

Permeabilität von Holzwerkstoffmatten

DISSERTATION

Zur Erlangung des Doktorgrades

an der Universität Hamburg

Fachbereich Biologie

vorgelegt von

Wiwat Hanvongjirawat

aus Krabi, Thailand

Hamburg 2003

Genehmigt vom
Fachbereich Biologie der
Universität Hamburg
auf Antrag von Herrn Professor Dr. A. FRÜHWALD
Weitere Gutachter der Dissertation:
Herr Dr. habil. A. STEFFEN

Tag der Disputation: 04. Juni. 2003

Hamburg, den 20. Mai 2003



Professor Dr. A. Frühwald
Dekan

„Gedruckt mit Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes“

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg und dem Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes der Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft in der Zeit von Oktober 1998 bis Januar 2003. Die Arbeit wurde finanziell unterstützt aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft durch die AiF über die DGfH.

Ich danke dem DAAD herzlich für das Stipendium zum Studium in Deutschland in der Zeit von April 1998 bis Juni 2003 sowie für die Unterstützung des Aufenthaltes meiner Familie.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. A. Frühwald für die Anleitung meiner Arbeit und die Gelegenheit zum Studium in Deutschland. Er förderte meine fachliche und persönliche Entwicklung. Außerdem gab er mir wichtige Anregungen und die Freiheit zur selbständigen Arbeit. Diese Erfahrung werde ich in Thailand umsetzen.

Großen Dank schulde ich Herrn W. Scholz für die technische Unterstützung bei der Konstruktion und dem Bau der Versuchsanlagen, die Unterstützung im Labor und die Korrekturen zur Verbesserung der deutschen Grammatik.

Ich danke Herrn Dr. H. Thömen und Herrn C. Heinemann für die fachlichen Diskussionen und die Unterstützung.

Die vorliegende Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Poznań, Fakultät für Holztechnologie, Institut für Maschinenbau und Thermodynamik, Polen, möglich. Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. R. Guzenda, Herrn Prof. Dr. J. Weres und Herrn Dr. W. Olek für die Darstellung des ersten Modellansatzes und die Berechnung der zweidimensionalen Permeabilität mit dem an der Universität Poznań entwickelten Simulationsprogramm.

Für die Anfertigung der Versuchsanlagen bedanke ich mich bei der mechanischen Werkstatt, Herrn K. Brumm und Herrn J. Schröder. Für die Beratung bei der Anwendung des Programms C/C++ danke ich Herrn R. Goldbach (Diplom Ing. Elektrotechnik). Für die Unterstützung bei der Messtechnik danke ich Herrn Diplom Ing. M. Gruchot.

Ich danke Herrn Dr. A. Geissen, Herrn Dr. P. Becker und Herrn Dr. E. Schwab für die Durchsicht der Arbeit.

Für die Unterstützung bei den praktischen Arbeiten bedanke ich mich bei Frau D. Bielenberg und Herrn W. Zerhau. Ich möchte mich auch bei Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Holzphysik, die mich durch die Diskussionen und Gespräche unterstützt haben, bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Problemstellung	3
2.1. Erste Messvorrichtung zur kontinuierlichen eindimensionalen Messung	5
2.2. Zweite Messvorrichtung zur kontinuierlichen zweidimensionalen Messung	6
3. Kenngrößen zur Beschreibung der Permeabilität	7
3.1. Transport von Gasen in porösen Medien	7
3.2. Bedeutung der Permeabilität von Holzwerkstoffen	7
3.3. Gesetz von Darcy	8
3.4. Anwendbarkeit des Gesetzes von Darcy	11
4. Bisherige Methoden zur Untersuchung der Permeabilität von Holzwerkstoffen	13
4.1. Methode von Denisov et al. 1975	13
4.2. Methode von Hata 1993	14
4.3. Methode von v. Haas 1998 und v. Haas et al. 1998	15
4.4. Methode von Haselein 1998	17
4.5. Vergleich von Messmethoden (Heinemann, 1999)	18
4.6. Methode von Shang et al. 1999	19
5. Einflussfaktoren der Permeabilität bei Holzwerkstoffen	21
5.1. Holzart	21
5.2. Rohdichte der Platten	21
5.3. Partikelcharakteristika und Porenstruktur	22
5.4. Art des strömenden Mediums	24
5.5. Strömungsrichtung	24
5.6. Feuchte der Matten	29
5.7. Klebstoffanteil	29
5.8. Temperatur	30

6. Material	31
6.1. Spanmaterial	31
6.2. Strands	35
6.3. Fasern	36
6.4. Vorbereitung der Materialien zur Bestimmung der Permeabilität	37
7. Methoden	40
7.1. Messvorrichtung I zur kontinuierlichen eindimensionalen Messung der Permeabilität	40
7.1.1. Konstruktion der Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität ...	40
7.1.2. Konstruktion der Messvorrichtung I zur Messung der horizontalen Permeabilität	44
7.1.3. Vorversuche zur Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung I	48
7.1.4. Anwendbarkeit des Gesetzes von Darcy	49
7.1.5. Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung I	52
7.1.6. Bestimmung der Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen.....	55
7.1.6.1. Vorversuche zur Messung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen mit Messvorrichtung I	58
7.1.6.2. Gültigkeit des Gesetzes von Darcy	61
7.1.6.3. Ablauf der Messung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen	63
7.2. Messvorrichtung II zur kontinuierlichen zweidimensionalen Messung der Permeabilität	65
7.2.1. Aufbau der Messvorrichtung II.....	65
7.2.2. Einrichtung der Messvorrichtung II	67
7.2.3. Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung II	70
7.2.3.1. Erste Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung II	70
7.2.3.2. Zweite Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung II	70
7.2.4. Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in zwei Dimensionen	71

7.2.4.1. Erster Modellansatz zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in zwei Dimensionen.....	72
7.2.4.1.1. Mathematisches Modell.....	72
7.2.4.1.2. Lösungsverfahren für das Strömungsproblem.....	74
7.2.4.1.2.1 Wahl der Methode	74
7.2.4.1.2.2 Approximation des geometrischen Raums	75
7.2.4.1.2.3 Optimierungsverfahren.....	75
7.2.4.1.2.4 Algorithmus zur computergestützten Bestimmung der Permeabilitätswerte	75
7.2.4.1.2.5 Computerprogramm	76
7.2.4.2. Zweiter (eigener) Modellansatz zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in zwei Dimensionen.....	79
7.2.4.2.1. Mathematisches Modell.....	79
7.2.4.2.2. Randbedingungen und numerische Lösung zur Berechnung der vertikalen und horizontalen Permeabilität in zwei Dimensionen.....	80
7.2.4.2.2.1 Randbedingung	81
7.2.4.2.2.2 Numerische Lösung der partiellen Differentialgleichung	82
7.2.4.2.3. Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität	87
7.2.4.2.4. Algorithmus zur computergestützten Bestimmung der Druckverteilung und der vertikalen und horizontalen Permeabilität.....	92
8. Ergebnisse	94
8.1. Messung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung I	94
8.1.1. Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte bei verschiedenen Materialien.....	99
8.1.2. Einfluss der Feuchtigkeit auf die Permeabilität.....	99
8.1.3. Einfluss des Klebstoffanteils	101
8.1.4. Einfluss der verschiedenen Spanfraktionen	102
8.1.5. Einfluss der Strömungsrichtung und Verhältnisse der Permeabilität.....	105
8.1.6. Einfluss der Lufttemperatur.....	106
8.1.7. Vergleich der Ergebnisse	109
8.2. Messung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung II	111

8.2.1. Erster Messzyklus.....	111
8.2.1.1. Berechnung der Permeabilität nach dem ersten Modellansatz.....	112
8.2.1.2. Berechnung der Permeabilität nach dem zweiten Modellansatz.....	114
8.2.1.3. Vergleich der berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten und zweiten Modellansatz mit der gemessenen Permeabilität von Messvorrichtung I und der konventionellen Methode	116
8.2.1.3.1. Permeabilität von Fasermatten	116
8.2.1.3.1.1 Überprüfung der Gasdruckbedingungen an den Drucksensoren .	118
8.2.1.3.2. Permeabilität von Matten aus DS-Spänen.....	121
8.2.1.3.3. Permeabilität von Matten aus MS-Spänen	123
8.2.1.3.4. Permeabilität von Matten aus Strands	124
8.2.2. Zweiter Messzyklus.....	126
8.2.2.1. Permeabilität von Fasermatten	128
8.2.2.2. Permeabilität von Matten aus DS-Spänen.....	129
8.2.2.3. Permeabilität von Matten aus MS-Spänen	131
8.2.2.4. Permeabilität von Matten aus Strands	132
8.2.3. Permeabilität von Matten aller Materialien	134
8.2.4. Einfluss der Strömungsrichtung und Verhältnisse der Permeabilität.....	136
9. Diskussion.....	138
9.1. Bestimmung der Permeabilität mit Messvorrichtung I	138
9.1.1. Vergleich der Ergebnisse der Messvorrichtung I mit der konventionellen Methode	138
9.1.2. Materialeinfluss auf die Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte.....	143
9.1.3. Feuchteinfluss.....	144
9.1.4. Klebstoffeinfluss	144
9.1.5. Einfluss der Spanabmessung.....	145
9.1.6. Einfluss der Strömungsrichtung auf das Verhältnis vertikaler zu horizontaler Permeabilität	147
9.1.7. Einfluss der Lufttemperatur.....	148
9.2. Bestimmung der Permeabilität mit Messvorrichtung II	148

9.2.1. Bewertung der berechneten Permeabilitätswerte nach zwei Modellansätzen	150
9.2.1.1. Druckbedingungen in der Probe.....	150
9.2.1.2. Beurteilung der zwei Modellansätze.....	152
9.2.2. Bewertung der Ergebnisse.....	153
9.2.2.1. Permeabilität von Fasermatten.....	154
9.2.2.2. Permeabilität von Matten aus MS-Spänen.....	156
9.2.2.3. Permeabilität von Matten aus DS-Spänen	161
9.2.2.4. Permeabilität von Matten aus Strands	163
9.2.2.5. Vergleich der gemessenen Drücke mit den simulierten Drücken nach dem zweiten Modellansatz.....	166
9.2.3. Materialeinfluss auf die Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte	168
9.2.4. Einfluss der Strömungsrichtung im Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität.....	168
9.2.5. Grenzen der Messvorrichtung II und damit verbundene Erweiterung des Forschungsbedarfs	168
10. Zusammenfassung.....	173
11. Literatur.....	182
12. Anhang	185
12.1. Simulierte Druckverteilung mit dem Simulationsprogramm der Universität Poznań	185
12.2. Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Lufttemperaturen .	186
12.3. Anwendungsprogramm zur Berechnung der Permeabilität in zwei Dimensionen ...	188
13. Abbildungsverzeichnis	193
14. Tabellenverzeichnis	202
15. Abkürzungsverzeichnis	204

1. Einleitung

Die Permeabilität eines Materials ist ein wichtiger charakteristischer Parameter bei Bearbeitungsprozessen. Die Permeabilität beschreibt die Durchlässigkeit eines porösen Mediums für Gase oder Flüssigkeiten. Die Permeabilität hat Einfluss auf z.B. die Holz Trocknung, die Imprägnierbarkeit sowie den Wärme- und Feuchtetransport im Holz und in Holzwerkstoffen.

Bei der Holzwerkstoffherstellung ist die Optimierung des Heißpressvorgangs von wesentlicher technologischer und ökonomischer Bedeutung. Die Heißpressung stellt einen kostenintensiven und komplexen Abschnitt in der Holzwerkstoffproduktion dar. Somit sind die Minimierung des Energieeinsatzes und die Erhöhung der Anlagenkapazität durch Presszeitverkürzung, eine optimale Ausnutzung der einzusetzenden Rohstoffe Holz und Klebharze sowie die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der hergestellten Holzwerkstoffe anzustreben.

Limitierender Faktor beim Pressen ist die Aushärtung der Klebharze in der Plattenmittelschicht, in der ein Temperaturniveau von knapp über 100 °C erreicht werden muss. Um möglichst eine kurze Presszeit zu erzielen, muss die Mattenmitte schnellstmöglich erwärmt werden. Die Permeabilität der Matte ist ein wichtiger Parameter für den konvektiven Wärmetransport.

Am Eingang der Heißpresse kann die Mattenoberfläche durch Vorwärmung, z.B. mit Satttdampf, vorgewärmt werden. Durch Verdampfen der Feuchte in den Oberflächenschichten nach Kontakt mit den Heizplatten (üblicherweise > 200 °C) erhöht sich der Gasdruck und feuchte Luft strömt in Richtung Plattenmitte. Somit stellt die vertikale Permeabilität einen maßgebenden Parameter bei der Erwärmung der Mittelschicht in der Heißpresse dar (Bolton und Humphrey 1994, Frühwald et al. 1999, v. Haas 1998), da der konvektive Wärmetransport durch Verdampfung, Dampfströmung und Kondensation dann sehr große Bedeutung neben dem konduktiven Wärmetransport innerhalb der Matten in Richtung der Mittelschicht hat, wenn die Wegsamkeit in den Matten hoch ist.

Andererseits kann durch die Spangeometrie, die Streutechnik und vor allem durch die Drucksteuerung während des Pressens erheblicher Einfluss auf die vertikale Permeabilität und somit auf die Presszeit genommen werden. In der Praxis ist dieses durchaus bekannt und es wird, auf Erfahrungswerten basierend, versucht, diesen Zusammenhängen Rechnung zu tragen. So wird z.B. bei der Herstellung von MDF, ausgehend von verhältnismäßig homogener Dichteverteilung zu Pressbeginn, mit hohem Druck gearbeitet, um die Deckschichten stark zu verdichten. Da infolge der hohen Dichte der Matte die Permeabilität

niedrig ist, wird zu einem späteren Zeitpunkt der Druck vermindert, um Dampf in die rückfedernde noch nicht ausgehärtete Mittelschicht strömen zu lassen und diese aufzuheizen. Anschließend wird wieder höher verdichtet. Durch die Druckreduzierung nimmt die Dicke der Matte zu, wodurch die Permeabilität erheblich steigt. Dabei wird aber auch eine nennenswerte Anzahl von teilausgehärteten Klebstoffbrücken, im Übergangsbereich zwischen "Mittelschicht" und "Deckschicht" oder in der Mittelschicht selbst zerstört, mit der Folge, dass die erreichten Festigkeiten (insbesondere die Querkzugfestigkeit) zu niedrig im Verhältnis zur eingesetzten Klebstoffmenge ausfallen.

Zur Vermeidung von Dampfplatzern wird gegen Ende des Pressvorganges ein möglichst hoher Gas- und Dampfdruckabbau über die Schmalkanten der Platte angestrebt, da die Klebharze, besonders in der Mittelschicht, beim Verlassen der Presse, erst einen Teil ihrer Endfestigkeit erreicht haben. Ein niedriger Gasdruck in der Platte vermindert die Gefahr von Dampfplatzern. Somit stellt die horizontale Permeabilität (parallel zur Plattenebene) einen maßgebenden Parameter für den Dampfdruckabbau beim Verlassen der Platten aus der Presse dar. Die horizontale Permeabilität ist zudem auch zu Beginn des Pressvorganges von Bedeutung, da hier die Matte beim Verdichten entlüftet werden muss.

2. Problemstellung

Die Gaspermeabilität von Holzwerkstoffmatten (bzw. -platten) hat im Herstellungsprozess der Platten eine große Bedeutung. Zur Optimierung des Press- und Verdichtungsvorganges und damit der Presszeit und zur Vermeidung von Dampfplatzern ist die genaue Kenntnis der vertikalen und horizontalen Permeabilität und der wirkenden Einflussfaktoren wichtig. Es liegt daher nahe, ein schnelles Verfahren zur Bestimmung der Permeabilität zur Verfügung zu haben.

Bisher werden Kennwerte der Permeabilität meist durch Gas-Durchflussmessungen an Probekörpern ermittelt, indem ein bestimmter Differenzdruck angelegt und das Durchflussvolumen gemessen wird. Die Auswertung erfolgt entsprechend dem Gesetz von Darcy (v. Haas 1998, Heinemann 1999).

Dieses Messverfahren für die Permeabilität, das u.a. von v. Haas (1998) und Heinemann (1999) angewendet wurde, gilt als ein sehr zuverlässiges, aber auch sehr aufwendiges Verfahren. Die vertikale und horizontale Permeabilität werden dadurch bestimmt, dass Proben aus verklebten Platten mit gleichmäßigem Rohdichteprofil ausgeformt und zur Durchflussmessung eingesetzt werden. Für die Plattenherstellung ist ein zeitintensives Pressprogramm notwendig, um ein gleichmäßiges Dichteprofil zu erreichen. Dieses ist nur bedingt, z.B. durch extrem lange Presszeiten (bis 5 Std.) bei relativ niedrigen Temperaturen, erzielbar (die Temperatur der Heizplatten wird um 0,9 °C pro Minute bis zu einer Temperatur von 105 °C erhöht, um den Temperaturunterschied in der Matte zwischen der Deck- und Mittelschicht gering zu halten). Für jede zu untersuchende Rohdichte muss eine Platte hergestellt werden. Die Mantelflächen der zylindrischen Proben werden mit Epoxidharz bzw. bei niedrigen Rohdichten mit Silikon abgedichtet und anschließend mittels eines Warmschrumpfschlauches in die Messeinrichtung integriert. Dieses Verfahren beinhaltet neben dem extremen zeitlichen Aufwand eine spezifische Diskontinuität der Probeneigenschaften. Die Durchflussrate durch die Proben wird bestimmt und entsprechend dem Gesetz von Darcy ausgewertet. Insofern ist die "klassische Methode" zeit- und kostenaufwendig.

Haselein (1998) hat eine "Schnellmethode" entwickelt, in der die horizontale und vertikale Permeabilität in einem Verdichtungsversuch bestimmt wird. Das Verfahren basiert auf der Permeabilitätsbestimmung anhand eines mathematischen Modells. Die Grenzbedingungen des Systems werden für einseitige und beidseitige Luftzufuhr, senkrecht zur Mattenoberfläche, festgelegt. Die ohne Klebharze gestreute und vorverdichtete Fasermatte wird mittels zweier Presszylinder, die auch der Luftzufuhr dienen, auf vorgegebene Rohdichten verdichtet und

mit Luft durchströmt. Die Luft strömt aus den Zylinderseitenflächen der Matten in die Umgebung. In der Modellrechnung werden die aufgenommenen Druck- und Durchflussbedingungen verwendet und es wird die horizontale und vertikale Permeabilität berechnet. Dieses Verfahren wird bisher nur modellhaft bei Matten aus Fasern angewendet .

Ein Vergleich der Permeabilitätskoeffizienten der beiden beschriebenen Messmethoden ergab jedoch extrem unterschiedliche Ergebnisse (Heinemann 1999), was zu dem Schluss führte, dass die von Haselein (1998) entwickelte Methode zwar einen innovativen Ansatz zur Permeabilitätsmessung bietet, jedoch keine realistischen Ergebnisse liefert. Das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität ergibt mit den beiden Messmethoden ebenso unterschiedliche Absolutwerte wie auch entgegengesetzte Tendenzen. Mit der von v. Haas (1998) verwendeten Messmethode nimmt das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität mit steigender Verdichtung ab. Bei der Methode von Haselein steigt in der Tendenz das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität mit steigender Verdichtung jedoch an (siehe auch Abschnitt 5.5).

Als wahrscheinliche Ursachen für die gefundenen Ergebnisse von Haselein (1998), die mit denen anderer Methoden nicht übereinstimmen, sind zu vermuten:

- Zur Bestimmung der Permeabilität mit der Methode von Haselein (1998) muss eine Probe zwei mal gemessen werden. Bei der ersten Messung erfolgt die einseitige Luftzufuhr senkrecht zur Mattenoberfläche (die Luft strömt von oben in die Probe). Bei der zweiten erfolgt beidseitige Luftzufuhr (die Luft strömt von oben und unten in die Probe). Es wird im Modellansatz angenommen, dass die Druck- und Durchflussbedingungen bei Anwendung beider Randbedingungen für einseitige und beidseitige Luftzufuhr gleich sind. Unter Annahme eines isotropen Materials ist die vertikale Permeabilität gleich der horizontalen Permeabilität ($K_v/K_h=1$) und wird bei beidseitiger Luftzufuhr ermittelt. Haselein weist darauf hin, dass diese Annahme unrealistisch ist. Bei einseitiger Luftzufuhr werden bestimmte Verhältnisse von vertikaler zu horizontaler Permeabilität festgelegt und die Abmessungen (Abstand in vertikaler und horizontaler Richtung) mittels einer Gleichung variiert, bis die vertikale der horizontalen Permeabilität entspricht, die bei beidseitiger Luftzufuhr ermittelt wird. Das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität ergibt sich aus dem Schnittpunkt der beiden Geraden (bei einseitiger und beidseitiger Luftzufuhr). Diese Berechnung konnte nicht nachvollzogen werden.
- Haselein (1998) misst den Druck nur außerhalb des eigentlichen Messobjektes, nicht aber innerhalb der Probe, da sich der Druck an der Probe durch Expansion des Gases

und durch die Bohrungen reduziert. Diesen Druck hat Haselein als Anfangsbedingung verwendet, um die Druckverteilung in der Probe zu simulieren.

- Der Ansatz von Haselein (1998) basiert auf der Annahme einer linearen Druckverteilung parallel und vertikal zur Probenfläche. Die lineare Druckverteilung ist bisher jedoch nicht nachgewiesen; die Druckverteilung kann von verschiedenen Faktoren, wie z.B. der Dichteverteilung und Partikelgeometrie, beeinflusst sein.
- Da die Probe bei der Verdichtung am Rand nicht gehalten wird, tritt eine Querdehnung ein, die zu unterschiedlicher Dichteverteilung und zu veränderten Strömungsbedingungen führt.
- Es konnte nicht nachvollzogen werden, ob die unrealistischen numerischen Ergebnisse durch den Ansatz im Auswertungsverfahren bedingt sind; hierzu liefert die Arbeit von Haselein (1998) wie auch das Softwareprogramm keine vollständige Dokumentation.

Grundsätzlich wäre der Messansatz von Haselein (1998) für den Einsatz in der Praxis lohnend, weil damit für ein Partikelgemisch in relativ kurzer Zeit (z.B. unter 1 Stunde) die Permeabilitätswerte für Matten unterschiedlicher Dichte bestimmt werden können. Das Verfahren ist jedoch mit den entwickelten Auswerteprogrammen nicht nachvollziehbar.

Daher wurde als Arbeitsziel für die vorliegende Dissertation ein `` Schnellverfahren `` zur Bestimmung der vertikalen und horizontalen Permeabilität von Holzwerkstoffmatten formuliert. Aus Gründen der ``Erreichbarkeit eines sicheren Verfahrens`` soll die Methode in zwei Stufen entwickelt werden :

- a) erstens die Bestimmung der vertikalen bzw. horizontalen Permeabilität in zwei Schritten,
- b) zweitens die Bestimmung der vertikalen und horizontalen Permeabilität in einem Schritt.

2.1. Erste Messvorrichtung zur kontinuierlichen eindimensionalen Messung

Mit der ersten Messvorrichtung wird die vertikale bzw. horizontale Permeabilität nacheinander an unterschiedlichen Proben und bei unterschiedlichen Verdichtungszuständen gemessen. Die Berechnung der vertikalen und horizontalen Permeabilität erfolgt direkt mittels dem Gesetz von Darcy. Die konzipierte Anlage kann aus geometrischen Gründen für Fasern und Späne, jedoch nicht für Strands eingesetzt werden. Die Einflussfaktoren auf die Permeabilität sind die Materialien (DS-, MS-Späne und Fasern), Feuchte der Materialien, Klebstoffanteil, Partikelgröße der MS-Späne und Temperatur des Durchflussmediums. Mit der Messvorrichtung I werden die

beschriebenen Einflussfaktoren untersucht. Die Ergebnisse der Permeabilität werden mit der konventionellen Methode nach v. Haas (1998) verglichen.

2.2. Zweite Messvorrichtung zur kontinuierlichen zweidimensionalen Messung

Mit der zweiten Messvorrichtung wird die vertikale und horizontale Permeabilität gleichzeitig an Proben unterschiedlichen Verdichtungszustandes gemessen. Die Berechnung der vertikalen und horizontalen Permeabilität erfolgt über zwei computergestützte Modellansätze. Die Anlage kann für Fasern, Späne und Strands eingesetzt werden.

Zwei Modellansätze zur Berechnung der Permeabilität werden dargestellt. Die berechnete Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-, MS-Spänen, Fasern und Strands nach den beiden Modellansätzen wird mit den Ergebnissen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode verglichen.

3. Kenngrößen zur Beschreibung der Permeabilität

3.1. Transport von Gasen in porösen Medien

Der Transport von Gasen in Holz bzw. porösen Medien kann durch zwei Prinzipien, die Gasströmung und die Diffusion, beschrieben werden. Gasströmung wird durch ein Absolutdruckgefälle, das den Transport eines Gases (bzw. einer Flüssigkeit) durch einen porösen Stoff verursacht, beschrieben. Bei der Diffusion ist der Absolutdruck an allen Stellen im betrachteten Körper gleich, es herrscht lediglich ein Partialdruckgefälle für die vorhandenen Gase (Vollmer 1954). Die Diffusion lässt sich in zwei Arten unterteilen: Die erste ist die Intergasdiffusion, die den Transport des Wasserdampfes aus der Luft in den Zelllumen beschreibt. Die zweite beschreibt den Transport von gebundenem Wasser in der Zellwand (Siau 1984). Die Ermittlung von Diffusionszahlen ist sehr zeitaufwendig (Polaczek 1980), wogegen Permeabilitätszahlen relativ einfach und schnell bestimmbar sind.

3.2. Bedeutung der Permeabilität von Holzwerkstoffen

Die Permeabilität von Holzwerkstoffen hat eine große Bedeutung bei deren Herstellung. Während des Heißpressvorganges wird die Matte unter einer hohen Temperatur und einem hohen Druck verpresst. In der Heißpresse wird die Wärme von den Pressplatten durch Konduktion in die äußeren Mattenschichten geleitet. Wenn die Temperatur in den äußeren Schichten auf 100 °C und mehr ansteigt, verdampft das Wasser in der äußeren Schicht und es baut sich ein zunehmender Dampfdruck auf. Es entsteht ein Gesamtdruckunterschied zwischen den Deckschichten und der Mittelschicht. Der Wasserdampf strömt von den heißen Deckschichten zur Mittelschicht und von der Mattenmitte zu den seitlichen Kanten. Durch Kondensation des Dampfes in der Mittelschicht steigen die Temperatur und die Feuchte, die sowohl für die Aushärtung des Klebstoffes sowie für die Plastifizierung des Holzes notwendig sind. Bei diesem Vorgang ist die vertikale Permeabilität maßgebend. Wenn zum Ende des Pressvorganges die Temperatur in der Mittelschicht auf über 100 °C ansteigt, ist der Dampfdruck in der Matte größer als der Atmosphärendruck. Der Dampf in der Platte kann nur über die seitlichen Schmalkanten entweichen. Falls der Dampfdruck beim Öffnen der Presse größer ist als Klebstoff- bzw. Querzugfestigkeit, platzt die Platte auf (Dampfplatzer). Folglich sollte die horizontale Permeabilität hoch genug sein, um den Dampfdruck auf ein vertretbares Maß abzubauen.

3.3. Gesetz von Darcy

Das Gesetz von Darcy wird für Untersuchungen zur Anwendbarkeit von physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf die Permeabilität eines porösen Mediums sehr häufig herangezogen. Der stationäre Durchfluss von Gasen und Flüssigkeiten durch Holz bzw. poröse Medien ist laminar. Die Anwendung des Gesetzes von Darcy setzt voraus, dass unter den Versuchsbedingungen ein lineares Gesetz gilt. Die Grenzen der Anwendung von Darcy's Gesetz wurden von Scheidegger (1974) und Siau (1984) beschrieben. Das Gesetz von Darcy basiert auf folgenden, wesentlichen Annahmen:

- Der Durchfluss ist viskos und linear. Daraus ergibt sich die Proportionalität von linearer Geschwindigkeit bzw. Durchflussmenge zu der auftretenden Druckdifferenz.
- Die Flüssigkeit bzw. das Gas ist homogen und inkompressibel.
- Das poröse Medium ist homogen.
- Es gibt keine Wechselwirkung zwischen Flüssigkeiten bzw. Gasen zum porösen Medium.
- Die Permeabilität ist unabhängig von der Probenlänge in Strömungsrichtung.

Obwohl gegen diese Annahmen in vielen praktischen Untersuchungen verstoßen wird, stellt die Grundgleichung eine nützliche Beziehung zwischen der Geschwindigkeit und der Druckdifferenz dar (Siau 1984). Gemäß dem Gesetz von Darcy muss die Kurve, die sich durch die Messpunkte zwischen der Geschwindigkeit bzw. der Durchflussmenge und der Druckdifferenz ergibt, linear sein und durch den Schnittpunkt des Koordinatensystems verlaufen. Im praktischen Fall ergibt die Streuung der Messpunkte manchmal eine Gerade, die nicht durch den Schnittpunkt des Koordinatensystems verläuft. Falls keine Gerade vorliegt, kommt das Gesetz von Darcy nicht zur Anwendung. Es muss dann das System untersucht werden, um die Ursache der Abweichung zu finden. (Dullien 1979, Scheidegger 1974)

Siau (1984) beschreibt das Gesetz von Darcy für die eindimensionale Strömungsrichtung durch eine Differentialgleichung (Gleichung 1).

$$k = - \frac{Qdx}{AdP} \quad (1)$$

k	Permeabilität (m ² /Pa·s)
Q	Durchflussmenge (m ³ /s)
A	Oberfläche (m ²)

dx Distanz in Strömungsrichtung bei der Messung der Druckdifferenz (m)

dP Druckdifferenz (Pa)

Die spezifische Permeabilität ergibt sich durch Multiplikation der Permeabilität und der dynamischen Viskosität des Durchflussmediums. Wenn die Viskosität des Durchflussmediums in die Gleichung 1 eingesetzt wird, ist die spezifische Permeabilität nur von der Porenstruktur und nicht vom Durchflussmedium abhängig (Siau 1984, Dullien 1979). Dadurch ändert sich die Gleichung 1 folgendermaßen:

$$K = - \frac{\eta Q dx}{A dP} \quad (2)$$

K spezifische Permeabilität (m²)

η dynamische Viskosität des Durchflussmediums (Pa · s)

In dieser Arbeit wird im weiteren die spezifische Permeabilität als "Permeabilität" bezeichnet. Scheidegger (1974) hat beschrieben, dass die Permeabilität von der Knudsen-Diffusion, der Rauheit der inneren Oberfläche, der Absorption der Oberfläche, der Kapillarkondensation und der molekularen Diffusion abhängt. Trotzdem ergibt sich aus der Porenstruktur kein Unterschied. Deshalb wird auch die mit Gasen und Flüssigkeiten gemessene Permeabilität differieren.

Beim Durchfluss des Gases von einer Seite der Probe zur anderen ändern sich sowohl das Volumen als auch die Geschwindigkeit des Gases mit der Druckdifferenz, da das Gas kompressibel ist. Infolge abnehmenden Druckes kann die isotherme Expansion eines idealen Gases mit dem allgemeinen Gesetz der Gase berechnet werden.

$$PV = nRT \quad (3)$$

P Absolutdruck (Pa)

V Volumen (m³)

n Mole des Gases

R universelle Gaskonstante = 8,3142 J/(mol.K)

T Absoluttemperatur (K)

Wenn Gleichung 2 für Gase angewendet wird, muss Gleichung 3 bei der Expansion des durch die Probe strömenden Gases in die Gleichung 2 eingesetzt werden, da die kontinuierliche Änderung des Gases durch die Druckdifferenz und die Durchflussmenge verursacht wird. Damit ergibt sich die Gleichung 4 aus der gelösten Gleichung (Gleichung 2 und Gleichung 3) von Darcy für Gas in eindimensionaler Strömungsrichtung. Die

Permeabilität lässt sich mit Hilfe dieses Ausdrucks für Gase in eindimensionaler Strömungsrichtung berechnen.

$$K = \frac{\eta Q L P}{A \Delta P \bar{P}} \quad (4)$$

P absoluter Druck bei der Messung der Durchflussmenge (Pa)

ΔP Druckdifferenz (Pa)

\bar{P} mittlerer Druck (Pa)

L Länge der Probe in Strömungsrichtung (m)

Infolge der Anisotropie unterscheidet sich die Richtung des Druckgradienten an einem gegebenen Punkt im porösen Medium vom Geschwindigkeitsvektor. Für isotrope Medien sind Druckgradient und Geschwindigkeitsvektor parallel. Das Gesetz von Darcy lässt sich für anisotrope Medien mit Gleichung 5 beschreiben (Dullien 1979).

$$v_i = -\frac{1}{\eta} \left(K_{i1} \frac{\partial P}{\partial x_1} + K_{i2} \frac{\partial P}{\partial x_2} + K_{i3} \frac{\partial P}{\partial x_3} \right) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

1,2,3 = x, y, z Koordinaten

K_{ij} Komponenten des Tensors zweiter Ordnung der Permeabilität

v_i Geschwindigkeit in Strömungsrichtung

Das Gesetz von Darcy in der Gleichung 5 kann zu der Form des Tensors zweiter Ordnung der Permeabilität durch folgende Gleichung beschrieben werden.

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\eta} \nabla P \quad (6)$$

\mathbf{v} Geschwindigkeitsvektor

\mathbf{K} Tensor zweiter Ordnung der Permeabilität

Der Tensor zweiter Ordnung der Permeabilität besteht aus neun Komponenten:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Der Tensor der Permeabilität ist symmetrisch ($K_{ij} = K_{ji}$). Das anisotrope Medium kann dann als orthotrop betrachtet werden. Die Permeabilität ist nur von den drei gegenseitig

orthogonalen Hauptachsen abhängig und nicht mehr von den Strömungsrichtungen im Verhältnis zur Materialorientierung. Die Druckgradienten und Geschwindigkeiten verlaufen parallel in drei orthogonalen Hauptachsen ($K_{ii} = K_i$). Das Gesetz von Darcy zur Berechnung der Permeabilität kann für jede Strömungsrichtung mit der Gleichung 8 beschrieben werden (Collins 1961, Scheidegger 1974, Dullien 1979, Bear 1988, Kaviany 1991).

$$v_i = -\left(\frac{K_i}{\eta}\right)\left(\frac{\partial P}{\partial x_i}\right) \quad (i = 1,2,3) \quad (8)$$

v_i Geschwindigkeit in Strömungsrichtung

K_i Permeabilität in Strömungsrichtung

Es ist bekannt, dass Hölzer bzw. Holzwerkstoffe anisotrop sind. Die gemessene Permeabilität ist von den Strömungsrichtungen im Verhältnis zur Materialorientierung abhängig. Gewöhnlich wird angenommen, dass anisotrope poröse Medien orthotrop sind. Sie haben drei gegenseitig orthogonale Hauptachsen. Die Permeabilität lässt sich mit Gleichung 8 für dreidimensionale Strömungsrichtungen berechnen.

3.4. Anwendbarkeit des Gesetzes von Darcy

Für Flüssigkeiten hoher Geschwindigkeit und für Gase hoher bzw. niedriger Geschwindigkeit ist das Gesetz von Darcy nicht anwendbar. Es ergeben sich folgende Abweichungen zum Gesetz von Darcy (Scheidegger 1974, Siau 1984):

- Turbulente Strömung
- Nichtlineare Strömung
- Molekularströmung bzw. Knudsen-Diffusion

Das Gesetz von Darcy ist nur bei niedriger Geschwindigkeit des Durchflusses anwendbar, wenn der Durchfluss laminar und stationär ist und die Durchflussgeschwindigkeit proportional mit der Druckdifferenz ansteigt. Bei höheren Geschwindigkeiten wird ein Übergangsbereich durchschritten, bevor turbulente Strömung eintritt. Bei turbulenter Strömung ist die quadratische Geschwindigkeit proportional zur Druckdifferenz. Wenn Flüssigkeiten bzw. Gase durch kleine, kurze Kapillaren strömen, kommt es zu nichtlinearen Strömungen aufgrund eines kinetischen Energieverlustes. Bei nichtlinearer Strömung ist, wie bei turbulenter Strömung, die quadratische Geschwindigkeit proportional zur Druckdifferenz. Man kann mit der Reynold'schen Zahl beurteilen, ob nichtlineare oder turbulente Strömung auftritt. Molekularströmung bzw. Knudsen-Diffusion ist eine Bewegung der Gasmoleküle in der an der Wand der Kapillare anliegenden Grenzschicht. Sie wird signifikant, wenn der

Kapillardurchmesser kleiner oder gleich der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle ist. Dies kann bei laminarem Durchfluss mit niedriger Druckdifferenz bzw. niedriger Durchflussgeschwindigkeit vorkommen. Dadurch ergibt sich eine größere gemessene Permeabilität. Somit weist die gemessene Permeabilität von Gasen und von Flüssigkeiten einen Unterschied auf, obwohl kein Unterschied in der Porenstruktur vorliegt. Die Molekularströmung bzw. Knudsen-Diffusion ist im Gegensatz zu Flüssigkeiten bei Gasen signifikant (Scheidegger 1974, Dullien 1979, Siau 1984).

4. Bisherige Methoden zur Untersuchung der Permeabilität von Holzwerkstoffen

4.1. Methode von Denisov et al. 1975

Denisov et al. (1975) untersuchten den Einfluss der Spangeometrie bei einer Rohdichte von 500 kg/m^3 und der Art des strömenden Mediums im Rohdichtebereich von 300 bis 800 kg/m^3 auf die vertikale Permeabilität der Spanmatten mit homogener Rohdichteverteilung über den Querschnitt. Bei Spanplatten aus definierten Spänen mit einer Spanfeuchte von 0 bis 15% und unterschiedlichen Spanabmessungen mit einer Rohdichte von ca. 550 bis 650 kg/m^3 wurden die horizontalen und vertikalen Permeabilitäten bestimmt. Weiterhin ermittelten Denisov et al. (1975) die horizontale und vertikale Permeabilität von einschichtigen Spanplatten aus industriell erzeugten Spänen mit unterschiedlichen Spanabmessungen bei einer Rohdichte von 550 kg/m^3 . Dreischichtige Spanplatten mit aus Tanne und Lärche erzeugten Spänen im Rohdichtebereich von 520 bis 800 kg/m^3 , auf eine Gleichgewichtsfeuchte von 6% im Raumklima konditioniert, wurden auf beide Permeabilitäten hin untersucht. Zur Bestimmung wurde eine rechteckige Aufnahmeplatte angefertigt, in die eine Matten- bzw. Plattenprobe eingelegt wurde. Eine Gummiabdichtung wurde durch Verschrauben auf die Probenflächen gedrückt. Die Probe wurde mit Luft oder Dampf durchströmt. Ein Kompressor erzeugte auf der einen Seite der Probe einen Überdruck. Auf der Niederdruckseite wurde die Gasdurchflussmenge gemessen. Abbildung 1 zeigt die Einrichtung von Denisov et al. (1975).

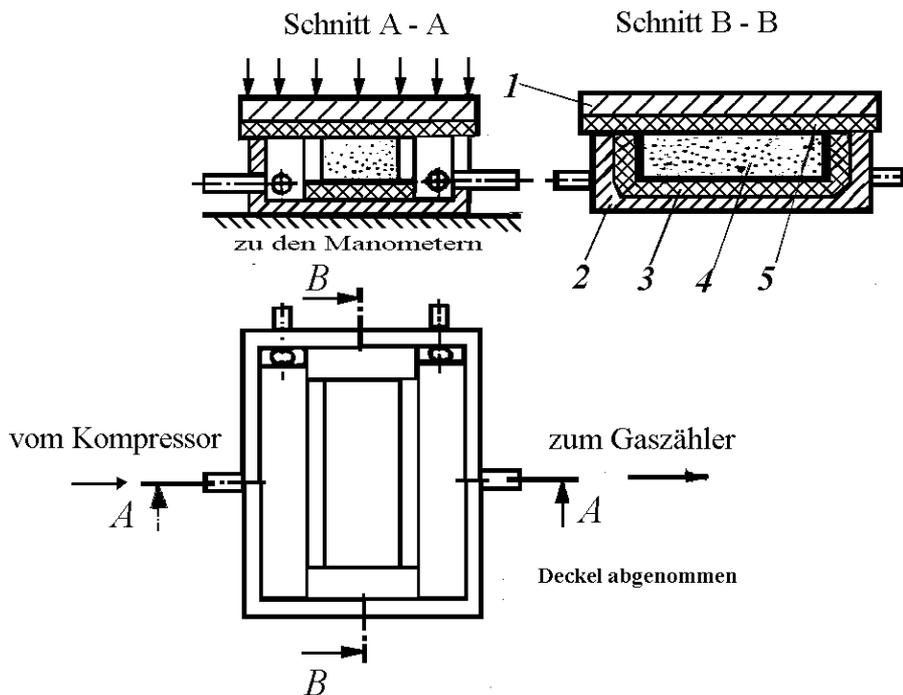


Abbildung 1: Anlage von Denisov et al. (1975) 1. Deckel, 2. Gehäuse 3,5 Gummidichtung, 4. Probe

4.2. Methode von Hata 1993

Hata (1993) bestimmte die Permeabilität der dampfinjizierten Spanplatten aus beleimten Spänen mit definierten Abmessungen. Die Platten hatten ein relativ homogenes Rohdichteprofil. Die dampfinjizierten Spanplatten wurden zwei Wochen bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % konditioniert. Zur Bestimmung der Permeabilität senkrecht zur Plattenebene wurde eine rechteckige Probe der Dimensionen 10x10x10 mm³ ausgeschnitten. Für die Permeabilitätsbestimmung parallel zur Plattenebene wurde eine rechteckige Probe mit den Dimensionen 100x10x10 mm³ ausgeschnitten. Alle Mantelseiten der Proben wurden mit einem feuchtedichten und plastischen Film versiegelt. Die Proben wurden in ein Plastikrohr eingebracht. Die Luftzufuhr wurde durch eine Mikroluftversorgung erzeugt. Die Luftgeschwindigkeit und die Druckdifferenz bei stationärem Luftstrom wurde gemessen. Abbildung 2 zeigt die Einrichtung von Hata.

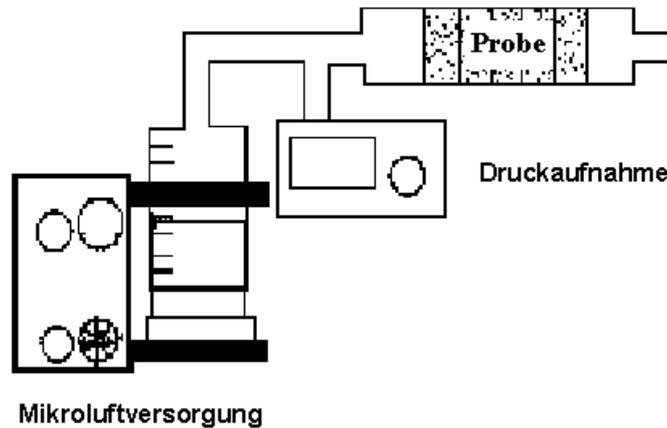


Abbildung 2: Permeabilitätsmessanlage von Hata (1993)

4.3. Methode von v. Haas 1998 und v. Haas et al. 1998

v. Haas (1998) und v. Haas et al. (1998) ermittelten die Permeabilität parallel und senkrecht zur Plattenebene von MDF-Platten, Deckschichten und Mittelschichten von Spanplatten, jeweils für Bau- und Möbelplatten sowie OSB-Platten mit einem homogenen Rohdichteprofil bei Dichten zwischen 200 und 1200 kg/m³. Weiterhin untersuchten sie den Einfluss des unterschiedlichen Klebstoffanteils, des Plastifizierungszustandes und der Feuchte auf die Permeabilität bei unterschiedlichen Rohdichten. Es wurden Platten im Rohdichtebereich von 200 bis 1200 kg/m³ hergestellt und Proben mit einem Zapfenbohrer aus den Platten ausgebohrt. Der Durchmesser der Proben, senkrecht zur Plattenebene, betrug 35 mm und die Länge 20 mm. Die Proben, parallel zur Plattenebene, waren ca. 40 mm lang und hatten einen Durchmesser von 15 mm. Alle Proben wurden bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte klimatisiert. Anhand einer eigenen Versuchsserie wurde der Einfluss der Feuchte auf die Permeabilität untersucht. Diese Proben dieser Versuchsserie wurden bei 20 °C und 85 % rel. Luftfeuchte klimatisiert. Zur Bestimmung der Permeabilität von Proben mit einer Rohdichte größer als 300 kg/m³ wurde eine Versuchseinrichtung, bestehend aus einem Differenzdruckaufnehmer, einer Pumpe, zwei Regelventilen und drei Schwebekörperdurchflussmessern, eingesetzt. Abbildung 3 zeigt die gewählte Anlage zur Bestimmung der Permeabilität mit einer Rohdichte größer als 300 kg/m³. Die Proben mit einer Rohdichte größer als 450 kg/m³ wurden vor dem Prüfen mit Epoxidharz, die mit einer geringeren Rohdichte als 450 kg/m³ mit Silikon-Dichtstoff ummantelt. Dann wurden die Proben in die Mitte eines ca. 12 cm langen Schrumpfschlauches geführt und in beide Enden des Schrumpfschlauches Verbindungsstücke gesteckt. Mit einer Heißluftpistole wurde der Schrumpfschlauch erwärmt, wodurch sich dieser eng an die Probe

und die Verbindungsstücke anlegte. Mit Hilfe einer Pumpe wurde ein Überdruck erzeugt. Mit zwei Regelventilen konnte der Überdruck reguliert werden. Der Differenzdruck wurde mit einem induktiven Differenzdruckaufnehmer gemessen. Auf der Niederdruckseite wurde die Durchflussmenge bestimmt. Zur Messung der Permeabilität von Proben mit Rohdichten unter 300 kg/m^3 wurde eine weitere Anlage mit Ventilen und Rohren eines größeren Innendurchmessers gebaut. Abbildung 4 zeigt die Anlage von v. Haas (1998) zur Bestimmung der Permeabilität mit einer Rohdichte von unter 300 kg/m^3 . Zur Messung der Permeabilität von Matten mit einer Rohdichte unter 300 kg/m^3 in vertikaler Richtung wurden beleimte Fasern und Deckschichtspäne in einem 70 mm langen Rohr mit einem Durchmesser von 34 mm auf die gewünschte Rohdichte verdichtet und mit Luft durchströmt.

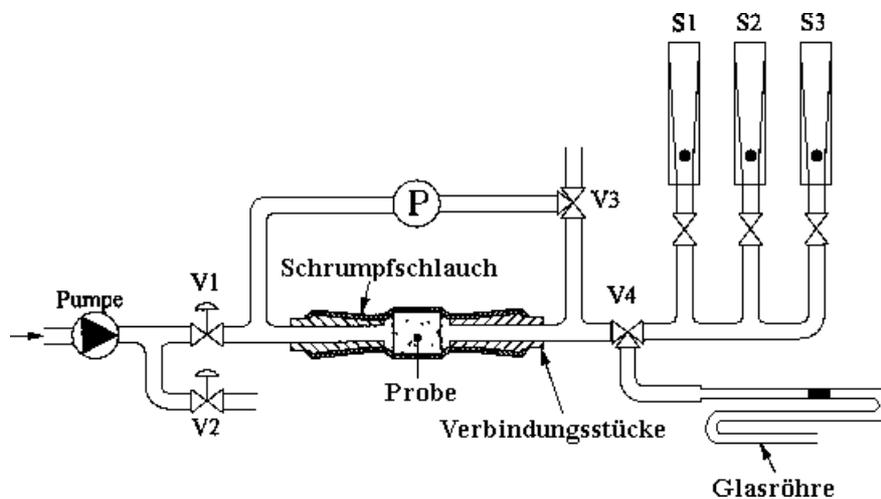


Abbildung 3 : Anlage von v. Haas (1998) zur Bestimmung der Permeabilität von Proben einer Rohdichte größer als 300 kg/m^3

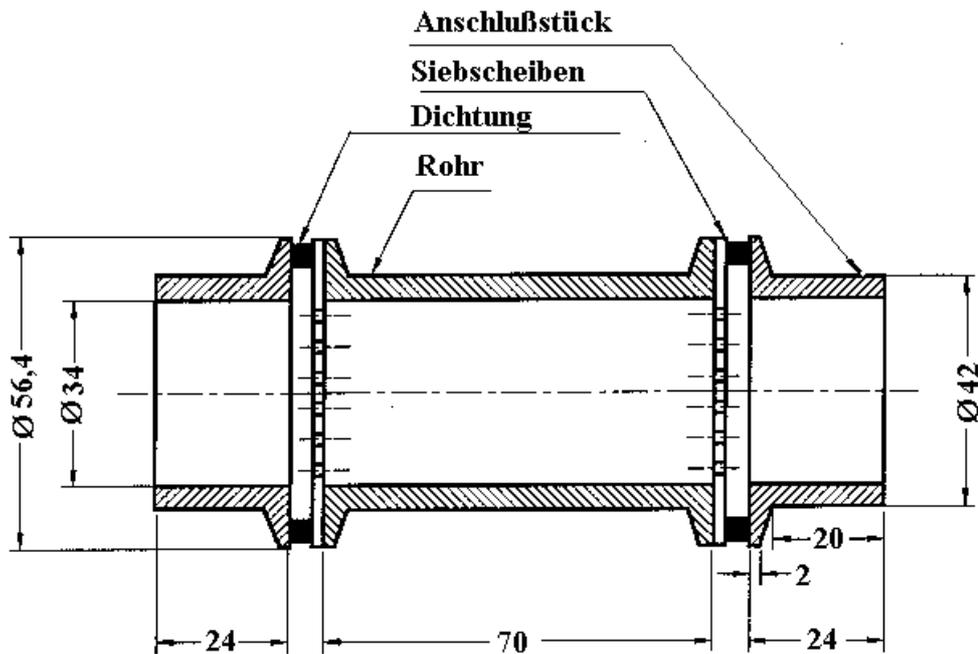


Abbildung 4: Anlage von v. Haas (1998) zur Bestimmung der Permeabilität von Proben einer Rohdichte unter 300 kg/m^3

4.4. Methode von Haselein 1998

Haselein (1998) entwickelte eine Methode zur gleichzeitigen Messung der Permeabilität von Fasermatten in vertikaler und horizontaler Richtung. Bei diesem Verfahren wird eine unbeleimte, zylindrische Fasermatte auf eine vorgewählte Rohdichte kalt verdichtet. Die Luft strömt senkrecht durch die Mattenoberfläche und entweicht über die Seitenflächen der Matte in die Umgebung. Die Berechnung der Permeabilitätswerte erfolgt auf Basis eines numerischen Modells. Mittels eines Computerprogramms beschreibt das Modell die Druck- und Durchflussbedingungen. Die Methode hat den Vorteil, dass eine aufwendige Abdichtung der Probenperipherie nicht erforderlich ist. Die Anlage bestand aus einer hydraulischen Presse mit einer Kapazität von 300 kN , einem induktiven Wegaufnehmer, einem Differenzdruckaufnehmer und einem Massenstrom-Messgerät. Als Parameter wurden die Mattendicke, der Luftzufuhr- und Luftabfuhrdruck und die Massenstrommessung aufgenommen. Abbildung 5 zeigt die Anlage von Haselein. Vor der Berechnung der Permeabilität wurde die lineare Abhängigkeit des Massenstroms von der Druckdifferenz über den gemessenen Rohdichtebereich verifiziert. Haselein (1998) beobachtete dabei eine lineare Beziehung zwischen Massenstrom und der Druckdifferenz. Unter diesen Bedingungen gilt das Gesetz von Darcy. Zur Verifizierung wurden die vertikalen und horizontalen Permeabilitätswerte der

zweidimensionalen Methode mit der eindimensionalen Methode im untersuchten Rohdichtebereich von 150 bis 950 kg/m³ bei einer Feuchte von ca. 6,5 % verglichen. Der Vergleich ergab bei beiden Methoden Übereinstimmung.

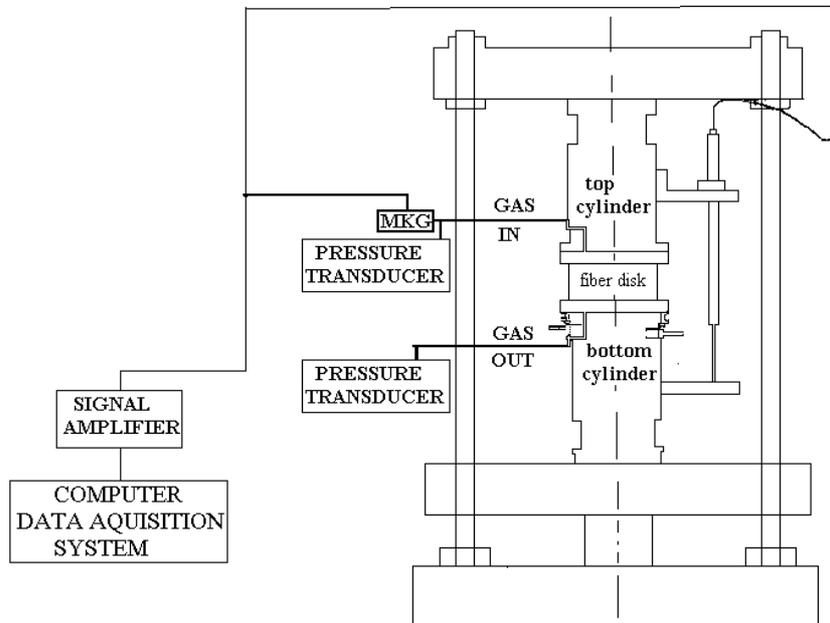


Abbildung 5: Permeabilitätsmesseinrichtung von Haselein (1998); MKG bedeutet Massenstrommessung

4.5. Vergleich von Messmethoden (Heinemann, 1999)

Einen Vergleich der zwei Permeabilitätsmessmethoden an Holzwerkstoffen, die von Haselein (1998) an der Oregon State University und von v. Haas (1998) an der Universität Hamburg entwickelt wurden, hat Heinemann (1999) durchgeführt. Die Verwendung gleicher Fasern und DS- bzw. MS-Spänen führte bei der Permeabilitätsmessung mit den zwei Messmethoden zu unterschiedlichen Koeffizienten. Ein Vergleich der Werte zeigt, dass die an der Oregon State University durchgeführten Untersuchungen in horizontaler Richtung höhere und in vertikaler Richtung niedrigere Permeabilitätswerte aufweisen. Die Betrachtung der Verhältnisse von vertikaler zu horizontaler Permeabilität ergibt gegensätzliche Trends. Um die Permeabilität von Holzwerkstoffen bei unterschiedlichen Temperaturen messen zu können, wurde die Messanlage von v. Haas (1998) so umgebaut, dass ein Heizschlauch im Bereich der Luftzufuhr integriert wurde. Mittels eines PT-100 Widerstandsthermometers und eines angeschlossenen PID-Reglers konnte die Temperatur exakt geregelt werden. Zusätzlich

wurde eine Isolationszelle in die Messanlage eingebaut, um Wärmeverluste bei der Permeabilitätsbestimmung mit höheren Temperaturen zu vermeiden. Abbildung 6 zeigt die Anlage, wie sie von Heinemann (1999) aufgebaut wurde.

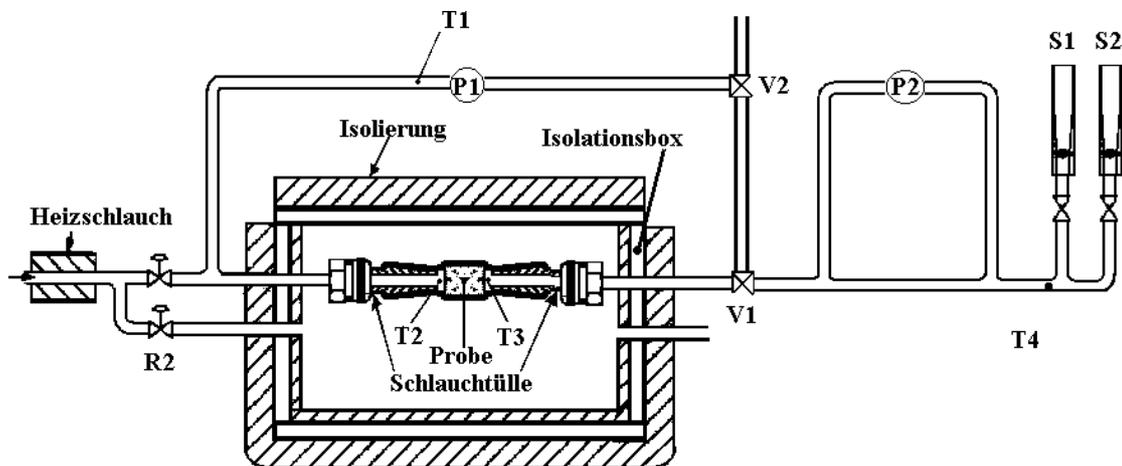


Abbildung 6: Messeinrichtung zur Bestimmung der Permeabilität von Holzwerkstoffproben bei unterschiedlichen Temperaturen nach Heinemann (1999)

4.6. Methode von Shang et al. 1999

Shang et al. (1999) ermittelten die Permeabilität von Spanmatten von Holzspänen aus Linde (*Tilia platyphyllos*), Pappel (*Populus tremula*), Birke (*Betula verrucosa*) und Ulme (*Ulmus carpinifolia*). Die Apparatur zur Bestimmung der Permeabilität bestand aus Metallnetz, Kompressor, Manometer zum Messen der Luftgeschwindigkeit vor und nach der Probe, Rohre, Differenzdruckmesser und zylindrischem Bett, in das die Späne eingesetzt werden konnten. Abbildung 7 zeigt die Apparatur. Das zylindrische Bett war horizontal angeordnet. Mit dieser Apparatur konnten sie nur die Permeabilität senkrecht zur Plattenebene messen. Die Späne im zylindrischen Bett wurden nicht verdichtet. Infolgedessen konnten nur der Einfluss der Schüttdichte von Holzspänen auf die Permeabilität ermittelt werden. Weiterhin untersuchten Shang et al. (1999) die Permeabilität in Abhängigkeit von der Holzart, der Verteilung der Spangröße, der Porosität und der Feuchte. Mit Hilfe eines Kompressors wurde auf der einen Seite der Probe ein Überdruck erzeugt. Auf der Niederdruckseite bestimmten Shang et al. (1999) die Luftgeschwindigkeit. Beim Versuch wurden die Luftgeschwindigkeit und die Druckdifferenz pro Probenlänge gemessen, um festzustellen, ob das Gesetz von Darcy Gültigkeit besitzt. Es ergab sich bei einem Luftstrom von weniger als 3 m/s über eine charakteristische Partikellage eine lineare Beziehung

zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druckdifferenz je Probenlänge. Unter diesen Bedingungen gilt zur Beschreibung der Fluidbewegung in porösen Körpern das Gesetz von Darcy, weil der Gasstrom in der Probe laminar ist. Mit zunehmender Druckdifferenz nahm die Luftgeschwindigkeit zu. Die Permeabilität nahm mit zunehmender Luftgeschwindigkeit ab.

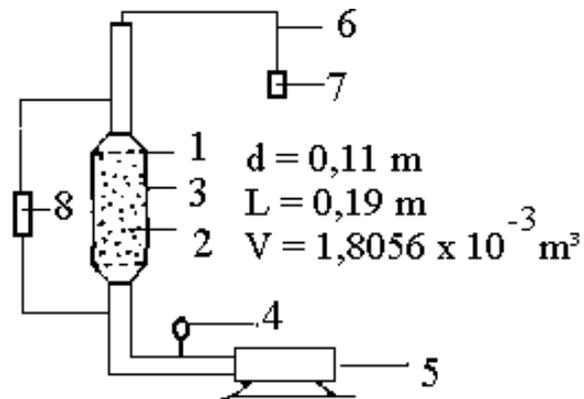


Abbildung 7: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Permeabilität von Shang et al. (1999)
1. Metallnetz, 2. Partikel, 3. Zylindrisches Bett, 4. Manometer, 5. Kompressor 6. Rohr, 7. Luftgeschwindigkeitsmesser, 8. Differenzdruckmesser

5. Einflussfaktoren der Permeabilität bei Holzwerkstoffen

5.1. Holzart

Denisov et al. (1975) ermittelten den Einfluss verschiedener Holzarten auf die Permeabilität von Spanwerkstoffen. Es wurden dreischichtige, 19 mm dicke Spanplatten aus Lärchen- bzw. Tannenholz hergestellt und untersucht. Im gesamten untersuchten Rohdichtebereich erwiesen sich die Spanplatten aus Tanne als weniger durchlässig gegenüber den Platten aus Lärchenholz. Denisov et al. (1975) sehen die Ursache darin, dass sich weiche und harte Holzarten bei der Spanvliesbildung unterschiedlich verhalten.

Shang et al. (1999) bestimmten den Einfluss verschiedener Holzarten mit gleicher Spangröße auf die vertikale Permeabilität bei niedriger Mattendichte von 113 bis 154 kg/m³. Dabei ergab sich bei Verwendung von Ulme eine höhere Permeabilität als bei Pappel, und diese ist wiederum höher als bei Linde. Das deutet darauf hin, dass durch die Variation der Holzarten verschiedene Schüttdichten infolge eines unterschiedlichen Hohlraumsystems vorhanden sind. Deshalb hängt die Permeabilität von der jeweils verwendeten Holzart ab.

5.2. Rohdichte der Platten

Lehmann (1972) verglich die Permeabilität von Spanplatten mit einer mittleren Rohdichte von 650 kg/m³, Faserhartplatten mit einer mittleren Dichte von 790 kg/m³ und Faserdämmplatten mit einer mittleren Rohdichte von 540 kg/m³. Eine Abnahme der Permeabilität wurde in der Reihenfolge Faserdämm-, Span- und Faserhartplatten, also in der Reihenfolge der Dichte, nachgewiesen.

Nach Denisov et al. (1975) nimmt im Rohdichtebereich von 300 bis 800 kg/m³ die gemessene Permeabilität von Luft und Dampf senkrecht zur Mattenebene mit zunehmender Dichte ab. Die horizontale und vertikale Permeabilität von Spanplatten aus definierten Spänen bei verschiedenen Feuchten im Rohdichtebereich von 550 bis 650 kg/m³ und von dreischichtigen Platten aus verschiedenen Holzarten im Rohdichtebereich von 520 bis 800 kg/m³ wurden untersucht. In beiden Fällen nahm die Permeabilität bei der Erhöhung der Rohdichte ab.

Hata (1993) kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Die vertikale und horizontale Permeabilität der Spanplatten verringerte sich mit zunehmender Rohdichte zwischen 300 und 600 kg/m³. Mit zunehmender Rohdichte zwischen 300 und 400 kg/m³ sank die Permeabilität parallel zur

Plattenebene stark ab, von 400 bis 600 kg/m³ nahm sie langsamer ab. Senkrecht zur Plattenebene ging die Permeabilität im gesamten Rohdichtebereich zwischen 400 bis 600 kg/m³ langsam zurück. Bei einer Rohdichte von 600 kg/m³ hatten die beiden Permeabilitäten den gleichen Wert. Letzteres wurde von anderen Forschern nicht festgestellt.

v. Haas (1998) und v. Haas et al. (1998) untersuchten die horizontalen und vertikalen Permeabilitäten sehr umfangreich. Die Rohdichte beeinflusst danach die Permeabilität für alle homogen aufgebauten Platten sehr stark. Die Permeabilität vergrößert sich bei Reduzierung der Rohdichte von 1000 auf 400 kg/m³ um das 1000-fache. Die Permeabilität parallel zur Plattenebene von Proben mit einem ausgeprägten Rohdichteprofil bei gleicher mittlerer Rohdichte ist wesentlich größer als bei Proben mit einem homogenen Rohdichteprofil. Das Verhältnis der Permeabilitätswerte beträgt hier 2,6:1. Senkrecht zur Plattenebene sind industriell hergestellte MDF-Platten aus Kiefernholz mit einem ausgeprägten Rohdichteprofil bei gleicher mittlerer Rohdichte undurchlässiger als im Labor hergestellte Platten, wobei die geringfügig niedrigere Permeabilität wahrscheinlich durch die Rohdichteunterschiede über den Plattenquerschnitt verursacht wird. Die im Labor beleimten und gestreuten Matten weisen nahezu die Durchlässigkeit wie industriell beleimte und gestreute Matten auf.

Nach Shang et al. (1999) nimmt mit zunehmender Schüttdichte zwischen 180 bis 220 kg/m³, bei gleicher Holzfeuchtigkeit, die vertikale Permeabilität bei allen untersuchten Holzarten linear ab.

5.3. Partikelcharakteristika und Porenstruktur

Denisov et al. (1975) untersuchten den Einfluss der Partikelcharakteristika. Die Auswertung der an einschichtigen Spanmatten mit einer Rohdichte von 500 kg/m³ erzielten Versuchsergebnisse zeigt, dass breite, flache Späne der Luft und dem Dampf einen bedeutend größeren Widerstand entgegensetzen als Reißspäne und insbesondere Sägespäne. Das weist darauf hin, dass das Medium durch die Räume zwischen den Spanpartikeln hindurchströmt und die Späne umströmt werden. Infolgedessen wird bei Vollholz eine um ein bis zwei Zehnerpotenzen geringere Permeabilität gemessen als bei Spanplatten der gleichen Holzart und mit derselben Rohdichte. Bei der Untersuchung der Permeabilität von Spanplatten aus definierten Spänen zeigte sich, dass die horizontale und vertikale Permeabilität mit zunehmender Breite abnahm. Mit zunehmender Spanlänge und Spandicke stiegen die horizontale und vertikale Permeabilität an. Als Ursache für die Vergrößerung der horizontalen und vertikalen Permeabilität bei zunehmender Spanlänge kann man eine ungleichmäßigere Mattenbildung und als Folge davon eine örtlich geringere

Rohdichte ansehen. Die Spandicke wirkt sich weniger auf die Permeabilität parallel zur Plattenebene als auf die Permeabilität senkrecht zur Plattenebene aus. Dickere Späne ergeben eine weniger dichte Matte. Sie verformen sich nicht so leicht, werden um so mehr verdichtet; damit bleibt eine größere Hohlraumstruktur, die einen Stoffaustausch vor allem über die Mattendicke ermöglicht. Durch die Vergrößerung der Plattenrohichte von 550 auf 650 kg/m³ nahm der Einfluss der Spanabmessungen auf die horizontale und vertikale Permeabilität stark ab.

Lehmann (1972) hat die Permeabilitätswerte von Holzwerkstoffplatten mit Vollholz gleicher Rohdichte verglichen. Vollholz ist undurchlässiger als Holzwerkstoffplatten. Er weist darauf hin, dass die Hohlräume zwischen den Partikeln der Holzwerkstoffplatten die Permeabilität stärker beeinflussen als die Porenstruktur des Vollholzes. Eine Erklärung dafür ist, dass das Gas zum großen Teil um die Partikel herum strömt und nicht durch die Holzpartikel.

Im Gegensatz zum Ergebnis von Denisov (1975) nahmen bei Hata (1993) die horizontale und vertikale Permeabilität senkrecht und parallel zur Spanplattenebene mit zunehmender Spanlänge bei gleicher Spanbreite und -dicke ab. Mit zunehmender Spanbreite bei gleicher Spandicke und Spanlänge sanken die beiden Permeabilitäten, mit zunehmender Spandicke stiegen die beiden Permeabilitäten.

v. Haas (1998) und v. Haas et al. (1998) gehen sehr differenziert auf den Einfluss der Partikelgeometrie ein. Die Permeabilität parallel und senkrecht zur Plattenebene hängt demnach von der Rohdichte und von der Materialart (DS-, MS-Späne, Fasern und Strands) bei einem Klebstoffgehalt von 11 % ab. Bei niedrigen Rohdichten erweisen sich das Fasermaterial und das OSB-Material (nur in vertikaler Richtung) als sehr wenig permeabel. Die DS-Späne zeigen sich weniger permeabel als die MS-Späne. Die MS-Späne sind am durchlässigsten. Bei hohen Rohdichten ist das Fasermaterial am durchlässigsten, gefolgt von den DS-Spänen und den MS-Spänen. OSB erweist sich in vertikaler Richtung als am wenigsten permeabel. Es zeigen sich nur geringe Unterschiede der Permeabilitätswerte in vertikaler und horizontaler Richtung zwischen zwei Mittelschicht-Spanmaterialien sowie zwischen zwei Deckschicht-Spanmaterialien. Das Bauspanmaterial (Deck- und Mittelschicht) ist bei niedrigen Rohdichten etwas undurchlässiger und die Spanabmessung größer als beim Möbelspanmaterial. Ähnlich wie bei OSB führt eine größere Spanabmessung zu einer geringeren Permeabilität. Bei hohen Rohdichten weist die Faserplatte im Vergleich zu den anderen Platten wahrscheinlich die größere Anzahl von Poren auf, durch die das Gas strömen kann. Die Permeabilität von OSB-Platten senkrecht zur Plattenebene ist sehr niedrig. OSB weist die größte Spanabmessung auf. Das Gas muss um die Strands strömen, also längere Wege zurücklegen, wodurch selbst bei ähnlichen Abmessungen der Poren und bei gleicher Gasmenge höhere Strömungsverluste auftreten. Die Permeabilität von Proben aus

einer Mischung von 50 % Mittelschicht- und 50 % Deckschichtspänen in einem Rohdichtebereich von 400 bis 900 kg/m³ wurde ebenfalls bestimmt. Die Permeabilität parallel und senkrecht zur Plattenebene dieser Mischung lag ab einer Rohdichte von 600 kg/m³ in der Größenordnung der Deckschichtspäne, d.h. die Deckschichtspäne bestimmen in der Mischung sehr stark die Hohlraumstruktur.

Nach Shang et al. (1999) steigt die Permeabilität mit zunehmender Spangröße bei niedriger Rohdichte an. Untersucht wurden Spanmatten aus Linde, Pappel und Ulme. Das weist darauf hin, dass die Schüttdichte unterschiedlicher Holzarten mit zunehmender Spangröße abnimmt. Die Holzart hat ebenfalls Einfluss auf die Porenstruktur.

Einen Vergleich der Durchlässigkeiten der aus DS-, MS-Spänen und Fasern hergestellten Platten bei gleichen Rohdichten und Holzfeuchten hat Heinemann (1999) durchgeführt. Die Durchlässigkeit der aus MS-Spänen hergestellten Platten ist am größten, die Durchlässigkeit der aus Fasern hergestellten Platten ist dagegen in beiden Durchströmungsrichtungen am geringsten.

5.4. Art des strömenden Mediums

Denisov et al. (1975) untersuchten die Auswirkung von Dampf und Luft auf die Permeabilität von einschichtigen Spanvliesen. Die betrachteten Spanarten lagen im Rohdichtebereich von 300 bis 800 kg/m³. Der Absolutwert der Permeabilität für Dampf ist wesentlich kleiner als der entsprechende Wert für Luft. Das ist damit zu erklären, dass die Holzpartikel durch den Dampf quellen und sich die Poren und Kanäle verengen.

5.5. Strömungsrichtung

Bei Erhöhung der mittleren Rohdichte ist die horizontale Permeabilität höher als die vertikale Permeabilität. Die vertikale Permeabilität sinkt mit steigendem mittlerem Rohdichteprofil stärker als die horizontale Permeabilität bei einem ausgeprägten Rohdichteprofil bei gleicher mittlerer Rohdichte (Lehmann 1972).

Die horizontale Permeabilität der Platten bzw. Matten ist in jedem Fall höher als die vertikale Permeabilität. (Denisov et al. 1975, Heinemann 1999)

Die horizontale Permeabilität der Spanplatten ist immer höher als die vertikale Permeabilität. Das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Permeabilität beträgt 400:1 bis 3:1 bei zunehmender

Rohdichte von 300 kg/m^3 bis 600 kg/m^3 . Das Verhältnis hängt von der Spangeometrie und dem Verdichtungsverhältnis ab. (Hata 1993)

Bei der Untersuchung der Permeabilität von OSB parallel zur Plattenebene wurden gleichlaufende und querlaufende Strömungen geprüft. Eine gleichlaufende Strömung liegt vor, wenn die Luft in Richtung der Längsorientierung der Strands strömt. Eine querlaufende Strömung liegt vor, wenn die Luft quer zur Längsorientierung der Strands strömt. Oberhalb einer Rohdichte von 700 kg/m^3 beträgt das Verhältnis der gleichlaufenden zur querlaufenden Permeabilität ca. 3:1. Für Faser-, Deckschicht- und Strandmaterial sind alle Proben bei hohen Rohdichten senkrecht weniger permeabel als parallel. (v. Haas 1998 und v. Haas et al. 1998)

Den Vergleich des Verhältnisses von vertikaler zu horizontaler Permeabilität im gemessenen Rohdichtebereich haben Haselein (1998), v. Haas (1998) und v. Haas et al. (1998) durchgeführt. Bei Haselein sinkt die horizontale Permeabilität der Fasermatten mit zunehmender Rohdichte von 150 bis 1000 kg/m^3 stark ab. Im Gegensatz zur vertikalen Richtung sinkt die Permeabilität langsam im gesamten Rohdichtebereich. Abbildung 8 stellt die horizontale und vertikale Permeabilität der Fasermatten von Haselein (1998) dar. Man erkennt, dass bei geringer Rohdichte die Differenz der Permeabilität für Fasermatten zwischen den beiden Richtungen groß und bei hohen Rohdichten gering ist. Nach Haselein (1998) nimmt bei der Faserplatte das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität linear mit ansteigender Rohdichte zu. Abbildung 9 zeigt für Fasermatten das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität in Abhängigkeit zur Rohdichte nach Haselein (1998).

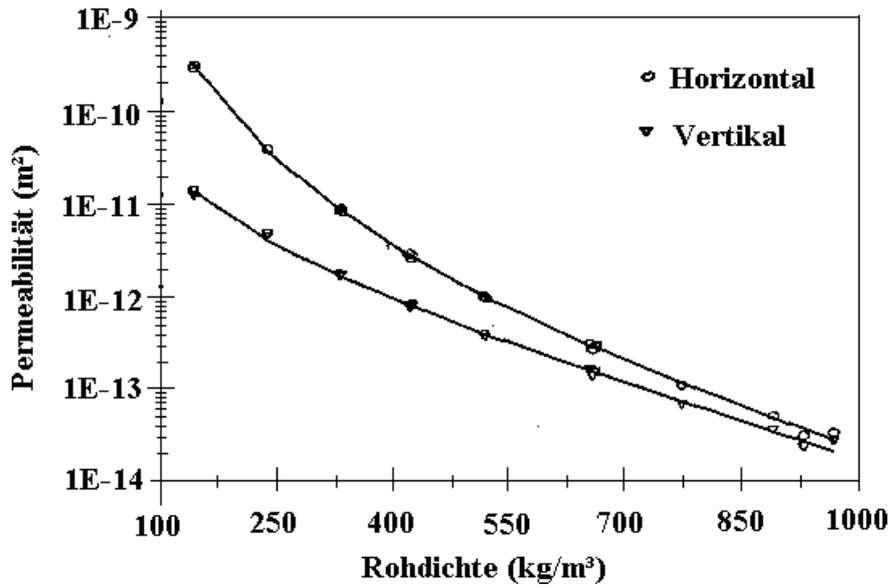


Abbildung 8: Horizontale und vertikale Permeabilität der Faserplatte in Abhängigkeit von der Rohdichte (Haselein 1998)

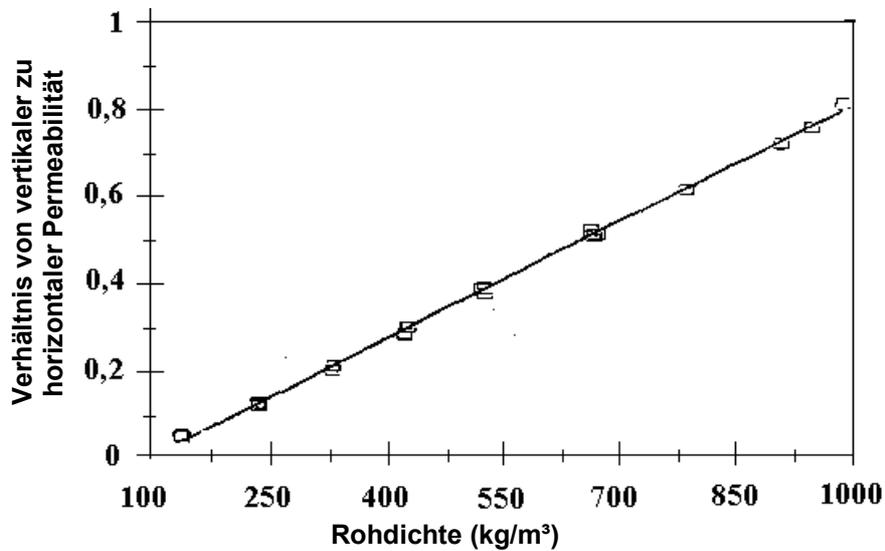


Abbildung 9: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte für Faserplatten (Haselein 1998)

Im Gegensatz zu Haselein ist der Permeabilitätsunterschied bei niedrigen Rohdichten für Faserplatten und DS-Möbelplatten in den beiden Richtungen gering (v. Haas 1998 und v. Haas et al. 1998). Das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität nimmt dabei mit

zunehmenden Rohdichten ab (Abbildung 10).

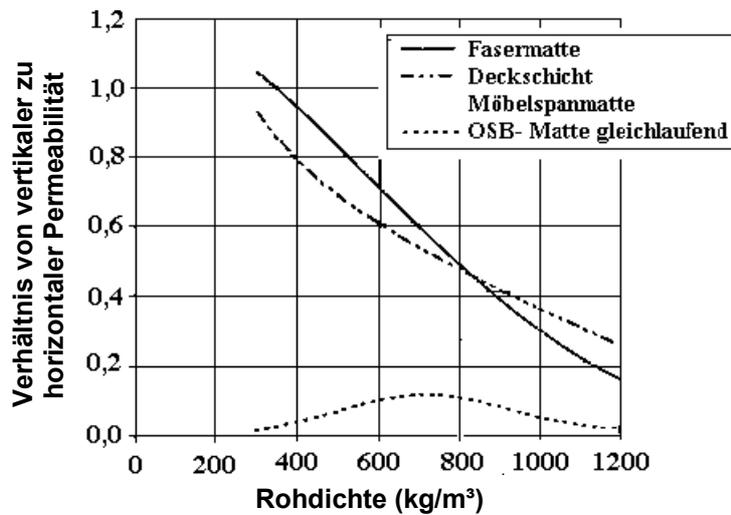


Abbildung 10: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität des Faser-, Deckschicht- und Strandmaterials bei verschiedenen Rohdichten nach v. Haas 1998 und v. Haas et al. 1998

Einen Vergleich des Verhältnisses von vertikaler zu horizontaler Permeabilität nach den Methoden an der Oregon State University und an der Universität Hamburg hat Heinemann (1999) durchgeführt. Betrachtet man das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität, ergeben sich mit den beiden Messmethoden ebenso unterschiedliche Absolutwerte wie auch entgegengesetzte Tendenzen. Bei den Versuchen an der Oregon State University (gemäß Anlage von Haselein 1998) nahmen die Verhältnisse von vertikaler zu horizontaler Permeabilität der Fasermatte im Rohdichtebereich von 300 bis 800 kg/m³ mit einem Feuchtegehalt von ca. 2 % und 10 % zu, ebenso wie bei den Versuchen von Haselein (1999). Allerdings durchschritten beiden Kurven bei einer Rohdichte von ca. 800 kg/m³ ein Maximum, bevor mit weiter ansteigender Rohdichte das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität wieder abnahm. Abbildung 11 zeigt das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität zweier Fasermatten mit unterschiedlichem Feuchtegehalt im untersuchten Rohdichtebereich (Heinemann 1999). Bei der an der Universität Hamburg entwickelten Methode zeigte sich beim Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität an verklebten Platten eine entgegengesetzte Tendenz (Abbildung 12). Insgesamt ist mit zunehmender Rohdichte die Permeabilitätsverringerung in vertikaler Richtung höher als in horizontaler Richtung. Infolgedessen nahm das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität der Fasermatte mit zunehmender Rohdichte ab. Abbildung 12 zeigt das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität zweier Fasermatten mit

unterschiedlichen Feuchtegehalten im gemessenen Rohdichtebereich nach der an der Universität Hamburg entwickelten Messmethode (Heinemann 1999).

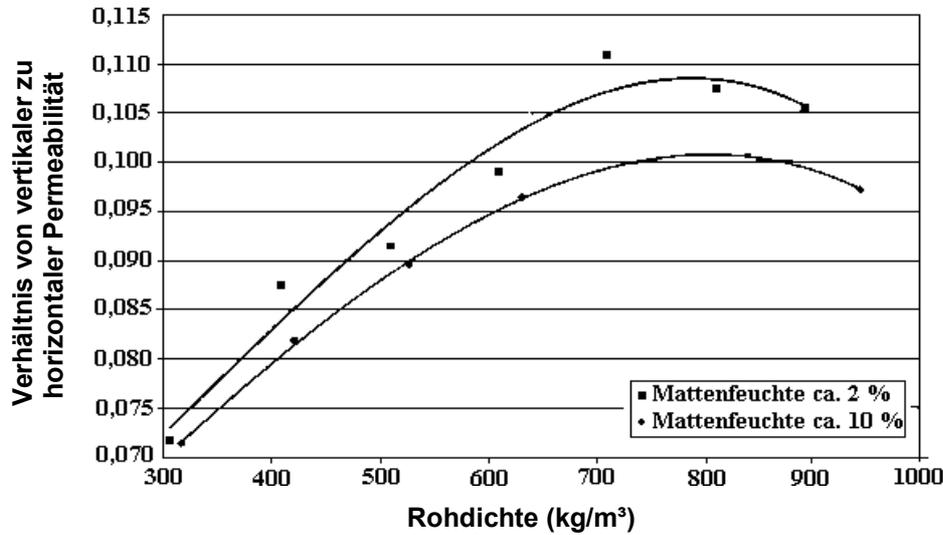


Abbildung 11: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität zweier Faserplatten mit unterschiedlichen Feuchtegehalten im gemessenen Rohdichtebereich nach der Methode an der Oregon State University (Anlage von Haselein 1998) nach Heinemann (1999)

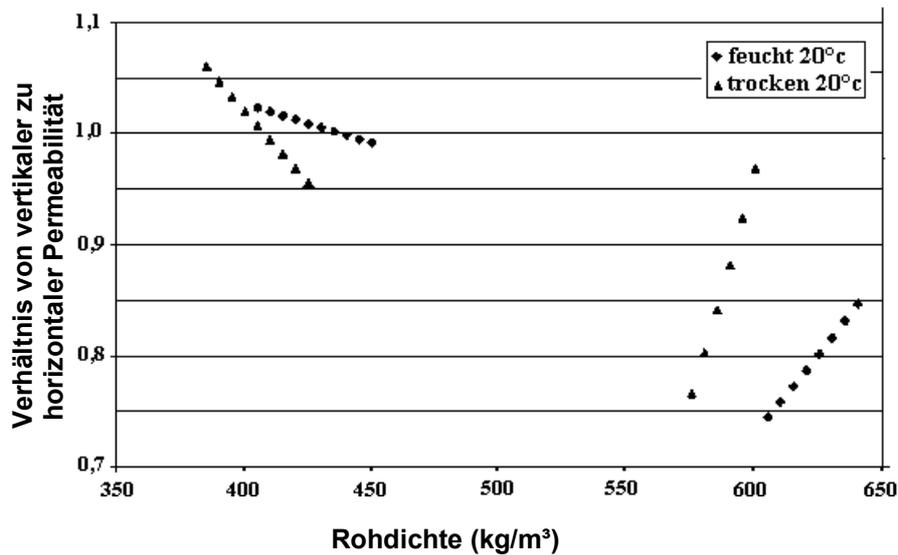


Abbildung 12: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität einer Faserplatte mit unterschiedlichen Feuchten in Abhängigkeit von der Rohdichte nach der Methode an der Universität Hamburg (Heinemann 1999)

5.6. Feuchte der Matten

Bei Erhöhung der Mattenfeuchte von 0 auf 15 % nimmt die Permeabilität senkrecht und parallel zur Plattenebene im Rohdichtebereich von 550 bis 650 kg/m³ ab (Denisov et al. 1975). Der Feuchtegehalt der untersuchten Spanplatten wurde dabei nicht angegeben.

Eine Steigerung der Feuchtigkeit von 7 auf 10 % bewirkt aber nur oberhalb einer Rohdichte von 900 kg/m³ eine Verringerung der Permeabilität in vertikaler und horizontaler Richtung. Eine Feuchteerhöhung von 0 auf 7 % beeinflusst die Permeabilität nur wenig. Wahrscheinlich werden durch die Quellung der Späne bei hoher Rohdichte die wenigen noch freien Hohlräume verschlossen, so dass eine starke Minderung der Durchlässigkeit nach den Ergebnissen von v. Haas und v. Haas et al. (1998) auftritt.

Im Gegensatz dazu stellten Shang et al. (1999) fest, dass die vertikale Permeabilität der unbeleimten Spanmatten aus unterschiedlichen Holzarten mit gleicher Rohdichte (bezogen auf trockenes Holz) von ca. 180 – 220 kg/m³ und zunehmender Mattenfeuchte von 0 bis 10 % dramatisch sinkt. Ab einer Mattenfeuchte von 10 % nimmt die vertikale Permeabilität allmählich ab.

5.7. Klebstoffanteil

v. Haas (1998) und v. Haas et al. (1998) ermitteln die horizontale und vertikale Permeabilität von Spanplatten aus Mittelschicht-Möbelspänen und von OSB-Platten. Der Klebstoffanteil hatte vor allem bei hohen Rohdichten einen Einfluss auf die Permeabilität, wobei sich bei Mittelschicht-Spänen und Strands die gleiche Abhängigkeit zeigte. Je höher der Klebstoffanteil, desto undurchlässiger erweist sich die Probe in vertikaler und horizontaler Richtung. Mit zunehmender Rohdichte bei 5 % und 11 % Klebstoffanteil steigt der Unterschied in der Durchlässigkeit. Es wurde festgestellt, dass das Gas bei Holzwerkstoffen vor allem um die Partikel herum strömt. Der Hohlraumanteil hat daher sehr großen Einfluss auf die Permeabilität. Bei höherem Klebstoffanteil und gleicher Rohdichte der Probe stehen in der Probe geringfügig mehr Hohlräume zur Verfügung, da der Klebstoff eine höhere Dichte als das Holz hat. Trotzdem reduziert sich die Permeabilität mit zunehmendem Klebstoffanteil. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass bei sehr hoher Dichte der Klebstoff zwischen benachbarten Spänen einen wenig durchlässigen Film bildet.

5.8. Temperatur

Bei gleicher Probenfeuchte sind für alle untersuchten Holzwerkstoffe, Rohdichten und Durchströmungsrichtungen die Proben bei einer Temperatur von 80°C gegenüber Luft geringfügig durchlässiger als bei 20°C (Heinemann 1999).

6. Material

Zur Bestimmung der Permeabilität wurden unbeleimte DS-, MS-Späne, Fasern und Strands von verschiedenen Holzwerkstoffherstellern verwendet. Die Geometrie der Materialien ist ein Faktor, der einen Einfluss auf die Permeabilität hat. Bei unterschiedlichen Materialien bzw. gleichen Materialien verschiedener Fraktionen (z.B MS-Späne) ist die Spangeometrie verschieden, wovon die Permeabilität abhängt. Um die Permeabilität bei verschiedenen Materialien und in Abhängigkeit von der Geometrie genau zu beschreiben, wurde Spanlänge, -breite und -dicke für DS-, MS-Späne und Strands analysiert. Für Fasern wurde die Dickenverteilung analysiert.

6.1. Spanmaterial

DS- und MS-Späne aus Nadelholz wurden von der Firma Pfeleiderer (Rheda – Wiedenbrück) für die Untersuchung bezogen.

- Die Späne wurden bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte im Normalklima 20/65 gelagert und anschließend zur Vermeidung der erneuten Feuchteaufnahme in Plastiksäcken verschlossen.
- Zur Bestimmung der Dimensionen wurden Späne auf einer Unterlage ausgebreitet. Stichproben wurden nach dem Zufallsprinzip entnommen und anschließend jeder Span einzeln vermessen. Die Dicke der Späne wurde mit einer Messuhr bestimmt, Breite und Länge wurden mit einem Messschieber gemessen. Die Abmessungen der kleinen Deckschichtspäne wurden mit einer Messlupe bestimmt.
- Zur Ermittlung der Zusammensetzung wurden die Späne mittels eines Taumel-Siebanalyse-Turms nach DIN 4188 fraktioniert. Dazu wurden 160 g Späne eingewogen und 10 Minuten mit 50 Umdrehungen pro Minute geschüttelt. Die einzelnen Fraktionen wurden gewogen und auf das Gesamtgewicht bezogen. Jeweils zwei Proben einer Spanart wurden fraktioniert und daraus der Mittelwert gebildet.

Die Spangrößenverteilungen der Mittelschichtspäne sind in den Abbildungen 13 bis 15 dargestellt.

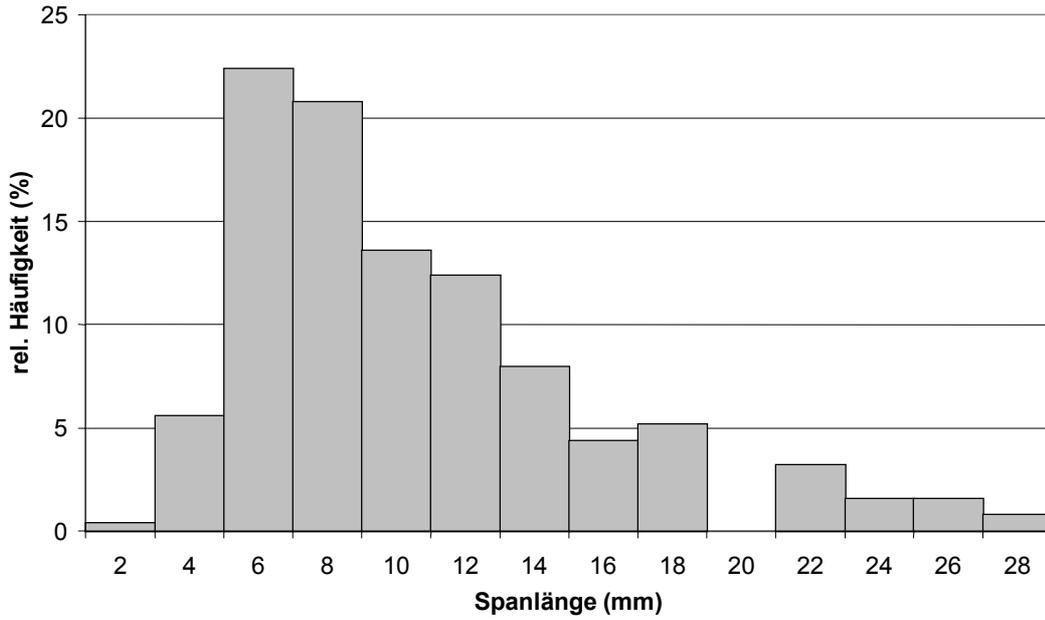


Abbildung 13: Verteilung der Spanlänge der MS-Späne

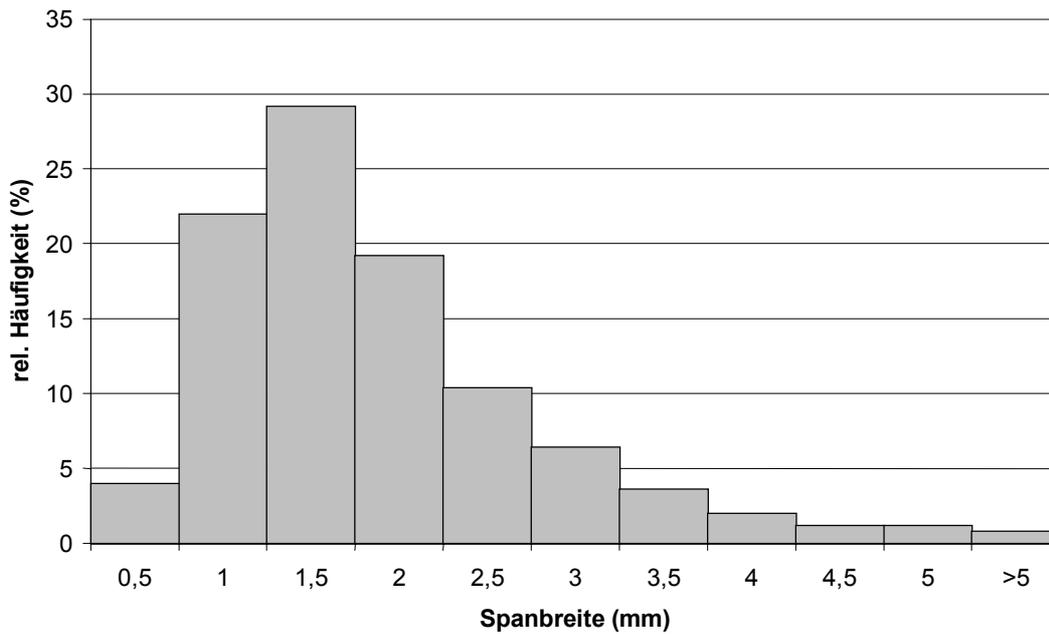


Abbildung 14: Verteilung der Spanbreite der MS-Späne

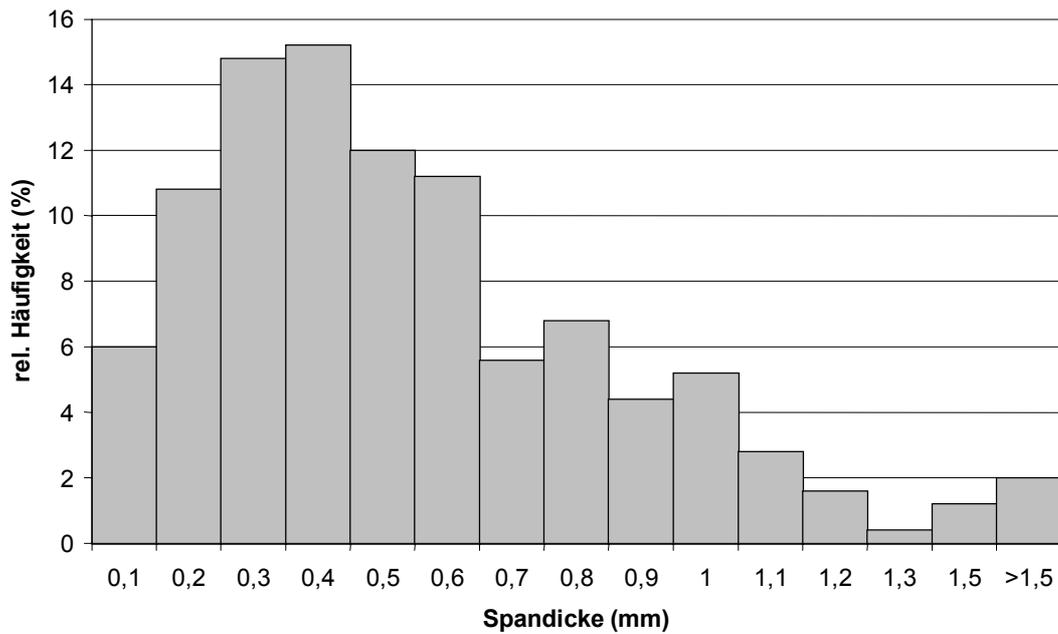


Abbildung 15: Verteilung der Spandicke der MS-Späne

Die einzelnen Fraktionen des Gewichtsanteils von DS- und MS-Spänen sind in Abbildung 16 und 17 wiedergegeben.

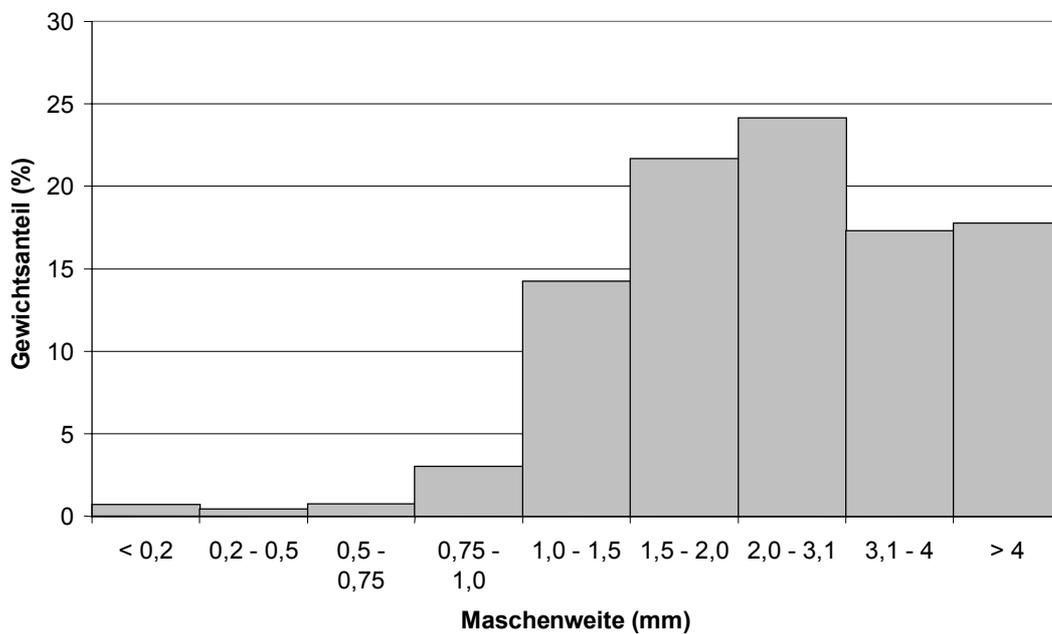


Abbildung 16: Gewichtsanteil der einzelnen Fraktionen der MS-Späne

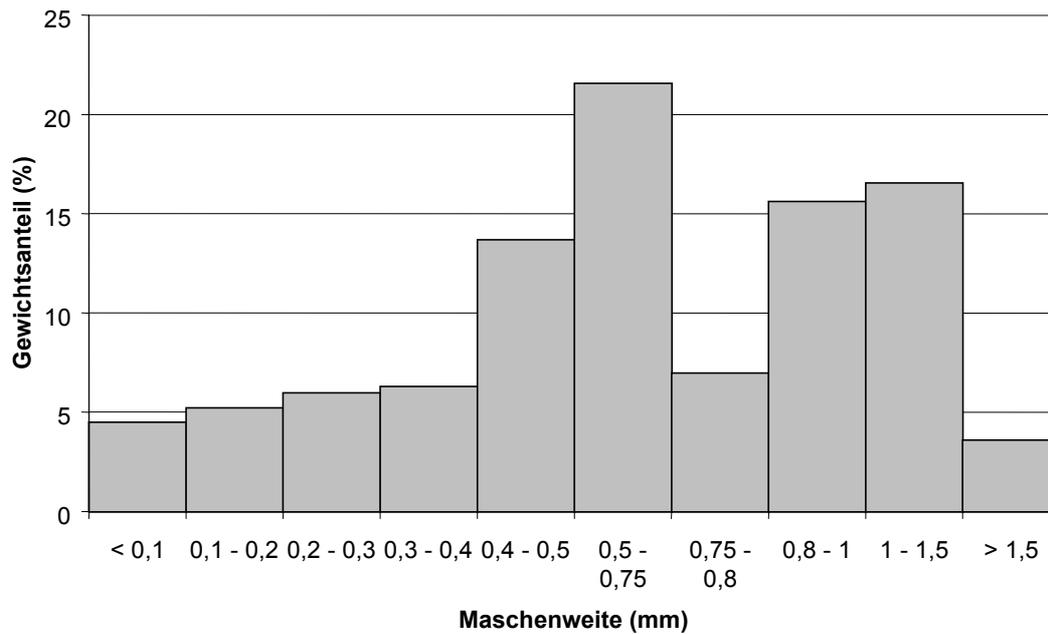


Abbildung 17: Gewichtsanteil der einzelnen Fraktionen der DS-späne

Tabelle 1 zeigt die Mittelwerte der Breiten, Längen und Dicken der einzelnen Siebfractionen von Deck- und Mittelschicht.

Tabelle 1: Mittelwerte der Spanlänge l , Breite b und Dicke d sowie des Schlankheitsgrades l/d , Spanoberfläche $l \times b$ und des Spanvolumens $l \times b \times d$ für verschiedene Spanarten (V = Variationskoeffizient, MS = Mittelschicht, DS = Deckschicht)

Maschenweite(mm)	Anzahl	l (mm)	V (%)	b (mm)	V (%)	d (mm)	V (%)	l/d	V (%)	$l \times b$ (mm ²)	V (%)	$l \times b \times d$ (mm ³)	V (%)
MS	250	9,59	54,40	1,66	65,07	0,51	68,91	35,91	196,13	18,03	114,08	11,78	190,75
> 4	100	20,8	39,85	5,21	32,3	0,93	70,41	39,64	107,92	105,2	48,2	101,78	92,04
3,1 - 4	100	15,7	42,37	3,38	23,07	1	63,75	27,08	102,2	50,63	38,92	49,57	70,84
2 - 3,1	100	13,6	43,89	2,35	30,42	0,72	54,05	31,93	101,38	30,35	45,34	21,14	67,06
1,5 - 2	100	9,48	54,65	1,64	32,86	0,54	48,34	22,76	85,76	14,67	57,29	8,36	91,16
1 - 1,5	100	5,92	39,81	1,17	29,43	0,54	42,46	18,22	173,63	6,75	44,93	3,51	56,8
DS													
0,5 - 0,75	50	2,10	18,80	0,25	54,14	0,12	68,85	46,3	223,41	0,52	57,86	0,06	84,51
0,75 - 0,8	50	2,60	23,66	0,55	36,13	0,18	57,62	29,4	173,74	1,38	33,56	0,26	83,46
0,8 - 1,0	50	2,78	37,23	0,73	36,25	0,26	57,37	28,41	277,96	1,87	34,69	0,50	71,29
1,0 - 1,5	50	3,42	33,06	1,07	34,73	0,29	55,84	22,11	142,69	3,45	37,49	1,01	63,20

6.2. Strands

Strands aus Nadelholz wurden von einem OSB-Hersteller (Kronopol, Polen) bezogen. Zur Bestimmung der Stranddimension wurde die gleiche Methode wie bei den Spänen angewendet. Die Größenverteilungen der Strands sind in den Abbildungen 18 bis 20 dargestellt. Tabelle 2 zeigt die Mittelwerte der Breiten, Längen und Dicken.

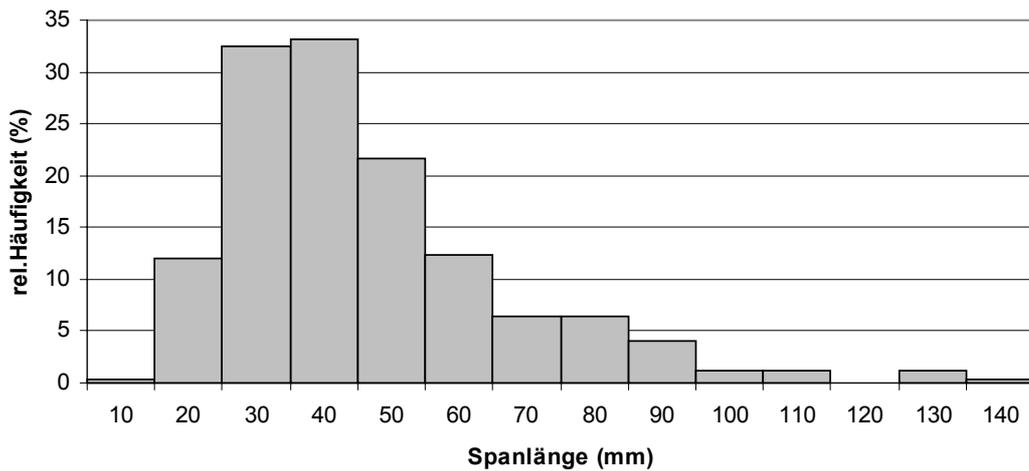


Abbildung 18: Verteilung der Spanlänge der Strands

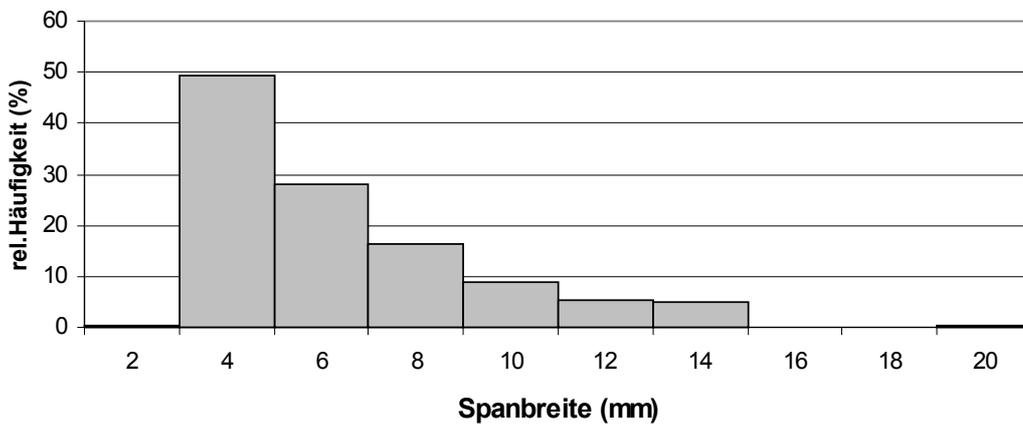


Abbildung 19: Verteilung der Spanbreite der Strands

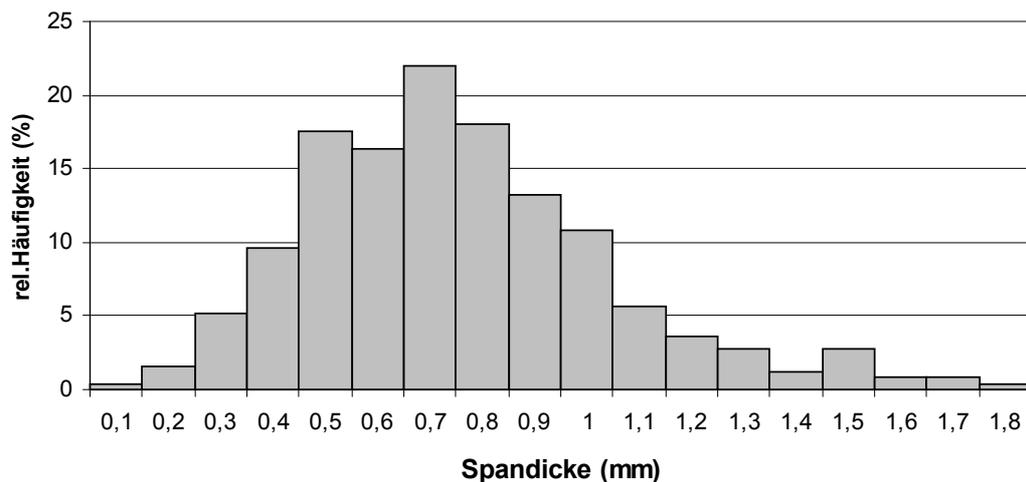


Abbildung 20: Verteilung der Spandicke der Strands

Tabelle 2: Mittelwerte der Spanlänge l , Breite b , und Dicke d , sowie des Schlankheitsgrades l/d , Spanoberfläche $l \times b$ und des Spanvolumens $l \times b \times d$ für verschiedene Spanarten (V = Variationskoeffizient)

	Anzahl	l (mm)	V (%)	b (mm)	V (%)	d (mm)	V (%)	l/d	V (%)	$l \times b$ (mm ²)	V (%)	$l \times b \times d$ (mm ³)	V (%)
Strands	331	41,62	50,06	4,74	64,63	0,71	41,33	67,73	62,14	206,68	100,88	161,16	134,59

6.3. Fasern

Fasern aus Nadelholz wurden von einem MDF-Hersteller (Kronopol, Polen) bezogen. Zur Analyse der Fasergröße wurde eine Bauer McNett-Fraktionierung durchgeführt. Hierzu wurden 10 g atro Fasern über einen Zeitraum von 12 h in Leitungswasser suspendiert und anschließend mit einem Ultra Torrax Rührgerät bei niedriger Rotationsgeschwindigkeit für ca. 1 min aufgeschlagen. Nach dem Befüllen des Fraktioniergerätes mit Wasser wurden Fasern hinzugegeben und 20 min durch vier Siebe unterschiedlicher Maschenweite (20, 50, 100 und 200 mesh) gespült. Die suspendierten Fraktionen wurden über Fritten, in die zuvor getrocknete und gewogene Filter eingelegt waren, dekantiert. Der Vorgang konnte durch eine angeschlossene Vakuumpumpe beschleunigt werden. Zur Bestimmung der Faserfraktionen wurden die auf den Filtern zurückgehaltenen Fasern im Trockenschrank bei 103°C getrocknet. Die relative Faserdickenverteilung, in Abbildung 21 wiedergegeben, wurde gravimetrisch bestimmt. Die Fraktion D200 bildet den Feinstoff und wurde rechnerisch als Differenz zur Ausgangsmasse ermittelt.

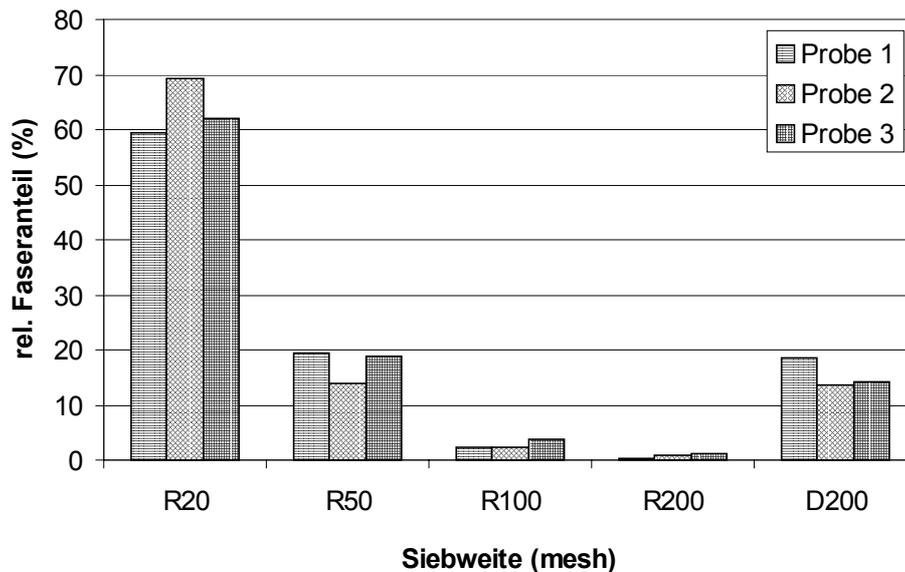


Abbildung 21: Relative Fasergrößenverteilung (gravimetrisch)

Diese Art der Messmethode sagt nichts über die Verteilung der Faserlänge aus. Als nachteilig ist auch die Suspendierung der Fasern zu beurteilen, da unterschiedliches Quellungsverhalten der einzelnen Faserdicken als Fehlergröße in die Ergebnisse mit eingeht. Luftstrahlsieb oder Bestimmung des Mahlgrades nach Schopper-Riegler wurden nicht in Betracht gezogen. Bildanalytische Methoden wie FiberScan oder mit einem Verfahren, welches Earl McCarthy (QualScan, McCarthy Products Company) entwickelt hat, konnten aus finanziellen Gründen nicht in Erwägung gezogen werden.

6.4. Vorbereitung der Materialien zur Bestimmung der Permeabilität

Zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Feuchten mit Messvorrichtung I (siehe Abschnitt 7.1) wurden MS-, DS-Späne und Fasern bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte im Normalklima 20/65 und Klima 20/35 gelagert und anschließend zur Vermeidung der erneuten Feuchteaufnahme in Plastiksäcken verschlossen. MS-, fraktionierte MS-, DS-Späne und Fasern wiesen einen Feuchtegehalt von 10–11 % für Normalklima 20/65 und 6–7 % für Klima 20/35 auf.

Zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit einem Klebstoffsanteil von 10 % und einer Feuchte von ca. 10–11 % wurden MS-, DS-Späne und Fasern mit einer Anfangsfeuchte von ca. 3–4 %, die von der Industrie geliefert wurden, aus den Plastiksäcken entnommen und direkt in einer kleinen Laborbeleimtrommel mit 32 cm Durchmesser und 40 cm Breite beleimt. Ein flüssiges Harnstoffharz (Kaurit 345 der BASF AG) wurde als Klebstoff

verwendet. Die Eigenschaften von Kaurit 345 sind nach Herstellerangabe in Tabelle 3 dargestellt. Zum Beleimen wurde das Harnstoffharz ohne Härter verwendet. Der Klebstoffanteil betrug 10 % Festharz bezogen auf atro Holzmaterial.

Tabelle 3: Eigenschaften von Kaurit 345

Trockengehalt	68 ± 1 %
pH – Wert bei 20 °C	7,5 – 9,5
Dichte bei 20 °C	1,29 – 1,31 g/cm ³
Viskosität bei 20 °C	400 – 600 mPa s

Nach dem Beleimen wurde das Material in einem Plastiksack aufbewahrt. Die Permeabilität des beleimten Materials musste am gleichen Tag nach dem Beleimen gemessen werden, um eine Härtung des Klebstoffs und/oder ein zu starkes Wegschlagen in die Späne zu vermeiden. Fasern wurden nach dem Beleimen durch Fluffen vereinzelt, um einzelne verdichtete Faserballen wieder aufzulockern.

Eine Übersicht über die verschiedenen Materialien und Faktoren zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit der Messvorrichtung I wird in Tabelle 4 gezeigt.

Tabelle 4: Materialien und Faktoren zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung I

Materialart	Klebstoffanteil 10 %	Klebstoffanteil 0 %	
	Feuchte 10 – 11 %	Feuchte 10 – 11 %	Feuchte 6 – 7 %
Fasern	X	X	X
DS-Späne	X	X	X
MS-Späne	X	X	X
MS-Späne			
Franktion 1-1,5 mm		X	
Franktion 1,5-2 mm		X	
Franktion 2-3,1 mm		X	
Franktion 3,1-4 mm		X	

Die verwendeten Materialien zur Bestimmung der Permeabilität mit Messvorrichtung II (siehe Abschnitt 7.2) bei der ersten Messung sind unbeleimte DS-, MS-Späne, Fasern und Strands bei einer Feuchte von ca. 11,3 – 12,3 %.

Die verwendeten Materialien zur Bestimmung der Permeabilität mit Messvorrichtung II bei der zweiten Messung sind unbeleimte DS-, MS-Späne, Fasern und Strands bei einer Feuchte von ca. 12,2 – 13,9 % (siehe die Begründung in Abschnitt 7.2.3.2).

7. Methoden

Klassischerweise werden zur Bestimmung der Permeabilität Platten bestimmter Rohdichte und gleichmäßiger Dichteverteilung hergestellt (vgl. von v. Haas 1998 und Heinemann 1999). Da dieses Verfahren extrem zeitaufwendig ist, sollen neue Methoden bzw. Verfahren entwickelt werden.

Um die horizontale und vertikale Permeabilität schnell und einfach bei verschiedenen Rohdichten ermitteln zu können, wurden zwei Messvorrichtungen entwickelt. Die eine ist für kontinuierliche eindimensionale und die andere für kontinuierliche zweidimensionale Permeabilitätsmessung bestimmt. Die erste Anlage eignet sich für Faser- und Spanmaterialien, die zweite Anlage auch für Strands.

7.1. Messvorrichtung I zur kontinuierlichen eindimensionalen Messung der Permeabilität

Mit Messvorrichtung I soll die Permeabilität von DS-, MS-Spänen und Fasern gemessen werden. Die Materialien werden in der Anlage verdichtet und die Permeabilität in horizontaler und vertikaler Richtung getrennt gemessen.

7.1.1. Konstruktion der Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität

Abbildung 22 zeigt schematisch den Aufbau der Messanlage zur Messung der vertikalen Permeabilität. Mit der nachfolgend beschriebenen Anlage wird mittels Luft die vertikale Permeabilität an DS-, MS-Span- und Fasermatten gemessen.

Die Anlage besteht aus dem unteren Grundkörper (1), von dem aus sich die Einzelteile der Anlage zentrisch von unten nach oben montieren lassen und der gleichzeitig den Lufteintritt aufnimmt. Die verdichtete Luft strömt durch 124 Bohrungen der unteren Pressplatte (2) in den geschlossenen zylindrischen Pressraum (3), der einen inneren Durchmesser von 40 mm aufweist. Auf der Gegenseite begrenzt die axial bewegliche und ebenfalls mit 124 Bohrungen versehene obere Pressplatte (4) den Pressraum. Abbildung 23 zeigt die obere und untere Pressplatte mit jeweils 124 Bohrungen und Abbildung 24 zeigt den geschlossenen zylindrischen Pressraum (Zylinderrohr). Die Bohrungen wurden so gewählt, dass die DS-Späne nicht durch die Bohrungen dringen, bevor sie verdichtet werden. Der Durchmesser

der Bohrungen in den Pressplatten beträgt 1 mm, versehen mit einer Senkung zum harmonischen Luftdurchlaß. Nach den Untersuchungen von v. Haas (1998) und v. Haas et al. (1998) verringern sich die Permeabilitätswerte der mit Epoxidharz ummantelten Proben um etwas mehr als eine Zehnerpotenz im Vergleich zu den nicht ummantelten Proben. Da die Luft am Probenrand durchströmt, tritt eine geringere Druckdifferenz zwischen dem Druck vor und nach der Probe auf. Infolgedessen ist die Permeabilität der nicht mit Epoxidharz ummantelten Proben höher als die der mit Epoxidharz ummantelten. Um diesen Einfluss zu reduzieren, befinden sich die Bohrungen nur innerhalb von 30 mm des Pressplattendurchmessers von insgesamt 40 mm. Die Bohrungen sind kreisförmig angeordnet, pro Flächeneinheit konstant. Die axiale Press- bzw. Entlastungsbewegung erfolgt manuell über die hohle Gewindespindel (7), die an ihrem unteren Ende als Führungs- und Dichtungszylinder gefertigt ist. Die lineare Führung beim Press- bzw. Entlastungsvorgang erfolgt über die Führungsbuchse (5) entlang der Außenbuchse (6) und dem Zylinderrohr. Am oberen äußeren Ende der hohlen Gewindespindel ist eine drehbare Schnellkupplung (8) angebaut, damit sich beim Drehen der Gewindespindel die darüberliegenden Teile nicht mitdrehen, wenn die Probe verdichtet bzw. entlastet wird. Die hohle Gewindespindel dient außerdem dazu, die Luft nach Durchströmung der Probe in Richtung Schwebekörpermessgerät (S) entweichen zu lassen. Das Schwebekörpermessgerät wurde nach VDI/VDE-Richtlinie 3513 (Blatt 3) eingebaut. Die integrierten Rohrleitungen der Messvorrichtung aus Edelstahl haben einen Innendurchmesser von 7 mm. Die Verbindung zwischen dem Schwebekörpermessgerät und dem 3-Wegeventil (V3) ist ein flexibler Schlauch (9) aus Edelstahl, der die Auf- bzw. Abwärtsbewegung der Spindel und damit des Presskolbens ermöglicht. Der Pressraum ist mittels Dichtbändern (A) und Nutringdichtungen (B) gegen die Atmosphäre abgedichtet. Zur Messung der vertikalen Permeabilität werden MS- und DS-Späne sowie Fasern in das seitlich geschlossene Zylinderrohr gestreut und auf verschiedene Rohdichten verdichtet. Eine Markierung ist auf der Messanlage angebracht, damit die Länge der Probe mit Hilfe einer Schieblehre genau gemessen werden kann (C). Die Durchflussmenge wird durch das Dosierventil V1, mit dem die kleine Durchflussmenge exakt geregelt wird, eingestellt. Zur Aufnahme der Durchflussmenge sind Schwebekörperdurchflussmesser und zur Bestimmung des Druckniveaus sowie der Druckdifferenz sind Differenzdruckaufnehmer in die Messvorrichtung integriert. Abbildung 25 zeigt die Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität.

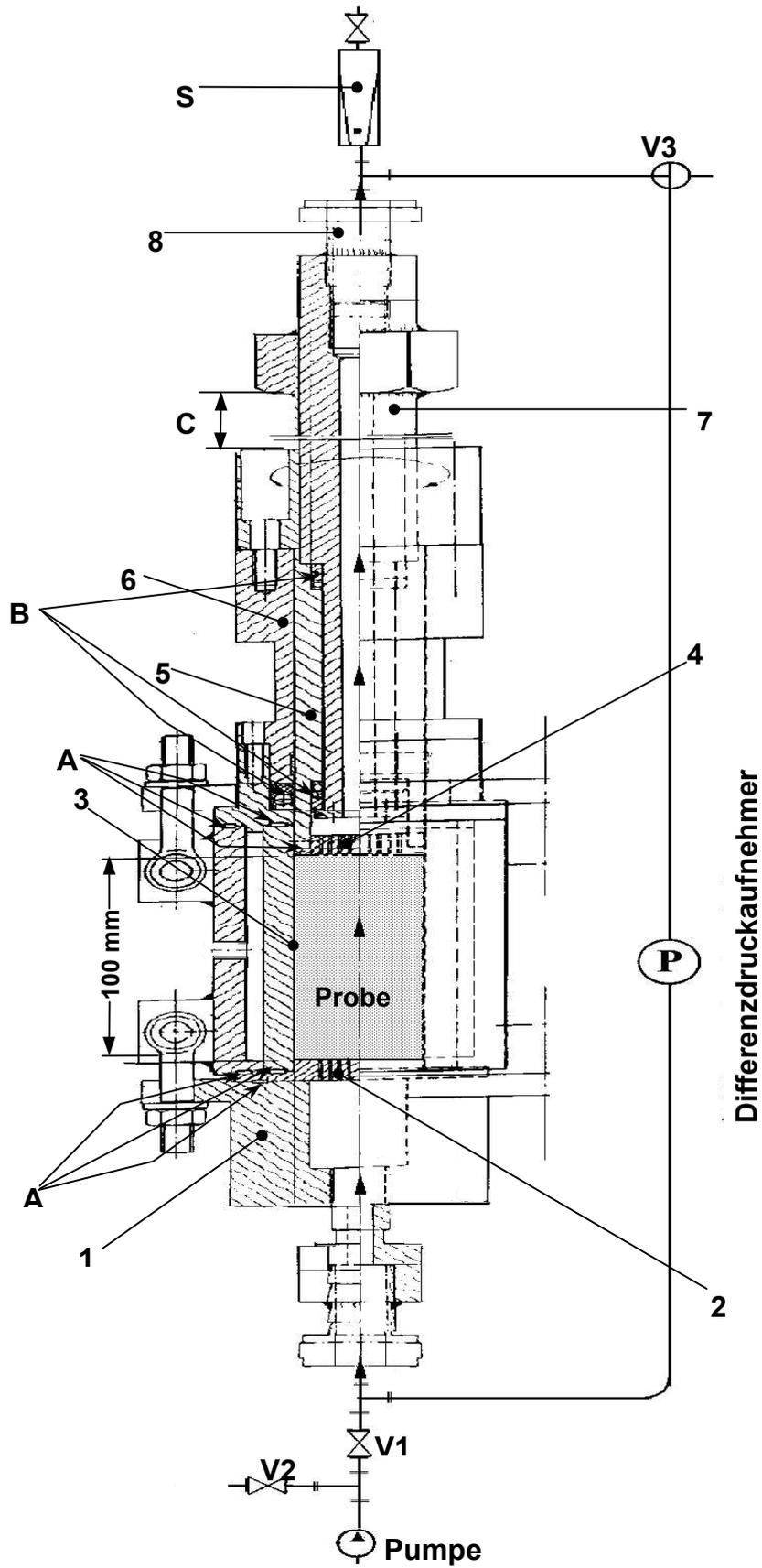


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Vorrichtung zur Bestimmung der vertikalen Permeabilität

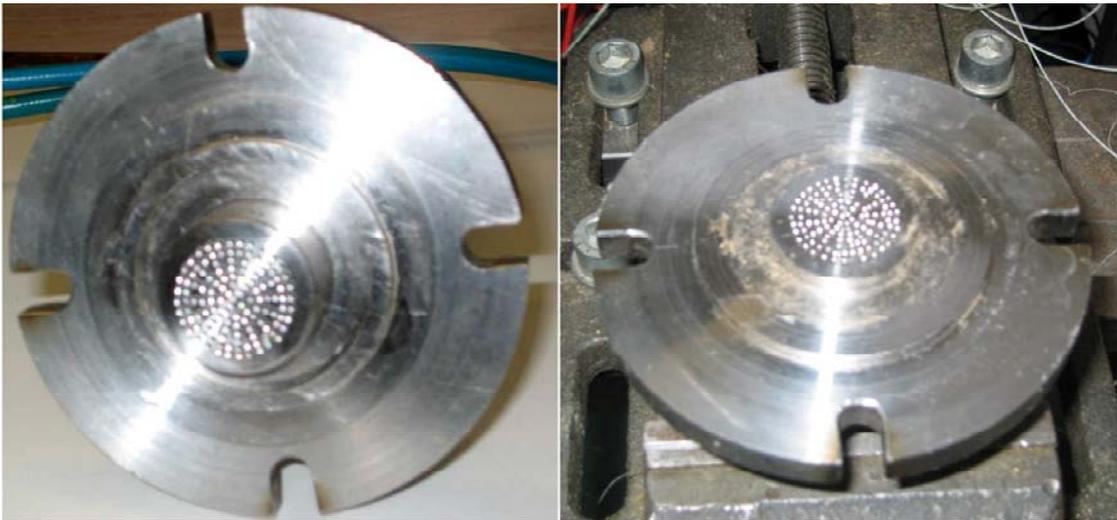


Abbildung 23: Die obere Pressplatte (links) und untere Pressplatte (rechts) mit jeweils 124 Bohrungen

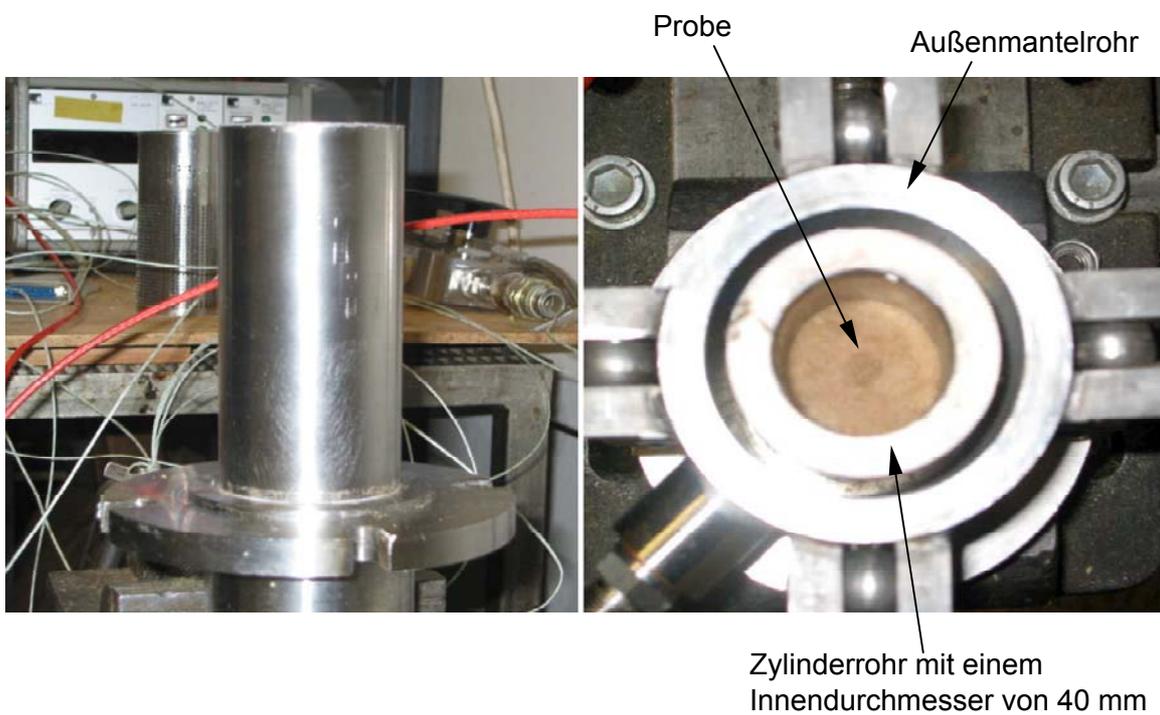


Abbildung 24: Zylinderrohr mit einem Innendurchmesser von 40 mm (links) und Oberseite des Zylinderrohrs zur Messung der vertikalen Permeabilität (rechts)

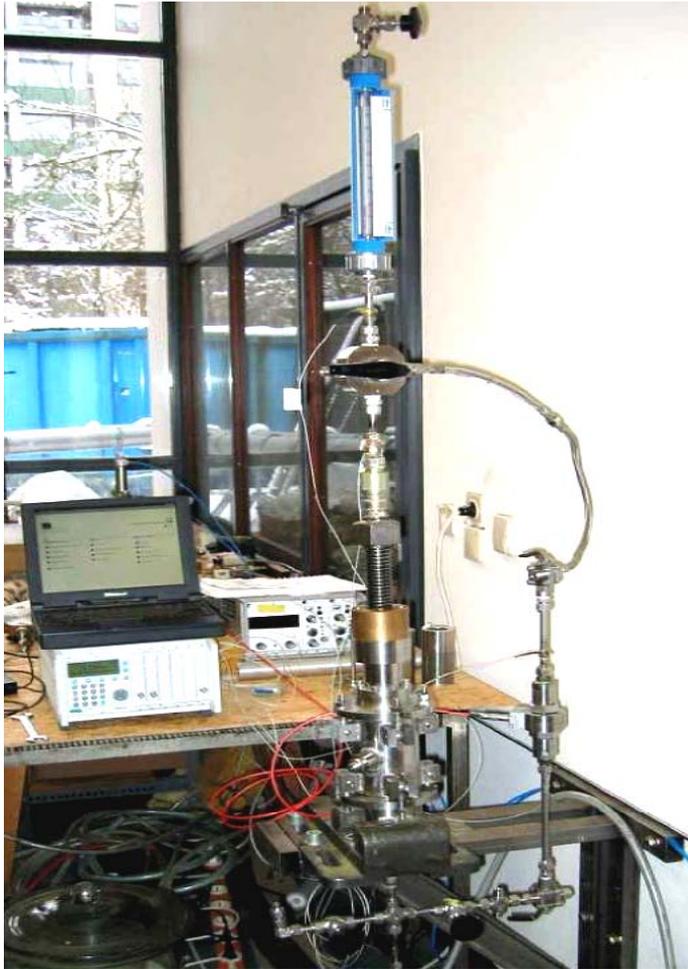


Abbildung 25: Gesamtansicht der Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität

7.1.2. Konstruktion der Messvorrichtung I zur Messung der horizontalen Permeabilität

Abbildung 26 zeigt schematisch den Aufbau der Messanlage zur Messung der horizontalen Permeabilität. Die untere und obere Pressplatte der oben beschriebenen Anlage ist ausgebaut, die neue untere Pressplatte verfügt über eine zentrale 8 mm Bohrung, in die von oben ein seitlich mit Bohrungen versehenes Rohr (\varnothing 8 mm) eingesteckt wird. Die Bohrungen im Zylindermantel, die den horizontalen Luftauslaß in die Probe ermöglichen, sind 1,5 mm groß und ringförmig von unten nach oben auf einer Länge von 100 mm verteilt. Die neu einzubauende obere Pressplatte verfügt über eine zentrale 10 mm Bohrung, durch die das vorher beschriebene 8 mm Rohr lose durchgeführt ist. Abbildung 27 zeigt die obere Pressplatte mit einer Bohrung von 10 mm Durchmesser und die untere Pressplatte sowie das eingesteckte Rohr (\varnothing 8 mm) mit den Bohrungen (\varnothing 1,5 mm). Das gebohrte Zylinderrohr zeigt Abbildung 28. Die seitlichen Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,5 mm, die nach dem horizontalen Durchströmen der Probe dem Luftauslaß aus dem Pressraum zum

Schwebekörpermessgerät (S) dienen, sind ringförmig auf der gesamten Länge des Zylinderrohres mit dem geringstmöglichen Fertigungsabstand verteilt, um den Druckabfall so gering wie möglich zu halten. Fasern bzw. Späne werden in das Zylinderrohr gestreut und manuell über die hohle Gewindespindel verdichtet. Die Probe hat die Form eines zentral gebohrten Zylinders. Sie hat einen inneren Radius von 4 mm und einen äußeren von 20 mm. Die Luft strömt von unten durch das gebohrte zentrale 8 mm Rohr in die Probe und weiter durch das seitlich gebohrte Zylinderrohr mit 40 mm Innendurchmesser zum Luftauslaß des Außenmantelrohrs in Richtung Schwebekörpermessgerät (Abbildung 26).

Die hohle Gewindespindel ist am oberen Ende mittels Blindstopfen abgedichtet, so dass ausschließlich eine horizontale Luftströmung möglich ist. Abbildung 29 zeigt die Messvorrichtung I zur Messung der horizontalen Permeabilität.

Die Regelung und Messdatenerfassung erfolgt wie bei der vertikalen Messung.

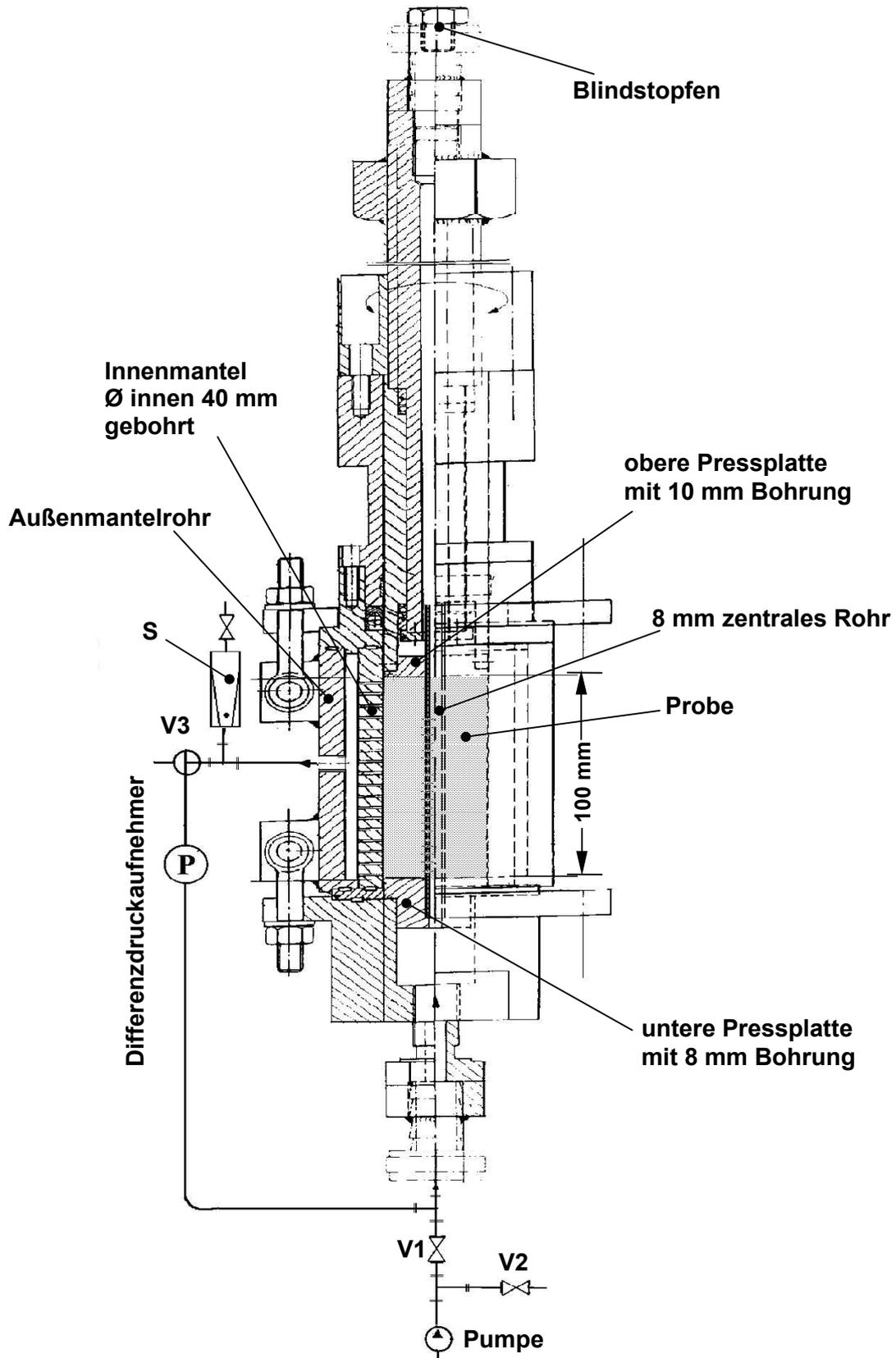


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Vorrichtung zur Bestimmung der horizontalen Permeabilität

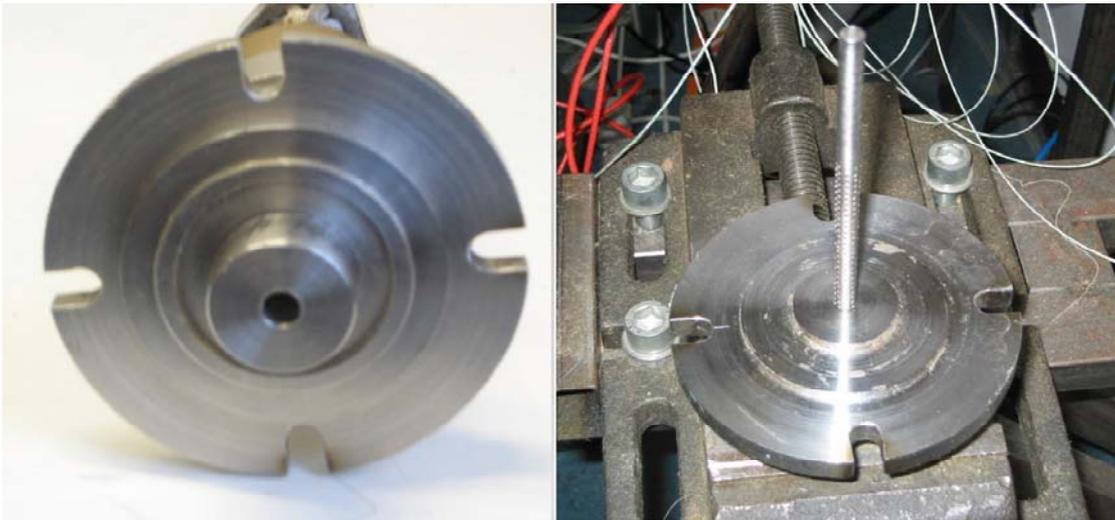


Abbildung 27: Obere Pressplatte mit einer zentralen Bohrung eines Durchmessers von 10 mm (links) und untere Pressplatte sowie eingestecktes Rohr (\varnothing 8 mm) mit den Bohrungen eines Durchmessers von 1,5 mm (rechts)

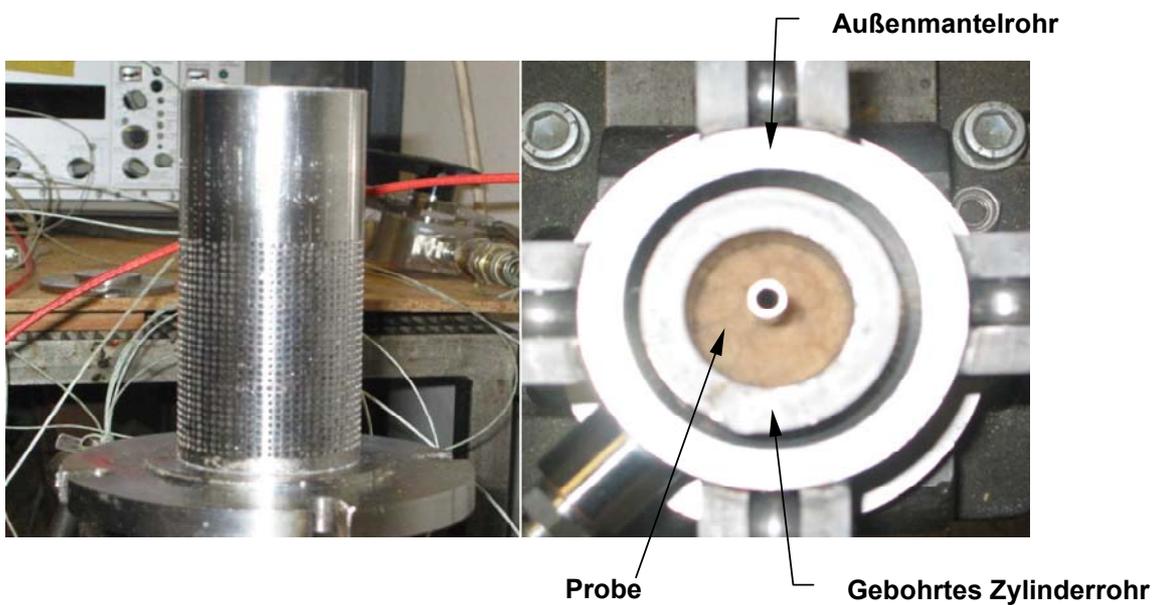


Abbildung 28: Gebohrtes Zylinderrohr (links) und Oberseite des gebohrten Zylinderrohrs zur Messung der horizontalen Permeabilität (rechts)



Abbildung 29: Gesamtansicht der Messvorrichtung I zur Messung der horizontalen Permeabilität

7.1.3. Vorversuche zur Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung I

In einem Leerversuch wurde die Dichtigkeitsprüfung der in Abbildung 25 und Abbildung 29 dargestellten Messvorrichtung, Rohrleitungen, Ventile und Schraubverbindungen durchgeführt. Während Luft kontinuierlich durch das gesamte System strömt, wurden gleichzeitig mögliche Leckstellen mit Seifenlauge angesprüht, um die Dichtigkeit der Verschraubungen zu prüfen.

Der Druckabfall beim Durchströmen der Bohrungen und Rohrleitungen bei verschiedenen Durchflussmengen wurde bestimmt. Bei Permeabilitätsmessungen von Proben wurden die im Leerversuch gemessenen Differenzdrücke berücksichtigt, indem vom gemessenen Differenzdruck der im Leerversuch entstehende Differenzdruck abgezogen wurde. Eine Veränderung des Probenraumvolumens, welches in späteren Versuchen auftreten kann, hat keine weitere Änderung der Druckdifferenz zur Folge. In Abbildung 30 sind die Differenzdrücke bei verschiedenen Durchflussmengen von 0 bis 120 l/h in horizontaler und vertikaler

Richtung dargestellt. In diesem Bereich handelt es sich um laminare Durchströmungen (siehe Abschnitt 7.1.4.).

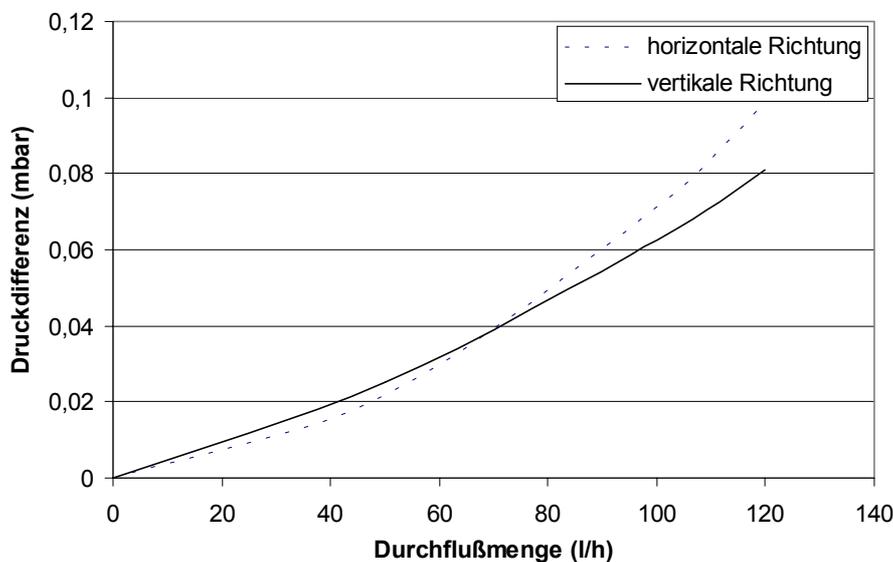


Abbildung 30: Druckabfall der Messvorrichtung bei verschiedenen Durchflussmengen in horizontaler und vertikaler Richtung

7.1.4. Anwendbarkeit des Gesetzes von Darcy

Das Gesetz von Darcy ist nur bei niedrigen Durchflussraten gültig, wenn die Strömung laminar ist und wenn stationäre Bedingungen vorliegen. Da die Permeabilität eine Materialkonstante ist, muss die Durchflussgeschwindigkeit bzw. das Durchflussvolumen proportional mit den Druckdifferenzen ansteigen. Zudem muss die dadurch entstehende Proportionalitätsgerade durch den Schnittpunkt des Koordinatensystems verlaufen (Scheidegger 1974, Dullien 1979, Siau 1984). In einem Vorversuch wurde ermittelt, dass bis zu einem Durchflussvolumen von 120 l/h die Strömung durch die Probe als laminar anzusehen ist. Höhere Durchflussvolumina führen zu turbulenten Strömungen. In der Abbildung 31 bis Abbildung 35 wird gezeigt, dass bei der vertikalen und horizontalen Durchströmung unbeleimter fraktionierter MS-Späne (Maschenweite 1,5 mm bis 2,0 mm) zwischen dem Durchflussvolumen und der anliegenden Druckdifferenz ein linearer Zusammenhang besteht.

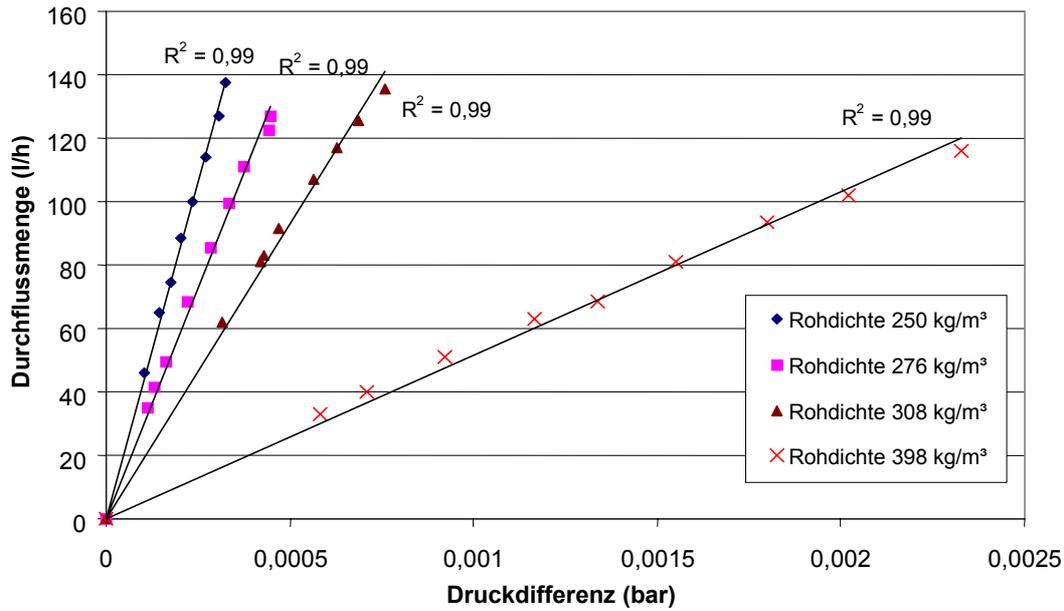


Abbildung 31: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohdsichten von 250, 276, 308 und 398 kg/m³ in vertikaler Richtung

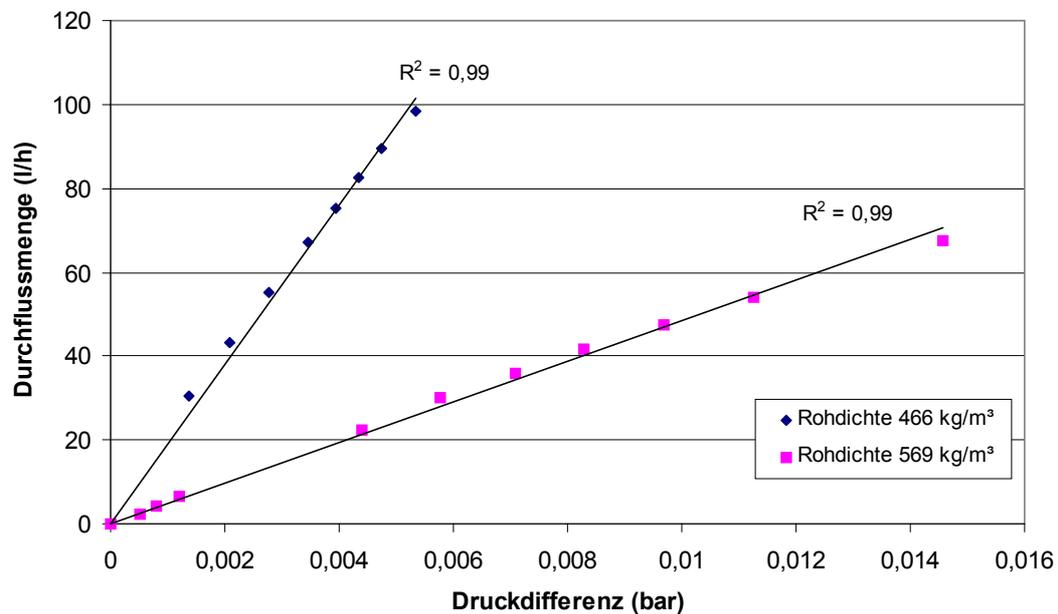


Abbildung 32: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohdsichten von 466 und 569 kg/m³ in vertikaler Richtung

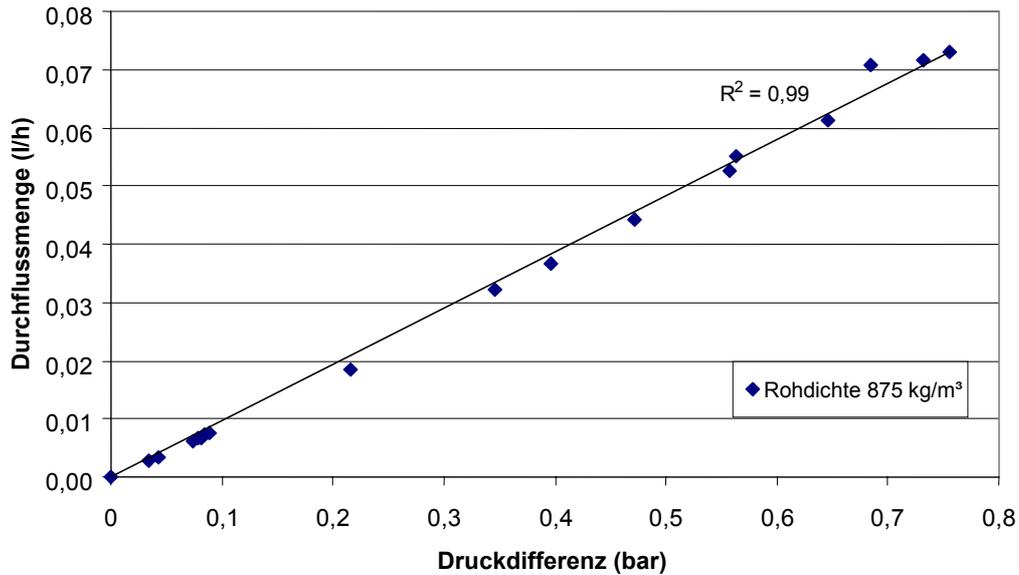


Abbildung 33: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei einer Mattenrohddichte von 875 kg/m^3 in vertikaler Richtung

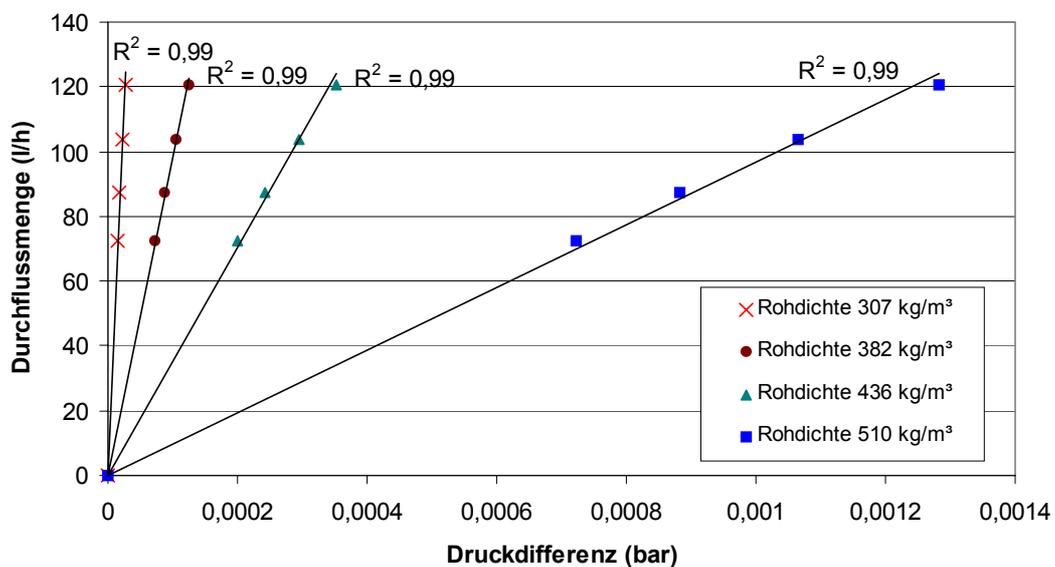


Abbildung 34: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohddichten von 307 , 382 , 436 und 510 kg/m^3 in horizontaler Richtung

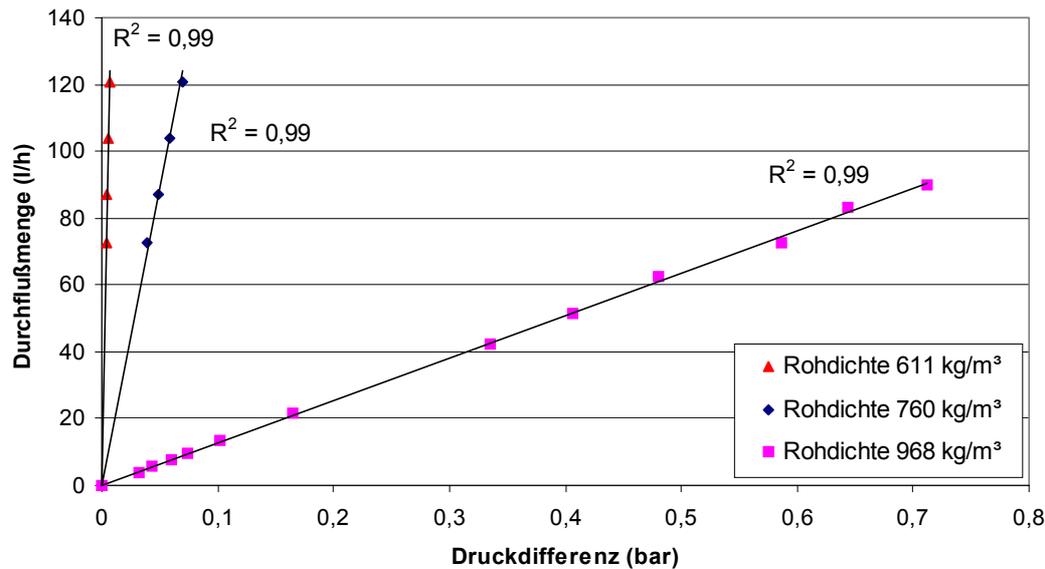


Abbildung 35: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohdsichten von 611, 760, und 968 kg/m³ in horizontaler Richtung

7.1.5. Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung I

Die Messvorrichtung I zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität ist wegen der gewählten Probenraumabmessungen nur für DS-, MS-Späne und Fasern geeignet. Zur Messung der Differenzdrücke wurden drei Differenzdruckaufnehmer Typ PD1 (0,01, 0,1 und 1 bar) verwendet und an einem KWS-Messverstärker der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik angeschlossen. Zur Messung der Durchflussmengen dienten zwei Schwebekörpermessgeräte. Das erste für eine Durchflussmenge bis maximal 12 l/h und das andere für eine Durchflussmenge bis maximal 140 l/h. Ein Bezugspunkt zur Messung der Probenlänge wurde mit Hilfe einer Schieblehre bestimmt, indem die obere Pressplatte gegen die untere Pressplatte gefahren wurde. Bei der Messung wurde verdichtete Luft bei einer Temperatur von 20 °C aus dem zentralen Druckluftsystem verwendet.

Zur Bestimmung der vertikalen und horizontalen Permeabilität in einem Rohdichtebereich von 250 bis 950 kg/m³ wurden 20 g DS-, MS-Späne und Fasern (jeweils 3 Replikationen), bezogen auf atro Holzmaterial, gewogen und mit Hilfe eines Papiertrichters langsam in das Zylinderrohr gestreut und verdichtet. Die Permeabilität wurde bei verschiedenen Durchflussmengen gemessen. Die Durchflussmenge wurde durch das Ventil (V1) geregelt, bis sich der Schwebekörper in Ruhelage befand und von einer Skala abgelesen. Der Differenzdruck vor

und nach der Probe (ΔP) sowie der Differenzdruck vor der Probe zum Atmosphärendruck (ΔP_{atm}) wurden gemessen, indem das 3-Wegeventil (V3) umgestellt wurde. Die Drücke vor der Probe (P_2) und nach der Probe (P_1) sowie der mittlere Druck (\bar{P}) lassen sich nach der folgenden Gleichung 9 berechnen.

$$P_2 = P_{\text{atm}} + \Delta P_{\text{atm}}, \quad P_1 = P_2 - \Delta P, \quad \bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (9)$$

ΔP_{atm} Differenzdruck zur Atmosphäre (Pa)

P_{atm} Atmosphärendruck (Pa)

P_1 absoluter Druck nach der Probe (Pa)

P_2 absoluter Druck vor der Probe (Pa)

Das Schwebekörpermessgerät zur Messung der Durchflussmengen ist vom Hersteller auf Luft als Referenzdurchfluss bei einer Temperatur von 20 °C, absolutem Druck 1,013 bar, Dichte 1,293 kg/m³ und dynamischer Viskosität 1,81x10⁻⁵ Pa·s geeicht. Nach VDE/VDI Richtlinie 3513 (Blatt 1), nach Fiedler (1992) und auf Vorschlag der Firma Krohne wurden die tatsächlichen Durchflussmengen aus den gemessenen Durchflussmengen (abgelesen von der Skala bzw. einer Eichkurve) nach der vereinfachenden Gleichung 10 umgerechnet, da das Schwebekörpermessgerät außerhalb des Referenzdurchflusses angewendet wurde.

$$Q = Q_{\text{gem}} \sqrt{\frac{PT_r}{P_r T}} \quad (10)$$

Q tatsächliche Durchflussmenge (m³/s)

Q_{gem} gemessene Durchflussmenge (m³/s)

P absoluter Druck vor dem Schwebekörpermessgerät (Pa)

P_r absoluter Druck beim Referenzdurchfluss = 1,013 x 10⁵ Pa

T absolute Temperatur vor dem Schwebekörpermessgerät (K)

T_r absolute Temperatur beim Referenzdurchfluss = 293,15 K

Der Druckabfall nach der Probe bis vor dem Schwebekörpermessgerät ist sehr gering (< 0,1 mbar) bei einer Durchflussmenge von 120 l/h. Da der Druck nach der Probe sich kaum vom Druck vor dem Schwebekörpermessgerät unterscheidet, gilt zur Berechnung $P_1 \approx P$. Nach Bohl (1994) wurde die dynamische Viskosität nach Gleichung 11 für Bezugsdruck 1 bar berechnet.

$$\eta = 17,07 \times (1 + 0,00286 \times t - 0,0000015 \times t^2) \times 10^{-6} \quad (11)$$

η dynamische Viskosität (Pa · s)

t Temperatur (°C)

Die vertikale Permeabilität wurde nach Gleichung 4 berechnet. Die zur Berechnung verwendete Oberfläche hat einen Durchmesser von 30 mm, weil sich die Bohrungen nur in diesem Durchmesserbereich befinden. Die Durchströmung und der Druck vor und nach der Probe treten nur hier auf (siehe auch Abschnitt 9.1.1).

Die Probe zur horizontalen Permeabilitätsbestimmung entspricht einem zentral gebohrten Zylinder und hat einen inneren Radius von 4 mm und einen äußeren von 20 mm. Abbildung 36 zeigt eine Struktur der Probe zur Bestimmung der horizontalen Permeabilität. Nach Siau (1984) wurde die horizontale Permeabilität nach Gleichung 12 berechnet.

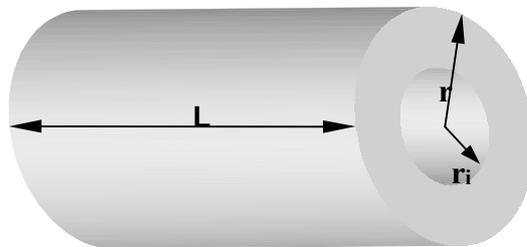


Abbildung 36: Struktur der Probe für Bestimmung der horizontalen Permeabilität

$$K_h = \frac{\eta Q P \ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{2\pi L \Delta P} \quad (12)$$

K_h spezifische horizontale Permeabilität (m²)

r äußerer Radius der Probe (m)

r_i innerer Radius der Probe (m)

L Länge der Probe in axialer Richtung (m)

Vor und nach dem Versuch zur Permeabilitätsmessung wurde die Probenfeuchte bestimmt. Die Anfangsfeuchte der Probe betrug 10 – 11 %. Die Probenfeuchte nahm um bis zu 1,5 % innerhalb der Prüfzeit von 1,5 Stunden ab, da die Gleichgewichtsfeuchte der Luft niedriger als die Feuchte der Probe war. Da die Probenfeuchte abnahm, verringerte sich die Probenmasse. Die Rohdichte änderte sich ebenfalls. Abbildung 37 zeigt die vertikale Permeabilität der MS-Späne Fraktion 1,5 - 2 mm bei einer Feuchte von 10 – 11 % in Abhängigkeit von der Rohdichte vor und nach dem Versuch sowie den Mittelwert. Da die Permeabilitätswerte vor und nach dem Versuch mit einer statistischen Sicherheit von 95 %

nicht verschieden sind, wurde der Mittelwert der Rohdichten für weitere Berechnungen verwendet. Bei der Anfangsfeuchte der Probe von 6 - 7 % nahm die Probenfeuchte nach dem Versuch um ca. 0,5 % innerhalb der Prüfzeit von 1,5 Stunden ab.

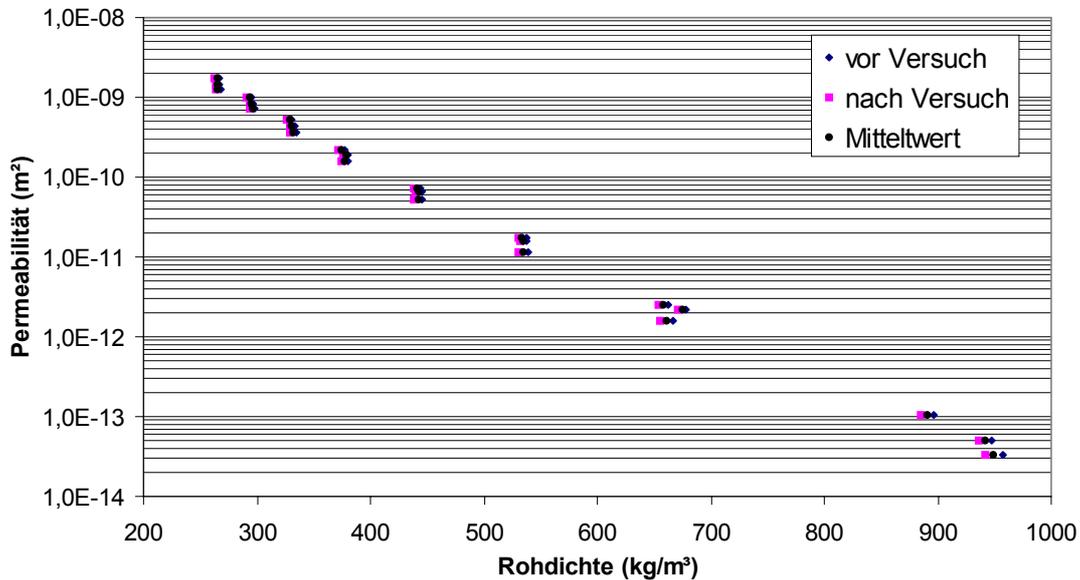


Abbildung 37: Vertikale Permeabilität der MS-Späne Fraktion 1,5 - 2 mm, bei einer Anfangsfeuchte von 10% – 11 % in Abhängigkeit von der Rohdichte vor und nach dem Versuch und der Mittelwerte.

Zur Betrachtung der Masseverluste, verursacht dadurch, dass DS-Späne beim Pressen durch die Bohrungen nach außen dringen, wurden die DS-Späne nach dem Versuch gewogen. Der Masseverlust der DS-Späne betrug ca. 0,45 bis 1 % bei Messung der horizontalen Permeabilität und ca. 0,2 bis 0,5 % bei der vertikalen Permeabilitätsmessung. Diese Werte können vernachlässigt werden. Die Vorverdichtung der DS-Späne war notwendig, um einen besseren Zusammenhalt der Späne zu gewährleisten. Die Schüttdichte der DS-Späne betrug ca. 230 kg/m³. Deshalb kann die Permeabilität der DS-Späne ab einer Rohdichte von 250 kg/m³ gemessen werden. Bei geringer Dichte fallen bei der Durchströmung mehr Späne durch die Bohrungen.

7.1.6. Bestimmung der Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen

Es ist nur möglich, die Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen in vertikaler Richtung zu bestimmen, da der Zwischenraum zwischen Außenmantelrohr und seitlich geschlossenem Zylinderrohr als Vorwärmraum der Probe dient (Abbildung 38). Die Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität wurde angepaßt. Abbildung 38 zeigt schematisch die

Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Lufttemperaturen. Die Anlage und die Rohrleitungen wurden mittels Glasfasermatten wärmeisoliert, um einen Temperatureaustausch zwischen dem System und der Umgebung zu verhindern. Zwischen Messanlage und Luftzufuhr ist zur Erzeugung von Warmluft ein elektrischer Heizschlauch montiert. Das Dichtungsband (A) wurde entnommen, um Wärme mittels Luft durch Konvektion schnell zu übertragen. Um die Temperaturen an verschiedenen Stellen in der Anlage messen zu können, wurden die Rohrleitungen jeweils 2 mm aufgebohrt. In die Bohrungen wurden 6 Thermoelemente (Type K) eingeführt und mit Epoxidharz abgedichtet. Nach einigen Vorversuchen (siehe Abschnitt 7.1.6.1) wurden ein Differenzdruckaufnehmer Typ PD1 (0,1 bar) zur Messung des Druckes vor dem Schwebekörpermessgerät und ein Absolutdruckaufnehmer (10 bar, Genauigkeitsklasse 0,3) zur Messung des Druckes vor der Probe verwendet. Zur Messung der Durchflussmenge wurde ein Schwebekörpermessgerät bis maximal 2000 l/h verwendet. Der Differenzdruckaufnehmer, der Absolutdruckaufnehmer und 6 Thermoelemente wurden an einen Messverstärker MGplus der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik angeschlossen und kalibriert. Die Messdaten wurden über eine spezielle Software erfaßt.

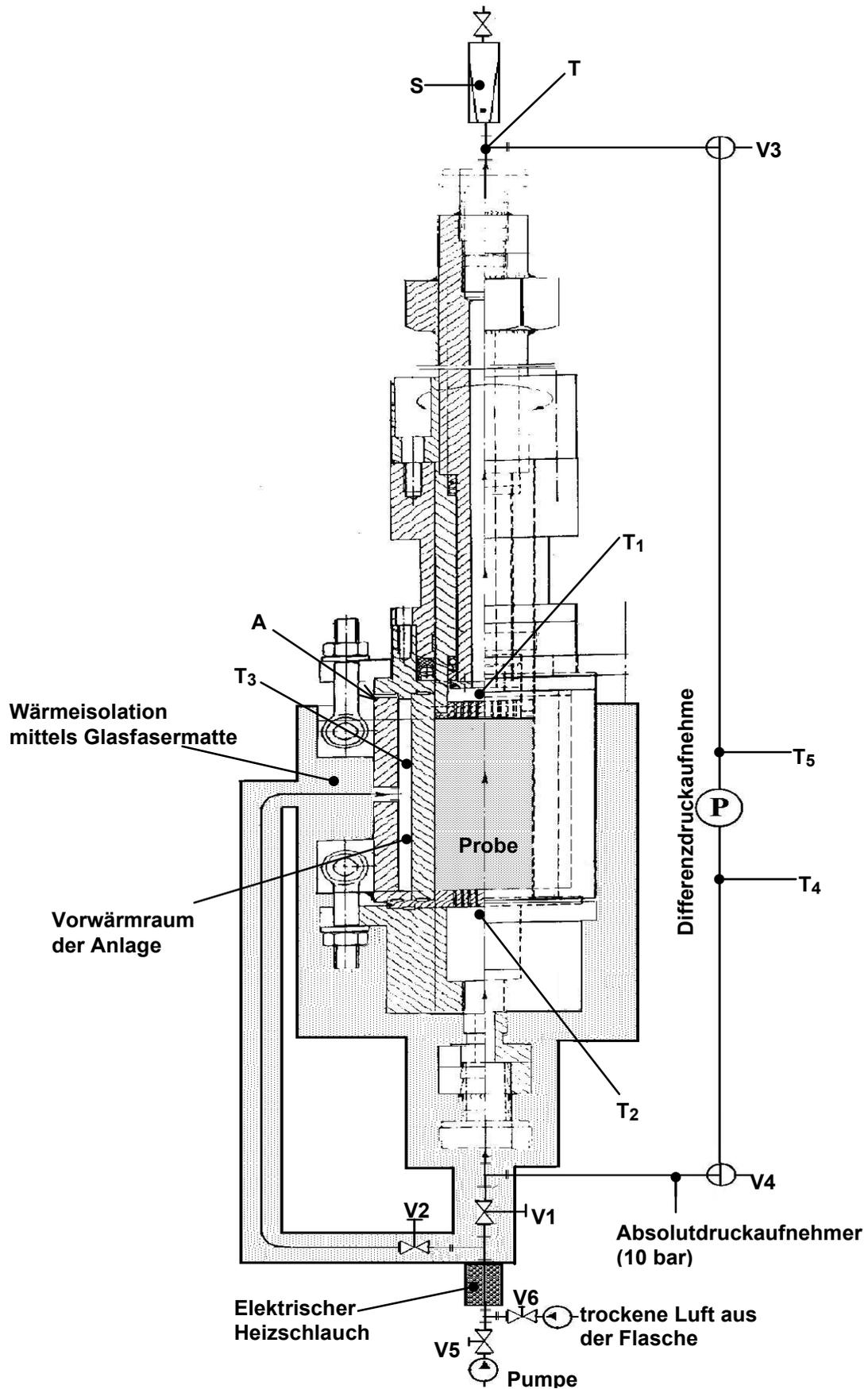


Abbildung 38: Messvorrichtung zur Bestimmung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen

7.1.6.1. Vorversuche zur Messung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen mit Messvorrichtung I

Bei Versuchen von Heinemann (1999) zur Messung der Permeabilität mit einer Lufttemperatur von 80 °C wurden die Temperaturen in den Proben aus MS-Spanplatte, die im Normalklima bei 20/65 konditioniert wurden, gemessen. Die Temperatur in der Probe war niedriger als die Temperatur vor und hinter der Probe. Es wurde dadurch begründet, dass es beim Auftreffen der erwärmten Luft auf die feuchte Probe zu einem Übergang des gebundenen Wassers in die Gasform kommt. Hierzu ist Energie erforderlich, die möglicherweise die Lufttemperatur in der Probe stark absinken lässt. Außerdem ging kontinuierlich Feuchtigkeit mit dem Wärmestrom durch die Probe verloren. Dieser Trocknungseffekt hat eine Änderung der Porenstruktur als auch des Probenvolumens und der Probenmasse zur Folge.

Um die oben beschriebenen Probleme auszuschließen, wurden Materialien, die im Trockenschrank bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurden, verwendet. Zur Messung der Permeabilität wurde mit trockener Luft gearbeitet, um Befeuchtung und Quellung zu vermeiden.

Der Druckabfall beim Durchströmen der Bohrungen und längs der Rohrleitung bei verschiedenen Durchflussmengen mit der trockenen Luft bei Temperaturen von 20°C und 80°C im Leerversuch wurde wieder gemessen, da durch die sehr geringen Durchflussmengen von 0 bis 120 l/h im Laminarbereich die Probe sehr langsam bis zu einer erzielten Temperatur von ca. 80 °C erwärmt wurde. Zur Messung des Druckabfalls bei verschiedenen Durchflussmengen bis ca. 1800 l/h wurde der Differenzdruckaufnehmer (0,1 bar) verwendet.

Bei Messung des Druckabfalls mit einer Lufttemperatur von 80°C tritt der Druckabfall nicht nur beim Durchströmen der Bohrungen und längs der Rohrleitung, sondern auch bei Expansionsströmung und beliebigem Wärmeaustausch hinter der Probe bis zum Schwebekörpermessgerät auf, da der Differenzdruckaufnehmer sich nicht direkt hinter der Probe, sondern vor dem Schwebekörpermessgerät befindet (siehe Abbildung 38). Die Strömung hinter der Probe bis zum Schwebekörpermessgerät ist keine isotherme Strömung.

Bei Messung des Druckabfalls mit erwärmter Luft musste die Temperatur von ca. 80 °C im Pressraum, in dem sich die Probe befindet, kontrolliert werden. Die Temperaturen vor der Probe bzw. vor dem Pressraum (T_2), nach der Probe bzw. nach dem Pressraum (T_1), vor dem Schwebekörpermessgerät (T), im Vorwärmraum (T_3), vor dem Differenzdruckaufnehmer (T_4) und nach dem Differenzdruckaufnehmer (T_5) wurden aufgenommen. Der elektrische

Heizschlauch wurde auf ca. 180 °C eingestellt. Um trockene Luft zu sparen, wurde die verdichtete Luft aus dem Haussystem (feuchte Luft) zur Vorwärmung des Pressraums verwendet. Dazu wurde das Ventil (V5) geöffnet. Zur Vorwärmung des Pressraums wurde das Ventil (V2) voll geöffnet und zur Erwärmung im Pressraum wurde das Ventil (V1) auf eine Durchflussmenge von ca. 1000 l/h eingestellt. Bei Erreichen einer Temperatur von fast 80 °C vor und nach dem Pressraum (T_2 und T_1) wurde das Ventil (V6) zum Einströmen der trockenen Luft geöffnet und das Ventil (V5) geschlossen. Die Zunahme der Temperatur vor dem Pressraum (T_2) und nach dem Pressraum (T_1) verläuft nicht gleichmäßig parallel. So muss die Temperatur vor dem Pressraum (T_2) und nach dem Pressraum (T_1) durch das Ventil V1 und V2 nachgeregelt werden, um die Temperaturzunahme gleichmäßig zu halten. Abbildung 39 zeigt die Verläufe der Temperaturen an den verschiedenen Messpunkten im Leerversuch. Wenn die Temperatur vor und nach der Probe erreicht war, betrug die Temperatur vor dem Schwebekörpermessgerät ca. 43 °C.

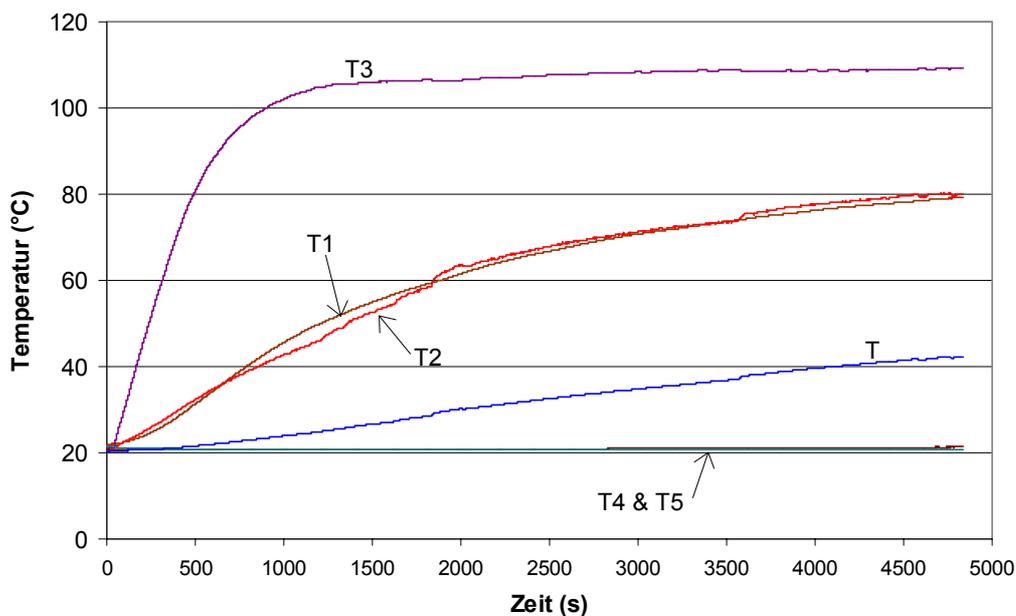


Abbildung 39: Temperaturverlauf bei Messung des Druckabfalls im Leerversuch

Der Druckabfall wurde bei verschiedenen Durchflussmengen gemessen. Abbildung 40 zeigt den Druckabfall bei den Lufttemperaturen von 20°C und 80°C. Bei gleicher Durchflussmenge ist der Druckabfall bei der Lufttemperatur von 80 °C insgesamt höher als bei 20 °C.

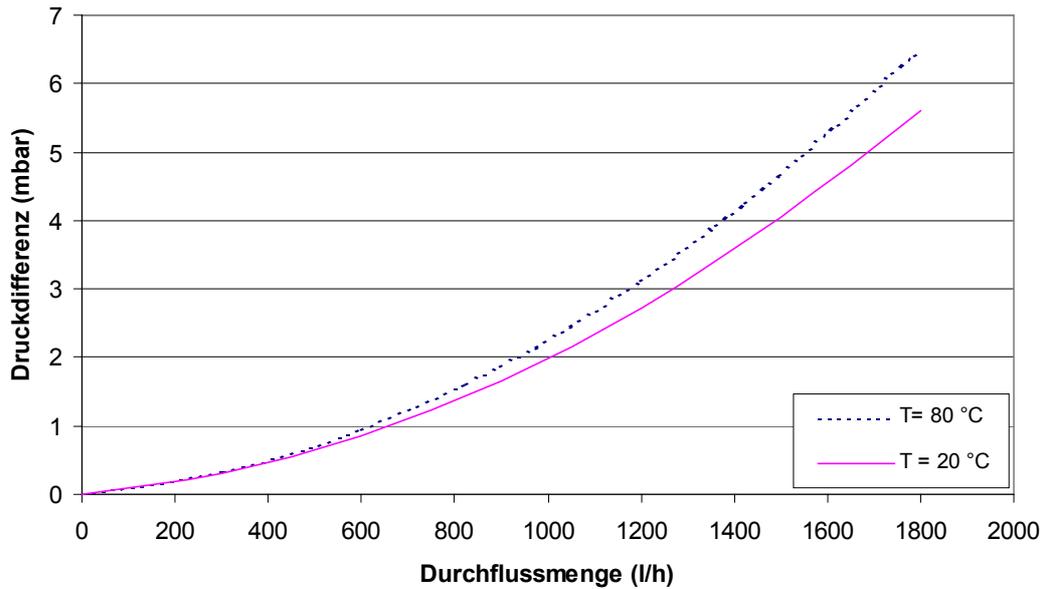


Abbildung 40: Druckabfall in der Messvorrichtung bei verschiedenen Durchflussmengen und Temperaturen in vertikaler Richtung

Zur Erwärmung der Probe in der Messvorrichtung wurden trockene MS-Späne verwendet. Dazu wurden 20 g atro Späne abgewogen, in die Anlage eingestreut und verdichtet. Der elektrische Heizschlauch wurde auf ca. 180 °C eingestellt. Ventil (V5) wurde geöffnet. Ventil (V2) wurde voll geöffnet und mit Ventil (V1) wurde bis zur Durchflussmenge von ca. 1000 l/h eingestellt. Die Temperaturen vor und nach der Probe wurden durch das Ventil V1 und V2 nachgeregelt. Ventil (V6) wurde geöffnet und Ventil (V5) wurde geschlossen, bis die Temperatur vor und nach der Probe von ca. 80 °C erreicht war. Abbildung 41 zeigt den Temperaturverlauf der MS-Späne bei einer Rohdichte von 409 kg/m³.

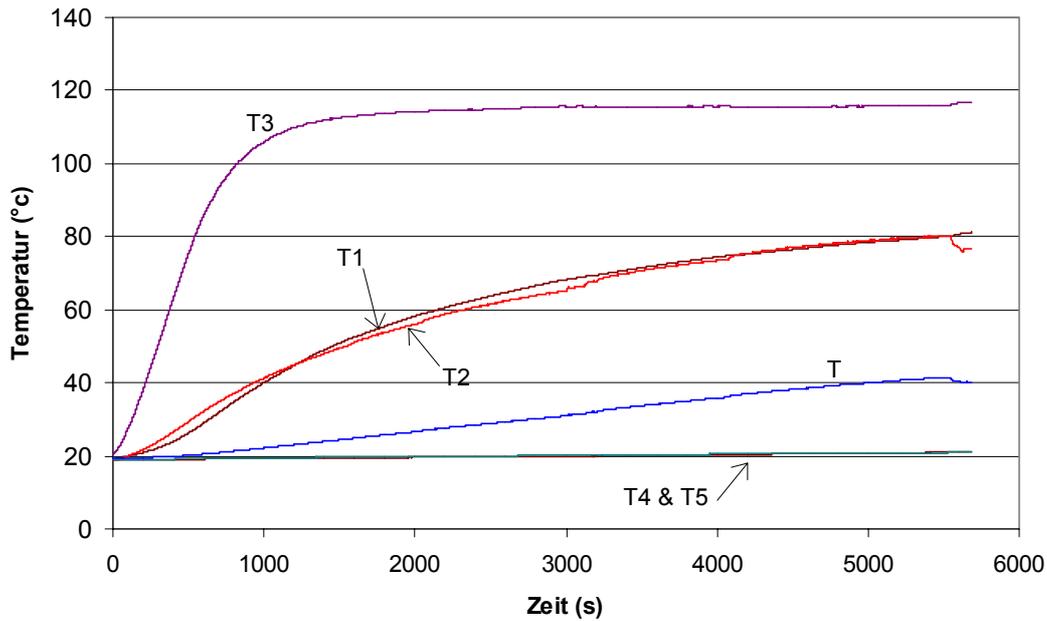


Abbildung 41: Temperaturverlauf bei der Messung der horizontalen Permeabilität von MS-Späne einer Rohdichte 409 kg/m^3

7.1.6.2. Gültigkeit des Gesetzes von Darcy

Um die Probe möglichst schnell auf ca. $80 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erwärmen, musste der elektrische Heizschlauch auf ca. $180 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt werden. Anschließend strömte die erwärmte trockene Luft durch die Probe mit einer Durchflussmenge von mindestens 1000 l/h . Ob das Gesetz von Darcy bei hoher Durchflussmenge noch anwendbar und die Strömung laminar ist, wurde geprüft. Zur Überprüfung der laminaren Strömung wurden trockene MS-Späne mit trockener Luft bei einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und verschiedenen Durchflussmengen (1000 , 1200 , 1400 und 1600 l/h) und einer Rohdichte von ca. 289 kg/m^3 und bei verschiedenen Durchflussmengen (1000 und 1200 l/h) und einer Rohdichte von ca. 409 kg/m^3 getestet. Abbildung 42 zeigt, dass bei vertikaler Durchströmung der MS-Späne zwischen den Durchflussmengen und der anliegenden Druckdifferenz kein linearer Zusammenhang besteht. Die Strömung bei höheren Durchflussmengen ist nicht mehr laminar. Abbildung 43 zeigt die berechnete vertikale Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte der MS-Späne im nicht laminaren Bereich. Die vertikale Permeabilität der MS-Späne nimmt mit zunehmender Durchflussmenge bzw. steigendem Differenzdruck geringfügig ab. Es ist möglich, das Gesetz von Darcy bei höherer Strömung anzuwenden, um die vertikale Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $80 \text{ }^\circ\text{C}$) zu vergleichen, so dass

zur Bestimmung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen die gleiche Durchflussmenge eingestellt werden muss.

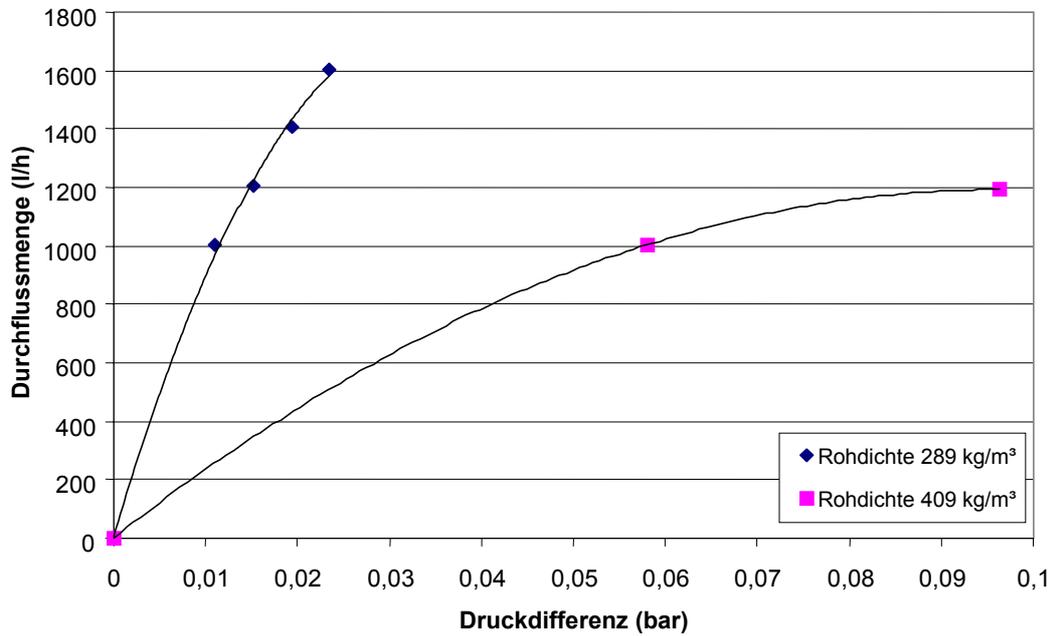


Abbildung 42: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck: MS-Späne bei Mattenrohddichten von 289 und 409 kg/m³ in vertikaler Richtung

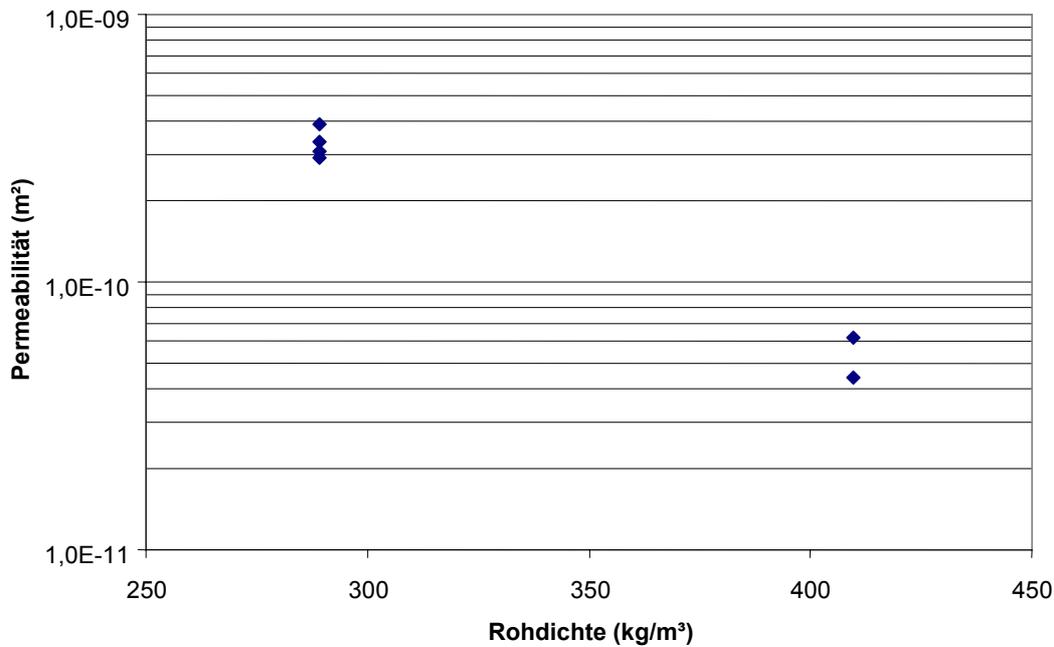


Abbildung 43: Vertikale Permeabilität der MS-Späne bei verschiedenen Durchflussmengen im nicht laminaren Bereich in Abhängigkeit von der Rohdichte

7.1.6.3. Ablauf der Messung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen

Zur Bestimmung der vertikalen Permeabilität mit trockener Luft von 20 °C und 80 °C wurden darrtrockene DS-, MS-Späne und Fasern verwendet, die im Trockenschrank bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und im Exsikkator aufbewahrt wurden. Die darrtrockenen DS-, MS-Späne und Fasern (jeweils 3 Replikationen) wurden, jeweils 20 g bezogen auf atro Holzmaterial, gewogen, in die Anlage eingestreut und verdichtet. Die vertikale Permeabilität wurde in einem Rohdichtebereich von 300 bis nur 750 kg/m³ gemessen, da der Verdichtungswiderstand mit abnehmender Feuchte zunimmt.

Die eingestellten Durchflussmengen der angebrachten Skala von 800, 850, 900, 950 und 1000 l/h zur Bestimmung der vertikalen Permeabilität mit trockener Luft von 20 °C und 80 °C wurden gewählt. Zum Vergleich der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen wurde die korrigierte Durchflussmenge von ca. 1000 l/h ausgewählt, wobei die Dichte der Luft von 80 °C ab- und die Durchflussmenge zunimmt. Bei dieser eingestellten Durchflussmenge traten ein hoher Druck vor der Probe bei hoher Rohdichte auf (für MS-Späne 1000 l/h Durchflussmenge, Druck vor der Probe 5,5 bar bei einer Rohdichte von ca. 750 kg/m³). Ein Absolutdruckaufnehmer bis 10 bar wurde in die Anlage zur Messung des Drucks vor der Probe (P₂) integriert (siehe Abbildung 38). Der Druck vor dem Schwebekörpermessgerät (P) wurde mit einem Differenzdruckaufnehmer (0,1 bar) gemessen, indem das 3-Wegeventil (V4) zur Atmosphäre geöffnet wurde.

Zur Bestimmung der Permeabilität mit trockener Luft von 20 °C wurde das Ventil (V6) geöffnet. Mit dem Ventil (V1) wurde die Durchflussmenge geregelt. Zur Bestimmung der Permeabilität mit trockener Luft von 80 °C wurde die Probe in der Anlage erwärmt. Der Erwärmungsvorgang der Probe erfolgte mit der Beschreibung in Abschnitt 7.1.6.1. Nach dem Erreichen der Temperatur 80 °C wurde die Zieldurchflussmenge eingestellt. Bei der Einstellung der Zieldurchflussmenge war die Temperatur vor der Probe schnell bis zu 5 °C abgefallen (siehe Abbildung 41). Um den Temperaturunterschied vor und nach der Probe nicht zu groß werden zu lassen, wurde eine hohe Durchflussmenge eingestellt, so dass die Temperatur vor der Probe zur Zieltemperatur hin bis zu 2–3 °C anstieg. Die Zieldurchflussmenge wurde wieder zurückgestellt. Die Daten des Drucks vor der Probe (P₂), vor dem Schwebekörpermessgerät (P) und der 6 Temperaturen (T₁ – T₅ und T) wurden mittels eines Programms gleichzeitig aufgenommen.

Die Probenfeuchte wurde nach der Messung der Permeabilität bestimmt und nahm um 0,5 bis 1 % (besonders die Proben mit trockener Luft von 20 °C gemessen) zu. Dieser Anstieg wurde vernachlässigt.

Zur Berechnung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen wurden die Druckverluste ($\Delta P_{\text{verlust}}$) vor der Probe bis zum Schwebekörpermessgerät im Leerzustand berücksichtigt. Der Differenzdruck vor und nach der Probe (ΔP) lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$\Delta P = P_2 - P - \Delta P_{\text{verlust}} \quad (13)$$

ΔP Differenzdruck vor und nach der Probe (Pa)

P_2 absoluter Druck vor der Probe (Pa)

P absoluter Druck vor dem Schwebekörpermessgerät (Pa)

$\Delta P_{\text{verlust}}$ Druckabfall bzw. Druckverlust vor der Probe bis zum Schwebekörpermessgerät (Pa)

Die Drücke nach der Probe (P_1) und der mittlere Druck (\bar{P}) lassen sich nach der Gleichung 9 berechnen.

Die Durchflussmenge wurde mit der Gleichung 10 korrigiert, da das Schwebekörpermessgerät außerhalb des Referenzdurchflusses (Luft bei 20 °C und 1,013 bar abs.) angewendet wurde. Der angewendete Betriebsdurchfluss ergab eine Temperatur von ca. 41,9 bis 48,6 °C und einen Absolutdruck von 1,022 bis 1,0273 bar. Der Betriebsdurchfluss weist keinen großen Unterschied zum Referenzdurchfluss auf. Bei der Umrechnung der Durchflussmengen mit Gleichung 10 beträgt die Abweichung vom Standard-Durchfluss bei einer Durchflussmenge von 1000 l/h bis ca. 2 %.

Da der Prozeß nach der Probe bis zum Schwebekörpermessgerät keine Isotherme ist, wurde die Durchflussmenge nach der Probe (Q_1) bei einer Temperatur von 80 °C weiter nach der Gasgleichung 14 für ideale Gase korrigiert.

$$Q_1 = \frac{QPT_1}{TP_1} \quad (14)$$

Q_1 Durchflussmenge nach der Probe (m^3/s)

Q tatsächliche Durchflussmenge (m^3/s)

P_1 absoluter Druck nach der Probe (Pa)

P absoluter Druck vor dem Schwebekörpermessgerät (Pa)

T_1 absolute Temperatur nach der Probe (K)

T absolute Temperatur vor dem Schwebekörpermessgerät (K)

Nach Bohl (1994) macht sich die Druckabhängigkeit der dynamischen Viskosität erst bei hohen Drücken bemerkbar. Fluide, deren dynamische Viskosität eine relativ große Temperaturabhängigkeit aufweisen, besitzen im allgemeinen auch eine merkliche

Druckabhängigkeit der Viskosität. Weil die Druckabhängigkeit der dynamischen Viskosität im unteren Druckbereich (Druck unter 10 bar) gering ist, trifft die Berechnung der dynamischen Viskosität mit der Gleichung 11 relativ genau zu. Zur Berechnung der dynamischen Viskosität wurde die Temperatur vor und nach der Probe als Mittelwert gebunden und mit der Gleichung 11 berechnet.

Zur Berechnung der vertikalen Permeabilität bei trockener Luft von 80 °C wurde die Durchflussmenge nach der Probe (Q_1) als Q und der Druck nach der Probe (P_1) als P in der Gleichung 4 ersetzt.

7.2. Messvorrichtung II zur kontinuierlichen zweidimensionalen Messung der Permeabilität

Die Messvorrichtung II wurde zur Messung der zweidimensionalen Permeabilität von DS-, MS-Spänen, Fasern und Strands, die mit einer durchschnittlichen Strandlänge von ca. 70 mm hintereinander liegen und mit ausreichender Überlappung verpreßt werden können, um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, konzipiert. Bei der Messvorrichtung II wurde die Permeabilität in horizontaler und vertikaler Richtung gleichzeitig gemessen. Zur Berechnung der Permeabilitätswerte in beiden Richtungen dient ein simulierendes Programm.

7.2.1. Aufbau der Messvorrichtung II

Mit nachfolgend beschriebener Anlage wird mittels Luft die Permeabilität bei DS-, MS-Spänen, Fasern und Strands in zweidimensionaler Richtung gemessen. Abbildung 44 zeigt den schematischen Aufbau der Messvorrichtung II zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität. Sie versteht sich als Zylinderpresse mit einem Pressdurchmesser von 250 mm und einem Pressweg von 100 mm. Sie besteht aus der Grundplatte (1), durch die es mittels der Zentralbohrung $\varnothing 95,4$ mm möglich ist, die untere Pressplatte (2) und den Presszylinder (3) axialgenau auf dem Tisch der Prüfmaschine zu montieren. So kann der Presskolben, bestehend aus oberer Pressplatte (4), Presskolbenzylinder (5) und Maschinenanschlusskopf (6) genau fluchtend mittels der Belastungstraverse der Prüfmaschine in den Presszylinder eingefahren werden. Die Teile 4, 5 und 6 sind miteinander verschraubt, im verschraubten Zustand wurde der Außendurchmesser 250 mm bearbeitet. So bildet das Ganze die Kolbeneinheit.

Die Teile 2 und 3 sind mittels einer V-Kupplung (Spannring) schnell zu verbinden und zu lösen. Bei A ist ein Dichtungsband zur Abdichtung der Flanschverbindung der Teile 2 und 3

eingelegt. Die Abdichtung zwischen Presskolben und Presszylinder erfolgt durch eine Nutringdichtung (B). Mit Dichtungsband (C) sind auch die Teile 4, 5 und 6 abgedichtet.

Durch Beratung und Berechnung mit einem Simulationsprogramm der Universität Poznań (Kooperationspartner siehe Abschnitt 7.2.4.1) wurden die Messpunkte zur Messung der Drücke in der Probe festgelegt. Die Druckverteilung in der Probe von Matten aus MS-Spänen bei verschiedener Rohdichte von 200, 500, 800, 1200 kg/m³ wurde mittels Simulationsprogramm an der Universität Poznań simuliert. Bei einer Rohdichte von 200 kg/m³ strömt die Luft im oberen betrachteten Bereich mehr als im unteren Bereich. Die Luft strömt in vertikaler Richtung mehr bei entsprechend zunehmender Rohdichte von 500 bis 1200 kg/m³ (siehe Abbildung 117 im Anhang), da mit zunehmender Rohdichte der Widerstand in horizontaler Richtung größer wird. Aus diesem Grund wurden die Messpunkte in verschiedenen Positionen zur Messung der Drücke bei den Rohdichten 200, 500, 800, 1200 kg/m³ in der Anlage festgelegt (siehe Abbildung 118 im Anhang). Die Messpunkte wurden in bestimmten Positionen in der Anlage fixiert, um die simulierenden Drücke mit den gemessenen Drücken bei der Berechnung der Permeabilität genau zu vergleichen.

Aus dem oben beschriebenen Grund sind 4 Kapillarrohre (P₄ bis P₇) Ø 2 x 0,5 mm in die untere Pressplatte zur Weiterleitung des Absolutdruckes zum Druckmessgerät eingebaut.

In der oberen Pressplatte sind es dagegen nur 3 Kapillarrohre (P₁ bis P₃). Die obere Pressplatte verfügt außerdem über Luftdurchlässe von ca. 52 % der gesamten Pressflächen, um während des Pressvorganges die Luftzufuhr zur Probe zu ermöglichen. Außerdem ist zur gleichmäßigen Luftverteilung eine Sintermetallscheibe (4a) in die Platte integriert und am äußeren Durchmesser Ø 125 mm zum Plattenrand hin abgedichtet.

Da der Presszylinder (3) mit 72 auf den Umfang verteilten Langlöchern (6 mm breit, 100 mm lang) versehen ist, kann die Luft, welche von der oberen Pressplatte in den Pressraum einströmt, sowohl vertikal wie auch horizontal die Probe durchströmen und durch die oben beschriebenen Langlöcher im Mantel des Presszylinders in die Atmosphäre ausströmen.

Ein Wegaufnehmer (D) ermöglicht es, nach dem Kalibrieren der Presse den genauen Pressweg und die jeweilige Dicke des Probenkörpers zu überwachen. Die Durchflussmenge wird mittels Schwebekörpermessgerät (S) vor der Anlage gemessen.

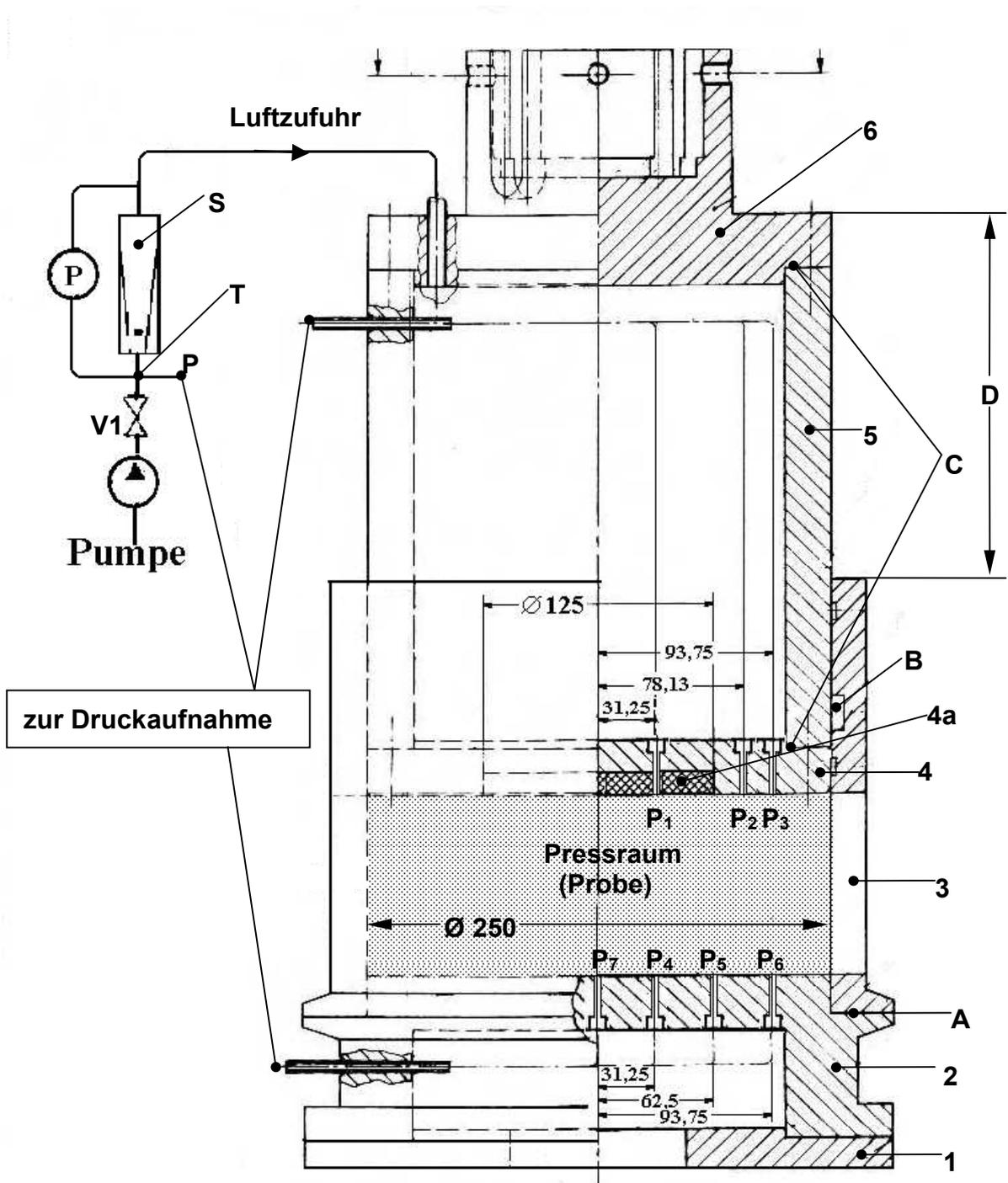


Abbildung 44: Schematischer Aufbau der Messvorrichtung II zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität

7.2.2. Einrichtung der Messvorrichtung II

Die Messvorrichtung II wurde in eine Prüfmaschine integriert. Zur simulierten Druckverteilung und Berechnung der Permeabilität wurden die Drücke vor und nach der Probe (P_1 bis P_7) mit

Absolutdruckaufnehmern (10 bar, Genauigkeitsklasse 0,3) gemessen. Zur korrigierten Durchflussmenge wurden der Druck vor dem Schwebekörpermessgerät (P) mit einem Absolutdruckaufnehmer und der Differenzdruck zwischen dem Schwebekörpermessgerät mit einem Differenzdruckaufnehmer (1 bar) bestimmt. Die Dicke der Probe wurde mit einem Wegaufnehmer gemessen. Die Temperatur vor dem Schwebekörpermessgerät und vor der Probe sowie die Raumtemperatur wurden jeweils mit einem Thermoelement (Typ K) gemessen. Die Druckaufnehmer, der Differenzdruckaufnehmer, der Wegaufnehmer und die Thermoelemente wurden an einen Messverstärker MGCplus der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik angeschlossen und kalibriert. Die Kalibrierung der Drucksensoren erfolgte im verwendeten Messbereich über zwei Wertpaare in einem geschlossenen System. Das erste Wertpaar wurde für den aktuell herrschenden Luftdruck ermittelt. Der aktuelle Luftdruck wurde mit einem Quecksilberbarometer bestimmt. Ein von der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik kalibrierter Druckaufnehmer wurde auf den aktuellen Druck eingestellt. Alle nicht kalibrierten Druckaufnehmer wurden ebenfalls auf diesen Druck eingestellt. Als zweites Wertpaar wurde der maximale Druck des zentralen Druckluftsystems verwendet, alle nicht kalibrierten Druckaufnehmer wurden auf diesen Druckwert entsprechend dem kalibrierten Druckaufnehmer eingestellt. Nach Herstellerangaben weisen alle Sensoren eine lineare Kennlinie auf. Die Messdaten wurden gleichzeitig über eine Software des gleichen Herstellers erfaßt. Abbildung 45 zeigt die in einer Prüfmaschine integrierte Messvorrichtung II mit an den Messverstärker angeschlossen Drucksensoren und Wegaufnehmern. Die Durchflussmenge wurde mit einem Schwebekörpermessgerät im Messbereich von 0 bis 30 m³/h gemessen. Zur Messung der Permeabilität diente verdichtete Luft aus dem zentralen Druckluftsystem mit einem Druck von 6 bar und einer Temperatur von 20°C. Nach den durchgeführten Vorversuchen wurde der Messpunkt P₇ herausgenommen und ``blind`` gesetzt, da der Druckunterschied zwischen P₇ und P₄ sehr gering ist. Mit nun 6 statt 7 Messpunkten erfolgen die Simulation der Druckverteilung und die Berechnung der Permeabilität schneller. Abbildung 46 zeigt Messvorrichtung II im Einsatzbereich.



Abbildung 45: Integrierte Messvorrichtung II in einer Prüfmaschine mit an einen Messverstärker angeschlossenen Drucksensoren und Wegaufnehmern



Abbildung 46: Gesamtansicht der Messvorrichtung II zur Messung der Permeabilität

7.2.3. Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung II

7.2.3.1. Erste Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung II

Die Messvorrichtung II wurde in eine hydraulische Prüfmaschine, die für eine maximale Kraft von 150 kN ausgelegt ist, integriert. Unbeleimte MS-, DS-Späne, Fasern und Strands mit einer Anfangsfeuchte von 11,3-12,3 % wurden als Material zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität verwendet. Das Material wurde, basierend auf der Mattendicke von 10 mm bei einer Rohdichte von 800 kg/m^3 (ca. 393 g), eingewogen und in den Presszylinder eingestreut. Vor dem Einstreuen des Materials in den Presszylinder, der, wie vorher beschrieben, Langlöcher aufweist, wurde mit Hilfe eines Papierinnenmantels der Presszylinder nach außen hin abgedichtet, damit das Material nicht durch die Löcher vorzeitig nach außen dringt. Nach dem Einstreuen wurde das Material mit einem Handpressstempel vorverdichtet. Dann wurde der Papiermantel nach oben aus dem Presszylinder entfernt. Zur Temperaturmessung vor der Probe wurde ein Thermoelement von außen durch eines der Langlöcher des Presszylinders geführt, auf das vorverdichtete Material mittig aufgelegt und gegen Verschieben fixiert. Die Materialien wurden zu einer bestimmten Dicke mittels Handsteuerung der Prüfmaschine verdichtet. Beim Verdichten wird ein Rohdichtebereich von 200 bis 800 kg/m^3 angestrebt. Die Durchflussmenge wurde durch das Regelventil V1 geregelt, bis sich der Schwebekörper in Ruhelage befand und von angebrachter Skala abgelesen werden konnte. Gleichzeitig wurden die vorher beschriebenen Daten erfasst und in MS-Excel gespeichert.

Mit einer hydraulischen Prüfmaschine, deren Kraftmessbereich auf 150 kN begrenzt war, konnte die Permeabilität der verschiedenen Materialien in einem Rohdichtebereich bis maximal 574 kg/m^3 für DS-Späne, 524 kg/m^3 für Fasern und MS-Späne sowie 510 kg/m^3 für Strands bei einem Probendurchmesser von 250 mm bestimmt werden. Der Probendurchmesser von 250 mm war so gewählt, dass sich bei einer durchschnittlichen Strandlänge von ca. 70 mm und ausreichender Überlappung einzelner Strands ein reproduzierbares und realitätsnahes Mattengefüge ergibt.

7.2.3.2. Zweite Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung II

Auf Grund der Messergebnisse an der 150 kN Prüfmaschine stand fest, dass die Kraft nicht ausreicht. Um den zu untersuchenden Dichtebereich zu erweitern, wurde die Messvorrichtung II

anschließend in eine 250 kN-Prüfmaschine integriert. Die Materialien wurden im Klima 20/75 konditioniert, um den Verdichtungswiderstand der Materialien zu reduzieren. Die Anfangsfeuchte der Materialien betrug 12,2 bis 13,9 %. Bei der zweiten Messung wurde der Verdichtungsprozess über ein Programm gesteuert. Die Maschine ist mit einer Geschwindigkeit von 1 mm pro Minute bis zur maximalen Kraft von 250 kN gefahren worden. Bei den erzielten Dicken bzw. Rohdichten wurden die Daten erfasst. Um die höchste Rohdichte bei der Leistung der Maschine von 250 kN zu erreichen, wurde die Probe noch zwei Mal verdichtet. Beim zweiten und dritten Verdichten ist die Maschine mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm pro Minute bis zur maximalen Kraft von 250 kN gefahren, um die Permeabilität der Endrohndichte bei dieser Kraft von 250 kN zu messen. Die Vorbereitung der Materialien, die Messregelung und Messdatenerfassung erfolgte sinngemäß wie bei der ersten Messung.

Nach einigen Versuchen konnte die Permeabilität der verschiedenen Materialien in einem Rohdichtebereich bis maximal 680 kg/m^3 für DS-Späne, 627 kg/m^3 für Fasern und 650 kg/m^3 für MS-Späne und Strands bestimmt werden. Bei dieser Rohdichte kann die Permeabilität der Spanplatte, Leicht-MDF und OSB beschrieben werden, da die Rohdichte bei der Produktion für die normale Spanplatte und OSB ca. 600 bis 700 kg/m^3 und für Leicht-MDF unter 650 kg/m^3 beträgt.

Höhere Dichten hätten höhere Verdichtungskräfte erfordert; es stand jedoch keine Anlage höherer Leistung zur Verfügung. Um die Permeabilität bis zu einer Rohdichte von 800 kg/m^3 zu beschreiben, kann sie nach der Gleichung 51 mit den angewendeten Koeffizienten in Tabelle 7 und Tabelle 8 extrapoliert werden. Da die Bestimmtheitsmaße der Regressionen hoch sind und die optimale Anpassung der Regressionkurve erreichen, kann die Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte außerhalb des gemessenen Rohdichtebereichs erklärt werden (siehe Abschnitt 8.2.2).

7.2.4. Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in zwei Dimensionen

Die Berechnung der Permeabilitätswerte in horizontaler und vertikaler Richtung für Messvorrichtung II erfolgt auf der Basis eines physikalischen Modells, gestützt durch ein Computerprogramm. In folgender Beschreibung wird die Berechnung der zweidimensionalen Permeabilität dargestellt.

7.2.4.1. Erster Modellansatz zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in zwei Dimensionen

Prof. Dr. R. Guzenda, Prof. Dr. J. Weres, Dr. W. Olek von der Universität Poznań, Polen, Fakultät für Holztechnologie, Institut für Maschienenbau und Thermodynamik, arbeiten seit vielen Jahren auf dem Gebiet mehrdimensionaler Wärmebewegung und Temperaturverteilung in Festkörpern. Das erarbeitete Rechenprogramm ist derzeit auf dem Großrechner der Universität Poznań installiert. Das Programm kann mit begrenztem Aufwand auf die Probleme des Stofftransportes und der Druckverteilung in Holzwerkstoffmatten adaptiert werden.

Bei der Kooperation und Zusammenarbeit mit der Universität Poznań wurde ein Modellansatz zur Berechnung der Permeabilität in zwei Dimensionen entwickelt. Der erste Modellansatz ist folgendermaßen zu beschreiben:

7.2.4.1.1. Mathematisches Modell

Das mathematische Modell zur Beschreibung der Luftströmung, wie sie während des Heißpressvorgangs von Holzwerkstoffmatten stattfindet, wurde aus der Kontinuitätsgleichung für den Gasstrom in porösen Materialien,

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (15)$$

\mathbf{v} Gasgeschwindigkeitsvektor

ρ Dichte des Gases

τ Zeit

ϕ Porosität

sowie aus dem Darcyschen Gesetz in der Form

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\eta} \text{grad}(P) \quad (16)$$

\mathbf{K} Permeabilitätsvektor

η dynamische Viskosität

hergeleitet. Durch Substitution von Gleichung 16 in Gleichung 15 erhält man die Strömungsgleichung in folgender Form:

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \text{div} \left[\rho \frac{\mathbf{K}}{\eta} \text{grad}(P) \right] \quad (17)$$

Unter der Annahme, dass es sich bei dem betrachteten Prozess um einen stationären Vorgang handelt, lässt sich Gleichung 17 folgendermaßen vereinfachen:

$$\text{div} \left[\rho \frac{\mathbf{K}}{\eta} \text{grad}(P) \right] = 0 \quad (18)$$

Entsprechend der Symmetriebedingungen, die sich aus der Geometrie des untersuchten Körpers ergeben, lässt sich Gleichung 18 zu einem zweidimensionalen Problem vereinfachen.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{K_x}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{K_y}{\eta} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (19)$$

x, y Koordinaten eines Punktes im zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem

K_x spezifische horizontale Permeabilität im kartesischen Koordinatensystem

K_y spezifische vertikale Permeabilität im kartesischen Koordinatensystem

Nimmt man vereinfachend an, dass es sich bei Luft um ein ideales Gas handelt, so lässt sich seine Dichte folgendermaßen berechnen

$$\rho = \frac{P}{R_i T} \quad (20)$$

P Absolutdruck

R_i individuelle Gaskonstante für Luft = 287 J/(kg·K)

T Absoluttemperatur

und in Gleichung 19 substituieren. Darüber hinaus erlaubt der isotherme Charakter des Prozesses eine Reduzierung der partiellen Differentialgleichung (19) zu der Form:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_x}{\eta} P \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_y}{\eta} P \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (21)$$

Gleichung 21 ist nun noch um die Randbedingungen zu ergänzen. Bei der Analyse von Strömungsproblemen werden meist Randbedingungen erster Ordnung (d.h. vorgegebene

Druckwerte an den entsprechenden Systemgrenzen) betrachtet. Diese Art von Grenzbedingung lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$P = P_b \quad (22)$$

Darüber hinaus lassen sich bei der mathematischen Beschreibung von Gasströmungen in porösen Materialien die Grenzflächen auch durch Randbedingungen zweiter Ordnung darstellen:

$$\dot{g}_V = -\frac{K_n}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} \quad (23)$$

\dot{g}_V volumetrischer Luftstrom

\mathbf{n} auswärtsgerichteter Einheitsvektor senkrecht zur Systemgrenze

K_n spezifische Permeabilität in n Richtung

Ist der Gasstrom \dot{g}_V gleich Null, so beschreibt die Randbedingung nach Gleichung 23 undurchlässige Grenzflächen oder aber Symmetrieebenen. Strömungswerte, die ungleich Null sind, werden verwendet, um die Strömungsgeschwindigkeit von Luft in das poröse Material hinein bzw. aus dem Material heraus zu definieren.

7.2.4.1.2. Lösungsverfahren für das Strömungsproblem

7.2.4.1.2.1 Wahl der Methode

Das durch die partielle Differenzialgleichung (Gleichung 21) sowie die Randbedingungen (Gleichungen 22 und 23) dargestellte Luftströmungsproblem kann nicht analytisch gelöst werden. Der Hauptgrund hierfür liegt in der starken Nicht-Linearität der Gleichung 21. Zur Lösung des mathematischen Modells wurde deshalb ein numerisches Verfahren nach Weres (1997) angewendet. Das Verfahren basiert auf der Finite Elemente Methode (FEM) und eignet sich sehr gut für die Lösung von Randwertproblemen komplexer Geometrien sowie von Aufgaben mit gemischten Randbedingungen verschiedenster Art. Ein weiteres wichtiges Merkmal des Verfahrens ist seine Eignung für die Lösung von potentialabhängigen partiellen Differenzialgleichungen, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, numerische Lösungen für stark nicht-lineare Probleme zu erzielen. Die wesentlichen Merkmale der angewendeten Methode werden im Folgenden diskutiert.

7.2.4.1.2.2 Approximation des geometrischen Raums

Der geometrische Bereich des Problems, der mit der Ausdehnung der untersuchten Probe zusammenfällt, wurde durch Aufteilung des Raumes in eine endliche Anzahl isoparametrischer Elemente festgelegt (Olek et al. 2000, Weres et al. 2000). Die Oberseite des Modellbereichs war im inneren Bereich mit einem Durchmesser von 125 mm für den Luftstrom offen, während der äußere Ring bis zu einem Gesamtdurchmesser von 250 mm abgedeckt war. Die Unterseite war vollständig durch eine undurchlässige Platte abgedeckt. Die Schmalflächen (Kanten) des Körpers waren für den Luftstrom offen. Die Geometrie des Körpers und die geeignete Wahl der Randbedingungen ermöglichten es, die zu lösende Aufgabe als ein zweidimensionales Problem zu betrachten und es damit auf zwei Dimensionen zu reduzieren. Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass Flächenanisotropien vernachlässigt werden können.

Die FEM-Approximation des geometrischen Bereichs, in Verbindung mit der FEM-Lösung der Gleichungen 21, 22 und 23 sowie der iterativen Prozedur, die der Nicht-Linearität der Gleichungen Rechnung trägt, bildeten zusammen mit den entsprechenden Daten zur Beschreibung der Prozessbedingungen die Grundlage des operativen mathematischen Modells.

7.2.4.1.2.3 Optimierungsverfahren

Ein Optimierungsverfahren nach Press und Teukolsky (1996) wurde angewendet, um das Minimum der Zielfunktion in Abhängigkeit von der horizontalen und der vertikalen Permeabilität zu ermitteln. Die Zielfunktion war definiert als die Summe der Abweichungsquadrate zwischen vorhergesagten Druckwerten und den entsprechenden Werten, die an den einzelnen Drucksensoren gemessen wurden. Die iterative Prozedur zur Erlangung des Minimalwertes für die Zielfunktion ist in den Abbildungen 47, 48 und 49 dargestellt.

7.2.4.1.2.4 Algorithmus zur computergestützten Bestimmung der Permeabilitätswerte

Der Algorithmus zur Bestimmung der Koeffizienten, also der Permeabilitätswerte in horizontaler und vertikaler Richtung, setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen:

1. Einlesen empirisch ermittelter Druckwerte für spezifische Positionen.

2. Einlesen der Anfangswerte für die zu schätzenden Koeffizienten (K_x/η und K_y/η) des ersten Zeitschrittes.
3. Beginn der iterativen Bestimmung des Minimums der Zielfunktion in Abhängigkeit von den zu schätzenden Koeffizienten K_x/η und K_y/η . Abbruchkriterium ist eine vorgegebene Schätzgenauigkeit bzw. die maximale Zahl der Iterationen.
 - 3.1. Bestimmung der räumlichen Luftdruckverteilung mit Hilfe des computergestützten Simulationsprogramms, das auf dem oben beschriebenen mathematischen Modell basiert.
 - 3.2. Berechnung der Zielfunktion, d.h. der Summe der Abweichungsquadrate zwischen den Ergebnissen der Computersimulation und den Messergebnissen.
 - 3.3. Speicherung der aktuellen Zahl der Iterationen sowie der entsprechenden Werte der Zielfunktion und der geschätzten Koeffizienten.
 - 3.4. Erhöhung der Zahl der Iterationen um Eins.
4. Nachdem das Minimum der Zielfunktion sowie die Koeffizienten K_x/η und K_y/η bestimmt worden sind: Erneuter Start der Computersimulation zur Vorhersage der Druckverteilung in der Probe unter Verwendung der geschätzten Koeffizienten.
5. Berechnung der dynamischen Viskosität η unter Berücksichtigung der entsprechenden Gleichung sowie der Prüftemperatur.
6. Berechnung der Permeabilitätswerte in horizontaler und vertikaler Richtung, K_x und K_y , durch Multiplizieren der geschätzten Koeffizienten K_x/η und K_y/η mit der dynamischen Viskosität (η).
7. Speicherung der endgültigen Ergebnisse für die Permeabilität in einer Datenbank.

7.2.4.1.2.5 Computerprogramm

Das Softwarepaket wurde entsprechend den oben genannten Algorithmen programmiert. Es eignet sich zur Lösung von stationären wie instationären, drei- und zweidimensionalen, quasi-linearen direkten wie auch inversen Strömungsproblemen unter Berücksichtigung verschiedener Arten von Randbedingungen. Der Programmcode ist in Fortran 95 geschrieben und so ausgelegt, dass das Programm bei Verwendung des entsprechenden Compilers auf verschiedenen gängigen Betriebssystemen läuft. Die Verfasser verwendeten

die Lahey Fortran 95 und Windows98 Entwicklungsumgebung zum Kompilieren des Programms.

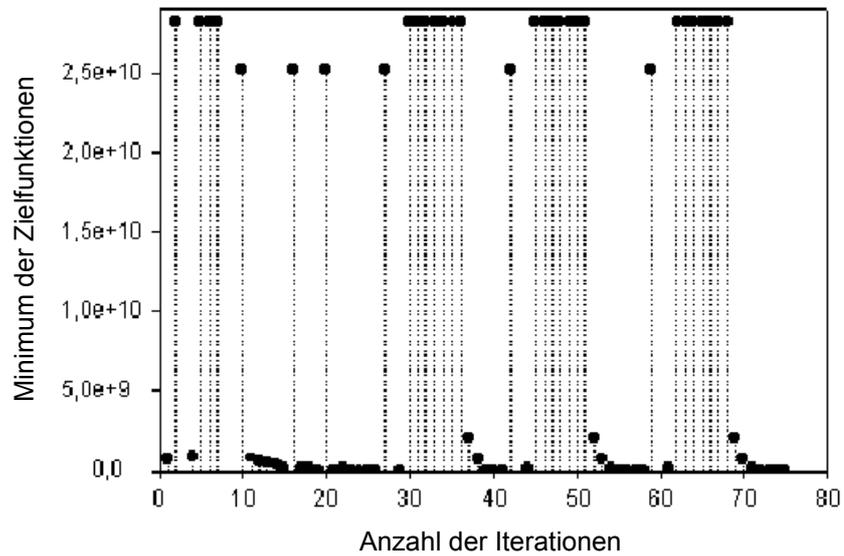


Abbildung 47: Iterative Bestimmung des Minimums der Zielfunktion in Abhängigkeit von den zu schätzenden Permeabilitätswerten K_h und K_v . Das Minimum wurde bei Iteration Nr. 58 (Daten für Faser 1, Dichte 450 kg/m³) erreicht. Die hier dargestellten Ergebnisse umfassen fast den gesamten Wertebereich für die Zielfunktion.

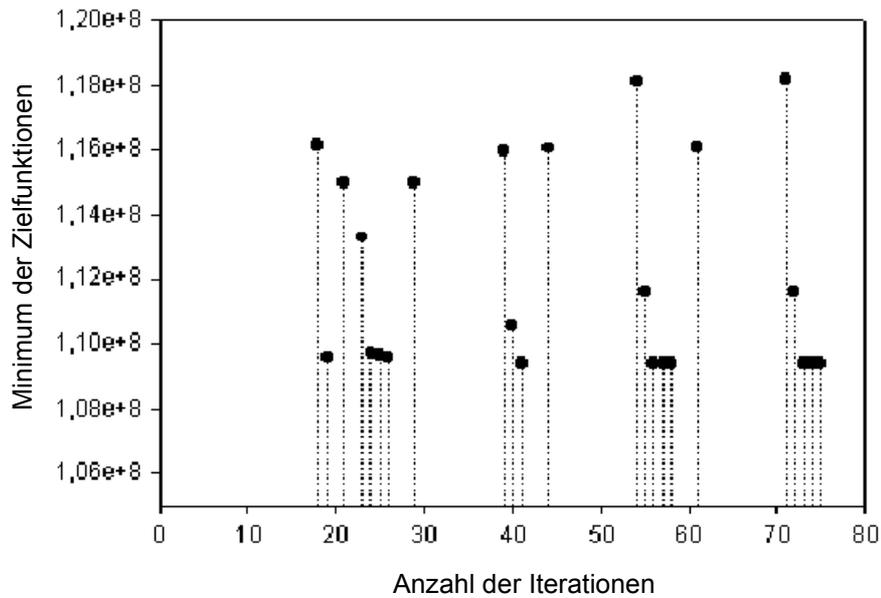


Abbildung 48: Iterative Bestimmung des Minimums der Zielfunktion in Abhängigkeit von den zu schätzenden Permeabilitätswerten K_h und K_v . Das Minimum wurde bei Iteration Nr. 58 (Daten für Faser 1, Dichte 450 kg/m^3) erreicht. Einige Daten fehlen aufgrund der erhöhten Auflösung (verringertes Wertebereich für die Zielfunktion).

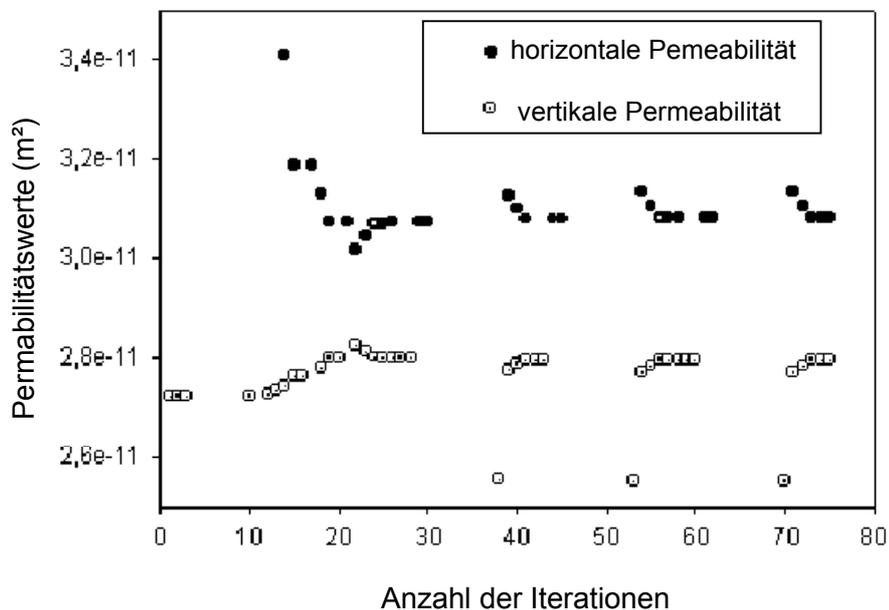


Abbildung 49: Veränderungen der Permeabilitätswerte für beide Richtungen in aufeinanderfolgenden Iterationen. Die optimalen Werte (= Minimum der Zielfunktion) wurden bei Iteration Nr. 58 (Daten für Faser 1, Dichte 450 kg/m^3) ermittelt. Einige Daten fehlen aufgrund der erhöhten Auflösung (verringertes Wertebereich für die Zielfunktion).

7.2.4.2. Zweiter (eigener) Modellansatz zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in zwei Dimensionen

7.2.4.2.1. Mathematisches Modell

Entsprechend den Symmetriebedingungen, die sich aus der Geometrie des untersuchten Körpers ergeben, lässt sich Gleichung 18 neu zu einem zweidimensionalen Problem in zylindrischer Koordinate beschreiben.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho \frac{K_r}{\eta} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\rho \frac{K_\theta}{\eta} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{K_z}{\eta} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0. \quad (24)$$

r, θ, z Koordinaten eines Punktes im zylindrischen Koordinatensystem

K_r spezifische horizontale Permeabilität in Zylinderkoordinate

K_z spezifische vertikale Permeabilität in Zylinderkoordinate

Das ideale Gasgesetz (Gleichung 20) wird in die Gleichung 24 eingeführt. Darüber hinaus erlaubt der isotherme Charakter des Prozesses eine Reduzierung der partiellen Differentialgleichung (24) zu der Form:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{K_r}{\eta} P \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{K_\theta}{\eta} P \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_z}{\eta} P \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (25)$$

Es wird angenommen, dass die Materialien in θ -Ebene isotrop sind ($\partial P / \partial \theta = 0$). Gleichung 25 reduziert sich damit zu:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{K_r}{\eta} P \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_z}{\eta} P \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (26)$$

Nach Bear (1988) und Collins (1961) wurde die Gleichung 26 für homogene anisotrope Matrix in folgender Form beschrieben

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{K_r}{\eta} \frac{1}{2} \frac{\partial P^2}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_z}{\eta} \frac{1}{2} \frac{\partial P^2}{\partial z} \right) = 0 \quad (27)$$

Beim isothermen Prozess ist die dynamische Viskosität konstant. Gleichung 27 kann damit in folgender Form beschrieben werden:

$$\frac{K_r}{r} \frac{\partial P^2}{\partial r} + K_r \frac{\partial^2 P^2}{\partial r^2} + K_z \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} = 0 \quad (28)$$

Gleichung 28 wird nun so umformuliert, dass sie das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität enthält.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial P^2}{\partial r} + \frac{\partial^2 P^2}{\partial r^2} + \frac{K_z}{K_r} \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} = 0 \quad (29)$$

Die partielle Differentialgleichung 29 ist notwendig, um die Druckverteilung in der Probe zu berechnen.

Die Lösung des numerischen mathematischen Modells erfordert die Formulierung von Randbedingungen.

7.2.4.2.2. Randbedingungen und numerische Lösung zur Berechnung der vertikalen und horizontalen Permeabilität in zwei Dimensionen

Abbildung 50 zeigt den geometrischen Bereich zur numerischen Lösung. Der gesamte Pressraum der Anlage, in der sich die Probe befindet, hat einen Durchmesser von 250 mm. Der innere Bereich der oberen Pressplatte mit einem Durchmesser von 125 mm ist offen, um die Luft strömen zu lassen. Der äußere Bereich ist nicht permeabel. Die Luft strömt von oben innerhalb des Durchmessers von 125 mm in die Probe ein und seitlich aus. Die untere Pressplatte ist vollständig geschlossen.

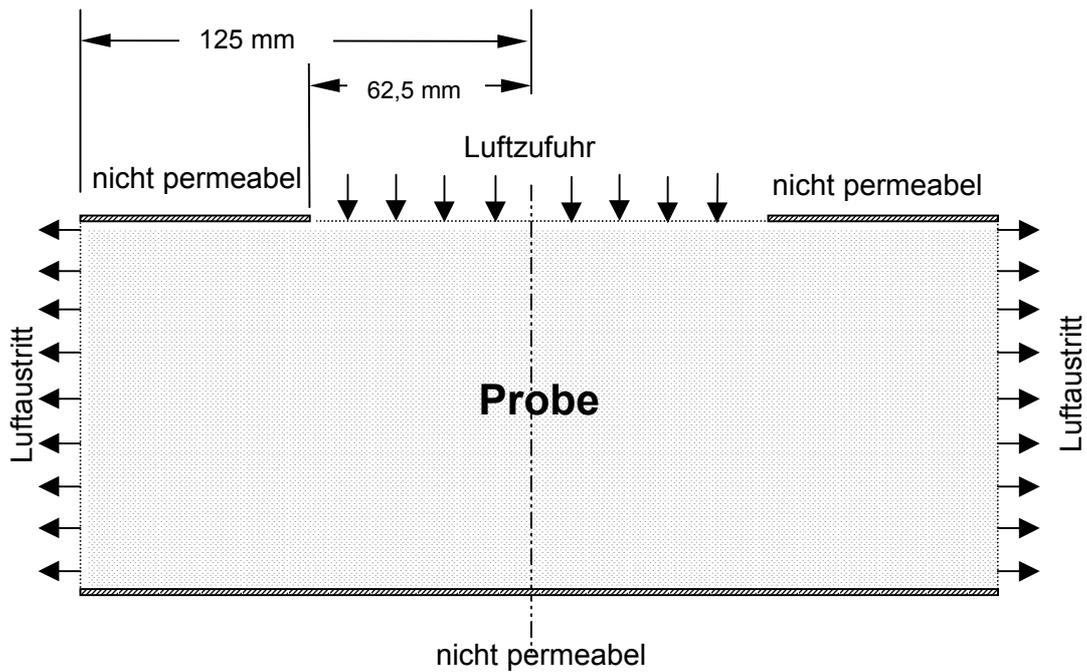


Abbildung 50: Der geometrische Bereich zur numerischen Lösung

7.2.4.2.1 Randbedingung

Um die Druckverteilung in der Probe zu simulieren, wurde die Methode der finiten Differenzen angewendet. Da der betrachtete Bereich symmetrisch ist, wurde nur der halbe Bereich der Probe betrachtet. Die Abbildung 51 stellt die Geometrie zur Lösung eines zweidimensionalen Randwertproblems von einer glatten Fläche über ein beschränktes Gebiet in der r - z -Ebene (Zylinderkoordinate) für die Druckverteilung in der Probe dar. Die Ebene wird durch ein rechtwinkliges Gitter mit den Maschenweiten h_r (horizontal) und h_z (vertikal) unterteilt. Die Einteilung ergibt in horizontaler Richtung n_r Spalten und in vertikaler Richtung n_z Zeilen. Daraus erhält man in horizontaler Richtung $i = 1$ bis $n_r + 1$ und in vertikaler Richtung $j = 1$ bis $n_z + 1$ Gitterpunkte. Die Gesamtheit aller Gitterpunkte bilden das Gitter zum Zweck der Berechnung des betrachteten Bereiches. Für alle Punkte des betrachteten Bereiches werden die Ableitungen in der Differentialgleichung durch Differenzenquotienten der gesuchten Funktionswerte ersetzt.

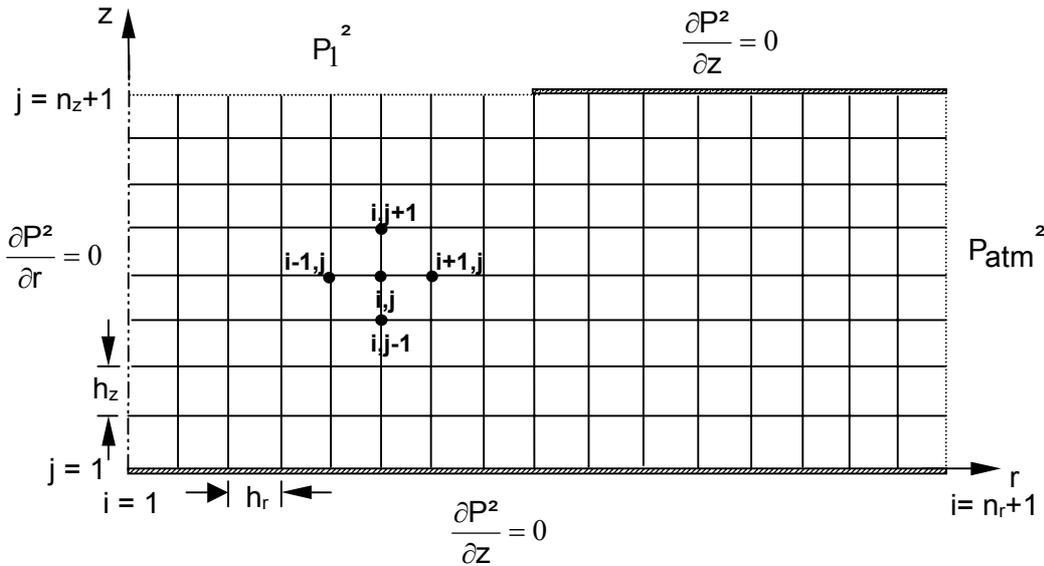


Abbildung 51: Geometrie zur Lösung des Strömungsproblems

7.2.4.2.2 Numerische Lösung der partiellen Differentialgleichung

Bei der Methode der finiten Differenzen zur Lösung von Randwertproblemen werden die Ableitungen in der Differentialgleichung durch Differenzenquotienten der gesuchten Funktionswerte der Lösungsfunktion an einzelnen ausgewählten Stellen des untersuchten Bereiches ersetzt. Im vorliegenden Fall sind die gesuchten Funktionswerte $P^2_{i,j}$ in jedem Gitterpunkt des betrachteten Bereiches. Nach Haselein (1998) wurde die partielle Differentialgleichung (29) zur Bestimmung der Druckverteilung in der Probe für Zylinderkoordinaten gelöst; es erfolgt die numerische Lösung folgendermaßen:

1. $i = 1, j = 1$ ($r = 0, z = 0$)

Dieser Punkt liegt sowohl in der Symmetrieebene als auch am nicht permeablen unteren Rand. Da eine Division durch Null nicht möglich ist, wird der erste Term der Differentialgleichung (29) ungültig.

Die Anwendung der Regel von L ' Hospital

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{(\partial P^2 / \partial r)}{r} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial P^2}{\partial r} \right)}{\frac{\partial r}{\partial r}} \right) = \frac{(\partial^2 P^2 / \partial r^2)}{1} = \frac{\partial^2 P^2}{\partial r^2} \tag{30}$$

und Einsetzen dieses Ausdrucks in Gleichung 29 ergibt

Aus der Rand- bzw. Symmetriebedingung ergibt sich :

$$P^2_{i+1,j} = P^2_{i-1,j} \quad \text{und} \quad P^2_{i,j+1} = P^2_{i,j-1}$$

Durch Einsetzen in Gleichung 34 erhält man :

$$\frac{2}{h_r^2} (P^2_{i+1,j}) + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} (P^2_{i,j+1}) = \left(\frac{2}{h_r^2} + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} \right) P^2_{i,j} \quad (35)$$

2. $i = 1, j = 2$ bis $n_z (r = 0)$

Die Punkte liegen am Rand der Symmetrieebene. Es wird jeweils ein imaginärer Punkt ergänzt (Abbildung 53).

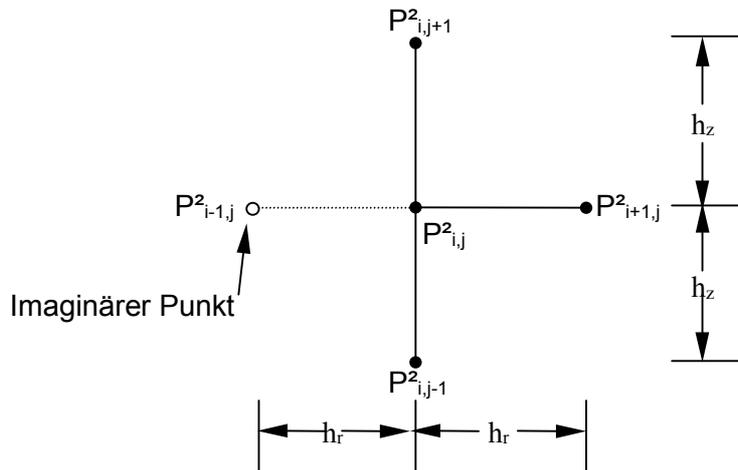


Abbildung 53: Ergänzung des imaginären Punktes bei $r = 0$

Durch Ausnutzen von Symmetrie

$$P^2_{i+1,j} = P^2_{i-1,j}$$

und der Randbedingung

$$\left(\frac{\partial P^2}{\partial r} \right) = 0$$

in Gleichung 34 ergibt

$$\frac{4}{h_r^2} (P^2_{i+1,j}) + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} (P^2_{i,j+1} + P^2_{i,j-1}) = 2 \left(\frac{2}{h_r^2} + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} \right) P^2_{i,j} \quad (36)$$

3. $i = 2$ bis N_r , $j = 1$ ($z = 0$)

Diese Punkte liegen auf dem Rand, der an die nicht permeable untere Platte grenzt. Der Rand wird als Symmetrie angesehen, ein imaginärer Punkt wird ergänzt (Abbildung 54).

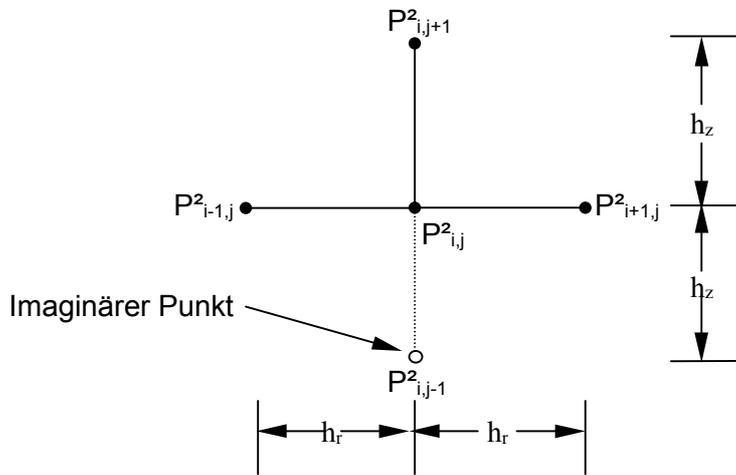


Abbildung 54: Ergänzung des imaginären Punktes an der nicht permeablen unteren Platte

Erneut erfolgt die Anwendung von Symmetrie-

$$P^2_{i,j+1} = P^2_{i,j-1}$$

und Randbedingung

$$\left(\frac{\partial P^2}{\partial z} \right) = 0$$

Die nun in der partiellen Differentialgleichung (29) enthaltene erste Ableitung wird durch folgenden Differenzenquotient der ersten Ableitung der Taylorreihe ersetzt :

$$\frac{\partial P^2}{\partial r} \cong \frac{P^2_{i+1,j} - P^2_{i-1,j}}{2h_r} \quad (37)$$

Durch Einsetzen der zentralen Differenzenquotienten (32), (33) und (37) in die partielle Differentialgleichung (29) erhält man

$$\left(\frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2rh_r} \right) P^2_{i+1,j} + \left(\frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2rh_r} \right) P^2_{i-1,j} + 2 \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} P^2_{i,j+1} = 2 \left(\frac{1}{h_r^2} + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} \right) P^2_{i,j} \quad (38)$$

4. $i = 2$ bis N_r , $j = 2$ bis N_z

Die Punkte liegen im Inneren des betrachteten Bereichs. Die zentralen Differenzenquotienten (32), (33) und (37) werden in die partielle Differentialgleichung (29) eingesetzt. Daraus ergibt sich

$$\left(\frac{1}{h_r^2} + \frac{1}{2rh_r}\right)P^2_{i+1,j} + \left(\frac{1}{h_r^2} - \frac{1}{2rh_r}\right)P^2_{i-1,j} + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2}(P^2_{i,j+1} + P^2_{i,j-1})$$

(39)

$$= 2\left(\frac{1}{h_r^2} + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2}\right)P^2_{i,j}$$

5. $i > (n_r+2)/2$, $j = n_z$

Diese Punkte liegen an der nicht permeablen oberen Platte. Als Randbedingung wird Symmetrie angenommen. Ein imaginärer Punkt wird ergänzt (Abbildung 55).

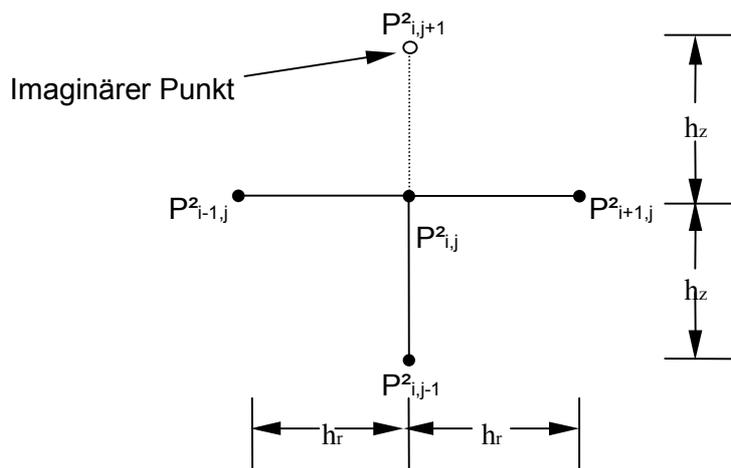


Abbildung 55: Ergänzung des imaginären Punktes an der nicht permeablen oberen Platte

Wieder erhält man

$$P^2_{i,j-1} = P^2_{i,j+1}$$

Durch Einsetzen der zentralen Differenzenquotienten (32), (33) und (37) in die partielle Differentialgleichung (29) ergibt sich

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h_r^2} \left(1 + \frac{1}{2rh_r} \right) P^2_{i+1,j} + \frac{1}{h_r^2} \left(1 - \frac{1}{2rh_r} \right) P^2_{i-1,j} + 2 \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} P^2_{i,j-1} \\ & = 2 \left(\frac{1}{h_r^2} + \frac{(K_z/K_r)}{h_z^2} \right) P^2_{i,j} \end{aligned} \quad (40)$$

Aus den Gleichungen (34) - (36) und (38) - (40) ergibt sich ein lineares Gleichungssystem. Zur Simulation der Druckverteilung ist außerdem die Kenntniss der Drücke an den offenen Rändern notwendig.

Das Simulationsprogramm wurde mit der Programmiersprache C/C++ umgesetzt.

7.2.4.2.3. Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität

Nach Ermittlung der Druckverteilung mit der gerade beschriebenen Methode wird nun der Bereich zwischen oberer und unterer nicht permeable Pressplatte zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität verwendet (Abbildung 56).

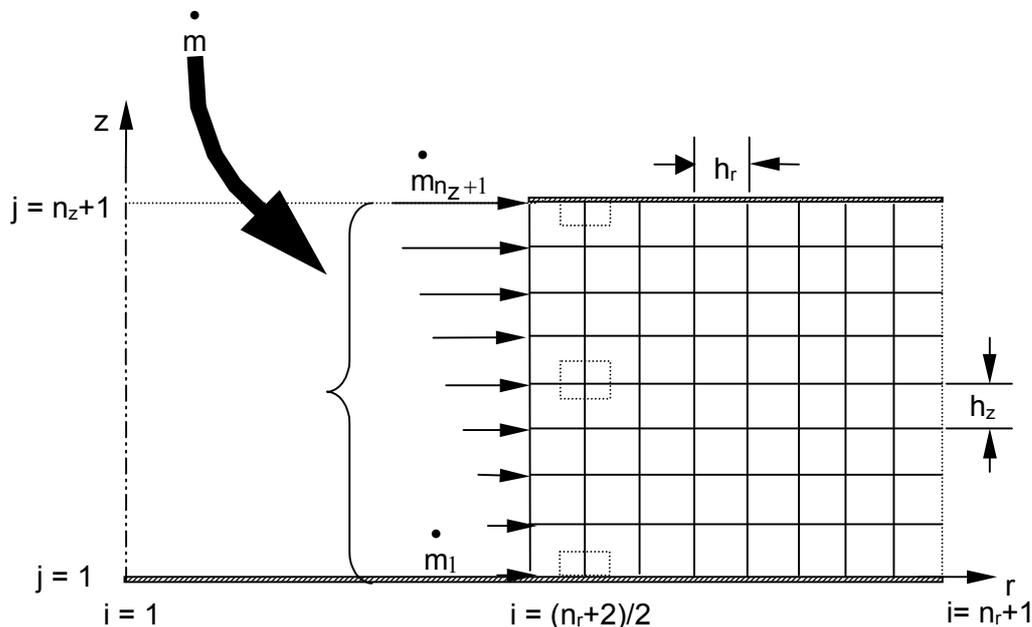


Abbildung 56: Der betrachtete Bereich zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität

Da die Luft von oben in vertikaler Richtung einströmt und seitlich in horizontaler Richtung ausströmt, liegt keine rein horizontale Strömung vor. Außerdem strömt mehr Luft in den oberen Bereich der Probe. Infolgedessen sind der Druck und die Geschwindigkeit im oberen

Bereich der Probe größer als im unteren Bereich. Das hat zur Folge, dass der Massenstrom im oberen Bereich ebenfalls größer ist als im unteren Bereich mit jeweils gleichem Gitterpunktindex (i).

Nach der Kontinuitätsgleichung entspricht der eintretende Massenstrom (\dot{m}) dem austretenden Massenstrom. Gemäß Abbildung 56 muss der Masseneintritt der Summe des Massenstroms der Gitterpunkte $j = 1$ bis $n_z + 1$ im Gitterbereich $i > (n_r + 2)/2$ entsprechen. Das mathematische Modell des Massenausgleichs wird in Gleichung 41 dargestellt.

$$\dot{m} = \sum_{j=1}^{n_z+1} \dot{m}_{i,j} \quad \text{für } (n_r+2)/2 < i \leq n_r+1 \quad (41)$$

Nach Chapra et al. (1998) und Patankar (1980) wird die Control-Volume-Methode für die Kontinuitätsgleichung zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität angewendet. Senkrechte Linien durch die Mitte von Gitternetzlinien erzeugen einen Bereich (Abbildung 56). Die Approximation wird auf die Mittelpunkte der den Bereich umgebenden Linien angewendet. Der Eintritt des Massenstroms durch diese Mittelpunkte muss dem Austritt des Massenstroms aus den jeweiligen Mittelpunkten entsprechen.

Zunächst wird der Gitterbereich an der nicht permeablen oberen Platte betrachtet. Abbildung 57 zeigt das Control-Volume für das an die obere Platte grenzende Gitter. Der Eintritt des Massenstroms vom Punkt $(i-1, j)$ zum Punkt (i, j) gleicht den Austritten der Massenströme von Punkt (i, j) zum Punkt $(i+1, j)$ und $(i, j-1)$, denn die Kontinuitätsgleichung lautet:

$$\dot{m}_{i-1,j} = \dot{m}_{i+1,j} + \dot{m}_{i,j-1} \quad (42)$$

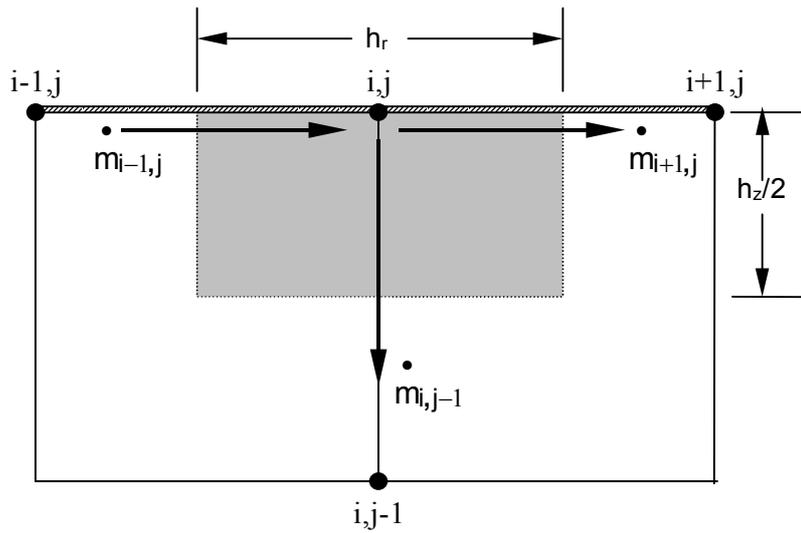


Abbildung 57: Control-Volume des an die obere Platte grenzenden Gitterbereiches

Abbildung 58 zeigt das Control-Volume für den inneren Gitterbereich. Die Masseneintritte vom Punkt $(i-1, j)$ und Punkt $(i, j+1)$ zum Punkt (i, j) gleichen den Austritten der Massenströme von Punkt (i, j) zum Punkt $(i+1, j)$ und $(i, j-1)$. Dies ergibt sich erneut aus der Kontinuitätsgleichung.

$$\dot{m}_{i-1,j} = \dot{m}_{i+1,j} + \dot{m}_{i,j-1} - \dot{m}_{i,j+1} \quad (43)$$

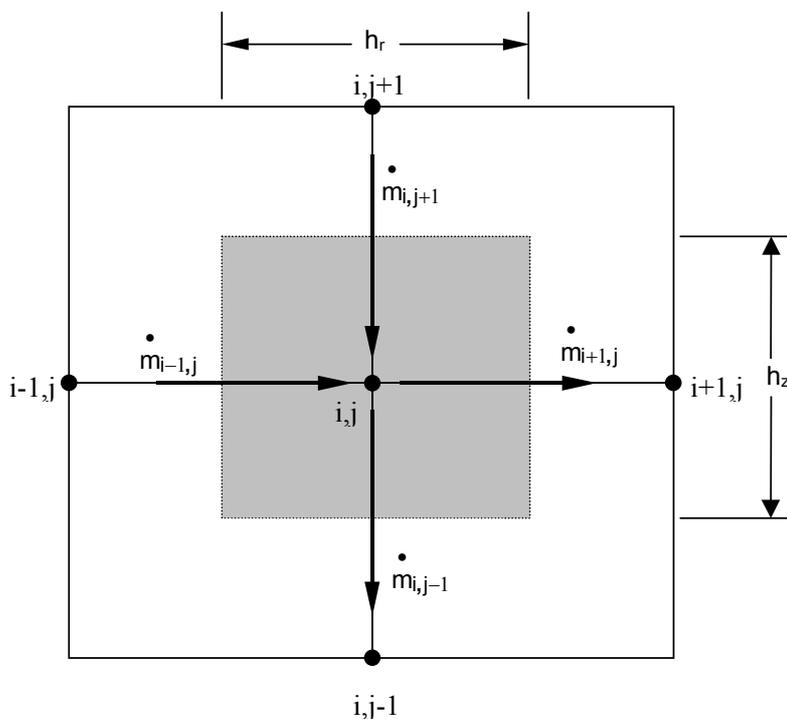


Abbildung 58: Control-Volume für inneren Gitterbereich

In Abbildung 59 ist das Control-Volume des an die untere Platte grenzenden Gitterbereiches dargestellt. Wieder ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung, dass die Eintritte der Massenströme vom Punkt $(i-1, j)$ und Punkt $(i, j+1)$ zum Punkt (i, j) dem Austritt des Massenstroms von Punkt (i, j) zum Punkt $(i+1, j)$ entsprechen.

$$\dot{m}_{i-1,j} + \dot{m}_{i,j+1} = \dot{m}_{i,j+1} + \dot{m}_{i,j} \quad (44)$$

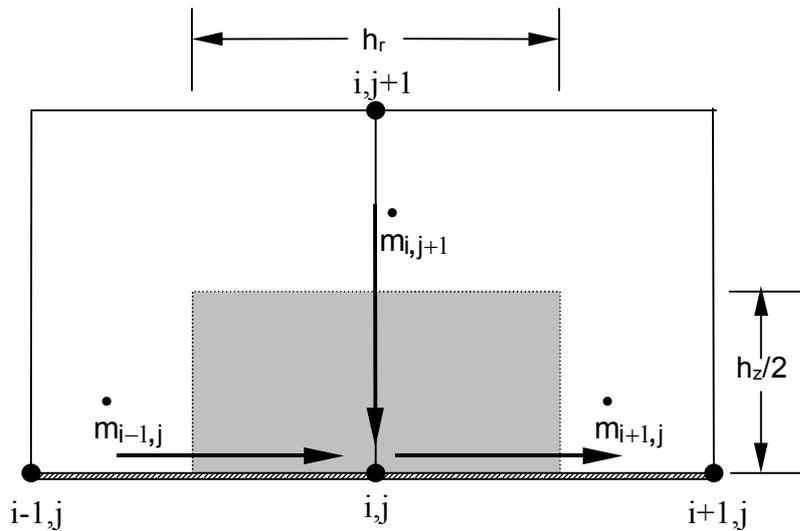


Abbildung 59: Control-Volume für den Gitterbereich an der unteren Platte

Haselein (1998) löste die Gleichung zur Berechnung der eindimensionalen horizontalen und vertikalen Permeabilität für die Zylinderkoordinate in der Form des Massenstroms. Die Gleichung zur Berechnung der eindimensionalen vertikalen Permeabilität wird daher folgendermaßen beschrieben:

$$\dot{m} = \int_{r_1}^{r_2} r \int_0^{2\pi} \rho v_z r d\theta dr$$

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^{n_r} \left[\left(\frac{r_{i+1}^2 - r_i^2}{2} \right) 2\pi \rho \left(-\frac{K_z}{\eta} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right]$$

$$\dot{m} = -\sum_{i=1}^{n_r} \left[\left(r_{i+1}^2 - r_i^2 \right) \frac{\pi K_z}{2\eta R_j T} \frac{\partial P^2}{\partial z} \right]$$

$$\dot{m} = \frac{\pi K_z}{2\eta h_z R_j T} \sum_{i=1}^{n_r} \left[\left(r_{i+1}^2 - r_i^2 \right) \left(P_{i,j}^2 - P_{i,j-1}^2 \right) \right] \quad (45)$$

Entsprechend ergeben sich die Ausdrücke zur Berechnung der eindimensionalen horizontalen Permeabilität:

$$\dot{m} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \rho v_r r d\theta dz$$

$$\dot{m} = 2\pi h r \rho v_r = 2\pi h r \rho \left(-\frac{K_r}{\eta} \frac{dP}{dr} \right) = -\frac{2\pi h r K_r}{\eta} \rho \frac{dP}{dr} = -\frac{2\pi h r K_r}{2\eta} \frac{1}{R_i T} \frac{dP^2}{dr}$$

$$\dot{m} = \frac{\pi r_i K_r h_z}{\eta h_r R_i T} \sum_{j=1}^{n_z+1} (P^2_{i,j} - P^2_{i+1,j}) \quad (46)$$

Wie in Abbildung 56 dargestellt, wird der Eintritt des Massenstroms an jedem Gitterpunkt von $j = 1$ bis n_z+1 in den einzelnen Gitterabschnitten (i) der horizontalen Richtung berechnet. Die Summe des Massenstroms aller übereinander liegenden Gitterpunkte ($j = 1$ bis n_z+1) in den einzelnen Gitterabschnitten (i) der horizontalen Richtung gleicht gemäß Kontinuitätsgleichung dem Eintritt des Massenstroms.

Entsprechend den Abbildungen 57, 58 und 59 werden die angepassten Ausdrücke (45) und (46) bezüglich des Control-Volumens jeweils zur Berechnung des Massenstromeintritts an den entsprechenden Gitterpunkten ($j = n_z+1$, $j = 2$ bis n_z , $j = 1$) in die Gleichungen (42), (43) bzw. (44) eingesetzt. Daraus ergeben sich folgende Ausdrücke:

für $j = n_z+1$;

$$\dot{m}_{i,j=n_z+1} = \frac{\pi r_i K_r h_z}{2\eta h_r R_i T} (P^2_{i,j} - P^2_{i+1,j}) + \frac{\pi K_z}{2\eta h_z R_i T} \left((r_i + \frac{h_r}{2})^2 - (r_i - \frac{h_r}{2})^2 \right) (P^2_{i,j} - P^2_{i,j-1}) \quad (47)$$

für $j = 2$ bis n_z ;

$$\dot{m}_{i,j} = \left(\begin{array}{l} \frac{\pi r_i K_r h_z}{\eta h_r R_i T} (P^2_{i,j} - P^2_{i+1,j}) + \frac{\pi K_z}{2\eta h_z R_i T} \left((r_i + \frac{h_r}{2})^2 - (r_i - \frac{h_r}{2})^2 \right) (P^2_{i,j} - P^2_{i,j-1}) \\ - \frac{\pi K_z}{2\eta h_z R_i T} \left((r_i + \frac{h_r}{2})^2 - (r_i - \frac{h_r}{2})^2 \right) (P^2_{i,j+1} - P^2_{i,j}) \end{array} \right) \quad (48)$$

für $j = 1$;

$$\dot{m}_{i,j=1} = \frac{\pi r_i K_r h_z}{2\eta h_r R_i T} (P^2_{i,j} - P^2_{i+1,j}) - \frac{\pi K_z}{2\eta h_z R_i T} \left((r_i + \frac{h_r}{2})^2 - (r_i - \frac{h_r}{2})^2 \right) (P^2_{i,j+1} - P^2_{i,j}) \quad (49)$$

Zur Ermittlung der Druckverteilung in der Probe ist eine Schätzung des Verhältnisses der vertikalen zur horizontalen Permeabilität (K_z/K_r) erforderlich. Zur Ermittlung der horizontalen und vertikalen Permeabilität wird der Massenstrom in jedem Punkt des betrachteten Bereiches (Abbildung 56) mit der Control-Volume-Methode für beide Dimensionen berechnet. Es wird angenommen, dass die vertikale und horizontale Permeabilität in allen Punkten des betrachteten Bereiches konstant sind. Die horizontale Permeabilität wird zunächst geschätzt und das sich daraus ergebende Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität zur Berechnung des Massenstroms in jedem Punkt verwendet. Die Summe der Massenströme der Gitterpunkte $j = 1$ bis n_z+1 in den Gitterabschnitten $i > (n_r+2)/2$ wird als Mittelwert angegeben und mit dem gemessenen Masseneintritt verglichen.

7.2.4.2.4. Algorithmus zur computergestützten Bestimmung der Druckverteilung und der vertikalen und horizontalen Permeabilität

Das Programm zur Berechnung der Druckverteilung und der vertikalen und horizontalen Permeabilität wurde in der Programmiersprache C/C++ geschrieben. Das Programm wurde in Visual C++ kompiliert und läuft im Windows Betriebssystem.

Der Algorithmus zur Bestimmung der Druckverteilung und der vertikalen und horizontalen Permeabilität setzt sich aus folgenden Schritten zusammen (siehe auch Abschnitt 12.3 im Anhang):

1. Eingabe der empirisch ermittelten Druckwerte (P_1 - P_6) für spezifische Positionen.
2. Eingabe von Dicke und Radius sowie der Temperatur der Probe.
3. Eingabe des gemessenen Massenstroms. Der Massenstrom wird mit folgendem Ausdruck berechnet :

$$\dot{m} = \rho Q = \frac{PQ}{R_i T} \quad (50)$$

- \dot{m} Massenstrom (kg/s)
- P absoluter Druck vor dem Schwebekörpermessgerät (Pa)
- Q tatsächliche Durchflussmenge (m^3/s)
- R_i individuelle Gaskonstante für Luft = 287 J/(kg·K)

T absolute Temperatur vor dem Schwebekörpermessgerät (K)

ρ Dichte des Gases (kg/m^3)

4. Eingabe der Anzahl von Spalten (n_r) und Zeilen (n_z). Genauigkeit, aber auch Zeitaufwand steigen mit der Verfeinerung des Gitters.
5. Beginn der iterativen Bestimmung des Minimums der Zielfunktion in Abhängigkeit des zu schätzenden Verhältnisses von vertikaler zu horizontaler Permeabilität (K_z/K_r). Abbruchkriterium ist eine vorgegebene Schätzgenauigkeit bzw. Maximalzahl von Iterationen.
 - 5.1. Bestimmung der räumlichen Luftdruckverteilung mit Hilfe des computergestützten Simulationsprogramms, das auf dem oben beschriebenen mathematischen Modell basiert. Zur Iteration wurde das Gauß-Seidel-Verfahren (Chapra et al.1998) angewendet.
 - 5.2 Zur Berechnung der Zielfunktion wird die Methode der kleinsten Quadrate angewendet, d.h. die Summe der Abweichungsquadrate zwischen den Ergebnissen der Computersimulation und den Messergebnissen wird minimiert.
6. Nach Ermittlung der Zielfunktion erhält man die Druckverteilungen in der Probe und das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität. Der Massenstrom wird mit der geschätzten horizontalen und vertikalen Permeabilität berechnet und mit dem gemessenen Massenstrom verglichen. Unterschreitet der Unterschied des berechneten und gemessenen Massenstroms eine vorgegebene Schätzgenauigkeit, wird das Programm abgebrochen.

8. Ergebnisse

8.1. Messung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung I

MS-, DS-Späne und Fasern wurden als Materialien zur Messung der horizontalen und vertikalen Permeabilität im Rohdichtebereich von 250 – 950 kg/m³ mit Messvorrichtung I verwendet. Von jedem Material wurden drei Proben gemessen. Für jede Rohdichte wurde die horizontale und vertikale Permeabilität bei vier verschiedenen Durchflussmengen gemessen und als Mittelwert angegeben.

Zur Ermittlung der horizontalen und vertikalen Permeabilitätskoeffizienten wurde die klassische Regressionsanalyse angewendet. Es wurde die Regressionskurve mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß ausgewählt. Dabei wurden die Messpunkte der Permeabilität (K) und der Rohdichte (ρ) nach den Funktionen $K = 1/\ln(K)$ und $\rho = 1/\ln(\rho)$ transformiert. Die Bestimmung der Koeffizienten (a, b, c) erfolgte über eine lineare multiple Regression. Die verwendete Regressionsfunktion lautet : $1/\ln(K) = a + b\rho + c/\ln(\rho)$. Die Abbildung 60 und Abbildung 61 verdeutlichen die Streuung der Mittelwerte der Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern um die Regressionskurven in horizontaler bzw. vertikaler Richtung. Für jedes Material ist die Abhängigkeit der horizontalen und vertikalen Permeabilität von der Rohdichte in logarithmischer Darstellung angegeben.

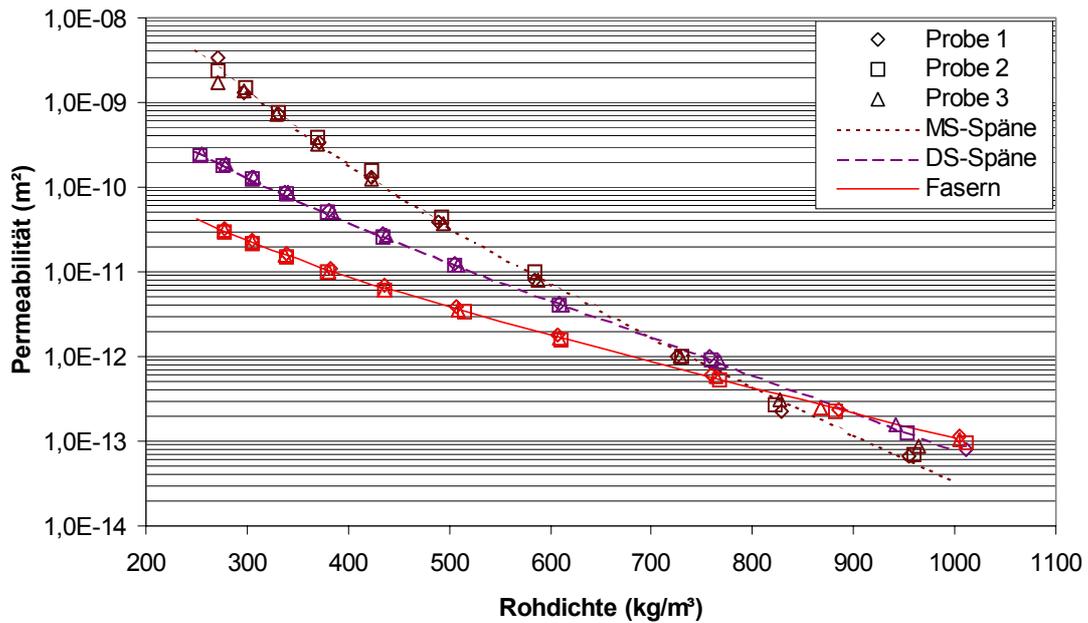


Abbildung 60: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 %

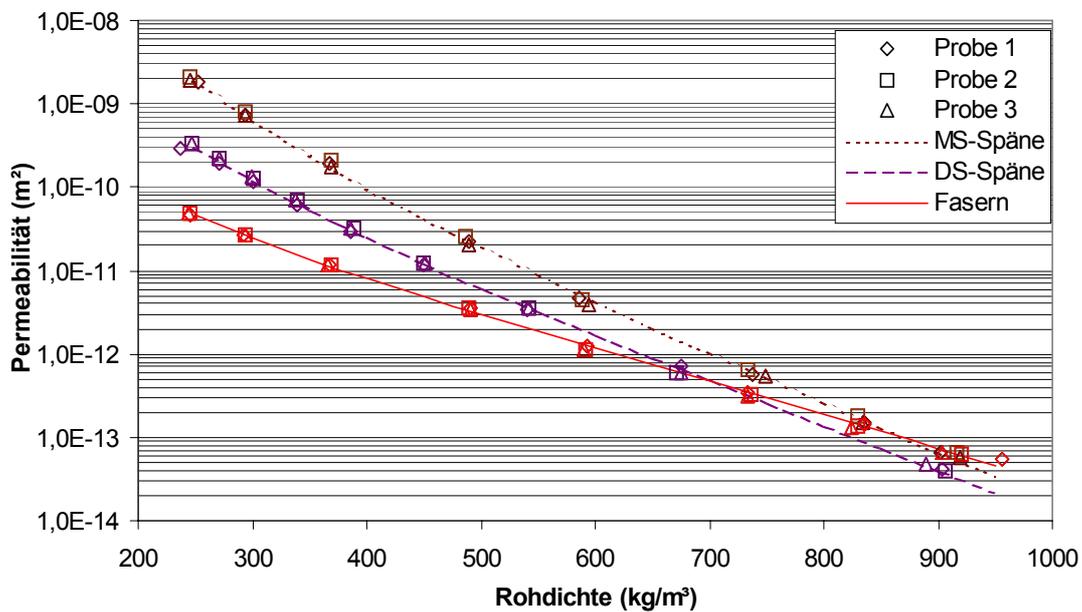


Abbildung 61: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 %

Die Streupunkte der Mittelwerte der Permeabilität weichen nicht stark von den Regressionskurven ab. Nur bei niedriger Rohdichte (unter 300 kg/m³) der MS-Späne in horizontaler Richtung ist eine größere Streuung vorhanden. Da die Permeabilität von Matten

aus MS-Spänen groß und der Abstand zwischen dem äußeren und inneren Radius der Probe klein ist, tritt bei niedriger Rohdichte von Matten aus MS-Spänen eine hohe Durchflussmenge und eine kleine Druckdifferenz in horizontaler Richtung auf. Die Genauigkeit des Druckdifferenzaufnehmers von 0,01 bar reicht nicht mehr aus.

Zur Beschreibung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte für alle Materialien wird die Gleichung 51 mit 3 Koeffizienten aus der Regressionsanalyse verwendet.

$$K = e^{\frac{1}{a+bp+c/\ln\rho}} \quad (51)$$

ρ Rohdichte (kg/m³)

a, b, c Koeffizienten

Die Koeffizienten zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte befinden sich in Tabelle 5 und 6.

Tabelle 5: Koeffizienten zur Berechnung der horizontalen Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte (RBZH = Rohdichte aus Masse, bezogen auf atro Holz, berechnet, RBMK = Rohdichte, ohne Berücksichtigung der Masse des Klebstoffes, berechnet)

$$K = e^{\frac{1}{a+b\rho+c/\ln\rho}}$$

Material	Klebstoffanteil(%)	Feuchte (%)	a	b	c	R ²	Bemerkungen
Fasern	0	10 - 11	-0,0199	4,937E-06	-0,1281	0,99	-
DS-Späne	0	10 - 11	-0,0164	8,014E-06	-0,1713	0,99	-
MS-Späne	0	10 - 11	0,0333	3,176E-06	-0,4748	0,99	-
MS-Fraktionen							
1,0 – 1,5 mm	0	10 - 11	0,0030	7,999E-06	-0,2977	0,99	-
1,5 – 2,0 mm	0	10 - 11	0,0073	8,982E-06	-0,3331	0,99	-
2,0 – 3,1 mm	0	10 - 11	0,0189	8,118E-06	-0,4047	0,99	-
3,1 – 4,0 mm	0	10 - 11	0,0498	2,897E-06	-0,5831	0,99	-
Fasern	0	6 – 7	-0,0189	4,739E-06	-0,1328	0,99	-
DS-Späne	0	6 – 7	-0,0174	8,141E-06	-0,1657	0,99	-
MS-Späne	0	6 – 7	0,0326	3,111E-06	-0,4675	0,99	-
Fasern	0	10 - 11	-0,0203	5,507E-06	-0,1234	0,99	RBZH
DS-Späne	0	10 - 11	-0,0169	8,819E-06	-0,1656	0,99	RBZH
MS-Späne	0	10 - 11	0,0318	3,577E-06	-0,4591	0,99	RBZH
Fasern	0	6 – 7	-0,0192	5,089E-06	-0,1296	0,99	RBZH
DS-Späne	0	6 – 7	-0,0178	8,753E-06	-0,1615	0,99	RBZH
MS-Späne	0	6 – 7	0,0316	3,382E-06	-0,4565	0,99	RBZH
Fasern	10	10 - 11	-0,0220	6,320E-06	-0,1209	0,99	-
DS-Späne	10	10 - 11	-0,0289	1,214E-05	-0,1107	0,99	-
MS-Späne	10	10 - 11	-0,0007	1,309E-05	-0,3067	0,99	-
Fasern	10	10 - 11	-0,0224	6,977E-06	-0,1167	0,99	RBMK
DS-Späne	10	10 - 11	-0,0293	1,338E-05	-0,1068	0,99	RBMK
MS-Späne	10	10 - 11	-0,0017	1,447E-05	-0,2962	0,99	RBMK

Tabelle 6: Koeffizienten zur Berechnung der vertikalen Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte (RBZH = Rohdichte aus Masse, bezogen auf atro Holz, berechnet, RBMK = Rohdichte, ohne Berücksichtigung der Masse des Klebstoffes, berechnet)

$$K = e^{\frac{1}{a+b\rho+c/\ln\rho}}$$

Material	Klebstoffanteil(%)	Feuchte (%)	a	b	c	R ²	Bemerkungen
Fasern	0	10 - 11	-0,0214	7,251E-06	-0,1236	0,99	-
DS-Späne	0	10 - 11	-0,0023	7,220E-06	-0,2491	0,99	-
MS-Späne	0	10 - 11	0,0214	4,962E-06	-0,4000	0,99	-
MS-Fraktionen							
1,0 – 1,5 mm	0	10 - 11	0,0119	5,949E-06	-0,3434	0,99	-
1,5 – 2,0 mm	0	10 - 11	0,0146	6,819E-06	-0,3667	0,99	-
2,0 – 3,1 mm	0	10 - 11	0,0167	6,951E-06	-0,3799	0,99	-
3,1 – 4,0 mm	0	10 - 11	0,0195	5,935E-06	-0,4014	0,99	-
Fasern	0	6 – 7	-0,0197	6,945E-06	-0,1322	0,99	-
DS-Späne	0	6 – 7	-0,0011	6,976E-06	-0,2544	0,99	-
MS-Späne	0	6 – 7	0,0170	6,070E-06	-0,3748	0,99	-
Fasern	0	10 – 11	-0,0218	7,961E-06	-0,1195	0,99	RBZH
DS-Späne	0	10 – 11	-0,0013	7,543E-06	-0,2497	0,99	RBZH
MS-Späne	0	10 – 11	0,0199	5,595E-06	-0,3851	0,99	RBZH
Fasern	0	6 – 7	-0,0120	7,353E-06	-0,1296	0,99	RBZH
DS-Späne	0	6 – 7	-0,0017	7,484E-06	-0,2483	0,99	RBZH
MS-Späne	0	6 – 7	0,0162	6,506E-06	-0,3664	0,99	RBZH
Fasern	10	10 - 11	-0,0232	7,843E-06	-0,1165	0,99	-
DS-Späne	10	10 - 11	-0,0065	9,634E-06	-0,2381	0,99	-
MS-Späne	10	10 - 11	0,0092	9,284E-06	-0,3475	0,99	-
Fasern	10	10 - 11	-0,0236	8,654E-06	-0,1125	0,99	RBMK
DS-Späne	10	10 - 11	-0,0072	1,066E-05	-0,2298	0,99	RBMK
MS-Späne	10	10 - 11	0,0081	1,029E-05	-0,3354	0,99	RBMK

8.1.1. Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte bei verschiedenen Materialien

In Abbildung 60 und Abbildung 61 sind die horizontale und vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern in Abhängigkeit von der Rohdichte dargestellt. Die Permeabilität nimmt mit zunehmender Rohdichte ab. Bei niedrigen Rohdichten sind in horizontaler und vertikaler Richtung MS-Späne am durchlässigsten. DS-Späne sind durchlässiger als Fasern.

Bei hohen Rohdichten weisen in horizontaler Richtung Fasern die höchsten Permeabilität auf, gefolgt von den DS-Spänen und den MS-Spänen. Bei hohen Rohdichten sind Fasern in vertikaler Richtung am durchlässigsten, gefolgt von den MS-Spänen und den DS-Spänen.

8.1.2. Einfluss der Feuchtigkeit auf die Permeabilität

Zum Vergleich der horizontalen und vertikalen Permeabilität wurde die Rohdichte unter Berücksichtigung der darrtrockenen Holzmasse berechnet. Da der Wassergehalt einen Einfluss auf die Rohdichte hat, wird die Permeabilität gegen die Rohdichte aufgetragen. In Abbildung 62 und Abbildung 63 ist der Einfluss der Feuchtigkeit auf die horizontale und vertikale Permeabilität dargestellt. Mit zunehmender Feuchte von 6 % - 7 % auf 10 % - 11% vermindern sich die horizontale und vertikale Permeabilität von Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern geringfügig. Dies ist verständlich, da bei höherer Feuchte eine Quellung stattgefunden hat und damit bei gleicher Rohdichte (bezogen auf atro Holzmasse) in einem bestimmten Volumen geringfügig weniger Hohlräume in der Probe zur Verfügung stehen.

Die Verminderung der Permeabilität durch Feuchteerhöhung ist bei hoher Rohdichte geringfügig höher als bei niedriger Rohdichte. Durch die Verdichtung bei hoher Rohdichte (bezogen auf atro Holzmasse) und höherer Feuchte liegen die Materialien dichter aneinander, da der Verdichtungswiderstand der Materialien mit zunehmender Feuchte sinkt (v. Haas 1998). Deshalb haben die Oberflächen der verdichteten Materialien in der Probe bei einer Feuchte von 10 % - 11% besseren Kontakt als bei einer Feuchte von 6% - 7%. Dadurch wird die Permeabilität geringer. Infolgedessen ist die Verminderung der Permeabilität bei hoher Rohdichte größer als bei niedriger Rohdichte.

Eine Ausnahme bilden unbeleimte Matten aus MS-Spänen in horizontaler Richtung, wo sich kein Permeabilitätsunterschied durch Feuchtezunahme ergibt.

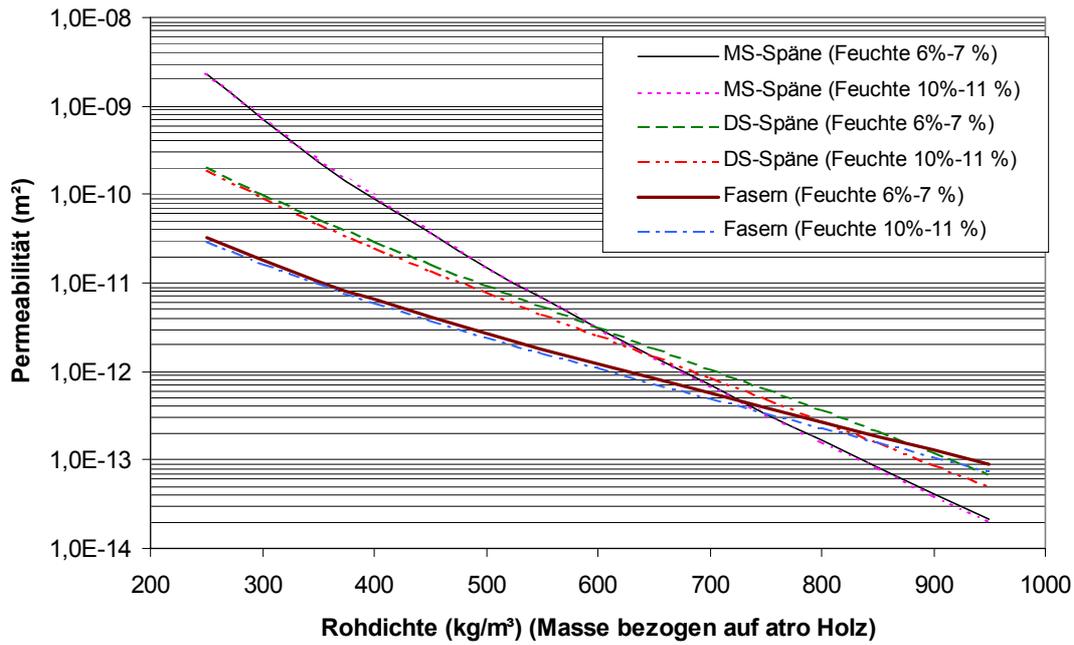


Abbildung 62: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Feuchten

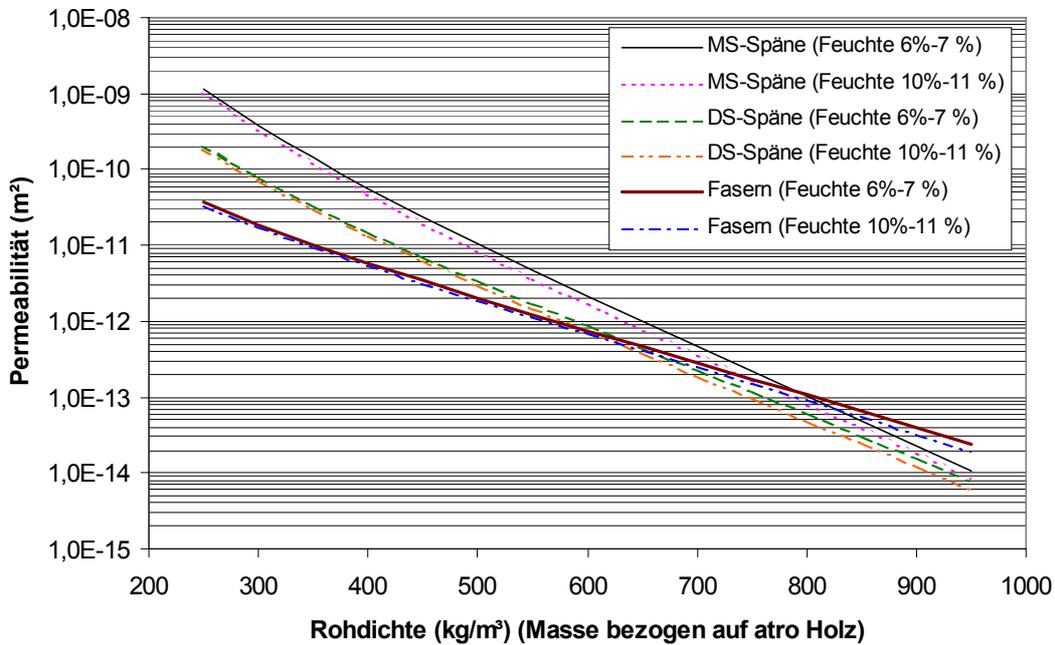


Abbildung 63: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Feuchten

8.1.3. Einfluss des Klebstoffanteils

Die Permeabilität der beleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern mit einem Klebstoffanteil von 10 % wurde mit der Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 % verglichen. Der Klebstoff hat eine höhere Rohdichte als das Holz. Zum Vergleich der Permeabilität bei verschiedenen Klebstoffanteilen wurde die Rohdichte ohne Berücksichtigung des Klebstoffs berechnet. In Abbildung 64 und Abbildung 65 ist der Einfluss des Klebstoffanteils auf die horizontale und vertikale Permeabilität dargestellt. Der Klebstoffanteil hat einen Einfluss auf die Permeabilität bei einer Rohdichte ab ca. 300 kg/m³ für Matten aus Fasern, ab ca. 500 kg/m³ für Matten aus DS-Spänen und ab ca. 650 kg/m³ für Matten aus MS-Spänen. Oberhalb dieser Grenzwerte vermindern sich die horizontale und vertikale Permeabilität mit zunehmendem Klebstoffanteil. Der Einfluß des Klebstoffes auf die Permeabilität steigt dabei mit zunehmender Rohdichte an. Dies ist vermutlich darin begründet, dass durch die Verdichtung die Oberflächen der einzelnen Partikel fest aneinander liegen und durch den Klebstoff ``verklebt`` wurden, obwohl der Klebstoff durch die kalte Presse nicht ausgehärtet ist. Infolgedessen sind die Hohlräume in der Probe bei hohem Klebstoffanteil verschlossen und dadurch die Proben sehr wenig permeabel.

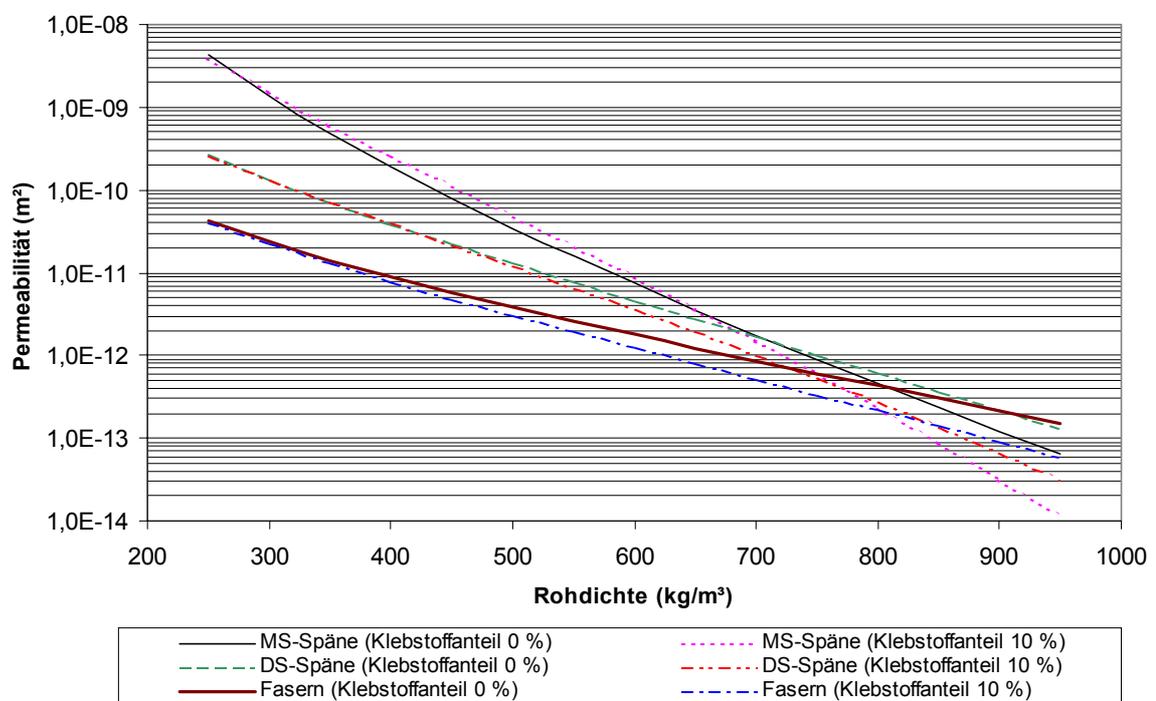


Abbildung 64: Horizontale Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Klebstoffanteilen und einer Feuchte von 10 % - 11 %

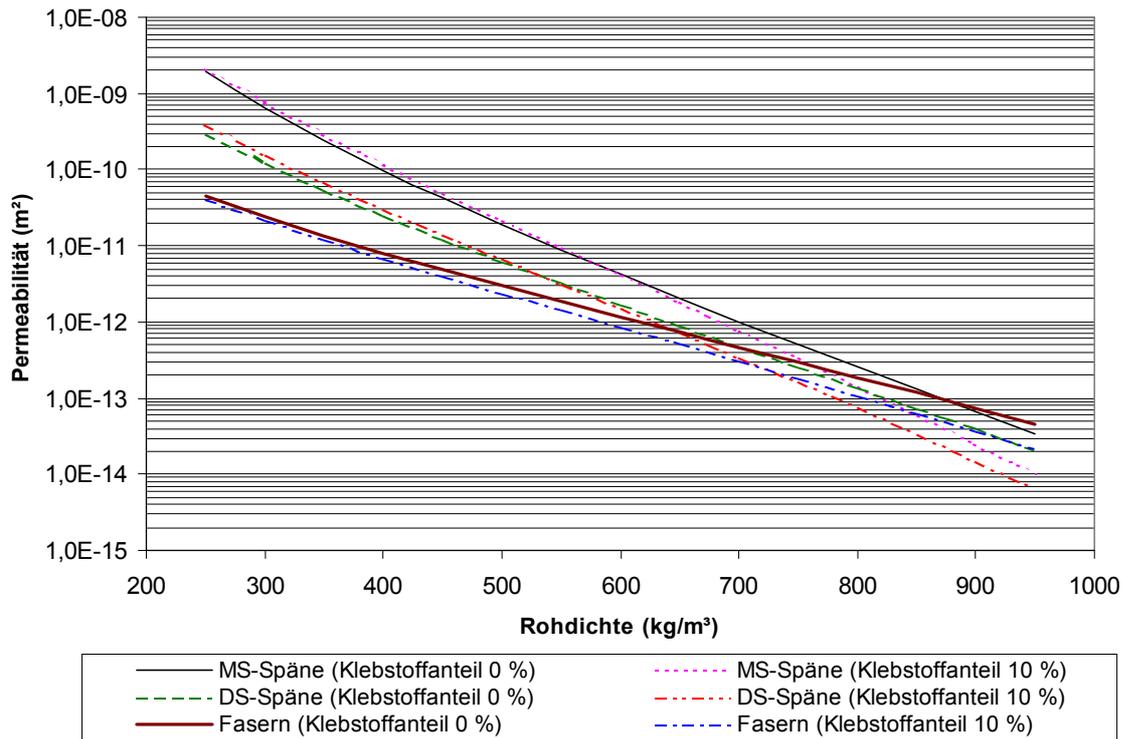


Abbildung 65: Vertikale Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Klebstoffanteilen und einer Feuchte von 10 % - 11 %

8.1.4. Einfluss der verschiedenen Spanfraktionen

MS-Späne wurden mit verschiedenen Maschenweiten fraktioniert. Bei der größeren Maschenweite bekommt man breitere, dickere und längere Späne als bei der kleineren Maschenweite (siehe Tabelle 1). Infolgedessen haben die Späne bei der größeren Maschenweite eine geringere Schüttdichte und einen größeren Verdichtungswiderstand. Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen, dass bei niedriger Rohdichte in horizontaler und vertikaler Richtung die Spanfraktion 3,1 mm – 4,0 mm am durchlässigsten ist, gefolgt von den Spanfraktionen 2,0 mm – 3,1 mm, 1,5 mm – 2,0 mm und 1,0 mm – 1,5 mm, obwohl die Späne bei größerer Spanfraktion breiter als die der kleineren Spanfraktion sind. Die Spandicke hat bei niedriger Rohdichte einen größeren Einfluss auf die horizontale und vertikale Permeabilität als die Spanbreite. Je dicker die Späne sind, desto durchlässiger ist die Probe bei niedriger Rohdichte in horizontaler und vertikaler Richtung.

Bei hoher Rohdichte besteht die Tendenz in horizontaler Richtung zu verminderter Permeabilität bei der größeren Spanfraktion als bei kleinerer Spanfraktion, obwohl die Späne der größeren Spanfraktion dicker als bei der kleineren Spanfraktion sind. Der Grund

könnte darin liegen, dass durch hohe Verdichtung der Widerstand gegen Luftströmung zwischen den Kontaktflächen der Späne bei der größeren Spanoberfläche größer als bei der kleineren Spanoberfläche ist. In horizontaler Richtung strömt die Luft parallel zur Oberflächenebene. Infolgedessen ist die horizontale Permeabilität bei größerer Spanoberfläche geringer als bei kleinerer Spanoberfläche. Die Spanfraktion 1,0 mm – 1,5 mm ist am durchlässigsten, gefolgt von den Spanfraktionen 1,5 mm – 2,0 mm, 2,0 mm – 3,1 mm und 3,1 mm – 4,0 mm.

Bei hoher Rohdichte ist die vertikale Permeabilität der Spanfraktion 2,0 mm – 3,1 mm geringer als bei der Spanfraktion 1,5 mm – 2,0 mm, und diese ist wiederum geringfügig niedriger als bei der Spanfraktion 1,0 mm – 1,5 mm. Wahrscheinlich wird die geringfügig niedrigere Permeabilität in vertikaler Richtung bei hoher Rohdichte durch die Spanbreite verursacht, da die Spandicken sich kaum unterscheiden. Die mittleren Breiten der Spanfraktionen 1,0 mm – 1,5 mm, 1,5 mm – 2,0 mm und 2,0 mm – 3,1 mm betragen entsprechend 1,17 mm, 1,64 mm und 2,35 mm. Bei den Dicken der Spanfraktionen wurden entsprechend 0,54 mm, 0,54 mm und 0,72 mm registriert.

Eine Ausnahme bildet die Spanfraktion 3,1 mm – 4,0 mm in vertikaler Richtung. Dort ist die vertikale Permeabilität im gesamten Rohdichtebereich von 250 kg/m^3 – 950 kg/m^3 am durchlässigsten, obwohl die Breite dieser Spanfraktion am größten ist. Das bedeutet, dass nicht nur die Breite einen Einfluss auf die Permeabilität hat, sondern auch die Dicke. Die Dicke, die Breite und die Oberfläche der Spanfraktion 3,1 mm – 4,0 mm betragen entsprechend 1 mm, 3,38 mm und $50,63 \text{ mm}^2$. Durch die dickeren Späne ist der Verdichtungswiderstand groß. Die Hohlräume bei hoher Rohdichte wurden wenig geschlossen. In vertikaler Richtung strömt mehr Luft durch die Hohlräume zwischen den Spänen als zwischen den Kontaktflächen der Späne. Infolgedessen ist die vertikale Permeabilität der Spanfraktion 3,1 mm – 4,0 mm bei hoher Rohdichte am höchsten.

Die beiden Permeabilitätswerte der ungesiebten MS-Späne liegen etwa in der Mitte zwischen den Permeabilitätswerten der Spanfraktionen von 1,0 mm bis 4,0 mm.

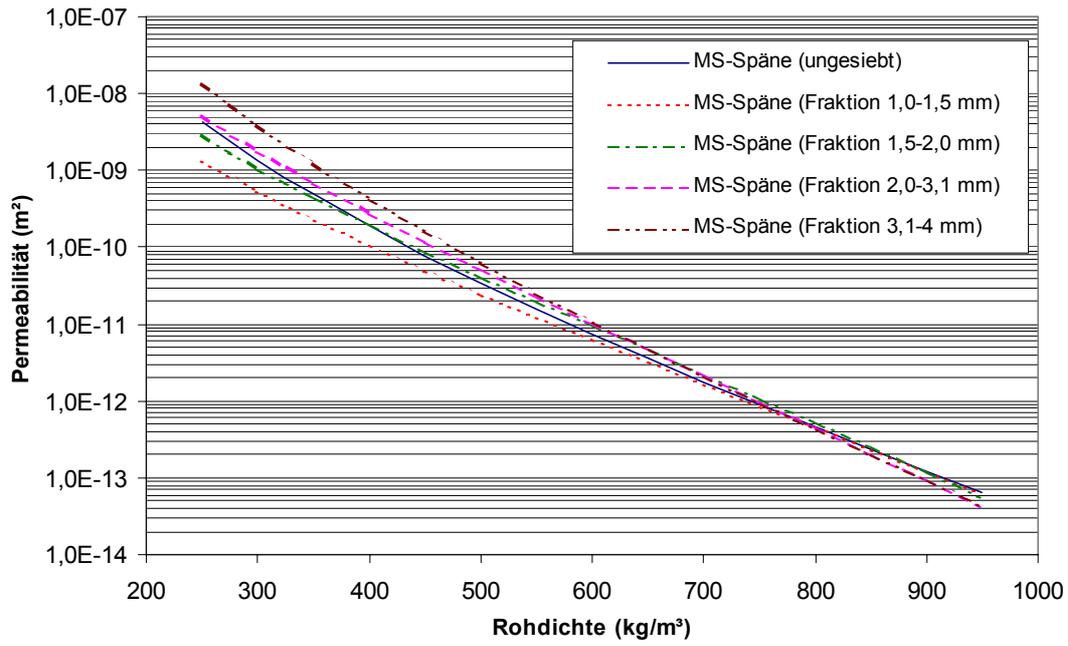


Abbildung 66: Horizontale Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei verschiedenen Fraktionen

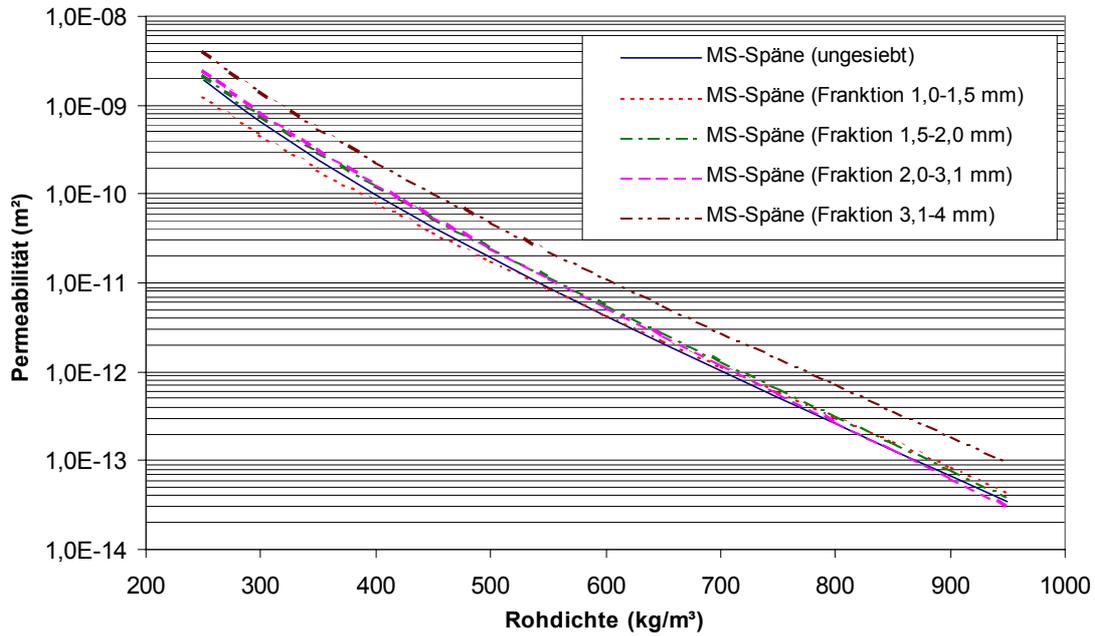


Abbildung 67: Vertikale Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei verschiedenen Fraktionen

8.1.5. Einfluss der Strömungsrichtung und Verhältnisse der Permeabilität

Die in Abbildung 68 angegebene Rohdichte wurde ohne Berücksichtigung des Klebstoffs berechnet. Abbildung 68 zeigt das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität von beleimten und unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 % – 11 %. Bei einer Rohdichte von 250 kg/m^3 ist die vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-Spänen sowie unbeleimten und beleimten Fasermatten geringfügig höher als die horizontale Permeabilität. Die vertikale Permeabilität von beleimten Matten aus DS-Spänen ist aber bei dieser Rohdichte höher als die horizontale Permeabilität. Bei unbeleimten und beleimten Matten aus MS-Spänen beträgt die horizontale Permeabilität ungefähr das Doppelte der vertikalen Permeabilität. Alle Materialien sind bei Rohdichten über 350 kg/m^3 in horizontaler Richtung durchlässiger als in vertikaler Richtung.

Für unbeleimte und beleimte Matten aus DS-Spänen und Fasern nimmt der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen mit zunehmender Rohdichte zu, d.h. das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität nimmt mit zunehmender Rohdichte ab. DS-Späne und Fasern weisen eine kleineren Dicke, Breite und Länge auf und sind damit leichter zu verdichten. Durch die Verdichtung bei kleineren Spanabmessungen können sich die Hohlräume zwischen den Materialien verschließen, wodurch die Luftströmung in vertikaler Richtung behindert wird. In horizontaler Richtung strömt die Luft parallel zur Kontaktfläche. Durch die Verdichtung ändert sich der Widerstand gegen die Luftströmung zwischen den Kontaktflächen der DS-Späne und Fasern geringfügig, da die Oberfläche und Dicke der DS-Späne und Fasern zu klein sind und schon durch die Vorverdichtung miteinander kontaktieren. Infolgedessen nimmt die Permeabilität von unbeleimten und beleimten Matten aus DS-Spänen und Fasern in vertikaler Richtung mit zunehmender Rohdichte stärker als in horizontaler Richtung ab. Dadurch vergrößert sich der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen mit zunehmender Rohdichte.

Die Matten aus MS-Spänen sind in vertikaler Richtung über den gesamten Rohdichtebereich wesentlich undurchlässiger als in horizontaler Richtung. Für unbeleimte Matten aus MS-Spänen ist der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen über den gesamten Rohdichtebereich wesentlich gleichmäßiger. Dabei ist die horizontale Permeabilität ca. 2-fache größer als die vertikale Permeabilität. Für beleimte Matten aus MS-Spänen nimmt der Unterschied der Permeabilität mit zunehmender Rohdichte ab, d.h. das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität steigt mit zunehmender Rohdichte. Da durch die Verdichtung der Klebstoff einen Film zwischen den Oberflächen der Späne bildet, können sich die Hohlraumanteile in horizontaler Richtung stärker als in vertikaler Richtung verschließen. Durch Klebstoffzugabe ist die Veränderung des Widerstandes gegen Luftströmung zwischen den Kontaktflächen der MS-Späne in horizontaler Richtung stärker

als in vertikaler Richtung, da die Luft in horizontaler Richtung parallel zur Oberfläche der Späne und in vertikaler Richtung zwischen den Hohlräumen der Späne strömt. Infolgedessen reduziert sich die Permeabilität von beleimten Matten aus MS-Spänen in horizontaler Richtung stärker als in vertikaler Richtung. Dadurch nimmt das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität von beleimten Matten aus MS-Spänen mit zunehmender Rohdichte zu.

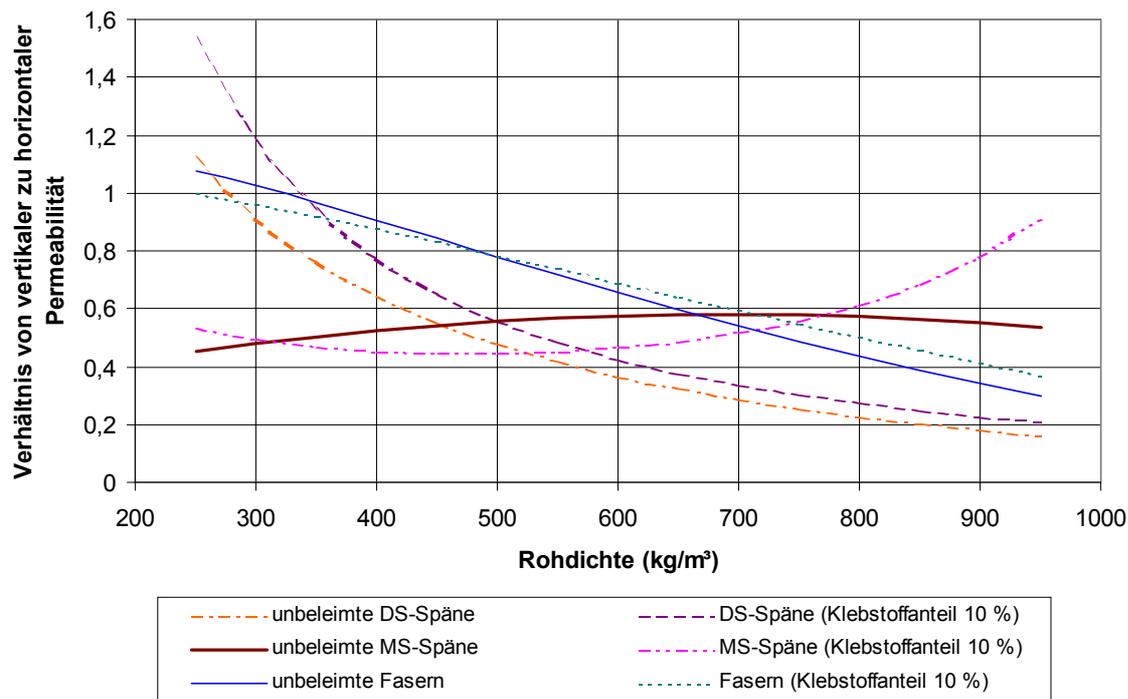


Abbildung 68: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Klebstoffanteilen in Abhängigkeit von der Rohdichte (Feuchte 10 % – 11 %)

8.1.6. Einfluss der Lufttemperatur

Zur Messung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen von ca. 20°C und 80°C wurden darrtrockene MS-, DS-Späne und Fasern verwendet. Bei Erhöhung der Lufttemperatur von 20°C bis 80°C nimmt die Dichte der Luft ab, da Expansionsströmung auftritt. Die Durchflussmenge und damit auch die Strömungsgeschwindigkeit nehmen zu. Die dynamische Viskosität ändert sich ebenfalls. Zur Berechnung der Permeabilität wurde das Gesetz von Darcy angewendet. Es ist anwendbar, wenn der Durchfluss laminar ist. Die so berechneten Permeabilitätswerte hängen nicht vom Durchflussmedium, sondern von der Porenstruktur ab. Bei der hier gemessenen Permeabilität unter verschiedenen Temperaturen ist der Durchfluss nicht laminar, da bei geringer Durchflussmenge bzw. Geschwindigkeit die

Proben bis zur Zieltemperatur sehr langsam erwärmt werden. Um die Proben bis zur Zieltemperatur schnell zu erwärmen, wurde eine Durchflussmenge von ca. 1000 l/h eingestellt. Bei dieser Durchflussmenge ist der Luftstrom in der Probe nicht laminar. Im nicht laminaren Bereich nehmen die mit dem Gesetz von Darcy berechneten vertikalen Permeabilitätswerte in Abhängigkeit von der Rohdichte mit zunehmender Durchflussmenge bzw. steigendem Differenzdruck geringfügig ab (siehe Abschnitt 7.1.6.2).

Es ist möglich, das Gesetz von Darcy zum Vergleich der Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen anzuwenden. Dabei wurde die gleiche Durchflussmenge (ca. 1000 l/h, nach der Korrektur, wegen Expansionsströmung bei Erhöhung der Temperatur (siehe Abschnitt 7.1.6.3)) zur Berechnung der Permeabilitätswerte verwendet. Die vertikalen Permeabilitäten von Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Lufttemperaturen von 20°C und 80°C sind in Abbildung 69 bis Abbildung 71 dargestellt. Die bei 80°C und hoher Rohdichte gemessenen vertikalen Permeabilitäten sind geringfügig niedriger als die bei 20°C gemessenen. Durch die Erwärmung sind die Materialien weicher. Nach v. Haas et al. (2000) vermindert sich der Verdichtungswiderstand durch Temperaturerhöhung bei einer Feuchte von 0 % geringfügig. Durch die Verdichtung bei hoher Rohdichte liegen die Materialien bei 80°C fester aneinander als bei 20°C, da die plastische Verformung der Materialien bei 80°C durch Verdichtung stärker ist als bei 20°C. Infolgedessen ist die Permeabilität bei 80°C geringfügig niedriger als bei 20°C.

Weiterhin sollte der Temperatureinfluss auf die Permeabilität untersucht werden. Die Permeabilitätswerte der drei Proben, gemessen bei verschiedenen Temperaturen, wurden als Mittelwert berechnet. Zur Varianzanalyse wurde das einfache Blockexperiment angewendet. Die vertikalen Permeabilitäten bei verschiedenen Temperaturen (20°C und 80°C) unterscheiden sich nicht zum 5 % Niveau (siehe Tabelle 13 bis Tabelle 15 im Anhang).

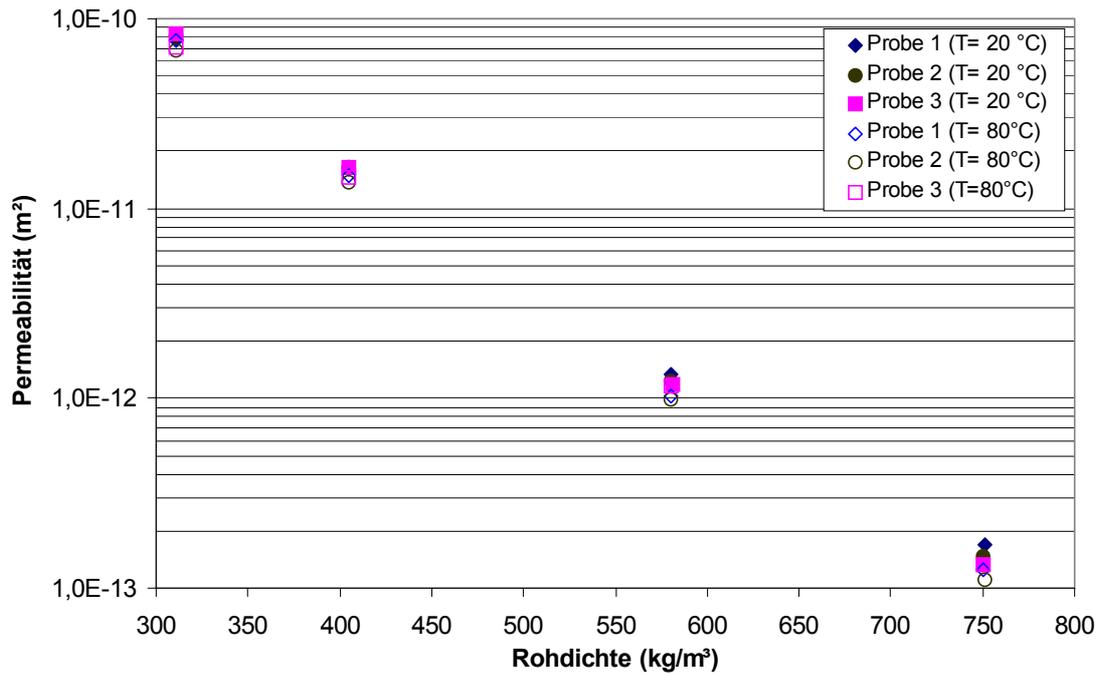


Abbildung 69: Vertikale Permeabilität von Matten aus DS-Spänen bei Temperaturen von 20°C und 80°C (Feuchte ca. 0,5 % – 1 % in Abhängigkeit von der Rohdichte)

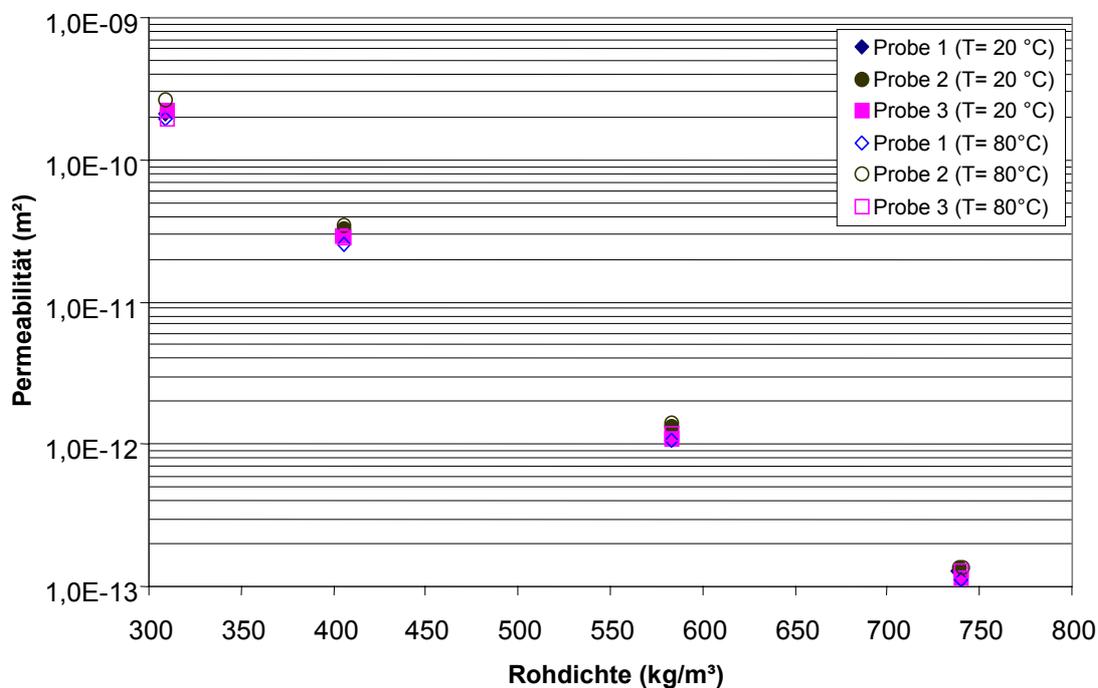


Abbildung 70: Vertikale Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei Temperaturen von 20°C und 80°C (Feuchte von ca. 0,5 % – 1 % in Abhängigkeit von der Rohdichte)

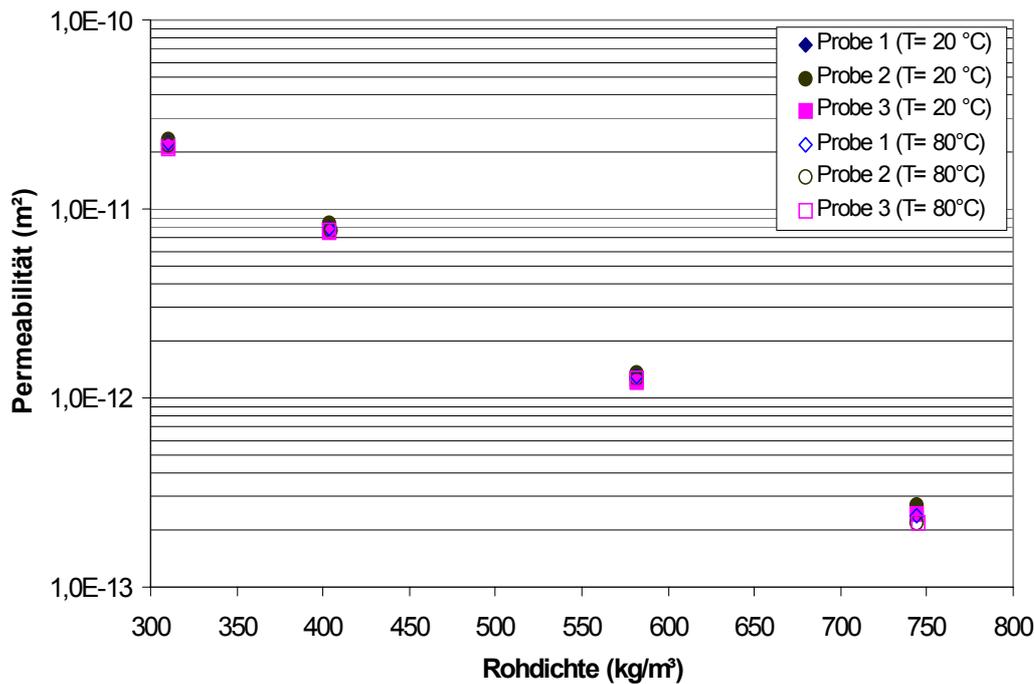


Abbildung 71: Vertikale Permeabilität von Fasermatten bei Temperaturen von 20°C und 80°C (Feuchte ca. 0,5 % – 1 % in Abhängigkeit von der Rohdichte)

8.1.7. Vergleich der Ergebnisse

Die mit Messvorrichtung I bestimmten Ergebnisse der mit einem Klebstoffanteil von 10 % beleimten Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern wurden mit den Ergebnissen der konventionellen Methode nach v. Haas (1998) verglichen. Nach dieser Methode wurden die mit gleichmäßigem Rohdichteprofil hergestellten Platten verschiedener Materialien mit einem Klebstoffanteil von 11 % geprüft.

Zum Vergleich der Ergebnisse der Permeabilität in beiden Richtungen ist die Rohdichte unter Berücksichtigung des Klebstoffs angegeben. In Abbildung 72 und Abbildung 73 sind die horizontalen und vertikalen Permeabilitäten der mit einem Klebstoffanteil von 10 % beleimten Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode dargestellt. Für die Matten aus DS-Spänen und Fasern unterscheiden sich die Permeabilitäten in beiden Richtungen im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode nur geringfügig. Jedoch sind die Permeabilität der Matten aus DS-Spänen und Fasern in vertikaler Richtung und die Permeabilität der Matten aus DS-Spänen in horizontaler Richtung geringfügig höher als die Ergebnisse der konventionellen Methode. Eine Ausnahme bildet die Matte aus Fasern in horizontaler Richtung, wo die Permeabilität geringfügig niedriger im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode ist.

Für die Matten aus MS-Spänen ist der Unterschied zwischen den beiden Methoden in beiden Richtungen größer als bei DS-Spänen und Fasern. Es ist zu vermuten, dass der größere Unterschied auf die heterogenen MS-Späne zurückzuführen ist. In horizontaler Richtung nimmt der Unterschied der Permeabilität für die MS-Späne zwischen beiden Methoden mit zunehmender Rohdichte ab. In vertikaler Richtung ist der Unterschied der Permeabilität zwischen beiden Methoden im gesamten Rohdichtebereich gleichmäßiger als in horizontaler Richtung.

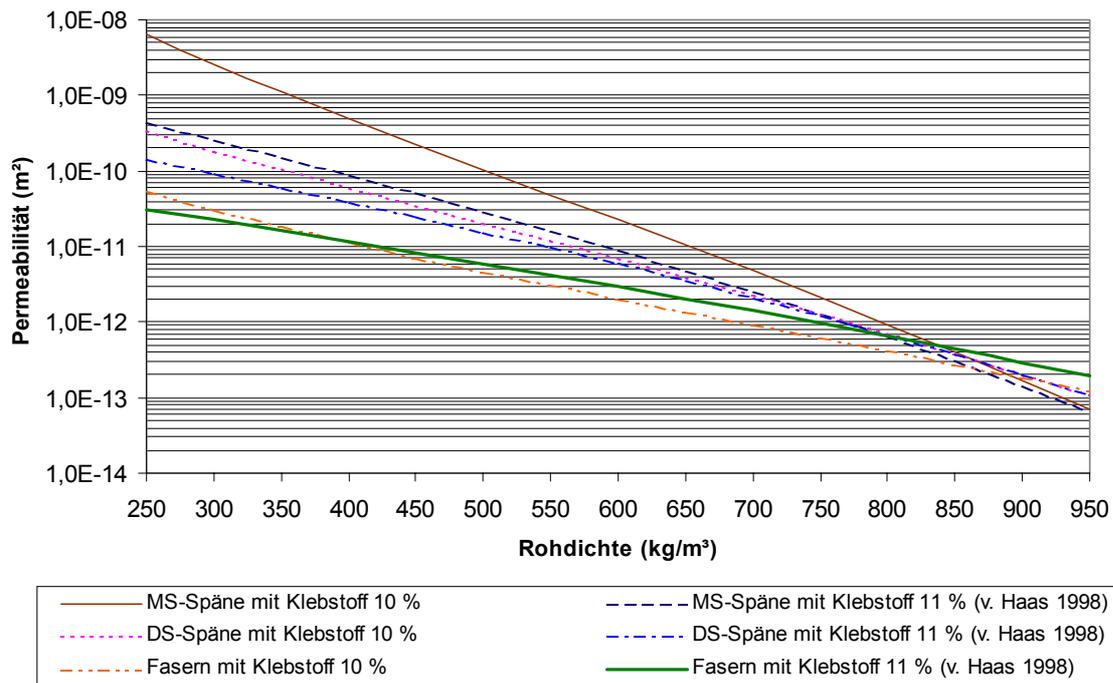


Abbildung 72: Vergleich der horizontalen Permeabilität von beleimten Matten aus DS, MS-Spänen und Fasern mit den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)

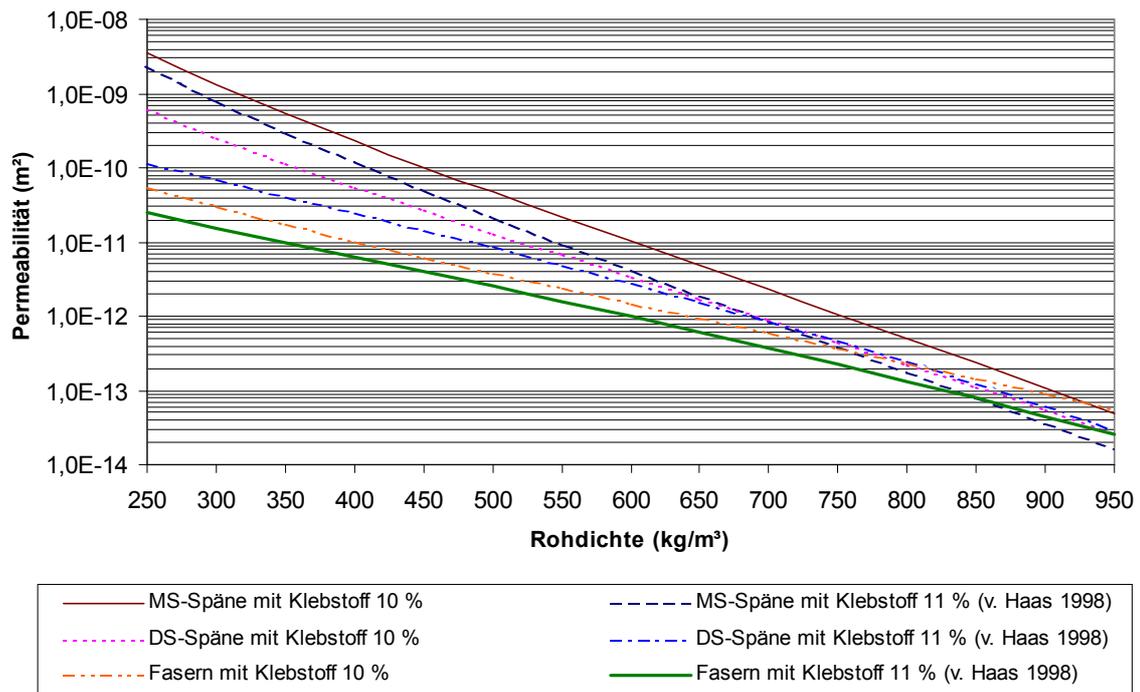


Abbildung 73: Vergleich der vertikalen Permeabilität von beleimten Matten aus DS, MS-Spänen und Fasern mit den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)

8.2. Messung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung II

8.2.1. Erster Messzyklus

Zur Bestimmung der horizontalen sowie der vertikalen Permeabilität mit der Messapparatur II wurden unbeleimte MS-, DS-Späne, Fasern und Strands (siehe Kapitel 6) verwendet. Der Probendurchmesser war so gewählt, dass sich bei einer durchschnittlichen Strandlänge von ca. 70 mm und ausreichender Überlappung einzelner Strands ein reproduzierbares und realitätsnahes Mattengefüge ergibt. Aus diesem Grund wurde ein Verdichtungszyylinder mit 250 mm Durchmesser gewählt. Da die hydraulische Prüfmaschine eine maximale Kraft von 150 kN leistet, konnte die Permeabilität der verschiedenen Materialien in einem Rohdichtebereich bis maximal 574 kg/m³ für DS-Späne, 524 kg/m³ für Fasern und MS-Spänen sowie 510 kg/m³ für Strands bestimmt werden. Diese Limits ergeben sich aus den Verdichtungswiderständen der Matte bei Raumtemperatur (20°C). Die minimale Rohdichte

wurde auf 200 kg/m^3 festgelegt, da die Menge der durchströmenden Luft nicht beliebig erhöht werden konnte.

Die Materialien wurden mit einer Ausgleichsfeuchte von 11,3–12,3 %, die sich im Klima 20/72 einstellt, eingewogen. Im Verlauf der Messung ergab sich aufgrund der trockeneren Druckluft eine Reduzierung der Feuchte in der Probe. Nach der Permeabilitätsmessung einer Probe erfolgte eine weitere Bestimmung der Materialfeuchte. Der Mittelwert zwischen der Ausgangs- und Endfeuchte wurde berechnet und zur Korrektur der Probenrohddichte herangezogen.

Mit Hilfe der in Abschnitt 7.2.4. beschriebenen Methode wurden die Permeabilitätswerte aus den gemessenen Durchfluss- und Druckbedingungen für Matten aus Fasern, DS- und MS-Spänen sowie Strands berechnet. Für jedes Material erfolgte die Bestimmung der Permeabilitätswerte an 3 Proben. Für eine Probe von Matten aus Fasern und DS-Spänen wurden zudem die Druckbedingungen bei drei verschiedenen Durchflussmengen gemessen und anschließend die Permeabilität berechnet. Bei der ersten Messung wurden die Permeabilitätswerte nach dem ersten (Abschnitt 7.2.4.1) und zweiten Modellansatz (Abschnitt 7.2.4.2) berechnet.

8.2.1.1. Berechnung der Permeabilität nach dem ersten Modellansatz

Aus den berechneten Permeabilitätswerten aller Materialien (3 Proben je Material) wurden die Mittelwerte gebildet. In Abbildung 74 ist die horizontale Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohddichte dargestellt. Insgesamt ergeben sich für die verschiedenen Materialien einheitliche Tendenzen, der horizontale Permeabilitätswert nimmt mit steigender Rohddichte ab. Im niedrigeren Rohddichtebereich zeigen sich bei der horizontalen Permeabilität größere Unterschiede zwischen den Materialarten als im höheren Rohddichtebereich. Insgesamt ergibt sich folgende Reihenfolge abnehmender Permeabilität: MS-Späne, Strands, DS-Späne und Fasern. Bei einer Rohddichte von 500 kg/m^3 sind die Matten aus Strands am undurchlässigsten.

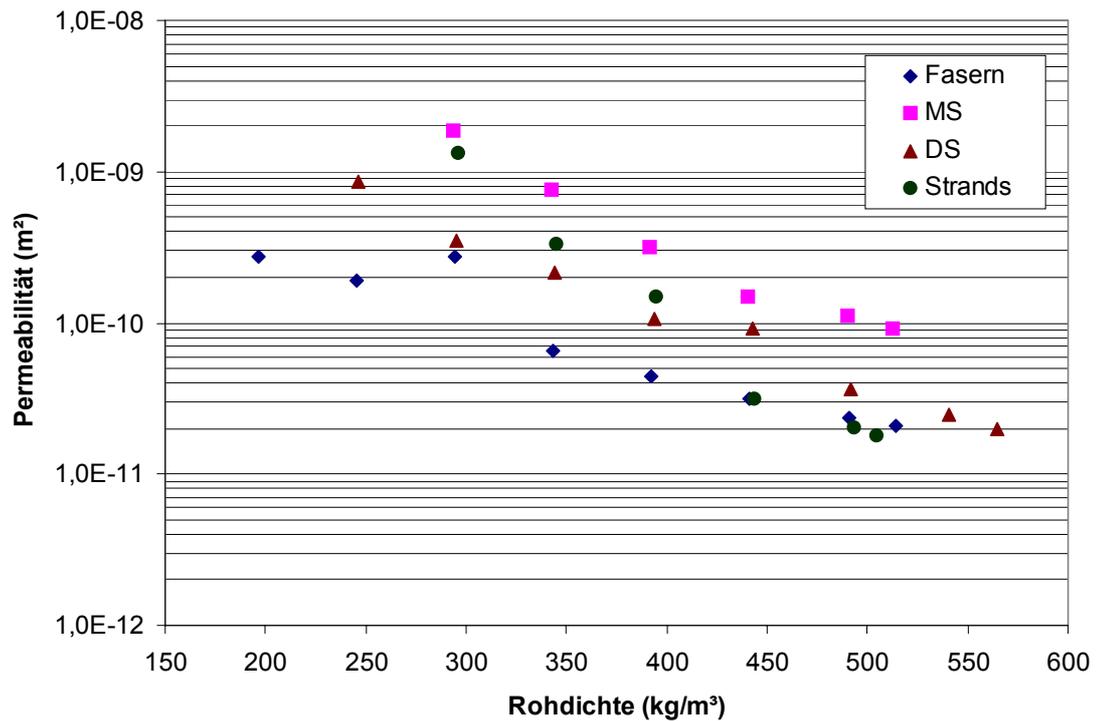


Abbildung 74: Horizontale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach dem ersten Modellansatz

Abbildung 75 stellt die vertikale Permeabilität verschiedener Materialien dar, die mit dem ersten Modellansatz berechnet wurden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse für die verschiedenen Materialien keine einheitliche Abhängigkeit von der Rohdichte. Es ergibt sich folgende Reihenfolge abnehmender vertikaler Permeabilität: MS-Späne, Strands, DS-Späne und Fasern. Dies entspricht auch der Reihenfolge bei der horizontalen Permeabilität.

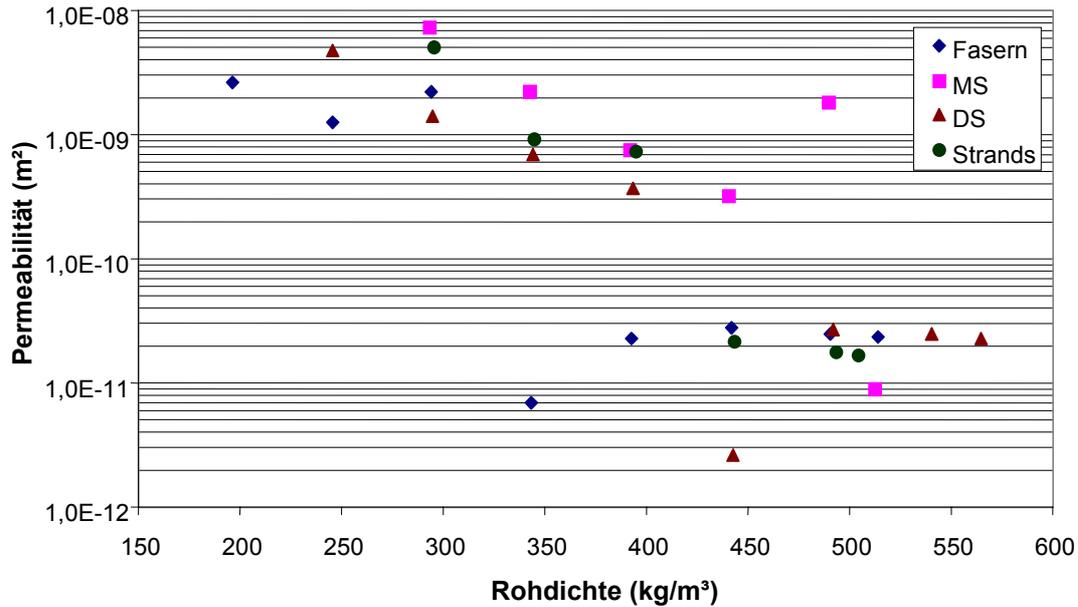


Abbildung 75: Vertikale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach erstem Modellansatz

8.2.1.2. Berechnung der Permeabilität nach dem zweiten Modellansatz

In Abbildung 76 ist die horizontale Permeabilität verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Rohdichte dargestellt. Die mit dem zweiten Modellansatz berechneten horizontalen Permeabilitätswerte entsprechen etwa den mit dem ersten Modellansatz berechneten Werten hinsichtlich der Abhängigkeit von der Rohdichte. Im niedrigen Rohdichtebereich zeigt auch hier die horizontale Permeabilität größere Unterschiede bei den verschiedenen Materialarten als im höheren Rohdichtebereich. Die horizontale Permeabilität der MS-Späne ist im ganzen Rohdichtebereich am höchsten, gefolgt von den Strands, DS-Spänen und Fasern. Auch hier sind die Matten aus Strands bei einer Rohdichte von 500 kg/m³ am undurchlässigsten.

Abbildung 77 zeigt die vertikale Permeabilität verschiedener Materialien, die mit dem zweiten Modellansatz berechnet wurden. Insgesamt zeigen die vertikalen Permeabilitätswerte verschiedener Materialien im Gegensatz zu der Berechnung nach dem ersten Modellansatz eine einheitlichere Tendenz in Abhängigkeit von der Rohdichte. Bei einer Rohdichte von 200 bis ca. 450 kg/m³ ergibt sich bezüglich abnehmender vertikaler Permeabilität folgende Reihenfolge: MS-Späne, DS-Späne und Fasern. Ab einer Rohdichte von 450 kg/m³ ist die vertikale Permeabilität der Fasern am höchsten, gefolgt von MS-Spänen und DS-Spänen. Die Matte der Strands ist ab einer Rohdichte von 300 kg/m³ am undurchlässigsten.

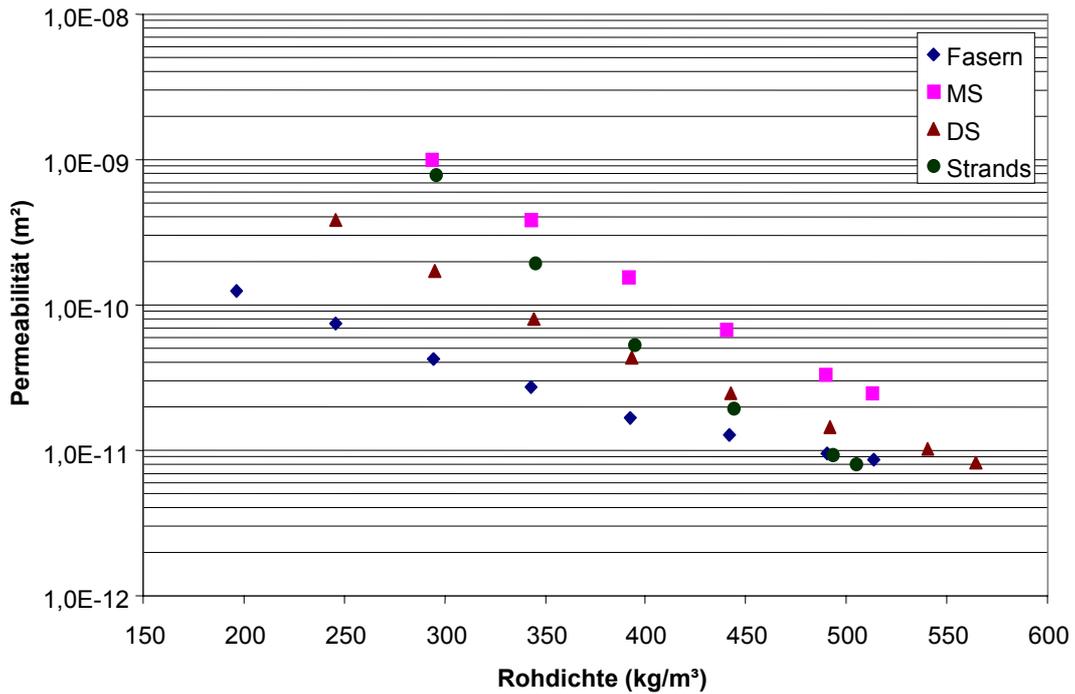


Abbildung 76: Horizontale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach dem zweiten Modellansatz

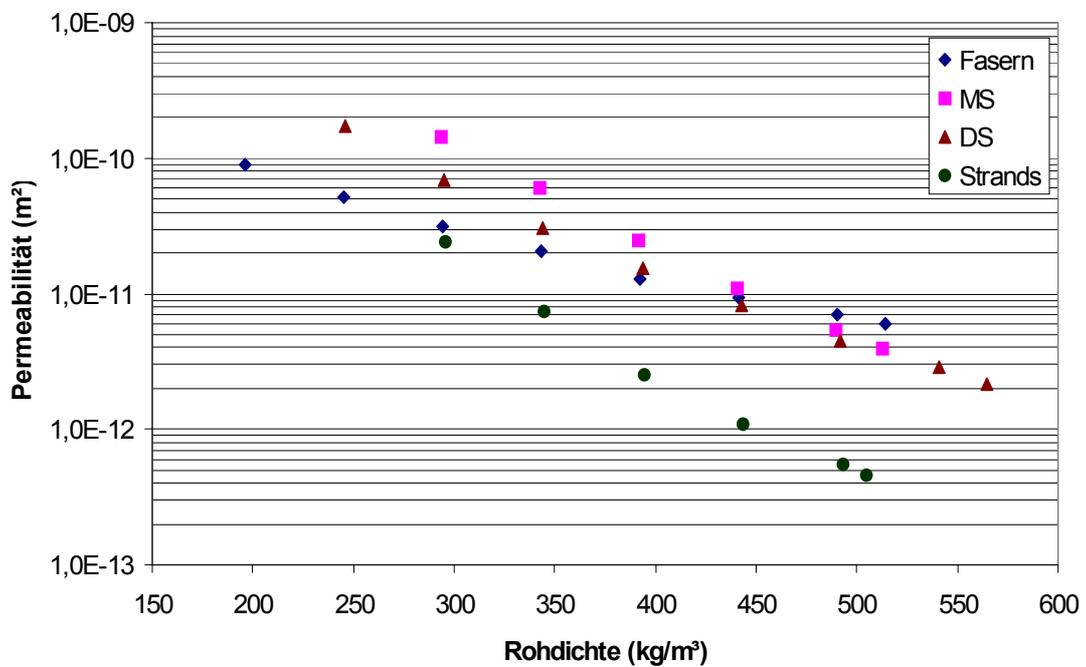


Abbildung 77: Vertikale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach dem zweiten Modellansatz

8.2.1.3. Vergleich der berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten und zweiten Modellansatz mit der gemessenen Permeabilität von Messvorrichtung I und der konventionellen Methode

Unbeleimte DS-, MS-Späne, Fasern und Strands wurden als Materialien zur Bestimmung der vertikalen und horizontalen Permeabilität mit Messvorrichtung II verwendet. Die Berechnung der Permeabilitätswerte erfolgte nach dem ersten und zweiten Modellansatz. Die Ergebnisse der berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten und zweiten Modellansatz werden mit den Ergebnissen der Permeabilität, die an Matten der unbeleimten DS-, MS-Späne und Fasern mit der Messvorrichtung I gemessen wurden, und mit der konventionellen Methode (v. Haas 1998) verglichen. Bei der konventionellen Methode wurden beleimte Platten mit gleichmäßigem Rohdichteprofil hergestellt. Die Proben wurden aus den Platten rund ausgesägt und am Rand mit Epoxidharz abgedichtet. Die vertikale und horizontale Permeabilität wurden getrennt bestimmt.

8.2.1.3.1. Permeabilität von Fasermatten

Mit zunehmender Rohdichte weisen die berechneten Permeabilitäten nach dem ersten und zweiten Modellansatz in vertikaler und horizontaler Richtung (Abbildung 78 bzw. Abbildung 79) abnehmende Tendenz auf. Insgesamt liegen die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz im Vergleich zu den mit der Messvorrichtung I und mit der konventionellen Methode erzielten Ergebnissen höher als die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz. Die Replikationen der berechneten Permeabilitätswerte aus beiden Modellansätzen zeigen eine gute Übereinstimmung. Als nicht logisch und derzeit nicht erklärbar sind die Werte in beiden Richtungen zu beurteilen, die nach dem ersten Modellansatz für die Rohdichten von ca. 300 kg/m^3 bzw. 350 kg/m^3 berechnet wurden. Die Tendenz der berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz in beiden Richtungen ist mit zunehmender Rohdichte kontinuierlich abnehmend. Die berechneten Permeabilitäten nach dem zweiten Modellansatz in beiden Richtungen sind geringfügig höher als die Permeabilitäten, gemessen mit Messvorrichtung I und konventioneller Methode.

Der Unterschied der nach beiden Modellansätzen berechneten Permeabilitätswerte von Fasermatten der Probe 1 in beiden Richtungen ergibt sich durch verschiedene Durchflussmengen. Die Permeabilität nimmt mit abnehmender Durchflussmenge geringfügig ab. Es ist ein Hinweis dafür, dass die Luft nicht vollkommen laminar in der Probe strömt.

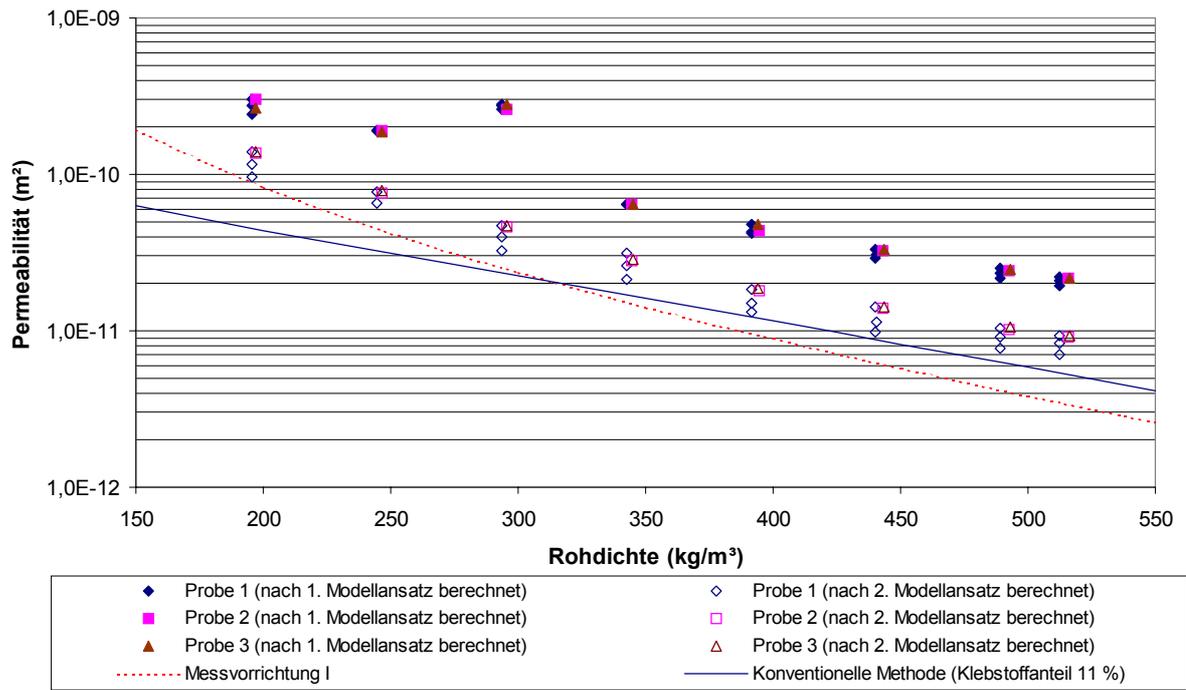


Abbildung 78: Vergleich der horizontalen Permeabilität der Fasermatten

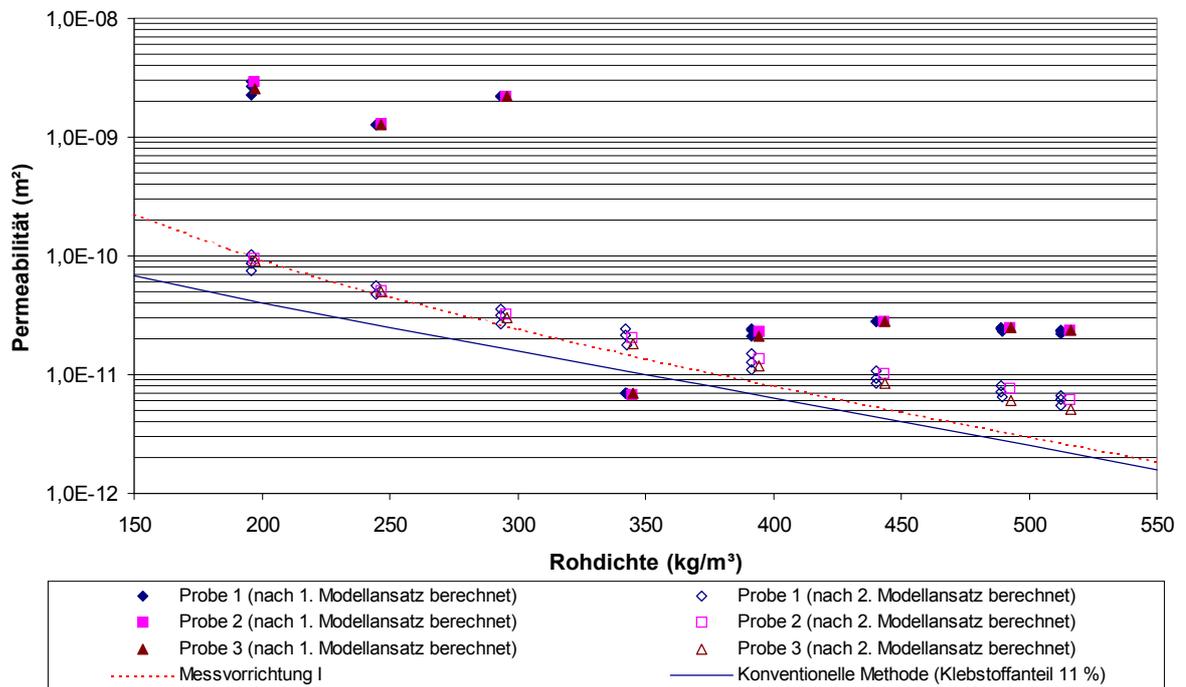


Abbildung 79: Vergleich der vertikalen Permeabilität der Fasermatten

8.2.1.3.1.1 Überprüfung der Gasdruckbedingungen an den Drucksensoren

Da der Unterschied der berechneten Permeabilitätswerte von Fasermatten nach dem ersten und zweiten Modellansatz relativ groß war, wurden die Druckbedingungen für eine Fasermatte in Abhängigkeit von der Mattenrohddichte überprüft, weil die Fasern eine homogene Geometrie aufweisen. Da sich mit steigender Rohddichte eine verringerte Permeabilität einstellt, nimmt auch der Gasdruck an den verschiedenen Aufnahmepositionen mit zunehmender Verdichtung bei gleichbleibender Durchflussmenge zu. Der Gasdruck an den verschiedenen Sensoren variiert in einer Fasermatte zwischen 21 mbar an P_6 (200 kg/m^3) und 1787 mbar an P_1 (524 kg/m^3) bei einer konstanten Durchflussmenge von $13 \text{ m}^3/\text{h}$ (Abbildung 80). Insgesamt nimmt der gemessene Gasdruck mit zunehmendem Abstand zur Mattenmitte in horizontaler Richtung ab. Zudem wird die Differenz zwischen den Aufnahmestellen in horizontaler Richtung zum Rand hin größer.

Trotz der vertikalen Zuführung der Luft stellen sich in dem betrachteten Rohddichtebereich, durch die geringen Differenzen zwischen P_1 und P_4 bzw. P_3 und P_6 ersichtlich, vertikal verlaufende Isobaren ein.

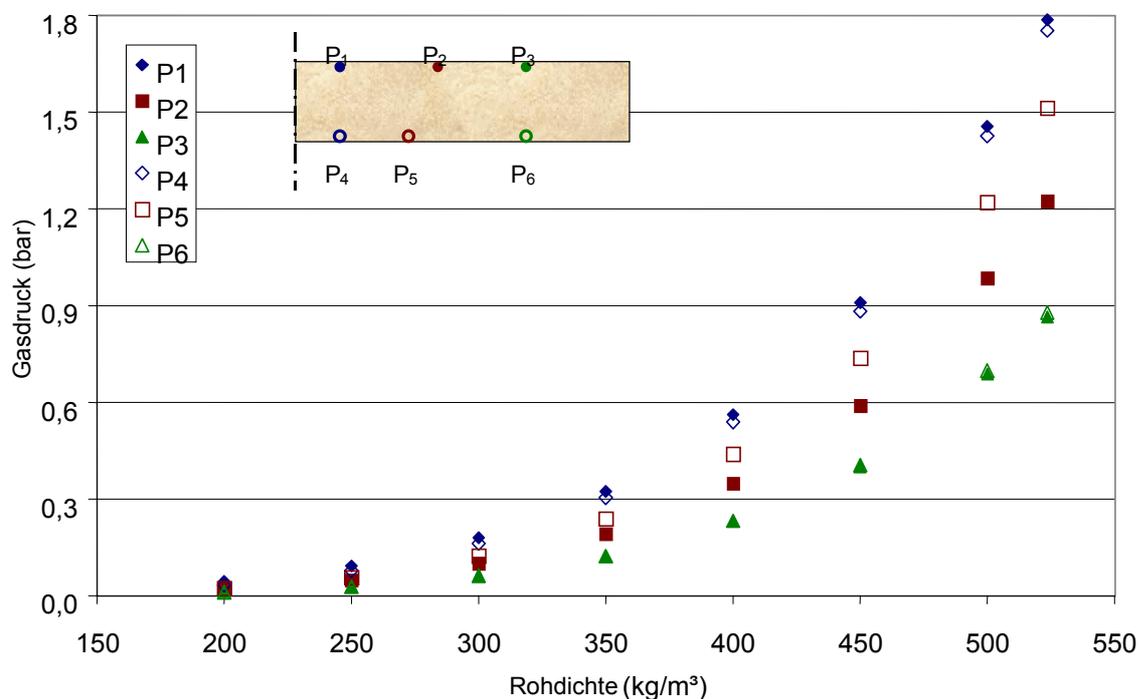


Abbildung 80: Druckbedingungen in einer Fasermatte in Abhängigkeit von der Rohddichte (Durchflussmenge $13 \text{ m}^3/\text{h}$; Skizze nicht maßstäblich)

Es wurde überprüft, ob die Luft in die Probe einströmt und der Druck vertikal isobar verläuft. Zur Überprüfung dieser Annahme wurde der Druck in der Probe einer Fasermatte gemessen. Außerdem wurde ein Drucksensor (P_{Mitte}) in der Mitte der Probe an der Position zwischen Drucksensor P_3 und P_6 angeordnet, um den Luftdruck in der Probe zu messen.

Abbildung 81 zeigt die Druckbedingungen in einer Fasermatte in Abhängigkeit von der Rohdichte bei zusätzlicher Messung des Druckes zwischen P_3 und P_6 (Durchflussmenge ca. $13 \text{ m}^3/\text{h}$). Dabei bestätigte sich, dass die Luft in die Probe einströmt und der Druck vertikal zwischen P_3 und P_6 isobar verläuft.

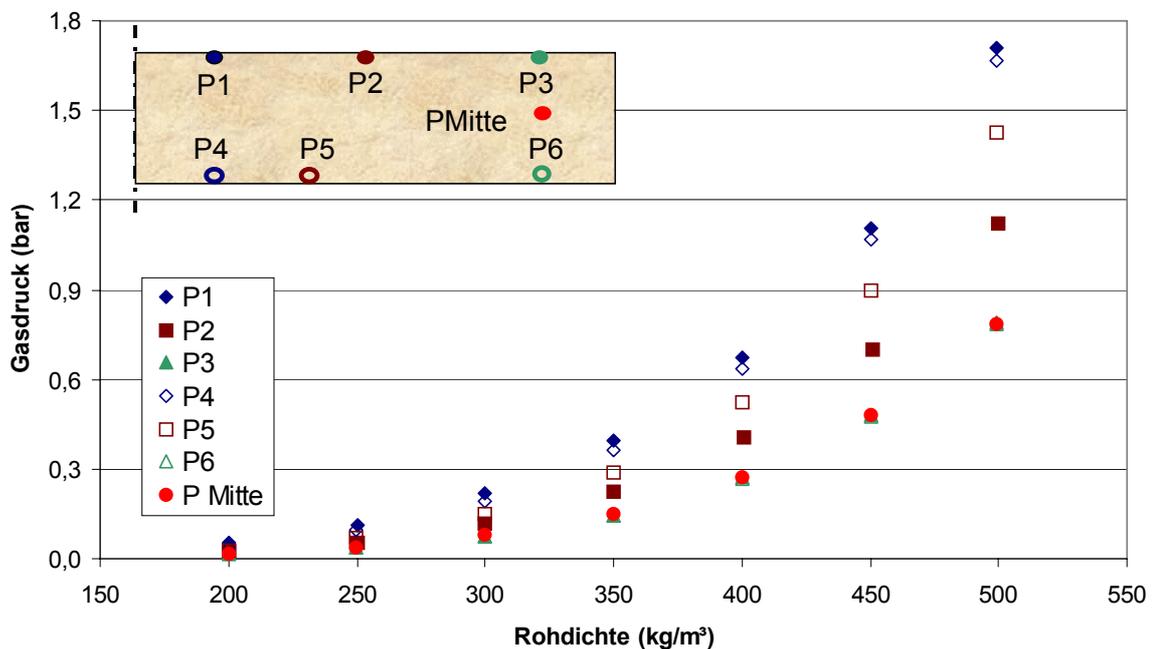


Abbildung 81: Druckbedingungen in einer Fasermatte in Abhängigkeit von der Rohdichte bei zusätzlicher Messung des Druckes in der Probe (Durchflussmenge $13 \text{ m}^3/\text{h}$; Skizze nicht maßstäblich)

Da sich anhand der Gasdruckmessungen im äußeren Mattenbereich quasi vertikale isobare Druckbedingungen zur Mattenoberfläche ergeben, ist eine Betrachtung zur Berechnung der eindimensionalen horizontalen Permeabilität möglich. Zur Überprüfung der berechneten Permeabilitätswerte nach beiden Modellansätzen wurde auf Grundlage der Messwerte an den Sensoren P_3 und P_6 die Permeabilität in horizontaler Richtung der Fasermatte an 3 Proben bestimmt (Abbildung 82). Die Berechnung der Permeabilität erfolgte mittels der Gleichung (12) für einen Kreisabschnitt nach Siau (1984). Der Differenzdruck ergibt sich aus dem Mittelwert von P_3 (Matteneroberseite) und P_6 (Mattenunterseite) sowie dem Luftdruck zum Zeitpunkt der Messung.

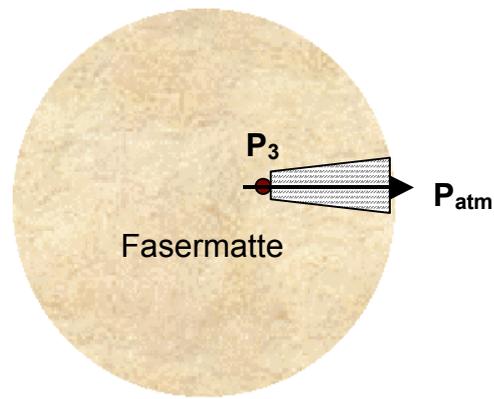


Abbildung 82: Skizze zur Verdeutlichung der Permeabilitätsbestimmung mittels Druck und Durchflussbedingungen (Pfeil zeigt die Durchströmungsrichtung der Druckluft)

Diese Ergebnisse werden mit Messergebnissen verglichen, die nach beiden Modellansätzen berechnet und mit der konventionellen Methode bzw. Messvorrichtung I ermittelt wurden. So stimmen diese Ergebnisse mit den Ergebnissen der berechneten Permeabilitätswerte nach zweitem Modellansatz überein. Daraus ergeben sich geringfügig höhere Permeabilitäten im Vergleich zu den Permeabilitäten, die mit der konventionellen Methode bzw. Messvorrichtung I ermittelt wurden (Abbildung 83). Jedoch liegen diese Permeabilitäten unter den Werten, die nach dem ersten Modellansatz berechnet wurden.

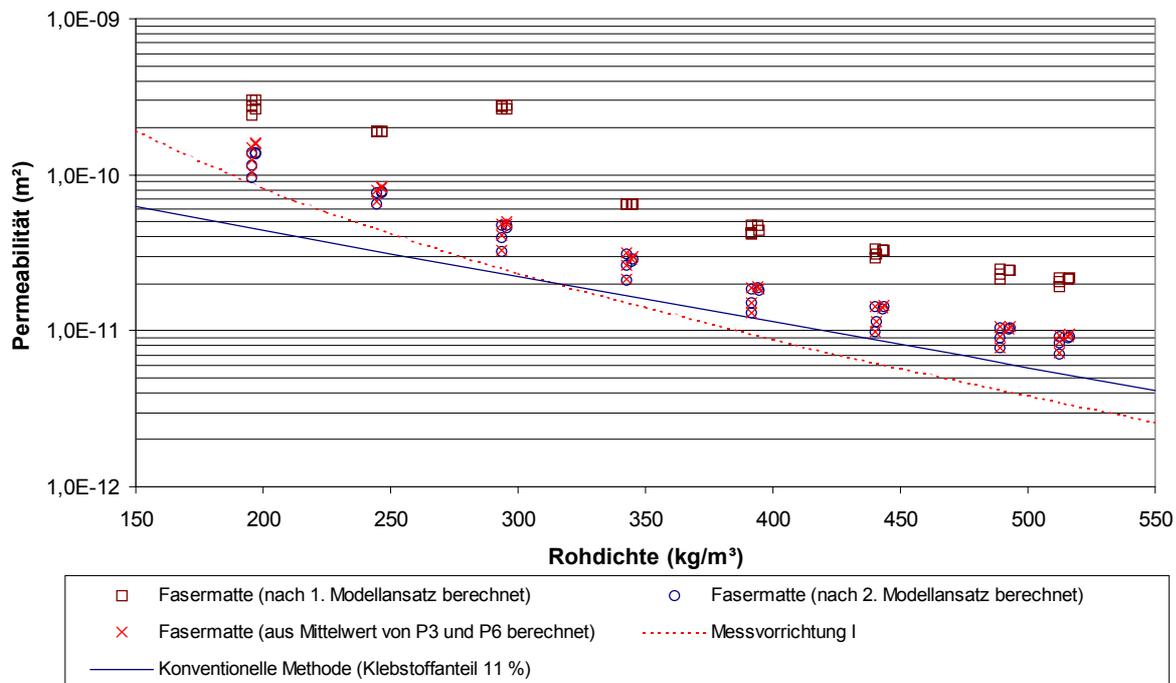


Abbildung 83: Vergleich der berechneten horizontalen Permeabilität von Fasermatten nach den beiden Modellansätzen mit dem aus Mittelwert von P_3 und P_6 berechneten Permeabilitätswert

Differenzen zwischen den aus dem Mittelwert von P_3 und P_6 berechneten Einzelmesswerten bei gleicher Rohdichte ergeben sich durch unterschiedliche Durchflussmengen. Im Darcy'schen Gesetz werden die Strömungsvolumina berücksichtigt und sollten daher keinen Einfluss auf den Werkstoffkennwert Permeabilität haben. Unterschiede sind jedoch auf die relativ hohen Durchflussmengen von 13 bis 22 m³/h (angebrachte Skala) zurückzuführen. Dieses wird auch durch die verringerte Variationsbreite bei Rohdichten über 500 kg/m³ erkennbar, bei der ein messbarer Gasdruck an allen Sensoren schon bei geringeren Strömungsvolumen bestimmt werden kann.

8.2.1.3.2. Permeabilität von Matten aus DS-Spänen

In Abbildung 84 und Abbildung 85 sind die berechneten horizontalen und vertikalen Permeabilitätswerte von Matten aus DS-Spänen nach beiden Modellansätzen im Vergleich mit den Permeabilitätswerten, die mit der konventionellen Methode bzw. Messvorrichtung I ermittelt wurden, dargestellt. In horizontaler Durchströmungsrichtung sind die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz als homogen zu bewerten. Allerdings liegen die Werte um das ca. 2,5-fache höher als die Werte, die mit der konventionellen Methode bzw. Messvorrichtung I ermittelt wurden. Die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz stimmen mit den Werten, die mit der konventionellen Methode bzw. Messvorrichtung I ermittelt wurden, überein.

In vertikaler Strömungsrichtung nimmt die berechnete Permeabilität nach dem ersten Modellansatz mit zunehmender Rohdichte nicht kontinuierlich ab. Die Werte, die für eine Rohdichte von ca. 450 kg/m³ (Abbildung 85) berechnet wurden, sind nicht logisch erklärbar. Dagegen nimmt die nach dem zweiten Modellansatz berechnete Permeabilität mit zunehmender Rohdichte kontinuierlich ab. Diese Werte liegen geringfügig niedriger im Vergleich zu den mit der Messvorrichtung I und mit der konventionellen Methode erzielten Ergebnissen.

Der Unterschied der nach den beiden Modellansätzen berechneten Permeabilitätswerte in beiden Richtungen von Matten aus DS-Spänen der Probe 3 ergibt sich wieder durch verschiedene Durchflussmengen.

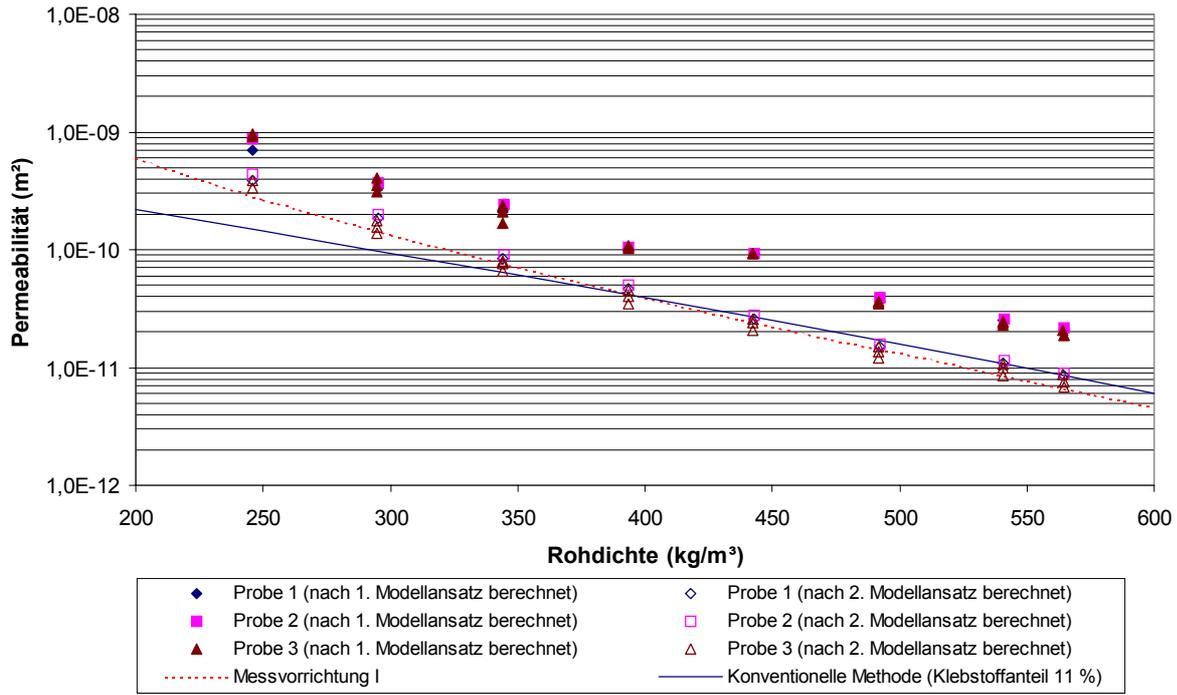


Abbildung 84: Vergleich der horizontalen Permeabilität von Matten aus DS-Spänen

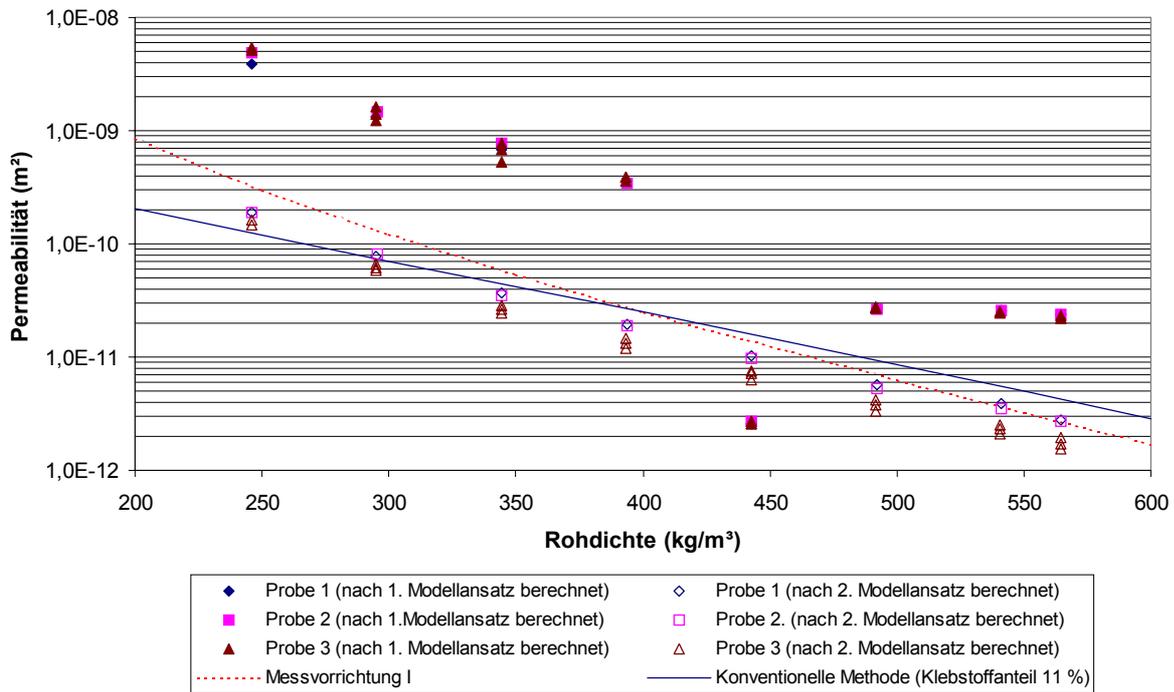


Abbildung 85: Vergleich der vertikalen Permeabilität von Matten aus DS-Spänen

8.2.1.3.3. Permeabilität von Matten aus MS-Spänen

Abbildung 86 und Abbildung 87 zeigen die berechneten horizontalen und vertikalen Permeabilitätswerte der MS-Späne nach beiden Modellansätzen im Vergleich zu den Ergebnissen, die mit Messvorrichtung I und der konventionellen Methode bestimmt wurden.

In horizontaler Richtung sind die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz geringfügig höher als die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz (Abbildung 86). Die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz stimmen besser mit den Ergebnissen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998) überein als die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz.

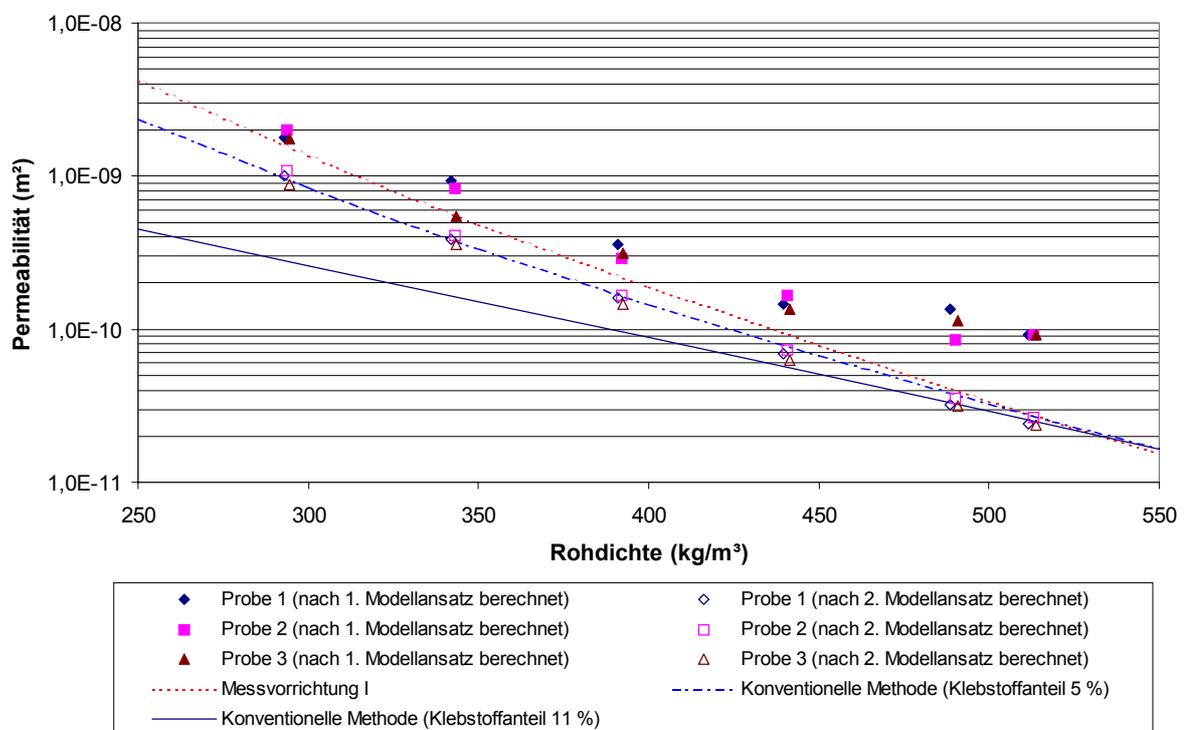


Abbildung 86: Vergleich der horizontalen Permeabilität von Matten aus MS-Spänen

In vertikaler Durchströmungsrichtung nehmen die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz mit zunehmender Rohdichte nicht kontinuierlich ab und liegen über den Ergebnissen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998). Die Werte, die für eine Rohdichte von ca. 500 kg/m³ ermittelt wurden, sind wiederum nicht logisch erklärbar (Abbildung 87). Dagegen nehmen die nach zweitem Modellansatz berechneten Permeabilitätswerte mit zunehmender Rohdichte kontinuierlich ab. Allerdings sind die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz niedriger als die Ergebnisse der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998). Die

Abweichung der nach dem zweiten Modellansatz berechneten vertikalen Permeabilitätswerte von Matten aus MS-Spänen ist zwischen den Ergebnissen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998) am höchsten im Vergleich zu den Ergebnissen der Matten aus DS-Spänen, Fasern und Strands.

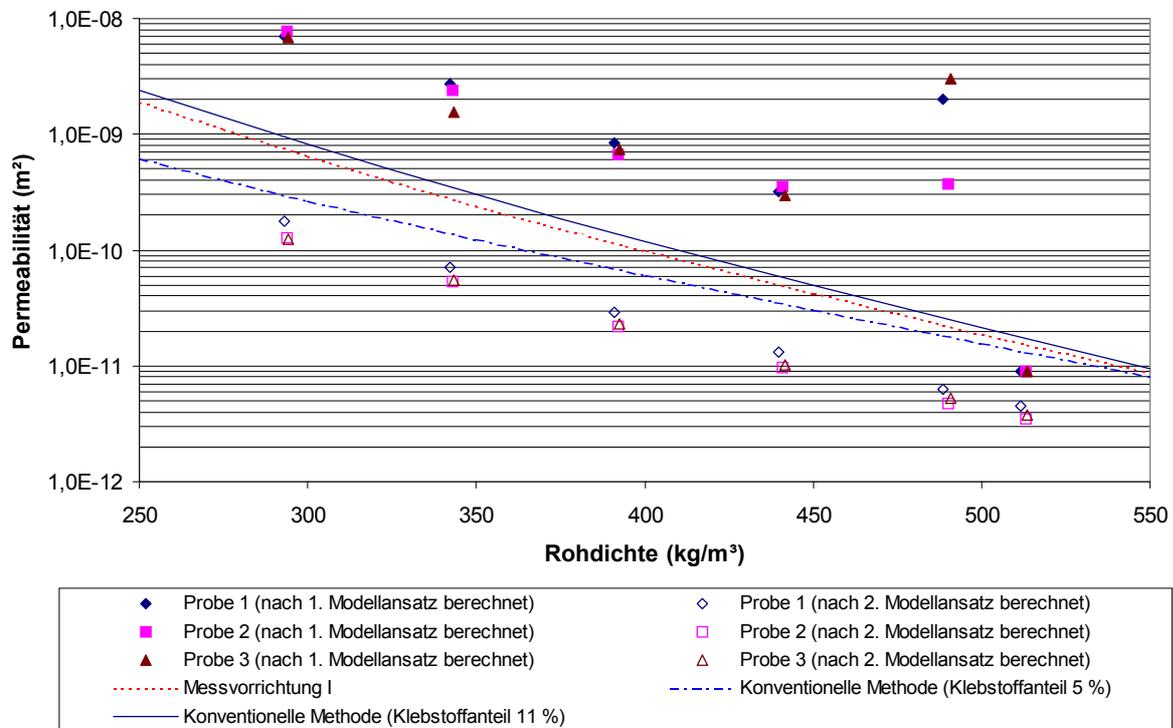


Abbildung 87: Vergleich der vertikalen Permeabilität von Matten aus MS-Spänen

8.2.1.3.4. Permeabilität von Matten aus Strands

Die Berechnung der Permeabilität von Matten aus Strands geschieht an Proben mit nicht ausgerichteten Strands. Eine Orientierung der Strands, wie es in der industriellen Praxis üblich ist, wäre bei runden Proben schwer reproduzierbar. Außerdem wäre die Berücksichtigung der Strandausrichtung hinsichtlich der Messtechnik und Berechnung erheblich aufwendiger.

Da die Messvorrichtung I nur einen Durchmesser von 40 mm hat, konnte die Permeabilität von Matten aus Strands nicht gemessen werden. Die mit Messvorrichtung II ermittelten berechneten Permeabilitätswerte von Matten aus Strands nach den beiden Modellansätzen wurden mit der gemessenen Permeabilität von Platten aus Strands mit einem Klebstoffanteil von 5 und 11 % mittels der konventionellen Methode (v. Haas 1998) verglichen.

Sehr gute und reproduzierbare Ergebnisse liefern die berechneten horizontalen Permeabilitäten von Matten aus Strands nach beiden Modellansätzen (Abbildung 88). Ein Vergleich mit der konventionellen Methode, die Ergebnisse für die zwei Hauptrichtungen liefert, zeigt, dass die berechneten Permeabilitätswerte nur unerheblich von diesen abweichen.

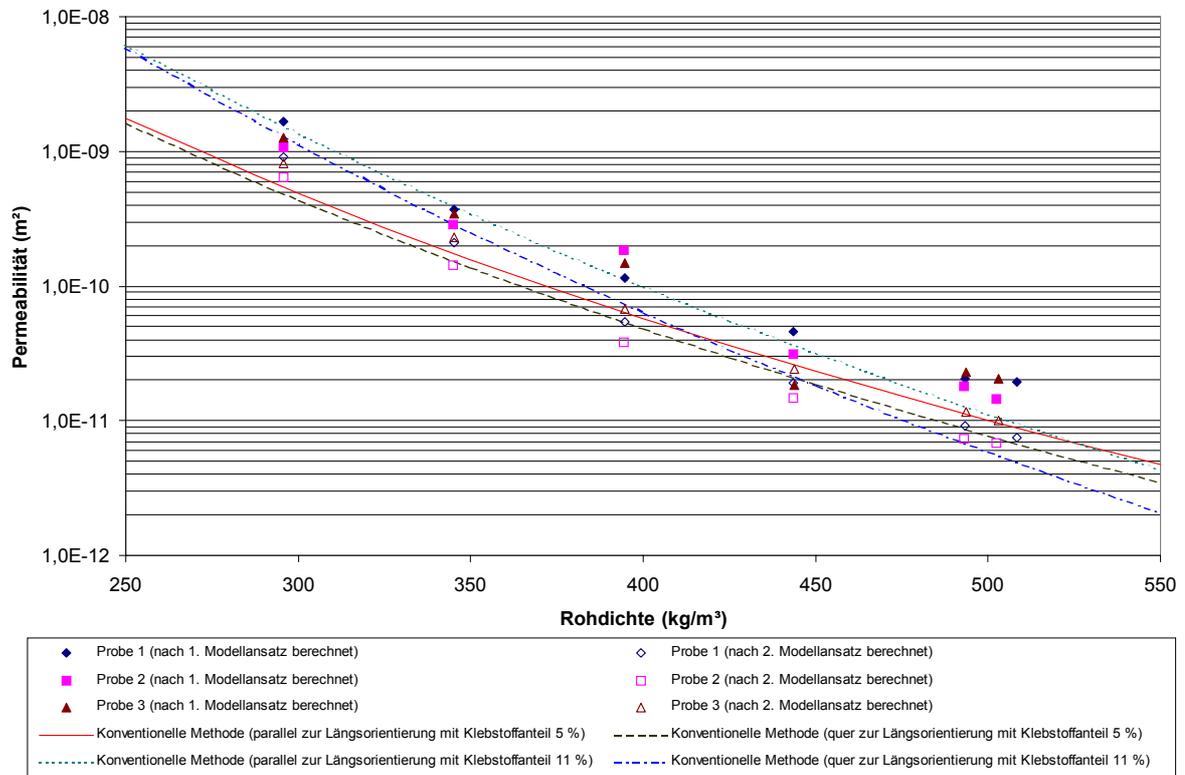


Abbildung 88: Vergleich der horizontalen Permeabilität von Matten aus Strands

Die berechneten vertikalen Permeabilitäten von Matten aus Strands nach dem ersten Modellansatz ergeben die höchsten Abweichungen von den Ergebnissen der konventionellen Methode im Vergleich zu den Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern (Abbildung 89). Die berechneten vertikalen Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz zeigen eine gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen der konventionellen Methode. Allerdings sind diese Permeabilitätswerte geringfügig niedriger als die Ergebnisse der konventionellen Methode.

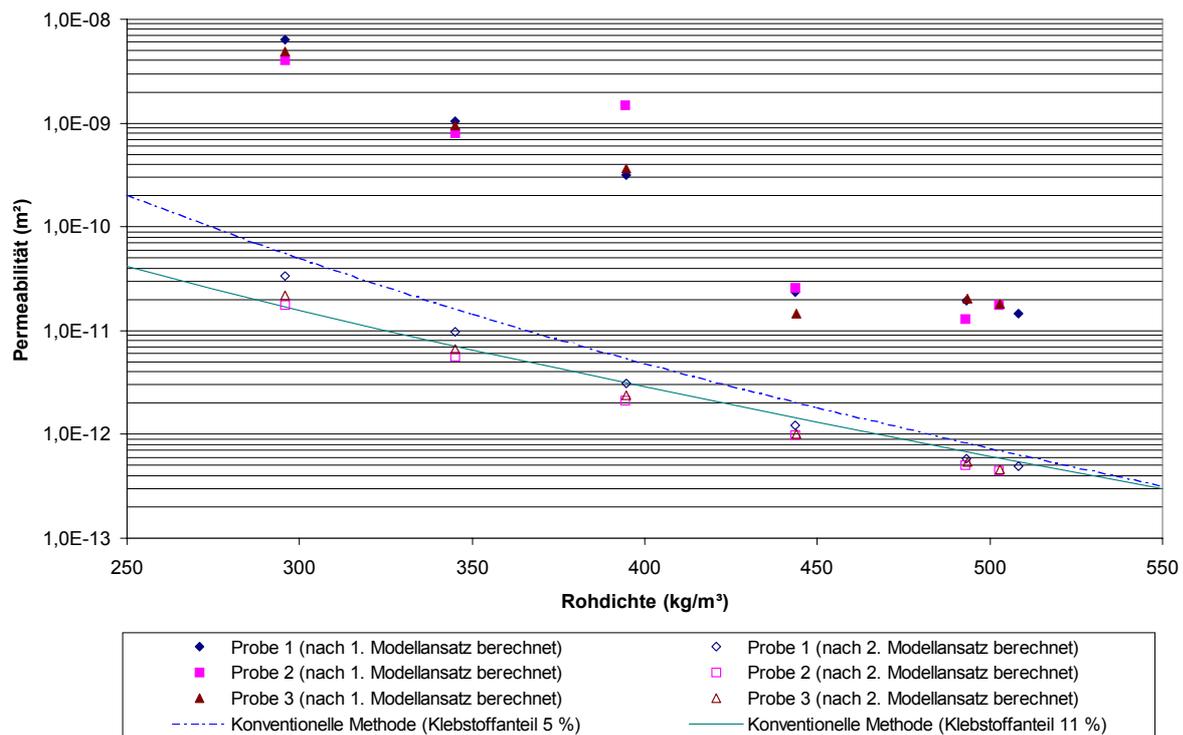


Abbildung 89: Vergleich der vertikalen Permeabilität von Matten aus Strands

8.2.2. Zweiter Messzyklus

Auf Grund der ermittelten Ergebnisse stand fest, dass die Kraft der Prüfmaschine von 150 kN zum Verdichten der Materialien auf eine Rohdichte von 800 kg/m³ bei einer Temperatur von 20 °C bei weitem nicht ausreicht. So wurde die Messvorrichtung II in eine Prüfmaschine, die für eine maximale Kraft von 250 kN ausgelegt ist, integriert und weitere Messreihen durchgeführt. Die Materialien wurden im Klima 20/75 konditioniert, um den Verdichtungswiderstand der Materialien zu reduzieren. Die Anfangsfeuchte der Materialien betrug 12,2 bis 13,9 %. Zu den Versuchen wurde die Maschine mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis zur maximalen Kraft gefahren. Um die höchsten Rohdichten bei der Leistung der Maschine von 250 kN zu erreichen, wurden die Materialien zweimal entlastet und wieder verdichtet. Beim zweiten und dritten Verdichten wurde die Maschine mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min bis zur maximalen Kraft gefahren, um die Permeabilität der Endrohichte bei der Kraft von 250 kN zu messen. Drei Replikationen wurden für jedes Material durchgeführt.

Die Permeabilität konnte bis zu den maximalen Rohdichten von 680 kg/m³ für DS-Späne, 627 kg/m³ für Fasern und 650 kg/m³ für MS-Späne und Strands bestimmt werden. Die Anfangs- und Endfeuchte wurde als Mittelwert berechnet, um die Rohdichte zu korrigieren. Die Berechnung der Permeabilität erfolgte nach dem zweiten Modellansatz.

In Abbildung 90 bis Abbildung 97 sind die Werte der nach dem zweiten Modellansatz berechneten horizontalen und vertikalen Permeabilitätswerte der unbeleimten Matten aus Fasern, DS-, MS-Spänen und Strands beider Messreihen dargestellt.

Da die Ergebnisse der beiden Messreihen gut übereinstimmen, wurde die klassische Regressionsanalyse zur Ermittlung der Permeabilitätskoeffizienten von allen Proben bei den beiden Messungen angewendet (siehe Abschnitt 8.1). Die Koeffizienten der horizontalen und vertikalen Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte für Gleichung 51, die mit der Messvorrichtung II bestimmt wurde, finden sich in Tabelle 7 und Tabelle 8.

Tabelle 7: Koeffizienten zur Berechnung der horizontalen Permeabilität der unbeleimten Fasern, DS-, MS-Späne und Strands in Abhängigkeit von der Rohdichte bei einer Feuchte von 11,3 bis 13,9 % (Messvorrichtung II)

Material	a	b	c	R ²
Fasern	-0,0153	7,869E-07	-0,1523	0,98
DS-Späne	0,0185	-4,368E-06	-0,3511	0,99
MS-Späne	0,063	-1,084E-05	-0,6153	0,99
Strands	0,145	-3,242E-05	0,1451	0,98

Tabelle 8: Koeffizienten zur Berechnung der vertikalen Permeabilität der unbeleimten Fasern, DS-, MS-Späne und Strands in Abhängigkeit von der Rohdichte bei einer Feuchte von 11,3 bis 13,9 % (Messvorrichtung II)

Material	a	b	c	R ²
Fasern	-0,0239	4,609E-06	-0,1067	0,99
DS-Späne	0,016	-2,184E-06	-0,3301	0,99
MS-Späne	0,0395	-6,54E-06	-0,4651	0,99
Strands	0,0785	-1,891E-05	-0,6508	0,96

Da die Regressionskurven eine gute Korrelation liefern, wird die Gleichung 51 mit drei Koeffizienten aus der Regressionsanalyse zur Beschreibung der horizontalen und vertikalen Permeabilität, die mit der Messvorrichtung II bestimmt wurde, in Abhängigkeit von der Rohdichte für alle unbeleimten Materialien verwendet. Diese Regressionskurven wurden wieder mit den Ergebnissen, die mit der Messvorrichtung I ermittelt wurden, verglichen.

8.2.2.1. Permeabilität von Fasermatten

Die Werte der horizontalen und vertikalen Permeabilität der Fasermatten der zweiten Messung mittels Messvorrichtung II (Abbildung 90 und Abbildung 92) stimmen gut mit der ersten Messung überein. Jedoch sind diese Permeabilitätswerte in beiden Richtungen geringfügig höher als die Permeabilitätswerte, die mit Messvorrichtung I bestimmt wurden. Dabei wird der Unterschied bei höheren Rohdichten größer.

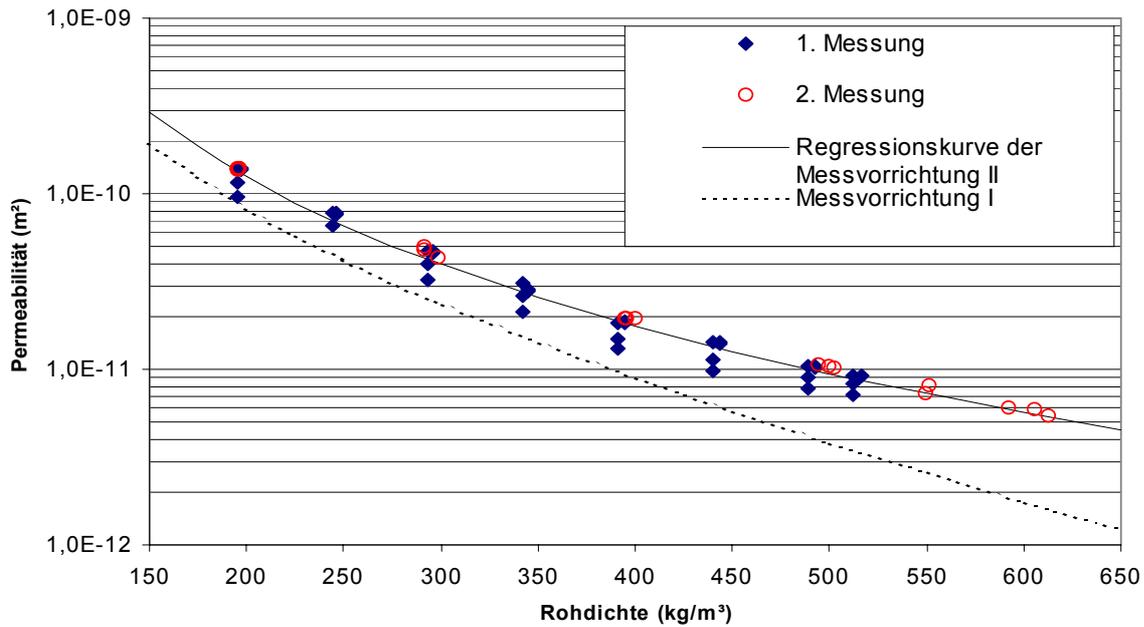


Abbildung 90: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Fasermatten bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I

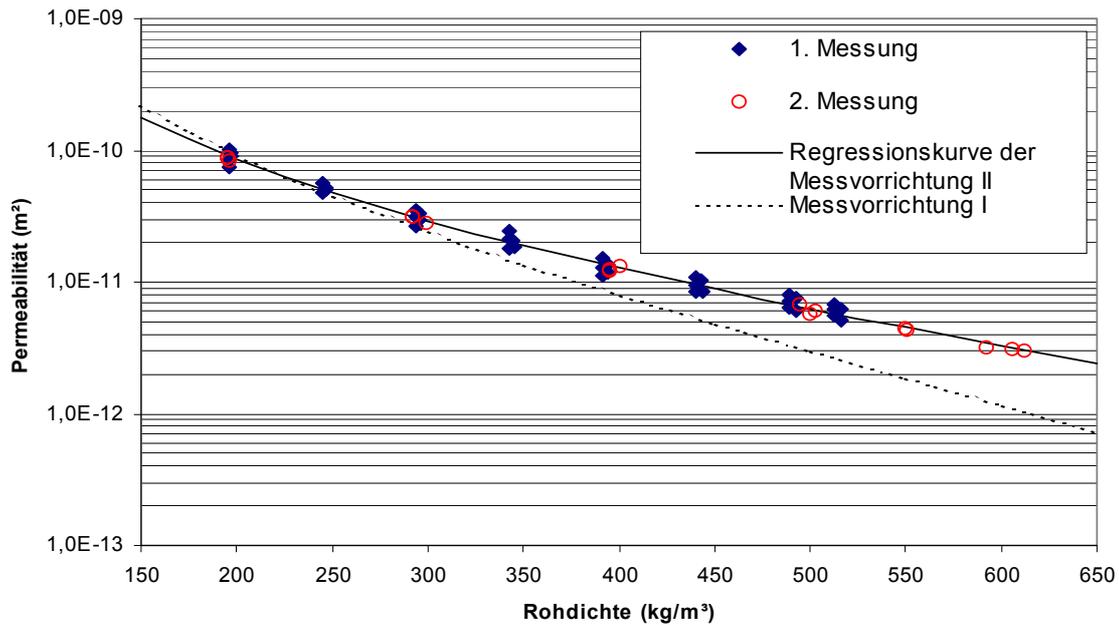


Abbildung 91: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Fasermatten bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I

8.2.2.2. Permeabilität von Matten aus DS-Spänen

Die Werte der horizontalen und vertikalen Permeabilität der Matte aus DS-Spänen der zweiten Messung mittels der Messvorrichtung II (Abbildung 92 und Abbildung 93) stimmen wieder gut mit der ersten Messung überein. Die mit der Messvorrichtung II ermittelten Permeabilitätswerte in beiden Richtungen stimmen auch mit der mit Messvorrichtung I bestimmten Permeabilität überein. Allerdings sind die mit Messvorrichtung II gemessenen Permeabilitätswerte in horizontaler Richtung geringfügig höher als die mit der Messvorrichtung I gemessene Permeabilität (Abbildung 92).

In vertikaler Richtung sind die berechneten Permeabilitätswerte, gemessen mit Messvorrichtung II, bei einer Rohdichte von ca. 250 bis 550 kg/m³ geringfügig niedriger als die mit der Messvorrichtung I gemessene Permeabilität (Abbildung 93).

Wiederum weist die Permeabilität, die mit Messvorrichtung II ermittelt wurde, bei höherer Rohdichte einen größeren Unterschied im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I auf. Zudem sind die Ergebnisse der Permeabilität in beiden Richtungen, die mit der Messvorrichtung II gemessen wurden, höher als die Permeabilität, die mit der Messvorrichtung I gemessen wurde.

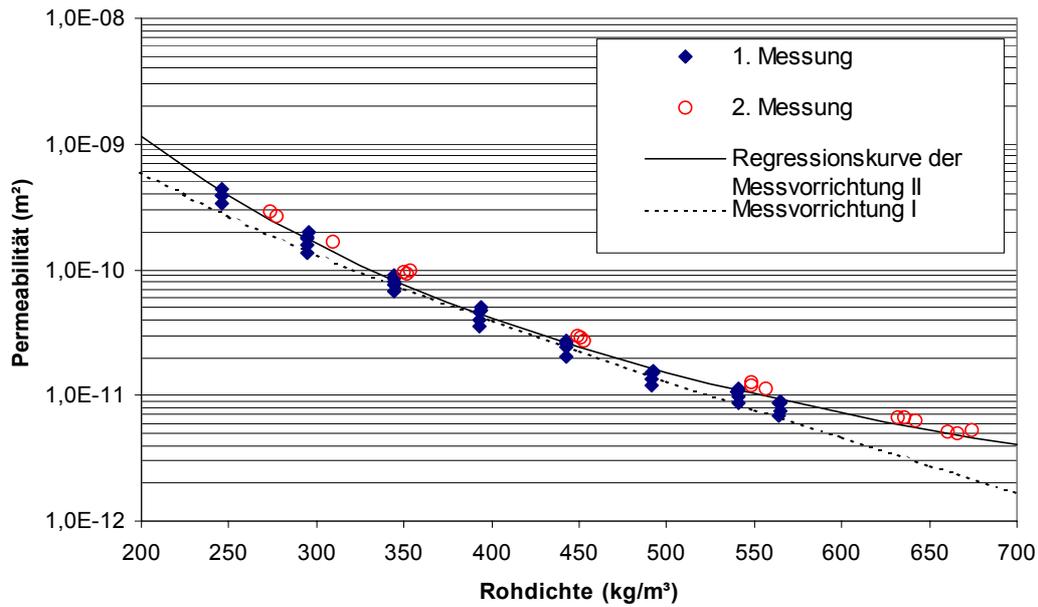


Abbildung 92: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I

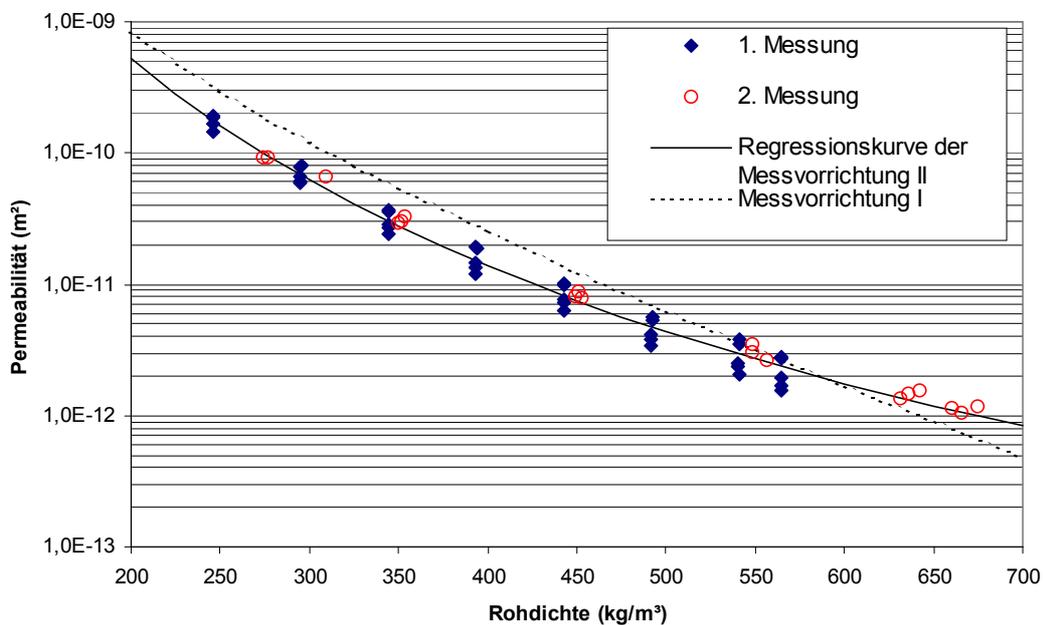


Abbildung 93: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I

8.2.2.3. Permeabilität von Matten aus MS-Spänen

Die Permeabilitätswerte von Matten aus MS-Spänen der zweiten Messung weichen geringfügig von der ersten Messung ab. Die geringfügige Abweichung der Permeabilität ist möglicherweise auf das nicht homogene Material zurückzuführen (Abbildung 94 bzw. Abbildung 95).

In horizontaler Richtung stimmen die mit Messvorrichtung II gemessenen Permeabilitäten bei einer Rohdichte von ca. 300 bis 500 kg/m³ mit den Ergebnissen der Messvorrichtung I überein (Abbildung 94). Ab einer Rohdichte von 500 kg/m³ sind die mit Messvorrichtung II gemessenen Permeabilitäten wiederum höher als die mit Messvorrichtung I gemessenen Permeabilitäten.

Die Permeabilität in vertikaler Richtung weist einen großen Unterschied zwischen den Werten, die mit der Messvorrichtung II und Messvorrichtung I gemessen wurden, auf (Abbildung 95). Die mit der Messvorrichtung II gemessene Permeabilität in dieser Richtung bei einer Rohdichte von ca. 300 kg/m³ ist ca. 4-fache niedriger als die mit der Messvorrichtung I gemessene Permeabilität. Mit zunehmender Rohdichte wird der Unterschied geringer.

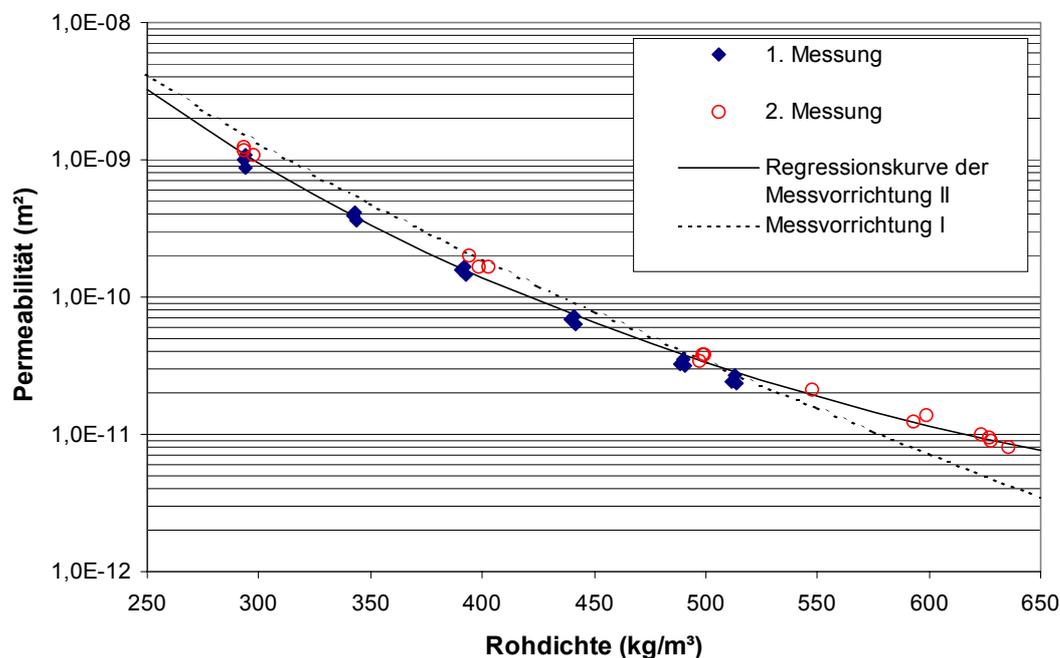


Abbildung 94: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I

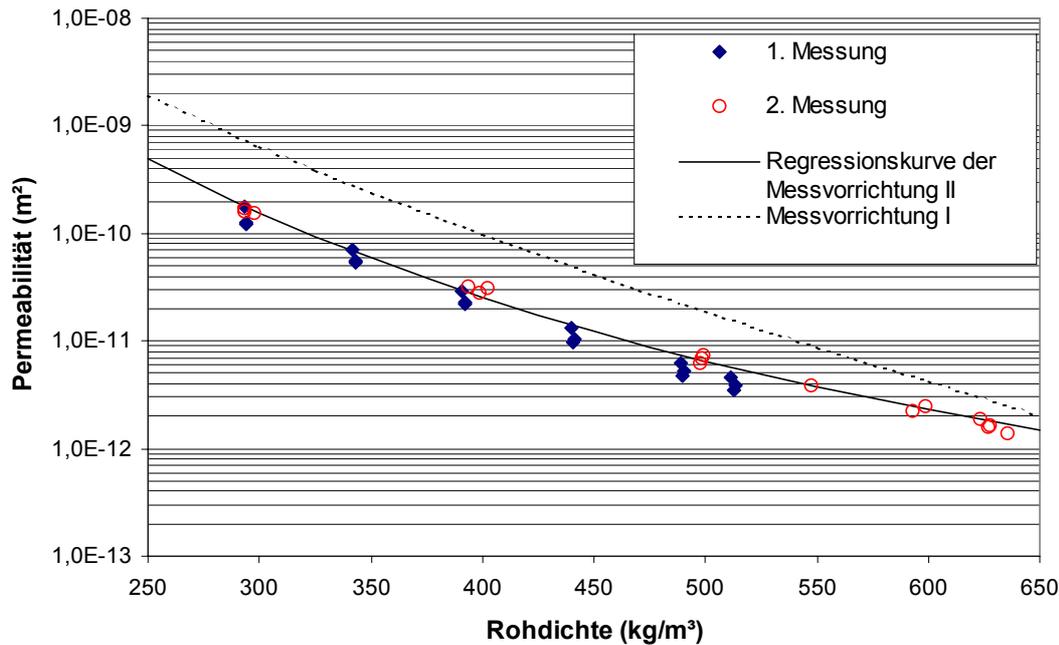


Abbildung 95: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I

8.2.2.4. Permeabilität von Matten aus Strands

Da die Messvorrichtung I nur einen Durchmesser von 40 mm hat, konnte die Permeabilität von Matten aus Strands nicht gemessen werden. Die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz von Matten aus Strands, die mit Messvorrichtung II ermittelt wurden, wurden mit der gemessenen Permeabilität von Platten aus Strands mit einem Klebstoffanteil von 5 und 11 % mittels der konventionellen Methode (v. Haas 1998) verglichen.

Die Abweichung der Permeabilität aus der zweiten zur ersten Messung ist größer als die Abweichung bei MS-Spänen (Abbildung 96 bzw. Abbildung 97). Möglicherweise ist diese Abweichung bei den Matten aus Strands nicht nur auf das heterogene Material, sondern auch auf die Druckbedingungen am Druckaufnehmer zurückzuführen, der durch die großflächigen Strands isoliert wird oder auch günstig in einem "Strömungskanal" liegen kann.

Die Permeabilitätswerte in beiden Richtungen, die mit Messvorrichtung II ermittelt wurden, stimmen mit den Ergebnissen der konventionellen Methode überein. Allerdings sind diese

Permeabilitätswerte in beiden Richtungen bei einer Rohdichte ab ca. 550 kg/m³ geringfügig höher als bei der konventionellen Methode.

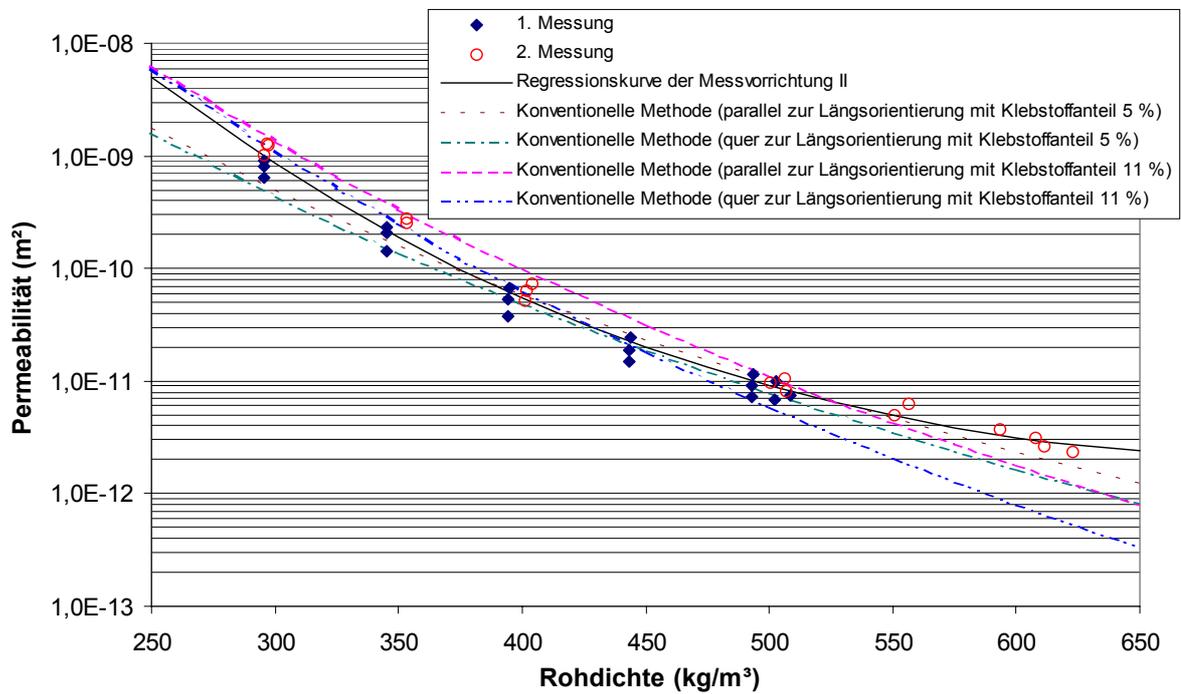


Abbildung 96: Horizontale Permeabilität von Matten aus Strands bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)

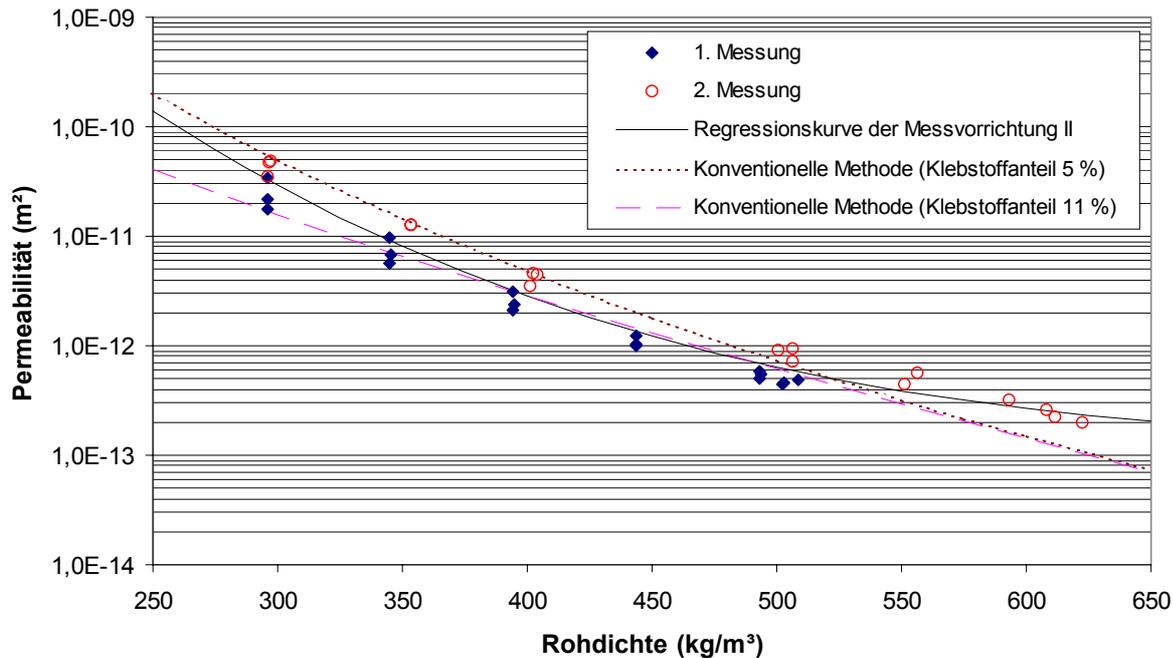


Abbildung 97: Vertikale Permeabilität von Matten aus Strands bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)

8.2.3. Permeabilität von Matten aller Materialien

Die Kapazität der verfügbaren Prüfmaschine (250 kN) reicht bei einer Temperatur von 20 °C zum Verdichten der Materialien zu einer Rohdichte von 800 kg/m³ nicht aus. Die Permeabilität konnte bis maximal 680 kg/m³ für DS-Späne, 627 kg/m³ für Fasern und 650 kg/m³ für MS-Späne und Strands bestimmt werden. In diesem Rohdichtebereich kann die Permeabilität der Spanplatte, Leicht-MDF und OSB beschrieben werden, da die Rohdichte bei der Produktion für die normale Spanplatte und OSB ca. 600 bis 700 kg/m³ beträgt und für Leicht-MDF unter 650 kg/m³ liegt. Für HDF-Platten (MDF mit einer Rohdichte von ≥ 800 kg/m³) ist die Rohdichte zu niedrig, um die Permeabilität in beiden Richtungen zu beschreiben.

Zur Beschreibung der Permeabilität in beiden Richtungen bis zu einer Rohdichte von 800 kg/m³ wurden die berechnete Permeabilitätswerte nach Gleichung 51 mit den angewendeten Koeffizienten, die von den berechneten Permeabilitätswerten nach dem zweiten Modellansatz mittels Regressionsverfahren bestimmt wurden, in Tabelle 7 und Tabelle 8 extrapoliert. Da die Bestimmtheitsmaße der Regressionen hoch sind und eine sehr gute Anpassung der Regressionkurven möglich ist, kann die Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte außerhalb des gemessenen Rohdichtebereichs erklärt werden.

Abbildung 98 zeigt die horizontale Permeabilität aller Mattenarten in Abhängigkeit von der Rohdichte. Mit zunehmender Rohdichte nimmt die Permeabilität ab. Ein Vergleich im Bereich niedriger Rohdichte ergibt größere Unterschiede zwischen den Materialarten als im Bereich höherer Rohdichte. Insgesamt ist die Permeabilität von Matten aus MS-Spänen am höchsten, gefolgt von den Matten aus DS-Spänen und Fasern. Bei niedriger Rohdichte ist der Wert von Matten aus Strands fast gleich groß wie die Permeabilität der Matte aus MS-Spänen. Mit steigender Rohdichte nimmt die Permeabilität der Matte aus Strands stark ab. Ab einer Rohdichte von ca. 500 kg/m³ zeigen die Werte von Matten aus Strands die niedrigste Permeabilität.

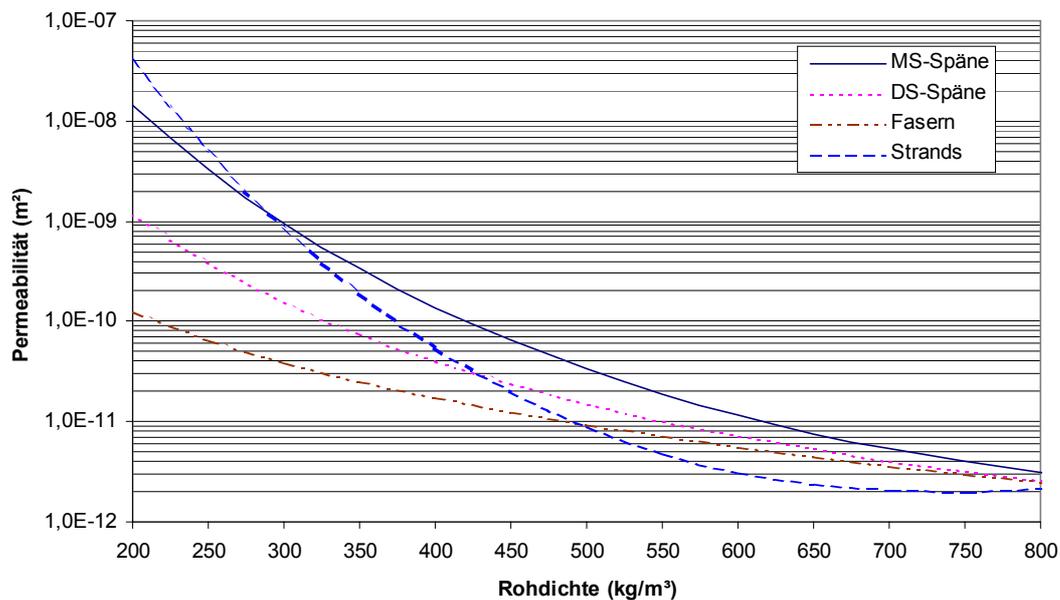


Abbildung 98: Horizontale Permeabilität verschiedener Materialien, die mit der Messvorrichtung II gemessen wurden

In Abbildung 99 ist die vertikale Permeabilität aller Materialien in Abhängigkeit von der Rohdichte dargestellt. Bei einer Rohdichte im Bereich von 200 bis ca. 450 kg/m³ ist die Permeabilität von Matten aus MS-Spänen am höchsten, gefolgt von der Matte aus DS-Spänen und Fasern. Ab einer Rohdichte von ca. 450 kg/m³ ändert sich die Permeabilität der Matte aus MS-, DS-Spänen und Fasern dahingehend, dass die Permeabilität von Matten aus Fasern am höchsten ist, gefolgt von MS- und DS-Spänen. Insgesamt ist die Permeabilität von Matten aus Strands ab einer Rohdichte von ca. 300 kg/m³ am niedrigsten.

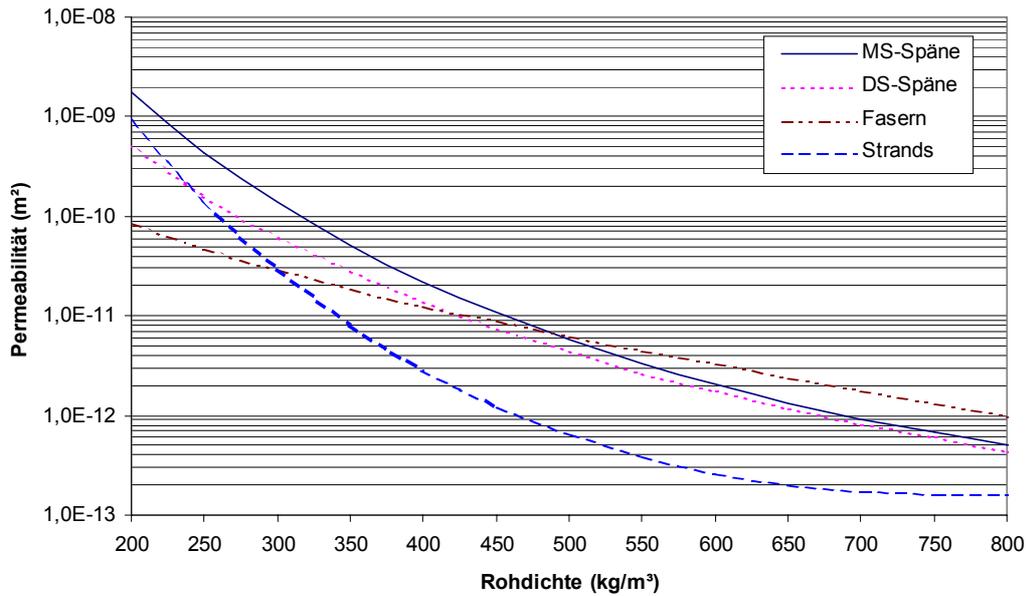


Abbildung 99: Vertikale Permeabilität verschiedener Materialien, die mit der Messvorrichtung II gemessen wurde

8.2.4. Einfluss der Strömungsrichtung und Verhältnisse der Permeabilität

Abbildung 100 zeigt das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität von unbeleimten Matten aller Materialarten. Insgesamt ist die Permeabilität aller Materialien in horizontaler Richtung über den gesamten Rohdichtebereich höher als in vertikaler Richtung. Bei niedriger Rohdichte ist der Permeabilitätsunterschied zwischen den beiden Richtungen für Matten aus DS-Spänen und Fasern geringer als bei höherer Rohdichte. Er nimmt mit zunehmender Rohdichte zu. Mit diesen Erkenntnissen werden die Ergebnisse von Messvorrichtung I und konventioneller Methode (v. Haas 1998) bestätigt.

Für Matten aus MS-Spänen und Strands bleibt das Verhältnis der Permeabilität beider Richtungen über den gesamten Rohdichtebereich relativ konstant.

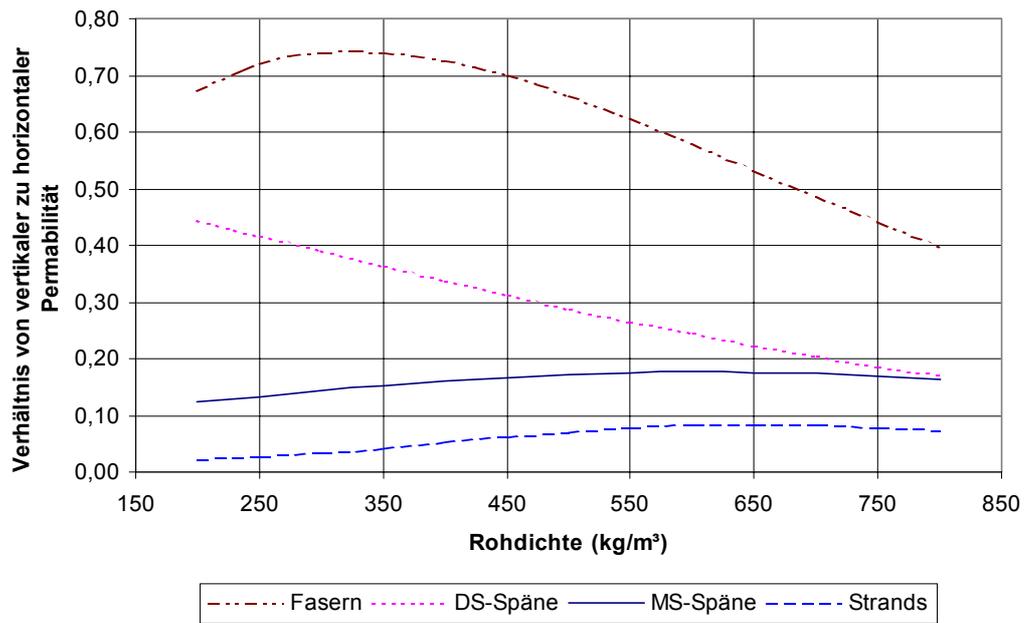


Abbildung 100: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Rohdichte (Messvorrichtung II)

9. Diskussion

9.1. Bestimmung der Permeabilität mit Messvorrichtung I

Spanform und -geometrie (DS-, MS-Späne und Fasern), Feuchtigkeit des Materials, Klebstoffanteil, Spanfraktionen der MS-Späne, Stömungsrichtung und Temperatur des Mediums beeinflussen die Permeabilität. Zur Bestimmung der Permeabilität mit Messvorrichtung I wurden die beschriebenen Einflussfaktoren ermittelt.

Bei der Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung I bei niedriger Rohdichte treten eine hohe Durchflussmenge und eine niedrige Druckdifferenz auf. Durch die Verdichtung ändert sich der Widerstand der Probe, so dass bei hoher Rohdichte eine niedrige Durchflussmenge und eine hohe Druckdifferenz auftritt. Während der Permeabilitätsmessung sind die verwendeten Differenzdruckaufnehmer (0,01, 0,1 und 1 bar) bzw. die verwendeten Schwebekörpermessgeräte (0 - 12 l/h und 0 – 140 l/h) auszutauschen, um eine ausreichende Messgenauigkeit zu erreichen. Obwohl ein Zeitverlust durch das Austauschen der Messgeräte erfolgt, ist dieser Zeitverlust durch die wesentlich kürzere Prüfzeit der eindimensionalen Messung der Permeabilität gegenüber früheren Messmethoden mehr als kompensiert. Die Prüfzeit der Permeabilitätsmessung mit der Messvorrichtung I bei einer Rohdichte von 250 bis 950 kg/m³, jeweils bei vier verschiedenen Durchflussmengen in einer Richtung ermittelt, beträgt ca. 1,5 Std. Bei der konventionellen Methode liegt der Zeitbedarf zur Herstellung der Platten und der Permeabilitätsmessung einer Rohdichte wenigsten bei 5 Std. Die Ergebnisse der Messvorrichtung I stimmen gut mit den Ergebnissen der konventionellen Methode überein. Größere Unterschiede zwischen beiden Methoden ergeben sich nur bei Matten aus MS-Spänen.

9.1.1. Vergleich der Ergebnisse der Messvorrichtung I mit der konventionellen Methode

Die klassische Methode zur Messung der Permeabilität, die von v. Haas (1998) und Heinemann (1999) angewendet wurde, gilt als ein sehr zuverlässiges, aber auch sehr aufwendiges Verfahren. Für die Plattenherstellung ist ein zeitintensives Pressprogramm notwendig, um ein gleichmäßiges Dichteprofil zu erreichen. Für jede zu untersuchende Rohdichte muss eine Platte hergestellt werden. Die Zylinderflächen der Proben werden mit Epoxidharz bzw. bei niedrigen Rohdichten mit Silikon abgedichtet und anschließend mittels

eines Warmschrumpfschlauches in die Messeinrichtung integriert. Dieses Verfahren beinhaltet neben dem extremen zeitlichen Aufwand eine spezifische Diskontinuität der Probeneigenschaften. Die Durchflussrate durch die Proben wird bestimmt und entsprechend dem Gesetz von Darcy ausgewertet. Insofern ist die "klassische Methode" zeit- und kostenaufwendig sowie von der Homogenität des Probenmaterials und von den Herstellbedingungen abhängig.

Um die Permeabilität bei verschiedenen Rohdichten kontinuierlich messen zu können, wurde die Messvorrichtung I entwickelt. Eine Probenrandabdichtung ist nicht erforderlich. Mit dieser Anlage wurden die horizontale und vertikale Permeabilität getrennt gemessen. Die Anlage ist nur für Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern geeignet. Durch die Untersuchung von v. Hass (1998) stand fest, dass sich die Permeabilitätswerte der mit Epoxidharz ummantelten Proben um etwas mehr als eine Zehnerpotenz im Vergleich zu den nicht ummantelten Proben verringern. Da die Luft am Probenrand durchströmt, tritt eine geringere Druckdifferenz zwischen dem Druck vor und nach der Probe bei gleicher Durchflussmenge auf. Infolgedessen ist die Permeabilität der nicht mit Epoxidharz ummantelten Proben höher als bei den mit Epoxidharz ummantelten Proben. Um die Strömung am Probenrand bei der Messung der vertikalen Permeabilität zu reduzieren, wurde die Anlage so konzipiert, dass bei einem Pressplattendurchmesser von 40 mm die Luft in die Probe und aus der Probe durch die Bohrungen, die sich nur innerhalb eines Durchmessers von 30 mm des Pressplattendurchmessers befinden, ein- und ausströmt (Abbildung 101). Die zur Berechnung der vertikalen Permeabilität verwendete Oberfläche hat einen Durchmesser von 30 mm, weil sich die Bohrungen nur im Durchmesserbereich von 30 mm befinden. Die Durchströmung und der Druck vor und nach der Probe treten nur hier auf.

Abbildung 101 zeigt die schematische Darstellung der Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität mit Luft- und Kurzschlußluftströmung in der Probe. Wenn die Luft direkt am Probenrand ein- und ausströmt, tritt eine Druckreduzierung vor der Probe und eine Druckerhöhung nach der Probe bei gleicher Durchflussmenge auf. Infolgedessen verringert sich der Differenzdruck bei gleicher Durchflussmenge. Deshalb ist die Permeabilität bei auftretender Kurzschlußluftströmung höher als bei ohne Kurzschlußluftströmung. Die Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität wurde so konzipiert, dass die Luft nicht direkt am Probenrand einströmt und damit eine Druckreduzierung vor der Probe und eine Druckerhöhung nach der Probe möglichst vermieden wird. Möglicherweise tritt dennoch eine Kurzschlußluftströmung zwischen der Mantelfläche der Probe und der Stirnfläche des Rohres auf. Eine Druckreduzierung vor der Probe auf Grund auftretender Kurzschlußluftströmung wird durch Luftumströmung an der Probe vermieden (d.h. die Luft strömt langsam zwischen der Probenfläche und der nicht permeablen unteren Pressplatte, wo der Widerstand gegen Luftströmung größer ist). Die Druckerhöhung nach der Probe wird

mittels der nicht permeablen oberen Pressplatte reduziert. Da die Luft gegen die nicht permeable obere Platte strömt, tritt ein Druckverlust auf. Allerdings ist der Druck an der nicht permeablen oberen Platte geringfügig höher als an der permeablen oberen Platte, in der sich die Bohrungen befinden. Infolgedessen strömt die Luft langsam nach Verlassen der Probe zwischen der Probenoberfläche und der nicht permeablen oberen Pressplatte und durch die Bohrungen aus.

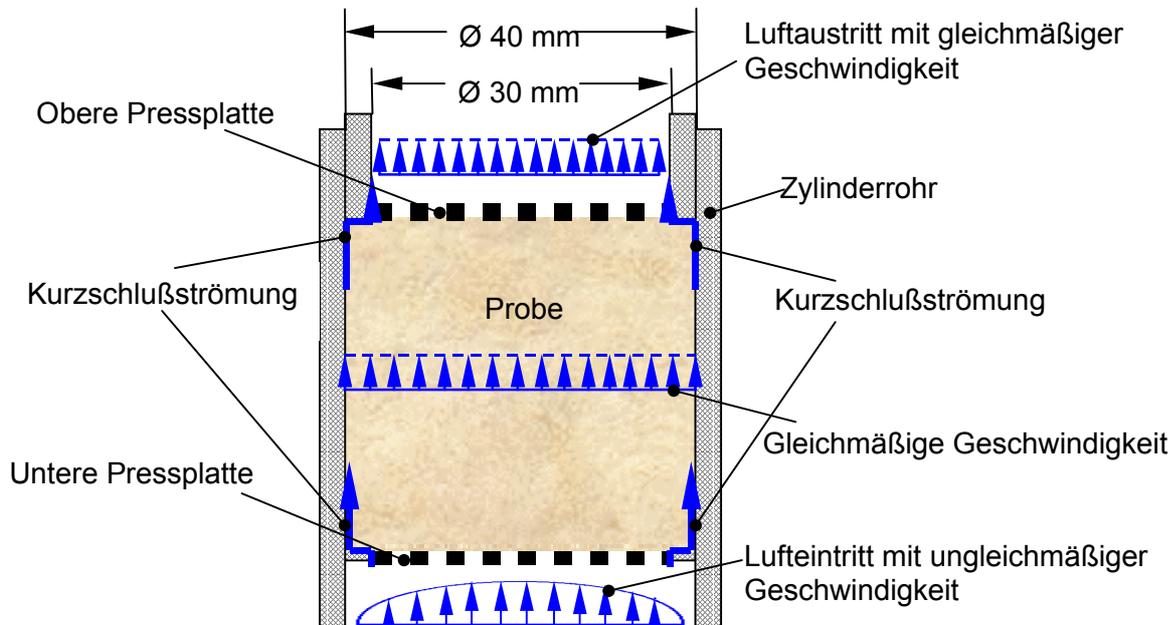


Abbildung 101: Schematische Darstellung der Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität mit Luft- und Kurzschlußluftströmung in der Probe

Die Anlage zur Messung der horizontalen Permeabilität bietet keine Möglichkeit, Kurzschlußluftströmung zu vermeiden, so dass möglicherweise Kurzschlußluftströmung an der Oberfläche zwischen Probe und den nicht permeablen oberen und unteren Platten auftritt (Abbildung 102).

Allerdings ergibt sich bei der Anlage zur Messung der vertikalen Permeabilität ein Außendruck der Partikel durch die Querdehnung an die Zylinderwand (Abbildung 101). Also kann es kaum Kurzschlußströmung geben. Bei der Anlage zur Messung der horizontalen Permeabilität wird der Pressdruck direkt auf die Probe aufgebracht (Abbildung 102). Die Kurzschlußströmung der Anlage zur Messung der horizontalen Permeabilität ist sicher geringer als die der Anlage zur Messung der vertikalen Permeabilität.

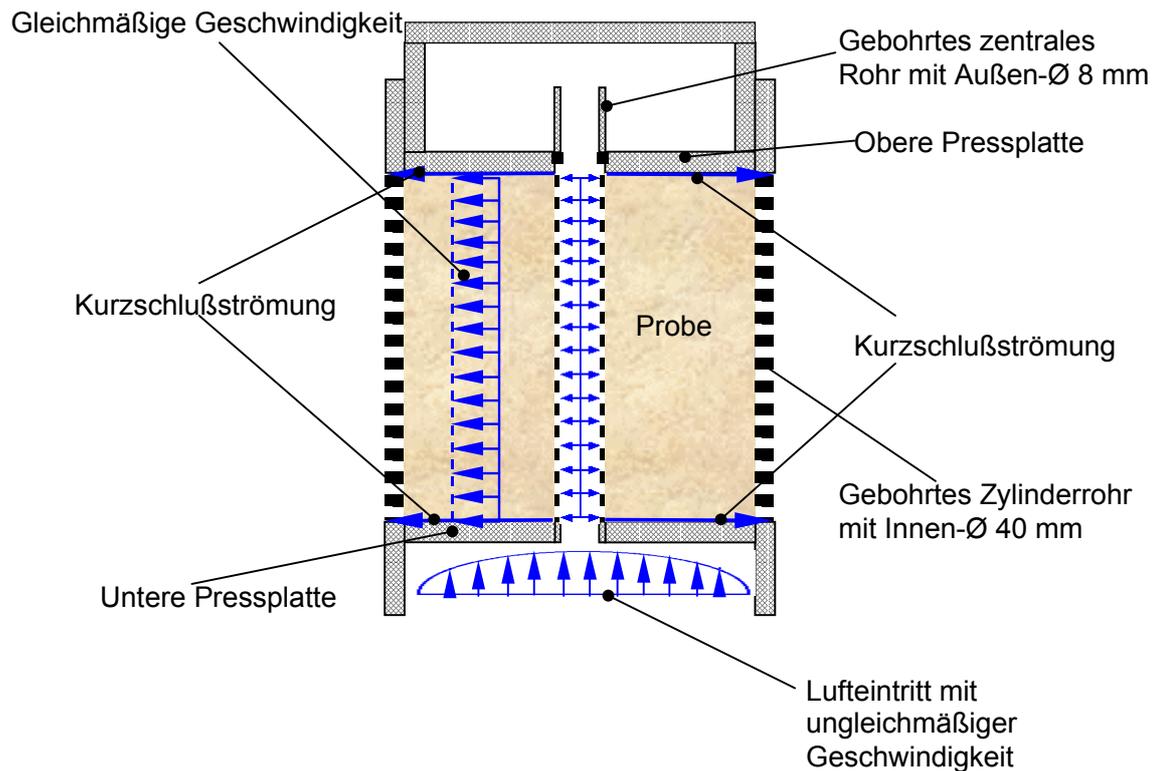


Abbildung 102: Schematische Darstellung der Messvorrichtung I zur Messung der horizontalen Permeabilität mit Luft- und Kurzschlußluftströmung in der Probe

Die Permeabilitäten der mit einem Klebstoffanteil von 10 % beleimten Matten aller Materialien, die mit Messvorrichtung I ermittelt wurden, wurden mit den Permeabilitäten der mit einem Klebstoffanteil von 11 % beleimten Platten, die von v. Haas (1998) mit der konventionellen Methode gemessen wurden, verglichen (siehe Abbildung 72 und Abbildung 73). Für die Matten aus DS-Spänen und Fasern sind die beiden Permeabilitäten geringfügig unterschiedlich im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode. Jedoch sind die Permeabilitäten der Matten aus DS-Spänen und Fasern in vertikaler Richtung und der Matten aus DS-Spänen in horizontaler Richtung geringfügig höher als die Ergebnisse der konventionellen Methode. Der Unterschied zwischen beiden Methoden ist in vertikaler Richtung geringfügig höher als in horizontaler Richtung. Es ist zu vermuten, dass die oben beschriebene Kurzschlußströmung bei der Messung der vertikalen Permeabilität auftritt.

Eine Ausnahme bildet die Matte aus Fasern in horizontaler Richtung, wo die Permeabilität ab einer Rohdichte von 400 kg/m^3 im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode geringfügig niedriger ist. Es könnte sein, dass sich die Matten aus Fasern durch Verdichten am Probenrand gegen die Innenmantelfläche des Rohres einfacher als die Matten aus DS- und MS-Spänen querdehnen und dadurch ein nicht bestimmbarer Anteil der

Fasern in die Bohrungen eindringt. Damit erhöht sich der Differenzdruck. Infolgedessen ist die Permeabilität geringer.

Für die Matten aus MS-Spänen ist der Unterschied zwischen den beiden Methoden in beiden Richtungen größer als bei DS-Spänen und Fasern. Es ist zu vermuten, dass bei MS-Spänen der größere Unterschied auf die heterogenen MS-Späne zurückzuführen ist. Bei den beleimten Platten aus MS-Spänen, die von v. Haas (1998) zur Messung der Permeabilität verwendet wurden, ist der Klebstoff ausgehärtet und bildet einen Film zwischen den Kontaktflächen der Späne aus. Bei der hier gemessenen Permeabilität der beleimten Matten aus MS-Spänen ist der Klebstoff nicht ausgehärtet, sondern die Späne sind ab einer Rohdichte von ca. 650 kg/m^3 durch den Klebstoff bei hoher Verdichtung verklebt (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65). Es könnte sein, dass der Widerstand gegen Luftströmung zwischen den Kontaktflächen der Späne bei ausgehärtetem Klebstoff größer als bei nicht ausgehärtetem Klebstoff ist und dadurch die mit Messvorrichtung I gemessene Permeabilität höher ist als bei der konventionellen Methode. Dafür spricht, dass bei ausgehärtetem Klebstoff die Partikelmatrix sehr fest und die einzelnen Partikel auch durch höheren Gasdruck nicht minimal ortsveränderlich sind, was bei nicht ausgehärtetem Klebstoff und dünnen Partikeln möglich sein könnte.

In horizontaler Richtung ist die mit Messvorrichtung I gemessene Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei einer Rohdichte von 250 kg/m^3 ca. 14-fach höher als die mit der konventionellen Methode gemessenen Permeabilität (Abbildung 72). Der Unterschied der Permeabilität für MS-Späne zwischen beiden Methoden in dieser Richtung nimmt mit zunehmender Rohdichte ab und verschwindet bei einer Rohdichte von 950 kg/m^3 . Die mit Messvorrichtung I gemessene horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-Spänen stimmt jedoch gut mit der mit Messvorrichtung II gemessenen Permeabilität bei einer Rohdichte von 250 bis ca. 650 kg/m^3 überein (Abbildung 94). In vertikaler Richtung ist die mit Messvorrichtung I gemessene Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei einer Rohdichte von 250 kg/m^3 ca. 1,5-fach und bei einer Rohdichte von 950 kg/m^3 ca. 3-fach höher als die mit der konventionellen Methode gemessenen Permeabilität (Abbildung 73). Bei niedriger Rohdichte ist der Unterschied der Permeabilität zwischen beiden Methoden in horizontaler Richtung größer als in vertikaler Richtung. Bei hoher Rohdichte ist der Unterschied der Permeabilität zwischen beiden Methoden in horizontaler Richtung niedriger als in vertikaler Richtung. Die MS-Späne werden durch den Klebstoff und die hohe Verdichtung ab einer Rohdichte von ca. 650 kg/m^3 zusammen verklebt. In horizontaler Richtung strömt die Luft parallel zur Oberflächenebene der Späne. Der Widerstand der Kontaktflächen der Späne gegen Luftströmung in horizontaler Richtung nimmt bei Verdichtung stärker zu als in vertikaler Richtung. Dadurch nimmt die mit Messvorrichtung I gemessene horizontale Permeabilität stark und die vertikale Permeabilität allmählich mit zunehmender Rohdichte ab.

Hata (1993) untersuchte die horizontale und vertikale Permeabilität der mit einem Klebstoffanteil von 10 % hergestellten Platten aus definierten MS-Spänen, wo die Permeabilität in horizontaler Richtung mit zunehmender Rohdichte von 300 bis 600 kg/m³ stark und in vertikaler Richtung allmählich abnimmt. Infolgedessen ist der Unterschied der horizontalen Permeabilität zwischen beiden Methoden bei niedriger Rohdichte größer als bei hoher Rohdichte und der Unterschied der vertikalen Permeabilität zwischen beiden Methoden ist fast gleich über den ganzen Rohdichtebereich.

Der Unterschied der Permeabilität beruht vermutlich auf folgenden Punkten:

- Die verwendeten Materialien zur Messung der Permeabilität sind unterschiedlich.
- Bei der konventionellen Methode ist der Klebstoff ausgehärtet. Bei den Versuchen mit Messvorrichtung I ist der Klebstoff nicht ausgehärtet.
- Wahrscheinlich tritt eine Kurzschlußluftströmung bei der Messung der Permeabilität mit der Messvorrichtung I auf.
- Bei der konventionellen Methode, die v. Haas 1998 verwendete, strömt die Luft in der Probe nicht vollkommen laminar, vor allem nicht bei niedriger Rohdichte. So ist z.B. bei einer Rohdichte von 400 kg/m³ der OSB-Platte der Unterschied der berechneten horizontalen Permeabilität um das ca. 1,4-fache bei einer Druckdifferenz von 0,05 bar pro cm höher als bei einer Druckdifferenz von 0,25 bar pro cm. Bei der Messvorrichtung I ist der Durchfluss laminar.

9.1.2. Materialeinfluss auf die Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte

Alle bisherigen Untersuchungen weisen darauf hin, dass mit zunehmender Rohdichte beide Permeabilitäten abnehmen (Denisov et al. 1975, Hata 1993, Haselein 1998, v. Haas 1998, Heinemann 1999, Shang 1999). Dieses wird auch durch diese Arbeit bestätigt.

Bei niedriger Rohdichte sind beide Permeabilitäten der Platten aus MS-Spänen am höchsten. Die Platten aus DS-Spänen sind weniger permeabel als Platten aus MS-Spänen. Die Platten aus Fasern sind am wenigsten permeabel. Bei hoher Rohdichte wird der Permeabilitätsunterschied verschiedener Materialien in beiden Richtungen zueinander geringer (v. Haas 1998, Heinemann 1999). Mit dieser Arbeit werden die beschriebenen Ergebnisse bestätigt.

9.1.3. Feuchteinfluss

Wird eine Probe befeuchtet, vermindert sich die Permeabilität (Denisov et al. 1975, v. Haas 1998, Heinemann 1999). Mit zunehmender Rohdichte der Platten aus DS-Spänen und Fasern steigt der Permeabilitätsunterschied in horizontaler und vertikaler Richtung durch die Feuchtezunahme an. Dies wird damit begründet, dass der Anstieg des Permeabilitätsunterschiedes bei Feuchtezunahme durch die Quellung der Späne verursacht wird, wodurch sich die wenigen Hohlräume im hohen Rohdichtebereich schließen (v. Haas 1998, Heinemann 1999). Im Gegensatz dazu stellten Denisov et al. (1975) fest, dass ab einer Rohdichte von 700 kg/m^3 die Späne in den Platten sehr dicht geschichtet sind. Dadurch wird das Schwinden der Partikel bei Feuchteabnahme durch die Klebeverbindungen beeinträchtigt. Das hat zur Folge, dass bei Verringerung der Feuchte ein geringerer Permeabilitätsunterschied in horizontaler und vertikaler Richtung eintritt. Shang et al. (1999) stellten fest, dass die vertikale Permeabilität der Spanmatten aus unterschiedlichen Holzarten mit gleicher Rohdichte (bezogen auf atro Holz) von ca. 180 kg/m^3 – 220 kg/m^3 und zunehmender Mattenfeuchte von 0 % bis 10 % dramatisch sinkt. Ab einer Mattenfeuchte von 10 % nimmt die vertikale Permeabilität allmählich ab.

In dieser Arbeit wird festgestellt, dass sich mit zunehmender Feuchte die Permeabilitäten von unbeleimten MS-, DS-Spänen und Fasern vermindern, wobei die Verminderung durch eine Feuchtezunahme von 6 % – 7 % auf 10 % – 11 % bei niedriger Rohdichte sehr gering und bei hoher Rohdichte größer ist. Dieses ist damit zu erklären, dass bei höherer Feuchte und gleicher Rohdichte (bezogen auf atro Holzmasse) in einem bestimmten Volumen geringfügig weniger Hohlräume in der Probe zur Verfügung stehen, da die Abmessungen der Partikel bei Feuchteerhöhung durch die Quellung geringfügig größer sind. Durch die Verdichtung bei hoher Rohdichte (bezogen auf atro Holzmasse) und höherer Feuchte liegen die Partikel fester und mit weniger Hohlräumen aneinander, da der Verdichtungswiderstand der Materialien mit zunehmender Feuchte sinkt (v. Haas 1998). Deshalb haben die Oberflächen der Materialien in der Probe durch die Verdichtung bei einer Feuchte von 10 % - 11% besseren Kontakt miteinander als bei einer Feuchte von 6% - 7%. Dadurch ist die Permeabilität geringer. Infolgedessen ist die Verminderung der Permeabilität bei hoher Rohdichte größer als bei niedriger Rohdichte. Mit dieser Arbeit werden die Ergebnisse von v. Haas (1998) und Heinemann (1999) insgesamt bestätigt.

9.1.4. Klebstoffeinfluss

Durch Zugabe des Klebstoffs verringert sich die Permeabilität in horizontaler und vertikaler Richtung ab einer Rohdichte von ca. 300 kg/m^3 für Matten aus Fasern, von ca. 500 kg/m^3 für

Matten aus DS-Spänen und von ca. 650 kg/m^3 für Matten aus MS-Spänen. Der Unterschied der Permeabilität steigt mit zunehmender Rohdichte an. Es könnte sein, dass durch die Verdichtung die Oberflächen der einzelnen Partikel fest anliegend sind und durch den Klebstoff zusammen ``verklebt`` wurden, obwohl der Klebstoff durch die kalte Presse nicht ausgehärtet ist. Infolgedessen sind die Hohlräume in der Probe bei hohem Klebstoffanteil verschlossen und dadurch die belemten Proben sehr wenig permeabel. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen von v. Haas (1998), wonach die Permeabilität mit zunehmendem Klebstoffanteil abnimmt und mit zunehmender Rohdichte der Unterschied in der Durchlässigkeit zunimmt.

9.1.5. Einfluss der Spanabmessung

Nach Shang et al. 1999 nimmt mit zunehmenden Spanabmessungen von Linde, Pappel und Ulme die vertikale Permeabilität bei niedriger Rohdichte zu. Das wurde damit begründet, dass mit zunehmenden Spanabmessungen die Schüttdichte abnimmt.

Nach Hata 1993 nimmt mit zunehmender Länge und Breite bei gleicher Dicke die Permeabilität der Spanplatte in horizontaler und vertikaler Richtung bei einer Rohdichte von 400 kg/m^3 ab. Mit zunehmender Dicke bei gleicher Länge und Breite nimmt die Permeabilität der Spanplatte in horizontaler und vertikaler Richtung bei einer Rohdichte von 400 kg/m^3 zu.

Nach Denisov et al. 1975 nimmt mit zunehmenden Spanfraktionen die horizontale und vertikale Permeabilität der einschichtigen Spanplatte bei einer Rohdichte von 550 kg/m^3 ab, wobei die Permeabilität in horizontaler Richtung stärker als in vertikaler Richtung abnimmt. Mit zunehmender Breite bei gleicher Länge und Dicke nimmt die horizontale und vertikale Permeabilität von Spanplatten aus definierten Spänen bei einer Rohdichte von 550 und 650 kg/m^3 ab und mit zunehmender Dicke bei gleicher Länge und Breite zu. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Hata (1993) stellten Denisov et al. (1975) fest, dass mit zunehmender Länge bei gleicher Dicke und Breite die horizontale und vertikale Permeabilität von Spanplatten aus definierten Spänen bei einer Rohdichte von 550 und 650 kg/m^3 zunimmt. Als Ursache für die Zunahme der horizontalen und vertikalen Permeabilität bei zunehmender Spanlänge nennen die Autoren eine ungleichmäßigere Vliesbildung und als Folge davon örtlich eine geringere Rohdichte.

Mit dieser Arbeit wird festgestellt, dass mit größer werdenden Partikeln die horizontale und vertikale Permeabilität bei niedriger Rohdichte zunimmt. Die Späne haben bei größerer Maschenweite eine geringere Schüttdichte und einen größeren Verdichtungswiderstand und liegen zueinander loser verteilt als bei kleinerer Maschenweite. Infolgedessen sind die Matten

aus MS-Spänen bei größerer Maschenweite und niedriger Rohdichte in beiden Richtungen durchlässiger als bei kleinerer Maschenweite (Abbildung 66 und Abbildung 67), obwohl die Späne der größeren Spanfraktion breiter als bei der kleineren Spanfraktion sind. Die Spandicke hat einen größeren Einfluss auf die horizontale und vertikale Permeabilität bei niedriger Rohdichte als die Spanbreite. Je dicker die Späne sind, desto durchlässiger ist die Probe in horizontaler und vertikaler Richtung bei niedriger Rohdichte. Mit dieser Arbeit werden die Ergebnisse von Shang et al. (1999) bestätigt.

Mit größer werdenden Partikeln nimmt die horizontale Permeabilität bei hoher Rohdichte ab. Bei hoher Rohdichte ist die horizontale Permeabilität bei größerer Spanfraktion niedriger als bei kleinerer Spanfraktion, obwohl die Späne der größeren Spanfraktion dicker als bei der kleineren Spanfraktion sind. Der Grund könnte darin liegen, dass durch die Verdichtung der Widerstand gegen Luftströmung zwischen den Kontaktflächen der Späne bei der größeren Spanoberfläche größer als bei der kleineren Spanoberfläche ist. In horizontaler Richtung strömt die Luft parallel zur Oberflächenebene. Infolgedessen ist die horizontale Permeabilität bei größerer Spanoberfläche geringer als bei der kleineren Spanoberfläche.

In vertikaler Richtung nimmt auch die Permeabilität bei hoher Rohdichte mit zunehmenden Spanfraktionen von 1,0 mm – 1,5 mm auf 2,0 mm–3,1 mm ab. Wahrscheinlich wird die geringfügig niedrigere Permeabilität in vertikaler Richtung bei hoher Rohdichte durch die Spanbreite verursacht, da die Spandicke einen nicht zu großen Unterschied aufweist. Die Breite der Spanfraktionen 1,0 mm – 1,5 mm, 1,5 mm – 2,0 mm und 2,0 mm – 3,1 mm betrug entsprechend 1,17 mm, 1,64 mm und 2,35 mm, die Dicke entsprechend 0,54 mm, 0,54 mm und 0,72 mm.

Eine Ausnahme bildet die Spanfraktion 3,1 mm – 4,0 mm in vertikaler Richtung. Dort ist die vertikale Permeabilität im Rohdichtebereich von 250 kg/m^3 – 950 kg/m^3 am höchsten, obwohl die Breite der Spanfraktion 3,1 mm – 4,0 mm am größten ist. Das bedeutet, dass nicht nur die Breite einen Einfluss auf die Permeabilität hat, sondern auch die Dicke. Die Dicke, die Breite und die Oberfläche der Spanfraktion 3,1 mm – 4,0 mm betragen entsprechend 1 mm, 3,38 mm und $50,63 \text{ mm}^2$. Durch die dickeren Späne ist der Verdichtungswiderstand groß. Die Hohlräume bei hoher Rohdichte werden wenig geschlossen. Infolgedessen ist die vertikale Permeabilität der Spanfraktion 3,1 mm - 4,0 mm bei hoher Rohdichte am höchsten.

9.1.6. Einfluss der Strömungsrichtung auf das Verhältnis vertikaler zu horizontaler Permeabilität

Für alle Partikel ist ab einer Rohdichte von 350 kg/m^3 die Permeabilität in vertikaler Richtung geringer als in horizontaler Richtung. Für unbeleimte und beleimte Matten aus DS-Spänen und Fasern nimmt der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen mit zunehmender Rohdichte zu, d.h. das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität nimmt mit zunehmender Rohdichte ab. DS-Späne und Fasern weisen eine geringere Dicke, Breite und Länge auf und sie sind leicht zu verdichten. Durch die Verdichtung bei kleineren Spanabmessungen werden die Hohlräume zwischen den Partikeln, wo die Luft in vertikaler Richtung durchströmen kann, verschlossen. In horizontaler Richtung strömt die Luft parallel zur Kontaktfläche (Länge x Breite der Partikel). Durch die Verdichtung ändert sich der Widerstand zwischen den Kontaktflächen der DS-Späne und Fasern gegen Luftströmung geringfügig, da die Oberfläche und die Dicke der DS-Späne und Fasern klein sind und schon miteinander durch die Vorverdichtung Kontakt haben. Infolgedessen nimmt die Permeabilität von unbeleimten und beleimten Matten aus DS-Spänen und Fasern in vertikaler Richtung mit zunehmender Rohdichte stärker als in horizontaler Richtung ab. Folglich nimmt der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen mit zunehmender Rohdichte zu. Mit diesen Ergebnissen werden die Ergebnisse von v. Haas (1998) bestätigt, wonach das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität bei Platten aus DS-Spänen und Fasern mit zunehmender Rohdichte abnimmt. Es ist so begründet, dass DS-Späne und Fasern in der Probe mit ihrer Längsachse meist parallel zur Plattenoberfläche ausgerichtet sind. In der stark verdichteten Matte muss es in dieser Richtung mehr Strömungskanäle geben als in senkrechter Richtung. Im Gegensatz zu Haselein (1998) nimmt damit das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität beim Fasermaterial mit zunehmender Rohdichte zu.

Die Matten aus MS-Spänen sind in vertikaler Richtung über den gesamten Rohdichtebereich wesentlich undurchlässiger als in horizontaler Richtung. Für unbeleimte Matten aus MS-Spänen ist der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen über den gesamten Rohdichtebereich wesentlich gleichmäßiger. Für beleimte Matten aus MS-Spänen nimmt der Unterschied der Permeabilität mit zunehmender Rohdichte ab, d.h. das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität steigt mit zunehmender Rohdichte. Da durch die Verdichtung der Klebstoff einen Film zwischen den Oberflächen der Späne bildet, können sich die Hohlraumanteile in horizontaler Richtung mehr als in vertikaler Richtung verschließen. Durch Klebstoffzugabe ist der Widerstand zwischen den Kontaktflächen der MS-Späne gegen Luftströmung in horizontaler Richtung höher als in vertikaler Richtung, da die Luft in horizontaler Richtung parallel zur Oberfläche der Späne und in vertikaler Richtung

zwischen den Hohlräumen der Späne strömt. Infolgedessen reduziert sich die Permeabilität von beleimten Matten aus MS-Spänen in horizontaler Richtung stärker als in vertikaler Richtung. Dadurch nimmt das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität von beleimten Matten aus MS-Spänen mit zunehmender Rohdichte zu. Mit dieser Arbeit werden die Ergebnisse von Hata (1993) bestätigt, dass die Permeabilität von Platten aus definierten MS-Spänen mit einem Klebstoffanteil von 10 % in horizontaler Richtung mit zunehmender Rohdichte von 300 bis 600 kg/m³ stärker als in vertikaler Richtung abnimmt. Infolgedessen ist der Unterschied der Permeabilität der Spanplatten zwischen beiden Richtungen bei niedriger Rohdichte größer als bei hoher Rohdichte.

9.1.7. Einfluss der Lufttemperatur

Bei hoher Rohdichte und einer Feuchte von 0 % sind die bei einer Lufttemperatur von 80°C gemessenen vertikalen Permeabilitäten von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern geringfügig niedriger als die bei einer Lufttemperatur von 20°C gemessenen vertikalen Permeabilitäten. Die vertikalen Permeabilitäten bei verschiedenen Temperaturen (20°C und 80°C) zeigen keine Unterschiede zum 5 % Niveau für alle Materialien. Durch die Erwärmung sind die Partikel weicher. Infolgedessen ist der Verdichtungswiderstand der bei einer Lufttemperatur von 80°C gemessenen Proben geringer, weil die Materialien bei einer Temperatur von 80°C durch stärkere plastische Verformung fester als bei 20°C aneinander anliegen. Dies ist besonders bei hoher Rohdichte von Einfluss. Dadurch ist die vertikale Permeabilität bei hoher Rohdichte und einer Temperatur von 80°C geringfügig niedriger als bei 20°C. Bei der Anwendung des Gesetzes von Darcy sind die berechneten Permeabilitätswerte nicht vom Durchflussmedium abhängig, sondern nur von der Porenstruktur der Materialien, weil sich, so die Annahme, das Durchflussmedium nicht auf die Partikel auswirkt. In diesem Fall wirkt sich die Temperatur auf die Partikel in der Form aus, dass sich der Verdichtungswiderstand durch eine Temperaturerhöhung bei einer Feuchte von 0 % nur geringfügig vermindert (v. Haas 1998). Infolgedessen ist die Permeabilität bei einer Temperatur von 80 °C und hoher Rohdichte geringfügig niedriger als bei 20°C. Im Gegensatz dazu stellt Heinemann (1999) fest, dass die bei einer Lufttemperatur von 80 °C gemessenen vertikalen und horizontalen Permeabilitäten von Platten aus MS-, DS-Spänen und Fasern geringfügig höher sind als die bei 20 °C gemessenen Permeabilitäten.

9.2. Bestimmung der Permeabilität mit Messvorrichtung II

Eine ``Schnellmethode`` zur Bestimmung der Permeabilität in zwei Dimensionen wurde von Haselein (1998) entwickelt. Heinemann (1999) hat einen Vergleich der Permeabilität

zwischen der konventionellen Methode, die von v. Haas (1998) zur Messung der Permeabilität angewendet wurde, und der Schnellmethode nach Haselein (1998) durchgeführt. Ein Vergleich der Permeabilitätswerte der beiden beschriebenen Messmethoden ergab jedoch extrem unterschiedliche Ergebnisse, so dass das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität mit den beiden Messmethoden ebenso unterschiedliche Absolutwerte wie auch entgegengesetzte Tendenzen ergab. Mit der Messmethode, die von v. Haas (1998) verwendet wurde, nimmt das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität mit steigender Verdichtung ab. Bei der Methode nach Haselein steigt in der Tendenz das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität von Fasermatten mit steigender Verdichtung (siehe auch Abschnitt 5.5). Die Berechnung der Permeabilitätswerte mit dem Modellansatz von Haselein (1998) kann nicht nachvollzogen werden. Mit der Anlage von Haselein kann außerdem nur die Permeabilität von Fasermatten bestimmt werden. Grundsätzlich wäre aber der Messansatz von Haselein (1998) für den Einsatz in der Praxis lohnend, weil hier für ein Partikelgemisch in relativ kurzer Zeit (z.B. in weniger als einer Stunde) die Permeabilitätswerte für Matten unterschiedlicher Dichte bestimmt werden können.

Aus oben beschriebenem Grund wurde die Messvorrichtung II zur Messung der Permeabilität von Matten aus DS-, MS-Spänen, Fasern und Strands in zwei Dimensionen konzipiert. Zur Bestimmung der Permeabilität bei verschiedenen Rohdichten werden die Materialien in der Anlage verdichtet. Der Gasdruck wurde an verschiedenen Positionen in der Probe gemessen. In der Kooperation mit der Universität Poznań wurden die Messpunkte (P_1 bis P_7) zur Messung der Drücke bei verschiedenen Rohdichten in der Probe festgelegt, indem die Druckverteilung in der Probe bei verschiedenen Rohdichten (200 kg/m^3 , 500 kg/m^3 , 800 kg/m^3 und 1200 kg/m^3) von Matten aus MS-Spänen durch ein Simulationsprogramm ermittelt wurde (Abbildung 117 im Anhang). Bei einer Rohdichte von 200 kg/m^3 strömt die Luft im oberen betrachteten Bereich mehr als im unteren Bereich. Die Luftströmung in vertikaler Richtung nimmt relativ zu bei zunehmender Rohdichte von 500 bis 1200 kg/m^3 , da der Widerstand in horizontaler Richtung größer wird. Aus diesem Grund wurden die Messpunkte in verschiedenen Positionen zur Messung der Drücke bei den Rohdichten 200 kg/m^3 , 500 kg/m^3 , 800 kg/m^3 , 1200 kg/m^3 festgelegt (siehe Abbildung 118 im Anhang), um die simulierten Drücke mit den gemessenen Drücken zu vergleichen. Zur Berechnung der Permeabilität wurde ein erster Modellansatz der Universität Poznań verwendet. Weiterhin wurde ein eigener Modellansatz entwickelt.

Die Prüfzeit der Permeabilitätsmessung mit der Messvorrichtung II bei einer Rohdichte von 200 bis ca. 680 kg/m^3 ist kürzer als bei der Messvorrichtung I und betrug je Probe etwa 30 Minuten. Ein Zeitnachteil liegt bei der Berechnung der Permeabilität. Die Berechnungszeit ist von der Verfeinerung des eingegeben Gitters und der Computerleistung abhängig. Zur optimalen

Einteilung des Gitters bei der Eingabe wird vorgeschlagen, dass in das Berechnungsprogramm 80 Spalten und 40 Zeilen eingegeben werden. Bei 80 Spalten beträgt der Abstand in horizontalen Richtung ca. 1,56 mm und bei 40 Zeilen beträgt der Abstand in vertikaler Richtung 1,0 mm für eine Mattendicke von 40 mm.

9.2.1. Bewertung der berechneten Permeabilitätswerte nach zwei Modellansätzen

Bei der ersten Messung (Die Kraft der Prüfmaschine wird angehalten und die Permeabilität wird gemessen) wurden die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten und zweiten Modellansatz mit den Ergebnissen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998) verglichen.

Insgesamt ist die Abweichung der berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz für aller Materialien größer als nach zweitem Modellansatz im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998). Die nach dem ersten Modellansatz berechneten Permeabilitätswerte in beiden Richtungen nehmen mit zunehmender Rohdichte nicht kontinuierlich ab, besonders nicht in vertikaler Richtung. Diese Diskontinuität bei zunehmender Rohdichte ist logisch nicht erklärbar. Allerdings sind die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz für die horizontale Durchströmungsrichtung als erheblich besser zu beurteilen als die Permeabilitäten vertikal zur Mattenoberfläche.

Im Gegensatz zu den berechneten Permeabilitätswerten nach dem zweiten Modellansatz verläuft die Tendenz der berechneten Permeabilitätswerte bei zunehmender Rohdichte in beiden Richtungen kontinuierlich abnehmend und liegen näher bei den Ergebnissen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998).

9.2.1.1. Druckbedingungen in der Probe

Da die berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten und zweiten Modellansatz einen Unterschied aufweisen, wurden erneut die Druckbedingungen in der Probe überprüft.

Die Druckwerte, die sich aus Abbildung 80 ergeben, weisen aufgrund konstanter Abhängigkeiten zwischen Gasdruckniveau und Rohdichte an den jeweiligen Sensoren darauf hin, dass sich die Strömungsverhältnisse mit zunehmender Probenverdichtung kontinuierlich verändern. Einziger variierender Parameter während eines Versuches ist die Mattendichte.

Stellt man die prozentuale Dickenänderung der Druckänderung gegenüber, ist auch hier eine Kontinuität gegeben (Abbildung 103).

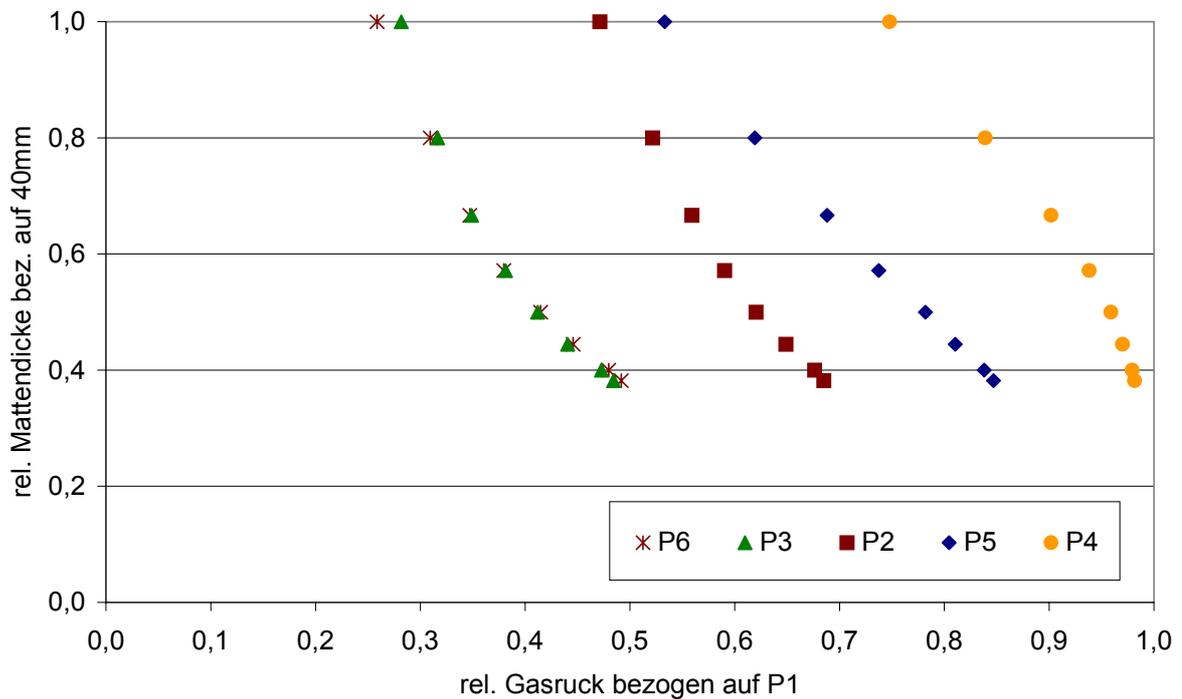


Abbildung 103: Abhängigkeit zwischen relativem Druck bezogen auf Gasdrucksensor P_1 und der relativen Dickenänderung, bezogen auf die Ausgangsdicke einer Fasermatte von 40 mm (entsprechend einer Mattenrohichte von 200 kg/m^3). Position der Gasdruckensoren P_1 bis P_6 siehe Abbildung 80.

Abbildung 104 zeigt einen Vergleich der Druckbedingungen, die sich aus Abbildung 80 und Abbildung 103 ergeben, an verschiedenen Positionen der Matte, bezogen auf den Drucksensor P_1 in Abhängigkeit von der Rohdichte. Je höher der Wert, desto geringer ist die Druckdifferenz zum Drucksensor P_1 . Das Muster, das sich bei dieser Darstellungsform ergibt, ist plausibel. Insgesamt verringert sich die Druckdifferenz zu P_1 mit steigender Mattenverdichtung.

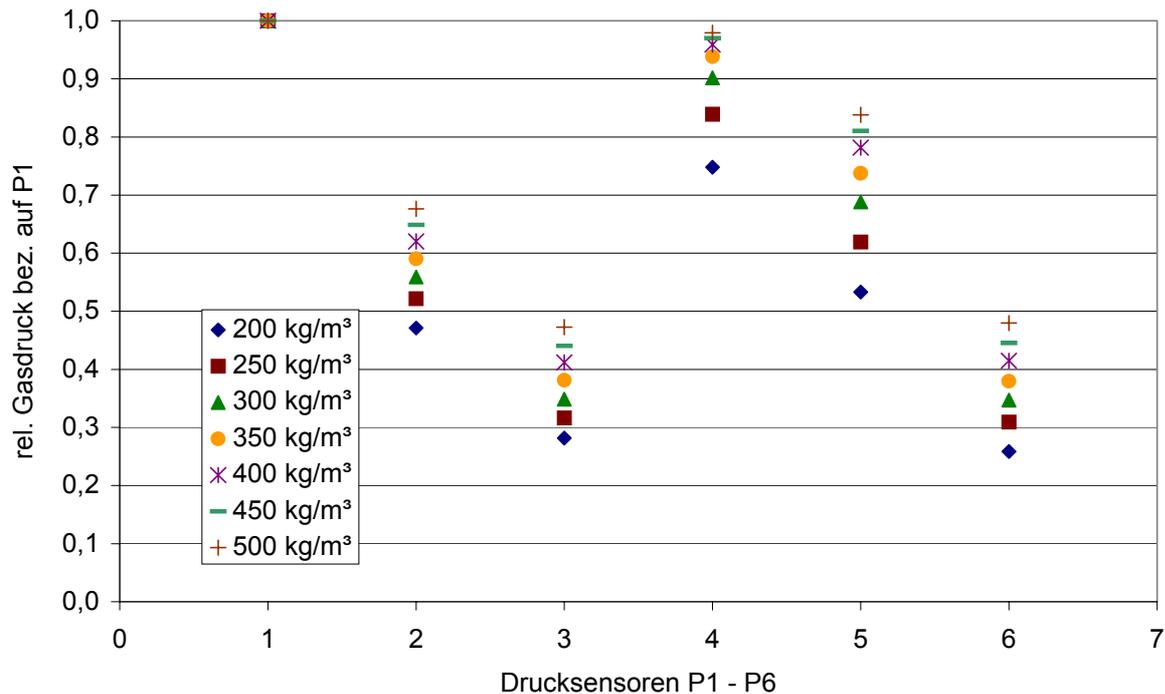


Abbildung 104: Relativer Gasdruck in der Matte im Verhältnis zum Druckaufnehmer P_1 bei verschiedenen Rohdichten (Position der Drucksensoren P_1 bis P_6 siehe Abbildung 80)

Je größer der Mattenradius, an dem sich ein Gasdruckaufnehmer befindet, desto größer ist die Druckdifferenz zum Drucksensor P_1 . Dieses ist zum einen auf den sich einstellenden Ausgleichsdruck (Überdruck vor der Probe zum Atmosphärendruck) und auf den sich vergrößernden Querschnitt (bzw. die sich vergrößernde Strecke) zurückzuführen, wodurch sich der Gasdruck verringert.

Die Änderung der Druckbedingungen in der Probe verläuft kontinuierlich mit zunehmender Rohdichte. So ist anzunehmen, dass auch die Änderung der berechneten Permeabilitätswerte mit zunehmender Rohdichte kontinuierlich verläuft. Die Tendenz der berechneten Permeabilitätswerte nach dem ersten Modellansatz ist in beiden Richtungen mit zunehmender Rohdichte nicht kontinuierlich abnehmend, besonders nicht in vertikaler Richtung. Es ist zu vermuten, dass beim ersten Modellansatz ein Fehler im Simulationsprogramm vorhanden ist.

9.2.1.2. Beurteilung der zwei Modellansätze

Bei der Berechnung der Permeabilität nach den zwei Modellansätzen tritt ein größerer Unterschied auf. Die Ursache der Abweichung der berechneten Permeabilitätswerte zwischen beiden Modellansätzen wird folgendermaßen zusammengefasst:

- Die Probe zur Messung der Permeabilität ist rund. Die partielle Differentialgleichung zur numerischen Lösung des ersten Modellansatzes ist aber im kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Ob das kartesische Koordinatensystem im Inhalt des Simulationsprogramms zum zylindrischen Koordinatensystem transformiert, mit der Expansion des Gases korrigiert und zusammen gelöst wird, kann nicht beurteilt werden. Die partielle Differentialgleichung zur numerischen Lösung des zweiten Modellansatzes ist im zylindrischen Koordinatensystem dargestellt, mit der Expansion des Gases korrigiert und zusammen gelöst.
- Die Randbedingungen des ersten Modellansatzes sind sehr kompliziert und unterscheiden sich in zwei Arten. Die Erste ist die Randbedingung für die Druckwerte an der nicht permeablen Platte der Systemgrenzen (siehe auch Abschnitt 7.2.4.1.1). Die Zweite ist die Randbedingung für die Strömungsgeschwindigkeit der Luftzufuhr und des Luftaustritts an der Probe. Die beiden Arten der Randbedingungen werden mit der partiellen Differentialgleichung (21) gelöst. Das bedeutet, dass die beiden Permeabilitätswerte nur in einem Schritt berechnet werden, indem die horizontale und vertikale Permeabilität gleichzeitig geschätzt wird, um die Druckverteilung in der Probe zu simulieren. Die simulierte Druckverteilung wird mit den gemessenen Drücken verglichen. Der mögliche Fehler im Simulationsprogramm des ersten Modellansatzes ist schwer zu finden, weil die numerische Lösung kompliziert ist. Beim zweiten Modellansatz gibt es nur eine Art der Randbedingung, die für die Simulation der Druckverteilung notwendig ist. Die beiden Permeabilitätswerte werden in zwei Schritten berechnet. Beim ersten Schritt wird die Druckverteilung in der Probe simuliert, indem das Verhältnis vertikaler zu horizontaler Permeabilität geschätzt wird. Die simulierte Druckverteilung wird mit den gemessenen Drücken verglichen. Beim zweiten Schritt wird zunächst die horizontale Permeabilität geschätzt und das sich daraus ergebende Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität zur Berechnung des Massenstromes mittels Control-Volume-Methode verwendet. Der Eintritt des gemessenen Massenstroms wird mit dem Austritt des berechneten Massenstromes verglichen. Das Simulationsprogramm wurde Schritt für Schritt entwickelt und getestet. Anschließend wurde das Programm zusammen geführt.

9.2.2. Bewertung der Ergebnisse

Die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz von Messvorrichtung II sind besser zu beurteilen als nach erstem Modellansatz. Daher werden nur die Ergebnisse nach dem zweiten Modellansatz mit den Ergebnissen der Messvorrichtung I verglichen und beurteilt.

9.2.2.1. Permeabilität von Fasermatten

Für unbeleimte Fasermatten sind die vertikale und horizontale Permeabilität der Messvorrichtung II bei niedriger Rohdichte geringfügig höher als bei der Messvorrichtung I. Der Unterschied der beiden Permeabilitäten wird mit zunehmender Rohdichte größer im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I (Abbildung 90 und Abbildung 91). Die Fasern können als ein homogenes Material angesehen werden. Die Überprüfung der Druckbedingungen in der Probe bei Messvorrichtung II ergab, dass der Druck vertikal zwischen P_3 und P_6 isobar verläuft (Abbildung 80 und Abbildung 81). Die berechnete Permeabilität in horizontaler Richtung nach Gleichung (12) stimmt gut mit der berechneten Permeabilität nach zweitem Modellansatz überein (Abbildung 83). Abbildung 105 zeigt die simulierte Druckverteilung in der Probe von Fasermatten bei einer Rohdichte von 200 kg/m^3 und 606 kg/m^3 . Es bestätigt sich, dass der Druck vertikal zwischen P_3 und P_6 (mit Radius = $93,75 \text{ mm}$) isobar verläuft. Allerdings ist der simulierte Druck von P_3 bei einer Rohdichte von 200 kg/m^3 geringfügig höher als von P_6 (siehe Tabelle 11). Der Grund des Unterschiedes der Permeabilitäten zwischen Messvorrichtung I und II könnte darin liegen, dass sich die Matten aus Fasern bei der Messung mit Messvorrichtung I in horizontaler Richtung durch Verdichtung am Probenrand gegen die Innenmantelfläche des Rohres querdehnen. Außerdem liegen die Matten aus Fasern durch Verdichtung an der oberen und unteren Pressplatte in vertikaler Richtung fest aneinander, da die Rückfederung von Matten aus Fasern groß ist. Dadurch dringt ein nicht bestimmbarer Anteil der Fasern in die Bohrungen ein und der Differenzdruck erhöht sich. Infolgedessen ist die mit Messvorrichtung I gemessene Permeabilität geringer als die mit Messvorrichtung II gemessene Permeabilität.

Der Unterschied der beiden Methoden wird größer bei hoher Rohdichte. Die Differenzdruckerhöhung bei der Messvorrichtung I wird wegen des Eindringens der Faserplatte in die Bohrungen bei hoher Verdichtung größer. Außerdem ist die Messvorrichtung II fast gänzlich offen zur Atmosphäre. Bei höherer Rohdichte ist der Widerstand der Materialien größer. Die Luft sucht deshalb den Weg des geringsten Widerstandes, um einzuströmen (z.B durch eine Art ``Kanal``, der beim Auflegen des Thermoelementes zur Messung der Temperatur auf der Probe entsteht). Infolgedessen gehen Drücke in den Aufnahmepositionen verloren bzw. die Druckverluste werden bei höherer Rohdichte größer. Der große Unterschied der beiden Permeabilitäten beider Messvorrichtungen bei hoher Rohdichte setzt sich aus den zwei beschriebenen Ursachen zusammen.

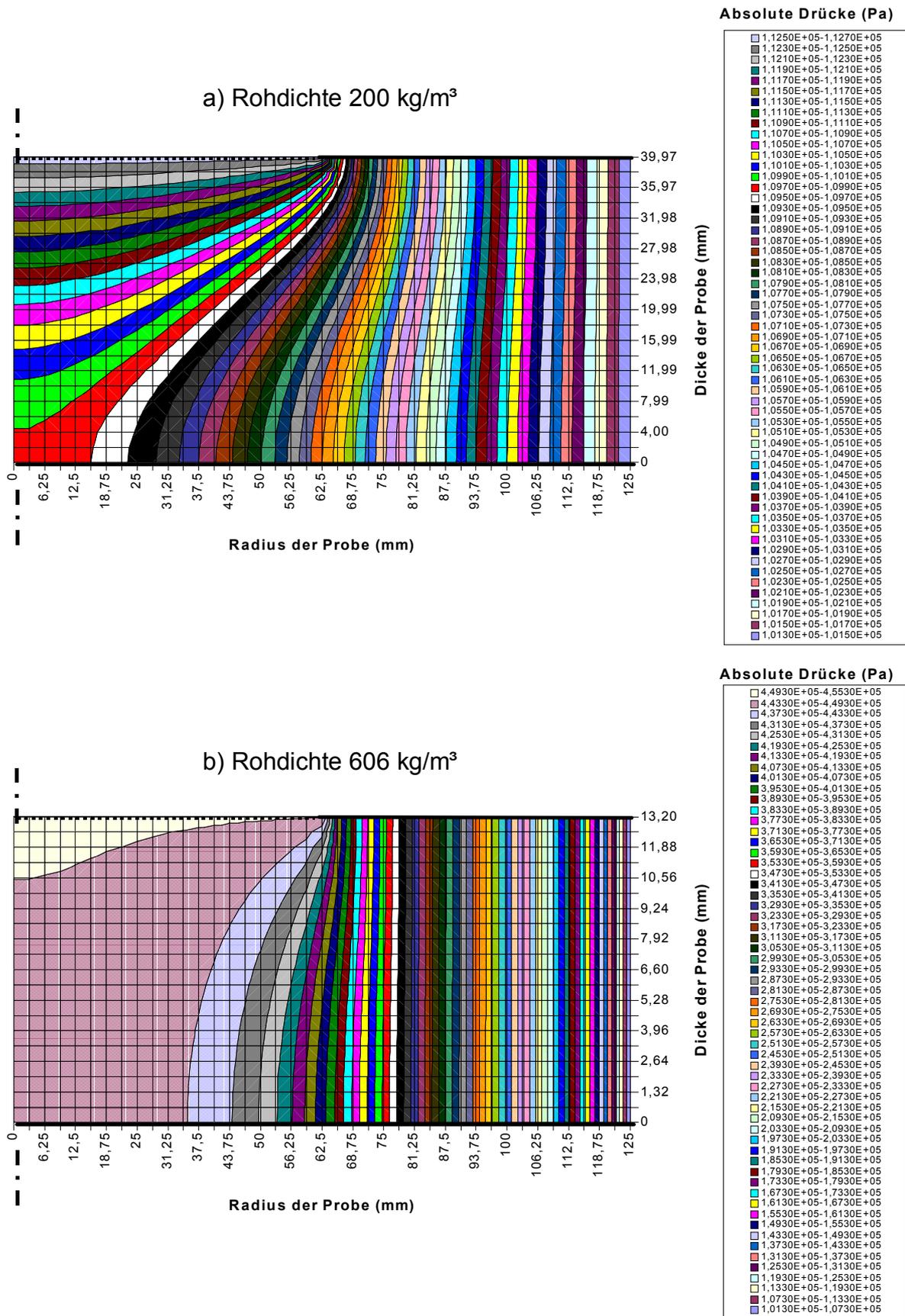


Abbildung 105: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Fasermatten bei einer Rohdichte von 200 kg/m³ und 606 kg/m³

9.2.2.2. Permeabilität von Matten aus MS-Spänen

In horizontaler Richtung stimmen die berechneten Permeabilitätswerte aus Messvorrichtung II / zweiter Modellansatz bei einer Rohdichte von ca. 300 bis 500 kg/m³ mit den Ergebnissen der Messvorrichtung I überein. Ab einer Rohdichte von ca. 500 kg/m³ werden die Permeabilitätswerte bei Messvorrichtung II geringfügig höher als bei Messvorrichtung I (Abbildung 94). Wiederum ist die Messvorrichtung II fast gänzlich offen zur Atmosphäre. Bei höherer Rohdichte ist der Widerstand der Materialien größer. Die Luft sucht deshalb, wie schon beschrieben, den Weg des geringsten Widerstandes, um einzuströmen (z.B ist die Verteilung der Probenoberfläche nicht gleichmäßig bzw. durch den "Kanal" des Thermoelements zur Messung der Temperatur auf der Probe). Infolgedessen gehen Drücke in den Aufnahmepositionen verloren bzw. die Druckverluste werden bei höherer Rohdichte größer.

In vertikaler Richtung ist der Unterschied der mit Messvorrichtung I und II gemessenen Permeabilität von Matten aus MS-Spänen am größten im Vergleich zu den Ergebnissen von Matten aus DS-Spänen, Fasern und Strands. In dieser Richtung, bei einer Rohdichte von ca. 304 kg/m³, ist die mit Messvorrichtung II gemessene Permeabilität ca. 4-fache niedriger als die mit Messvorrichtung I gemessene Permeabilität. Drucksensoren für 10 bar und Genauigkeitsklasse 0,3 standen zur Verfügung, um die Drücke in der Probe zu messen. Bei diesen Drucksensoren liegt die Ungenauigkeit unter 0,03 bar. Zur Messung der Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei dieser Rohdichte wurde eine hohe Durchflussmenge von 22 m³/h (angebrachte Skala) eingestellt, um die Genauigkeit der Drucksensoren zu erreichen. Obwohl die eingestellte Durchflussmenge hoch ist, sind die Drücke an allen Drucksensoren sehr gering. Die Überdrücke der verschiedenen Aufnahmepositionen betragen bei dieser Rohdichte $P_1 = 0,027$ bar, $P_2 = 0,007$ bar, $P_3 = 0,004$ bar, $P_4 = 0,015$ bar, $P_5 = 0,009$ bar und $P_6 = 0,004$ bar, da die Matten aus MS-Spänen sehr permeabel sind. Da die gemessenen Drücke in der Probe von Matten aus MS-Spänen bei niedriger Rohdichte klein sind, war ein relativ großer Messfehler zu erwarten. Daher wurden die 10 bar-Drucksensoren mit einem 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer der Genauigkeitsklasse 1 überprüft (Tabelle 9). Alle 10 bar-Drucksensoren und der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer wurden an ein geschlossenes System angeschlossen und alle Druckwerte gleichzeitig aufgenommen. Der Luftdruck wurde zuerst bei gleichen Drücken von P_1 bis P_6 , die bei der Messung der Permeabilität von Matten aus MS-Spänen mit einer Rohdichte von 304 kg/m³ aufgenommen wurden, geregelt, um die Permeabilität aus den aufgenommenen Druckwerten der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer als zuverlässige Referenzdrücke erneut zu berechnen. Zur erneuten Berechnung der Permeabilität wurden die Druckwerte ($P_1 = 0,026$ bar, $P_2 = 0,007$ bar, $P_3 = 0,004$ bar, $P_4 = 0,015$ bar, $P_5 = 0,009$ bar und $P_6 = 0,005$ bar) der aufgenommenen Drücke der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer verwendet (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9 zeigt einen Vergleich der Messwerte aller 10 bar-Drucksensoren mit den Anzeigewerten des 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmers. Der Unterschied ist sehr gering.

Tabelle 9: Vergleich der Messwerte aller 10 bar-Drucksensoren ($P_1 - P_6$) mit den Anzeigewerten des 0,1 bar- Differenzdruckaufnehmers (Die hinterlegten Felder sind die gemessenen Druckwerte der 10 bar-Drucksensoren (P_1-P_6) und die Anzeigewerte der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer zur erneuten Berechnung der Permeabilitätswerte)

Differenzdruckaufnehmer 0,1 bar (bar)	Drucksensoren 10 bar (bar)					
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,003	0,003
0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004
0,007	0,007	0,007	0,004	0,008	0,006	0,007
0,009	0,010	0,009	0,009	0,010	0,009	0,009
0,015	0,015	0,016	0,014	0,015	0,015	0,014
0,026	0,027	0,027	0,026	0,027	0,027	0,027
0,035	0,036	0,036	0,035	0,035	0,035	0,035
0,040	0,041	0,040	0,041	0,041	0,041	0,041
0,050	0,051	0,052	0,050	0,052	0,051	0,049
0,061	0,062	0,062	0,062	0,063	0,061	0,062
0,071	0,072	0,072	0,073	0,073	0,072	0,072
0,080	0,081	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082
0,090	0,092	0,092	0,092	0,093	0,092	0,092
0,100	0,103	0,104	0,103	0,103	0,102	0,102

Tabelle 10 zeigt einen Vergleich der erneut berechneten Permeabilität aus Druckwerten der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer mit der berechneten Permeabilität der 10 bar-Drucksensoren und den Ergebnissen der Messvorrichtung I. Die berechneten Permeabilitäten aus den Druckwerten der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer sind kaum höher als die berechneten Permeabilitäten aus den Druckwerten der 10 bar-Drucksensoren. Damit wird bestätigt, dass die Drucksensoren die niedrigen Drücke mit hinreichender Genauigkeit messen können. Die Messfehler beeinflussen die berechnete Permeabilität bei der Messung der niedrigen Drücke kaum und können daher vernachlässigt werden.

Tabelle 10: Vergleich der berechneten Permeabilität aus den Druckwerten der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer mit der berechneten Permeabilität aus den Druckwerten der 0,1 bar-Drucksensoren und den Ergebnissen der Messvorrichtung I

Methode	Horizontale Permeabilität (m ²)	Vertikale Permeabilität (m ²)
Messvorrichtung I	1,25E-09	5,97E-10
Messvorrichtung II Berechnung aus den Messwerten der 10 bar-Drucksensoren	1,08E-09	1,53E-10
Messvorrichtung II Berechnung aus den Messwerte der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer	1,09E-09	1,69E-10

Außerdem wurden die 10 bar-Drucksensoren mit dem 1 bar-Differenzdruckaufnehmer der Genauigkeitsklasse 1 bei einem Druck von 0,1 bar bis 1,0 bar überprüft. Die Druckwerte der 10 bar-Drucksensoren stimmen mit den Druckwerten der 1 bar-Differenzdruckaufnehmer überein (Abbildung 106).

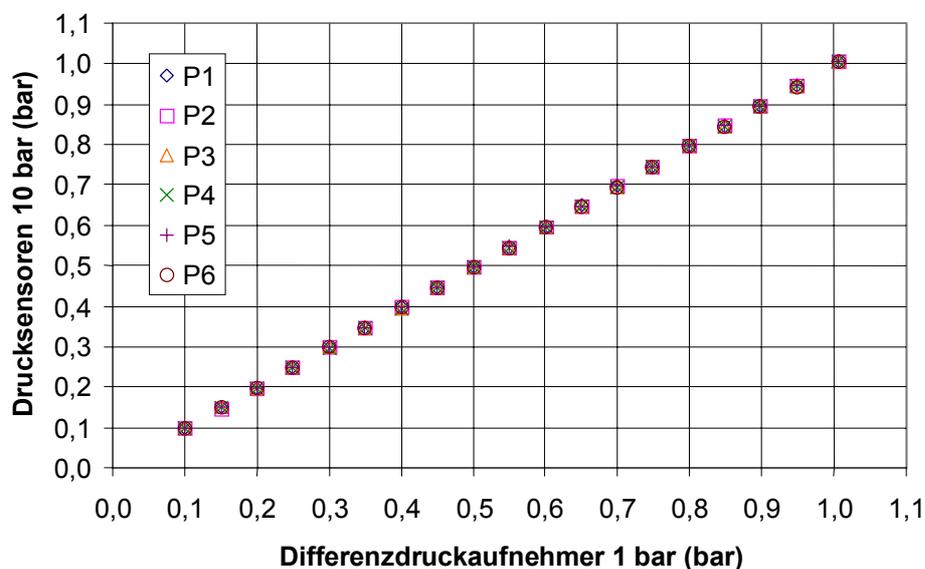


Abbildung 106: Vergleich der Druckwerte der 10 bar-Drucksensoren mit den Druckwerten der 1 bar-Differenzdruckaufnehmer

Abbildung 107 zeigt die simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus MS-Spänen bei einer Rohdichte von 304 kg/m³ und 636 kg/m³. Aus der Abbildung geht hervor, dass bei niedriger Rohdichte mehr Luft im oberen Bereich der Probe in horizontaler Richtung seitlich ausströmt. Es ist damit zu begründen, dass bei niedriger Rohdichte die Luft im oberen

Bereich der Probe seitlich ausströmt, bevor sie in vertikaler Richtung in den unteren Bereich gelangt. Infolgedessen ist die mit Messvorrichtung II gemessene vertikale Permeabilität niedriger als die mit Messvorrichtung I gemessene vertikale Permeabilität. Bei hoher Rohdichte strömt im oberen Bereich der Probe nur wenig mehr Luft als im unteren Bereich seitlich aus, da der Widerstand in horizontaler Richtung bei hoher Rohdichte größer wird. Dadurch strömt relativ mehr Luft in vertikaler Richtung. Infolgedessen ist die mit Messvorrichtung II gemessene vertikale Permeabilität nur geringfügig niedriger als die mit Messvorrichtung I gemessene vertikale Permeabilität. Somit ist der Unterschied der vertikalen Permeabilität zwischen beiden Methoden gering.

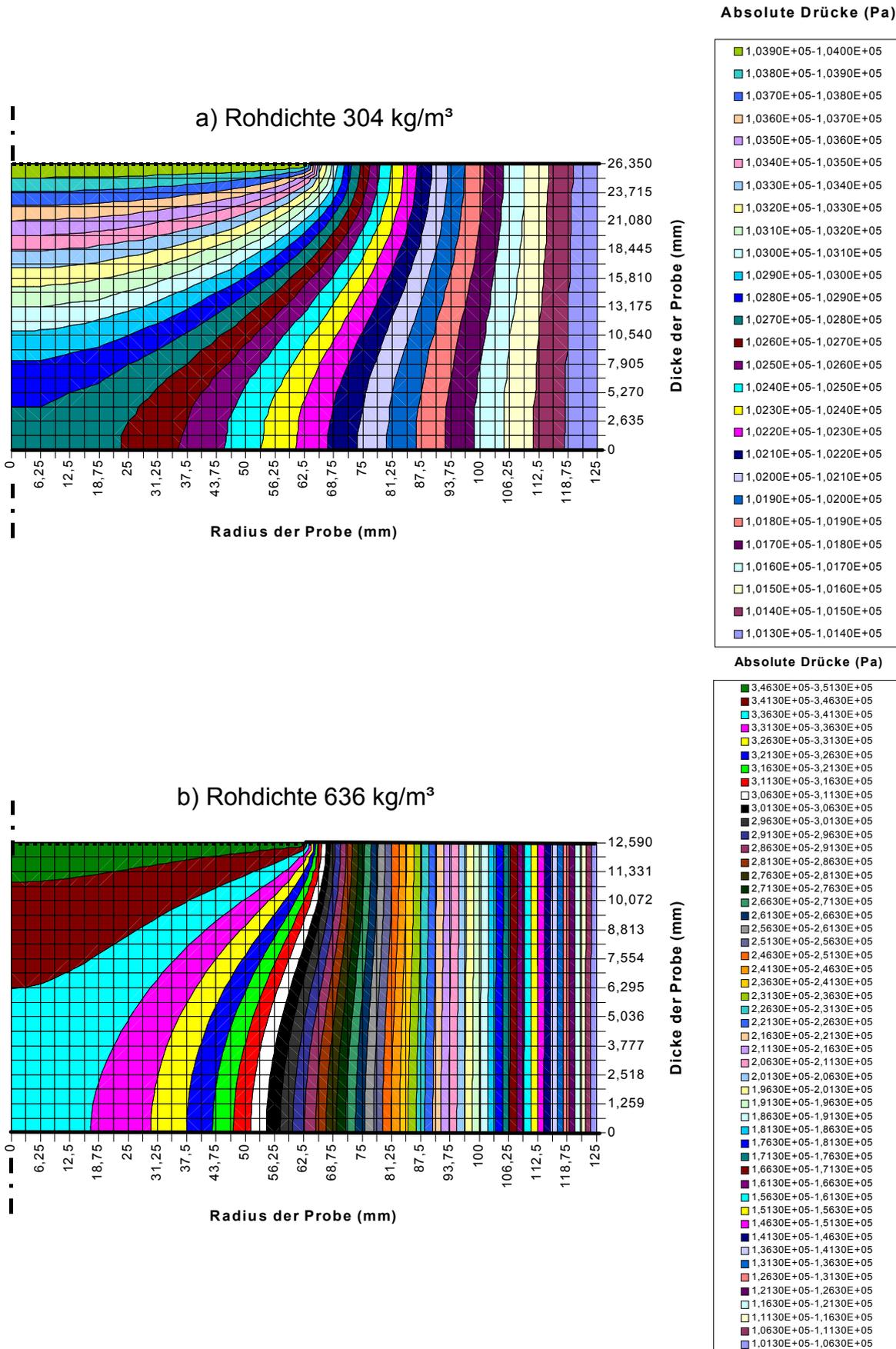


Abbildung 107: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus MS-Spänen bei einer Rohdichte von 304 kg/m³ und 636 kg/m³

9.2.2.3. Permeabilität von Matten aus DS-Spänen

In horizontaler Richtung stimmen die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz bei einer Rohdichte von ca. 250 bis 550 kg/m³ mit den Ergebnissen der Messvorrichtung I überein (Abbildung 92). Bei diesen Rohdichten sind die berechneten Permeabilitätswerte nach dem zweiten Modellansatz in vertikaler Richtung geringfügig niedriger als die Permeabilitäten (Abbildung 93), die mit Messvorrichtung I bestimmt wurden. Abbildung 108 zeigt die simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus DS-Spänen bei einer Rohdichte von 283 kg/m³ und 675 kg/m³. Es ist zu vermuten, dass die Luft im oberen Bereich der Probe geringfügig mehr als im unteren Bereich der Probe strömt. Infolgedessen ist die vertikale Permeabilität, die mit Messvorrichtung II bestimmt wurde, geringer.

Wiederum sind die berechnete horizontale und vertikale Permeabilität nach dem zweiten Modellansatz ab einer Rohdichte von ca. 550 kg/m³ geringfügig höher als die mit Messvorrichtung I gemessene Permeabilität in beiden Richtungen. Die Tendenz des Unterschiedes zwischen beiden Methoden (Messvorrichtung I und II) mit zunehmender Rohdichte ab 550 kg/m³ wird größer. Es ist zu vermuten, dass der Drucksensor durch Verdichtung von feinen Spänen bei hoher Rohdichte verschlossen wird (siehe Abschnitt 9.2.2.5). Außerdem entsteht, wie schon beschrieben, eine Art "Kanal" beim Auflegen des Thermoelementes zur Messung der Temperatur auf die Probe. Infolgedessen gehen die Drücke in den Aufnahmepositionen verloren bzw. die Druckverluste werden bei höherer Rohdichte größer. Dadurch ist der Unterschied der Permeabilität zwischen beiden Methoden bei höherer Rohdichte größer.

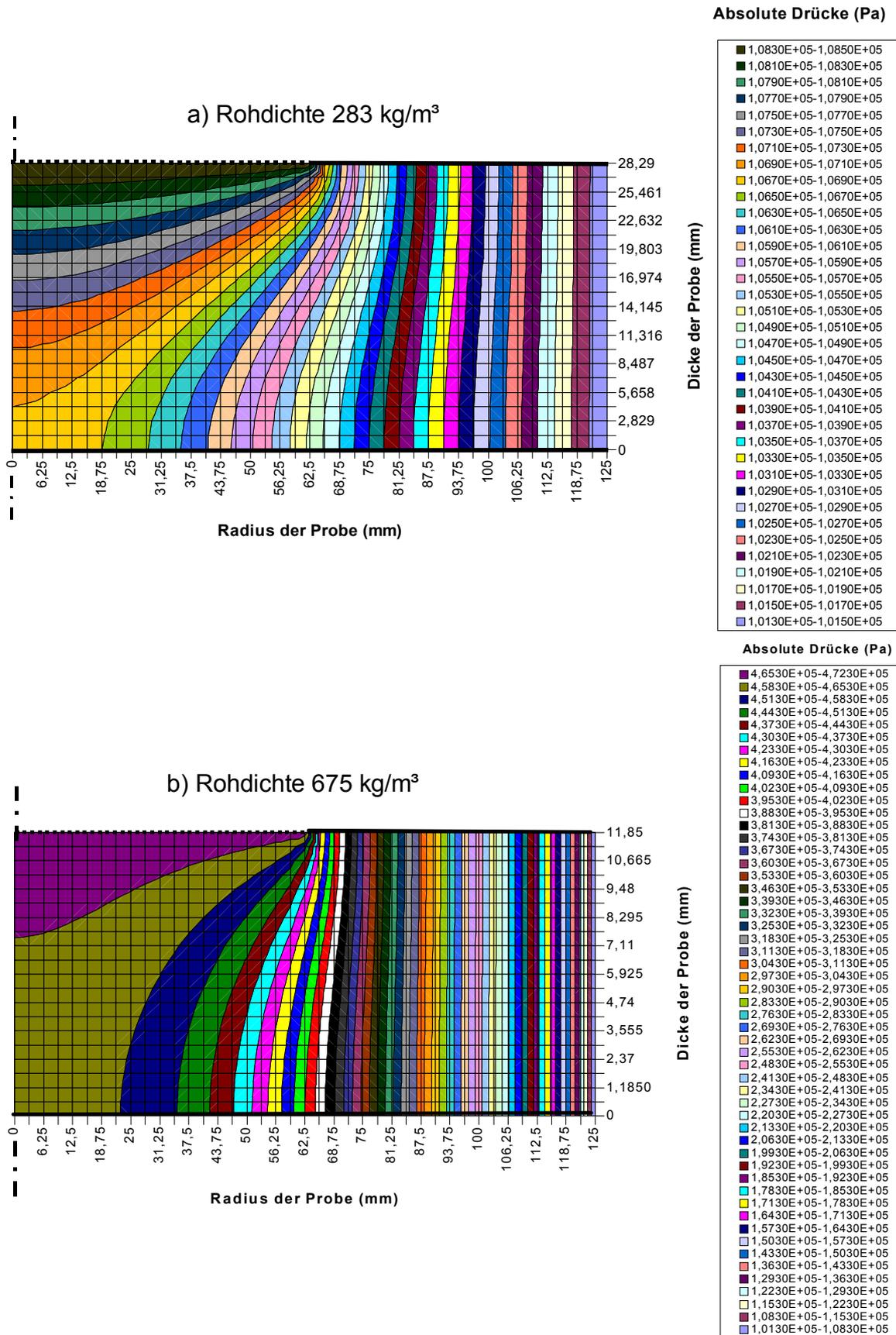


Abbildung 108: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus DS-Spänen bei einer Rohdichte von 283 kg/m³ und 675 kg/m³

9.2.2.4. Permeabilität von Matten aus Strands

Die Abweichung der berechneten Permeabilität von Matten aus Strands der zweiten Messung zur ersten Messung ist größer als bei den Ergebnissen der Matten aus DS-, MS-spänen und Fasern (Abbildung 96 und Abbildung 97). Beim Streuen von Matten aus Strands ist es schwierig, die Strands gleichmäßig zu verteilen, da Strands große Abmessungen aufweisen. Möglicherweise ist die Abweichung der Permeabilität der Matten aus Strands nicht nur auf das heterogene Material, sondern auch auf die Druckbedingungen am Druckaufnehmer zurückzuführen, der durch die großflächigen Strands isoliert wird oder auch günstig in einem "Strömungskanal" liegen kann.

Die berechneten Permeabilitätswerte von Matten aus Strands stimmen mit den Ergebnissen der konventionellen Methode überein. Allerdings sind die berechneten Permeabilitätswerte in beiden Richtungen ab einer Rohdichte von ca. 550 kg/m^3 geringfügig höher als die der konventionellen Methode. Die Tendenz des Unterschiedes wird mit zunehmender Rohdichte ab 550 kg/m^3 größer. Durch die Verdichtung und die großflächigen Strands bei hoher Rohdichte wird der Drucksensor möglicherweise noch mehr isoliert (siehe Tabelle 11). Es ist schwierig, die Strands gleichmäßig in die Anlage zu streuen und zu verdichten. Durch die Verdichtung ergeben sich geringfügig unterschiedliche Berührungspunkte zu den Pressplatten mit entsprechend unterschiedlicher Luftströmung, da der Presskolben über keine kardanische Befestigung zur Maschine verfügt, sondern starr angebracht ist und damit kein Flächenausgleich zwischen Pressplatten und Strands stattfinden kann. Außerdem könnte es sein, dass, wie schon beschrieben, auch hier beim Auflegen des Thermoelements zur Messung der Temperatur auf der Probe eine Art "Kanal" entsteht, der dann wahrscheinlich leichter durchströmt wird. Die Luft sucht generell den Weg des geringsten Widerstandes, um einzuströmen. Infolgedessen gehen die Drücke in den Aufnahmepositionen verloren bzw. die Druckverluste werden bei höherer Rohdichte größer. Dadurch ist der Unterschied der Permeabilität zwischen beiden Methoden bei höherer Rohdichte größer.

Abbildung 109 zeigt die simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus Strands bei einer Rohdichte von 300 kg/m^3 und 620 kg/m^3 . Bei niedriger Rohdichte strömt die Luft im oberen Bereich der Probe in horizontaler Richtung seitlich mehr aus, d.h. die Luft strömt auch in vertikaler Richtung weniger als bei der Messung der Permeabilität von Matten aus MS-Spänen. Die horizontale Permeabilität von Matten aus Strands bei einer Rohdichte von ca. 300 kg/m^3 ist so groß wie bei den Matten aus MS-Spänen (Abbildung 76 und Abbildung 98). Da die Luft im oberen Bereich der Probe in horizontaler Richtung seitlich mehr ausströmt, reduziert sich die vertikale Permeabilität, die mit Messvorrichtung II bestimmt wurde, im Vergleich zu der eindimensionalen Messung. Dieser Einfluss tritt bei den Matten

aus MS-Spänen stärker als bei den Matten aus Strands auf, da die vertikale Permeabilität von Matten aus Strands durch die größere Oberfläche der Späne gering ist. Infolgedessen ist der Unterschied der vertikalen Permeabilität von Matten aus MS-Spänen groß im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I (Abbildung 95). Der Unterschied der vertikalen Permeabilität von Matten aus Strands ist gering im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode (Abbildung 97).

Bei hoher Rohdichte strömt in vertikaler Richtung mehr Luft in die Probe von Matten aus Strands, da der Widerstand in horizontaler Richtung durch die Verdichtung und die größere Oberfläche der Strands größer wird.

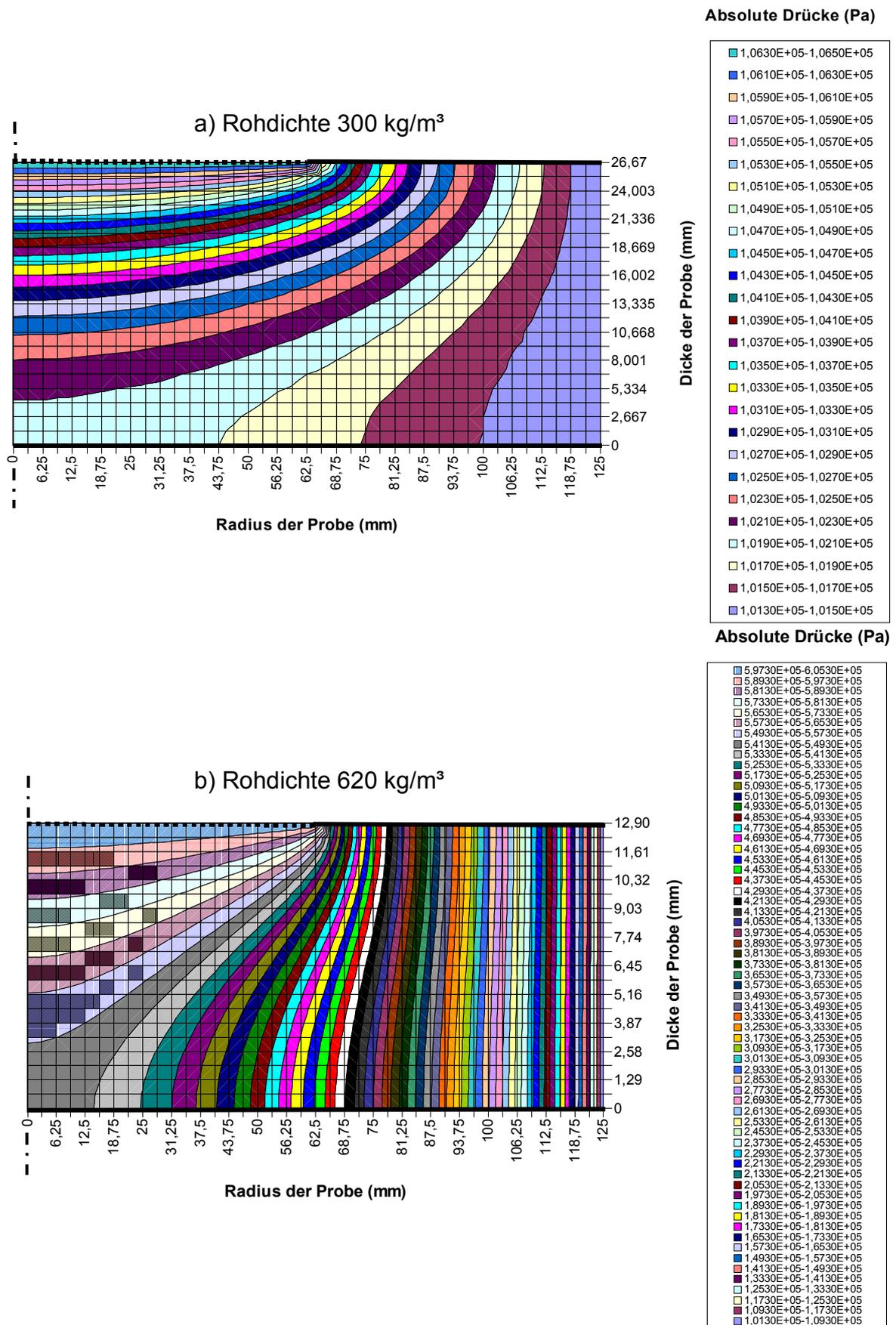


Abbildung 109: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus Strands bei einer Rohdichte von 300 kg/m³ und 620 kg/m³

9.2.2.5. Vergleich der gemessenen Drücke mit den simulierten Drücken nach dem zweiten Modellansatz

Zur Simulation der Druckverteilung in der Probe nach dem zweiten Modellansatz wurde der Messpunkt (P_1) für die Anfangsbedingung verwendet. In Tabelle 11 sind die gemessenen Drücke an den verschiedenen Messpunkten im Vergleich zu den simulierten Drücken dargestellt. Bei niedriger Rohdichte sind die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken gering, bei hoher Rohdichte werden sie größer. Es ist zu vermuten, dass durch die Verdichtung die Drucksensoren durch die Matten isoliert werden. Infolgedessen sind die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Drücken größer. Dies wäre auch eine Ursache dafür, dass die in beiden Richtungen bei hoher Rohdichte berechnete Permeabilität, die mit Messvorrichtung II bestimmt wurde, höher ist als die Ergebnisse der Messvorrichtung I bzw. der konventionellen Methode.

Die größte Abweichung zwischen den gemessenen und den simulierten Drücken bei hoher Rohdichte liegt bei den Matten aus Strands, da die Drucksensoren durch die Verdichtung und die großflächigen Strands noch stärker isoliert werden. Diese Erscheinung tritt an den einzelnen Drucksensoren zufällig auf.

Tabelle 11: Vergleich der gemessenen Drücke bei verschiedenen Messpunkten von Matten aus DS-, MS-Spänen, Fasern und Strands mit den simulierten Drücken nach dem zweiten Modellansatz (Lage der Drucksensoren siehe Abbildung 44)

Materialien	Rohdichte (kg/m ³)	Messpunkte	Gemessene absolute Drücke (Pa)	Simulierte absolute Drücke (Pa)	Abweichung (%)
Fasern	200	P ₁	1,126E+05	1,126E+05	0,000
		P ₂	1,062E+05	1,068E+05	0,584
		P ₃	1,044E+05	1,045E+05	0,096
		P ₄	1,094E+05	1,092E+05	-0,183
		P ₅	1,070E+05	1,071E+05	0,093
		P ₆	1,041E+05	1,041E+05	0,000
	606	P ₁	4,497E+05	4,497E+05	0,000
		P ₂	3,447E+05	3,473E+05	0,754
		P ₃	2,855E+05	2,782E+05	-2,553
		P ₄	4,459E+05	4,449E+05	-0,235
		P ₅	4,022E+05	4,035E+05	0,318
		P ₆	2,788E+05	2,781E+05	-0,269
DS-Späne	283	P ₁	1,085E+05	1,085E+05	0,000
		P ₂	1,043E+05	1,048E+05	0,479
		P ₃	1,028E+05	1,033E+05	0,516
		P ₄	1,068E+05	1,064E+05	-0,346
		P ₅	1,050E+05	1,051E+05	0,057
		P ₆	1,026E+05	1,031E+05	0,487
	675	P ₁	4,690E+05	4,690E+05	0,000
		P ₂	3,445E+05	3,527E+05	2,380
		P ₃	2,868E+05	2,810E+05	-2,022
		P ₄	4,603E+05	4,540E+05	-1,373
		P ₅	4,067E+05	4,023E+05	-1,079
		P ₆	2,604E+05	2,800E+05	7,508
MS-Späne	304	P ₁	1,040E+05	1,040E+05	0,000
		P ₂	1,020E+05	1,025E+05	0,510
		P ₃	1,017E+05	1,020E+05	0,275
		P ₄	1,028E+05	1,026E+05	-0,156
		P ₅	1,022E+05	1,023E+05	0,068
		P ₆	1,017E+05	1,018E+05	0,079
	636	P ₁	3,484E+05	3,484E+05	0,000
		P ₂	2,643E+05	2,662E+05	0,721
		P ₃	2,084E+05	2,123E+05	1,881
		P ₄	3,399E+05	3,305E+05	-2,760
		P ₅	2,908E+05	2,917E+05	0,306
		P ₆	1,716E+05	2,107E+05	22,756
Strands	300	P ₁	1,065E+05	1,065E+05	0,000
		P ₂	1,024E+05	1,036E+05	1,133
		P ₃	1,015E+05	1,025E+05	1,005
		P ₄	1,021E+05	1,020E+05	-0,137
		P ₅	1,017E+05	1,018E+05	0,079
		P ₆	1,013E+05	1,015E+05	0,237
	620	P ₁	6,053E+05	6,053E+05	0,000
		P ₂	5,180E+05	4,283E+05	-17,324
		P ₃	2,631E+05	3,325E+05	26,378
		P ₄	5,327E+05	5,254E+05	-1,376
		P ₅	4,379E+05	4,523E+05	3,286
		P ₆	2,765E+05	3,191E+05	15,410

9.2.3. Materialeinfluss auf die Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte

Mit den berechneten Permeabilitätswerten nach dem zweiten Modellansatz, die mit Messvorrichtung II gemessen wurden, werden die bisherigen Ergebnisse (Denisov et al. 1975, Hata 1993, Haselein 1998, v. Haas 1998, Heinemann 1999, Shang 1999) und die Ergebnisse der Messvorrichtung I dahingehend bestätigt, dass die Permeabilität in horizontaler und vertikaler Richtung mit zunehmender Rohdichte abnimmt.

OSB ist in senkrechter Richtung am wenigsten permeabel im Vergleich zu den MS-, DS-Spänen und Fasern (v. Haas 1998), da eine größere Spanfläche zu einer geringeren Permeabilität führt. Mit dieser Arbeit wird auch bestätigt, dass die Permeabilität der Matten aus Strands in vertikaler Richtung ab einer Rohdichte von 300 kg/m^3 am niedrigsten ist.

9.2.4. Einfluss der Strömungsrichtung im Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität

Mit den Ergebnissen der Messvorrichtung II werden die Ergebnisse der Messvorrichtung I und die Ergebnisse von v. Haas (1998) bestätigt, dass das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität bei Platten aus DS-Spänen und Fasern mit zunehmender Rohdichte abnimmt. Im Gegensatz dazu nimmt bei Haselein (1998) das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität beim Fasermaterial mit zunehmender Rohdichte zu.

9.2.5. Grenzen der Messvorrichtung II und damit verbundene Erweiterung des Forschungsbedarfs

- Der Probendurchmesser war so gewählt, dass sich bei einer durchschnittlichen Strandlänge von ca. 70 mm und ausreichender Überlappung einzelner Strands ein reproduzierbares und realitätsnahes Mattengefüge ergibt. Aus diesem Grund wurde ein Verdichtungszyylinder mit 250 mm Durchmesser gewählt. Um die Probe mit einem Durchmesser von 250 mm bei einer Temperatur von 20 °C und einer Feuchte von 14 % bis auf eine Rohdichte von 800 kg/m^3 zu verdichten, reicht die Kraft der Prüfmaschine von 250 kN nicht aus, da ein spezifischer Druck von 23 N/mm^2 notwendig wäre. Bei einem Probendurchmesser von 250 mm ergibt sich hieraus eine Kraft von 1129 kN.
- Bei der Messung der Permeabilität von Matten aus Strands wäre eine Orientierung der Strands, wie in der industriellen Praxis üblich, bei runden Proben schwer reproduzierbar.

Beim Streuen von Matten aus Strands in die Anlage sind die Strands schwierig gleichmäßig zu verteilen. Außerdem wäre die Berücksichtigung der Strandausrichtung hinsichtlich der Messtechnik und Berechnung erheblich aufwendiger. Um die Permeabilität von Matten aus Strands mit Berücksichtigung der Strandorientierung messen zu können, soll eine rechtwinklige Probe hergestellt werden. Dazu benötigt man einen Modellansatz zur Berechnung der Permeabilität in drei Dimensionen.

- Bei der kontinuierlichen Permeabilitätsmessung mit Messvorrichtung II tritt das gleiche Problem wie bei Messvorrichtung I auf, dass bei niedriger Rohdichte eine hohe Durchflussmenge und ein niedriger Druck zu verzeichnen ist. Durch die Verdichtung ändert sich der Widerstand der Probe, so dass bei hoher Rohdichte eine niedrige Durchflussmenge und ein hoher Druck auftritt. Drucksensoren für 10 bar und Genauigkeitsklasse 0,3 standen zur Verfügung. Obwohl die Ungenauigkeit dieser Drucksensoren unter 0,03 bar liegt, können diese Drucksensoren niedrige Drücke unter 0,03 bar mit hinreichender Genauigkeit messen (siehe Abschnitt 9.2.2.2). Um die Genauigkeit der Drucksensoren bei der Messung der Permeabilität von niedriger Rohdichte zu erreichen, wurde die Durchflussmenge bis ca. 23 m³/h (angebrachte Skala) geregelt. Ist allerdings die eingestellte Durchflussmenge zu hoch, so sind die Drücke an allen Drucksensoren sehr gering, besonders bei der Messung der Matten aus MS-Spänen bei niedriger Rohdichte (z.B. wurde bei der Messung der Permeabilität von Matten aus MS-Spänen mit einer Rohdichte von 304 kg/m³ die Durchflussmenge 22 m³/h (angebrachte Skala) eingestellt; die Überdrücke der verschiedenen Aufnahmepositionen betragen bei dieser Rohdichte $P_1 = 0,027$ bar, $P_2 = 0,007$ bar, $P_3 = 0,004$ bar, $P_4 = 0,015$ bar, $P_5 = 0,009$ bar und $P_6 = 0,004$ bar). Die berechneten Permeabilitätswerte bei verschiedenen Durchflussmengen zeigten geringe Unterschiede. Diese Unterschiede sind jedoch auf die relativ hohen Durchflussmengen zurückzuführen. Infolgedessen ist der Luftstrom in der Probe nicht vollständig laminar. Mit der Umrechnung der Daten aus Messvorrichtung I ist der Luftstrom in der Probe laminar, wenn die Durchflussmenge nicht mehr als 2 m³/h beträgt. Bei dieser Durchflussmenge sind niedrige Drücke von Matten aus MS-Spänen bei niedriger Rohdichte bis zu 0,0001 bar zu erwarten.
- Bei den verdichteten Fasermatten tritt in der Anlage, durch die Langlöcher bedingt, eine Querdehnung bis ca. 2 mm auf (Abbildung 110). Ebenfalls ändert sich die Rohdichte der Probe. Außerdem reduziert sich die Rohdichte durch Feuchteverlust (bis zu 5 %) in der Probe bei der Messung der Permeabilität, da die Gleichgewichtsfeuchte der Luft niedriger als die Feuchte der Probe ist. Der höhere Feuchteverlust ist auf die relativ hohe Durchflussmenge zurückzuführen. Die Reduzierung der Rohdichte durch Querdehnung und Feuchteverlust wurde erneut berechnet und ist in der Abbildung 111 und Abbildung 112 dargestellt. Drei Proben von Matten aus Fasern wurden bei der zweiten Messung mit

Messvorrichtung II zur erneuten Berechnung der Permeabilität unter Berücksichtigung der Querdehnung und des Feuchteverlustes mittels Regressionsverfahren analysiert. Die Regressionsfunktionen wurden verwendet, um die Permeabilität bei gleichen Rohdichten zu berechnen und zu vergleichen (Tabelle 12). Aus der Tabelle 12 geht hervor, dass sich die Rohdichte durch Querdehnung und Feuchteverlust der Probe reduziert und dadurch die Permeabilität bei gleicher Rohdichte vermindert. Die Verminderung der Permeabilität bei gleicher Rohdichte durch Querdehnung ist geringer als durch den Feuchteverlust (von der Anfangsfeuchte bis zur Feuchte des Mittelwerts und zur Endfeuchte). In dieser Arbeit diente der Mittelwert zwischen der Anfangs- und Endfeuchte zur Berechnung der Rohdichte. Durch beides, Querdehnung und Feuchteverlust (von Anfangsfeuchte bis zur Feuchte des Mittelwerts), wird die Verminderung der Permeabilität bei gleicher Rohdichte höher. Die Verminderung der Permeabilität erhöht sich mit zunehmender Rohdichte. Allerdings ist die Verminderung der Permeabilität durch beides, Querdehnung und Feuchteverlust (von der Anfangsfeuchte bis zur Feuchte des Mittelwerts), bis zum maximal 1,2-fachen (bei der Extrapolation bis zu einer Rohdichte von 900 kg/m^3), sehr gering. Um den Feuchteverlust in der Probe bei der Messung der Permeabilität zu vermeiden, muss konditionierte Luft verwendet werden. Für die Matten aus DS-, MS-Spänen und Strands ist der Einfluss der Querdehnung der Probe durch Verdichtung auf die Permeabilität sehr gering.

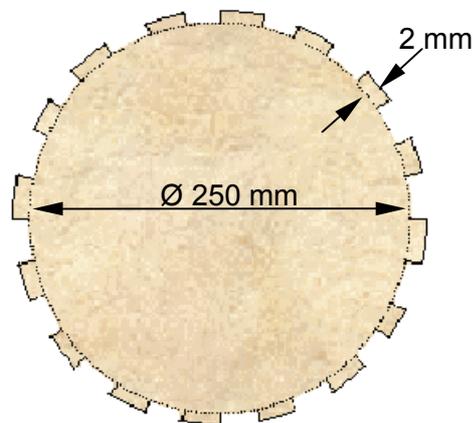


Abbildung 110: Querdehnung von Matten aus Fasern durch Verdichtung

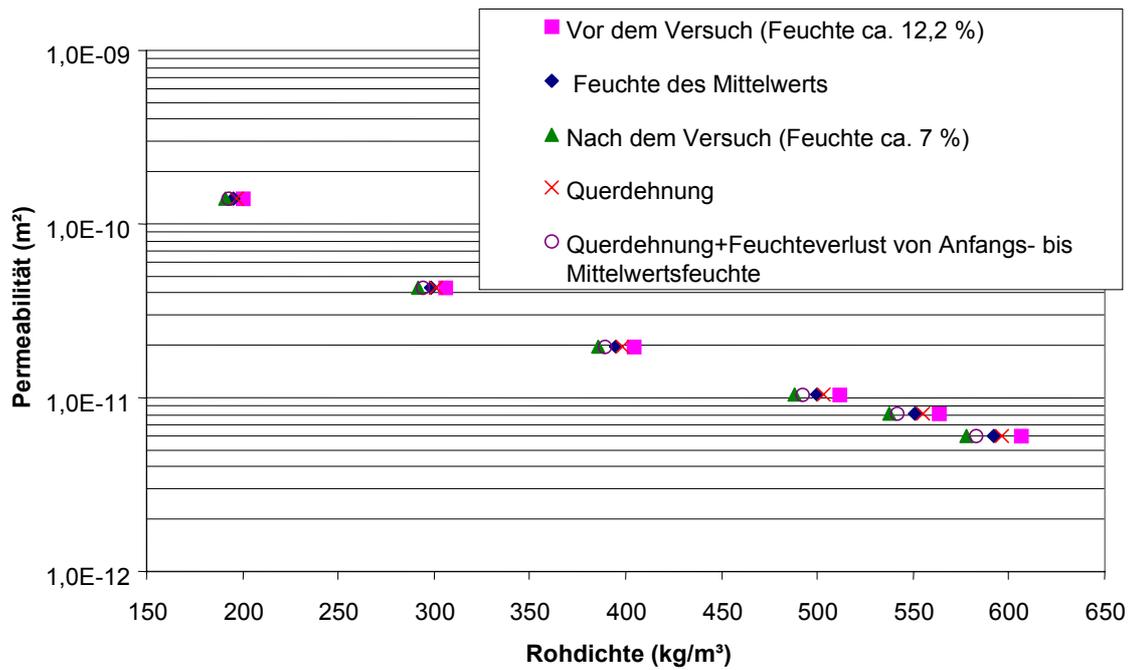


Abbildung 111: Reduzierung der Rohdichte durch Querdehnung und Feuchteverlust bei Messung der Permeabilität in horizontaler Richtung von einer Matte aus Fasern

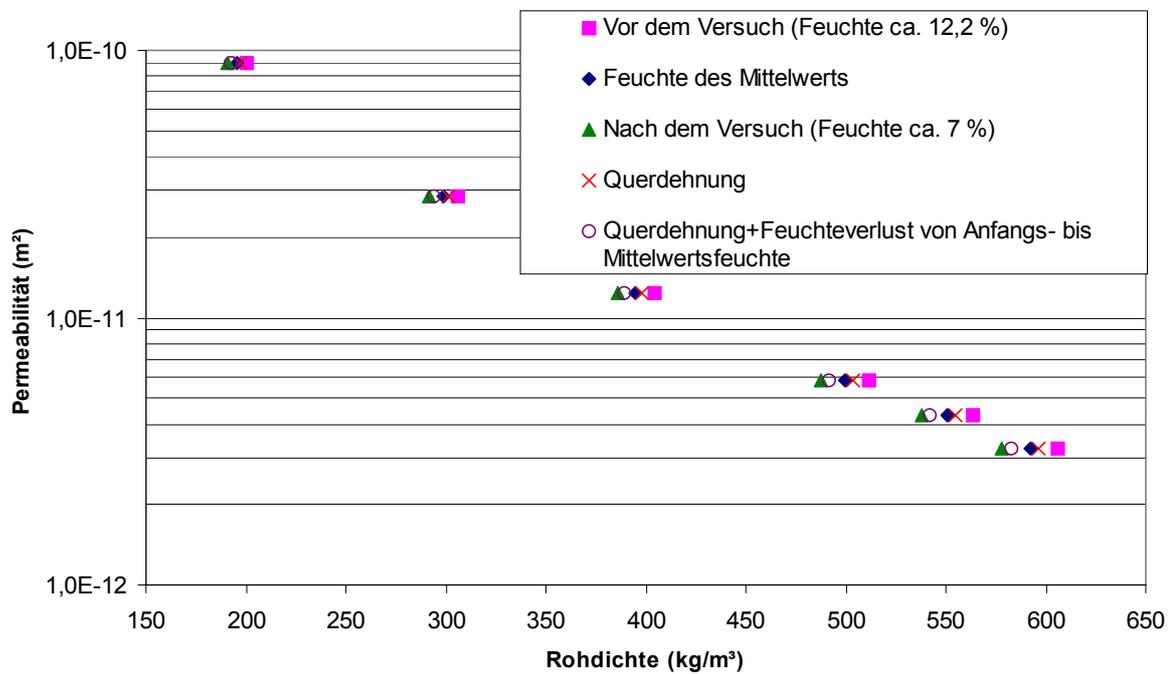


Abbildung 112: Reduzierung der Rohdichte durch Querdehnung und Feuchteverlust bei Messung der Permeabilität in vertikaler Richtung von einer Matte aus Fasern

Tabelle 12: Verminderung der horizontalen (K_h) und vertikalen (K_v) Permeabilität von Matten aus Fasern durch Querdehnung und Feuchteverlust der Probe

Rohdichte (kg/m^3)	Anfangsfeuchte ca. 12,2 % (Standard)		Feuchte des Mittelwerts		Feuchteverlust bis zu 5% (Endfeuchte ca.7%)		Querdehnung von ca. 2 mm		Querdehnung von ca. 2 mm und Feuchteverlust des Mittelwerts	
	K_h (m^2)	K_v (m^2)	K_h (m^2)	K_v (m^2)	K_h (m^2)	K_v (m^2)	K_h (m^2)	K_v (m^2)	K_h (m^2)	K_v (m^2)
200	1,40E-10	8,80E-11	1,31E-10	8,30E-11	1,23E-10	7,81E-11	1,34E-10	8,44E-11	1,26E-10	7,97E-11
300	4,65E-11	3,03E-11	4,37E-11	2,85E-11	4,10E-11	2,67E-11	4,46E-11	2,90E-11	4,18E-11	2,73E-11
400	2,09E-11	1,33E-11	1,96E-11	1,24E-11	1,84E-11	1,16E-11	2,00E-11	1,27E-11	1,88E-11	1,18E-11
500	1,10E-11	6,58E-12	1,03E-11	6,09E-12	9,57E-12	5,62E-12	1,05E-11	6,24E-12	9,80E-12	5,77E-12
600	6,33E-12	3,47E-12	5,89E-12	3,19E-12	5,47E-12	2,91E-12	6,02E-12	3,27E-12	5,60E-12	3,00E-12
650	4,92E-12	2,56E-12	4,57E-12	2,34E-12	4,23E-12	2,13E-12	4,67E-12	2,41E-12	4,34E-12	2,20E-12

- Die Prüfzeit der Permeabilitätsmessung mit der Messvorrichtung II bei einer Rohdichte von 200 bis ca. 680 kg/m^3 ist wesentlich kürzer als bei der Messvorrichtung I und betrug je Probe bis zu 30 Minuten. Ein Zeitnachteil liegt bei der Berechnung der Permeabilität. Die Berechnungszeit nach dem zweiten Modellansatz ist von der Verfeinerung des eingegebenen Gitters und der Computerleistung abhängig. Bei Einteilung des Gitters in 80 Spalten und 40 Zeilen betrug die Berechnungszeit bei niedriger Rohdichte maximal 5 Minuten. Bei hoher Rohdichte wird die Berechnungszeit länger und betrug ca. 10 Minuten, da der Druckunterschied zwischen dem Druck vor der Probe und dem Atmosphäredruck größer wird. Deshalb braucht das Programm mehr Zeit, um den Druck in der Probe zu simulieren. Das Simulationsprogramm muss weiter entwickelt werden, um den Berechnungsvorgang zu beschleunigen.

10. Zusammenfassung

Bei der Holzwerkstoffherstellung ist die Optimierung des Heißpressvorgangs von wesentlicher technologischer und ökonomischer Bedeutung. Das Heißpressen stellt einen kostenintensiven und komplexen Abschnitt in der Holzwerkstoffproduktion dar. Somit sind die Minimierung des Energieeinsatzes, die Erhöhung der Anlagenkapazität durch Presszeitverkürzung, eine optimale Ausnutzung der einzusetzenden Rohstoffe Holz und Klebharze sowie die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der hergestellten Holzwerkstoffe anzustreben. Limitierender Faktor beim Pressen ist die Aushärtung der Klebharze in der Plattenmittelschicht, in der ein Temperaturniveau von knapp über 100 °C erreicht werden sollte. Um möglichst kurze Presszeiten zu erzielen, muss die Mattenmitte möglichst schnell erwärmt werden. Die Permeabilität der Matte ist ein wichtiger Parameter für den konvektiven Wärmetransport; Wasser verdampft in den Deckschichten, strömt in die Plattenmitte und kondensiert dort. Somit stellt die vertikale Permeabilität einen maßgebenden Parameter bei der Erwärmung der Mittelschicht in der Heißpresse dar (Bolton und Humphrey 1994, Frühwald et al. 1999, v. Haas 1998). Zur Vermeidung von Dampfplatzern wird gegen Ende des Pressvorganges ein möglichst hoher Gas- und Dampfdruckabbau über die Schmalkanten der Platte angestrebt. Ein niedriger Gasdruck in der Platte vermindert die Gefahr von Dampfplatzern. Somit stellt die horizontale Permeabilität (parallel zur Plattenebene) einen maßgebenden Parameter für den Dampfdruckabbau beim Verlassen der Platten aus der Presse dar. Die horizontale Permeabilität ist zudem auch zu Beginn des Pressvorganges von Bedeutung, da hier die Matte beim Verdichten entlüftet werden muss.

Die Einflussfaktoren auf die Permeabilität sind die Materialien (Deckschicht (DS)-, Mittelschicht (MS)-Späne, Fasern und Strands), Feuchte der Materialien, Klebstoffanteil, Partikelgröße und Größenverteilung sowie die Temperatur des Durchflussmediums. Die Kenntnis der Permeabilität in Abhängigkeit von diesen Faktoren erlaubt es, den Pressvorgang hinsichtlich einer Reduzierung der Presszeit und der Sicherung der Produktqualität (Querzugfestigkeit, Vermeidung von Dampfplatzern) gezielt zu verbessern. Diese Kenntnisse sind von besonderer Bedeutung, wenn in der Praxis rasch wechselnde Rohstoffe eingesetzt und die Platten in ihren Eigenschaften, besonders bei der Dichte und dem Dichteprofil, kundenspezifisch gefertigt werden.

Das bisherige Messverfahren für die Permeabilität, das u.a., von v. Haas (1998) und Heinemann (1999) angewendet wurde, gilt als ein sehr zuverlässiges, aber auch sehr aufwendiges Verfahren. Die vertikale und horizontale Permeabilität werden dadurch bestimmt, dass Proben aus verklebten Holzwerkstoffplatten mit gleichmäßigem

Rohdichteprofil ausgeformt und zur Durchflussmessung eingesetzt werden. Für die Plattenherstellung ist ein zeitintensives Pressprogramm notwendig, um ein homogenes Dichteprofil zu erreichen (bis ca. 5 Std.). Für jede zu untersuchende Rohdichte muss eine Platte hergestellt werden. Die Zylinderflächen der hergestellten Proben werden mit Epoxidharz bzw. bei niedrigen Rohdichten mit Silikon abgedichtet und anschließend mittels eines Warmschrumpfschlauches in die Messeinrichtung integriert. Die Durchflussrate durch die Proben wird bestimmt und entsprechend dem Gesetz von Darcy ausgewertet.

Haselein (1998) hat eine ``Schnellmethode`` entwickelt, in der die horizontale und vertikale Permeabilität in einem Verdichtungsversuch bestimmt werden. Das Verfahren basiert auf der Permeabilitätsbestimmung anhand eines mathematischen Modells. Dieses Verfahren kann bisher nur modellhaft bei Matten aus Fasern angewendet werden, liefert aber keine realistischen Ergebnisse.

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei neue Methoden, einschließlich deren versuchstechnische Umsetzung, zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität von Holzwerkstoffen entwickelt. Damit wird eine wesentlich schnellere Messung der Permeabilität gegenüber dem bisherigen ``klassischen`` Verfahren möglich und die Permeabilität, in Abhängigkeit der Dichte, wird an ein und demselben Material gemessen.

Die Messvorrichtung I ist für die eindimensionale kontinuierliche Messung (jeweils getrennt horizontale und vertikale Richtung) der Permeabilität bestimmt. Die Proben (Faser- und Spanmatten) werden in der Anlage auf verschiedene Rohdichten verdichtet und die Permeabilität jeweils in horizontaler bzw. vertikaler Richtung bestimmt. Mit der Messvorrichtung I können aus geometrischen Gründen Matten aus DS- und MS-Spänen sowie Fasern gemessen werden.

Die Messvorrichtung II ist für die zweidimensionale kontinuierliche Messung der Permeabilität vorgesehen. Auch hier werden die Proben auf verschiedene Rohdichten verdichtet. Um die Druckverteilung in der Probe simulieren zu können, wurden die Drücke an ausgewählten Positionen in der Probe gemessen. Die Berechnung der Permeabilitätswerte in horizontaler und vertikaler Richtung für Messvorrichtung II erfolgt auf der Basis zweier Modelle (zwei Modellansätze) computergestützt. Die horizontalen und vertikalen Permeabilitätswerte werden aus einem Versuch gleichzeitig berechnet. Neben Faser- und Spanmatten können mit der Messvorrichtung II auch die horizontale und vertikale Permeabilität von Strandmatten gemessen werden, da der Probenraum ausreichend groß ist.

Mit der Messvorrichtung I wurden die horizontale und vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Feuchten sowie von beleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern mit einem Klebstoffanteil von 10 %

in einem Rohdichtebereich von 250 bis 950 kg/m³ bestimmt. Bei unbeleimten Matten aus MS-Spänen erfolgte diese Messung unter Verwendung verschiedener Spanfraktionen.

Mit der Messvorrichtung II wurden nur die horizontale und vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen, Fasern und Strands in einem Rohdichtebereich von 200 bis 680 kg/m³ ermittelt. Die Ergebnisse aus den beiden Messvorrichtungen wurden mit denen der konventionellen Methode (v. Haas 1998, Heinemann 1999) verglichen.

Entsprechend den Ergebnissen aus Messvorrichtung I nehmen die horizontale und vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern mit zunehmender Rohdichte ab (Abbildung 113 und Abbildung 114). Bei niedriger Rohdichte sind die horizontale und vertikale Permeabilität der MS-Späne höher als die der DS-Späne, diese wiederum höher als die der Fasern. Bei hoher Rohdichte wird der Permeabilitätsunterschied zwischen den Materialien in beiden Richtungen zueinander geringer. Bei hohen Rohdichten (ab ca. 900 kg/m³) sind in horizontaler Richtung Fasermatten am durchlässigsten, gefolgt von den DS- und MS-Spanmatten. Bei hohen Rohdichten (ab ca. 900 kg/m³) sind Fasermatten in vertikaler Richtung am durchlässigsten, gefolgt von MS- und DS-Spanmatten. Alle Materialien sind bei einer Rohdichte ab ca. 350 kg/m³ in horizontaler Richtung durchlässiger als in vertikaler Richtung. Für unbeleimte und beleimte Matten aus DS-Spänen und Fasern nimmt der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen mit zunehmender Rohdichte zu, d.h. das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität nimmt mit zunehmender Rohdichte ab. Durch die Verdichtung bei kleineren Spanabmessungen können sich die Hohlräume zwischen den Materialien verschließen, wodurch die Luftströmung in vertikaler Richtung behindert wird. Infolgedessen nimmt die Permeabilität von unbeleimten und beleimten Matten aus DS-Spänen und Fasern in vertikaler Richtung mit zunehmender Rohdichte stärker ab als in horizontaler Richtung. Dadurch vergrößert sich der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen mit zunehmender Rohdichte. Die Matten aus MS-Spänen sind in vertikaler Richtung über den gesamten Rohdichtebereich wesentlich undurchlässiger als in horizontaler Richtung. Für unbeleimte Matten aus MS-Spänen ist der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen über den gesamten Rohdichtebereich gleichmäßiger. Für beleimte Matten aus MS-Spänen nimmt der Unterschied der Permeabilität mit zunehmender Rohdichte ab, d.h. das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität steigt mit zunehmender Rohdichte. Da durch die Verdichtung der Klebstoff einen Film zwischen den Oberflächen der Späne bildet, können sich die Hohlräume bei Gasbewegung in horizontaler Richtung stärker als in vertikaler Richtung verschließen. Durch Klebstoffzugabe ist die Veränderung des Widerstandes gegen Luftströmung zwischen den Kontaktflächen der MS-Späne in horizontaler Richtung stärker als in vertikaler Richtung. Infolgedessen reduziert sich die Permeabilität von beleimten Matten aus MS-Spänen in horizontaler Richtung stärker als in

vertikaler Richtung. Dadurch nimmt das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität von beleimten Matten aus MS-Spänen mit zunehmender Rohdichte zu.

Die Ergebnisse aus Messvorrichtung II bestätigen den Dichteinfluss (Abbildung 115 und Abbildung 116). In horizontaler und vertikaler Richtung weist die Permeabilität im Bereich niedriger Rohdichte größere Unterschiede zwischen den Materialarten auf als im Bereich höherer Rohdichte. In horizontaler Richtung ist die Permeabilität von Matten aus MS-Spänen am höchsten, gefolgt von Matten aus DS-Spänen und Fasern. Bei niedriger Rohdichte ist die Permeabilität von Matten aus Strands fast gleich groß wie die Permeabilität von Matten aus MS-Spänen. Mit steigender Rohdichte nimmt die Permeabilität von Matten aus Strands stark ab. Ab einer Rohdichte von ca. 500 kg/m^3 zeigen die Matten aus Strands den niedrigsten Wert. In vertikaler Richtung ist die Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei niedriger Rohdichte von 200 bis ca. 450 kg/m^3 am höchsten, gefolgt von Matten aus DS-Spänen und Fasern. Ab einer Rohdichte von ca. 450 kg/m^3 ändert sich die Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern dahingehend, dass die Permeabilität von Matten aus Fasern am höchsten ist, gefolgt von Matten aus MS- und DS-Spänen. Die vertikale Permeabilität von Matten aus Strands ist ab einer Rohdichte von ca. 300 kg/m^3 am niedrigsten. Insgesamt ist die Permeabilität aller Materialien in horizontaler Richtung über den gesamten Rohdichtebereich höher als in vertikaler Richtung. Bei niedriger Rohdichte ist der Permeabilitätsunterschied zwischen den beiden Richtungen für Matten aus DS-Spänen und Fasern geringer als bei höherer Rohdichte. Er nimmt mit zunehmender Rohdichte zu. Mit diesen Erkenntnissen werden die Ergebnisse von Messvorrichtung I und konventioneller Methode (v. Haas 1998) bestätigt. Für Matten aus MS-Spänen und Strands ist der Unterschied der Permeabilität zwischen den beiden Richtungen über den gesamten Rohdichtebereich wesentlich gleichmäßiger.

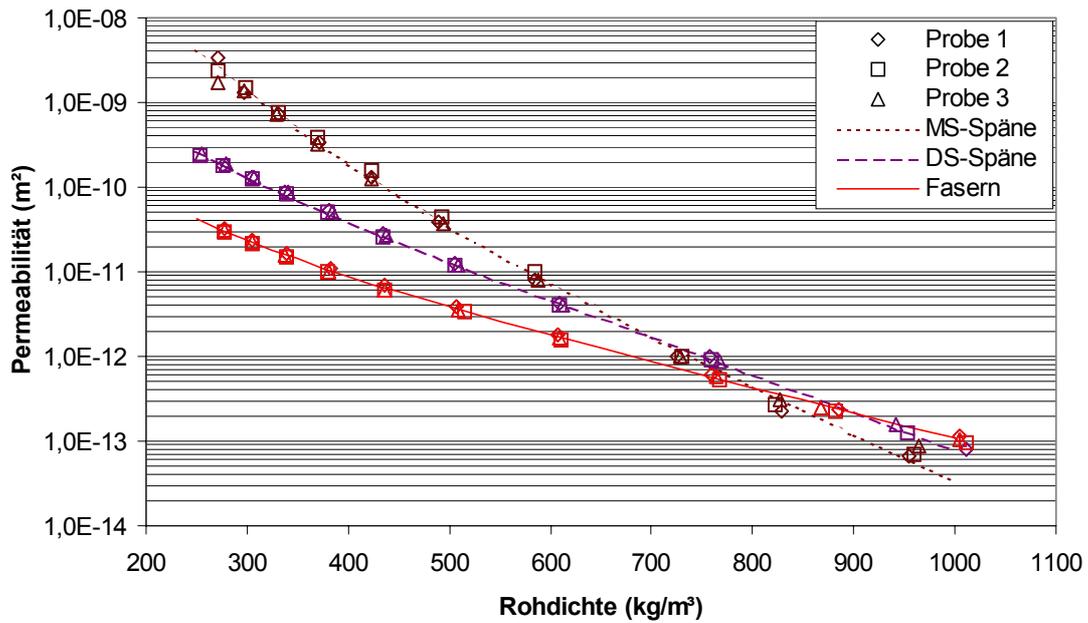


Abbildung 113: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 % (Messvorrichtung I)

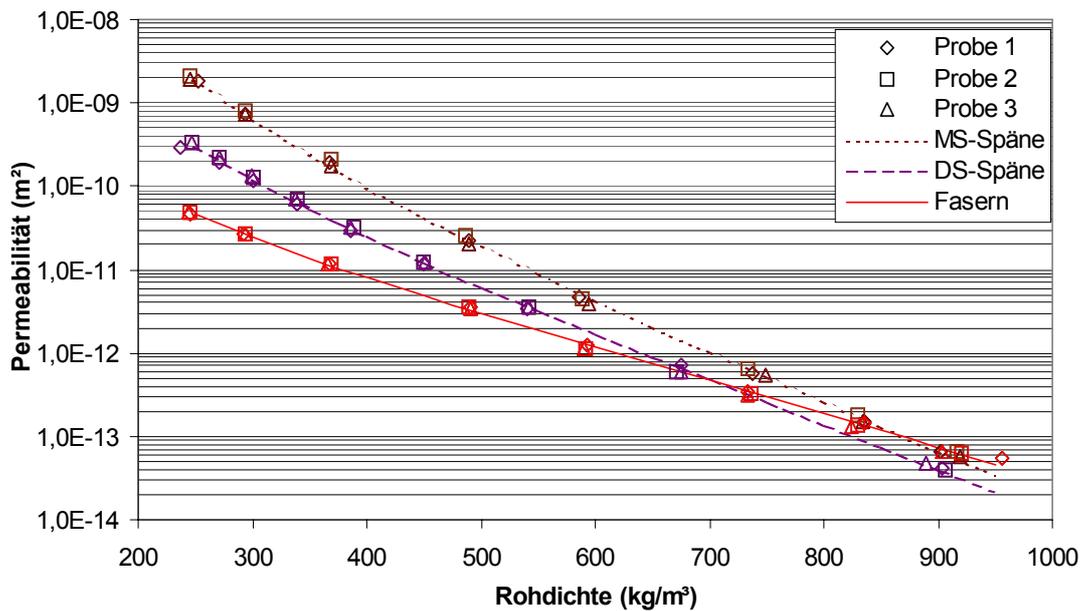


Abbildung 114: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 % (Messvorrichtung I)

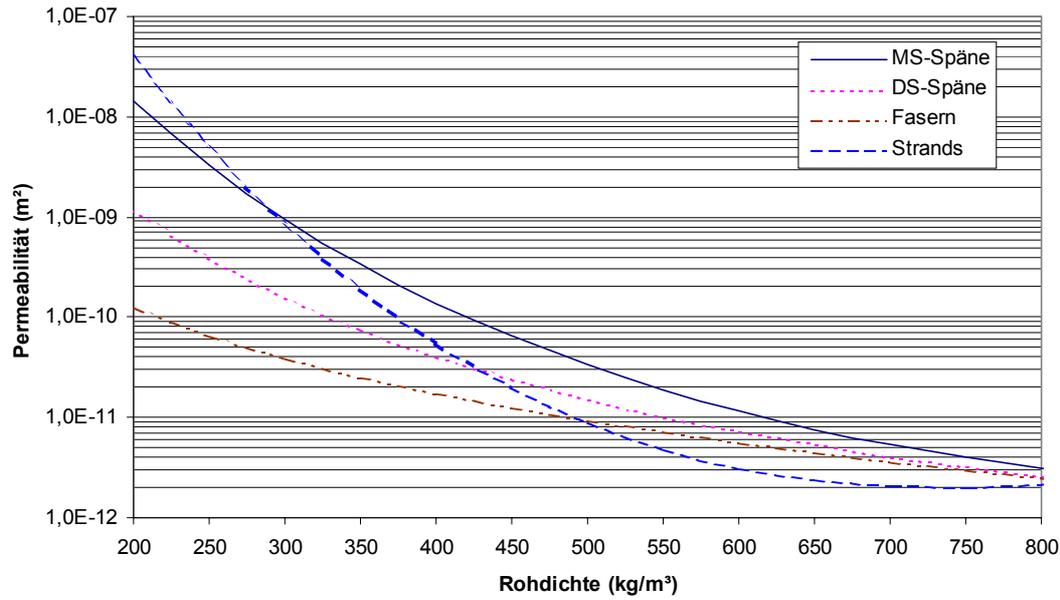


Abbildung 115: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten verschiedener Materialien bei einer Feuchte von 11,3 – 13,9 % (Messvorrichtung II)

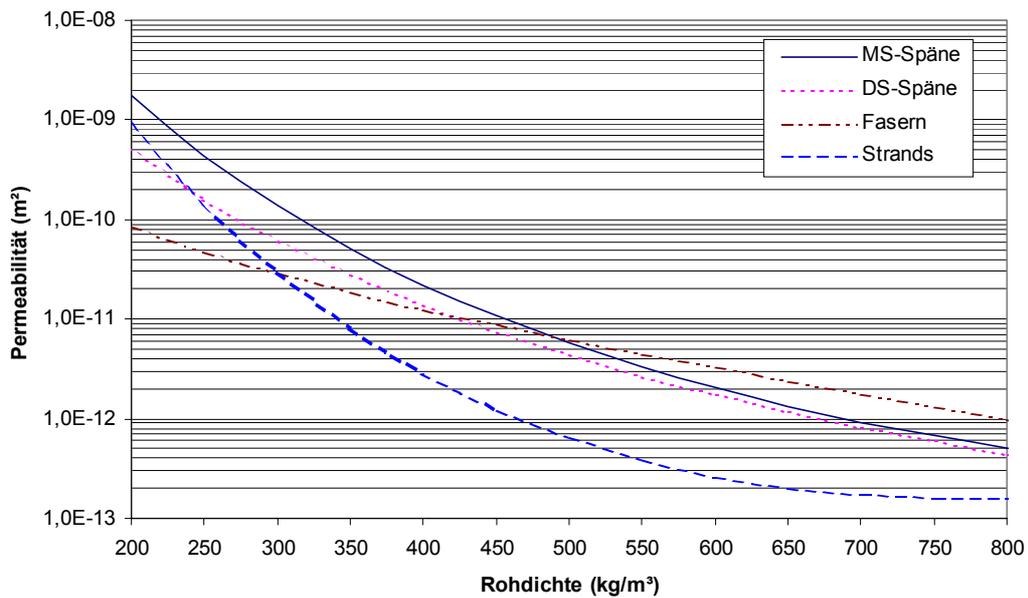


Abbildung 116: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten verschiedener Materialien bei einer Feuchte von 11,3 – 13,9 % (Messvorrichtung II)

Mit zunehmender Feuchte von 6 – 7 % auf 10 – 11 % nehmen die horizontale und vertikale Permeabilität für unbeleimte Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern nur geringfügig ab. Bei niedriger Rohdichte ist der Unterschied durch Feuchtezunahme geringer als bei hoher Rohdichte. Man kann dies dahingehend erklären, dass bei höherer Feuchte und gleicher Rohdichte (bezogen auf trockene Holzmasse) in einem bestimmten Volumen geringfügig weniger Hohlräume in der Probe zur Verfügung stehen, da die Abmessungen der Materialien bei Feuchteerhöhung durch die Quellung in geringem Maße größer werden. Durch die Verdichtung bei hoher Rohdichte (bezogen auf trockene Holzmasse) und höherer Feuchte liegen die Materialien fester aneinander, da der Verdichtungswiderstand der Materialien mit zunehmender Feuchte sinkt (v. Haas 1998). Deshalb haben die Oberflächen der Materialien in der Probe durch die Verdichtung bei einer Feuchte von 10 % - 11% besseren Kontakt als bei einer Feuchte von 6% - 7%. Dadurch wird die Permeabilität geringer. Infolgedessen ist die Verminderung der Permeabilität bei hoher Rohdichte größer als bei niedriger Rohdichte.

Durch Zugabe eines Klebstoffes verringert sich die Permeabilität in horizontaler und vertikaler Richtung ab einer Rohdichte von ca. 300 kg/m³ für Matten aus Fasern, von ca. 500 kg/m³ für Matten aus DS-Spänen und von ca. 650 kg/m³ für Matten aus MS-Spänen. Oberhalb dieser Grenzwerte vermindern sich die horizontale und vertikale Permeabilität mit zunehmendem Klebstoffanteil. Der Einfluß des Klebstoffes auf die Permeabilität steigt dabei mit zunehmender Rohdichte an. Dies ist vermutlich darin begründet, dass durch die Verdichtung die Oberflächen der einzelnen Partikel fest aneinander liegen und durch den Klebstoff "verklebt" wurden. Infolgedessen sind die Hohlräume in der Probe bei hohem Klebstoffanteil verschlossen und dadurch die Proben weniger permeabel. Die horizontale Permeabilität von Matten aus MS-Spänen nimmt durch Klebstoffzugabe mit zunehmender Rohdichte stärker als die vertikale Permeabilität ab. Die Permeabilität von Matten aus DS-Spänen und Fasern nimmt mit zunehmender Rohdichte in beiden Richtungen einheitlich ab.

Mit zunehmenden Spanfraktionen von Maschenweiten 1,0 – 1,5 mm, 1,5 – 2,0 mm, 2,0 – 3,1 mm und 3,1– 4,0 mm steigen bei niedriger Rohdichte die horizontale und vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-Spänen an, da die Späne bei größerer Maschenweite eine geringere Schüttdichte und einen größeren Verdichtungswiderstand haben und zueinander loser verteilt liegen als bei kleinerer Maschenweite. Infolgedessen sind die Matten aus MS-Spänen bei größerer Maschenweite und niedriger Rohdichte in beiden Richtungen durchlässiger als bei kleinerer Maschenweite. Mit größer werdenden Spänen (Maschenweiten 1,0–1,5 mm, 1,5–2,0 mm und 2,0–3,1 mm) nehmen die horizontale und vertikale Permeabilität bei hoher Rohdichte ab. Der Grund könnte darin liegen, dass durch die Verdichtung der Widerstand gegen Luftströmung zwischen den Kontaktflächen der Späne bei der größeren Spanoberfläche größer als bei der kleineren Spanoberfläche ist. In horizontaler Richtung strömt die Luft parallel zur Oberflächenebene. Infolgedessen ist die horizontale

Permeabilität bei größerer Spanoberfläche geringer als bei der kleineren Spanoberfläche. In vertikaler Richtung wird die geringfügig niedrigere Permeabilität bei hoher Rohdichte wahrscheinlich durch die Spanbreite verursacht, da die Spandicke einen nicht zu großen Unterschied aufweist. Eine Ausnahme bildet die vertikale Permeabilität der Spanfraktion 3,1–4,0 mm, wo die Permeabilität im gesamten Rohdichtebereich am höchsten ist, da diese Spanfraktion eine größere Dicke aufweist. Durch die dickeren Späne ist der Verdichtungswiderstand groß. Durch die Verdichtung werden die Hohlräume wenig geschlossen. Infolgedessen ist die vertikale Permeabilität der Spanfraktion 3,1- 4,0 mm am höchsten.

Bei niedriger Rohdichte weist die vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-, MS-Spänen und Fasern, die bei einer Lufttemperatur von 20°C und 80°C gemessen wurde, keinen Unterschied auf. Bei hoher Rohdichte sind die bei einer Lufttemperatur von 80 °C gemessenen vertikalen Permeabilitäten geringfügig niedriger als bei 20 °C. Durch die Erwärmung sind die Partikel weicher. Infolgedessen ist der Verdichtungswiderstand der bei einer Lufttemperatur von 80°C gemessenen Proben geringer, weil die Materialien bei höheren Temperatur durch stärkere plastische Verformung fester aneinander liegen als bei 20°C. Dies ist besonders bei hohen Rohdichten von Einfluss. Allerdings bestehen bei den vertikalen Permeabilitäten aller Materialien für beide Temperaturen (20°C und 80 °C) keine signifikanten Unterschiede (5 % Niveau).

Die mit Messvorrichtung I ermittelten Ergebnisse von Matten aus DS- und MS-Spänen sowie Fasern stimmen gut mit denen der konventionellen Permeabilitätsbestimmung (Herstellen von Platten bestimmter Rohdichte, Probenausformung und Durchflussmessung) der Untersuchungen von v. Haas (1998) überein. Größere Unterschiede zwischen beiden Methoden ergeben sich nur bei den Matten aus MS-Spänen. Es ist zu vermuten, dass dieser Unterschied auf die heterogenen MS-Späne zurückzuführen ist. Die Prüfzeit der Permeabilitätsmessung mit der Messvorrichtung I beträgt für den Rohdichtebereich von 250 bis 950 kg/m³ ca. 1,5 Std, wobei vier verschiedene Durchflussmengen in einer Richtung ermittelt werden. Bei der konventionellen Methode liegt der Zeitbedarf für die Herstellung der Platten und die Permeabilitätsmessung für eine Rohdichte bei ca. 5 Std.

Die mit Messvorrichtung II ermittelten und nach dem zweiten Modellansatz berechneten Ergebnisse stimmen gut mit denen der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998) überein. Ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Methoden (Messvorrichtung I und II) ergibt sich in vertikaler Richtung bei den Matten aus MS-Spänen und niedrigen Rohdichten, da bei der Messung der Permeabilität mit Messvorrichtung II die Luft im oberen Bereich der Probe seitlich ausströmt, bevor sie in vertikaler Richtung in den unteren Bereich gelangt, weil der Widerstand gegen Luftströmung in horizontaler Richtung gering ist. Infolgedessen ist die mit Messvorrichtung II gemessene vertikale Permeabilität

niedriger als die mit Messvorrichtung I gemessene vertikale Permeabilität. Die Prüfzeit für die Permeabilitätsmessung in beiden Richtungen mit der Messvorrichtung II bei einer Rohdichte von 200 bis 680 kg/m³ beträgt ca. 30 Minuten.

Die Ergebnisse, welche mit Messvorrichtung II bestimmt und nach dem ersten Modellansatz berechnet wurden, weisen nur teilweise eine Übereinstimmung mit den Werten der Messvorrichtung I und der konventionellen Methode (v. Haas 1998) auf. Bei der Messung der Matten aus Strands in horizontaler Richtung wurde eine gute Übereinstimmung festgestellt.

Die beiden neuen Messvorrichtungen bieten einen erheblichen Zeitgewinn und können in vereinfachter Version zur Standard-Ausstattung eines Prüflabors in der Holzwerkstoffindustrie werden.

11. Literatur

BEAR, J.; (1988): Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover Publications, New York. 764 S.

BOHL, W. (1994): Technische Strömungslehre, Vogel Buchverlag. 317 S.

BOLTON, A. J.; HUMPHREY, P. E. (1994): The Permeability of Wood-based Composite Materials. Part 1. A Review of the Literature and some Unpublished Work. Holzforschung 48: 95 – 100

CHAPRA, S.C.; CANALE, R.P. (1998): Numerical Methods for Engineers. McGraw-Hill 924 S.

COLLINS, R. E. (1961): Flow of Fluids through Porous Materials. Reinhold Publishing N.Y. 270 S.

DENISOV, O.B.; ANISOV, P.P.; ZUBAN, P.E. (1975): Untersuchungen der Permeabilität von Spanvliesen. Holztechnologie 16(1): 10 – 14

DULLIEN, F.A.L (1979): Porous Media Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press. 396 S.

FIEDLER, O; (1992): Strömungs- und Durchflussmesstechnik. R. Oldenbourg Verlag München Wien. 360 S.

FRÜHWALD, A.; STEFFEN, A.; HUMPHREY, P. E.; V. HAAS; G., THÖMEN, H. (1999): Entwicklung und Überprüfung eines Modells des thermodynamischen und des rheologischen Verhaltens von Fasermatten für MDF während der Heisspressung in Taktpressen und Ansätze zur Modellierung von Endlopressen. Abschlussbericht 214S.

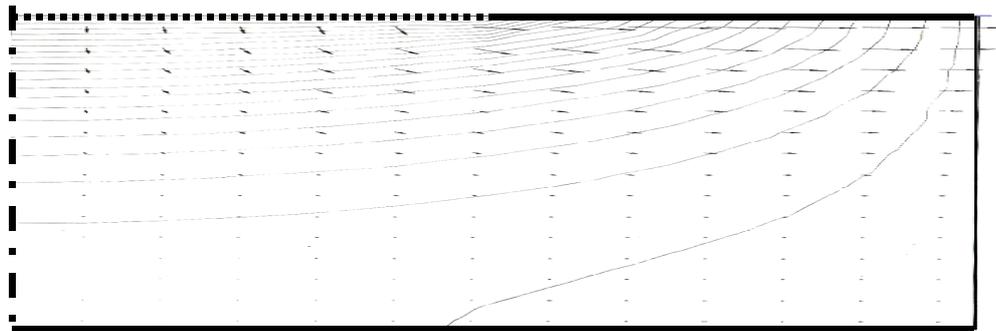
HAAS, G.V. (1998): Untersuchung zur Heisspressung von Holzwerkstoffmatten unter besonderer Berücksichtigung des Verdichtungsverhaltens, der Permeabilität, der Temperaturleifähigkeit und der Sorptionsgeschwindigkeit. Dissertation Universität Hamburg 264 S.

-
- HAAS, G. V.; FRÜHWALD, A. (2000): Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten von Faser-, Span- und OSB-Matten. Holz als Roh- und Werkstoff 58: 317 – 323
- HAAS, G. V.; STEFFEN, A.; FRÜHWALD, A. (1998): Untersuchungen zur Permeabilität von Faser-, Span- und OSB-Matten für Gase. Holz als Roh- und Werkstoff 56: 386 – 392
- HARTUNG, J.; ELPELT, B.; KLÖSENER, K.-H. (1985): Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, R. Oldenbourg Verlag München Wien. 973 S.
- HASELEIN, C. R. (1998): Numerical Simulation of Pressing Wood-Fiber Composites. Dissertation Oregon State University. 244 S.
- HATA, T. (1993): Heat Flow in Particle Mat and Properties of Particleboard under Steam-Injection Pressing. Wood Research 80: 1 – 47
- HEINEMANN, C. (1999): Methodische Untersuchungen zur Permeabilität von Holzwerkstoffmatten für Gas. Diplomarbeit Universität Hamburg. 106 S.
- KAVIANY, M. (1991): Principle of Heat Transfer in Porous Media. Springer Verlag. 626 S.
- LEHMANN, W.F. (1972): Moisture-Stability Relationships in Wood-Base Composition Boards. Forest Prod. J. 22(7): 53 –59
- OLEK W., GUZENDA R., WERES J. (2000). Computer-aided estimation of thermal conductivity of Scots pine wood. Proc. of the 12th International Symp. “*Nondestructive Testing of Wood*”, Sopron, Hungary, ed. F. Divos, 431-437. Sopron: Univ. of Western Hungary.
- PATANKAR, S. V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGRAW Hill. 197 S.
- POLACZEK, P. (1980): Untersuchungen über die Luftdurchlässigkeit von Holz, Diplomarbeit Universität Hamburg. 85 S.
- PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A. 1996. Numerical Recipes in Fortran 90: the art of parallel scientific computing. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

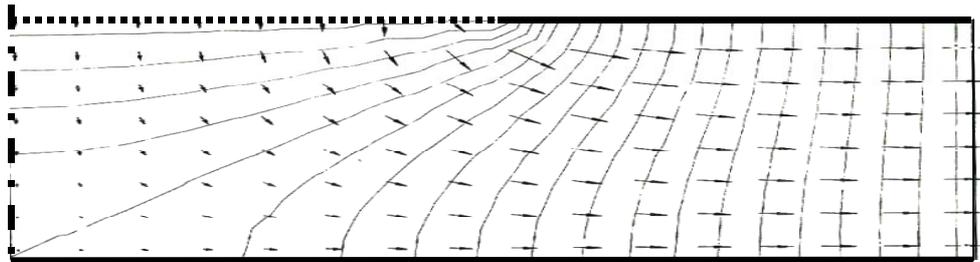
-
- SHANG, D.-K.; YAN, Q.-Y.; TAN, H.-P.; SUN, B.-H. (1999): The Experimental Research and Analysis of Permeability of Basalt and Wood Particle Aggregates. Holz als Roh- und Werkstoff 57: 271 – 275
- SIAU, J.F. (1984): Transport Processes in Wood. Springer Verlag. 245 S.
- SCHEIDEGGER, A. E. (1974); The Physic of Flow Through Porous Media. University of Toronto Press.
- VDI/VDE – RICHLINIEN 3513; (1971); Schwebekörper – Durchflussmesser, Berechnungsverfahren, Blatt 1
- VDI/VDE – RICHLINIEN 3513; (1978); Schwebekörper – Durchflussmesser; Genauigkeitsklassen, Blatt 2
- VDI/VDE – RICHLINIEN 3513; (1989); Schwebekörper – Durchflussmesser, Auswahl- und Einbauempfehlungen, Blatt 3
- VOLLMER, W. (1954): Der Transport von Gasen und Dämpfen in Papier. Chemie-Ing-Techn. Nr. 2 : 90 – 94
- WAGENBRETH, H. (1961); Schwebekörper – Durchflussmesser, Durchflussgleichung und Ähnlichkeitsgesetze in zweckmässiger Darstellung, Chemie-Ing.-Techn. 33(9) : 609-612.
- WERES, J. 1997. Finite element analysis of heat and mass transport in biological materials, pp. 1387-1392, in A. Garstecki (ed.), Computer Methods in Mechanics. Polish Assoc. for Comp. Mech.
- WERES J., OLEK W., GUZENDA R. 2000. Identification of mathematical model coefficients in the analysis of the heat and mass transport in wood. Drying Technology (An International Journal) 18(8): 1697-1708.

12. Anhang

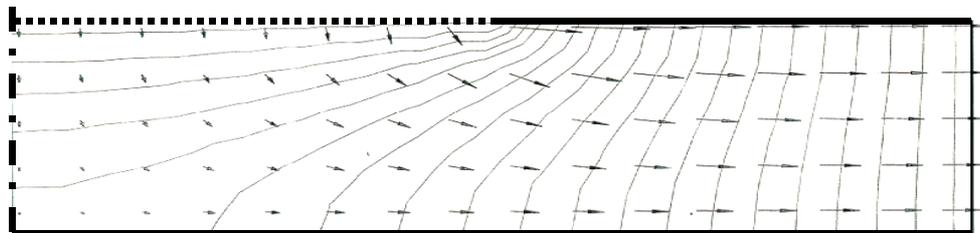
12.1. Simulierte Druckverteilung mit dem Simulationsprogramm der Universität Poznań



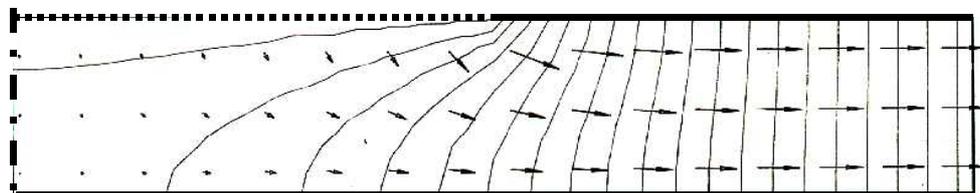
a) Rohdichte = 200 kg/m³



b) Rohdichte = 500 kg/m³



c) Rohdichte = 800 kg/m³



d) Rohdichte = 1200 kg/m³

Abbildung 117: Simulierte Druckverteilung von Matten aus MS-Spänen bei verschiedener Rohdichte von 200, 500, 800 und 1200 kg/m³ mit dem Simulationsprogramm der Universität Poznań

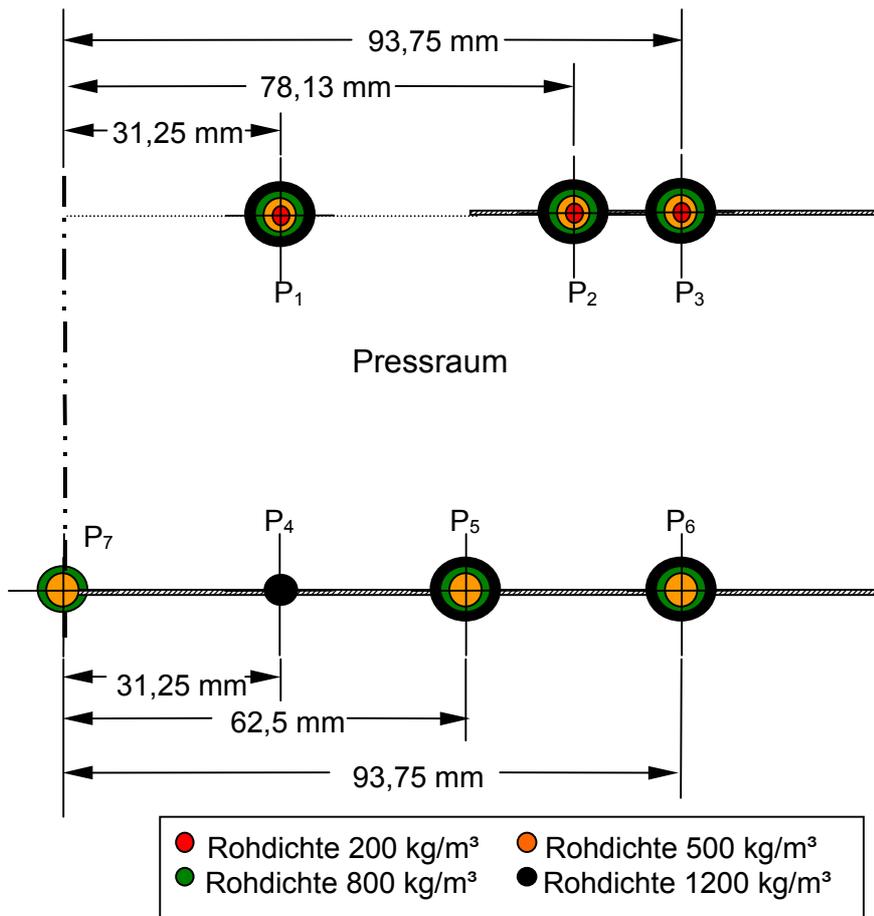


Abbildung 118: Festgelegte Messpunkte in der Anlage zur Messung der Drücke in der Probe bei verschiedener Rohdichte von 200, 500, 800 und 1200 kg/m³

12.2. Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Lufttemperaturen

Tabelle 13: Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität an DS-Spänen bei verschiedenen Temperaturen von 20 °C und 80 °C in Abhängigkeit von der Rohdichte

Streuungs- ursache	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Rohdichte	3	7,80853E-21	2,6028E-21	294,938	0,0003	9,276
Temperatur	1	1,53812E-23	1,5381E-23	1,742	0,2789	10,127
Zufallsfehler	3	2,64751E-23	8,825E-24			
Gesamt	7	7,85039E-21				

Tabelle 14: Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität an MS-Spänen bei verschiedenen Temperaturen von 20 °C und 80 °C in Abhängigkeit von der Rohdichte

Streuungs- ursache	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Rohdichte	3	6,6044E-20	2,2015E-20	92547,309	6,02E-08	9,276
Temperatur	1	1,6476E-25	1,6476E-25	0,692	0,4663	10,127
Zufallsfehler	3	7,1363E-25	2,3788E-25			
Gesamt	7	6,6045E-20				

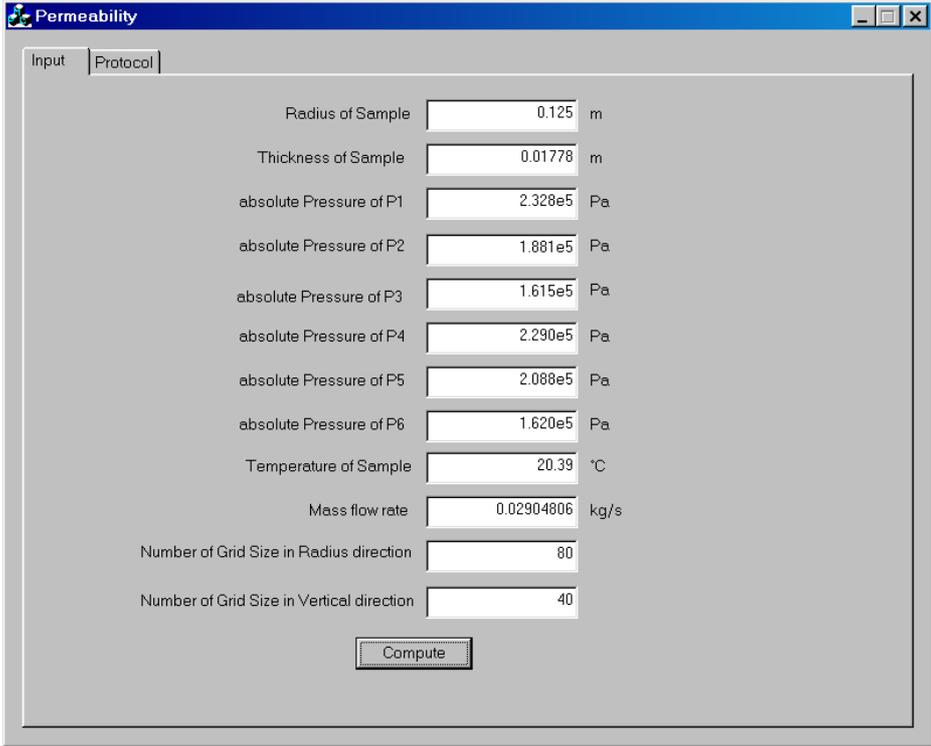
Tabelle 15: Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität an DS-Spänen bei verschiedenen Temperaturen von 20 °C und 80 °C in Abhängigkeit von der Rohdichte

Streuungs- ursache	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Rohdichte	3	6,039E-22	2,013E-22	3380,014	8,63E-06	9,276
Temperatur	1	1,0462E-25	1,0462E-25	1,756	0,2769	10,127
Zufallsfehler	3	1,7867E-25	5,9556E-26			
Gesamt	7	6,0418E-22				

12.3. Anwendungsprogramm zur Berechnung der Permeabilität in zwei Dimensionen

Abbildung 119 zeigt das Anwendungsprogramm zur Berechnung der Permeabilität in zwei Dimensionen mit den Eingaben der Daten. Dieses Anwendungsprogramm wurde nach dem zweiten Modellansatz und in der Programmiersprache C/C++ geschrieben. Das Programm wurde in Visual C++ kompiliert und läuft im Windows Betriebssystem. Die Daten müssen in SI-Einheiten eingegeben werden. Bei den reellen Zahlen muss der Punkt und darf nicht das Komma für Dezimalzahlen eingegeben werden. Nach der Eingabe der Daten drücken Sie bitte auf dem Knopf (Compute), um das Berechnungsprogramm zu beginnen.

Als Beispiel wurden die gemessenen Daten der Matten aus Fasern der Probe 1 der ersten Messung ins Berechnungsprogramm eingegeben. Die Matte der Fasern hat einer Rohdichte von 450 kg/m^3 (Gewicht 392,86 g), eine Dicke von 17,78 mm und einen Radius von 125 mm (Abbildung 119).



The screenshot shows a Windows application window titled "Permeability". It has two tabs: "Input" (selected) and "Protocol". The "Input" tab contains several input fields with labels and units, and a "Compute" button at the bottom.

Parameter	Value	Unit
Radius of Sample	0.125	m
Thickness of Sample	0.01778	m
absolute Pressure of P1	2.328e5	Pa
absolute Pressure of P2	1.881e5	Pa
absolute Pressure of P3	1.615e5	Pa
absolute Pressure of P4	2.290e5	Pa
absolute Pressure of P5	2.088e5	Pa
absolute Pressure of P6	1.620e5	Pa
Temperature of Sample	20.39	°C
Mass flow rate	0.02904806	kg/s
Number of Grid Size in Radius direction	80	
Number of Grid Size in Vertical direction	40	

Abbildung 119: Anwendungsprogramm zur Berechnung der Permeabilität in zwei Dimensionen mit den Eingaben der Daten (Daten aus Probe 1 der Fasern der 1. Messung)

Nach dem Beenden der Berechnung wird das Protokoll ausgedruckt und kann auf Diskette gespeichert werden. Im Protokoll sind die Anzahl der gesuchten Zielfunktionen (No.of Finding Minimum Error), das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität (K_v/K_h),

die Summe der Abweichung zwischen den Ergebnissen der Computersimulation und den Messergebnissen in P^2 (Minimum Error of P^2) und die Anzahl der Iterationen (No. Of Iteration) wiedergegeben (Abbildung 120).

No. of Finding (Minimum Error)	Kv/Kh	Minimum Error of P^2	No. of Iteration
1	0.00000000	3.17340658e+021	5101
2	0.50000000	1.01831547e+019	50227
3	1.00000000	4.23818325e+018	80948
4	0.75000000	2.05239412e+018	64945
5	0.87500000	2.63153655e+018	73601
6	0.62500000	3.65469599e+018	57143
7	0.81250000	2.16238535e+018	69038
8	0.68750000	2.46620934e+018	61392
9	0.78125000	2.05375949e+018	68179
10	0.71875000	2.18067837e+018	63523
11	0.76562500	2.03837758e+018	66473
12	0.75781250	2.04153483e+018	66211
13	0.77343750	2.04256548e+018	66697
14	0.76171875	2.03901618e+018	66276
15	0.76953125	2.03957498e+018	67152
16	0.76367188	2.03846465e+018	66155
17	0.76757813	2.03874948e+018	66292
18	0.76464844	2.03836340e+018	66491
19	0.76513672	2.03835610e+018	66506
20	0.76489258	2.03835615e+018	66292
21	0.76538086	2.03836325e+018	67056
22	0.76501465	2.03835523e+018	66340
23	0.76507568	2.03835544e+018	66751
24	0.76495361	2.03835546e+018	66596
25	0.76504517	2.03835528e+018	66581

Abbildung 120: Protokolle der Anzahl der gesuchten Zielfunktionen (No. of Finding Minimum Error), des Verhältnisses der vertikalen zur horizontalen Permeabilität (K_v/K_h), der Summe der Abweichung zwischen den Ergebnissen der Computersimulation und den Messergebnissen in P^2 (Minimum Error of P^2) und der Anzahl der Iterationen (No. Of Iteration)

Abbildung 121 zeigt das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität beim Minimum der Zielfunktion und Druckverteilung in der Probe.

Außerdem sind im Protokoll die Summe des Massenstroms von den Gitterpunkten $j = 1$ bis n_z+1 in einigen Gitterschritten $i > (n_r+2/2)$, der gemessene und berechnete Massenstrom, die vertikale und horizontale Permeabilität und der Vergleich der gemessenen und simulierten Drücke erfaßt (Abbildung 122).

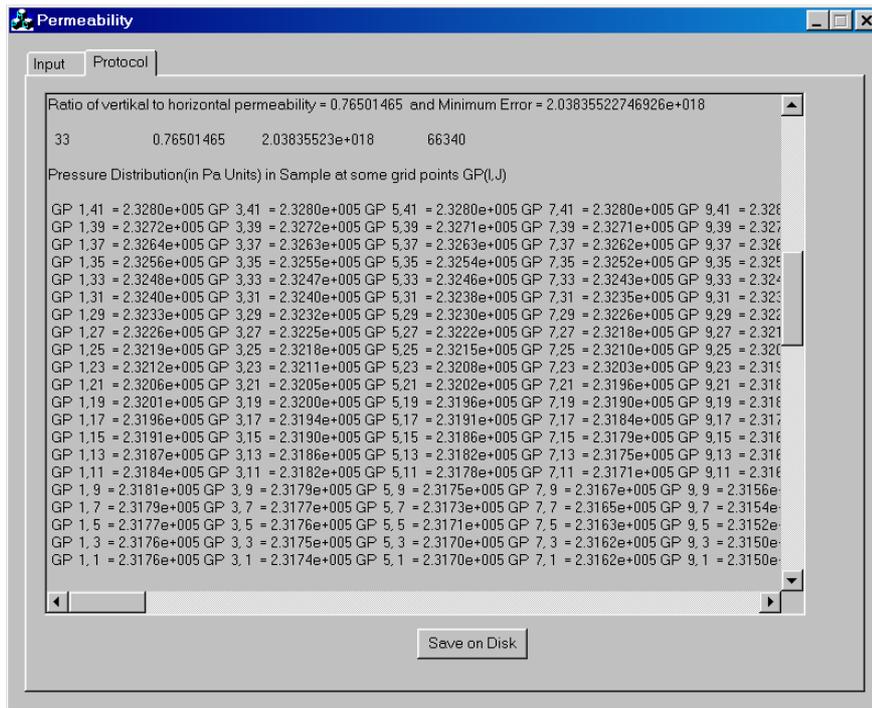


Abbildung 121: Das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität beim Minimum der Zielfunktion von P^2 und Druckverteilung in der Probe (Matten aus Fasern der Probe 1)

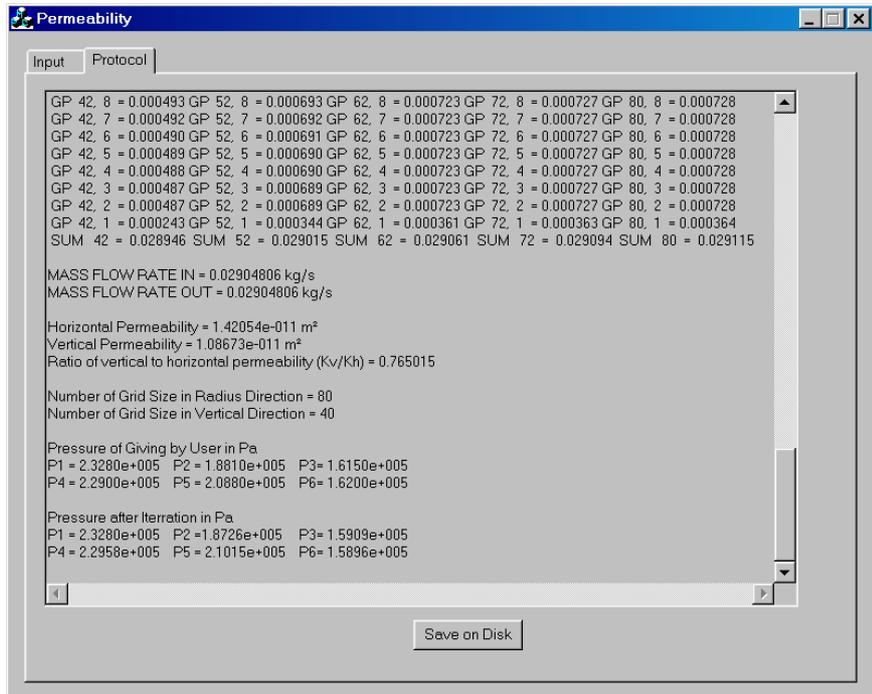


Abbildung 122: Protokolle der Summe des Massenstroms von den Gitterpunkten $j = 1$ bis n_z+1 in einigen Gitterschritten $i > (n_r+2/2)$, des gemessenen und berechneten Massenstroms, der vertikalen und horizontalen Permeabilität und des Vergleichs der gemessenen und simulierten Drücke.

Im Protokoll wird auch das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität des Minimums der Zielfunktion dargestellt. Die Ergebnisse der Berechnung wurden zur einfachen Betrachtung und zum einfachen Verständnis in Excel überarbeitet. Abbildung 123 zeigt das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität und die Zielfunktion von P^2 bei Matten aus Fasern der Probe 1. Beim Minimum der Zielfunktion von P^2 ($2.03835523e+018$) ist das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität 0.76501465 (siehe Abbildung 121).

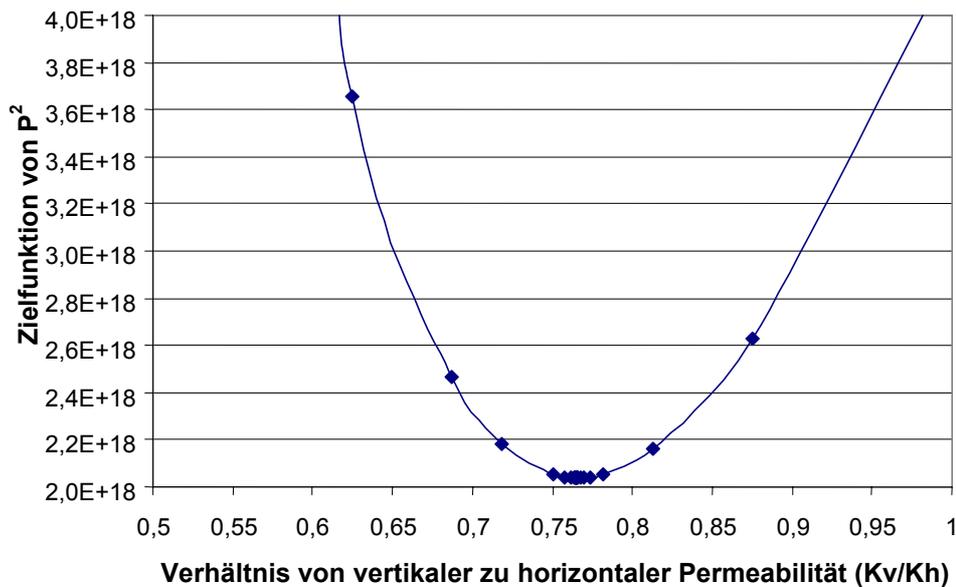


Abbildung 123: Das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität und Zielfunktion von P^2

Abbildung 124 zeigt die Druckverteilung in der halben Probe des betrachteten Bereiches (siehe Abbildung 51).

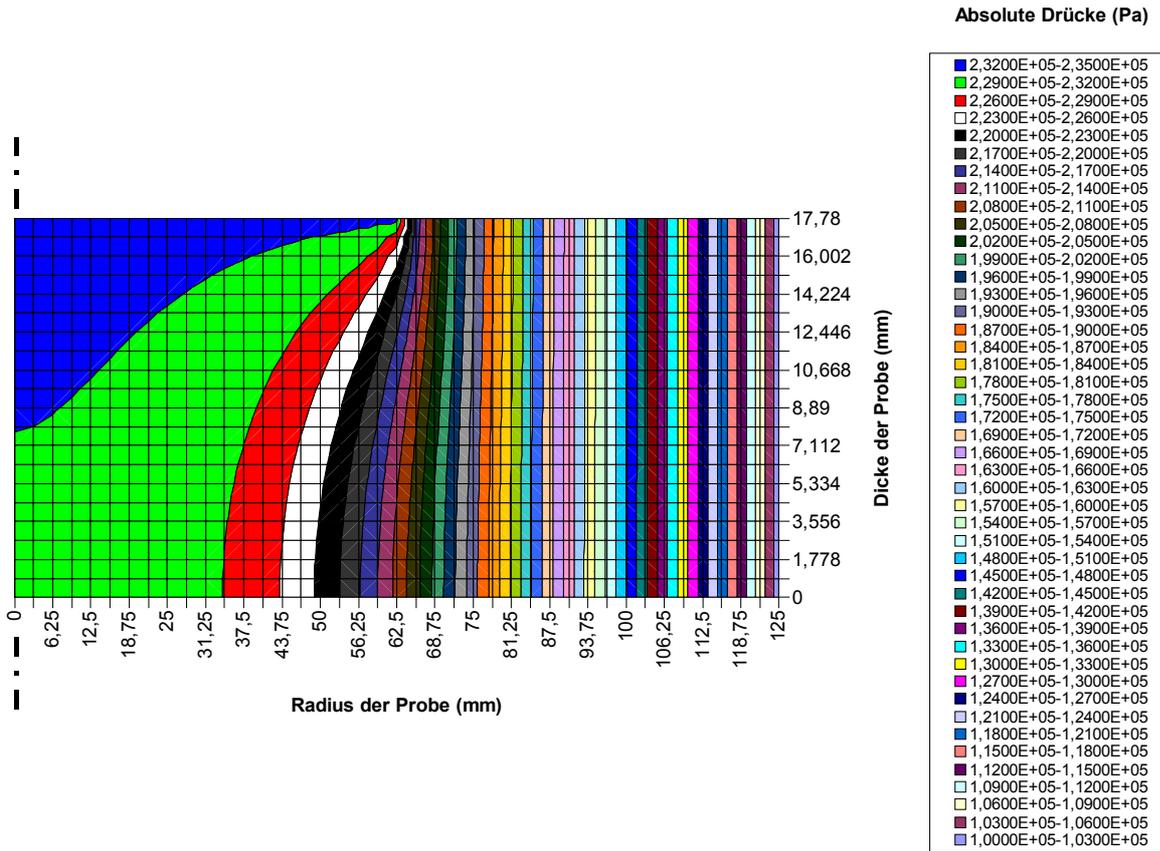


Abbildung 124: Druckverteilung in der Probe des betrachteten Bereiches (siehe Abbildung 51)

13. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anlage von Denisov et al. (1975) 1. Deckel, 2. Gehäuse 3,5 Gummidichtung, 4. Probe	14
Abbildung 2:	Permeabilitätsmesseinrichtung von Hata (1993)	15
Abbildung 3 :	Anlage von v. Haas (1998) zur Bestimmung der Permeabilität von Proben einer Rohdichte größer als 300 kg/m ³	16
Abbildung 4:	Anlage von v. Haas (1998) zur Bestimmung der Permeabilität von Proben einer Rohdichte unter 300 kg/m ³	17
Abbildung 5:	Permeabilitätsmesseinrichtung von Haselein (1998); MKG bedeutet Massenstrommessung.....	18
Abbildung 6:	Messeinrichtung zur Bestimmung der Permeabilität von Holzwerkstoffproben bei unterschiedlichen Temperaturen nach Heinemann (1999).....	19
Abbildung 7:	Versuchsordnung zur Bestimmung der Permeabilität von Shang et al. (1999) 1. Metallnetz, 2. Partikel, 3. Zylindrisches Bett, 4. Manometer, 5.Kompressor 6. Rohr, 7. Luftgeschwindigkeitsmesser, 8. Differenzdruckmesser	20
Abbildung 8:	Horizontale und vertikale Permeabilität der Fasermatte in Abhängigkeit von der Rohdichte (Haselein 1998).....	26
Abbildung 9:	Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte für Fasermatten (Haselein 1998).....	26
Abbildung 10:	Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität des Faser-, Deckschicht- und Strandmaterials bei verschiedenen Rohdichten nach v. Haas 1998 und v. Haas et al. 1998	27
Abbildung 11:	Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität zweier Fasermatten mit unterschiedlichen Feuchtegehalten im gemessenen Rohdichtebereich nach der Methode an der Oregon State University (Anlage von Haselein 1998) nach Heinemann (1999).....	28
Abbildung 12:	Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität einer Faserplatte mit unterschiedlichen Feuchten in Abhängigkeit von der Rohdichte nach der Methode an der Universität Hamburg (Heinemann 1999).....	28
Abbildung 13:	Verteilung der Spanlänge der MS-Späne	32
Abbildung 14:	Verteilung der Spanbreite der MS-Späne.....	32

Abbildung 15: Verteilung der Spandicke der MS-Späne.....	33
Abbildung 16: Gewichtsanteil der einzelnen Fraktionen der MS-Späne	33
Abbildung 17: Gewichtsanteil der einzelnen Fraktionen der DS-späne	34
Abbildung 18: Verteilung der Spanlänge der Strands.....	35
Abbildung 19: Verteilung der Spanbreite der Strands.....	35
Abbildung 20: Verteilung der Spandicke der Strands	36
Abbildung 21: Relative Fasergrößenverteilung (gravimetrisch)	37
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Vorrichtung zur Bestimmung der vertikalen Permeabilität	42
Abbildung 23: Die obere Pressplatte (links) und untere Pressplatte (rechts) mit jeweils 124 Bohrungen.....	43
Abbildung 24: Zylinderrohr mit einem Innendurchmesser von 40 mm (links) und Oberseite des Zylinderrohrs zur Messung der vertikalen Permeabilität (rechts).....	43
Abbildung 25: Gesamtansicht der Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität	44
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Vorrichtung zur Bestimmung der horizontalen Permeabilität	46
Abbildung 27: Obere Pressplatte mit einer zentralen Bohrung eines Durchmessers von 10 mm (links) und untere Pressplatte sowie eingestecktes Rohr (\varnothing 8 mm) mit den Bohrungen eines Durchmessers von 1,5 mm (rechts).....	47
Abbildung 28: Gebohrtes Zylinderrohr (links) und Oberseite des gebohrten Zylinderrohrs zur Messung der horizontalen Permeabilität (rechts)	47
Abbildung 29: Gesamtansicht der Messvorrichtung I zur Messung der horizontalen Permeabilität	48
Abbildung 30: Druckabfall der Messvorrichtung bei verschiedenen Durchflussmengen in horizontaler und vertikaler Richtung	49
Abbildung 31: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohdichten von 250, 276, 308 und 398 kg/m ³ in vertikaler Richtung ..	50
Abbildung 32: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohdichten von 466 und 569 kg/m ³ in vertikaler Richtung	50
Abbildung 33: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei einer Mattenrohdichte von 875 kg/m ³ in vertikaler Richtung	51

Abbildung 34: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohddichten von 307, 382, 436 und 510 kg/m ³ in horizontaler Richtung	51
Abbildung 35: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck bei Mattenrohddichten von 611, 760, und 968 kg/m ³ in horizontaler Richtung	52
Abbildung 36: Struktur der Probe für Bestimmung der horizontalen Permeabilität	54
Abbildung 37: Vertikale Permeabilität der MS-Späne Fraktion 1,5 - 2 mm, bei einer Anfangsfeuchte von 10% – 11 % in Abhängigkeit von der Rohdichte vor und nach dem Versuch und der Mittelwerte	55
Abbildung 38: Messvorrichtung zur Bestimmung der vertikalen Permeabilität bei verschiedenen Temperaturen	57
Abbildung 39: Temperaturverlauf bei Messung des Druckabfalls im Leerversuch	59
Abbildung 40: Druckabfall in der Messvorrichtung bei verschiedenen Durchflussmengen und Temperaturen in vertikaler Richtung.....	60
Abbildung 41: Temperaturverlauf bei der Messung der horizontalen Permeabilität von MS- Späne einer Rohdichte 409 kg/m ³	61
Abbildung 42: Abhängigkeit der Durchflussmenge vom angelegten Differenzdruck: MS- Späne bei Mattenrohddichten von 289 und 409 kg/m ³ in vertikaler Richtung	62
Abbildung 43: Vertikale Permeabilität der MS-Späne bei verschiedenen Durchflussmengen im nicht laminaren Bereich in Abhängigkeit von der Rohdichte.....	62
Abbildung 44: Schematischer Aufbau der Messvorrichtung II zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität	67
Abbildung 45: Integrierte Messvorrichtung II in einer Prüfmaschine mit an einen Messverstärker angeschlossenen Drucksensoren und Wegaufnehmern	69
Abbildung 46: Gesamtansicht der Messvorrichtung II zur Messung der Permeabilität	69
Abbildung 47: Iterative Bestimmung des Minimums der Zielfunktion in Abhängigkeit von den zu schätzenden Permeabilitätswerten K_h und K_v . Das Minimum wurde bei Iteration Nr. 58 (Daten für Faser 1, Dichte 450 kg/m ³) erreicht. Die hier dargestellten Ergebnisse umfassen fast den gesamten Wertebereich für die Zielfunktion.	77
Abbildung 48: Iterative Bestimmung des Minimums der Zielfunktion in Abhängigkeit von den zu schätzenden Permeabilitätswerten K_h und K_v . Das Minimum wurde bei Iteration Nr. 58 (Daten für Faser 1, Dichte 450 kg/m ³) erreicht. Einige Daten	

fehlen aufgrund der erhöhten Auflösung (verringertes Wertebereich für die Zielfunktion).	78
Abbildung 49: Veränderungen der Permeabilitätswerte für beide Richtungen in aufeinanderfolgenden Iterationen. Die optimalen Werte (= Minimum der Zielfunktion) wurden bei Iteration Nr. 58 (Daten für Faser 1, Dichte 450 kg/m^3) ermittelt. Einige Daten fehlen aufgrund der erhöhten Auflösung (verringertes Wertebereich für die Zielfunktion).	78
Abbildung 50: Der geometrische Bereich zur numerischen Lösung	81
Abbildung 51: Geometrie zur Lösung des Strömungsproblems	82
Abbildung 52: Ergänzung der zwei imaginären Punkte	83
Abbildung 53: Ergänzung des imaginären Punktes bei $r = 0$	84
Abbildung 54: Ergänzung des imaginären Punktes an der nicht permeablen unteren Platte	85
Abbildung 55: Ergänzung des imaginären Punktes an der nicht permeablen oberen Platte	86
Abbildung 56: Der betrachtete Bereich zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Permeabilität	87
Abbildung 57: Control-Volume des an die obere Platte grenzenden Gitterbereiches	89
Abbildung 58: Control-Volume für inneren Gitterbereich	89
Abbildung 59: Control-Volume für den Gitterbereich an der unteren Platte	90
Abbildung 60: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 %	95
Abbildung 61: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 %	95
Abbildung 62: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Feuchten	100
Abbildung 63: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Feuchten	100
Abbildung 64: Horizontale Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Klebstoffanteilen und einer Feuchte von 10 % - 11 %	101
Abbildung 65: Vertikale Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Klebstoffanteilen und einer Feuchte von 10 % - 11 %	102

Abbildung 66: Horizontale Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei verschiedenen Fraktionen.....	104
Abbildung 67: Vertikale Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei verschiedenen Fraktionen.....	104
Abbildung 68: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität von Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei verschiedenen Klebstoffanteilen in Abhängigkeit von der Rohdichte (Feuchte 10 % – 11 %).....	106
Abbildung 69: Vertikale Permeabilität von Matten aus DS-Spänen bei Temperaturen von 20°C und 80°C (Feuchte ca. 0,5 % – 1 % in Abhängigkeit von der Rohdichte) ..	108
Abbildung 70: Vertikale Permeabilität von Matten aus MS-Spänen bei Temperaturen von 20°C und 80°C (Feuchte von ca. 0,5 % – 1 % in Abhängigkeit von der Rohdichte)	108
Abbildung 71: Vertikale Permeabilität von Fasermatten bei Temperaturen von 20°C und 80°C (Feuchte ca. 0,5 % – 1 % in Abhängigkeit von der Rohdichte)	109
Abbildung 72: Vergleich der horizontalen Permeabilität von beleimten Matten aus DS, MS-Spänen und Fasern mit den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)	110
Abbildung 73: Vergleich der vertikalen Permeabilität von beleimten Matten aus DS, MS-Spänen und Fasern mit den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)	111
Abbildung 74: Horizontale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach dem ersten Modellansatz	113
Abbildung 75: Vertikale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach erstem Modellansatz ...	114
Abbildung 76: Horizontale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach dem zweiten Modellansatz	115
Abbildung 77: Vertikale Permeabilität (Mittelwerte) verschiedener Materialien, berechnet aus den Messwerten der Messvorrichtung II nach dem zweiten Modellansatz	115
Abbildung 78: Vergleich der horizontalen Permeabilität der Fasermatten.....	117
Abbildung 79: Vergleich der vertikalen Permeabilität der Fasermatten.....	117

Abbildung 80: Druckbedingungen in einer Fasermatte in Abhängigkeit von der Rohdichte (Durchflussmenge 13 m ³ /h; Skizze nicht maßstäblich).....	118
Abbildung 81: Druckbedingungen in einer Fasermatte in Abhängigkeit von der Rohdichte bei zusätzlicher Messung des Druckes in der Probe (Durchflussmenge 13 m ³ /h; Skizze nicht maßstäblich).....	119
Abbildung 82: Skizze zur Verdeutlichung der Permeabilitätsbestimmung mittels Druck und Durchflussbedingungen (Pfeil zeigt die Durchströmungsrichtung der Druckluft).....	120
Abbildung 83: Vergleich der berechneten horizontalen Permeabilität von Fasermatten nach den beiden Modellansätzen mit dem aus Mittelwert von P ₃ und P ₆ berechneten Permeabilitätswert.....	120
Abbildung 84: Vergleich der horizontalen Permeabilität von Matten aus DS-Spänen	122
Abbildung 85: Vergleich der vertikalen Permeabilität von Matten aus DS-Spänen	122
Abbildung 86: Vergleich der horizontalen Permeabilität von Matten aus MS-Spänen.....	123
Abbildung 87: Vergleich der vertikalen Permeabilität von Matten aus MS-Spänen.....	124
Abbildung 88: Vergleich der horizontalen Permeabilität von Matten aus Strands	125
Abbildung 89: Vergleich der vertikalen Permeabilität von Matten aus Strands	126
Abbildung 90: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Fasermatten bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I	128
Abbildung 91: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Fasermatten bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I	129
Abbildung 92: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I	130
Abbildung 93: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus DS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I	130
Abbildung 94: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I	131

Abbildung 95: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-Spänen bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der Messvorrichtung I	132
Abbildung 96: Horizontale Permeabilität von Matten aus Strands bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)	133
Abbildung 97: Vertikale Permeabilität von Matten aus Strands bei der ersten und zweiten Messung mit Messvorrichtung II im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Methode (v. Haas 1998)	134
Abbildung 98: Horizontale Permeabilität verschiedener Materialien, die mit der Messvorrichtung II gemessen wurden.....	135
Abbildung 99: Vertikale Permeabilität verschiedener Materialien, die mit der Messvorrichtung II gemessen wurde	136
Abbildung 100: Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Permeabilität verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Rohdichte (Messvorrichtung II)	137
Abbildung 101: Schematische Darstellung der Messvorrichtung I zur Messung der vertikalen Permeabilität mit Luft- und Kurzschlußluftströmung in der Probe	140
Abbildung 102: Schematische Darstellung der Messvorrichtung I zur Messung der horizontalen Permeabilität mit Luft- und Kurzschlußluftströmung in der Probe	141
Abbildung 103: Abhängigkeit zwischen relativem Druck bezogen auf Gasdrucksensor P_1 und der relativen Dickenänderung, bezogen auf die Ausgangsdicke einer Fasermatte von 40 mm (entsprechend einer Mattenrohichte von 200 kg/m^3). Position der Gasdrucksensoren P_1 bis P_6 siehe Abbildung 80.	151
Abbildung 104: Relativer Gasdruck in der Matte im Verhältnis zum Druckaufnehmer P_1 bei verschiedenen Rohdichten (Position der Drucksensoren P_1 bis P_6 siehe Abbildung 80)	152
Abbildung 105: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Fasermatten bei einer Rohdichte von 200 kg/m^3 und 606 kg/m^3	155
Abbildung 106: Vergleich der Druckwerte der 10 bar-Drucksensoren mit den Druckwerten der 1 bar-Differenzdruckaufnehmer.....	158
Abbildung 107: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus MS-Spänen bei einer Rohdichte von 304 kg/m^3 und 636 kg/m^3	160

Abbildung 108: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus DS-Spänen bei einer Rohdichte von 283 kg/m ³ und 675 kg/m ³	162
Abbildung 109: Simulierte Druckverteilung in der Probe von Matten aus Strands bei einer Rohdichte von 300 kg/m ³ und 620 kg/m ³	165
Abbildung 110: Querdehnung von Matten aus Fasern durch Verdichtung	170
Abbildung 111: Reduzierung der Rohdichte durch Querdehnung und Feuchteverlust bei Messung der Permeabilität in horizontaler Richtung von einer Matte aus Fasern	171
Abbildung 112: Reduzierung der Rohdichte durch Querdehnung und Feuchteverlust bei Messung der Permeabilität in vertikaler Richtung von einer Matte aus Fasern	171
Abbildung 113: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 % (Messvorrichtung I)	177
Abbildung 114: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten aus MS-, DS-Spänen und Fasern bei einer Feuchte von 10 – 11 % (Messvorrichtung I)	177
Abbildung 115: Horizontale Permeabilität von unbeleimten Matten verschiedener Materialien bei einer Feuchte von 11,3 – 13,9 % (Messvorrichtung II)	178
Abbildung 116: Vertikale Permeabilität von unbeleimten Matten verschiedener Materialien bei einer Feuchte von 11,3 – 13,9 % (Messvorrichtung II)	178
Abbildung 117: Simulierte Druckverteilung von Matten aus MS-Spänen bei verschiedener Rohdichte von 200, 500, 800 und 1200 kg/m ³ mit dem Simulationsprogramm der Universität Poznań	185
Abbildung 118: Festgelegte Messpunkte in der Anlage zur Messung der Drücke in der Probe bei verschiedener Rohdichte von 200, 500, 800 und 1200 kg/m ³	186
Abbildung 119: Anwendungsprogramm zur Berechnung der Permeabilität in zwei Dimensionen mit den Eingaben der Daten (Daten aus Probe 1 der Fasern der 1. Messung)	188
Abbildung 120: Protokolle der Anzahl der gesuchten Zielfunktionen (No.of Finding Minimum Error), des Verhältnisses der vertikalen zur horizontalen Permeabilität (K_v/K_h), der Summe der Abweichung zwischen den Ergebnissen der Computersimulation und den Messergebnissen in P^2 (Minimum Error of P^2) und der Anzahl der Iterationen (No. Of Iteration)	189

Abbildung 121: Das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität beim Minimum der Zielfunktion von P^2 und Druckverteilung in der Probe (Matten aus Fasern der Probe 1)	190
Abbildung 122: Protokolle der Summe des Massenstroms von den Gitterpunkten $j = 1$ bis n_z+1 in einigen Gitterschritten $i > (n_r+2/2)$, des gemessenen und berechneten Massenstroms, der vertikalen und horizontalen Permeabilität und des Vergleichs der gemessenen und simulierten Drücke.	190
Abbildung 123: Das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Permeabilität und Zielfunktion von P^2	191
Abbildung 124: Druckverteilung in der Probe des betrachteten Bereiches (siehe Abbildung 51)	192

14. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittelwerte der Spanlänge l , Breite b und Dicke d sowie des Schlankheitsgrades l/d , Spanoberfläche $l \times b$ und des Spanvolumens $l \times b \times d$ für verschiedene Spanarten (V = Variationskoeffizient, MS = Mittelschicht, DS = Deckschicht) 34	34
Tabelle 2:	Mittelwerte der Spanlänge l , Breite b , und Dicke d , sowie des Schlankheitsgrades l/d , Spanoberfläche $l \times b$ und des Spanvolumens $l \times b \times d$ für verschiedene Spanarten (V = Variationskoeffizient)..... 36	36
Tabelle 3:	Eigenschaften von Kaurit 345 38	38
Tabelle 4:	Materialien und Faktoren zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen Permeabilität mit Messvorrichtung I 39	39
Tabelle 5:	Koeffizienten zur Berechnung der horizontalen Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte (RBZH = Rohdichte aus Masse, bezogen auf atro Holz, berechnet, RBMK = Rohdichte, ohne Berücksichtigung der Masse des Klebstoffes, berechnet) 97	97
Tabelle 6:	Koeffizienten zur Berechnung der vertikalen Permeabilität in Abhängigkeit von der Rohdichte (RBZH = Rohdichte aus Masse, bezogen auf atro Holz, berechnet, RBMK = Rohdichte, ohne Berücksichtigung der Masse des Klebstoffes, berechnet) 98	98
Tabelle 7:	Koeffizienten zur Berechnung der horizontalen Permeabilität der unbeleimten Fasern, DS-, MS-Späne und Strands in Abhängigkeit von der Rohdichte bei einer Feuchte von 11,3 bis 13,9 % (Messvorrichtung II) 127	127
Tabelle 8:	Koeffizienten zur Berechnung der vertikalen Permeabilität der unbeleimten Fasern, DS-, MS-Späne und Strands in Abhängigkeit von der Rohdichte bei einer Feuchte von 11,3 bis 13,9 % (Messvorrichtung II) 127	127
Tabelle 9:	Vergleich der Messwerte aller 10 bar-Drucksensoren ($P_1 - P_6$) mit den Anzeigewerten des 0,1 bar- Differenzdruckaufnehmers (Die hinterlegten Felder sind die gemessenen Druckwerte der 10 bar-Drucksensoren (P_1-P_6) und die Anzeigewerte der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer zur erneuten Berechnung der Permeabilitätswerte) 157	157
Tabelle 10:	Vergleich der berechneten Permeabilität aus den Druckwerten der 0,1 bar-Differenzdruckaufnehmer mit der berechneten Permeabilität aus den	

	Druckwerten der 0,1 bar-Drucksensoren und den Ergebnissen der Messvorrichtung I	158
Tabelle 11:	Vergleich der gemessenen Drücke bei verschiedenen Messpunkten von Matten aus DS-, MS-Spänen, Fasern und Strands mit den simulierten Drücken nach dem zweiten Modellansatz (Lage der Drucksensoren siehe Abbildung 44)	167
Tabelle 12:	Verminderung der horizontalen (K_h) und vertikalen (K_v) Permeabilität von Matten aus Fasern durch Querdehnung und Feuchteverlust der Probe ...	172
Tabelle 13:	Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität an DS-Spänen bei verschiedenen Temperaturen von 20 °C und 80 °C in Abhängigkeit von der Rohdichte	186
Tabelle 14:	Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität an MS-Spänen bei verschiedenen Temperaturen von 20 °C und 80 °C in Abhängigkeit von der Rohdichte	187
Tabelle 15:	Varianzanalyse der vertikalen Permeabilität an DS-Spänen bei verschiedenen Temperaturen von 20 °C und 80 °C in Abhängigkeit von der Rohdichte	187

15. Abkürzungsverzeichnis

A	Oberfläche (m ²)
a, b, c	Koeffizienten
dx	Distanz in Strömungsrichtung bei der Messung der Druckdifferenz (m)
dP	Druckdifferenz (Pa)
DS	Deckschicht
\dot{g}_V	volumetrischer Luftstrom
MS	Mittelschicht
n	Mole des Gases
n	auswärtsgerichteter Einheitsvektor senkrecht zur Systemgrenze
\dot{m}	Massenstrom (kg/s)
k	Permeabilität (m ² /Pa·s)
K	spezifische Permeabilität (m ²)
K	Tensor zweiter Ordnung der Permeabilität
K _i	Permeabilität in Strömungsrichtung
K _{ij}	Komponenten des Tensors zweiter Ordnung der Permeabilität
K _h	spezifische horizontale Permeabilität (m ²)
K _x	spezifische horizontale Permeabilität im kartesischen Koordinatensystem
K _y	spezifische vertikale Permeabilität im kartesischen Koordinatensystem
K _n	spezifische Permeabilität in n Richtung
K _r	spezifische horizontale Permeabilität in Zylinderkoordinate
K _z	spezifische vertikale Permeabilität in Zylinderkoordinate
L	Länge der Probe in Strömungsrichtung (m)
L	Länge der Probe in axialer Richtung (m)
OSB	Oriented Strands Board
P	Absolutdruck (Pa)
P	absoluter Druck bei der Messung der Durchflussmenge (Pa)
P	absoluter Druck vor dem Schwebekörpermessgerät (Pa)
P _r	absoluter Druck beim Referenzdurchfluss = 1,013 x 10 ⁵ Pa
P ₁	absoluter Druck nach der Probe (Pa)
P ₂	absoluter Druck vor der Probe (Pa)
P _{atm}	Atmosphärendruck (Pa)
ΔP _{atm}	Differenzdruck zur Atmosphäre (Pa)
ΔP	Druckdifferenz (Pa)
ΔP	Differenzdruck vor und nach der Probe (Pa)

$\Delta P_{\text{verlust}}$	Druckabfall bzw. Druckverlust vor der Probe bis zum Schwebekörpermessgerät (Pa)
\bar{P}	mittlerer Druck (Pa)
Q	Durchflussmenge (m ³ /s)
Q	tatsächliche Durchflussmenge (m ³ /s)
Q ₁	Durchflussmenge nach der Probe (m ³ /s)
Q _{gem}	gemessene Durchflussmenge (m ³ /s)
r	äußerer Radius der Probe (m)
r _i	innerer Radius der Probe (m)
r,θ,z	Koordinaten eines Punktes im zylindrischen Koordinatensystem
R	universelle Gaskonstante = 8,3142 J/(mol·K)
R _i	individuelle Gaskonstante für Luft = 287 J/(kg·K)
t	Temperatur (°C)
T	Absoluttemperatur (K)
T	absolute Temperatur vor dem Schwebekörpermessgerät (K)
T ₁	absolute Temperatur nach der Probe (K)
T _r	absolute Temperatur beim Referenzdurchfluss = 293,15 K
v _i	Geschwindigkeit in Strömungsrichtung
v	Geschwindigkeitsvektor
V	Volumen (m ³)
x, y	Koordinaten eines Punktes im zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem
η	dynamische Viskosität des Durchflussmediums (Pa · s)
ρ	Dichte des Gases (kg/m ³)
ρ	Rohdichte (kg/m ³)
τ	Zeit
φ	Porosität

Lebenslauf

Name: Wiwat Hanvongjirawat
Geburtsdatum: 29.03.1967
Geburtsort: Krabi, Thailand
Eltern: Siri Hanvongjirawat (geb. Saetan) und Chan Hanvongjirawat
Nationalität: thailändisch
Familienstand: verheiratet mit Supacha Hanvongjirawat (geb. Lympiyaphan), 1 Kind

Schulbildung:

1973 – 1979 Grundschule Rachprachanukrok 1, Krabi
1979 – 1985 Primär- und Sekundarschule Samsenwittayalai, Bangkok
Abschluss: Certificate (Sciences)

Studium:

1986 – 1990 Forestry und Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok
Abschluss: B.Sc. (Forestry)
1990 – 1992 Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok
Abschluss: M.Sc. (Forest Products)
1992 – 1996 Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok
Abschluss: B.Eng (Mechanical Engineering)

Derzeitige Beschäftigung:

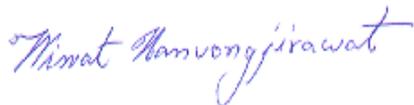
Seit 1992 Lecturer am Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok
Seit 1998 DAAD-Stipendiat als Gastwissenschaftler der Universität Hamburg, Ordinariat für Holztechnologie

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorgelegte Arbeit selbständig verfaßt, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht verwendet und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Inanspruchnahme persönlicher Hilfen habe ich namentlich aufgeführt.

Ich habe mich weder an einer anderen Universität um eine Promotion beworben, noch habe ich die Dissertation an einer anderen Universität eingereicht.

Hamburg, 30. April 2003



Wiwat Hanvongjirawat