuch unternommen, ein Produktionsbegleitendes Messverfahren für die Wasserdampfdurchlässigkeit zu entwickeln. Durch in Reihe schalten von mehreren Messfühlern (siehe Abbildung 23), die die Temperatur und relative Feuchte messen, und zwei Probenhalterungen zwischen den Messfühlern kann aufgrund der Zusammenhänge zwischen Partialdruck und Diffusionsstrom der s_d -Wert eines Musters genauer als nach den normierten Verfahren bestimmt werden.

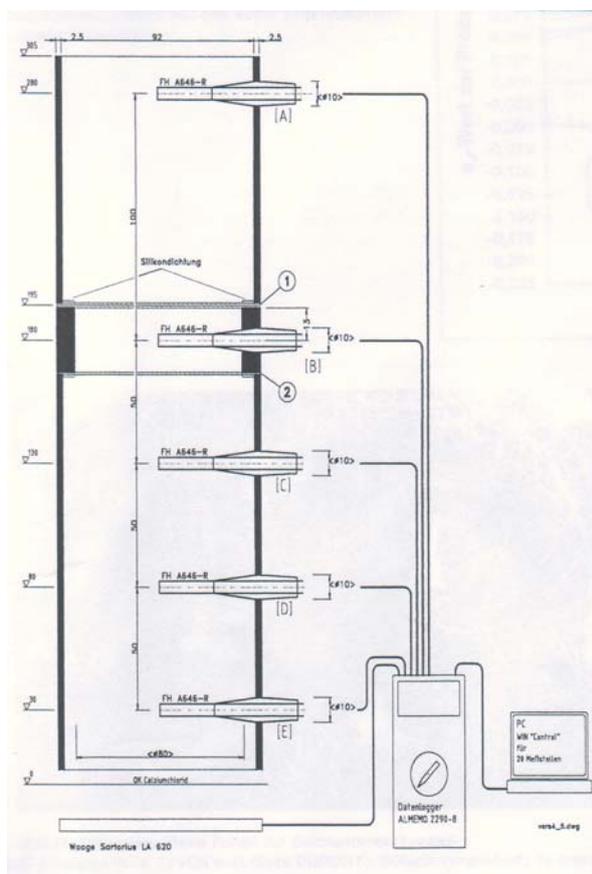


Abbildung 23 Modifiziertes, kontinuierliches Mehrlagenmessverfahren nach [28]

Der hier von Liersch gewählte Versuchsaufbau spiegelt in groben Zügen das gleiche System wieder, wie es bei dem Diodenlaser-Absorptionsspektroskop verwendet wird. Bei dem Dio-

denlaser wird das Feuchtigkeitsgefälle mittels Lichtabsorption visuell darstellbar. Bei Liersch hingegen wird durch die Anzahl der Messfühler das Feuchtegefälle darstellbar. Der Unterschied liegt zwischen beiden Versuchsaufbauten darin, dass bei [35] die unmittelbare Umgebung der Probe dargestellt wird und die Messabstände um ein Vielfaches kleiner sind als bei Liersch.

4.4. Stand der Diskussion

Die in den vorherigen Kapiteln behandelten Untersuchungsmethoden zeigen die Vielfalt der zurzeit praktizierten Möglichkeiten zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionsdurchlässigkeit von Folien oder textilen, beschichtet oder unbeschichteten Flächengeweben, wie sie Unterspann- und Unterdeckbahnen darstellen. In allen recherchierten Literaturquellen wurde darauf hingewiesen, dass für die Genauigkeit des Messergebnisses die umgebenden Prüfungsrandbedingungen ausschlaggebend sind. Besonders den diffusionsoffenen Bahnen, bei denen die unterschiedlichen Widerstände innerhalb der Messmethoden in die Ergebnisse hineinspielen, wird zunehmend Beachtung geschenkt, da sich deren Höhe in derselben Größenordnung befinden wie die Durchlässigkeit der Bahnen selbst. In den normierten Verfahren werden die Randbedingungen nach [28], [22], [30], [51], [23], zu wenig berücksichtigt. In der aktuellen international anerkannten und weit verbreiteten Norm DIN EN ISO 12572 aus dem Jahr 2002 werden diese Widerstände zum Teil erstmals berücksichtigt. Durch Weiterentwicklung der gravimetrischen Verfahren durch Liersch sind erstmals alle Übergangswiderstände, die nicht durch die Folien selber bedingt sind, erfassbar.

In [23] wird die Methode von Liersch noch weiterentwickelt, da hier davon ausgegangen wird, dass alle Übergangswiderstände nur von den Prüfungsrandbedingungen wie Luftdruck, Partialdruckdifferenz, Luftspalt, Sorptionsmittel, Luftgeschwindigkeit abhängig sind. Aus diesem Grund ist es nach [23] ausreichend, einmal die Übergangswiderstände des Prüfaufbaus zu bestimmen und danach lediglich anhand einer Probe im Mehrlagenverfahren dessen Diffusionsfähigkeit zu bestimmen. Hierbei wird allerdings die Anzahl der Schichten im Gegensatz zu Liersch von 3-5 auf 8 erhöht. Die Autoren lassen aber offen bei welcher Art von Folie die nur einmalig zu ermittelnden Randbedingungen bestimmt werden sollen. Hieraus könnte sich eine Ungenauigkeit ergeben, da zum einen die o.g. Prüfungsparameter voneinander abweichen können und die so, sehr leicht beeinflussbaren Ergebnisse verändern könnten. Zum anderen kann sich aufgrund der Diffusions- und Durchlässigkeitseigenschaften der Probe selber ein anderes Verhalten des Diffusionsstromes einstellen. Wie sich dieses auf die Randbedingungen auswirkt, ist noch nicht geklärt. In [51] wird zusätzlich noch auf die Oberflächenstruktur der Proben hingewiesen, die im Wesentlichen die Übergangswiderstände der Folie selber beeinflusst. Wenn nun die in [23] einmalig bestimmten Randbedingungen an einem Folientyp mit einer anderen Oberflächenstruktur bestimmt worden ist als die der zu prüfenden Folie, ergeben sich hieraus auf jeden Fall Unterschiede im Messergebnis. Trotzdem ist der Ansatz in [23] sinnvoll, da sich so die sehr große Probenanzahl beim Mehrlagenverfahren reduzieren lassen würde. Ein weiterer Vorteil neben der Zeit- und Arbeitersparnis wäre die Minimierung der Herstellungsbedingten Fehler im Versuchsaufbau.

In [51] wird beschrieben, dass die Summe der Übergangswiderstände zwar mit den genannten Verfahren zu bestimmen ist, jedoch deren Unterteilung und Zuweisung zu den einzelnen Übergängen nicht möglich ist. Lediglich bei Stoffen, die in unterschiedlichen Dicken produziert werden oder produziert werden können, ist es möglich mit dem Messverfahren der Normmethode bei Versuchsdurchführung mit unterschiedlicher Schichtdicke auf die Übergangswiderstände an der Probenoberfläche zu schließen, da die Randparameter sich gleich bleibend verhalten. Da sich die in dieser Arbeit behandelten Materialien aber nicht oder nur schlecht in unterschiedlichen Dicken produzieren lassen, entfällt die Bestimmung der Oberflächenstrukturbedingten Übergangswiderstände, was aus baupraktischer Sicht auch nicht erforderlich ist. In [51] wird aber die Aussage gemacht, dass bei Annahme von natürlicher Konvektion die Stoffübergangswiderstände feuchteunabhängig sind und die ermittelte Summe der Übergangswiderstände gleichmäßig auf die drei bei den normierten Verfahren vorhandenen Übergangswiderstände verteilt werden kann. Dies kann aber nur als gröbere Näherung angesehen werden.

Einigkeit zwischen den unterschiedlichen Autoren und Fachleuten herrscht hinsichtlich der Luftströmung oberhalb der Probe. Hier wird, wie auch die Norm [N14] bei sehr diffusionsoffenen Materialien fordert eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit verlangt. Diese soll dazu beitragen, dass sich der innerhalb einer ruhenden Luftschicht über der Probe entwickelnde Wasserdampfschleier (schichtweise Erhöhung des Partialdrucks) nicht bildet. Welchen Wert die Strömung annehmen soll, ist nicht einheitlich beschrieben, doch zeigt [51] in Anlehnung an [21], dass der Übergangswiderstand für den Transportprozess der Diffusion von Luftschichten stark von der enthaltenden Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Je höher die Geschwindigkeit der Luftströmung, desto geringer ist der s_d -Wert, den der Übergangswiderstand darstellt.

Im Bezug auf die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Filmen, bei denen es sich um mikroporöse Filme mit einer glatten Oberfläche handelt, und im Bezug auf die Unterspann- und Unterdeckbahnen, deren Aufbau sich je nach Herstellungsart stark unterscheidet, sollen folgende Überlegungen vor Auswahl und Bestimmung der Luftströmungen bei den Diffusionsprüfungen getroffen werden.

Nach [51] kommt es bei Überströmungen zu einem Unterdruck innerhalb der Materialien. Die Größe des Unterdrucks unmittelbar an der Oberfläche des Materials ist wiederum von der Oberflächenbeschaffenheit des Materials abhängig, da sich aufgrund ihrer Struktur eine laminare Grenzschicht ausbildet, in der sich der Druck verringert. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben hängt die Wasserdampfdiffusion in starkem Maße von den anliegenden Druckverhältnissen ab. Hierbei ist nicht nur von den Partialdrücken die Rede, sondern auch von dem absoluten Druck. Aufgrund des Materialgefüges der untersuchten Stoffe, mit den teilweise durchgängigen Porenraumverbindungen von einer Oberfläche zur anderen ergibt sich infolge der Überströmung ein Saugstrom durch die Probe hindurch. Dadurch wird die Diffusion nicht ausschließlich durch den Partialdampfdruck angetrieben, sondern es kommt ein strömungstechnischer Antrieb hinzu. In wieweit sich dieser zusätzlich Antrieb bemerkbar macht, oder ob die dadurch zu erwartende Erhöhung ein geringeres Ausmaß auf die Diffusionsstromdichte hat als die sich bei flussfreier Messung einstellende Barrierewirkung der Wasserdampf-

konzentrationsschicht, kann nicht abschließend geklärt werden, sollte aber in weiteren Arbeiten untersucht werden.

Hinsichtlich der Genauigkeiten der unterschiedlichen Methoden schreibt [51], dass bei normalem Laborbetrieb mit Luftfeuchteschwankungen von 2-3 % und der bei den normierten Verfahren vorgegebenen Wiegegenauigkeit von 1mg sich Unsicherheit von 5 % bei den Messwerten ergeben. Zwischen den Versuchen nach [28] und [23] ergeben sich nur geringe Messunterschiede, obwohl die Versuche an räumlich getrennten Orten stattgefunden haben. Die Norm [N14] begrenzt sich aufgrund der Verfahrensbedingten Messunsicherheiten selbst auf wasserdampfäquivalente Luftschichtdicken von $> 0,1$ m. Bei höheren Durchlässigkeiten würden die Messunsicherheiten bei Wiederholungsprüfungen nicht mehr zu reproduzierbaren Ergebnissen führen. Nach den Untersuchungen mittels des in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Verfahrens ergeben sich bei diesem System Unsicherheiten von 10 %, wobei die Abweichungen je nach Versuchsaufbau in Abbildung 21 variieren.

5. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Um zwei der vorgenannten Versuchsmethoden miteinander zu vergleichen wurden in der Materialprüfanstalt an der Technischen Universität in Braunschweig und im BBS INSTITUT Wolfenbüttel Versuche an diffusionsoffenen und Diffusionsdichten Materialien durchgeführt. Es sollten Unterschiede zwischen der in Kapitel 4.1 beschriebenen gravimetrischen Normmethode nach der DIN EN ISO 12572 und der in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Messmethode nach Lyssy aufgedeckt werden. Hierzu wurde im Vorfeld eine Reihe unterschiedlicher Materialien ausgesucht und für die jeweiligen Methoden vorbereitet. In den folgenden Unterkapiteln sind die Materialien deren Aufbau, die Probenvorbereitung, der Ein- und Ausbau bei der jeweiligen Methode, die Randbedingungen sowie die Ergebnisse aufbereitet.

5.1. Verwendete Materialien ,Struktur und Aufbau

Bei den untersuchten Produkten handelte es sich immer um reine Kunststoffbahnen oder – filme, oder um Verbundprodukte mit ein- oder zweiseitiger Vlieskaschierung. Ausgewählt wurden insgesamt fünf Unterspann- Unterdeckbahnen, wobei eine davon ausschließlich in belüfteten Dachquerschnitten eingebaut werden kann, da sie keine Diffusionsoffenheit im Sinne von [32] besitzt. Zu diesen fünf Bahnen wurde noch eine Dampfsperrbahn, mit einem geringeren s_d -Wert als 10 m, zwei Kunststofffolien aus dem gleichen Rohstoff aber mit unterschiedlichen Dicken und zwei Kunststofffilme, die nach den in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Verfahren hergestellt worden sind, hinzugenommen. Die Folien und Filme wurden aus dem Grund dazu genommen, weil zum einen über die Folien und den einen Film (Goretex) das Messsystem von Lyssy geeicht wird, zum anderen weil die meisten am Markt erhältlichen Unterspannbahnen diese Art von Filmen in ihrem Aufbau besitzen.

Tabelle 8 Untersuchte Materialien

	Einsatzgebiet/ Bahnart	Kennzeichnung	Herstellungsart	Materialart / Rohstoff
1	Unterspann-/Unterdeckbahn	Österreich / Nicofol	Vlies-Filmkombination	Polypropylenvlies mit Polyethylenfilm
2	Unterdeckbahn	Tyvek Solid	Flash-Spund-Produkt	HDPE-Polyethylen-Spinnvlies
3	Unterspann-/Unterdeckbahn	Italien	Vlies-Filmkombination	Polypropylenvlies mit Polypropylenfilm
4	Unterspann-/Unterdeckbahn	Deutschland / Seco 4000	Vlies-Filmkombination	Polypropylenvlies mit Polypropylenfilm
5	Unterspannbahndiffusionsdicht	BWK TypeF	Beschichtetes Vlies	
6	Dampfsperrbahn	Seco 400	Beschichtetes Vlies	Polypropylenbeschichtung auf Polypropylenvlies
7	Kunststofffolie	PET 19 μ m	gewalzt	Polyethylenterephthalat
8	Kunststofffolie	PET 36 μ m	gewalzt	Polyethylenterephthalat
9	Goretex-Film	Goretex	geblasen/bidirektional verstreckt	PTFE- Polytetrafluorethylen
10	Kunststofffilm, „atmungsaktiv“	Atmungsaktiver Film	geblasen/gereckt	Polypropylen

Die Rohstoffe die für die Bahnen verwendet wurden können wie folgt eingeteilt und hinsichtlich ihres Feuchteverhaltens charakterisiert werden:

Polymere/Polyolefine

Polyethylen – PE:

- hydrophob
- Wasseraufnahme nach ISO 62 $< 0,1\%$
- Gewichtszunahme erfolgt bei Feuchtlagerung durch Adsorption von Wassermolekülen an die Oberfläche des Polymers durch die in ihr enthaltenden Pigmente.
- offizielle Literaturwerte für WDD nach [5] Anhang Tabelle III

Polypropylen – PP:

- hydrophob
- Wasseraufnahme nach ISO 62 $< 0,1\%$
- Gewichtszunahme erfolgt bei Feuchtlagerung durch Adsorption von Wassermolekülen an die Oberfläche des Polymers durch die in ihr enthaltenden Pigmente.
- offizielle Literaturwerte für WDD nach [5] Anhang Tabelle III

Polytetrafluorethylen – PTFE

- auch als Teflon bekannt
- hydrophob
- Wasseraufnahme nach ISO 62 $< 0,1\%$
- geringer Polarisierungsgrad
- H₂O Durchlässigkeit entspricht ca. 0,03 g/m²d

Polykondensate

Polyamid – PA

- Sorten werden häufig bei der Filmherstellung eingesetzt
- hydrophil
- Wasseraufnahme nach ISO 62 entspricht 3,0%
- wesentlich höhere Dampfdurchlässigkeit nach [5]

Polyethylenterephthalat – PET

- Dampfdurchlässigkeit höher als bei Polyolefinen (PE,PP, PTFE) aber geringer als PA nach [5]
- Wasseraufnahme nach ISO 62 $< 0,2\%$
- eine Polyesterart

Wie unter Kapitel 3.3 bereits erläutert gibt es bei den geschlossenen Filmen und Folien (Tabelle 8 Nummer 5-8 gehören dazu) nur die Diffusionsart der Lösungsdiffusion. Da es sich bei allen Polymeren, außer PA, um hydrophobe Kunststoffe handelt und die Lösungsdiffusion zur Grundlage hat, dass sich die Wassermoleküle überhaupt anlagern und somit vom Kunststoff aufgenommen werden können, müssen diese Polymere nach [19] quellfähig sein. Bei höheren Wasserdampfkonzentrationen werden zwar vermehrt Moleküle an den Kunststoff angelagert und in ihm gelöst, doch kann dies den Diffusionsdurchgang verlangsamen. Nach den Untersuchungen und theoretischen Überlegungen in [19] [5] [49] führt diese ver-

mehrte Wasseraufnahme bei hydrophoben Polymeren zu einer Clusterbildung der Moleküle. Durch diese „Verklumpung“ der Moleküle wird ihre Beweglichkeit eingeschränkt und der Diffusionsstrom kommt ins stocken.

Zur Veranschaulichung des Diffusionsverhaltens von unterschiedlichen Polymeren sind in Abbildung 24 die Diffusionsstromdichten in Abhängigkeit der Temperatur aufgeführt.

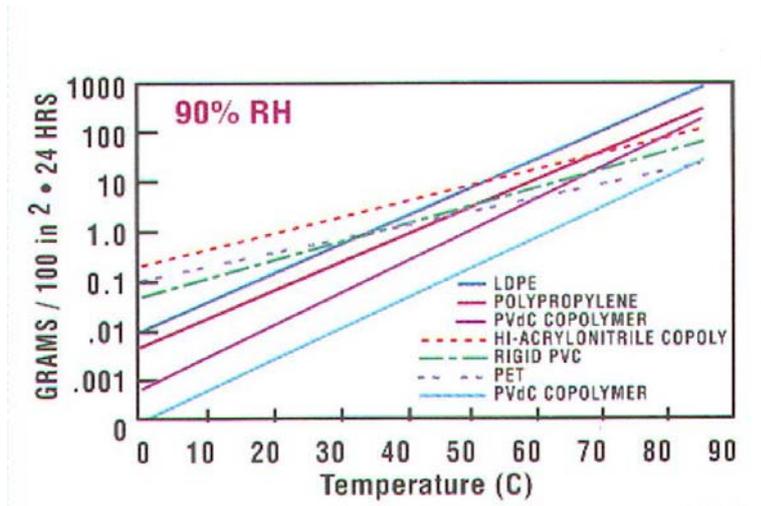


Abbildung 24 Allgemeines Diffusionsverhalten unterschiedlicher Polymerfolien

Die Diffusion durch die Polymerfolien hängt nach [49] im Wesentlichen von den zwei Faktoren Dicke der Folie und Dichte des Polymers ab. Bei den Kunststoffen kann die Dichte gleichgesetzt werden mit der Kristallinität, welche wiederum abhängig ist von der Morphologie der Polymere (verstreckt/unverstreckt). Der Einfluss der beiden Parameter auf die Wasserdampfdurchlässigkeit ist in den folgenden Abbildungen dargestellt.

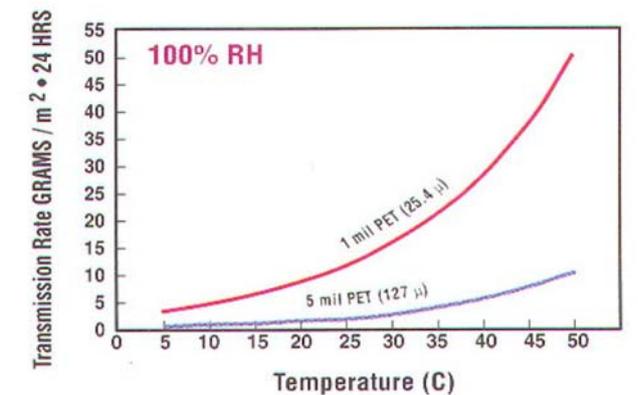


Abbildung 25 Dickenabhängigkeit

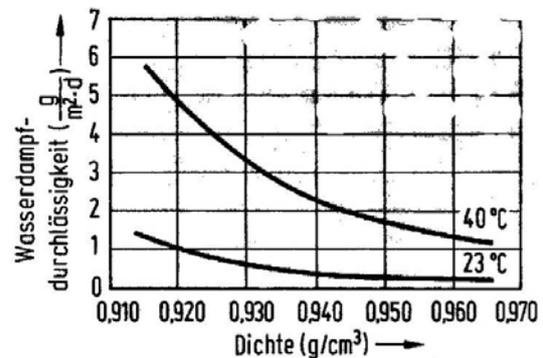


Abbildung 26 Dichteabhängigkeit

Die Durchlässigkeit kann nach [49] als umgekehrt proportional zur Foliendicke betrachtet werden.

5.2. Bestimmung der WDD mittels des gravimetrischen Verfahrens nach [N14]

Die Versuche fanden in einer Prüfkammer mit dem nach [N14] vorgegebenen Klima von 50 % relativer Feuchte und 23°C Raumtemperatur statt. Die Dicke der untersuchten Kunststoffbahnen mit den Nummern 1-6 aus Tabelle 8 wurde mit einer Schieblehre des Typs 16EX der Fa. Mahr mit einer Genauigkeit von 0,01 mm gemessen. Bei den Proben mit den Nummern 7-10 wurde die Dicke mittels eines Induktionsdickenmessgerätes nach den Abbildung 27 und Abbildung 28 bestimmt. Alle gemessenen Einzelwerte können dem Anhang C entnommen werden.



Abbildung 27 Induktionsmessgerät



Abbildung 28 Induktionsmessung

Die nach [N14] geforderte Wägepräzision von 1 mg wurde erfüllt, da als Messeinrichtung eine Waage mit einer maximalen Ladekapazität von 210 g und einer Auflösung von 0,01 mg der Fa. Sartorius aus der Genius Serie zum Einsatz kam.

Normalerweise fallen die in dieser Arbeit behandelten Stoffe dem Prüfaufbau in Anhang C zu, können aber auch, je nach Festigkeitseigenschaften dem Anhang A zugeordnet werden. Bei den in dieser Versuchsreihe durchgeführten Prüfungen wurde der in Anhang C vorgeschlagene Prüfaufbau gewählt, allerdings wurde hier keine mechanische Dichtung, sondern eine pastöse / flüssige Abdichtungsmasse verwendet.

5.2.1. Herstellung der Proben

Nach dem Herausschneiden der einzelnen Prüflinge aus den Bahnmustern, wurden die Prüfkörper sieben Tage lang nach [N14] Absatz 6.4 konditioniert, obwohl dies für Kunststoffmembranen nicht erforderlich ist. Zur Herstellung des Klimas von 93 % relativer Luftfeuchte innerhalb der Prüfgefäße, wurde eine gesättigte Salzlösung mit Ammoniumdihydrogenphosphat $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ hergestellt. Hierzu wurde destilliertes Wasser mit dem Salz unter kontinuierlichem Rühren angereichert. Um die geforderte gesättigte Lösung in den Schalen über den gesamten Prüfungszeitraum sicherzustellen, wurde in jeder Schale zusätzlich ein

Bodenkörper aus Salz belassen. Nach [19] ist hiermit sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt genau 93 % relative Feuchte innerhalb der Prüfschale herrscht. Nicht gelöstes Salz sorgt dafür, dass bei Zutritt von Wasserdampf in den Luftraum dieser in die Lösung aufgenommen wird und dort dieses überschüssige Salz löst. Ein Verlust von Wasser aus dem Prüfraum, wie es bei den durchgeführten Versuchen der Fall war, bewirkt ein Ausfallen von Salz und der Bodenkörper wächst an. Dies konnte nach Versuche bestätigt werden.

Als Prüfgefäße kamen die in Abbildung 29 dargestellten Glasschalen zur Anwendung. Sie haben den Vorteil, dass die Salzlösungen im Innern auch während des Versuches beobachtet und Unregelmäßigkeiten protokolliert werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass ein Benetzen der Probenunterseite durch die Salzlösung aufgrund zu hektischer oder schneller Handhabung des Prüfgefäßes gut erkennbar wäre. Der abgeflachte Schalenrand im oberen Bereich lässt eine gute Verbindung zwischen Probe und Prüfgefäß zu. Da die Probe genügend Auflagefläche besitzt und trotzdem noch ein Glasrand verbleibt, kann in diesem Bereich eine vollflächige Dichtung hergestellt werden.

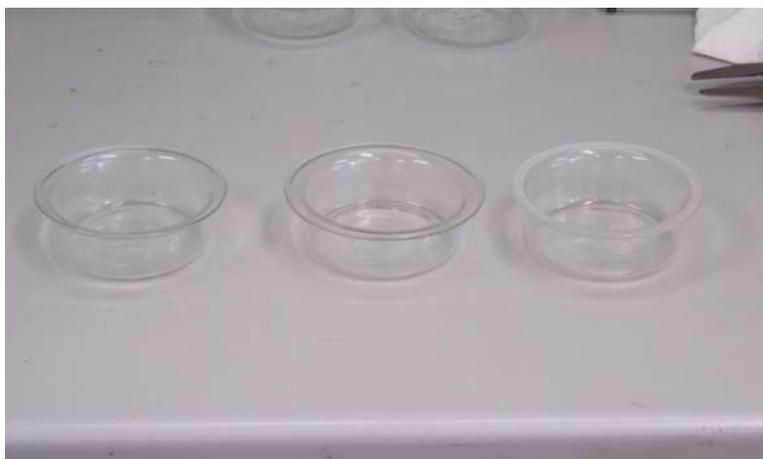


Abbildung 29 Prüfschalen

Die trockenen Schalen wurden mit Salzlösung soweit aufgefüllt, dass sich zwischen Oberkante Schalenrand und Flüssigkeitsoberfläche die nach Norm geforderten 15 – 20 mm Freibord befanden. Sollte dies aufgrund der Schalengeometrie nicht der Fall gewesen sein, ist dies im Einzelprüfbericht für jedes Material in Anhang C vermerkt. Um die Ausgangshöhe der Salzlösung zu dokumentieren wurden nach der Befüllung die Anfangsstände mit einer Markierung an den Prüfgefäßen gekennzeichnet.

Zum Andichten der Einzelproben an den Gefäßrand wurde eine Mischung aus Paraffin und Weichmacher benutzt. Aus Erfahrungswerten der MPA wurde als Weichmacher Oppanol, bei dem es sich um einen Kaugummigrundstoff handelt, eingesetzt. Bereits in [41] wurden Versuche mit diesem Dichtungsmittel durchgeführt. Dabei konnten keine Nachteile zu den in der Norm aufgeführten Dichtungsmitteln aufgezeigt werden, allerdings wird allgemein die mit solchen Abdichtungen zu erreichende Dichtigkeit in Frage gestellt. Dies wiederum ist für die hier durchgeführten Versuche von geringerer Bedeutung, da es sich bis auf Material 5 aus

Tabelle 8 um diffusionsoffenerer Kunststoffbahnen mit Durchlässigkeiten über der in [41] aufgeführten Grenze von $1 \text{ g/m}^2\text{d}$ handelt.

Um die Einzelproben auf den Prüfgefäßen sauber und glatt aufzuspannen, wurden nach dem Auflegen der Proben auf die Schalenränder jeweils 4 – 5 Stellen der Proben leicht mit dem Wachs auf dem Glas fixiert. Anschließend wurden die Proben umlaufend durch eine erste Beschichtung fest mit der Glasschale verbunden. Nun wurde, um die in der Norm geforderte Diffusionsfläche sicherzustellen, ein Glasring mit einem kantigen, nicht geschliffenen Rand und einem Durchmesser von 8 cm auf die so gespannte Folie aufgelegt. Um die Anhaftung des Paraffingemisches nach Erhärten an der Glasringoberfläche zu vermeiden, bzw. zu verringern, wurde dieser vor dem Aufsetzen auf die Folie mit Vaseline (Fett) eingestrichen. Hierdurch konnte eine exakte Prüffläche im Sinne der Norm erzeugt werden. Das Abdichten erfolgte durch mehrfaches Bestreichen mit dem geschmolzenen Paraffin/Oppanol-Gemisch. Es wurde darauf geachtet, dass die Temperatur des Wachses so gering wie möglich gehalten wurde, um die empfindlichen Proben nicht zu schädigen. Gleichzeitig musste aber die Viskosität ausreichend sein, um eine hohe Dichtigkeit zu erreichen. Deshalb wurden die ersten Lagen der Beschichtung mit kühlerem, die abschließenden Lagen mit heißerem Abdichtungsparaffin erstellt. Sofort nach Aufbringen der letzten Lage wurde der Glasring unter leichtem Drehen von der Probenoberfläche entfernt. Zum Teil war bei der Probeneindichtung festzustellen, dass sich die Materialien nach oben, also von dem Probenschälchen weg, aufblähten. Dies kann zu einem auf den erhöhten Dampfdruck im Schaleninneren zurückgeführt werden, zum anderen auf die Schrumpfung und das Erkalten des heißen Wachses im Randbereich, wodurch es zu leichten Spannungen innerhalb der Materialien kam.

5.2.2. Versuchsdurchführung

Um der Norm zu entsprechen, wurden von jedem Material 5 Proben hergestellt. Dies war erforderlich, weil die Prüffläche mit einem Durchmesser von 8 cm weniger als $0,02 \text{ m}^2$ betrug. Mit den Messungen wurde erst begonnen, nachdem von jedem Material alle Einzelproben angefertigt waren. Da die Herstellung je Probe etwa 30-45 Minuten betrug, wurden die fertig bestückten Prüfschalen einzeln und sofort nach Fertigstellung in die Klimakammer gebracht. Als die letzte Probe eines Materials angefertigt war und diese mindestens 1 Stunde im Klimaraum stand, konnte mit den periodischen Wägungen begonnen werden. Durch dieses kontinuierliche Herstellen der einzelnen Proben ergaben sich unterschiedliche Häufigkeiten an Messintervalle zwischen den Materialien. Somit konnten bei den Mustern die zuerst hergestellt wurden, die meisten Messungen durchgeführt werden.

Alle Unregelmäßigkeiten die während der zweiwöchigen Prüfungszeit festgestellt werden konnten, wurden protokolliert und sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 9 Unregelmäßigkeiten bei der Prüfung

Material	Abweichung
Österreich	Bei erster Probe 2,3 cm Luftspalt unterhalb der Folie
PET 19µm	Bei Probenummer 35 2,5 cm Luftspalt unterhalb der Folie
PET 19µm	Durch unsachgemäße Handhabung bildeten sich zwei Wassertropfen an der Unterseite der Folie

Was die Prüfungsrandbedingungen über den Messzeitraum betraf, wichen die Mittelwerte über den Prüfungszeitraum von den in der Norm [N14] vorgegebenen Werten bei der Temperatur um maximal 0,1 K und bei der relativen Luftfeuchtigkeit um maximal 0,6 % ab. Bei den protokollierten Einzelmessungen betrugen die maximalen Abweichungen zur Norm 0,5 K und 2,5 % relative Feuchte. Somit liegen alle Differenzen innerhalb der Normschwankungsbreite.

Die nach Anhang G in [N14] geforderte Luftgeschwindigkeit von 2m/s oberhalb der Prüfschalen wurde nicht hergestellt, weil der vom Hersteller mitgelieferte Eichstandard auch bei einer geringeren Luftströmung (0,12 m/s) geprüft wurde. Bereits in [4] wurde von einer zu hohen Geschwindigkeit abgeraten, da hierdurch eventuell die Wasserlösung zu schnell aus den kleinen Probenschalen verdunsten könnte. Die nach [N14] Absatz 7.3 erforderliche Konstanz in der Massenänderung wäre somit nicht erreichbar gewesen, wodurch sich auch keine stabile Wasserstromdichte bei den Proben eingestellt hätte.

Die in der Prüfkammer vorherrschenden Luftgeschwindigkeiten lagen im Mittel zwischen 0,1 und 0,16 m/s, wodurch sie mit der Luftströmung des Herstellereichstandards gut übereinstimmten. Beide Strömungsgeschwindigkeiten liegen im nach [N14] Absatz 5 festgelegten Bereich von 0,02 – 0,3 m/s. In diesem Bereich besitzt die Strömung laut [51] einen laminaren Charakter.

Nach [51] und [21] würde sich nach dem von der Norm vorgegebenen Wert von 2 m/s ein Wasserdampfdiffusionsübergangswiderstand als s_d -Wert von ca. 3,5 mm an der Probenoberseite ergeben. Bei den gewählten Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich bei normalem Luftdruck gemäß [N14] mit der in [51] aufgeführten linearen Abhängigkeit zwischen Massenstromdichte und Windgeschwindigkeit ein zusätzlicher s_d -Wert von 31 – 22 mm als Übergangswiderstand. In bauphysikalischen Berechnungen setzt Künzel gemäß [51] im Durchschnitt einen Stoffübergangskoeffizienten von $25 \cdot 10^{-9}$ [kg/m²sPa] im Gebäudeinneren an. Hieraus ergibt sich ein zusätzlicher s_d -Wert von 7,4 mm auf der Oberfläche von Bauteilen.

Um den Anforderungen in der Norm gerecht zu werden wurde bei der Herstellung der Proben darauf geachtet, dass die Ränder durch das Abdichtungsmittel die Probenoberfläche nur geringfügig (1-2 mm) überragten. Hierdurch soll die kontinuierliche Luftbewegung oberhalb der Prüflinge sichergestellt werden.

Als Vorteil der wahrscheinlich zu geringen Luftgeschwindigkeit oberhalb der Proben soll aber angeführt werden, dass bei der Messmethode nach Lyssy keine oder zumindest nur geringe Luftbewegungen über der Probenoberfläche stattfinden. Hierdurch ist eine Fehlerquelle für Abweichungen der Ergebnisse zwischen den beiden Messverfahren ausgeschlossen.

Vor dem Hintergrund, dass die Diffusionsmessungen in akkreditierten und zertifizierten Laboratorien im Allgemeinen nach der hier zugrunde gelegten Norm stattfinden, sollten hierzu noch weitere Versuche durchgeführt werden, bei denen die Luftgeschwindigkeiten oberhalb der Proben aufzuzeichnen sind. Da bei der Messmethode nach Lyssy aufgrund des empfindlichen Sensors keine Möglichkeit besteht in der oberen Kammer diese Luftgeschwindigkeiten zu erzeugen, muss sich, da dieses System weit verbreitet ist und eine Relation mit den nach Ihr gemessenen Werten hergestellt werden soll, die Bestimmung nach Norm an die dort aufgeführten Randbedingungen halten. Nur so ist es möglich ein eindeutiges Verhältnis zwischen den Messvarianten zu bilden.

5.2.3. Ergebnisse der Normversuche

Die erzielten Wasserdampfdurchlässigkeiten der nach Norm untersuchten Materialien liegen zwischen 0,81 g/m²xd und 752,03 g/m²xd. Bei den gemessenen Dicken der vorliegenden Materialien ergeben sich die dazu wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicken von 0,01 bis 25,91 m. In Tabelle 10 sind alle gemessenen Mittelwerte der Durchlässigkeiten und der hieraus resultierenden s_d-Werte aufgeführt.

Tabelle 10 Ergebnisse der Wasserdampfdurchlässigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 12572

Material	s _d -Wert [m]	WDD-Wert [g/m ² xd]	Probendicke [mm]
Österreich / Nicofol	0,03	459,07	0,4800
Tyvek Solid	0,05	285,92	0,2400
Italien	0,03	409,70	0,5600
Deutschland / Seco 4000	0,08	220,14	0,5600
BWK TypeF	25,91	0,81	0,4600
Seco 400	6,96	3,02	0,2500
PET 19 µm	4,48	4,45	0,0137
PET 36 µm	4,56	4,48	0,0183
Atmungsaktiver Film	0,03	423,16	0,0154
Goretex Anfangsmessbereich	0,01	752,03	0,0075
Goretex Gesamtmessbereich	0,01	686,47	0,0075

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl μ ist hier nicht mit aufgenommen, ist aber im Anhang C aufgeführt. Nach [I] ist es für Folien nicht sinnvoll die μ -Werte anzugeben, da bei planerischen Aspekten immer der s_d-Wert herangezogen wird. Dies deckt sich auch mit den in [N1] und [N11] aufgeführten feuchteschutztechnischen Kennwerten für Folien im Bauwesen. Es ist auch sinnvoll hier nicht die Widerstandszahl μ zu benutzen, da es sich bei ihr um eine Stoffkonstante handelt. Da es sich aber bei den Folien und Unterspannbahnen im Bauwesen um sehr dünne Materialien handelt, die teilweise auch noch Verbundmaterialien sind, sollte auf die Angabe des μ -wertes verzichtet werden. In Anhang C ist er dennoch informativ mit aufgeführt und wurde über den Zusammenhang $s_d = \mu \times d$ berechnet.

Da es sich bei dem Eichstandardmaterial Goretex für die Lyssy - Methode um einen sehr offenen Stoff handelt, konnten bei den einzelnen Wägungen nie eindeutige Werte gemessen werden. Da aufgrund der Empfindlichkeit der Wägeinrichtung zu keinem Zeitpunkt ein kon-

stanter Wert abgenommen werden konnte, wurde, um Sicherheit zu erlangen, bei den Goretex Mustern nochmals die Zeit gestoppt, in der eine Gewichtsreduktion von 1 mg erfolgte. In Tabelle 11 sind die einzelnen Zeitspannen von den Einzelmessungen aufgeführt. Aufgrund dieser gleichmäßigen Gewichtsabnahme wurde nach Aufstellen der Probenschalen auf die Waage genau 1 Minute gewartet und im Anschluss daran der entsprechende Wert abgelesen. Hiermit sollte versucht werden eine Kontinuität in die Messwerterfassung zu bringen.

Tabelle 11 Zeitspannen zur Gewichtsreduktion von 1mg bei Goretex

Messung	Probe 46 [s]	Probe 47 [s]	Probe 48 [s]	Probe 49 [s]	Probe 50 [s]
1	35	35	32	35	36
2	31	31	30	31	31
3	34	35	34	37	37
4	43	36	37	40	32
5	41	42	44	43	35
6	34	39	35	38	31
7	35	36	40	40	33
8	44	41	45	44	31
9	39	36	34	38	29
10	39	38	46	47	33
11	38	42	37	38	29
12	41	50	43	44	47

5.2.4. Ausbau und Entnahme der Proben

Der Ausbau und die Entnahme der Proben erfolgte an zwei zeitlich voneinander getrennten Terminen. Beim ersten Termin wurden nur die Proben der Materialien Goretex, atmungsaktiver Film und der USB aus Italien von den Prüfschalen gelöst. Bei diesen drei Stoffen war die Salzlösung bereits zum großen Teil oder vollständig verdunstet. Beim Ausbau konnte beim atmungsaktiven Film festgestellt werden, dass sich unterhalb der Salzkruste, die sich an der Oberfläche des Bodenkörpers gebildet hatte, noch Feuchtigkeit, jedoch kein flüssiges Wasser mehr befand. Die Salzkruste war sehr hart. Dies lässt sich nach [19] und [30] darauf zurückführen, dass durch das Verdunsten / Verdampfen des Wassers zusätzlich Salz ausgefallen ist. Beim Ablagern auf der Oberschicht des Bodenkörpers unter gleichzeitigem Abtrocknen des Wassers bildete sich eine zusammenhängende harte Salzschiicht, die Kruste. Nachdem das darüber liegende Wasser vollständig verdunstet war und die obere Salzschiicht nicht mehr mit Feuchtigkeit versetzt war, bildete sich die Kruste und schloss die darunter befindliche Feuchtigkeit ein.

Auch bei den Proben, bei denen noch geringfügig Wasser über oder in der obersten Salzschiicht vorhanden war, lag die harte Salzkruste an der Oberfläche vor.

Bei den Proben des Goretex-Materials lag auch eine Art Salzschieler an den senkrechten Prüfgefäßwänden vor. Dieser weist nach [H] auf Salzbelastungen in der Luftfeuchte hin. Bei diesen Salzbelastungen handelt es sich um die in Kapitel 4.3.5 beschriebenen schädlichen Ablagerungen innerhalb der Messgeräte.

Beim zweiten Ausbautermin wurden alle restlichen Materialien von den Prüfgefäßen gelöst. Bei den Proben der USB aus Österreich, und dem Tyvek- Material lag keine Feuchtigkeit innerhalb der Schalen mehr vor. Das Unterspannbahnmaterial aus Deutschland, die

Seco 4000, wies in drei von fünf Proben noch flüssiges Wasser auf. In den anderen lag lediglich noch eine erhöhte Feuchtigkeit unterhalb der Salzkruste vor. Bei den Materialien, die als Diffusionsdichter beschrieben werden können (Tabelle 8 Nummern 5 - 8), befanden sich die Salzbodenkörper noch vollständig unter Wasser. Auch war die Salzkruste noch nicht stark ausgebildet, da beim Entfernen des Bodenkörpers keine Kraft aufgewendet werden musste, im Gegensatz zu den Prüfschalen von den diffusionsoffenen Stoffen. Dies liegt, wie oben bereits beschrieben, an der geringern Menge Salz, die ausgefallen ist, da auch in diesen Probenschalen weniger Wasser verdunstet ist.

Der Abdichtungsbereich bei allen untersuchten Stoffen zeigte keine Undichtigkeiten beim Ausbau. Lediglich eine Probe des Materials PET 19 µm wies ein Fehlstelle im Randbereich auf (siehe hierzu Diagramme im Anhang C). Auch wenn die Abdichtungen nach dem Ausbau an der Unterseite keinen vollflächigen Kontakt zum Probengefäß aufwiesen, so wurde trotzdem die Dichtigkeit über die Abdichtung oberhalb des Prüflings und dem Glasrand sichergestellt, wie in der nachfolgenden Abbildung 30 verdeutlicht werden soll.

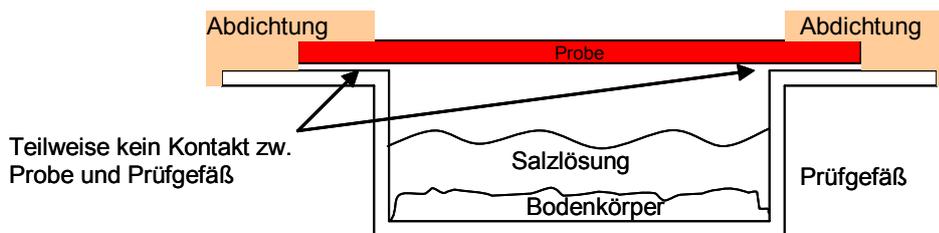


Abbildung 30 Schema der Einbausituation bei der Normprüfung

Die beim Ausbau einiger Proben festgestellte starke Anhaftung des Paraffingemisches an den Proben zeigt, dass auch wenn keine direkte Abdichtung zwischen Probe und Glasrand stattgefunden hat, durch die gute Verbindung zwischen Probe und Abdichtung sowie der Tatsache, dass die Abdichtung von der Probenoberfläche über die Probengrenze hinaus auf den Glasrand verlief, eine Trennung des Prüfschalenklimas zum Außenklima gewährleistet war und es somit zu keinen Umströmungen kommen konnte.

5.3. Ergebnisermittlung der Kennwerte für baupraktische Anwendungen mit den in der Norm aufgeführten Berechnungsgleichungen

Die grundlegenden Berechnungsgleichungen für die Transportvorgänge unter vorgegebenen Randbedingungen wurden bereits in Kapitel 3 aufgeführt und erläutert. Um aus den gemessenen Werte beim gravimetrischen Verfahren nach [N14], die in der Literatur verbreiteten Werte wie

W	= Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient	[kg/m ² *s*Pa]
Z	= Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand	[m ² *s*Pa/kg]
δ _p	= Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient bezogen auf den Dampfteildruck	[kg/m*s*Pa]
δ _a	= Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft bezogen auf den Dampfteildruck	[kg/m*s*Pa]

und die für planerische Zwecke notwendige Zahlen für

μ	= Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]
s_d -Wert	= wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	[m]
g oder WDD	= Wasserdampfdiffusionsstromdichte	[kg/m ² *s]

zu ermitteln, ist in der DIN EN ISO 12572 ein Berechnungsverfahren angegeben. Die o.g. Bezeichnungen sind ebenfalls aus dieser Norm entnommen.

Für die in Kapitel 5.2 beschriebenen Versuche und die hierbei gemessenen und im Anhang C aufgeführten Werte soll im Folgenden ein Beispiel durchgerechnet werden.

Die Beispielberechnung erfolgt am Material aus Österreich im Zeitintervall zwischen dem 13.04.05 18:00 Uhr und dem 14.04.05 08:30 Uhr:

Zuerst erfolgt die Ermittlung der Massendifferenz Δm zwischen den gemessenen Werten.

13.04.05 18:00	m_1	148,33616 g
14.04.05 08:30	m_2	146,97816 g
Zeitintervall in Sek.:	Δt	52200 s

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{\Delta t} = \frac{148,33616 - 146,97816}{52200} \quad [\text{kg/s}] \quad (18.)$$

$$\Delta m = \frac{1,358\text{g}}{52200\text{s}} = \frac{0,001358\text{kg}}{52200\text{s}} = 2,601536 \times 10^{-8} \quad [\text{kg/s}]$$

Mittels der gemessenen bzw. durch die Prüfanordnung festgelegte Diffusionsfläche ergibt sich die Wasserdampfdiffusionsstromdichte (WDD) zu:

$$g = \frac{G}{A} = \frac{2,601536 \times 10^{-8} \text{ kg}}{0,005027 \text{ m}^2} = 5,1751195 \times 10^{-6} \quad [\text{kg/s} \times \text{m}^2] \quad (19.)$$

Bei der Bestimmung des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten der Luft bezogen auf den Dampfteildruck δ_a mit den über den Prüfzeitraum gemittelten Werten der Temperatur und des Luftdrucks (in Pascal) sowie der Gaskonstanten für Wasserdampf und dem Normalluftdruck ergibt sich δ_a nach der Formel von Schirmer aus Gleichung (7.) zu :

$$\delta_a = \frac{0,083 \times p_0}{R_V \times T \times p} \times \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad [\text{kg/m} \times \text{h} \times \text{Pa}] \quad (20.)$$

$$\delta_a = \frac{0,083 \times 101325 \text{ Pa}}{462 \frac{\text{N} \times \text{m}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (273\text{K} + 22,9\text{K}) \times 101490,3 \text{ Pa}} \times \left(\frac{273\text{K} + 22,9\text{K}}{273\text{K}} \right)^{1,81} = 7,0129578 \times 10^{-7} \quad [\text{kg/m} \times \text{h} \times \text{Pa}]$$

Um den Wert auf die zur weiteren Berechnung bessere Zeiteinheit in Sekunden zu bringen, wird der Wert δ_a nochmals durch 3600 geteilt (Einheitenumrechnung Stunden in Sekunden)

$$\delta_a = \frac{7,0129578 \times 10^{-7}}{3600} = 1,948038 \times 10^{-10} \quad [\text{kg/m} \times \text{s} \times \text{Pa}]$$

Mittels der Wasserdampfdiffusionsstromdichte und dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten der Luft, lässt sich der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient berechnen. Hierbei wird die in [N14] Anhang G aufgeführte Formel benutzt, da es sich bei den untersuchten Materialien um sehr diffusionsdurchlässige Stoffe handelt und die Luftschicht zwischen der gesättigten Salzlösung und der Probenunterseite vom Diffusionswiderstand abgezogen werden muss, da es sonst zu einer signifikanten Messabweichung kommen würde. Da sich bei Diffusionsdichten Stoffen hierdurch keine Ergebnisverschlechterung ergibt, wurde auch für die in Kapitel 5.2 untersuchten dichteren Materialien dieser Berechnungsweg gewählt. Die in dieser Gleichung eingehende Luftschichtdicke unterhalb der Proben wurde kontinuierlich, da sie sich während der Messung durch das Verdunsten des Wassers bzw. der Salzlösung vergrößert, auf Grundlage des Schalendurchmessers und der Gewichtsabnahme angepasst. Der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient wurde dann für jeden Ableseschritt beim Aufzeichnen der Massenänderung mit der angepassten Luftschichtdicke berechnet.

$$W_c = \frac{1}{\frac{A \times p_v}{G} - \frac{d_a}{\delta_a}} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s} \times \text{Pa})] \quad (21.)$$

$$W_c = \frac{1}{\frac{1204,1\text{Pa}}{5,1751195 \frac{\text{kg}}{\text{s} \times \text{m}^2}} - \frac{0,023\text{m}}{1,948038 \times 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s} \times \text{Pa}}}} = 8,7257144 \times 10^{-9} \text{ [kg}/(\text{m}^2 \times \text{s} \times \text{Pa})]$$

Durch Multiplikation des Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient mit der gemessenen Schichtdicke des untersuchten Materials lässt sich der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient des Materials bestimmen. Dies wird unter der Voraussetzung berechnet, dass der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten des Stoffes genauso mit dem umgebenden Luftdruck schwankt wie der der Luft.

$$\delta = W_c \times d = 8,7257144 \times 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \times \text{s} \times \text{Pa}} \times 0,000472\text{m} = 4,1185372 \times 10^{-12} \text{ [kg}/\text{m} \times \text{s} \times \text{Pa}] \quad (22.)$$

Mit dem nun zu berechnenden μ -Wert, der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, ergibt sich ein Verhältnis zwischen dem Diffusionswiderstand des Stoffes und dem der Luft. Da es sich um ein Verhältnis zwischen zwei Eigenschaften handelt, besitzt dieser Wert keine Einheit.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} = \frac{1,9480438 \times 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s} \times \text{Pa}}}{4,1185372 \times 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s} \times \text{Pa}}} = 47 \quad [-] \quad (23.)$$

Um die Sperrwirkung eines Stoffes visuell besser darstellen zu können, wird die so berechnete Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl meistens in eine Dicke einer ruhenden Luftschicht umgerechnet. Hierzu wird sie mit der durchschnittlichen Dicke des Materials multipliziert.

$$s_d\text{-Wert} = \mu \times d = 47 \times 0,000472\text{m} = 0,022\text{m} \quad [\text{m}] \quad (24.)$$

Mit den so ermittelten Werten können die unterschiedlichen Produkte hinsichtlich ihres Diffusionsverhaltens leicht miteinander verglichen werden.

Neben der in der Norm aufwendigen Möglichkeit die Luftschicht unterhalb der Probe zu berücksichtigen, indem die Formel aus Anhang G aus [N14] zur Berechnung des Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient benutzt wird, kann die Luftschicht bei normaler Berechnung nach dem Abschnitt 8.3 aus [N14] auch am Ende vom ermittelten s_d -Wert abgezogen werden. Siehe hierzu die Herleitung in Anhang E.

5.4. Bestimmung der WDD - Werte mittels Lyssy- Methode

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte aus denselben Probenmustern wie bei den Normversuchen. Bei den diffusionsoffenen Materialien nach Tabelle 8 wurden die in Abbildung 17 dargestellten Aluminiumkarten, bei allen Diffusionsdichten Folien und Bahnen wurden die ebenfalls in Abbildung 17 dargestellten Großlochpappkarten verwendet. Bei allen Unterspannbahnmustern wurden die Proben von beiden Seiten mit Aluminiumkarten beklebt. Dies ist zwingend erforderlich, da sich sonst zu hohe Wasserdampfdurchlässigkeiten für die Proben ergeben. Grund dafür ist die Tatsache, dass es sich bei den Unterspannbahnen um Verbundprodukte, wie in Kapitel 2.1ff. beschrieben, handelt. Beim Aufkleben der Vlieskaschierten Unterspann- Unterdeckbahnen kommt es somit lediglich zu einem Kontakt zwischen Aluminium und Vlies. Die eigentliche Funktionsschicht (Filme und Beschichtungen nach Kapitel 2.1.2) wird nicht flächig mit der dampfsperrenden Schicht (Aluminium) verbunden. Dadurch werden die Ergebnisse verfälscht, denn es strömt bereits bei der Rücktrocknung der Messkammer Wasserdampf vollflächig durch die Filmschicht, sammelt sich unter der Aluminiumkarte und kann dann während der Messung durch die Perforationen in die Messkammer einströmen (siehe hierzu Abbildung 31). Dadurch wird die Messzeit zur Erhöhung der Feuchtigkeit in der oberen Kammer entscheidend verkürzt, dies führt zu großen Abweichungen in den Ergebnissen. Bei Beschichtungen kann auch eine Aluminiumkarte ausreichend sein, wenn die Beschichtung direkt auf die Trägerkarte aufgeklebt wird. Hierdurch können sich dann keine Umströmungen ergeben.

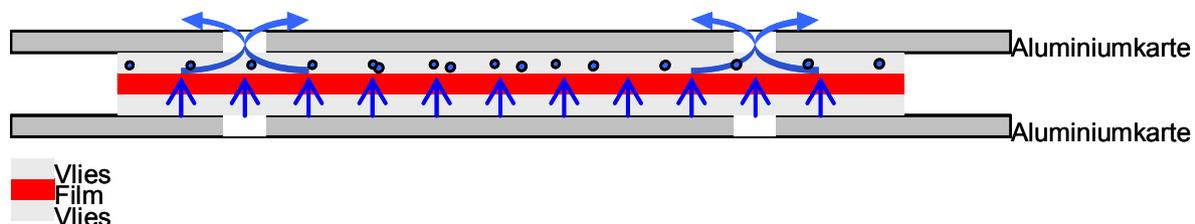


Abbildung 31 Probenumströmung

In welcher Größenordnung sich diese Abweichungen bewegen kann den Messergebnissen für das Unterspannbahnmuster aus Österreich im Anhang D entnommen werden, denn hier wurden die ersten beiden Proben ohne zweite Aluminiumkarte geprüft. Dieser Zusammen-

hang ist häufig die Ursache für die starke Abweichung zwischen den Herstellerwerten und den von unabhängiger Seite gravimetrisch bestimmten WDD- Werten an dem gleichen Material. Dies kann durch eine persönliche Beobachtung in der Qualitätsüberwachung bei einem Namenhaften deutschen Unterspannbahnhersteller bestätigt werden.

Bei den diffusionsoffenen Materialien wurde das Lyssy-Gerät mit einer Goretexmembran geeicht. Bei den Diffusionsdichten Stoffen erfolgte die Eichung durch eine vom Gerätehersteller mitgelieferte PET-Folie. Für beide Eichstandards werden Wasserdampfdiffusionsstromdichten bei folgenden Randbedingungen angegeben:

23°C bei Δ r.F. 85% und 38°C bei Δ r.F. 90%.

Bei dem diffusionsoffenen Material wird zusätzlich in Anlehnung an die DIN EN ISO 12572 noch eine Diffusionsstromdichte bei 23°C und 93/50 % relativer Feuchte mitgeliefert. Diese wurde zuvor von einem zertifizierten Laboratorium im März 2004 mittels der Gravimetrischen Methode ebenfalls nach der o.g. und unter [N14] aufgeführten Norm festgestellt und dokumentiert. Die Rahmenparameter bei der Eichstandardmessung sind durch einen mitgelieferten Prüfbericht schriftlich offen gelegt.

Die hierin aufgeführten Prüfparameter entsprechen den in der Norm aufgeführten Bedingungen, wobei die Luftströmung oberhalb der Prüflinge nicht den in [N14] Anhang G aufgeführten Anforderungen entsprach. Der Eichstandard wurde bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,12 m/s bestimmt. Diese Geschwindigkeit liegt im Bereich zwischen 0,02 - 0,3 m/s und entspricht somit [N14] Absatz 5e.

Beim Eichstandard für dichte Stoffe liefert der Hersteller nur Wasserdampfdiffusionsstromdichten für den Partialdampfdruck von 0/85 %, da hier der häufigste Messbereich dichter Folien liegt, siehe hierzu DIN EN ISO 12572 Klima B und DIN 53122-Teil 1 Klima E. Aus diesem Grund wurde die Wasserdampfdiffusionsstromdichte bei 23°C und 50/93 % r.F., die in den Normprüfungen am Materialmuster PET 19 μ m festgestellt wurde, für die Eichung herangezogen. Da es sich bei dem PET-Muster bei der Normprüfung um vom Hersteller gelieferte Eichfolie handelt stellt dies keine Abweichung von den sonstigen Eichverfahren des Lyssy- Gerätes dar. Die Einstellungen an der Prüfmaschine können der nachfolgenden Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12 Geräteeinstellungen während der Messung

Eichstandard	Goretex	PET
Wasserdampfdiffusionsstromdichte	557,02 g/m ² xd	4,56 g/m ² xd
Range/Sensorbereich	35	35
Obere Messgrenze	967	967
Untere Messgrenze	933	933
Untertrocknungszyklen (No. of Underdrys)	1	-
Untertrocknungsbereich (Underdry)	15	15
Auslaufbereich	15	15
Leckagerate	0,00 g/m ² xd	0,00 g/m ² xd
Toleranzbereich	1,0%	1,5%
Anzahl der Wiederholungen	8	8
Feuchtekompensation	-	1
Temperatur	23,0	23,0

Die obere und untere Messgrenze entsprechen 48 und 49 % relativer Luftfeuchtigkeit. Der Untertrocknungsbereich und auch der Auslaufbereich wurden mit 0,45 % r.F. festgelegt. Bei den Messungen wurde nach jedem Probenwechsel, es wurden von jedem Material 5 Proben geprüft, darauf geachtet, dass nach dem Trocknungszyklus die Feuchte in der oberen Kammer immer im Auslaufbereich bei 904-906 Anzeigeeinheiten zum Stehen kam und sich die Feuchte danach langsam wieder erhöhte. Daraus resultiert, dass die maximale Unterschreitung der Untergrenze 0,75 % r.F. betrug. Inwieweit zwischen den einzelnen Proben die Trockenluftzufuhr verändert werden musste, kann nur mit Hilfe der Umdrehungen an den beiden Einstellungsventilen beschrieben werden. Die während des Versuches vorgenommenen Einstellungen sind im Anhang D aufgeführt.

5.4.1. Prüfungsergebnisse nach Lyssy

Alle gemessenen Werte der diffusionsoffenen Materialien nach Tabelle 8 (1-4,9,10) sind im Vergleich zu einem Stoff (in diesem Fall Goretex) mit einer Wasserdampfdurchlässigkeit von 557,02 g/m²xd geprüft worden. In Tabelle 13 sind die in Anhang D aufgeführten Versuchsergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 13 Lyssy-Ergebnisse Eichstandard Goretex

Material	s _d -Wert [m]	WDD-Wert [g/m ² xd]	Probendicke [mm]
Österreich / Nicofol	0,055	307,85	0,4800
Tyvek Solid	0,136	149,11	0,2400
Italien	0,060	287,90	0,5600
Deutschland / Seco 4000	0,090	208,09	0,5600
BWK TypeF	34,041	0,68	0,4600
Seco 400	7,441	3,14	0,2500
PET 19 µm	-	-	0,0137
PET 36 µm	4,970	4,61	0,0183
Atmungsaktiver Film	0,069	258,78	0,0154
Goretex Anfangsmessbereich	0,02	579,92	0,0075
Goretex Gesamtmessbereich	0,02	579,92	0,0075

Die Diffusionsdichten Stoffe Seco 400, PET 36 µm und BWK Type F sind mit dem in Kapitel 5.1 beschriebenen und nach Norm geprüften PET 19 µm- Muster verglichen worden. Die bei der Normprüfung festgestellte Diffusionsstromdichte wurde als Eichmaßstab in die Maschinensteuerung eingegeben.

5.5. Vergleich der Prüfungsergebnisse

Da die Luftfeuchtigkeit in der Feuchtkammer des Lyssy-Gerätes nur durch das destillierte Wasser bestimmt wird, sollte theoretisch eine Luftfeuchtigkeit von 100 % unterhalb der Proben vorliegen. Da aber bei Voruntersuchungen in Zusammenarbeit mit [D] festgestellt wurde, dass die Feuchtigkeit, die an dem Prüfmuster anliegt, zwischen 95 und 98 % beträgt, wurde zum Vergleich der Ergebnisse aus beiden Verfahren ein Feuchtigkeitsgefälle in der Maschine von 96,7 % zu 48,5 % vorgegeben. Damit beträgt die Partialdruckdifferenz, die der Diffusion in der Maschine zugrunde liegt, 1359 Pa und ist somit um 12,56 %, was 151,63 Pa entspricht, größer als bei dem Normversuch. Somit müssten sich bei den Lyssy Ergebnissen höhere Werte als bei der Normmethode ergeben.

Tabelle 14 Prozentuale Abweichung der Ergebnisse zwischen Normprüfung und Lyssy- Methode

Nr	Material	Einheit	Norm - Ergebnis		Lyssy - Ergebnis		Prozentuale Abweichung	
			WDD [g/m ² xd]	s _d -Wert [m]	WDD [g/m ² xd]	s _d -Wert [m]	WDD [%]	s _d -Wert [%]
1	Österreich / Nicofol		459,07	0,03	307,85	0,055	-33	83
2	Tyvek Solid		285,92	0,05	149,11	0,136	-48	172
3	Italien		409,70	0,03	287,90	0,060	-30	100
4	Deutschland / Seco 4000		220,14	0,08	208,09	0,090	-5	13
5	BWK TypeF		0,81	25,91	0,68	34,041	-16	31
6	Seco 400		3,02	6,96	3,14	7,441	4	7
7	PET 19 µm		4,45	4,48	-	-	-	-
8	PET 36 µm		4,48	4,56	4,61	4,970	3	9
9	Atmungsaktiver Film		423,16	0,03	258,78	0,069	-39	130
10	Goretex Anfangsmessbereich		752,03	0,01	579,92	0,02	-23	100
11	Goretex Gesamtmessbereich		686,47	0,01	579,92	0,02	-16	100

Beim Vergleich der Werte liegt aber genau das Gegenteil vor. Hier sind die Wasserdampfdiffusionsstromdichten in fast allen Fällen niedriger als bei der Normprüfung. Die geringsten Abweichungen bei WDD und s_d-Wert ergeben sich bei den Diffusionsdichten Stoffen PET 36µm und der beschichteten Dampfsperre Seco 400. Die prozentualen Abweichungen sind bei der diffusionsdichten USB BWK Type F und Seco 4000 zwar schon erhöht, bei Betrachtung der dazugehörigen Absolutwerte hingegen, handelt es sich bei den WDD- Werten nur um geringe Abweichungen. Die geringeren Unterschiede bei den dichteren Materialien lassen sich darauf zurückführen, dass hier die bei der gravimetrischen Diffusionsprüfung festgestellten Werte als Eichstandard benutzt wurden. Somit lagen beim Eichstandard für die Maschine dieselben Randbedingungen wie bei den Normprüfungen vor.

Es zeigen sich aber auch bei dem gleichen Material Unterschiede zwischen Normergebnis und Lyssy- Prüfung. Da die Lyssy- Maschine mit einem Goretex- Standard geeicht wurde, dürften sich gerade bei den Vergleichswerten mit den nach Norm gemessenen Werten keine, oder zumindest nur geringe Unterschiede zeigen. Dies ist aber nicht der Fall, was die die Abweichungen von 16 und 23 % bei der Diffusionsstromdichte zeigen. In absoluten Zahlen handelt es sich um einen Massenunterschied von ca.130g Wasserdampf pro Quadratmeter und Tag beim Vergleich zwischen Probennummer 11 und dem Eichstandard.

Es zeigt sich also bereits ein Unterschied zwischen den in unterschiedlichen Laboratorien gravimetrisch bestimmten Wasserdampfdiffusionsstromdichten bei dem Eichmaterial. Da von beiden Prüfungen die Randbedingungen bekannt sind, kommen für die Abweichung nur die nachfolgenden Ursachen in Betracht.

Da die Luftgeschwindigkeit bei den hier durchgeführten Untersuchungen zwischen 0,1 und 0,16 m/s lag und diese bei der Bestimmung des Herstellereichstandards mit 0,12 m/s gemessen wurde, könnte diese Tatsache die Wasserdampfdiffusionsstromdichte erhöht haben. Zumal es sich bei den angegebenen Werten nur um Mittelwerte handelt, und bei länger andauernder Überströmung mit höheren Geschwindigkeiten sich die WDD- Werte kontinuierlich erhöhen.

Eine weitere Ursache könnte in der Probenherstellung liegen. Da die Goretex- Prüflinge bei der hier durchgeführten Versuchsreihe glatt über die Prüfgefäße gespannt wurden, könnten sich bei höherer Dehnung des Materials die produkteigenen Fehlstellen/Undichtigkeiten noch vergrößert haben und würden somit den Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion verringern.

Als letzter Unterschied zwischen den gravimetrischen Messungen kann die Prüffläche angeführt werden. Diese betrug bei den hier durchgeführten Versuchen die nach Norm mindestens vorgeschriebenen 50cm². Bei der Bestimmung des Herstellereichstandards wurde mit einer Prüffläche von 200cm² gemessen. Bei anderen Untersuchungen, beschrieben in [4], wurden die Diffusionsflächen sogar auf die Abmaße von 250 x 500 mm vergrößert. Hiermit sollte sichergestellt werden, dass die Ungleichmäßigkeiten des zu untersuchenden Stoffes ausgeglichen werden.

Aufgrund der Überlegung, dass sich bei Summation des zwischen den unterschiedlichen Laboratorien gemessenen Massenunterschiedes bei den Goretex-Materialien theoretisch bessere Ergebnisse zeigen müssten, wurde die Differenz auf die Messwerte der untersuchten Proben aufgeschlagen. Die sich dann ergebenden Messwerte sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15 Korrigierte Lyssy-Messwerte

Nr	Material	Einheit	Norm - Ergebnis		Lyssy – Ergebnis korrigiert um Δ -Eichstandard	Prozentuale Abweichung
			WDD [g/m ² xd]	s _d -Wert [m]	WDD [g/m ² xd]	WDD [%]
1	Österreich / Nicofol		459,07	0,03	437,3	-5
2	Tyvek Solid		285,92	0,05	278,56	-3
3	Italien		409,70	0,03	417,35	2
4	Deutschland / Seco 4000		220,14	0,08	337,54	53
5	BWK TypeF		0,81	25,91	-	-
6	Seco 400		3,02	6,96	-	-
7	PET 19 µm		4,45	4,48	-	-
8	PET 36 µm		4,48	4,56	-	-
9	Atmungsaktiver Film		423,16	0,03	388,23	-8
10	Goretex Anfangsmessbereich		752,03	0,01	709,37	-6
11	Goretex Gesamtmessbereich		686,47	0,01	709,37	3

Hierbei ergeben sich bis auf das USB-Muster Seco 4000 nur noch geringe Abweichungen zwischen den Messwerten, wobei die nach Lyssy gemessenen Werte größtenteils noch geringer sind als die nach Norm gemessenen Werte. Dies ist vor dem Hintergrund des größeren Partialdrucks im Sensorgesteuerten Messgerät nicht verständlich.

Nachdem diese Ergebnisse vorlagen wurden nochmals Lyssy- Messungen an den Originalproben durchgeführt. Diese konnten durch vorsichtiges Ausbauen nach den Normprüfungen wiedergewonnen werden. Die Proben

- USB Österreich Probe 5
- USB Tyvek Probe 10
- USB Italien Probe 11
- USB Deutschland Seco 4000 Probe 20

wurden nach der Eichung des Lyssy- Gerätes mit dem vom Hersteller mitgelieferten Eichstandard gemessen. In Tabelle 16 sind zum Vergleich die WDD- und s_d -Werte aus der Normprüfung und der so durchgeführten Lyssy- Messung sowie die prozentuale Abweichung aufgeführt. In Tabelle 17 sind die Lyssy- Werte um die Differenz der Eichstandards korrigiert und mit den Normwerten der Originalmuster verglichen.

Tabelle 16 Vergleich der Lyssy- und Norm- Ergebnisse (Eichung durch Herstellereichstandard) an denselben Probenstücken

Material	Normergebnisse der Einzelproben		Lyssy –Ergebnisse ohne Verbesserung		Prozentuale Abweichung	
	s_d -Wert [m]	WDD-Wert [g/m ² xd]	s_d -Wert [m]	WDD-Wert [g/m ² xd]	s_d -Wert [%]	WDD-Wert [%]
Österreich / Nicofol P5	0,03	467,25	0,055	307,90	83	-34
Tyvek Solid P10	0,06	244,68	0,148	136,98	143	-44
Italien P11	0,03	413,17	0,049	332,01	63	-20
Deutschland / Seco 4000 P20	0,06	242,45	0,080	228,93	33	-6

Tabelle 17 Vergleich zwischen korrigierten Lyssy- Ergebnissen und den Normergebnissen an den selben Probenstücken

Material	Normergebnisse der Einzelproben		Lyssy –Ergebnisse korrigiert um Δ -Eichstandard		Prozentuale Abweichung	
	s_d -Wert [m]	WDD-Wert [g/m ² xd]	s_d -Wert [m]	WDD-Wert [g/m ² xd]	s_d -Wert [%]	WDD-Wert [%]
Österreich / Nicofol P5	0,03	467,25	-	437,3	-	-6
Tyvek Solid P10	0,06	244,68	-	278,56	-	14
Italien P11	0,03	413,17	-	417,35	-	1
Deutschland / Seco 4000 P20	0,06	242,45	-	337,54	-	39

Auch hier zeigt sich wieder eine Ergebnisverbesserung nach der Korrektur mit dem Differenzbetrag der Eichstandards. Es ergaben sich, erwartungsgemäß in drei von vier Fällen größere Abweichungen als bei den Durchschnittswerten in Tabelle 15. Es ist anzumerken, dass sich diesmal bei den Lyssy- Prüfungen an den Originalmustern höhere WDD- Werte ergeben als bei den Normprüfungen, dies könnte an der im Gerät erhöhten Partialdruckdifferenz liegen.

Aufgrund der besseren Übereinstimmungsergebnisse zwischen den korrigierten Eichwerten und den mittels Lyssy gemessenen Werten wurde ein letzter Versuch durchgeführt. Hierzu

wurde die Maschine mit dem nach der Gravimetriemethode bestimmten Goretex- Durchschnittswert geeicht. Im Anschluss an die Eichung wurden erneut die Originalproben der vier o.g. diffusionsoffenen Unterspannbahnen in das Prüfgerät eingelegt.

Hierbei zeigten sich entgegen den Erwartungen, und den Resultaten bei dichten Materialien (s.o.) erneut höhere Abweichungen zwischen den Maschinenwerten und den gravimetrisch ermittelten Wasserdampfdiffusionsstromdichten.

Tabelle 18 Vergleich der Norm- und Lyssy- Werte nach der Maschineneichung mit den WDD-Werten der Goretexmembran aus der MPA- Normmessung

Material	Normergebnisse der Einzelproben	Lyssy -Ergebnisse	Prozentuale Abweichung
	WDD-Wert [m]	WDD-Wert [g/m²xd]	WDD [%]
Österreich / Nicofol P5	467,25	405,77	-13
Tyvek Solid P10	244,68	157,00	-36
Italien P11	413,17	365,53	-12
Deutschland / Seco 4000 P20	242,45	156,38	-36
Goretex Muster P46	686,47 bis 752,03	709,28	6 bis -6

Die Lyssy- Messungen ergeben mit Ausnahme des Unterspannbahnmusters aus Deutschland immer höhere Diffusionsstromdichten, da diese auch beim Eichstandard höher war. Somit muss bei der Lyssy- Messung des Seco 4000-Musters ein Messfehler aufgetreten sein. Dieser Versuch muss daher von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden.

Auch wenn die prozentualen Abweichungen bei allen WDD- Messungen über der 10-Prozentmarke liegen, muss doch immer berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um kleine Absolutbeträge in der Wasserdampfdiffusionsstromdichte handelt.

Im Bezug auf den letzten Versuch fällt bei Betrachtung der Relation zwischen Steigerung der Durchlässigkeit des Eichstandards und der Durchlässigkeit der Proben auf, dass diese in keinem Fall eine annähernde Übereinstimmung zeigen. Während die Diffusionsstromdichte des Eichstandards zwischen Herstellerwert und dem in der MPA gemessenen Normwert um 23 % ansteigt und mit dieser Abweichung in die Prüfmaschine eingegeben wurde, beträgt die Steigerungsrate bei den Proben zwischen Lyssy- Messung nach Eichung mit dem mitgelieferten Herstellerwert und Lyssy –Messung nach Eichung mit den in der gravimetrischen Versuchsreihe bestimmten Goretex- Werten einmal 32 %, einmal 15 % und einmal 10 %.

Die Abweichungen zwischen dem Goretex- Eichstandard und den gemessenen Proben verhalten sich bei beiden Eichungen des Gerätes relativ gleich, siehe hierzu das Δ^1 in Tabelle 19. Somit sind die Steigungsverhältnisse zwischen Standard und Proben als gleich bleibend anzusehen.

Tabelle 19 Lyssy- Messwerte der Proben bei unterschiedlichem Eichstandard

	Lyssy- Messwerte nach Eichung mit Hersteller Eichstandard		Lyssy- Messwerte nach Eichung mit MPA Eichstandard
Goretex	557,02	⇒Δ 23%⇒	686,47
Österreich / Nicofol P5	307,85	Δ ¹ 44,73%	405,77
Tyvek Solid P10	149,11	Δ ¹ 73,23%	157,00
Italien P11	287,9	Δ ¹ 48,31%	365,53

Diese Tatsache zeigt, dass die Messergebnisse der Lyssy- Messungen nur von dem verwendeten Eichstandard abhängen. Die Abweichungen zwischen den Probenergebnissen nach Lyssy und nach Gravimetrie sind im Wesentlichen ebenfalls von dem Eichstandard abhängig, da das Verhältnis zwischen Eichstandard und Probenmessung relativ konstant ist, auch bei Unterschieden zwischen dem Eichstandard.

6. Bewertung

Die Diffusionstransportmechanismen des Wassers durch die Folien nach Tabelle 8 mit den Nummern 1-4,9,10 können aufgrund ihrer Porengröße wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, den anliegenden Strömungen auf den Oberflächen bei der Normmethode wie auch nach der Untersuchungsmethode nach Lyssy dem Bereich der reinen Wasserdampfdiffusion zugerechnet werden. Bei genauerer Betrachtung überlagern sich hier aber drei Wassermolekülbewegungen, denen bei aufstellen der Wasserdampfdiffusionsstromdichte wie folgt Rechnung getragen werden kann:

$$m = D_D \times \frac{\Delta c}{\Delta x} + D_L \times \frac{\Delta c}{\Delta x} + K_S \quad (25.)$$

D_D = Diffusionskoeffizient für Wasserdampf in Luft

D_L = Diffusionskoeffizient für Wasser (gelöst) in Polymer

Δc = Konzentrationsunterschied zwischen den anliegenden Partialdrücken

Δx = Zurückzulegende Wegstrecke (Dicke des Diffusionsmedium)

K_S = Wassertransport durch Konvektion, bzw. durch zeitweilige Druckunterschiede zwischen den im Film befindlichen Partialdruck und dem Partialdruck an der Oberseite der Filme.

Durch Strömung an der Filmoberfläche, dessen Oberflächenstruktur nach [51] Einfluss auf die Diffusionsstromdichte hat, kommt es zu einem Gesamtdruckunterschied zwischen der Luft im Film und der über der Oberfläche befindlichen Luft. Es entsteht ein Unterdruck der den Wassertransport durch den Film hindurch beschleunigt. Zum einen können hierdurch die unterschiedlichen Bewegungsarten des Wassers nicht mehr voneinander unterschieden werden. Zum anderen erhöht sich der Feuchtigkeitsdurchsatz mittels Konvektion erheblich, siehe hierzu Kapitel 3.6. Nach den in Abschnitten 4.1, 4.2 und 4.3.6 behandelten Normen werden für diese Strömung eindeutige Werte vorgegeben.

Im Bezug auf das Einsatzgebiet der Unterspannbahnen im Steildach ist diese bei den Prüfungen der Bahnen anzusetzende Strömung sinnvoll. Vor dem Hintergrund das die ermittelten Werte in bauphysikalische Berechnungen und Planungen einfließen, sollte auf die Luftströmung bei der Prüfung verzichtet werden, da die dann ermittelten Werte auf der so genannten „Sicheren Seite“ liegen würden. In diesem Punkt der Luftströmung besteht somit noch abschließender Klärungsbedarf.

Bei den dichteren Materialien wie Nummer 5-8 aus Tabelle 8 handelt es sich nach [19] und [30] um die in Kapitel 3.3 beschriebene Lösungsdiffusion als Transportvorgang. Bei den beschichteten Materialien Seco 400 und BWK Type F könnten neben der Lösungsdiffusion auch die Effusion auftreten, da Vliese die Grundlage für die Beschichtung bilden. Aufgrund deren Unebenheiten der Vliesstoffoberfläche können sich bei den sehr dünnen Beschichtungen Poren ergeben, durch die dann Effusion stattfinden kann.

Bei der abschließenden Betrachtung der Vergleichsergebnisse zwischen den Messungen mit dem Verfahren nach Lyssy und den gravimetrischen Bestimmungen der Wasserdampfdiffusionsstromdichte lassen sich die nachfolgenden Feststellungen treffen.

- Jede Messung mit dem Verfahren nach Lyssy bedarf zuvor einer Eichung des Gerätes mit einem nach der normierten gravimetrischen Bestimmung gemessenen Eichstandard und dessen Wasserdampfdurchlässigkeit bei einer definierten Partialdruckdifferenz und Temperatur.
- Nur der Eichstandard entscheidet über die Diffusionsstromdichte der nachfolgend geprüften Muster. Als Eichstandard werden vom Maschinenhersteller zwei Folien mit unterschiedlicher Diffusionsoffenheit mitgeliefert. Ihre Wasserdampfdiffusionsstromdichte wurde zuvor bei verschiedenen Partialdruckgefällen und Temperaturen gravimetrisch bestimmt.
- Die Messung mittels Lyssy- Verfahren übernimmt alle Randbedingungen, die bei der Gravimetrie mit in das dortige Messergebnis eingeflossen sind. Dies hat den Vorteil, dass im Vergleich zu zwei unabhängigen gravimetrischen Messungen keine Abweichungen in den Rahmenparametern auftreten können.
- Nachteil des Lyssy- Gerätes ist, dass das in der Norm [N14] vorgegebene Klima C nicht genau nachzubilden ist. Der erste Grund hierfür ist die Obergrenze der Kalibrationskurve (Diagramm 2) des Sensors. Sie endet genau dort, wo der normierte Feuchtebereich beginnt. Der zweite Grund ist, dass die obere Normgrenze mit dem standardmäßigen Aufbau des Messgerätes nach Lyssy nicht einstellbar ist, weil in der unteren Messkammer theoretisch immer eine relative Feuchte von 100 % vorliegt.
- Bei den dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchen wurde die mit 48,5 % zu 96,9 % relativer Luftfeuchtigkeit maximal noch messbare Einstellung am Lyssy- Gerät gewählt. Der untere Wert wurde bei einer Voruntersuchung mit dem Maschinenhersteller festgestellt. Somit ergibt sich eine Partialdruckdifferenz zwischen den hier durchgeführten gravimetrischen und sensorgesteuerten Versuchen von 12,56%. Das höhere Feuchtegefälle liegt in der Maschine vor.
- Laut [51] bedeutet eine in normalem Laborbetrieb vorhandene Schwankung der relativen Feuchte von 2 – 3 Prozent, eine Unsicherheit von 5 % bei der Bestimmung des Messwertes. Diese wird mittels Umrechnungen auf die weiteren baupraktischen Kennwerte übertragen. Hierin sind noch keine Abweichungen aus der Zeiterfassung oder gravimetrische Fehler durch den Prüfer oder die Wägeinrichtung erfasst.
- Mit der hohen Feuchtigkeitsauflösung des Sensors im Lyssy- Messgerät ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte erreichbar. Aufgrund dieser Genauigkeit kann es aber bei falscher oder unsachgemäßer Einstellung des Gerätes bei den untersuchten, sehr diffusionsoffenen Materialien leicht zu größeren Abweichungen bezüglich der gravimetrischen Messungen kommen.
- Bei der Probenvorbereitung für die sensorgesteuerte Prüfung ist es zwingend erforderlich, die vlieskaschierten Proben von beiden Seiten mit einer Aluminiumkarte zu bekleben, da die sonst gemessene Wasserdampfdiffusionsstromdichte zu hoch ist.

Grund dafür ist, dass keine diffusionsdichte Verbindung zwischen der Aluminiumprüfkarte und dem Film innerhalb der Unterspannbahn hergestellt werden und die Diffusion durch die gesamte Fläche des Probenmusters erfolgen kann.

- Der mitgelieferte Eichstandard für diffusionsoffene Materialien wurde in der gravimetrischen Versuchsreihe nochmals mitbestimmt. Hierbei zeigten sich hohe Unterschiede zu dem vom Hersteller mitgelieferten Eichstandard. Somit soll an dieser Stelle festgestellt werden, dass das verwendete Goretex bereits bei der gravimetrischen Bestimmung zum Eichmaterial nach den hier durchgeführten Versuchen ein erhöhtes Schwankungsrisiko mitbringt. Diese Unterschiede werden durch das Lyssy Messverfahren auf die zu untersuchenden Stoffe übertragen.
- Bei Eichung des Gerätes mit unterschiedlichen Eichstandards bei zwei unterschiedlichen Messreihen an denselben Proben ist die Differenz bei beiden Messreihen zwischen Eichstandard und der jeweiligen Probe immer proportional zueinander.
- Als Unsicherheitsfaktor, bei der Messung diffusionsoffener Stoffe nach Lyssy, kann die stark reduzierte Prüffläche angesehen werden. Hierdurch könnten bereits kleine Fehlstellen oder Materialfehler erhebliche Abweichungen in den Wasserdampfdiffusionsstromdichten nach sich ziehen.
- Bei diffusionsdichten Stoffen zeigen sich beim Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren in den Wasserdampfdiffusionsstromdichten nur geringe Abweichungen. Bei der Umwandlung in die zugehörigen s_d -Werte werden diese geringen Unterschiede allerdings potenziert, sodass sich dadurch größere Abweichungen ergeben. Da als Eichstandard bei den dichteren Stoffen eine Wasserdampfdiffusionsdichte eingegeben wurde, die zuvor bei den gravimetrischen Versuchen im Laboratorium bestimmt wurde und dessen Ergebnisse an anderen Proben mit dem Lyssy-Verfahren bestätigt werden sollten, kann dies als Grund für die geringen Abweichungen angesehen werden.

7. Fazit und Ausblick

Im Bereich der Wasserdampfdiffusionsmessungen für diffusionsoffene Baustoffe, wie sie Unterspann- und Unterdeckbahnen im Steildach repräsentieren, sind zurzeit eine Reihe unterschiedlicher Messverfahren in der Anwendung. Der überwiegende Teil hiervon wird von der Industrie zur Qualitätskontrolle und zur Produktentwicklung/-weiterentwicklung genutzt. Einzelne Messverfahren werden aber auch in Forschungseinrichtungen oder Hochschulen angewandt. Alle vorgestellten Systeme, mit einer Ausnahme, folgen im Wesentlichen mit ihrem Messprinzip den in Normen festgelegten Verfahren oder greifen auf Messergebnisse, die nach diesen Verfahren gewonnen wurden, zurück. Die Ausnahme bildet das Diodenlaserspektrometer, mit dem über Lichtabsorption das Wasserdampfkonzentrationsgefälle über und unter der Folie bestimmt wird, woraus sich dann über physikalische Zusammenhänge der Diffusionsstrom berechnen lässt.

Als Normengrundlage für die automatisierten Systeme dient die DIN 53122 Teil 2 und die DIN EN ISO 12572. Bei der Ersten wird die Durchlässigkeit durch ein Messsystem mittels Elektrolyse bestimmt. Die Zweite und international weit verbreitete Norm beschreibt das gravimetrische Verfahren. Die hierbei gemessenen Werte stellen für viele maschinelle Messsysteme die Grundlage dar. Auch für das in dieser Arbeit ausführlich behandelte und zum Vergleich mit DIN EN ISO 12572 vorgestellte Verfahren nach Dr. Lyssy stellen gravimetrisch bestimmte Eichfolien die Grundlage zur Feststellung der Diffusionsoffenheit von Materialien dar.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Vergleichsuntersuchungen zwischen dem Verfahren nach Lyssy und dem normierten gravimetrischen Wasserdampfdiffusionsverfahren zeigten sich Gemeinsamkeiten, aber auch Differenzen.

Bei den diffusionsoffenen Unterspann- und Unterdeckbahnen konnte mit den durchgeführten Versuchen festgestellt werden, dass die Ergebnisse einzig von dem eingesetzten Eichstandard und dessen Wasserdampfdiffusionsstromdichte abhängig sind. Grundsätzlich kann als Eichstandard jede Art von Material verwandt werden, wobei dies möglichst in der Diffusionsoffenheit mit den zu prüfenden Stoffen übereinstimmen sollte. Bei dem vom Hersteller mitgelieferten Material handelt es sich um Goretex, was diese Anforderung in Bezug auf alle am Markt erhältlichen Unterspann- und Unterdeckbahnen erfüllt.

Die Randbedingungen, die bei der gravimetrischen Bestimmung des Eichstandards geherrscht haben, werden zwar nicht vom Lyssy-Gerät nachgebildet, sind aber als Beeinflussung in der Wasserdampfdiffusionsstromdichte enthalten, mit der die Maschine programmiert wird. Somit können Ergebnisse aus der Lyssy-Maschine nur mit gravimetrischen Messungen an ein und demselben Material verglichen werden, wenn die Proben im selben Labor geprüft werden, wo vorher bereits der Eichstandard bestimmt wurde. Ansonsten können sich, wie auch die Versuche gezeigt haben, zu große Unterschiede zwischen den Lyssy-Ergebnissen und einer gravimetrischen Messung an ein und demselben Material ergeben.

Wenn die Hersteller die Lyssy- Methode als Qualitätskontrollmechanismus einsetzen wollen, wofür sie als gut geeignet bezeichnet werden kann, sollten sie ihren Eichstandard in demselben Prüflabor bestimmen lassen, indem sie später ihre entwickelten und produzierten Produkte nach Norm zertifizieren lassen.

Bei den Versuchen an den diffusionsdichten Folien wurde ein Material als Eichstandard eingesetzt, dass zuvor unter den gleichen klimatischen Randbedingungen mit allen anderen Materialien zusammen gravimetrisch geprüft wurde. Somit unterlagen der Eichstandard und die gravimetrischen Proben der zu untersuchenden Materialien den gleichen Randbedingungen, da sie in demselben Labor geprüft wurden. Hiernach ließen sich mit dem „Lyssy-Verfahren“ die nach Norm gravimetrisch bestimmten Werte gut reproduzieren, wobei hier nur die bestimmte Wasserdampfdurchlässigkeit als Vergleichsmaßstab herangezogen werden sollte, und nicht der nach Umrechnung ermittelte baupraktische s_d -Wert, da sich dann die geringen Abweichungen mit der Dicke vervielfachen würden.

Als weitere Verbesserung dieser Kontroll- und Überwachungsmöglichkeit sollte das eigene Produkt als Eichmaß für die Lyssy- Prüfmaschine genommen werden. Hierdurch könnten Differenzen aufgrund von Materialabweichungen zwischen Eichstandard und Probenmaterial verhindert werden.

Nachdem beim Produktionsprozess eine gewisse Stabilität erreicht wurde, sollte anhand einer großen Anzahl von Prüflingen dessen Diffusionsstromdichte nach dem in der DIN EN ISO 12572 normierten gravimetrischen Verfahren festgestellt werden. Nach verschiedenen Quellen [4] [28] [19] sollte diese Bestimmung allerdings an größeren Proben als sie die Norm vorsieht durchgeführt werden. Hierdurch würden vorhandene Materialfehler geringere Auswirkungen auf die Messergebnisse haben. In dem Labor, wo die Materialien geprüft worden sind, sollte später auch die Zertifizierung des Produkts stattfinden. Neben der Probengröße sollte bei den gravimetrischen Bestimmungen noch auf die vorhandene Luftgeschwindigkeit oberhalb der Proben geachtet werden. Nach Norm sind hier mehr als 2 m/s gefordert. Da nicht explizit vorgegeben ist wie viel mehr Strömung zu herrschen hat und nach [19] [51] und [21] die Strömungsgeschwindigkeit bei der gravimetrischen Prüfung entscheidenden Einfluss auf die Wasserdampfdiffusionsstromdichte eines Stoffes hat, muss im Vorfeld festgelegt werden, welche Luftgeschwindigkeiten hier sinnvoll sind. Hierbei könnte z. B. auf die in [29] beschriebenen oder andere, ähnliche Untersuchungen zurückgegriffen werden.

Um die Übergangswiderstände die bei den gravimetrischen Prüfungen vorhanden sind, zu erfassen, müssten zusätzlich noch Untersuchungen nach dem in Kapitel 4.3.6 beschriebenen Mehrlagenverfahren durchgeführt werden. Die ermittelten Werte könnten dann auch von den Ergebnissen mit dem Lyssy- Verfahren abgezogen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Luftströmung oberhalb der Proben beim Mehrlagenverfahren und den normierten Prüfungen gleich gewesen ist.

Bei Produktneuentwicklungen könnten neben den gravimetrisch gemessenen Standardprodukten einer Firma auch andere Materialien als Eichstandard dienen. Deren gravimetrische Bestimmung sollte aber unter denselben Randbedingungen und in demselben Laboratorium stattfinden wie die der Standardprodukte.

8. Literaturverzeichnis

8.1. Normen

- [N1] DIN 4102-1 – 05/1998 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [N2] DIN 4108-3 – 07/2001 Wärmeschutz und Energie-Einsparung bei Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz Anforderungen Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [N3] DIN V 4108-4 – 04/2002 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
- [N4] DIN 4108-7 – 08/2001 Wärmeschutz und Energie-Einsparung bei Gebäuden – Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planung und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele
- [N5] DIN 5491 – Stoffübertragung. Diffusion und Stoffübergang. Grundbegriffe, Größen Formelzeichen, Kenngrößen
- [N6] DIN 52615 – 11/1987 Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen
- [N7] DIN 53122-1 – 08/2001 Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Gravimetrisches Verfahren
- [N8] DIN 53122-2 – 08/2001 Prüfung von Kunststoff-Folien, Elastomerfolien, Papier, Pappe und anderen Flächengebilden – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Elektrolyse-Verfahren
- [N9] DIN 68800-2 – 05/1996 Holzschutz- Vorbeugende bauliche Maßnahmen
- [N10] DIN EN 1931 – 03/2001 Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [N11] DIN EN 12524 – 07/2000 Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften, Tabellierte Bemessungswerte
- [N12] DIN EN 13501-1 – 06/2002 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten
- [N13] DIN EN ISO 6946 – 11/1996 Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchlasskoeffizient – Berechnungsverfahren

- [N14] DIN EN ISO 12572 – 09/2001 Wärme - und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [N15] DIN EN ISO 12571 – 09/2001 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfabsorption
- [N16] ISO 15106-1 – 01/2003 Kunststoffe; Filme und Folien – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit : Feuchtenachweis-Sensorverfahren
- [N17] ISO 15106-2 – 01/2003 Kunststoffe; Filme und Folien – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit : Infrarotnachweis-Sensorverfahren
- [N18] ISO 15106-3 – 01/2003 Kunststoffe; Filme und Folien – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit : Elektroytnachweis-Sensorverfahren
- [N19] BS 2782-8 – 05/1995 Flächenbeschichtete Werkstoffe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
Methode 820A Gravimetrisches (Schalen)-Verfahren
Methode 822A Täschen-Verfahren
- [N20] BSI-Technical Committee – 05/1990, Water vapour control membranes, Appendix B and C
- [N21] JIS A 1324 Japanese Industrial standard Measuring method of water vapour permeance for building materials
- [N22] JIS A 1470-1 – 2002 Testmethod of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity
- [N23] ÖNorm B 3690 – 11/1990, Kunststoff-Dachunterspannbahnen Begriffsbestimmungen, Anforderungen, Prüfungen, Normkennzeichnung

8.2. Literatur

- [1] Albrecht W., Fuchs H., Kittelmann W., Vliesstoffe – Rohdichte, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung, Wiley-VCH- Verlag 2000
- [2] BBS – Untersuchungen an Unterspannbahnen
- [3] Buss H., Aktuelles Tabellenhandbuch – Feuchte, Wärme, Schall, Weka-Baufachverlag 1994
- [4] Cammerer J., Alberti R., Untersuchungen an Unterdeck- und Unterspannbahnen, wksb 45 2000, Seite 11-16
- [5] Domininghaus H., Die Kunststoffe und Ihre Eigenschaften, VDI Verlag 1992, 4. Auflage

- [6] Fachregel für Dachdeckungen mit Dachziegeln und Dachsteinen - Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZDVH) 1997/2000
- [7] Franke F., Vortrag über Folien im Rahmen der Rosenheimer Kunststofftage 1999
- [8] Garden G.K., Thermische Betrachtungen in der Dachausführung, Canadian bulding digest 1965
- [9] Gertis K., Vortrag Dach und Wand 1991, Nürnberg
- [10] Großkinsky Th., Gottschling H., Sedlbauer K., Leimer H.-P., Durchfeuchtungsgefahr bei nicht ausgebauten Dachgeschossen, IBP-Mitteilung 379, 27/2000
- [11] Großkinsky Th., Sedlbauer K., Höhere Luftdichtheit durch Verklebung der Überlappungen einer Unterdeckbahn?, IBP-Mitteilung 396, 29/2002
- [12] Grundregeln für Dachdeckungen, Abdichtungen und Außenwandbekleidungen - Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZDVH) 1997
- [13] Hens H., Luft-Winddichtigkeit von geneigten Dächern : Wie sie sich wirklich verhalten, Bauphysik 13 1991, Heft 5 Seite 151-152
- [14] Hohmann R, Bestimmung der Feuchtepufferfunktion von Innenputzen, Dissertation Universität GH Essen 1996
- [15] Kießl K., Kapillarer- und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Dissertation Universität GH Essen 1983
- [16] Kießl K., Gertis K., Feuchtetransport in Baustoffen, eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene, Universität GH Essen 1996
- [17] Kießl K., Leonhardt H., Einfache Messung der Diffusionsoffenheit von Gesteinsoberflächen vor Ort, IBP-Mitteilung 190, 17/1990
- [18] Kinsella J., Untersuchungen von Dachmembranen bei Temperaturlaussetzung im geneigten Dach, WebDynamics / Conultec 12/2000
- [19] Klopfer H., Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, Bauverlag GmbH Wiesbaden/Berlin 1974
- [20] Klopfer H., Die Diffusion von Wasser in Polymeren, Ergebnisse von Sorptions- und Permeations-Versuchen, defazet-akuell Jahrg.26, Heft 6, 1972 Seite 299-309
- [21] Krischer O., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer-Verlag, 3. Auflage, 1978
- [22] Krus M., Feuchtetransport und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe, Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken, Dissertation Universität Stuttgart 1995

- [23] Krus M., Fitz C., Bestimmung des Diffusionswiderstandes extrem diffusionsoffener Folien, IBP Mitteilung 362, 27/2000
- [24] Künzel H., Nicht belüftet, voll gedämmt: Die beste Lösung im Steildach!, wksb 27 1989, Seite 1-7
- [25] Künzel H., Kann bei Steildachkonstruktionen auf eine Dampfsperre verzichtet werden?, Bauphysik 18 1996, Seite 7-9
- [26] Künzel H., Sedlbauer K, Steildächer – feuchte und wärmetechnische Ausbildung, Bauphysik-Kalender 2001, Seite 459-482
- [27] Künzel H., Bernhardt P., Wasserdampfdiffusion in Baustoffen und Bauteilen, Berichte aus der Bauforschung, Heft 80, Verlag Ernst&Sohn 1973
- [28] Liersch K.W., Methoden zur Bestimmung des s_d -Wertes von extrem diffusionsoffenen Materialien, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Baukonstruktion und Bauphysik
- [29] Liersch K., Strömungsmechanische Untersuchungen an einem belüfteten Steildach, Teil I und Teil II, Ges- Ing. 101 1980 Heft 1/2 Seite 13-20 und Heft 3 Seite 116-124
- [30] Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf, Petzold, Lehrbuch der Bauphysik – Schall - Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima, Teubner Verlag, 5. Auflage 2002
- [31] Merkblatt Wärmeschutz bei Dächern - Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZDVH) 1997
- [32] Merkblatt für Unterdächer, Unterdeckungen und Unterspannungen - Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks (ZDVH) 1997
- [33] Produktdatenblätter des Regelwerkes des Dachdeckerhandwerks
- [34] Schirmer B., Hochaufgelöste Wasserdampfdetektion mittels Diodenlaser-Absorptionspektroskopie, Dissertation Universität Erlangen Nürnberg 2001
- [35] Schirmer B., Durst F. Eine Meßmethode zur Bestimmung der Dampfdurchlässigkeit von Dampfsperren und Unterspannbahnen, Bauphysik 24 2002, Heft 5, Seiten 265-272
- [36] Schirmer R., Diffusionszahl von Wasserdampf-Luftgemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit, VDI, Verfahrens-Technik 1938 Heft 6, S.170-177
- [37] Schulze H., Geneigte Dächer ohne chemischen Holzschutz?, wksb 27 1989, Seiten 8-17
- [38] Schulze H., Hausdächer in Holzbauart, Werner Verlag 1984
- [39] Schulze H., Holzschutz baulich, chemisch, bekämpfend - Kommentar zur DIN 68800-2-3-4, DIN + DGfH, Beuth-Verlag 1998

- [40] Schulze H., Dampfsperren in Holzaußenbauteilen – Erfordernis und Risiko, Bauphysik 18 1996, Heft 6 Seite 175-183
- [41] Schricker G., Über die Genauigkeit der Schalenmethode zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von papiernen und Folien, Kunststoffe, Bd. 42 Heft 8 1952
- [42] Stauch D., Unterdächer, Unterdeckungen und Unterspannungen im ausgebauten Dach – Neue Beurteilungskriterien, BBauBl 5 1997, Seite 317-321
- [43] Tyvek-Präsentation – Vortragsprogramm vom 21.01.2005 in Magdeburg
- [44] Versuchsergebnisse des BBS INSTITUT an „atmungsaktiven“ Filmen und Vliesstoffen
- [45] Wagner H., Luftdichtheit und Feuchteschutz beim Steildach mit Dämmung zwischen den Sparren, wksb 27 1989, Seite 25-33
- [46] Wahrig G., Fremdwörterlexikon, Bertelsmann Lexikon Verlag 1988
- [47] Walter F., Untersuchungen über die Wasserdampfdurchlässigkeit von Anstrichen, Gesundheits-Ingenieur 1959, Heft 12
- [48] Weber C., Unterdeckungen und Unterspannungen – Dauerhaft funktionssicher Lösungen, bba 05/2003, Seite 25-26
- [49] Weber, G., Vorlesung „Neue Entwicklungen technischer Kunststoffe – Herstellung und Eigenschaften von Folien“ Fachbereich Technische Chemie, SS2003 TU Braunschweig
- [50] Weber H., Einteilung nach neusten Richtlinien und Normen – Anstriche und Beschichtungen für mineralische Baustoffe an Fassaden Teil1, Bausubstanz 2 1996, Seite 47-49
- [51] Worch A., Überlegungen und Versuche zur Erfassung des Wasserdampfübergangs an Bauteiloberflächen, Dissertation Universität Dortmund 2002
- [52] Zebe H.-C., Winddicht – Luftdicht – Dampfdicht, was ist im Steildachbereich praxisgerecht?, DAB 02/2003, Seite 48-49

8.3. Befragte Personen

- [A] Herr Dipl. Ing. Oliver Dirmeier, Rheinische Kunststoffwerke Wasserburg AG, 83512 Wasserburg am Inn, Telefonat am 18.04.2005
- [B] Herr Martin Pfeifer, Dachdeckermeister und berufener Sachverständiger für das Dachdeckerhandwerk, Informations- und Vortragsabend der Firma Tyvek, Magdeburg, Februar 2005

- [C] Frau Dr. Thiele, Coronor AG Peine
- [D] Herr Seitters, MRS Seitter, Lyssy - Generalvertretung Germany, Holzmaden, März 2005
- [E] Dipl. Ing. Holger Hanke, Dachdeckergeselle, Dachdeckerei Hanke Salzgitter, Januar 2005
- [F] em. Prof. Dr.-Ing. Friedrich H. Franke, Telefonat am 29.04.2005
- [G] Herr Wiegard, Technischer Angestellter beim ZDVH, Telefonat am 03.05.2005
- [H] Frau Marccino , Technische Angestellte bei der MPA Braunschweig
- [I] Dipl. Ing. Jens Bode, BBS INGENIEURBÜRO Wolfenbüttel

8.4. Abkürzungen und Einheiten

DiBt	Deutsches Institut für Bautechnik (Berlin)
DS	Dampfsperren
dtex	internationale Einheit für die Fadenstärke
EnEV	Energie-Einsparverordnung
GK	Gefahrenklasse
MPA	Materialprüfanstalt Braunschweig
s_d -Wert	wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke
USB	Unterspannbahn
UDB	Unterdeckbahn
WDD	Wasserdampfdiffusionsstromdichte
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl

[d]	Tag
[d]	Dicke (m)
[g]	Gramm
[hPa]	Hektopascal
[kg]	Kilogramm
[K]	Kelvin
[m]	Meter
[mol]	Molare Masse eines Stoffes
[nm]	Nanometer
[p]	vorhandener Luftdruck
[p ₀]	Normaler Luftdruck nach DIN EN ISO 12572
[Pa]	Pascal
[R]	Gaskonstante von Wasserdampf ($N \times m / (kg \times K)$)
[s]	Sekunde
[W]	Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient ($kg / (m^2 \times s \times Pa)$)
[β]	Stoffübergangskoeffizienten
[δ]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient ($kg / (m \times s \times Pa)$)
[δ_a]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft ($kg / (m \times s \times Pa)$)
[μm]	Mikrometer

**Anhang A – Fotodokumentation der Versuchsdurchführung des
Normverfahrens**

Anhang B – Fotodokumentation der Versuchsmaschine des Lyssy-Verfahrens

Anhang C – Auswertung der Normversuche nach DIN EN ISO 12572

**Anhang D – Auswertung der Wasserdampfdiffusionsversuche nach dem
Lyssy-Verfahren**

Anhang E – Mathematische Berücksichtigung der Luftschicht unterhalb der Proben

Bestimmung des optimalen Ortes für die mathematische Berücksichtigung der Luftschicht unterhalb der Proben innerhalb der Berechnungsgleichungen.

Herleitung:

Verfahren nach Norm

$$s_d = \mu \times d$$

$$s_d = \frac{\delta_a}{\delta} \times d \quad \text{mit} \quad \delta = W_c \times d$$

$$s_d = \frac{\delta_a}{W_c \times d} \times d \quad \text{mit} \quad W_c = \frac{1}{\frac{A \times \Delta p}{G} - \frac{d_a}{\delta_a}}$$

nach [N14] Anhang G

$$s_d = \frac{\frac{\delta_a}{1} \times d}{\frac{A \times \Delta p}{G} - \frac{d_a}{\delta_a}}$$

$$s_d = \delta_a \times \left(\frac{A \times \Delta p}{G} \right) - \delta_a \left(\frac{d_a}{\delta_a} \right)$$

$$s_d = \left(\frac{\delta_a \times A \times \Delta p}{G} \right) - d_a \quad [\text{m}]$$

Alternatives Verfahren

$$s_d = (\mu \times d) - d_a \quad \text{mit} \quad \mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$

$$s_d = \left(\frac{\delta_a}{\delta} \times d \right) - d_a \quad \text{mit} \quad \delta = W \times d$$

aus [N14] Abschnitt 8.5

$$s_d = \left(\frac{\delta_a}{W \times d} \times d \right) - d_a \quad \text{mit} \quad W = \frac{G}{A \times \Delta p_V}$$

$$s_d = \left(\frac{\frac{\delta_a}{\frac{G}{A \times \Delta p_V}} \times d \right) - d_a$$

$$s_d = \left(\frac{\delta_a \times A \times \Delta p}{G} \right) - d_a \quad [\text{m}]$$

Die Unterschiede in den Verfahren ergeben sich durch:

$$s_d = \frac{\delta_a}{\delta} \times d \quad \text{mit} \quad \delta = W_c \times d$$

$$\delta = \frac{d}{\frac{A \times \Delta p}{G} - \frac{d_a}{\delta_a}} \times d$$

$$\delta = \frac{G \times d}{A \times \Delta p} - \frac{d \times \delta_a}{d_a} \quad \text{und} \quad \mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$

bei einsetzen von δ in μ ergibt sich

$$\mu = \frac{\delta_a}{\frac{G \times d}{A \times \Delta p} - \frac{d \times \delta_a}{d_a}} = \frac{\delta_a \times A \times \Delta p}{G \times d} - \frac{\delta_a \times d_a}{d \times \delta_a}$$

$$\mu = \left(\frac{\delta_a \times A \times \Delta p}{G} - d_a \right) \times \frac{1}{d}$$

die vorhandene Dicke der Luftschicht wird bereits hier zum Abzug gebracht

$$s_d = (\mu \times d) - d_a = \frac{\delta_a}{W} = (\mu \times d) - d_a$$

$$\mu = \frac{\frac{\delta_a}{W} + d_a}{d}$$

$$\mu = \frac{\frac{\delta_a}{\frac{G}{A \times \Delta p}} + \frac{d_a}{d}}{d}$$

$$\mu = \frac{\frac{\delta_a \times A \times \Delta p}{G \times d} + \frac{d_a}{d}}{d}$$

$$\mu = \left(\frac{\delta_a \times A \times \Delta p}{G} + d_a \right) \times \frac{1}{d}$$

das hier vorhandene d_a wird daher am Ende abgezogen

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorstehende Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe und die benutzten Hilfsmittel sowie die befragten Personen und Institutionen vollständig angegeben habe.

Braunschweig, den 26. Juni 2005

Unterschrift
