

**IB 131-2014/064**

**Experimentelle Analyse des Verhaltens  
von Dry-Spots im Druckfeld eines  
Liquid Composite Moulding Prozesses**

Lea Kallenbach



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig**

Januar / 2015



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtzgemeinschaft  
Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik

IB 131-2014/064

Experimentelle Analyse des Verhaltens  
von Dry-Spots im Druckfeld eines  
Liquid Composite Moulding Prozesses

Braunschweig, Januar, 2015

Der Bericht umfasst:

142 Seiten

Institutsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



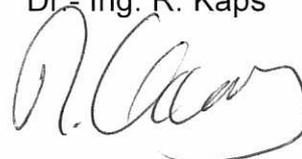
Leiter der Abteilung:  
Dr.- Ing. M. Kleineberg



Verfasser:  
L. Kallenbach



Betreuer:  
Dr.- Ing. R. Kaps







Technische  
Universität  
Braunschweig

Institut für Adaptronik  
und Funktionsintegration



Diplomarbeit

# Experimentelle Analyse des Verhaltens von Dry-Spots im Druckfeld eines Liquid Composite Moulding Prozesses

Lea Kallenbach

Matrikelnummer: 2944755

5. Januar 2015

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann

Betreuer: Dr.-Ing. Robert Kaps

Erstellt in Zusammenarbeit mit:

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.

in der Helmholtz-Gemeinschaft

## I Aufgabenstellung

Hier findet sich die zweite Seite der Aufgabenstellung.

Hier findet sich die dritte Seite der Aufgabenstellung.

## II Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel und Literatur angefertigt habe.

Braunschweig, den 5. Januar 2015

---

### III Übersicht

In der vorliegenden Arbeit wird das Verhalten eines Dry-Spot im Druckfeld eines Liquid Composite Moulding Prozesses experimentell untersucht. Dafür werden Anpassungen an einem existierenden Versuchsstand vorgenommen um die Automatisierbarkeit der Versuchsauswertung und die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu verbessern.

Faserverbundwerkstoffe werden aufgrund ihrer hohen Festig- und Steifigkeiten bei einer geringen Dichte und der weitreichenden Gestaltungsmöglichkeiten für Bauteile in vielen unterschiedlichen Branchen verwendet. Die hohen Kosten des Herstellungsverfahrens sind insbesondere beim Resin Transfer Moulding Verfahren ein Nachteil. Mittels geeigneter Fließsimulationen lassen sich die Kosten verringern. Für die erfolgreiche Verwendung von Fließsimulationen sind detaillierte Kenntnisse über die Mechanismen im realen Injektionsprozess erforderlich.

Die in der Arbeit beschriebenen Anpassungen am Versuchsstand umfassen u. a. eine optimierte Injektionsstrategie, die Integration von Druckmessumformern sowie eine dadurch erforderliche Änderung des Beleuchtungskonzepts. Zu weiteren Anpassungen zählen die Konstruktion einer Abschirmvorrichtung, eines Werkzeugunterbaus und eines Druckbehälters für Versuche mit höherem Injektionsdruck.

Für die Untersuchung des Dry-Spot Verhaltens werden Versuche am angepassten Versuchsstand durchgeführt. Mittels der entwickelten Injektionsstrategie wird ein Dry-Spot im Druckfeld eines RTM-Prozesses erzeugt. Über Stellgrößen, wie z. B. Injektionsdruck und Faservolumengehalt, werden die Prozessparameter variiert. Zu ihnen zählen die Viskosität des Fluids, die Permeabilität des Fasermaterials und der Druckgradient in der Kavität. Ihr Einfluss auf das Verhalten des Dry-Spot wird anhand der zeitlichen Volumen- und Stoffmengenänderung des Dry-Spot sowie seiner Auflöszeit und der Geschwindigkeit, der bei der Auflösung entstehenden mobilen Poren, ausgewertet.

Die Versuchsergebnisse zeigen die Auflösung des Dry-Spot aufgrund eindringenden Fluids und das Loslösen einzelner Poren aus dem Dry-Spot. Meist konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabeparametern festgestellt werden. Die ursprüngliche Annahme eines gleich gerichteten Druckgradienten in jeder Phase des Prozesses muss aufgrund der Ergebnisse revidiert werden. So ergeben sich vor dem Beginn des Loslösens der Poren unterschiedlich gerichtete Druckgradienten zwischen dem Dry-Spot und der Evakuierungsseite des Werkzeugs. Zusätzlich werden u. a. die von der Porenwanderung verursachten charakteristischen Druckschwankungen untersucht und für die weitere Auswertung der Versuche genutzt. Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten die Grundlage für eine Validierung von Fließsimulationen eines LCM-Prozesses, welche sich als Inhalt für nachfolgende Arbeiten anbietet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I Aufgabenstellung</b>	<b>i</b>
<b>II Erklärung</b>	<b>iv</b>
<b>III Übersicht</b>	<b>v</b>
<b>IV Bezeichnungen</b>	<b>viii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziele der Arbeit . . . . .	2
1.2 Gliederung der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Aufbau und Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen . . . . .	3
2.1.1 Glasfasern . . . . .	4
2.1.2 Faserhalbzeuge . . . . .	5
2.1.3 Matrixsysteme . . . . .	7
2.2 Liquid Composite Moulding Verfahren . . . . .	7
2.2.1 Open-Mould-Verfahren . . . . .	8
2.2.2 Closed-Mould-Verfahren . . . . .	9
2.2.3 Tränkungsstrategien . . . . .	10
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>11</b>
3.1 Arten von Gaseinschlüssen . . . . .	11
3.1.1 Entstehung von Dry-Spots . . . . .	11
3.1.2 Entstehung von Makro- und Mikroporen . . . . .	13
3.2 Mobilität der Poren . . . . .	15
3.3 Fließsimulation . . . . .	16
3.3.1 Darcy-Gleichung . . . . .	17
3.3.2 Permeabilität . . . . .	18
3.3.3 Viskosität . . . . .	19
<b>4 Anpassung und Erweiterung des Versuchsstands</b>	<b>21</b>
4.1 Injektionsstrategie . . . . .	21
4.2 Bestehender Versuchsstand . . . . .	23
4.2.1 RTM-Werkzeug . . . . .	23
4.2.2 Versuchsstand . . . . .	24
4.3 Erweiterung . . . . .	25

4.3.1 RTM-Werkzeug . . . . .	25
4.3.2 Versuchsstand . . . . .	28
<b>5 Versuche zur Analyse des Verhaltens von Dry-Spots</b>	<b>36</b>
5.1 Versuchsplan . . . . .	36
5.2 Verwendete Materialien . . . . .	38
5.2.1 Fasermaterial . . . . .	38
5.2.2 Matrixsystem . . . . .	38
5.3 Versuchsdurchführung . . . . .	39
<b>6 Auswertung der Versuchsergebnisse</b>	<b>42</b>
6.1 Verarbeitung der Versuchsmessdaten . . . . .	42
6.2 Betrachtung der Versuchsdurchführung . . . . .	44
6.3 Betrachtung der Versuchsmessdaten . . . . .	48
6.4 Einfluss der Eingabeparameter auf die Entstehung und das Verhalten des Dry-Spot . . . . .	56
6.4.1 Einfluss des Druckgradienten . . . . .	57
6.4.2 Einfluss der Permeabilität . . . . .	65
6.4.3 Einfluss der Viskosität . . . . .	69
6.5 Allgemeine Erkenntnisse aus den Versuchsergebnissen . . . . .	72
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>74</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>76</b>
<b>Tabellen- und Abbildungsverzeichnis</b>	<b>81</b>
<b>A Anhang</b>	<b>86</b>
A.1 Tabellen . . . . .	86
A.2 Diagramme . . . . .	88
A.3 Technische Zeichnungen . . . . .	94
A.4 Kameraeinstellungen . . . . .	107
A.5 Makros für die automatisierte Versuchsauswertung . . . . .	110
A.6 Datenblätter . . . . .	112
A.6.1 Datenblatt des Glasfasernadelvieses . . . . .	112
A.6.2 Datenblatt des Silikonöls . . . . .	113
A.6.3 Datenblatt des Kontrastmittels . . . . .	125
A.6.4 Datenblatt des Farbglasfilters . . . . .	133
A.6.5 Datenblatt der Druckmessumformer . . . . .	134
A.7 Daten-DVD . . . . .	142

## IV Bezeichnungen

### Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Fläche
$Ca$	–	Kapillarzahl
$g$	$m/s^2$	Gravitationskonstante
$G$	$kg/m^2$	spez. Flächengewicht
$K$	$m^2$	Permeabilität
$n$	–	Anzahl
$n$	mol	Stoffmenge
$p$	$N/m^2$	Druck
$R$	$J/(mol K)$	universelle Gaskonstante
$t$	m	Dicke
$T$	K	Temperatur
$v$	$m/s$	Geschwindigkeit
$V$	m	Volumen
$\gamma$	$N/mm^2$	Oberflächenspannung
$\eta$	Pa s	dyn. Viskosität
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\varphi$	–	Faservolumengehalt

### Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer Aided Design
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FVG	Faservolumengehalt
FVW	Faserverbundwerkstoffe
IR	infrarot

<b>LCM</b>	Liquid Composite Moulding
<b>MDF</b>	mitteldichte Holzfaser
<b>PTFE</b>	Polyetrafluorethylen
<b>RTM</b>	Resin Transfer Moulding
<b>SLI</b>	Single Line Injection
<b>UD</b>	unidirektional
<b>UV</b>	ultraviolett

# 1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe (FVW) werden in vielen unterschiedlichen Branchen, wie beispielsweise in der Luft- und Raumfahrttechnik, dem Automobilbau, aber auch im Bauwesen und der Sportindustrie, eingesetzt. Grund hierfür sind hohe Festig- und Steifigkeiten bei einer geringen Dichte und das daraus resultierende Leichtbaupotential. Aufgrund freier Gestaltungsmöglichkeiten der FVW gut an Belastungsrichtung und -art angepasste Bauteile, bieten einen weiteren Vorzug. Dem gegenüber steht ein teurer Herstellungsprozess, der eine breite Verwendung von FVW verhindert [15], [57], [64].

Insbesondere die Nutzung von Resin Transfer Moulding Verfahren (RTM-Verfahren), einem Liquid Composite Moulding Prozess, ist kostenintensiv. Beim RTM-Verfahren wird ein Matrixsystem in ein geschlossenes, beidseitig massives Formwerkzeug injiziert, in welchem sich ein vorbereitetes Fasermaterial (Preform) befindet. Die Herstellung der massiven Formwerkzeuge verursacht einen Großteil der Kosten. Gerade in der Entwicklungsphase eines neuen Bauteils stellen die Kosten für die iterative Anpassung der Formwerkzeuge eine besondere Herausforderung dar, z. B. für die Erzeugung von Prototypen. Andererseits ermöglichen RTM-Verfahren Bauteile mit höchster Qualität und Reproduzierbarkeit. Ebenso bieten sie den Vorteil eines automatisierbaren Herstellungsprozesses [3].

Zur Vermeidung der Kosten für Werkzeugänderungen und Optimierung des Herstellungsprozesses eignet sich der Einsatz von Softwaresimulationen der Fließvorgänge während des RTM-Verfahrens. Aufgrund des Einsatzes von Simulationen lassen sich bereits vor der ersten Bauteilherstellung optimierte Injektionsstrategien und Verfahren für ein Bauteil mit einer möglichst geringen Anzahl von Fehlstellen entwickeln. Auf diese Weise minimiert sich das Risiko bei der Entwicklung neuer Formwerkzeuge. Zusätzlich erlauben Simulationen eine detailliertere Vorkalkulation der Produkt-herstellungskosten [19].

Da verfügbare Simulationssoftware bislang nicht den benötigten Funktionsumfang bereitstellt um die Auswirkungen von Injektionsstrategien auf die Anzahl und Größe von Fehlstellen, wie beispielsweise Gaseinschlüsse, zu bestimmen, sind Erweiterungen notwendig. Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik werden deshalb Softwarewerkzeuge im Umfeld der Simulationssoftware *RTM-Worx* der Fa. *Polyworx* entwickelt.

Für die erfolgreiche Verwendung von Fließsimulationen sind detaillierte Kenntnisse über die Mechanismen im realen Prozess erforderlich. Sie fließen in Modelle ein, die das Verhalten des injizierten Matrixsystems und entstehender Fehlstellen beschreiben. Die am häufigsten auftretenden Fehlstellen während eines Liquid Composite Moulding (LCM) Verfahrens sind Gaseinschlüsse (Dry-

Spots) im getränkten Fasermaterial [30]. Diese Dry-Spots verschlechtern die mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Bauteils. Das Auftreten und Auflösen der Dry-Spots hängt von den Umgebungsbedingungen und einer großen Anzahl von Einflussfaktoren ab [30], [42], [50]. Zu den Einflussfaktoren auf die Entstehung und das Verhalten von Dry-Spots zählen u. a. der Druckgradient, die Entfernung zur Fließfront, die Permeabilität des Fasermaterials und die Viskosität des injizierten Matrixsystems. Zur Validierung der entwickelten Simulationen und Modelle zur Effektbeschreibung in LCM-Verfahren und der Beschreibung des Verhaltens von Dry-Spots ist der Vergleich der Simulationsergebnisse mit realen Versuchsergebnissen erforderlich.

Die experimentelle Analyse des Verhaltens von Dry-Spots und die Auswertung von Versuchen als Grundlage zur Validierung der Simulationsergebnisse ist Inhalt dieser Arbeit.

## 1.1. Ziele der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, die Größenänderung der Dry-Spot Fläche und das Auflösen des Dry-Spot in einem Faserlaminat während eines LCM-Prozesses in zeitlicher Abhängigkeit experimentell zu analysieren. Der Einfluss von Prozessparametern, wie Druckgradient, Faservolumengehalt und Viskosität des Matrixsystems, soll durch die Auswertung von Versuchen untersucht werden. Nach dem Abschluss der Arbeit soll der existierende Versuchsstand dahingehend erweitert sein, dass reproduzierbare Versuchsabläufe und -ergebnisse möglich sind. Ein weiteres Ziel ist die Erzeugung von Versuchsergebnissen, die zur Validierung von Simulationsergebnissen herangezogen werden können. Es sollen auftretende Effekte im Zusammenhang mit dem Dry-Spot bei der Injektion während eines LCM-Verfahrens aufgezeigt und beschrieben werden.

## 1.2. Gliederung der Arbeit

Nach der Einleitung in die Arbeit werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Faserverbundtechnologie und LCM-Verfahren vorgestellt. Es folgt im anschließenden Kapitel 3 die Darstellung des aktuellen Stands der Technik. Darin wird der aktuelle Forschungsstand bzgl. der Entstehung von Gaseinschlüssen, wie Dry-Spots, Mikro- und Makroporen beschrieben. Ebenso findet sich eine Übersicht der Ergebnisse vorangegangener Arbeiten im Hinblick auf die Mobilität der Poren und die Entwicklung von Fließsimulationen. In Kapitel 4 wird dargestellt, welche Anpassungen am existierenden Versuchsstand vorgenommen wurden. Dies berücksichtigt auch eine angepasste Injektionsstrategie. Der entwickelte Versuchsplan sowie eine Übersicht über die verwendeten Materialien und die detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung folgt in Kapitel 5. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist in Kapitel 6 dokumentiert. Neben der Betrachtung der Versuchsdurchführung, findet sich dort die Analyse der Versuchsmessdaten sowie die Auswertung des Einflusses von ausgewählten Prozessparametern auf das Verhalten des Dry-Spot. In Kapitel 7 wird der Inhalt der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf nachfolgende Arbeiten gegeben.

## 2 Theoretische Grundlagen

Das Kapitel der theoretischen Grundlagen gliedert sich in zwei Bereiche. Zuerst werden Aufbau und Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen mit den dazugehörigen Komponenten erläutert. Anschließend werden Liquid Composite Moulding Verfahren mit entsprechenden Beispielen beschrieben.

### 2.1. Aufbau und Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

Faserverbundwerkstoffe (FVW) sind Mehrphasenwerkstoffe, die aus einem Verbund von mindestens zwei Komponenten (Fasern und Matrix) bestehen. Dabei entsprechen die Fasern der hochfesten, versteifenden Komponente, die in die weniger feste, verbindende Matrix eingebettet ist [15], [16], [18].

Mit der Kombination beider Bestandteile werden die Eigenschaften der einzelnen Materialien verbessert sowie Synergieeffekte erzeugt, die unter Verwendung der Einzelkomponenten nicht erzielt werden können [15], [18]. Allgemein liegen die Vorteile von FVW darin, dass sie bei geringem Gewicht hohe Steifig- und Festigkeiten aufweisen. Des Weiteren gibt es vielfältige Kombinationsmöglichkeiten von Faser und Matrix und die mögliche Formgestaltung ist weitgehend frei. Diese Flexibilität führt jedoch zu hohen Herstellungskosten. Außerdem resultiert aus der hohen Anzahl an Variationsmöglichkeiten, dass häufig aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit nicht im Voraus auf das Materialverhalten des Verbundes geschlossen werden kann. Schließlich sind keine standardisierten FVW verfügbar [15], [57].

Die Aufgabe der Fasern sind die Leitung und Aufnahme der aufgetragenen Lasten. Einige wichtige Aufgaben des Matrixmaterials sind es, die Fasern in der gewünschten Anordnung zu halten und somit auch insgesamt die Form des Bauteils zu wahren. Außerdem überträgt die Matrix die Kräfte in die Faser, sowie von Faser zu Faser und schützt diese vor Umgebungseinflüssen. Bei Belastung quer zur Faser, nimmt die Matrix die anliegenden Kräfte auf [15], [36], [57].

Typische Matrixmaterialien sind polymere Kunststoffe, die sich in Duroplaste (bspw. ungesättigte Polyester, Epoxide) und Thermoplaste (u. a. Polypropylen, Polyamide) einteilen lassen. Glas, Kohlenstoff und Aramid sind charakteristische Materialien für die Herstellung von Fasern [15].

Im Weiteren werden lediglich Glasfasern betrachtet, da ausschließlich diese, wie später noch erläutert wird, in der Arbeit verwendet werden (s. Kapitel 5.2).

### 2.1.1. Glasfasern

Überwiegend wird zur Herstellung von Glasfasern das Schmelzspinnverfahren oder auch Düsenziehverfahren genutzt (s. Abbildung 2.1). Dabei wird der Rohstoff (z. B. Quarzmehl, Flussspat oder Kalkstein, versetzt mit Metalloxiden) bei etwa 1.400 °C aufgeschmolzen und anschließend durch Spinndüsen geführt, um so Glasfasern mit einem Durchmesser von 1 mm – 2 mm zu erzeugen. Mit einer Wickelvorrichtung werden die zähflüssigen Glasfäden dann mit einer Geschwindigkeit von 50 m/s auf einen Enddurchmesser von 5 µm – 24 µm gezogen. Vor dem Aufwickeln des Spinnfadens werden die einzelnen Fasern zuvor mit einer Schlichte benetzt. Ziel der Schlichte ist es, die Fasern zu bündeln, die Oberfläche zu schützen sowie die Haftung der Matrix zu verbessern [15], [18].

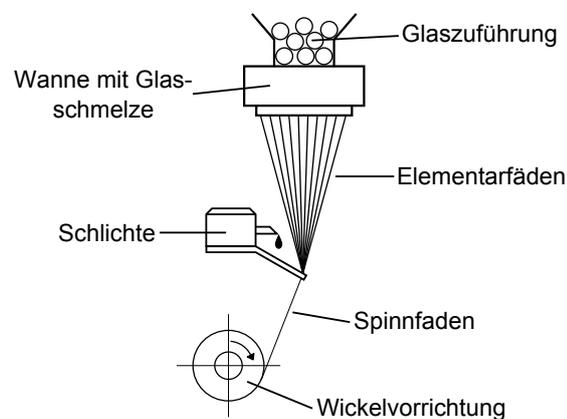


Abb. 2.1.: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von Glasfasern nach [18], [23]

Je nach Art der Bestandteile der Glasschmelze entstehen unterschiedliche Glasfasertypen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften. Als Standard hat sich das E-Glas (Aluminiumbor-silikatglas), ursprünglich für elektrische Anwendungen, etabliert. Dem gegenüber steht R/S-Glas (Resistance/Strength-Glas) mit höheren Festigkeiten, Glas mit guten dielektrischen Eigenschaften (D-Glas) und C-Glas mit guter chemischer Beständigkeit [3], [15], [18], [57]. Typische Kennwerte des jeweiligen Glasfasertyps sind Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Werkstoffkennwerte	Einheit	E-Glas	R/S-Glas	D-Glas	C-Glas
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,6	2,53	2,14	2,52
Zugfestigkeit	MPa	3.400	4.400	2.500	2.400
E-Modul	MPa	73.000	86.000	55.000	70.000
Bruchdehnung	%	4,8	4,8	4,6	4,8

Tab. 2.1.: Werkstoffkennwerte der verschiedenen Glasfaserarten [3], [15]

Glasfasern weisen eine hohe Zugfestigkeit auf sowie gute Drapierbarkeit aufgrund von niedriger Fasersteifigkeit. Weitere Vorteile liegen in der guten elektrischen und thermischen Isolationsfähigkeit und in einer geringen Feuchtigkeitsaufnahme. Ferner entspricht der Brechungsindex der Glasfasern in etwa dem von transparenten Harzen. Porenfreie und gut benetzte Lamine sind

dementsprechend annähernd transparent, während mit steigender Anzahl von Luftblasen das Laminat milchiger wird. Infolgedessen ist die Tränkung der Glasfasern visuell sehr gut überprüfbar. Zum Hauptvorteil der Glasfasern gehört, dass sie besonders günstig in der Anschaffung sind. Demgegenüber steht als Nachteil der niedrige Elastizitätsmodul der Glasfasern [57].

### 2.1.2. Faserhalbzeuge

Aus den zuvor erzeugten Fasern (s. Abschnitt 2.1.1) werden unterschiedliche Faserhalbzeuge hergestellt. Somit wird der Aufwand, Fasern positions- und orientierungsgenau zu platzieren, reduziert und die Qualität der Lamine gesteigert [57].

Generell werden Fasern nach ihrer Geometrie in Kurz-, Lang- und Endlosfasern eingeteilt [55]. Mit zunehmender Länge verbessern sich die Steifig- und Festigkeitskennwerte und somit auch die Verstärkungswirkung. Allerdings sind hohe Umformungsgrade bei langen Fasern nicht umsetzbar [57]. Anwendung finden die Kurzfasern im Spritzguss bei gering belasteten Bauteilen, in denen die Fasern wirt verteilt sind. Aus Langfasern werden beispielsweise Schnittmatten gefertigt, die beim Handlaminieren oder Nasspressen verwendet werden [3]. Bei höchst beanspruchten Laminaten werden aus Endlosfasern hergestellte Halbzeuge verwendet, um Lasten gezielt in definierter Faserorientierung aufzunehmen. Gewebe, Gelege, Matten/Vliese, Geflechte und Gestricke stellen Beispiele für diese Halbzeuge dar [57]. Im Folgenden werden beispielhaft Matten/Vliese und Gewebe näher erläutert.

#### Matten/Vliese

Eine Fasermatte besteht aus flächig und regellos verteilten sowie nicht gewebten Fasern. Je nach Mattentyp – Schnittmatte oder Endlosmatte – werden geschnittene oder ungeschnittene Fasern verwendet. Die wirre Verteilung der Fasern führt zu isotropen Eigenschaften in der Ebene, aber auch zu geringeren Werten der mechanischen Eigenschaften. Für eine bessere Handhabung werden die Fasern einer Matte mit einem Binder verklebt oder mittels einer mechanischen Bindung miteinander verbunden [20]. Matten sind wesentlich preiswerter als Gewebe. Ein weiterer Vorteil ist, dass kurze Faserlängen es ermöglichen auch geringe Querschnitte zu füllen, indem sich die Matte unter Druck teilweise auflöst und die Fasern mit der Matrix mitgeschwemmt werden. Zudem lassen sie sich aufgrund der lockeren Packungsdichte schnell tränken, was dazu führt, dass Fasermatten bei Injektionsverfahren als Fließhilfe genutzt werden [57]. Nachteile der Matten sind der geringe Faservolumengehalt (15 % – 35 %) und die geringen Steifig- und Festigkeiten [57].

Auch bei Vliesen handelt es sich um nicht gewebte Flächengebilde mit geringem Flächengewicht, jedoch sind diese viel feiner strukturiert [20], [57]. Die Verwendung von Einzelfasern beim Vlies gegenüber der Verwendung von Spinnfädenbündeln bei Matten führt zu der unterschiedlichen Struktur. Vorrangig dienen Vliese zur Verbesserung der Oberfläche sowie der Verstärkung von Deckschichten [18], [57].

## Gewebe

Gewebe setzen sich aus zwei rechtwinklig zueinander orientierten und sich kreuzenden Faserrichtungen (Kette und Schuss) zusammen. Hieraus ergibt sich eine bidirektionale Verstärkungswirkung. Je nach Arrangement von Kett- und Schussfäden (Flottierung) ergeben sich unterschiedliche Bindungsarten und damit auch verschiedene Faseranteile. Dies hat zum Vorteil, dass die Gewebekonstruktionen ideal an den Lastfall angepasst werden. Außerdem werden die Gewebe aufgrund ihrer einfachen Handhabung im Vergleich zu unidirektionalen Gelegen üblicherweise verwendet [20], [57].

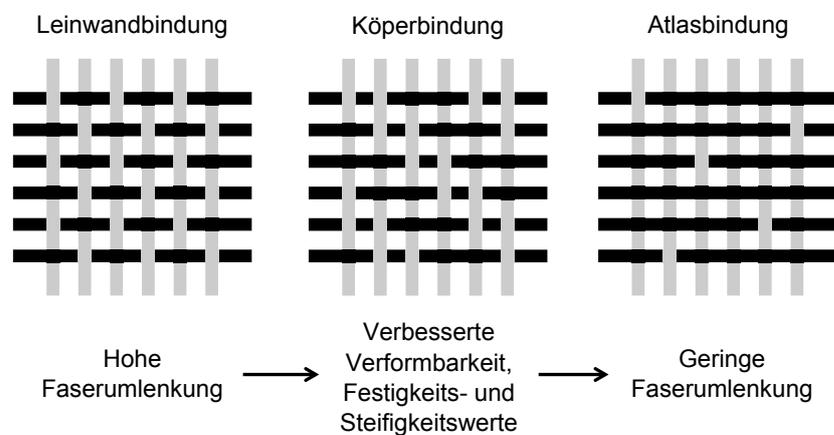


Abb. 2.2.: Typische Bindungsarten von Fasergeweben [20]

Abbildung 2.2 zeigt typische Gewebebindungsarten, wie z. B. die Leinwandbindung, welche den Grundtyp darstellt. Sie zeichnet sich durch gute Formstabilität aufgrund des geringen Abstands der Kreuzungspunkte und geringes Ausfransen beim Zuschnitt aus. Aufgrund der Formstabilität ist das Gewebe schiefbefest und lässt sich nicht ohne Falten über gewölbte Formteile drapieren [57]. Die Schussfäden der Körperbindungen verlaufen hingegen über zwei oder drei Kettfäden. Dies erzeugt diagonal verlaufende Linien, die charakteristisch für die Bindungsart sind [20]. Von Vorteil ist die bessere Drapierbarkeit, die auf Kosten der geringeren Schiefbefestigkeit bewirkt wird. In Abbildung 2.2 ist außerdem die Atlasbindung abgebildet, bei der der Schussfäden über eine größere Anzahl (mind. sieben) Kettfäden verläuft. Als Ergebnis ist die Schiefbefestigkeit sehr gering und das Gewebe sehr schmiegsam. Aus diesem Grund lässt sich das Gewebe faltenfrei (auch über nicht abwickelbare) Flächen legen [15], [20], [57].

Die Festig- und Steifigkeitskennwerte sowie die Verformbarkeit der Gewebe steigen bei abnehmender Faserumlenkung. Jedoch werden aufgrund der Faserumlenkung niemals die mechanischen Eigenschaften einer UD-Verstärkung erreicht (etwa 10 % – 40 % geringer) [3]. Im Vergleich zu Matten und Vliesen werden höhere Faservolumenanteile (35 % – 50 %) erreicht.

### 2.1.3. Matrixsysteme

Zu den Aufgaben der Matrix gehört es, die Fasern einzubetten und damit zusammenzuhalten sowie die Form des Bauteils zu erhalten. Außerdem schützt sie Fasern vor Umgebungseinflüssen, überträgt Kräfte von Faser zu Faser, gleicht Überbeanspruchungen aus und sorgt für einen Minimalabstand der Fasern [36]. Der Großteil der Eigenschaften der FVW hängt wesentlich von der Matrix ab. Dazu zählen beispielsweise die Dichte, die Steifig- und Festigkeitswerte, das Kriech- und Relaxationsverhalten, die Schlagzähigkeiten, die Temperatur-Einsatzgrenzen, die thermischen Ausdehnungskoeffizienten, die Wärmeleitfähigkeiten, die Chemikalienbeständigkeit sowie die Witterungs- und Alterungsbeständigkeit [57].

Typische Matrixmaterialien für Faserverbundwerkstoffe sind polymere Kunststoffe, die in Duroplaste und Thermoplaste eingeteilt werden [15]. Duroplaste gehören zu den meistverwendeten Matrixsystemen der Faserverbundtechnik [57]. Sie sind niedermolekular und somit bei Raumtemperatur meist dünnflüssig. Auf diese Weise werden die Verstärkungsfasern gut benetzt und getränkt. Anschließend müssen die Duroplaste chemisch härten, um ihre endgültige Konsistenz zu erreichen. Dies erfolgt durch die Zugabe von Härter und Beschleuniger und ggf. Energiezufuhr in Form von Wärme [15]. Beispiele sind Polyester, Epoxide und Polyimide [36].

Thermoplaste sind anders als Duroplaste bei Raumtemperatur fest und werden für die Verarbeitung über die Schmelztemperatur erwärmt [15]. Der Energieaufwand für die Faserimprägnierung ist damit deutlich höher. Außerdem ist die Faserimprägnierung aufgrund der höheren Viskosität der Thermoplaste deutlich schwieriger [15]. Als Vorteile der Thermoplasten sind kurze Verarbeitungszeiten und beliebig häufige Erwärmung für etwaige Umformungen anzuführen [36]. Zu dieser Gruppe gehören Polycarbonate und Polyamide [57].

## 2.2. Liquid Composite Moulding Verfahren

Zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen existieren eine Vielzahl von unterschiedlichen Harzinjektionsverfahren, die unter dem Begriff Liquid Composite Moulding Verfahren zusammengefasst werden. Darunter versteht man Verfahren, bei denen über ein im Werkzeug anliegendes Druckgefälle das darin enthaltene trockene Faserhalbzeug mit niedrigviskoser Matrix getränkt wird [3], [16], [19].

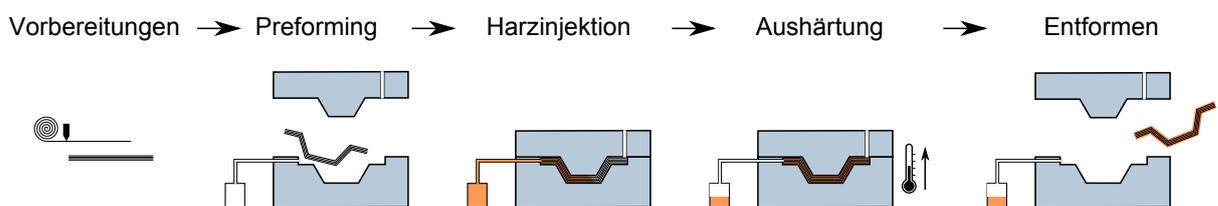


Abb. 2.3.: LCM-Verfahren: Vorbereitung, Preforming, Harzinjektion, Aushärtung, Entformen [16]

Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, werden zu Beginn Werkzeug und Faserhalbzeug für den Prozess vorbereitet. Dies beinhaltet die Reinigung des Werkzeugs und das Aufbringen des Trennmittels sowie den Zuschnitt des Faserhalbzeugs. Im Anschluss wird das zugeschnittene Faserhalbzeug (Preform) in das formgebende Werkzeug eingelegt. Verschlossen wird das Werkzeug dann entweder mit einer Membran (Open Mould) oder mit einem massiven Formwerkzeug (Closed Mould). In die erzeugte Kavität wird das Harzsystem injiziert. Nach einer vollständigen Durchtränkung des Preform wird die Injektion beendet und das Bauteil härtet aus. Zuletzt wird das Werkzeug wieder geöffnet um das Bauteil zu entformen [3], [16], [37].

Wie beschrieben, gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Injektionsverfahren, die in Open-Mould- und Closed-Mould-Verfahren unterteilt werden. Im Folgenden werden Verfahren, die in Zusammenhang mit dieser Arbeit stehen, erläutert.

### 2.2.1. Open-Mould-Verfahren

Charakteristisch ist für Open-Mould-Verfahren die Nutzung einseitiger Formwerkzeuge. Geschlossen wird das Werkzeug durch eine Membran, die luftdicht mit dem Basiswerkzeug abschließt. Diese ist flexibel und erhält ihre Form durch Evakuierung des Werkzeugs. Die Form wird dabei vom eingebrachten Faserhalbzeug vorgegeben. Aufgrunddessen ist ein lokales Überpressen sowie die Ausbildung von Harznestern kaum möglich. Maßgebend für die Wandstärke des Bauteils ist die Dehnfähigkeit der Membran. Dabei ist eine Einhaltung der Toleranzen jedoch schwieriger, da die Wandstärke von den Fertigungsparametern des Prozesses abhängig ist. Um die Sicherheit des Prozesses gegen Beschädigungen zu verbessern, werden in der Regel zwei übereinanderliegende Membranen verwendet, die über voneinander getrennte Vakuumkreisläufe verfügen. Bei dem Open-Mould-Verfahren muss, insbesondere bei der Nutzung im Autoklav, darauf geachtet werden, dass der Injektionsdruck geringer ist als der Umgebungsdruck, da die Membran sonst aufgedrückt wird [37].

#### SLI-Verfahren

Ein Open-Mould-Verfahren ist das Single Line Injection (SLI)-Verfahren. Hierbei wird das Faserhalbzeug (Preform) auf das Basiswerkzeug abgelegt und mit einer flexiblen Membran (Vakuumfolie) luftdicht verschlossen. Das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass das Werkzeug über dieselbe Leitung evakuiert wird, über die auch das Harzsystem injiziert wird. Per Umschalhahn werden die Schritte nacheinander durchgeführt (s. Abbildung 2.4). Die zweifache Verwendung der gleichen Leitungssysteme reduziert den Aufwand des Fertigungsaufbaus. Zusätzlich reduziert die daraus resultierende Materialeinsparung die anfallenden Kosten [37].

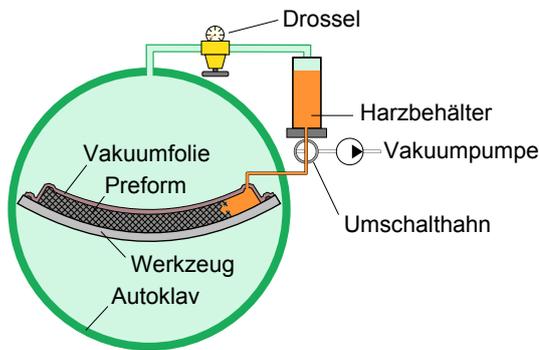


Abb. 2.4.: SLI-Verfahren [35]

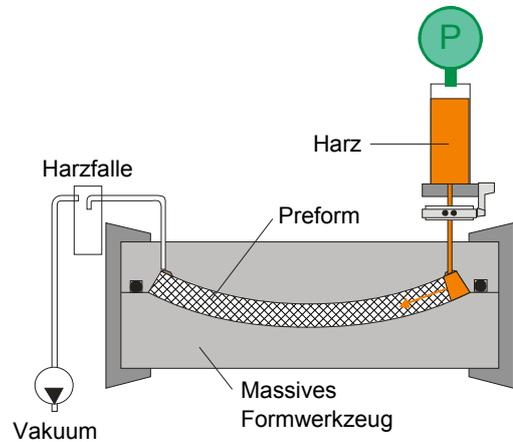


Abb. 2.5.: RTM-Verfahren [37]

### 2.2.2. Closed-Mould-Verfahren

Im Gegensatz zu Open-Mould-Verfahren werden bei Closed-Mould-Verfahren beidseitig massive Formwerkzeugteile verwendet. Dadurch entsteht eine nicht flexible Kavität und der Faservolumenanteil wird allein durch die Anzahl der eingebrachten Fasern bestimmt [37].

Die Verwendung der massiven Formwerkzeugteile führt zu einer beidseitig guten Bauteiloberfläche. Dies erlaubt enge Fertigungstoleranzen und einen minimalen Aufwand bei der Nachbearbeitung. Die Anforderungen an die aufgebaute Preform sind hoch, da die Bauteilqualität durch Harzüberschuss und überpresste Bereiche vermindert wird.

#### RTM-Verfahren

Ein typisches Closed-Mould-Verfahren ist das Resin Transfer Moulding (RTM)-Verfahren. Dabei wird das vorbereitete Fasermaterial (Preform) in ein mehrteiliges, massives, nicht variables Formwerkzeug gelegt. Nach dem Verschließen des Werkzeugs wird das Harzsystem mit Überdruck in die Form injiziert (s. Abbildung 2.5). Die Bauteilqualität kann durch vorheriges evakuieren der Form verbessert werden.

Das RTM-Verfahren bietet den Vorteil, dass unterschiedliche Faser- und Matrixhalbzeuge frei miteinander kombinierbar sind. Demgegenüber stehen hohe Fertigungskosten für die Formwerkzeuge und gegebenenfalls notwendige Nachbearbeitungen [37].

### 2.2.3. Tränkungsstrategien

Für die Herstellung porenfreier und vollständig imprägnierter Bauteile im LCM-Verfahren ist es notwendig die passende Tränkungsstrategie zu wählen. Diese ist abhängig von der Preformgeometrie sowie den Eigenschaften des Harzsystems. So muss das Bauteil vollständig imprägniert sein bevor das Harzsystem beginnt auszuhärten. Die Tränkung kann von einem oder mehreren Injektionspunkten (Ports) beginnen. Dabei sind diese an- und abschaltbar, sodass über ein bestimmtes Konzept die Injektion erfolgt [5].

Die Tränkungsstrategien können in drei Kategorien eingeteilt werden, aus denen sich alle weiteren und komplexeren Strategien ableiten lassen [38]:

- Punkttränkung: zentraler Anguss (Abbildung 2.6a)
- Kantentränkung: Anguss entlang einer Bauteilkante (Abbildung 2.6b)
- Umfangtränkung: Anguss entlang aller Bauteilkanten (Abbildung 2.6c)

Des Weiteren wird der Injektionsprozess von Entlüftungspunkten (Vents) beeinflusst. Diese sind Harzausgänge und verbinden die Kavität mit dem Umgebungsdruck oder dem Prozessvakuum [2]. Dadurch wird Poren ermöglicht aus dem Bauteil zu entweichen.

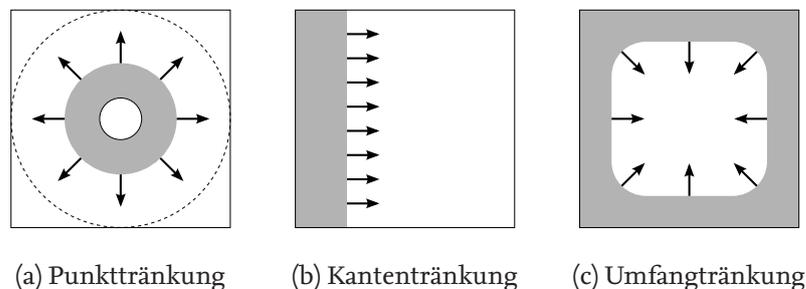


Abb. 2.6.: Kategorien der Tränkungsstrategien

## 3 Stand der Technik

Aus zahlreichen Veröffentlichungen geht hervor, dass Fehlstellen in Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen die mechanischen Eigenschaften herabsetzen [30]. Zu den Fehlstellen zählen u. a. unregelmäßige Faserverteilung, nicht gleichmäßig ausgerichtete Fasern, keine vollständige Anbindung zwischen Fasern und Matrix oder auch Fremdkörper im Bauteil [60], [61]. Gaseinschlüsse, die als Poren bezeichnet werden, sind ebenso Fehlstellen und haben einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Sie setzen Scher-, Zug- und Druck- sowie die Biegefestigkeit herab und beschleunigen das Versagen aufgrund zyklischer Belastung. Dabei sinken die mechanischen Kennwerte bei steigendem Porengehalt [1], [9], [26], [30], [54], [66].

Diese Arbeit befasst sich mit der Untersuchung von Gaseinschlüssen als Fehlstellen in Faserverbundwerkstoffen. Die wichtigsten, bei LCM-Verfahren entstehenden, Gaseinschlüsse werden im Folgenden beschrieben.

### 3.1. Arten von Gaseinschlüssen

Während eines LCM-Prozesses wird eine trockene Preform mit dem injizierten Harzsystem imprägniert. Bereiche im Bauteil, die nicht oder nur teilweise mit Harz getränkt sind, werden als Dry-Spots, Makro- und Mikroporen bezeichnet [46], [47]. In der Literatur werden diese Begriffe jedoch nicht einheitlich definiert [50]. In Übereinstimmung mit [50] werden die drei Gaseinschlüsse bezüglich ihrer Größe klassifiziert. Dry-Spots sind großflächig nicht getränkte Bereiche im Bauteil, die sich über viele Faserzwischenräume und Faserbündel erstrecken. In der Regel sind Dry-Spots mit bloßem Auge zu erkennen. Makroporen sind kleinere Lufteinschlüsse, die sich zwischen einigen Faserbündeln befinden. Als Mikroporen werden Lufteinschlüsse bezeichnet, die sich zwischen den Fasern innerhalb eines Faserbündels bilden.

Neben der Entstehung von Poren während des LCM-Prozesses können diese bereits vor Beginn der Injektion im Harz bestehen [51]. Diese werden im Weiteren nicht näher betrachtet.

#### 3.1.1. Entstehung von Dry-Spots

Dry-Spots sind großflächige Bereiche im Faserhalbzeug, die nicht mit Matrix getränkt sind. In Abbildung 3.1 sind zwei Dry-Spots nach dem Aushärten in dem Faserverbundbauteil (Flügelvorderkante) erkennbar.

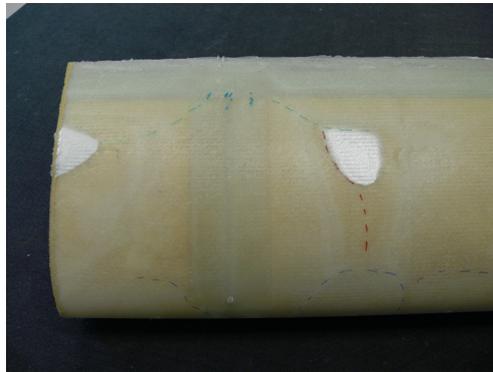


Abb. 3.1.: Dry-Spots im ausgehärteten Faserverbundbauteil (Ausschnitt Flügelvorderkante) [29]

Dry-Spots können bei der Injektion aufgrund einer falschen Anordnung von Ports und Vents entstehen [33], [27], [50]. Als Folge dessen gelieren beispielsweise bereits Harzsysteme bevor das Bauteil vollständig imprägniert ist.

Ein weiterer Faktor ist der Zusammenschluss mehrerer Fließfronten. Die inhomogene Faserarchitektur in der Preform führt zu einer Variation in der Permeabilität und somit zu unterschiedlichen Fließfrontgeschwindigkeiten und einem komplexen Harzfluss [52], [27]. Hieraus resultiert eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass sich Dry-Spots wegen zusammenlaufender Fließfronten bilden. Eine komplizierte Bauteilgeometrie erschwert außerdem die Vorhersage solcher Dry-Spots. Des Weiteren steigt der Anteil der Gaseinschlüsse mit größer werdendem Winkel zwischen den Fließfronten. Bei einem maximalen Winkel von  $180^\circ$  treffen zwei gegenüberliegende Fließfronten aufeinander [4], [11]. Bei Verschmelzung der Fließfronten kann Luft eingeschlossen werden, die anschließend nicht mehr die Möglichkeit hat sich zu einem Vent zu bewegen (s. Abbildung 3.2)[50].

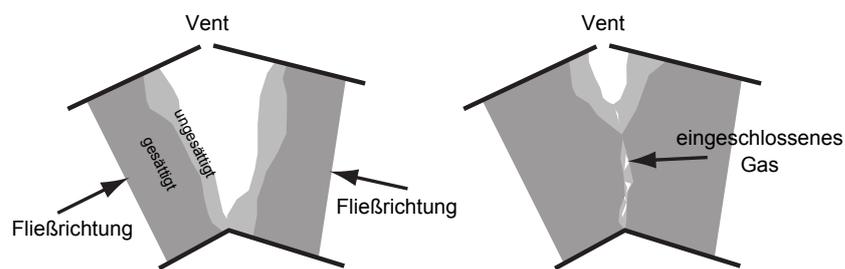


Abb. 3.2.: Entstehung von Dry-Spots aufgrund von zusammenlaufenden Fließfronten nach [5]

Ein weitere Ursache für das Entstehen von Dry-Spots ist das so genannte „Race-Tracking“. Hierunter versteht man die unterschiedliche Ausbreitung der Fließfront aufgrund von lokalen Bereichen erhöhter Porosität. Diese Bereiche stellen Kanäle mit geringerem Widerstand für den Harzfluss dar, was ein Voreilen der Matrix zur Folge hat. Problematische Bereiche sind Kanten und Ecken sowie komplexe Teile der Form, bei denen eine gleichmäßige Harzausbreitung schwierig umsetzbar ist. Andererseits werden definierte Luftkanäle für die bessere und einfachere Harzimpregnierung genutzt. Absichtliche oder unabsichtliche Kanäle können zu Dry-Spots führen [8], [48].

Der Entstehungsmechanismus der Dry-Spots ist beeinflussbar durch die Injektionsstrategie. Beispielsweise entstehen Dry-Spots je nach Bauteilgeometrie durch simultanes Öffnen der Angusspunkte (Ports), jedoch nicht wenn die Ports nacheinander (progressiv) geöffnet werden (s. Abbildung 3.3). Mittels einer hinreichend genauen Simulation des Matrixfließverhaltens kann die Injektionsstrategie optimiert werden um Anzahl und Größe der Dry-Spots zu minimieren.

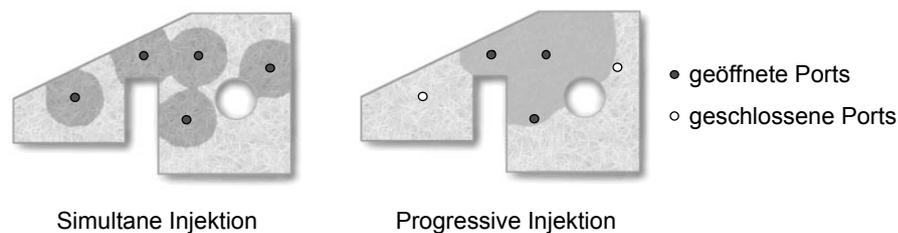


Abb. 3.3.: Vergleich von simultaner und progressiver Injektion nach [33]

Dry-Spots können aus dem Material entfernt werden, indem die Injektionsgeschwindigkeit verringert wird oder eine größere Menge des Matrixsystems über einen längeren Zeitraum injiziert wird. Beides ist ineffizient und erhöht sowohl den Materialbedarf als auch den zeitlichen Aufwand, was wiederum erhöhte Kosten verursacht [30].

Ein effizienterer Ansatz zur Minimierung von Dry-Spots bei LCM-Verfahren ist das sogenannte „Packing and Bleeding“. Hierbei werden die Auslässe (Vents) während der Injektion periodisch verschlossen und geöffnet. Der Prozess beginnt, nachdem die Fließfront des Matrixsystems sich vollständig durch das Bauteil bewegt hat. In der Packing-Phase, in der die Vents geschlossen sind, werden die Gaseinschlüsse vom einfließenden Matrixsystem komprimiert und der Druck in der Kavität steigt auf einen festgelegten Wert, der maximal dem Injektionsdruck entspricht. In der nachfolgenden Bleeding-Phase werden die Vents geöffnet und zusammen mit dem austretenden Matrixsystem entweicht ein Teil des vorher eingeschlossenen Gases. Mittels Wiederholung des Vorgangs kann das eingeschlossene Gas auf ein Minimum reduziert werden [27]. Dennoch verursacht das Packing and Bleeding einen erhöhten Materialaufwand aufgrund des zusätzlich benötigten Matrixsystems.

### 3.1.2. Entstehung von Makro- und Mikroporen

Wie beschrieben, sind Dry-Spots große Gaseinschlüsse, die während der Imprägnierung der Preform während eines LCM-Prozesses entstehen. Daneben entstehen auch kleinere Gaseinschlüsse, die als Makro- und Mikroporen bezeichnet werden. Ihre Präsenz ist abhängig vom verwendeten Fasermaterial, dem Matrixsystem und seiner Fließgeschwindigkeit.

In Fasermatten oder -vliesen in denen die Fasern wirr verteilt sind, liegen die Abstände zwischen den Fasern überall in der gleichen Größenordnung. Man spricht von einer „Single-Scale“ Porosität. Im Gegensatz dazu finden sich in Faserhalbzeugen mit „Dual-Scale“ Porosität Freiräume in zwei unterschiedlichen Größenordnungen. Dazu gehören beispielsweise Gewebe, Gelege, Geflech-

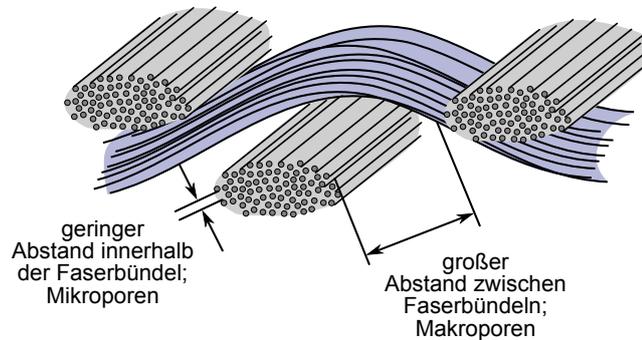


Abb. 3.4.: Schematische Darstellung eines Ausschnitts eines Faserhalbzeugs mit „Dual-Scale“ Porosität [50]

te oder Gestricke. [50], [53] In diesen werden die Fasern nicht einzeln, sondern in Faserbündeln, die als Rovings bezeichnet werden, verarbeitet. Es treten sowohl zwischen den Fasern innerhalb der Rovings, als auch zwischen den Rovings Freiräume auf. Die Freiräume (Abstände) innerhalb der Rovings sind deutlich kleiner, als die zwischen den Rovings (s. Abbildung 3.4). In den großen Freiräumen (Abständen) zwischen den Rovings entstehen die Makroporen, während innerhalb der Rovings die Mikroporen entstehen.

Dabei ist die Entstehung der jeweiligen Poren abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Matrixsystems  $v$ , seiner dynamischen Viskosität  $\mu$  und der Oberflächenspannung an der Grenzfläche Matrixsystem/Luft  $\gamma$ . Die dimensionslose Kapillarzahl  $Ca$  setzt diese Größen in Beziehung zueinander:

$$Ca = \frac{\mu v}{\gamma} \quad (3.1)$$

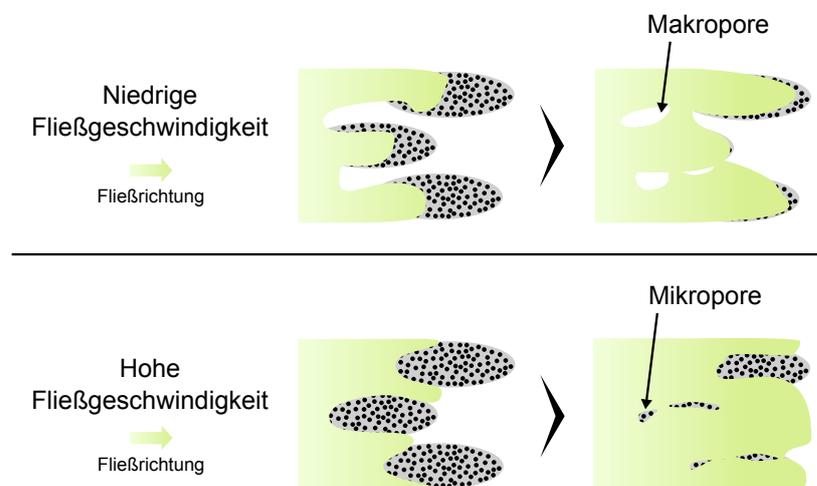


Abb. 3.5.: Schematische Darstellung der Auswirkung von niedrigen und hohen Fließgeschwindigkeit nach [56]

Die Entstehung von Makro- und Mikroporen beruht auf dem Einfluss der Kapillarkräfte und Viskositätskräfte. Bei einer niedrigen Fließgeschwindigkeit des Matrixsystems überwiegen die Kapillarkräfte der Rovings, weshalb das Matrixsystem in die Freiräume innerhalb der Rovings fließt. So entstehen zwischen den Rovings die Makroporen (s. Abbildung 3.5). Die dazugehörige Kapillarzahl ist klein. Bei einer hohen Fließgeschwindigkeit überwiegen die Viskositätskräfte, sodass das Matrixsystem in die Freiräume zwischen den Rovings fließt, jedoch nicht vollständig in diese eindringt. Entsprechend entstehen in den Rovings Mikroporen. Die dazugehörige Kapillarzahl ist groß [41].

Für ein Faserhalbzeug mit „Dual-Scale“ Porosität kann eine optimale Kapillarzahl ermittelt werden, bei der die Entstehung sowohl von Mikro- als auch von Makroporen minimiert wird. Die optimale Kapillarzahl bedeutet einen Ausgleich der beschriebenen Kräfte. Zudem trennt sie den Fließgeschwindigkeitsbereich in dem Makroporen entstehen von dem Bereich in dem Mikroporen entstehen (s. Abbildung 3.6).

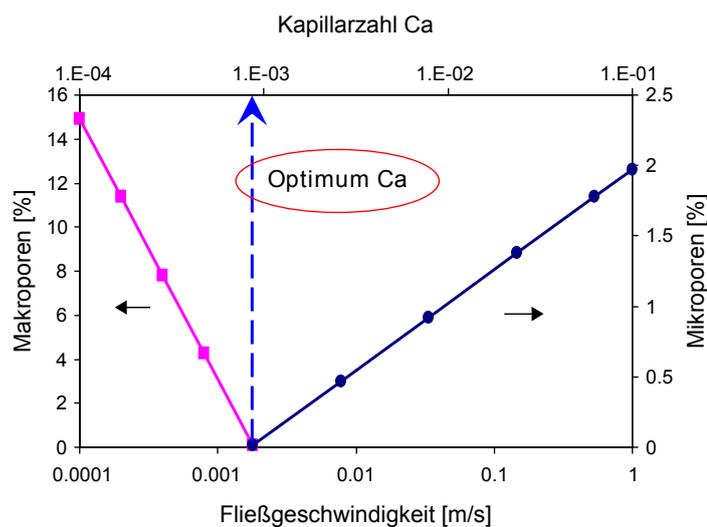


Abb. 3.6.: Anteil Mikro- und Makroporen in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der Kapillarzahl nach [41]

### 3.2. Mobilität der Poren

Neben dem Auftreten unterschiedlicher Poren spielt deren Mobilität bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen in LCM-Verfahren eine wichtige Rolle [45]. Während einige Poren sich nicht oder kaum bewegen, können andere Geschwindigkeiten erreichen, die deutlich über denen der Fließfronten liegen. In der Wissenschaft wurden bereits mehrere Einflussfaktoren erforscht. Die Mobilität der Poren hängt ab von dem anliegenden Druckgradienten, d. h. der Höhe der Druckdifferenzen zwischen Anguss und Fließfront, der Porengröße und der Position an der die Pore entsteht. Außerdem hat der Faservolumengehalt, der bestimmend ist für die Größe der Fließkanäle zwischen den Fasern, einen Einfluss auf die Mobilität der Poren. Ebenso spielt der Aufbau des Fasermaterials eine Rolle. Je nachdem wie die Fasern gegenüber der Bewegungsrichtung der Poren angeordnet

sind, können diese die Mobilität der Poren einschränken [2]. So können eng beieinander liegende Fasern senkrecht zur Bewegungsrichtung eine im Verhältnis zum Faserabstand große Pore stoppen. Andererseits wurde in Versuchen beobachtet, dass sich größere Poren in dieser Situation in kleinere Poren aufteilen, die ihre Bewegung zwischen den Fasern hindurch fortsetzen [32]. Zum Stillstand der Poren nach einer Bewegung kann es ebenso kommen, wenn unterschiedliche Druckgradienten im Bauteil vorherrschen. Dann sammeln sich die Poren vorzugsweise in Bereichen mit geringem Druckgradient [43].

Die Porenbewegung ist bei LCM-Verfahren durchaus erwünscht, da auf diese Weise größere Gaseinschlüsse (Dry-Spots) aus dem Bauteil einweichen können. Um diese Bewegung zu generieren, ist ein hinreichend großer Druckgradient erforderlich [22]. Dieser sollte idealerweise so ausgerichtet sein, dass die Poren auf direktem Weg zu einem Entlüftungspunkt (Vent) wandern. Andererseits ist die Bewegung von Poren, wenn diese nicht zu einem Ausgang wandern, unerwünscht. Diese Poren verteilen sich entsprechend weitläufig und ggf. unregelmäßig, weshalb sie in großen Teilen des Bauteils die mechanischen Kennwerte herabsetzen [45].

Einen positiven Einfluss auf die Mobilität der Poren kann auch die Diffusion des Gases ins Fluid haben. Unter höherem Druck diffundiert mehr Gas in das Fluid, weshalb die entstehenden Poren ein geringeres Volumen aufweisen. Solche kleineren Poren können eher aus dem Fasermaterial entweichen, da sie beweglicher sind als große Poren [44].

Um den Porengehalt zu minimieren, kann während einer Injektion im LCM-Verfahren an der Kavität zusätzlich ein geringerer Druck (Evakuierungsdruck) angelegt werden. Aufgrund der Entstehung der Poren an der Fließfront hat ein geringerer Druck vor der Fließfront einen positiven Effekt auf die Anzahl und Größe der entstehenden Poren. Der geringere Druck hat zur Folge, dass an der Fließfront weniger Gas zur Bildung von Poren zur Verfügung steht. Entsprechend bilden sich kleinere Poren, die eine höhere Mobilität aufweisen und somit aus dem Fasermaterial entweichen können [22].

Die Simulation der Bewegung der Poren ist aufgrund der großen Anzahl von Einflussfaktoren aufwendig. Zusätzlich werden Kennzahlen der unterschiedlichen eingesetzten Materialien und Informationen über ihren Aufbau benötigt. Dennoch vereinfacht eine Simulation die Entwicklung neuer Faserverbundbauteile. Deshalb werden Modelle entwickelt, die eine Abschätzung des Harzflusses und der Porenbewegung erlauben sollen.

### 3.3. Fließsimulation

Um die Kosten und den Aufwand von experimentellen Untersuchungen zu minimieren, werden Fließsimulationen eingesetzt. Sie verringern bei ausreichender Genauigkeit das Risiko fehlerbehafteter Faserverbundbauteile die im LCM-Verfahren hergestellt werden. Außerdem erlaubt eine Simulation die Validierung von neuen Formen und Injektionsstrategien, bevor kostenintensive Prototypen gefertigt werden.

Damit die nötige Genauigkeit erreicht werden kann, werden in der Literatur neue Modelle für die Abbildung der realen Abläufe bei einer Injektion entwickelt. Eine Übersicht darüber gibt beispielsweise [50].

In [28] werden drei unterschiedliche Arten der Dry-Spot-Deformation unterschieden. Für zwei der drei Arten wird ein Modell und eine Simulation vorgestellt, die mit Hilfe des Gesetzes von Darcy die Deformation des Dry-Spot während des Injektionsprozesses simulieren. Für den dritten Typ wird eine vereinfachte Form der Darcy-Gleichung verwendet.

Die Entstehung von Poren in der Fließfront steht in [45] im Fokus. Das vorgestellte Modell basiert u. a. auf dem Gesetz von Darcy und bezieht ein dreidimensionales Modell eines biaxialen Geleges ein. Unter Verwendung eines bereits existierenden Modells (entwickelt in [22]) werden sowohl die Bewegungen und die Auflösung von Poren modelliert, als auch die Teilung und der Zusammenschluss von Poren. Die mit Hilfe des Modells erzeugten Ergebnisse werden zur Validierung mit experimentell ermittelten Daten verglichen.

Ein spezielles Modell für die Entstehung von Mikroporen bei einem RTM-Verfahren wird in [34] vorgestellt. Zur Simulation der Fließfront wird ebenfalls das Gesetz von Darcy herangezogen. Unter Einbeziehung der Kapillarzahl wird die Größe der Poren und der Porengehalt in den Faserbündeln abgeschätzt.

In [38] werden die Grundlagen der Fließsimulationssoftware *RTM-Worx* beschrieben. Sie ist spezialisiert auf die Simulation von RTM- und Vakuuminfusionsverfahren. Diese Software wird vom Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR zur Fließsimulation verwendet. Die Grundlage der Software bildet u. a. das Gesetz von Darcy.

Wie die vorgestellten Beispiele gründen viele Modelle zur Fließsimulation in LCM-Prozessen auf dem Gesetz von Darcy. Darum wird dieses im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

### 3.3.1. Darcy-Gleichung

In Abschnitt 3.1.1 wird bereits erklärt, dass aufgrund der unterschiedlichen Fließfrontgeschwindigkeiten des Fluids Dry-Spots im Bauteil entstehen können. Dementsprechend ist die Injektionsgeschwindigkeit und die daraus resultierende Fließfrontgeschwindigkeit des Fluids eine wichtige Prozessgröße. Zur Beschreibung der Fließfrontgeschwindigkeit kann das Darcy-Gesetz genutzt werden. Es ist Grundlage für verschiedene Injektions- respektive Fließsimulationen in LCM-Prozessen [24], [28], [65].

Das Darcy-Gesetz ist die vereinfachte Form der Navier-Stokes-Gleichung. Es beschreibt die Durchlässigkeit eines inkompressiblen Fluids durch ein poröses Medium in Abhängigkeit eines Druck-

gradienten. Darcy ermittelt diesen Zusammenhang empirisch [12]. Die Formel des Gesetzes lautet:

$$\underline{v} = -\frac{\underline{K}}{\eta} \cdot (\nabla p - \rho g) \quad (3.2)$$

Dabei entspricht  $\underline{K}$  dem Tensor der richtungsabhängigen Permeabilität des Fasermaterials.  $\eta$  ist die dynamische Viskosität des Fluids,  $\rho$  die Fluiddichte sowie  $g$  die Gravitationskraft.  $\nabla p$  ist der Druckgradient in der Kavität. Aus dem Gesetz ist erkennbar, dass sich Fließgeschwindigkeit des Fluids und Druckabfall linear zueinander verhalten [19].

Die Kontinuitätsgleichung beschreibt den Erhalt von Masse in einem System. Bei der Betrachtung eines festen Kontrollvolumens innerhalb einer Strömung gilt, dass die Massenänderung im Kontrollvolumen der Differenz aus ein- und ausströmender Masse entsprechen muss [39]. Im Sonderfall einer inkompressiblen Strömung gilt, unter der Annahme einer konstanten Dichte von Fasern und Fluid, die vereinfachte Form der Kontinuitätsgleichung:

$$\nabla \underline{v} = 0 \quad (3.3)$$

Sie beschreibt, dass die Geschwindigkeitsvektoren an jedem Punkt der Strömung gleich sind. Unter Vernachlässigung der Gravitationskraft ergibt sich aus der Kombination des Gesetzes von Darcy (Gl. 3.2) und dem speziellen Fall der Kontinuitätsgleichung (Gl. 3.3) die Grundgleichung für die Fließfrontberechnung von inkompressiblen Fluiden:

$$\nabla \cdot \left( \frac{\underline{K}}{\eta} \nabla p \right) = 0 \quad (3.4)$$

### 3.3.2. Permeabilität

Im Bereich der Faserverbundtechnologie versteht man unter der Permeabilität die Durchlässigkeit des Fasermaterials gegenüber dem durchströmenden Fluid [19].

Die Permeabilität ist von den Fasern, der Matrix und ihrer Kombination abhängig. Die Eigenschaften der Fasern, die einen Einfluss auf die Permeabilität haben, sind die Art und Konstruktion der Textilien, die verwendete Schlichte und Haftvermittler, der Faserwerkstoff, der Lagenaufbau des Fasermaterials und die Oberflächenspannung. Einflussfaktoren der Matrix sind die Viskosität und die Oberflächenspannung. Die weiteren Einflussfaktoren Porosität und Kontaktwinkel lassen sich sowohl den Fasern als auch der Matrix zu ordnen [58].

Aufgrund der Faseranordnung ist die Permeabilität richtungsabhängig. Es lassen sich drei unterschiedliche Arten von Fließfronten unterscheiden (s. Abbildung 3.7). Die isotrope Fließfront breitet sich kreisförmig und in alle Richtungen gleichförmig aus (s. Abbildung 3.7a). Dies ist beispielsweise bei Fasermatten oder -vliesen erkennbar, da hier der Faseraufbau wirr ist und keine Vorzugsrichtung besteht. Bei Faseraufbauten, wie Gelegen oder Geweben, bei denen die Permeabilität in Kett- und Schussrichtung unterschiedlich ist, ergeben sich elliptische Fließfronten. Sind die Hauptachsen dieser Ellipsen parallel zur Kett- bzw. Schussrichtung, handelt es dabei um eine orthotrope Fließfront (s. Abbildung 3.7b). Bei einer Drehung der Ellipse um den Winkel  $\alpha$  spricht man hingegen von einer anisotropen Fließfront (s. Abbildung 3.7c). Wie die Fließfront sich ausbildet ist dabei abhängig von der Bindungsart des Fasermaterials.

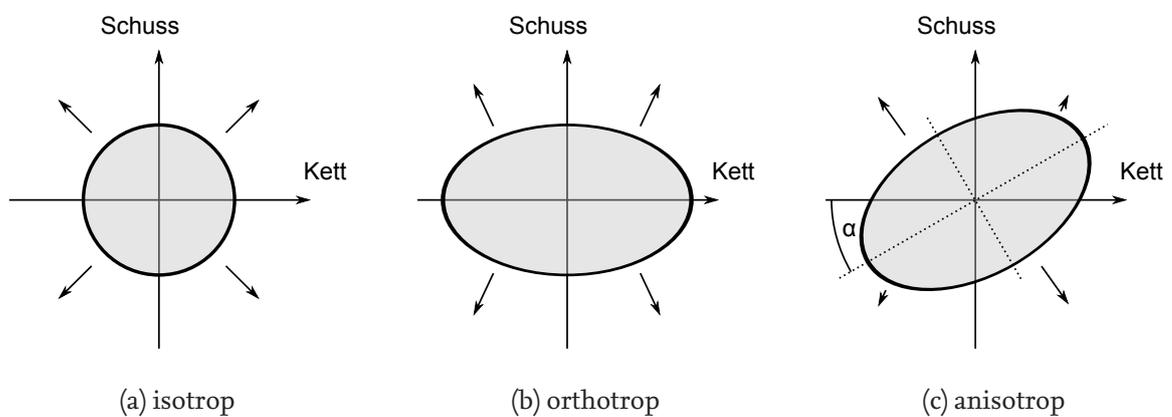


Abb. 3.7.: Ausbreitungsarten von Fließfronten

Mit Hilfe einer experimentellen Untersuchung der Fließellipsen lässt sich die Permeabilität eines Fasermaterials bestimmen. Dies ist aufwendig, da eine genaue Datenerfassung nötig ist und die Fließfronten häufig nicht der vorgestellten idealisierten Form entsprechen. Dies kann zum einen durch Unregelmäßigkeiten im Fasermaterial und zum anderen bei Open-Mould-Verfahren durch die verwendete Membran verursacht werden [13]. Im Gegensatz zur experimentellen Bestimmung der Permeabilität ist auch die rechnerische Ermittlung anhand von Modellen möglich [25], [40]. Die rechnerische Permeabilitätsbestimmung ist in der Umsetzung einfacher, kann jedoch häufig nur eingeschränkt angewendet werden, da die erreichbare Genauigkeit bei komplexen Aufbauten unzureichend ist. Außerdem sind einige Rechenmodelle nur für spezielle Faseraufbauten gültig. Häufig erfordert die rechnerische Bestimmung zusätzlich aufwendige Versuche zur Bestimmung einzelner Konstanten. Deshalb wird die Permeabilität häufig direkt in Versuchen bestimmt.

### 3.3.3. Viskosität

Die Viskosität ist definiert als die Eigenschaft eines fließfähigen Stoffsystems, beim Verformen eine Spannung aufzunehmen, die von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt [59]. Dementsprechend ist sie ein Maß für die Verschiebbarkeit der Fluidteilchen gegeneinander. D. h. Fluide mit einer geringen Viskosität sind dünnflüssiger als Fluide mit hoher Viskosität.

Bei der Viskosität wird zwischen der kinematischen und dynamischen Viskosität unterschieden. Aus dem Quotienten der dynamischen Viskosität  $\eta$  und der Dichte des Fluids  $\rho$  wird mit folgender Formel [6] die kinematische Viskosität  $\nu$  ermittelt:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.5)$$

Bei den verwendeten Matrixsystemen im Luft- und Raumfahrtbereich (z. B. Epoxidharze) hängt die Viskosität von der Temperatur und dem Aushärtegrad ab. Mit steigender Temperatur nimmt die Viskosität ab. Da auch die Aushärtungsreaktion temperaturabhängig ist, ergibt sich, dass mit steigenden Temperaturen auch die Vernetzung schneller verläuft. Ab dem Zeitpunkt ab dem das Aushärten des Matrixsystems einsetzt und somit sich das Harzsystem beginnt zu vernetzen, nimmt die Viskosität zu. Aus diesen Abhängigkeiten ergibt sich ein Zeitrahmen in dem das Harzsystem zu verarbeiten ist [62]. Abbildung 3.8 zeigt das Verhalten der Viskosität eines Epoxidharzsystems bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit der Zeit. Die einzelnen Temperaturen der der jeweiligen Viskositätsverläufe sind dabei konstant.

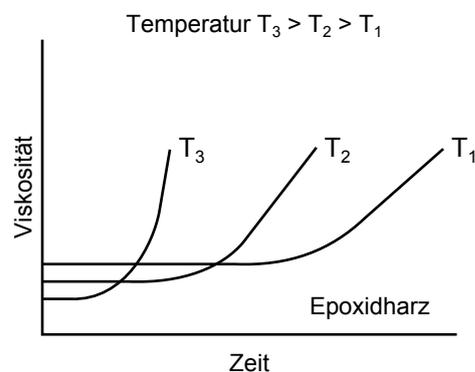


Abb. 3.8.: Viskositätsverlauf von Epoxidharzsystemen bei unterschiedlichen Temperaturen nach [62]

## 4 Anpassung und Erweiterung des Versuchsstands

In diesem Kapitel wird die Injektionsstrategie zur Erzeugung eines Dry-Spot im Druckfeld eines LCM-Prozesses vorgestellt. Anschließend wird das bestehende RTM-Werkzeug und der dazugehörige Versuchsstand zur Untersuchung des Dry-Spot beschrieben. Es folgen die Erläuterungen zur Anpassung und Erweiterung der jeweiligen Komponenten. Dabei wird jeweils zwischen Werkzeug und Versuchsstand unterschieden.

### 4.1. Injektionsstrategie

Um das Fluid bei einer Injektion in die Kavität des RTM-Werkzeugs so zu steuern, dass ein Dry-Spot im Faserhalbzeug entsteht, wird eine Injektionsstrategie benötigt. Die Anzahl und die Position der Angusspunkte sowie der zeitliche Ablauf des Öffnens und Schließens der Angusspunkte bestimmen die Entstehung des Dry-Spot.

Für die Auswertbarkeit der Versuche muss die Injektionsstrategie einige Anforderungen erfüllen. Dazu zählen die Reproduzierbarkeit des Dry-Spot (Größe, Form, Position) oder eine gleichartige Erzeugung des Dry-Spot, trotz unterschiedlicher Permeabilitäten bei verschiedenen Faserhalbzeugen [49].

In Abbildung 4.1 sind die resultierende Anzahl und Positionen der Angusspunkte dargestellt. Sie entsprechen dem von Herrn Bertling entwickelten Konzept [7]. Die Angusspunkte werden zu drei unterschiedlichen Injektionseinheiten gruppiert. Die konkrete Umsetzung wird im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt. Eine Injektionseinheit kennzeichnet, dass alle dazugehörigen Angusspunkte nur gleichzeitig geöffnet oder geschlossen werden können, da sie über dieselbe Injektionsleitung verfügen. Jede Injektionseinheit kann unabhängig von den übrigen gesteuert werden. Die Zuordnung der Angusspunkte zu den drei Injektionseinheiten ist in Abbildung 4.1 eingezeichnet. Dabei kann an Injektionseinheit 3 alternativ eine Verbindung zu einer Evakuierungsleitung oder einer Injektionsleitung geöffnet werden.

Wie in Abbildung 4.1 erkennbar, wird zuerst die Verbindung zwischen Injektionseinheit 3 und Vakuumpumpe geöffnet. Zeitgleich sind die Injektionsleitungen der übrigen Injektionseinheiten geschlossen. Entsprechend wird das Werkzeug von zwei Seiten evakuiert. Nach Erreichen des gewünschten Evakuierungsdrucks wird Injektionseinheit 1, bestehend aus zwei Angusspunkten, geöffnet. Erreicht die sich ausbreitende Fließfront eine Markierung, die den Übertritt der Fließfront über die ersten beiden Angusspunkte von Injektionseinheit 2 anzeigt, wird Injektionseinheit 2 geöffnet. Gleichzeitig wird die Verbindung zwischen Injektionseinheit 3 und Evakuierungsleitung

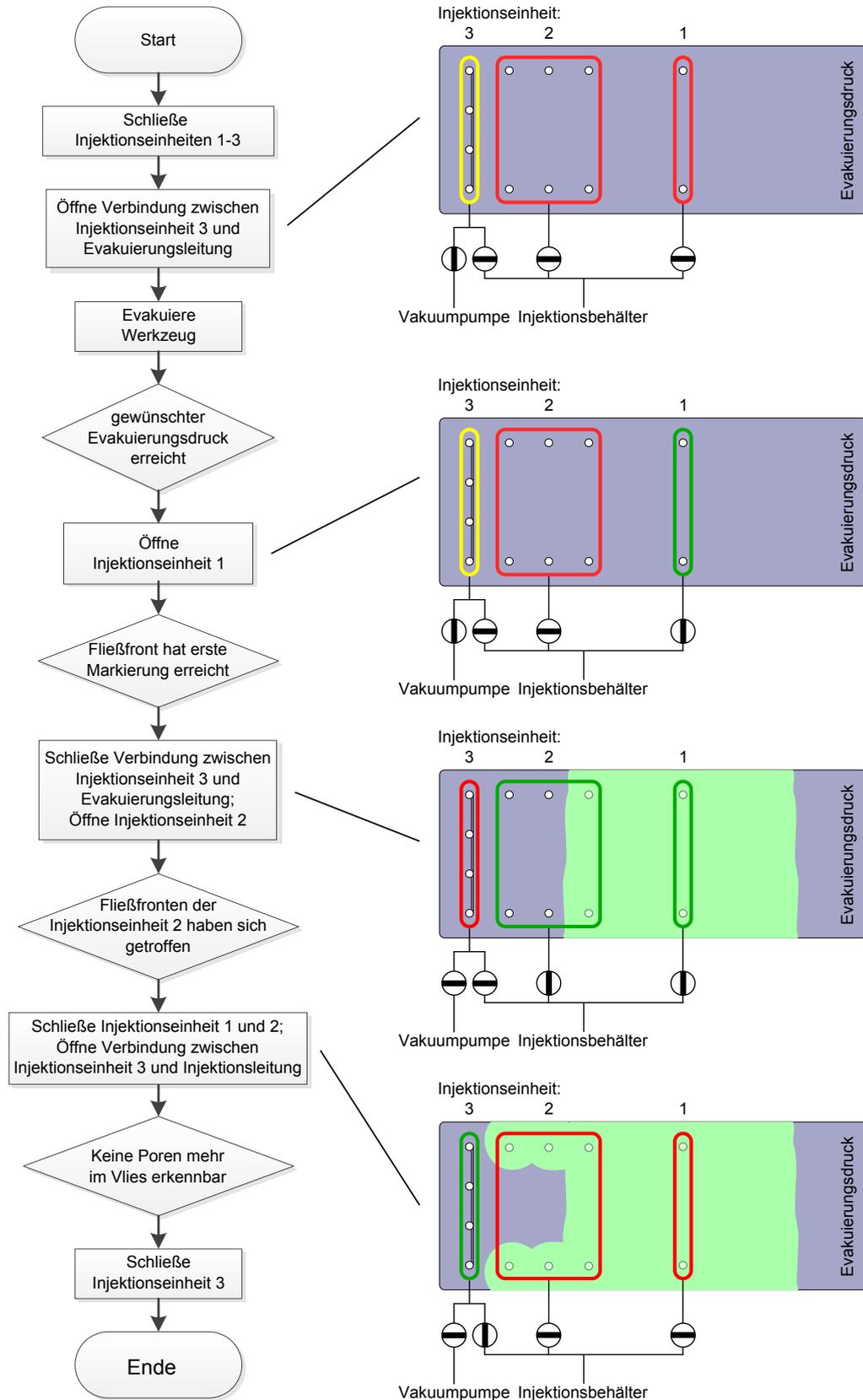


Abb. 4.1.: Ablaufdarstellung der angepassten Injektionsstrategie

zur Vakuumpumpe geschlossen. Bei Aufeinandertreffen der Fließfronten aus den sechs Angusspunkt der Injektionseinheit 2, werden Injektionseinheit 1 und 2 geschlossen und die Verbindung zwischen Injektionseinheit 3 und der Injektionsleitung geöffnet. Zwischen den unterschiedlichen Fließfronten ergibt sich ein Dry-Spot. Hiermit ist die Dry-Spot-Erzeugung abgeschlossen. Nach der Auflösung des Dry-Spot ist der Versuch beendet und Injektionseinheit 3 wird geschlossen.

Diese Injektionsstrategie und damit Schaltreihenfolge der Injektionseinheiten stellt eine Optimierung der in [49] vorgestellten Strategie dar. Zum einen ermöglicht sie festgelegte und einheitliche Schaltzeitpunkte, was die Reproduzierbarkeit der Dry-Spots verbessert. Zum anderen wird die Entstehung des Dry-Spot weniger von den Schaltvorgängen beeinflusst, da zwei der drei Injektionseinheiten zu diesem Zeitpunkt bereits wieder geschlossen sind. Auf diese Weise bildet sich der Dry-Spot zu einem Zeitpunkt, an dem bereits die für den Versuch vorgesehenen Druckverhältnisse bestehen.

## 4.2. Bestehender Versuchsstand

Im folgenden Unterkapitel wird der Versuchsstand mit dem dazugehörigen RTM-Werkzeug beschrieben. Der dargestellte Stand entspricht der in der Bachelorarbeit von Herrn Mulugeta erarbeiteten Version [49]. Sie dient als Grundlage für die weiterentwickelte Version, die im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt wurde.

### 4.2.1. RTM-Werkzeug

Das RTM-Werkzeug besteht aus einem Boden und einem Deckel, zwischen welchen zwei Glasscheiben, getrennt von einem Abstandshalter, positioniert werden. Dadurch wird die Kavität gebildet, in die das Fasermaterial eingelegt wird. Hierbei handelt es sich um ein Closed-Mould-Werkzeug, denn die Glasscheiben bilden zusammen mit der Höhe des Abstandshalters eine nicht variable Kavität.

Dabei stellt der Werkzeugboden die Hauptkomponente dar (s. Abbildung 4.2). Diese beinhaltet die jeweiligen Durchgangsbohrungen, die Ports und Vents, sowie eine Harzfalle in die das Fluid ablaufen kann. Die Harzfalle wird durch Anschrauben einer Platte an den Boden gebildet und durch das Verpressen eines O-Rings dazwischen abgedichtet.



Abb. 4.2.: RTM-Werkzeug

Die Angusspunkte (Ports und Vents) werden in drei Injektionseinheiten unterteilt, die unabhängig voneinander steuerbar sind. Abbildung 4.3 zeigt die einzelnen Angusspunkte, die über Angussstutzen miteinander verbunden werden, um komplexe Schlauchverbindungen zu verhindern. Mittels dieser Einheiten wird die Injektionsstrategie (s. Abschnitt 4.1) umgesetzt und ein Dry-Spot erzeugt. Auf der innenliegenden Seite verfügen die Stutzen über eine Nut, die die einzelnen Bohrungen miteinander verbinden. Für die Verbindung der Schläuche mit dem Werkzeug werden an die Angussstutzen sowie an die Angusspunkte der Injektionseinheit 1 jeweils eine Schlauchtülle mit abdichtendem *PTFE*-Band geschraubt. Über einen O-Ring werden die Angussstutzen mit dem Werkzeug verpresst und abgedichtet.

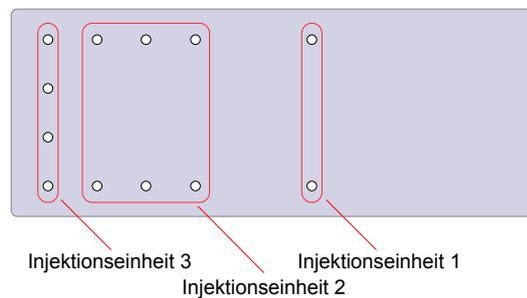


Abb. 4.3.: Gruppierung der Angusspunkte in Injektionseinheiten

Die aufliegende Glasscheibe mit den Durchgangsbohrungen für den Anguss, wird durch zwei umlaufende O-Ringe abgedichtet, wobei außerdem jeder Angusspunkt mit einem O-Ring abgedichtet wird. Per Vakuumanschluss zwischen den zwei umlaufenden O-Ringen wird der Zwischenraum evakuiert und die Glasscheibe angepresst.

Mit dem auf dem Boden aufliegenden Werkzeugdeckel und mit Hilfe der beiden Glasscheiben wird das Werkzeug verschlossen. Aufgrund der Höhe des Abstandshalters zwischen den Glasscheiben ergibt sich die Kavität. Auf diese Weise wird ein Closed-Mould-Werkzeug erzeugt (s. Abschnitt 2.2.2). Über einen O-Ring zwischen Deckel und oberer Glasscheibe wird dieser abgedichtet. Des Weiteren befindet sich im Deckel über der Harzfalle ein Vakuumanschluss, über den das Werkzeug permanent während des Injektionsprozesses evakuiert wird. Die Position ist so gewählt, dass sicher gestellt ist, dass kein Fluid in die Leitung gelangt.

#### 4.2.2. Versuchsstand

Der Versuchsstand besteht aus einem aus *item*<sup>®</sup>-Profilen gebauten Gerüst auf dem das Werkzeug positioniert wird. Darunter befindet sich eine Leuchtstoffröhre zur Beleuchtung des Untersuchungsbereichs. Für die Aufzeichnung der Videodaten wird eine Handkamera mit Hilfe eines *item*<sup>®</sup>-Profils am dem Werkzeug angebracht.

Die zwei Vakuuman schlüsse am Werkzeug werden über zwei Leitungen, die miteinander verbunden sind, an einen Exsikkator angeschlossen. Der Exsikkator dient zur Sicherheit als weitere Harzfalle und ist mit einer zusätzlichen Leitung an der Vakuumpumpe angeschlossen.

Die Injektionsleitungen der jeweiligen Einheiten, die über Schlauchtüllen an dem Werkzeug angebracht sind, werden durch ein Schlauchquetschventil geleitet und anschließend mit Kupferrohren in den Injektionsbehälter geführt. Per Druckanschluss und einem 3/2-Wege Handhebelventil werden die Quetschventile bedient und so die jeweiligen Angüsse geöffnet und geschlossen.

### 4.3. Erweiterung

Im Folgenden werden die am RTM-Werkzeug und dem dazugehörigen Versuchsstand durchgeführten Anpassungen und Erweiterungen beschrieben. Dies dient dem Ziel einer automatisierbaren Versuchsauswertung und reproduzierbarer Versuchsergebnisse.

#### 4.3.1. RTM-Werkzeug

Im weiteren Verlauf wird auf die Komponenten eingegangen, die im Rahmen dieser Arbeit an dem Werkzeug angepasst bzw. erneuert wurden. Dazu gehören unter anderem die Einführung von Druckmessumformern und die Variation der Abstandshalter.

##### Abstandshalter

Der Faservolumengehalt ist einer der wichtigsten Kennwerte der Faserverbundbauteile, da er maßgeblich die Eigenschaften des Materials bestimmt. Zur Betrachtung des Einflusses des Faservolumengehaltes auf das Verhalten des Dry-Spot wird der Faservolumengehalt in den Versuchen variiert. Um einen möglichst hohen FVG zu erhalten, wird das Vlies nach dem Einlegen in das Werkzeug zusammengepresst. Der größtmögliche FVG ist abhängig von der maximal aufzubringenden Kraft zum Komprimieren des Glasfasernadelfaservlies. Abhängig von der Lagenanzahl des Vlies und der maximal aufzubringenden Kraft ergibt sich eine minimale Dicke des komprimierten Vlies. Die Dicke des Abstandshalter muss der Dicke des komprimierten Vlies entsprechen. Über einen Druckversuch wird die komprimierte Dicke in Abhängigkeit der aufgebrachtten Kraft bestimmt. Die Ergebnisse finden sich in Anhang A.2.

Um die verwendete Glasscheibe nicht zu überlasten wird von einer maximalen Belastung von 2 bar ausgegangen. Außerdem beträgt die maximale Höhe der Abstandshalter, werkzeugbedingt, 6 mm. Aus Kosten- und Fertigungsgründen stehen die Abstandshalter nur in bestimmten (ganzzahligen) Dicken zur Verfügung. Somit ergibt sich eine maximale Anzahl Lagen (Faservolumengehalt) pro Abstandshalter (s. Tabelle 4.1). Die Maße der Abstandshalter sind Anhang A.3 zu entnehmen.

Für die Berechnung des Faservolumengehalts wird ein spezifisches Flächengewicht des verwendeten Glasfasernadelvlies unter zu Hilfenahme von gewogenen Proben des Materials berechnet (s. Tabelle A.1). Der Fasertyp des verwendeten Vlieses ist im Datenblatt als E-Glas angegeben (s. Anhang A.6.1). Die entsprechende Dichte  $\rho_F$  der Glasfaser ist der Literatur entnommen [3].

Der Faservolumengehalt  $\varphi$  berechnet sich aus der Anzahl der Lagen  $n$ , dem spezifischen Flächengewicht des Materials  $G$ , der Glasfaserdichte  $\rho_F$  und der Dicke des jeweiligen Abstandshalters  $t$  mit folgender Gleichung:

$$\varphi = \frac{n \cdot G}{\rho_F \cdot t} \quad (4.1)$$

Die erzielten Faservolumengehalte für die Dicken ab 4 mm ergeben lediglich weitere FVG in ähnlicher Größenordnung. Aus diesem Grund werden in den Versuchen nur Abstandshalter mit den Dicken 2 mm – 4 mm genutzt.

		Abstandshalterdicke			
		0,002 m	0,003 m	0,004 m	0,005 m
Lagen	1	10,51 %	7,00 %	5,25 %	4,20 %
	2	–	14,01 %	10,51 %	8,40 %
	3	–	–	–	12,61 %

Tab. 4.1.: Faservolumengehalt in Abhängigkeit der Vlieslagenanzahl und Abstandshalterdicke

### Druckmessumformer

Für ein besseres Verständnis des Verhaltens des Dry-Spot ist eine Druckmessung im entstehenden Dry-Spot sowie entlang des erzeugten Druckgradienten sinnvoll. Mit Hilfe der ermittelten Daten lässt sich der tatsächliche Druckverlauf über die Länge des Fasermaterials ermitteln. Auf Grundlage dieser Daten können einerseits unter Annahme der Anwendbarkeit des idealen Gasgesetzes die eingeschlossene Stoffmenge bestimmt und untersucht werden. Andererseits sollen die Ergebnisse zur Modellbildung des Dry-Spot-Verhaltens beitragen. Die dazu verwendeten Drucksensoren unterliegen den folgenden Anforderungen:

- druckdichter Anschluss der Sensoren an das Werkzeug
- absoluter Druckmessbereich: 0 bar – 3 bar
- geringe Messfehler toleranz
- Aufzeichnungsmöglichkeit der Messdaten zur Auswertung
- Möglichkeit zur Messung des Öldrucks ohne Einfluss des Anpressdrucks zwischen Fasermaterial und Werkzeug

Aufgrund der Anforderungen werden acht Druckmessumformer der Firma WIKA verwendet (s. Anhang A.6.5). Die Positionen der Sensoren ergeben sich aus der Injektionsstrategie (s. Abschnitt 4.1) und der daraus resultierenden Position des Dry-Spot.

Sensor 0 befindet sich an der Position des Dry-Spot. Um den Dry-Spot sind die Sensoren 1 – 4 platziert, während die Position der Sensoren 5 – 7 so gewählt ist, dass die Sensoren entlang des Druckgradienten aufgereiht sind.

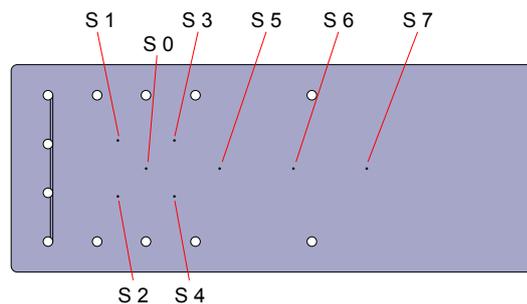


Abb. 4.4.: Positionen der Drucksensoren (S0-S7) auf der Aluminiumplatte

Für eine einfache Montage verfügen die Sensoren über einen G  $1/4$  A Prozessanschluss. Da diese nicht druckdicht in die Glasscheibe eingebracht werden können, wird sie durch eine Aluminiumplatte ersetzt. Dies bietet den Vorteil, dass das Abdichten der Sensoren und das Einbringen von Gewindebohrungen zur Befestigung der Sensoren leicht umzusetzen sind.

Die Verwendung der Aluminiumplatte bietet als weiteren Vorteil, dass die Ports der Injektionseinheit 3 zu einer Angusslinie verbunden werden können (s. Abbildung 4.4). Dadurch entsteht eine gleichmäßige Fließfront, die den Gaseinschluss gleichförmig schließt und zur reproduzierbaren Positionierung des Dry-Spot beiträgt.

Für die alleinige Druckmessung des Fluids ohne Einfluss des Anpressdrucks durch das Material werden in die Aluminiumplatte an den Positionen der Sensoren Kapillare gebohrt. Unterhalb der Gewindebohrungen für die Sensoren wird ein O-Ring zum Abdichten eingebracht. Die Sensoren weisen eine Hohlkammer auf, an deren Ende die Messmembran liegt.

In Vorversuchen zeigte sich, dass das eingeschlossene Gas aus dem Dry-Spot vollständig in den Hohlraum des naheliegenden Sensors verdrängt wurde. Dies resultiert aus der höheren Permeabilität des Hohlraums im Sensor gegenüber der Permeabilität des Fasermaterials in der Kavität. Um diesen Hohlraum zu minimieren und somit den Gaseinschluss außerhalb des Sensors zu halten werden kleine Hülsen in die jeweiligen Sensoren gesteckt (s. Abbildung 4.5). Die geringere Größe der Hohlkammer bewirkt ein geringeres Gasvolumen im Sensor. Zusätzlich wird die Hohlkammer mit Öl befüllt, um das Eindringen des Gases zu verhindern und trotzdem eine Messung des Drucks zu ermöglichen. Dies führt zur Minimierung des Fehlers bei der Bestimmung des in der Kavität eingeschlossenen Gasvolumens, da ausschließlich der Anteil außerhalb des Sensors ermittelt wird. Die Maße der konstruierten Aluminiumplatte und Hülsen sind dem Anhang A.3 zu entnehmen.

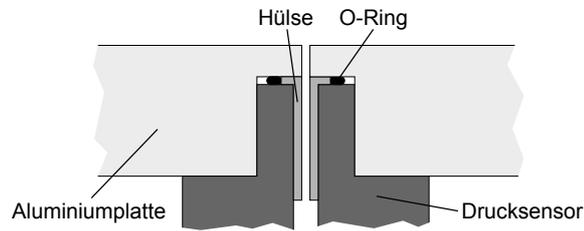


Abb. 4.5.: Schematische Darstellung der Befestigung der Drucksensoren an der Aluminiumplatte

Zur Aufnahme der Messdaten verfügen die acht Sensoren über einen aus drei Leitern bestehenden Kabelanschluss. Mittels des Multifunktions-Datenerfassungsmoduls *NI USB 6008* (Fa. *National Instruments*) werden die Sensoren an einen Rechner angeschlossen. Zusätzlich werden die Sensoren über ein Netzteil (*DP 832*, Fa. *Rigol*) mit Strom versorgt.

Zur Aufzeichnung der Messdaten und Kalibrierung der Sensoren auf der Grundlage von Herstellerangaben kommt auf dem Rechner die Software *NI SignalExpress 2013, Version 7.0.0* zum Einsatz.

### Weitere Anpassungen

In den vorherigen Versuchen, die in den Arbeiten von Herrn Bertling und Herrn Mulugeta beschrieben sind, wird der Evakuierungsdruck im Werkzeug an der Vakuumpumpe eingestellt und mittels eines Drucksensors direkt an der Pumpe gemessen [7], [49]. Aufgrund der zwischen Pumpe und Werkzeug geschalteten Harzfalle sowie den Verbindungsstücken und -schläuchen dazwischen, kommt es bedingt durch Leckage zu Verlusten. Um den korrekten Evakuierungsdruck im Werkzeug einzustellen, wird die Sensorposition angepasst und der Sensor mit Hilfe eines Flansches direkt am Werkzeugdeckel angeschlossen (s. Abbildung 4.2).

Nach einem Versuch wird die Kavität entlüftet, jedoch ist der Druck im Werkzeug weiterhin geringer als der Umgebungsdruck. Um es öffnen und reinigen zu können, musste bislang der Deckel hoch gehiebt werden, was zu Beschädigungen an der Oberfläche des Werkzeugbodens führt und somit Undichtigkeiten hervorrufen kann. Aus diesem Grund werden vier Gewindebohrungen in den Werkzeugdeckel gebohrt. Darüber wird der Deckel mit vier Schrauben (M8) gleichmäßig hoch gedrückt. Zur besseren Handhabung des Deckels werden außerdem zwei Griffe angebracht damit der Deckel gut platziert werden kann und nach dem Versuch auch wieder entfernt werden kann.

### 4.3.2. Versuchsstand

Neben dem Werkzeug wird auch der Versuchsstand mit seinen Komponenten erweitert und angepasst. Zu den angepassten Komponenten gehört der Werkzeugunterbau, der Druckbehälter, das Kameragehäuse, die Beleuchtung und die Abschirmvorrichtung. Zusätzlich wird der Versuchsstand um ein weiteres Schlauchquetschventil erweitert und ein anderes Fasermaterial eingeführt.

### Werkzeugunterbau

Um die Arbeit der Versuchsvorbereitung und während des Versuchs zu vereinfachen wird ein eigenständiger Versuchsstand für das RTM-Werkzeug aus *item*<sup>®</sup>-Profilen gebaut (s. Abbildung 4.6).

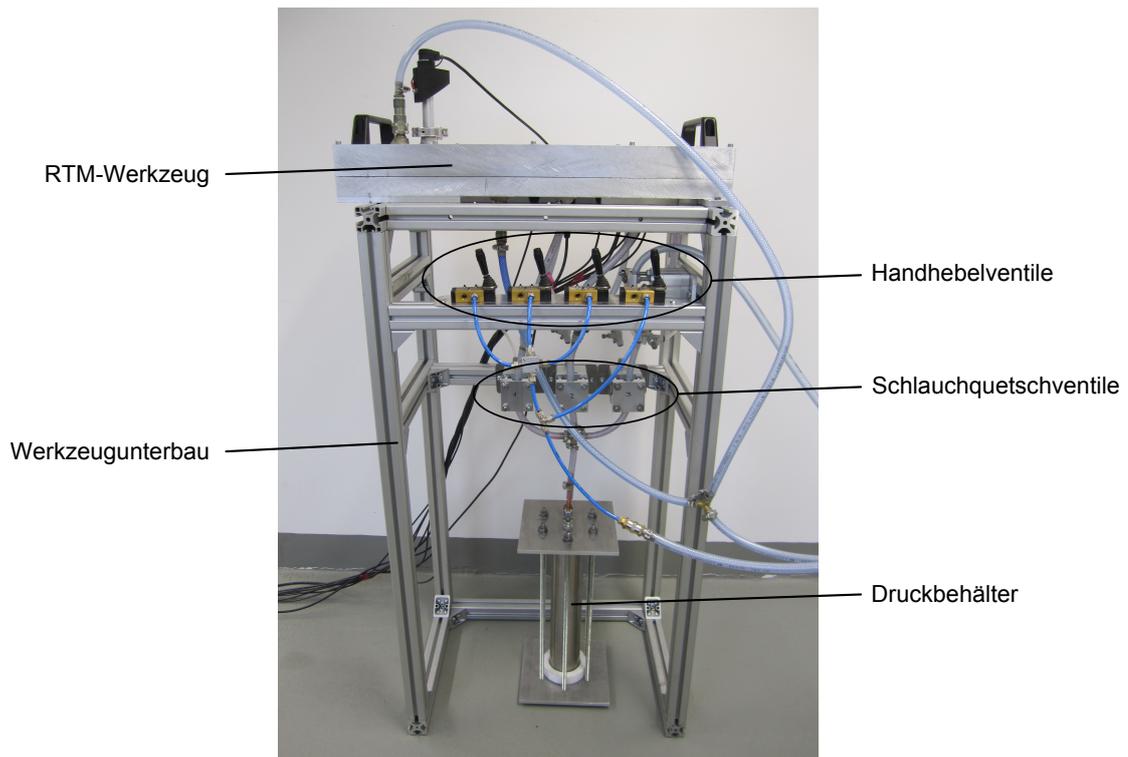


Abb. 4.6.: Versuchsstand

Dieser ermöglicht es, das Gefäß mit dem zu injizierenden Öl direkt unterhalb des Werkzeugs zu platzieren und die Schläuche direkt mit den Schlauchtüllen zu verbinden. Somit können auch die Schlauchquetschventile senkrecht zum Werkzeug und zu der Fließrichtung des Öls orientiert werden. Dies bietet den Vorteil, dass keine eingeschlossene Luft in den Schläuchen bestehen bleibt, sondern aufgrund seiner geringeren Dichte vollständig nach oben steigen kann. Dadurch wird verhindert, dass während der Injektion nachträglich Gas aus den Schläuchen in das Werkzeug und somit in den Dry-Spot gelangt. Die eingeschlossene Gasmenge variiert von Versuch zu Versuch entsprechend weniger, wodurch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verbessert wird.

### Druckbehälter

Um Versuche mit einem erhöhten Injektionsdruck durchführen zu können, wird der Versuchsstand um einen Druckbehälter erweitert. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Injektionsdruck von 3 bar nicht überschritten wird. In Übereinstimmung mit der Druckgeräterichtlinie 97/23/EG [17] erfolgt die Auslegung des Druckbehälters ohne Berechnung der Druckfestigkeit und Belastbarkeit. Dies ist zulässig, da das Produkt aus maximal zulässigem Druck und dem Volumen des

Druckbehälters weniger als 6.000 bar l beträgt. Der Behälter ist so konstruiert, dass er eine ausreichende Kapazität für das benötigte Ölvolumen eines Versuchs aufweist. Die Maße der einzelnen Teile sind dem Anhang A.3 zu entnehmen.

Der konstruierte Behälter besteht aus einem Rohr, zwei *PTFE*-Stutzen sowie zwei Aluminiumplatten (s. Abbildung 4.7). Dabei setzt sich der Behälter wie folgt zusammen. Auf die Ober- und Unterseite des Rohrs werden die *PTFE*-Stutzen gesteckt sowie je ein O-Ring eingelegt um den Behälter abzudichten. Über sechs Gewindestangen werden die Platten gegeneinander verschraubt und somit der Behälter verschlossen. In der oberen Platte befinden sich zwei weitere Bohrungen in die jeweils eine gerade Einschraubverschraubung eingelassen ist. Diese bestehen aus Gewintheadapter, Schneidring und Überwurfmutter. Hierüber wird ein Kupferrohr eingeführt, um das Öl bei dem Versuch heraus zu drücken. Über die Überwurfmutter wird der Schneidring mit dem Kupferrohr verpresst und der Behälter abgedichtet. Über die zweite Einschraubverbindung wird ein Kupferrohr angeschlossen, das mit einem Druckluftanschluss verbunden ist. Auf diese Weise wird der Druck  $p_{Eingang}$  auf das im Behälter befindliche Öl aufgebracht. Entsprechend wird das Öl aus dem Behälter verdrängt und tritt mit  $p_{Ausgang}$  über das zweite Kupferrohr aus. Dieses ist über eine Injektionsleitung mit dem Werkzeug verbunden. Aufgrund des Höhenunterschieds zwischen dem Druckbehälter und dem Werkzeug von 1,07 m ist der hydrostatische Druck nicht zu vernachlässigen. Daraus ergibt sich ein Druckunterschied zwischen  $p_{Ausgang}$  und dem an den Angüssen anliegenden Druck  $p_{Anguss}$  (nicht auf Skizze eingezeichnet). Um den gleichen hydrostatischen Druck und damit gleiche Bedingungen für jeden Versuch zu erzeugen, wird der Behälter auch bei den Versuchen verwendet, bei denen das Öl mit Umgebungsdruck injiziert wird. Dann wird kein Druckluftanschluss verwendet und der entsprechende Anschluss des Druckbehälters bleibt frei. In diesem Fall gilt  $p_{Eingang} = p_{Umgebung}$ .

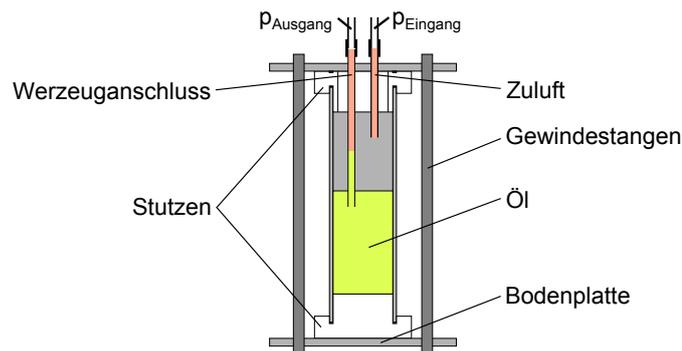


Abb. 4.7.: Schematische Darstellung des Druckbehälters

Da der Druckbehälter nur über einen Anschluss für die Injektion verfügt, werden die drei Leitungen für die jeweiligen Injektionseinheiten über eine Kreuzverbindung mit dem Druckbehälter verbunden.

## Kameragehäuse

Für die Aufzeichnung der Versuche steht bereits die Kamera *uEye XS 2* der Firma *IDS Imaging Development Systems* zur Verfügung. Diese ist jedoch nicht druckdicht und hitzebeständig und somit nicht für die Nutzung im Autoklav geeignet. Um die Anforderung zu erfüllen, dass Versuche mit einem Harzsystem mit hoher Verarbeitungstemperatur (z. B. *HexFlow<sup>®</sup> RTM 6*, Fa. *Hexcel*) möglich sind, ist ein geeignetes Kameragehäuse für den Versuchsstand zu bauen. Entsprechende Versuche sind nötig, um die Ergebnisse der durchgeführten Versuche mit Silikonöl zu validieren. Ohnehin wird eine Befestigungsmöglichkeit für die Kamera benötigt damit gewährleistet ist, dass immer derselbe Werkzeugausschnitt gefilmt wird.

In [49] wird ein Konzept vorgeschlagen, das ein Gehäuse aus einem Zylinder mit Deckel und Schauglas sowie einer Zu- und Abluftleitung zur Kühlung der Kamera vorsieht. Gegenüber dem Konzept sind beim tatsächlichen Aufbau allerdings einige Anpassungen sowie detailliertere Ausarbeitungen notwendig.

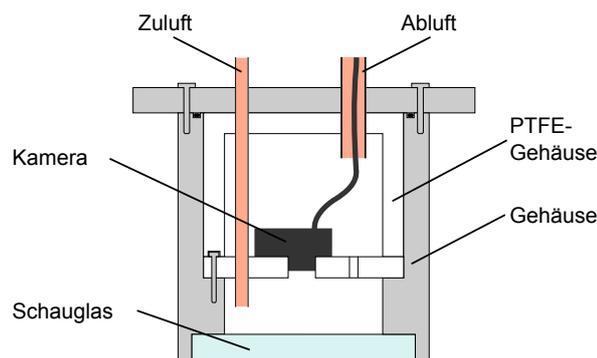


Abb. 4.8.: Schematische Darstellung des Kameragehäuses

Abbildung 4.8 zeigt das Kameragehäuse. Es wird ein Hohlzylinder und Deckel aus Aluminium sowie ein *PTFE*-Gehäuse und ein Schauglas verwendet. An die Unterseite des Zylinders wird mit Dichtmasse (Silikon *Dirko<sup>®</sup> HT*, Fa. *Elring*) das Schauglas verklebt. Die Dichtmasse gleicht die von der hohen Außentemperatur hervorgerufenen unterschiedlich starken Ausdehnungen der beiden Materialien aus und sorgt somit dafür, dass das Schauglas nicht bricht. Der Deckel wird mit Schrauben am Zylinder befestigt und mittels eines O-Rings abgedichtet. In das Aluminiumgehäuse wird eine *PTFE*-Scheibe geschraubt auf der die Kamera mit Hilfe von zwei Schrauben befestigt ist und somit eine gleichbleibende Position gewährleistet. Darauf wird ein *PTFE*-Zylinder gesetzt. Das *PTFE*-Gehäuse dient als weitere Isolierung gegenüber der erhitzten Luft im Autoklav.

Die nötige Kühlung der Kamera wird mittels Druckluft realisiert. Dafür sind im Deckel zwei gerade Einschraubverbindungen eingelassen über die die Kupferrohre für die Zu- und Abluft druckdicht angeschlossen werden. Ein Kupferrohr wird durch die *PTFE*-Scheibe geführt damit auch die Vorderseite der Kamera sowie das Schauglas gekühlt werden. In der Scheibe befinden sich mehrere Bohrungen um die Luft wieder abzuführen. Über das zweite Kupferrohr wird die Abluft und das Anschlusskabel der Kamera geleitet. Aufgrund ihrer höheren Flexibilität werden an die Kup-

ferrohre jeweils Temperierschläuche (PFA-Well-Flex-Schläuche mit Isolierung, Fa. Nonnenmann) angeschlossen. Zusätzlich wird die zugeführte Druckluft und das Anschlusskabel so von der Autoklavumgebung isoliert.

Die Kamera ist auf der *PTFE*-Scheibe im Gehäuse fixiert und das Gehäuse lässt sich über drei Bohrungen im Deckel am Versuchsstand montieren.

### Beleuchtung

Aufgrund der Verwendung der Aluminiumplatte ist die Transparenz in der Werkzeugmitte nicht mehr gegeben und eine Detektion des Dry-Spot sowie einzelner Poren per Durchleuchtung nicht mehr möglich.

Wegen Reflexionen auf der Glasscheibe wird eine Beleuchtung von oben ausgeschlossen. Deshalb wird fluoreszierendes Kontrastmittel zum Silikonöl gegeben. Fluoreszierende Pulver (z. B. *EpoDye*, Fa. *Struers*), die zum Einfärben von Harzen üblicherweise verwendet werden, sind zum Einfärben des Silikonöls nicht geeignet. Erstens lösen sich die partikelbasierenden Systeme nicht vollständig im Öl, zweitens wirkt das Fasermaterial wie ein Filter. Das Fasermaterial wird aus diesem Grund nicht gleichmäßig getränkt und leuchtet ungleichmäßig.

Aus diesem Grund ist ein flüssiges Kontrastmittel besser geeignet. Zur Anwendung kommt das fluoreszierende *Helling H 800 Öl* der Firma *Helling* (s. Anhang A.6.3). Dieses emittiert Licht der Wellenlänge um 550 nm und wird durch Licht der Wellenlänge um 365 nm angeregt. Die unterschiedlichen Wellenlängen des anregenden und des emittierten Lichts erlauben in Kombination mit einem Filter reflexionsfreie Aufnahmen der Kamera.

Für den bestmöglichen Kontrast wird das Öl mit dem Kontrastmittel im Verhältnis 500 : 1 gemischt. Mit Hilfe von vier UV-Lampen mit je 18 W wird das Öl aus Richtung der Kamera angeregt. Die verwendete Kamera verfügt über einen IR-Filter und ein Deckglas, die oberhalb von 650 nm bzw. unterhalb von 380 nm kein Licht durchscheinen lassen. Reflexionen der UV-Lampen auf dem Werkzeug innerhalb dieses Bereichs werden jedoch mit aufgenommen. Deshalb wird ein zusätzlicher Farbglassfilter (*Filter Y 500*) verwendet, der unterhalb von 500 nm liegende Wellenlängen absorbiert (s. Anhang A.6.4). So passiert zwar das vom Kontrastmittel emittierte Licht (550 nm) den Filter, nicht jedoch das am Werkzeug reflektierte Licht der UV-Lampen.

### Abschirmvorrichtung

Um Versuche bei gleichen Lichtbedingungen durchzuführen zu können und Reflexionen am Werkzeug zu vermeiden, wird eine Abschirmvorrichtung konstruiert. Diese wird auf den Versuchsstand und um das Werkzeug herum aufgebaut und besteht aus einer Bodenplatte, vier Seitenwänden (je zwei kurze und zwei lange Seitenwände) und einem Deckel (s. Abbildung 4.9). Die Bodenplatte weist

eine Nut auf, die der Positionierung der Seitenwände dient. Ein Ausschnitt in der Bodenplatte gewährleistet, dass die Abschirmvorrichtung unabhängig vom Rest des Versuchstandes am Werkzeug ausgerichtet ist. Durch zwei Taschen an der Längsseite des Ausschnitts werden Kabel der Lampen, sowie der Schlauch zur Vakuumpumpe aus der Vorrichtung abgeführt. Über ein Stecksystem werden die Seitenwände in die Bodenplatte gestellt, worauf dann der Deckel gelegt wird. Dieser weist ebenfalls eine Nut auf, damit der Deckel in fester Position auf den Seitenwänden aufliegt.

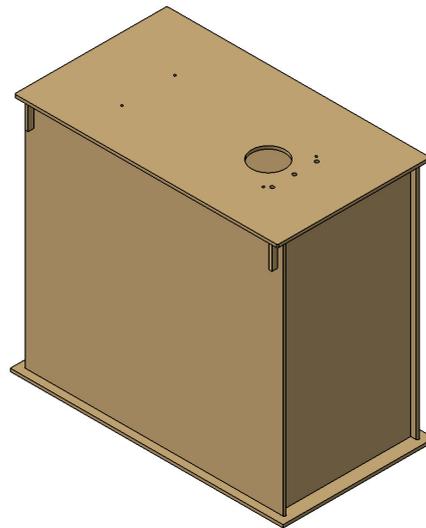


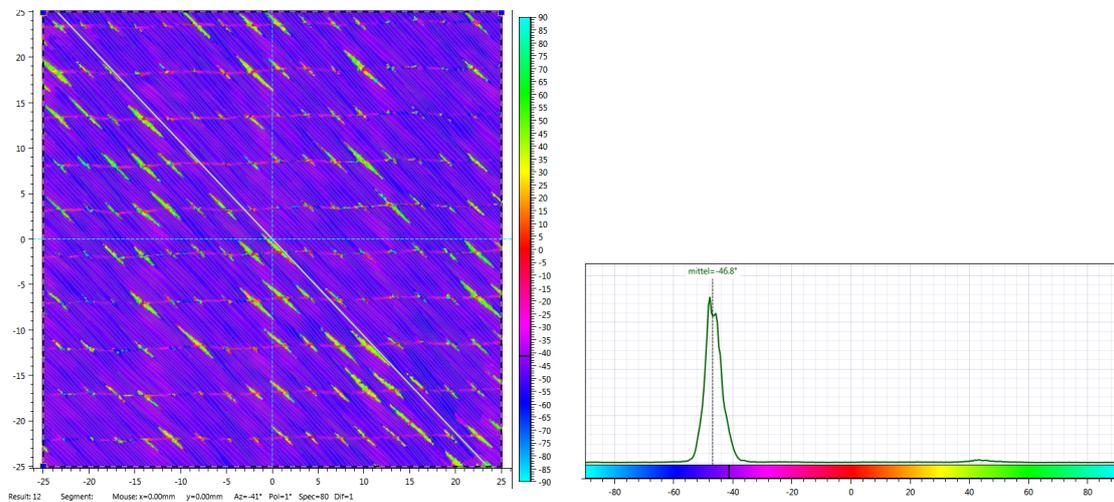
Abb. 4.9.: Abschirmvorrichtung aus MDF-Platten

Über eine Bohrung im Durchmesser des Kameragehäuses wird die Kamera im Deckel fixiert. Außerdem werden am Deckel und den Seitenwänden die vier UV-Lampen befestigt. Die Ausrichtung der Abschirmvorrichtung, der Kamera und der UV-Lampen am Werkzeug gewährleistet identische Lichtverhältnisse und sorgt dafür, dass der gefilmte Werkzeugausschnitt ebenfalls in allen Versuchen identisch ist. In Anhang A.3 befinden sich die technischen Zeichnungen für die Bauteile der Abschirmvorrichtung.

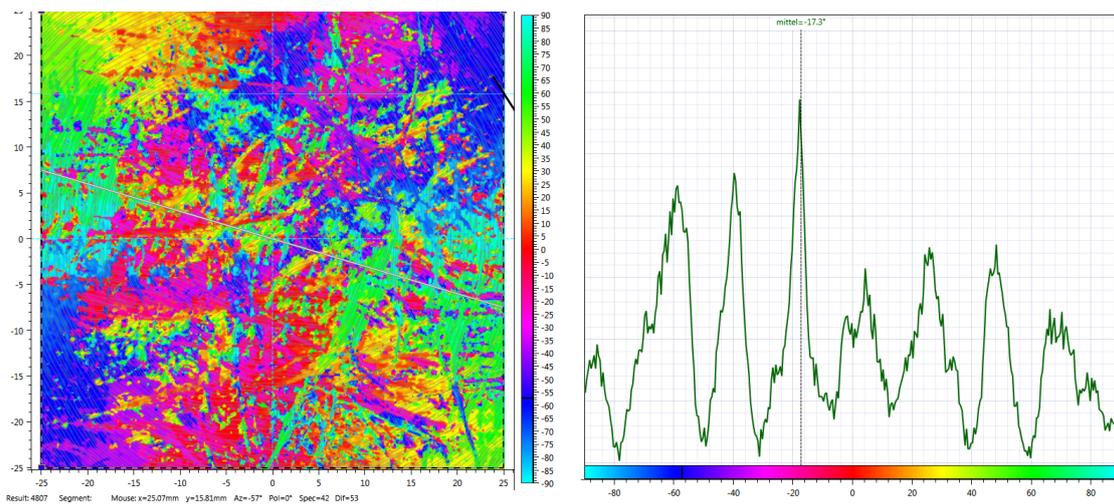
### Glasfasernadelvlies

Um allgemeingültige Aussagen über das Verhalten von Dry-Spots im Druckfeld eines LCM-Prozesses treffen zu können, werden als Fasermaterial keine Gewebe oder Gelege verwendet. Stattdessen kommen Vliese zum Einsatz, da diese keinen anisotropen Aufbau haben und somit keine besondere Vorzugsrichtung, in die das Öl fließt, aufweisen. Es handelt sich um ein Fasermaterial mit „Single-Scale“ Porosität (s. Abschnitt 3.1.2). Entsprechend ist eine einheitliche Porengröße zu erwarten, sodass das Verhalten des Dry-Spot ohne zusätzliche Effekte untersucht werden kann.

Abbildung 4.10a zeigt ein 45°-Gelege, das mit einem Faserwinkelsensor der Firma *Profactor* gescannt wurde. Deutlich ist ein Maximum bei 45° erkennbar. Das gescannte Vlies hingegen weist kein ausgeprägtes Maximum auf, was darauf schließen lässt, dass die Fasern im Vlies wirr angeordnet sind und somit keine bestimmte Orientierung aufweisen (s. Abbildung 4.10b).



(a) Faserwinkeldetektion bei einem 45°-Gelege



(b) Faserwinkeldetektion bei einem Vlies

Abb. 4.10.: Faserwinkeldetektion unterschiedlicher Materialien

Für die optische Auswertung des Dry-Spot sowie des Gastransports ist eine hohe Transparenz des Materials wichtig. Somit ist anzustreben, dass das getränkte Vlies nahezu transparent ist. Um Einflüsse von chemischen Bindemittel auszuschließen, sind ausschließlich Vliese mit mechanischer Bindung zu verwenden. Bei einer Injektion mit unterschiedlichen Mustern (und gleichem Faservolumengehalt) verschiedener Hersteller zeigt sich, dass in getränktem Zustand nicht alle Vliese transparent werden (s. Abbildung 4.11). Dies kann unterschiedliche Ursachen haben. So wird beispielsweise mit unterschiedlicher Schlichte gearbeitet oder diese wird unterschiedlich dick auf die Fasern aufgetragen. Je nach Vlies können die Fasern außerdem unterschiedlich gut benetzt sein, weswegen die Transparenz der Materialien unterschiedlich hoch ist. Wie der Vorversuch zeigt, weist das Glasfasernadelvlies der Firma *Sahlberg* im getränktem Zustand die höchste Transparenz auf, weshalb es für die folgenden Versuche verwendet wird.



Abb. 4.11.: Ergebnis des Transparenzversuchs; Vlies der Fa. *Sahlberg* (2. v. l.) erreicht die beste Transparenz

### Schlauchquetschventil

Für reproduzierbare Versuche und das Erzeugen eines gleich großen Dry-Spot wird an die Injektionsleitung der Injektionseinheit 3 eine weitere Leitung angeschlossen, die direkt an der zweiten Harzfalle und somit an der Vakuumpumpe angeschlossen ist. Über ein zusätzliches Quetschventil kann diese Leitung geöffnet oder geschlossen werden. Das Ventil ist baugleich zu den Schlauchquetschventilen der Injektionseinheiten. Die Bedienung des Ventils erfolgt ebenso wie bei den anderen Quetschventilen per Druckluftanschluss über ein 3/2-Wege Handhebelventil. Da Injektionseinheit 3 der Evakuierungsseite des Werkzeugs gegenüber liegt, ermöglicht der Anschluss der Einheit an die Vakuumpumpe die Evakuierung von zwei Seiten. Dies kommt insbesondere zum Tragen wenn die Fließfronten der Angusspunkte aus Injektionseinheit 1 sich vereinigt haben (s. Abschnitt 4.1). Das Öl trennt dann zwei Gasvolumen voneinander. Die Positionierung der Evakuierungsleitungen sorgt dafür, dass in beiden Bereichen weiterhin der Evakuierungsdruck herrscht. Ähnlich dem SLI-Prinzip wird dann zum späteren Zeitpunkt das Ventil geschlossen und das Fasermaterial wird durch dieselbe Leitung, mit der zuvor evakuiert wurde, das Öl injiziert. Der genaue zeitliche Ablauf ist in Abschnitt 4.1 über die verwendete Injektionsstrategie dargelegt.

Die Bewegung der Zylinderkolben der Quetschventile erzeugen eine Erschütterung, die auf den Videoaufnahmen zu Verwacklungen führen. Aus diesem Grund werden zwischen die 3/2-Wege Handhebelventile und den Kompaktzylinder der Quetschventile Drosselventile gebaut, sodass die Kolben sich mit einer geringeren Geschwindigkeit öffnen und schließen und die Erschütterung minimiert wird.

## 5 Versuche zur Analyse des Verhaltens von Dry-Spots

In den Versuchen soll das Verhalten des Dry-Spot untersucht werden. Dazu zählen die zeitlich abhängige Größenänderung des Dry-Spot und Dauer und Ablauf des Gastransports unter Variation unterschiedlicher Prozessparameter. Die eingestellten Prozessparameter sind die Größe des eingeschlossenen Gasvolumen, die dynamische Viskosität des Matrixsystems sowie der Druckgradient und die Permeabilität des Fasermaterials. Ihr Einfluss soll untersucht werden, indem die Ausgangsgrößen Porengeschwindigkeit, Auflösezeit des Dry-Spot und Volumen- und Stoffmengenänderung des Dry-Spot in zeitlicher Abhängigkeit ausgewertet werden.

Die Prozessparameter lassen sich nicht direkt einstellen, sondern über unterschiedliche Stellgrößen, von denen sie beeinflusst werden. Tabelle 5.1 ordnet die jeweiligen Stellgrößen den Prozessparametern zu.

Prozessparameter	Stellgrößen
Einschlussgröße	Evakuierungsdruck, Faservolumengehalt, Fließfrontengeometrie
Viskosität	Temperatur, Fluid
Druckgradient	Injektionsdruck, Evakuierungsdruck, Abstand Anguss/Fließfront
Permeabilität	Faserhalbzeug, Faservolumengehalt

Tab. 5.1.: Prozessparameter mit den dazugehörigen Stellgrößen

Da der Evakuierungsdruck sowohl die Einschlussgröße bestimmt als auch den Druckgradienten beeinflusst, werden Druckgradient und eingeschlossene Größe des Dry-Spot für die Auswertung der Versuche gemeinsam betrachtet.

In den folgenden Unterkapiteln wird zuerst der Versuchsplan vorgestellt. Nach der Darstellung der verwendeten Materialien wird die Versuchsdurchführung beschrieben, die auch die Beschreibung des Aufbaus des Versuchsstands beinhaltet.

### 5.1. Versuchsplan

Als Grundlage für die Auswertung der Einflussgrößen auf das Verhalten des Dry-Spot werden Versuchsmessdaten benötigt. Diese werden aus Versuchen gewonnen, bei denen jeder Parameter einzeln variiert und die entsprechenden Messdaten aufgezeichnet werden. So wird der Einfluss eines Parameters unabhängig von den übrigen Parametern untersucht.

Es ist nicht auszuschließen, dass die zu analysierenden Prozessparameter sich gegenseitig beeinflussen. Dementsprechend ergeben sich für den Versuchsplan viele zu berücksichtigende Parameterkombinationen. Neben dem direkten Einfluss der Parameter lassen sich mittels Kombinationen auch Verstärkungs- und Inhibitionseffekte untersuchen. Für eine ausreichend große Datenbasis sind jedoch viele Versuche nötig.

Zusätzlich erscheint die Durchführung von Versuchen mit einem weiteren Faserhalbzeug, neben dem verwendeten Glasfasernadelvlies, sinnvoll. Auf diese Weise ist es möglich auch höhere Faservolumengehalte zu untersuchen, die den in der Luft- und Raumfahrttechnik üblichen Werten in den Bauteilen entsprechen.

Um nachzuweisen, dass die mit Silikonöl erzielten Versuchsergebnisse für die Modellbildung des Dry-Spot-Verhalten anwendbar sind, sind Validierungsversuche mit Harzsystemen nötig. Für Versuche mit dem häufig verwendeten Harzsystem *HexFlow<sup>®</sup> RTM 6* (Fa. *Hexcel*) sind zudem Versuche im Autoklav erforderlich.

Die Ausführung aller beschriebenen Versuche ist in der vorgegebenen Zeit nicht möglich. In dieser Arbeit wird deshalb ausschließlich der Einfluss der einzelnen Parameter untersucht.

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu ermitteln und die Integrität der ausgewerteten Daten zu erhöhen, werden jeweils mehrere Versuche mit gleichen Parametern durchgeführt. Der Versuchsplan ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Auf die Darstellung der Wiederholungsversuche mit gleichen Parametern wird dabei verzichtet.

Prozessparameter	Evakuierungsdruck [bar]	Injektionsdruck [bar]	Viskosität [cSt]	Faservolumengehalt [%]
Einschlussgröße	0,01	1	350	10,51
	0,02	1	350	10,51
	0,03	1	350	10,51
Permeabilität	0,01	1	350	14,01
	0,01	1	350	7,00
	0,01	1	350	5,25
Druckgradient	0,01	2	350	10,51
	0,01	3	350	10,51
Viskosität	0,01	1	100	10,51
	0,01	1	500	10,51

Tab. 5.2.: Versuchsplan

## 5.2. Verwendete Materialien

Im folgenden Unterkapitel werden die verwendeten Materialien für die durchgeführten Versuche beschrieben. Die jeweiligen Datenblätter des Fasermaterials und des Matrixsystems befinden sich im Anhang.

### 5.2.1. Fasermaterial

Für die Versuche in der Diplomarbeit wird das Glasfasernadelvlies der Firma *Sahlberg* verwendet (s. Anhang A.6.1). Es werden ausschließlich Glasfasern verwendet, da diese im getränkten Zustand einen hohen Grad an Transparenz aufweisen. Grund hierfür ist der ähnliche Brechungsindex von Glas im Vergleich zu transparenten Harzen. Somit ist die Tränkung der Fasern optisch gut kontrollierbar und Lufteinschlüsse sind direkt erkennbar. Je mehr Poren im Laminat vorhanden sind, desto milchiger wird es. Entsprechend weist eine hohe Transparenz auf die hohe Güte des Laminats hin[57]. Eine Aufzeichnung und Auswertung des entstehenden Dry-Spot sowie die Bewegung einzelner Poren im Glasfasernadelvlies ist somit mit einer Kamera gut umsetzbar.

### 5.2.2. Matrixsystem

Die Versuche werden mit dem Silikonöl *Elbesil Öl B* (Fa. *Böwing GmbH*) und unterschiedlichen Viskositäten (100 cSt – 500 cSt) umgesetzt (s. Anhang A.6.2). Zur Erkennung des der Dry-Spot und der sich lösenden Poren wird das Öl mit dem fluoreszierenden Kontrastmittel *Helling Fluo H800 Öl* der Firma *Helling* im Verhältnis 500 : 1 eingefärbt (s. Anhang A.6.3).

Die Silikonöle verhalten sich wie ein newtonsches Fluid [21]. Dieses wird durch eine belastungsunabhängige Viskosität charakterisiert. Die Schergeschwindigkeit ist somit proportional zur Scherspannung [10]. Da die duroplastischen Harzsysteme sich bis zum Gelierzeitpunkt ebenfalls wie ein newtonsches Fluid verhalten, können für die Versuche Silikonöle als Ersatzfluid verwendet werden [14], [67].

Die Verwendung des Silikonöls bietet mehrere Vorteile. Im Gegensatz zu den Harzsystemen sind sie ungiftig und günstiger. Der Zeitaufwand für eine Versuchsdurchführung ist geringer aufgrund einer einfacheren Reinigung. Außerdem kann auf diese Weise das im Luft- und Raumfahrtbereich verwendete Harzsystem *HexFlow® RTM 6* ersetzt werden. Hieraus ergibt sich eine weitere Zeitersparnis und bessere Prozesskontrolle, da die Versuche nicht im Autoklav durchgeführt werden müssen. Des Weiteren ist die Nutzungszeit des Öls unbegrenzt, da kein Härtingsprozess einsetzt. Ferner ist lediglich die flüssige Phase des Harzsystems interessant, da in dieser Arbeit das Verhalten von Dry-Spots während eines Injektionsprozesses untersucht wird.

### 5.3. Versuchsdurchführung

Zu Beginn werden die einzelnen Komponenten des Werkzeugs gereinigt und zusammgebaut. Der im Folgenden erläuterte Werkzeugaufbau ist in Abbildung 5.1 gezeigt. Für den Aufbau werden im ersten Schritt die Dichtungen der Harzfallendeckel und Angussstutzen in die dafür vorgesehenen Nuten im Werkzeugboden eingelegt. Anschließend werden Harzfallendeckel und Angussstutzen einschließlich der Schlauchtüllen mit dem Boden verschraubt. Der Vakuumanschluss an der Unterseite des Werkzeugs ist einmalig zu montieren und bei weiteren Versuchen nicht wieder zu lösen.

Im nächsten Schritt werden die Injektionsschläuche zugeschnitten und mit Schlauchschellen an den Schlauchtüllen befestigt. Mit Hilfe von Y-Stücken werden die jeweiligen Injektionseinheiten (1 und 2) miteinander verbunden.

Hiernach wird der Werkzeugboden auf die *item*<sup>®</sup>-Profile des Versuchsstands geschraubt um die Position des Werkzeugs zu fixieren. Daraufhin werden die O-Ringe für die Angusspunkte sowie die umlaufenden Dichtungen für die Aluminiumplatte in die Nuten eingelegt.

Die Aluminiumplatte wird in den Werkzeugboden eingelegt. An diese sind einmalig die Druckmessumformer inklusive der Hülsen und O-Ringe zu schrauben (Aufbau s. Abbildung 4.5). Auf der Platte wird ein Abstandshalter platziert, dessen Dicke vom gewünschten Faservolumengehalt des jeweiligen Versuchs abhängt. Um ein Voreilen der Matrix zu verhindern sowie zur weiteren Abdichtung wird das zugeschnittene, selbstklebende Moosgummi (Fa. *Gummibusch*) neben dem Abstandshalter aufgeklebt.

Anschließend wird mit einer Einmalspritze Öl über die Kapillaren in die Hohlkammern der Drucksensoren gegeben, um Gaseinschlüsse darin zu vermeiden. Darauf wird die jeweilige Anzahl zugeschnittener Lagen Vlies (145 mm x 310 mm) eingelegt, welche von den eingestellten Parametern abhängig ist. Dabei ist der Zuschnitt so zu positionieren, dass die Hälfte der Moosgummidichtung mit Material bedeckt ist.



(a) Schritt 1



(b) Schritt 2



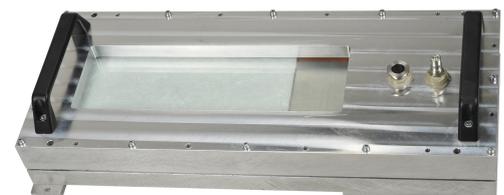
(c) Schritt 3



(d) Schritt 4



(e) Schritt 5



(f) Schritt 6

Abb. 5.1.: Werkzeugaufbau

Dabei ist der Zuschnitt so zu positionieren, dass die Hälfte der Moosgummidichtung mit Material bedeckt ist.

Dann wird die Glasscheibe auf das Vlies gelegt und die umlaufenden Dichtungen werden auf dem Werkzeugboden sowie in der Nut des Werkzeugdeckels positioniert. Mit einem Fluoreszenzmarker (Typ: 4949, Fa. *Flockenhaus*) werden auf die Glasscheibe zwei Markierungen gezeichnet. Sie dienen als Referenzpunkte zur Synchronisation der Versuche und zur Orientierung. Die erste Markierung wird mittig zwischen Angusspunkt 1 und 2 der Injektionseinheit 2 (s. Abbildung 4.3) aufgebracht. Erreicht die Fließfront die Markierung, wird der nächste Schaltvorgang ausgeführt. Die Position der Markierung stellt sicher, dass die Fließfront vor dem nächsten Schaltvorgang bereits über den ersten Angusspunkt der zweiten Injektionseinheit hinaus gelaufen ist, damit kein zusätzlicher Luftschluss im Material entsteht. Die zweite Markierung dient zur Orientierung und ist an der Position des entstehenden Dry-Spot gesetzt.

Anschließend wird der Deckel auf den Werkzeugboden gelegt. Aufgrund der Absätze im Deckel richtet dieser sich ebenso wie die Glasscheibe am Werkzeugboden aus. Dadurch wird die korrekte Position der Komponenten sichergestellt, um Undichtigkeiten als Folge eines Verkantens der Scheibe oder des Deckels auszuschließen. Zusätzlich minimiert dies die Gefahr beim Verschrauben des Werkzeugs nicht korrekt platzierte Komponenten zu beschädigen. Danach werden die beiden Werkzeughälften verschraubt. Die Platte und die Glasscheibe wird mit dem Abstandhalter verpresst. Somit entspricht die Höhe der Kavität der Dicke des jeweiligen Abstandshalters. Im Anschluss wird der Drucksensor (*Thermovac TR 211*, Fa. *Oerlikon Leybold Vacuum*) mit Dichtung und Schnellverschluss am Werkzeugdeckel angeschlossen.

Die Vakuumpumpe (*Trivac D 8 B*, Fa. *Oerlikon Leybold Vacuum*) wird zuerst an die Harzfalle angeschlossen. Diese wird wiederum mit den Vakuuman schlüssen des Werkzeugs verbunden. Mit Hilfe der Schlauchquetschventile werden die Injektionsleitungen abgeklemmt und das Werkzeug für zehn Minuten evakuiert. Dies führt dazu, dass geringe Mengen des Öls aus den Hohlkammern der Sensoren in das Vlies gesogen werden. Da dieses vorzeitig im Vlies befindliche Öl die Messergebnisse beeinträchtigen könnte, wird das Vlies ausgetauscht und das Werkzeug erneut verschlossen. Der erforderliche Vakuumdruck für den Versuch wird mittels eines Dosierventils (Typ: *VDH016-X*, Fa. *Inficon*) eingestellt.

Nach dem erneuten Verschließen des Werkzeugs wird die Abschirmvorrichtung inklusive Kamera und -gehäuse auf dem Versuchsstand montiert. Des Weiteren werden die UV-Lampen eingeschaltet und die Kamera an den Computer angeschlossen (Einstellungsprofil der Kamera, s. Anhang A.4). Außerdem werden die Druckmessumformer angeschlossen und die Software *NI SignalExpress 2013* zur Aufzeichnung der Daten gestartet. Für die Aufzeichnung der Umgebungsbedingungen, wie Umgebungsdruck, relative Luftfeuchte und Umgebungstemperatur, ist das Präzisions-Hygro-/Thermo-/Barometer (*GFTB 200*, Fa. *Greisinger electronic*) mit der dazugehörigen Software (*EBS 20M*, V1.4) einzuschalten.

Im weiteren Verlauf wird das Silikonöl mit dem Kontrastmittel gemischt und entgast. Dabei wird das Öl bestmöglich und beliebig lange entgast, da keine Topfzeit eingehalten werden muss. Silikonöl und Kontrastmittel werden im Verhältnis 500 : 1 gemischt und mit Hilfe eines Magnetrührstabs im Exsikkator entgast.

Die folgenden Einstellungen werden für das Entgasen des Silikonöls genutzt:

- Vakuumdruck: 0,01 mbar
- Drehzahl Magnetührstab: 500 / min
- Entgasungsdauer: 20 min

Anschließend wird das Öl in den Injektionsbehälter gefüllt, welcher per Kupferrohr an die Injektionsleitungen angeschlossen wird. Nun werden mit einer Klemmzange die einzelnen Schläuche abgeklemmt und die jeweiligen Schlauchquetschventile geöffnet. Sie bleiben geöffnet bis das Öl bis zu den Quetschventilen aufgestiegen ist und sich somit keine Luft mehr im Schlauch unterhalb der Ventile befindet.

Für die Versuche mit erhöhtem Injektionsdruck wird der Druckbehälter zusätzlich an einen Druckluftanschluss angeschlossen. Zur Einstellung des Injektionsdrucks werden ein Druckminderer und ein Digitalmanometer (Typ:CPG1000, Fa. WIKA) zwischengeschaltet. Bei Versuchen, bei denen der Injektionsdruck dem Umgebungsdruck entspricht ist keine weitere Einstellung nötig. Der Umgebungsdruck wird mit dem Präzisions-Hygro-/Thermo-/Barometer mit aufgezeichnet.

Zusammen mit einer digitalen Stoppuhr werden die Aufzeichnungen der Druckmessumformerdaten und des Kameravideos gestartet um in der Versuchsauswertung Videosequenz und Messdaten synchronisieren zu können.

Zu Beginn des eigentlichen Versuchs wird mit Hilfe der Injektionsstrategie ein Dry-Spot erzeugt (s. Abschnitt 4.1). Dazu ist das vierte Schlauchquetschventil geöffnet, sodass die Kavität von zwei Seiten evakuiert wird. Dann wird Injektionseinheit 1 geöffnet und das Fasermaterial wird über die ersten zwei Angusspunkte benetzt. Haben sich die zwei Fließfronten getroffen und die erste Markierung erreicht, werden gleichzeitig das vierte Quetschventil geschlossen und Injektionseinheit 2 geöffnet. Sobald sich die Fließfronten der neu geöffneten Angüsse getroffen haben, werden gleichzeitig Injektionseinheit 1 und 2 geschlossen und Injektionseinheit 3 geöffnet. Auf diese Weise bildet sich ein Dry-Spot im Material und es entsteht ein Druckgradient zwischen der Angusslinie der Injektionseinheit 3 und der gegenüberliegenden Werkzeugseite (anliegender Evakuierungsdruck). Nachdem sich der Dry-Spot aufgelöst hat und die Poren aus dem Material gewandert sind, wird die Injektionseinheit 3 geschlossen und der Versuch ist beendet (s. Abbildung 4.1).

## 6 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Auswertung der Versuchsergebnisse wird im folgenden Kapitel vorgestellt. Nach der Beschreibung der Messdatenverarbeitung wird die Versuchsdurchführung betrachtet. Im Anschluss folgt die Betrachtung und Auswertung der Versuchsmessdaten. Bevor die Erkenntnisse aus den Versuchen zusammengefasst werden, wird der Einfluss ausgewählter Parameter auf Entstehung und Verhalten des Dry-Spot dargelegt.

### 6.1. Verarbeitung der Versuchsmessdaten

Für die Auswertung stehen die Videoaufzeichnungen, die Messdaten der Druckmessumformer sowie die Messdaten der Umgebungsbedingungen zu Verfügung.

Mit Hilfe der Kamerasoftware *IDS uEye Cockpit 4.4* wird eingestellt, dass die Kamera zehn Bilder pro Sekunde aufzeichnet. Die Software *NI SignalExpress 2013* der Druckmessumformer ist ebenfalls so eingestellt, dass sie zehn Messwerte der Sensoren pro Sekunde aufnimmt. Auf diese Weise kann jeder Messwert einem Einzelbild des Videos zugeordnet werden. Zur Synchronisation wird die Zeitdifferenz der Starts der unterschiedlichen Aufzeichnungen gemessen.

Für die Auswertung der Einflussfaktoren auf die Eigenschaften des Dry-Spot, wird als Grundlage das eingeschlossene Gasvolumen im Fasermaterial berechnet. Das Gasvolumen wird ab dem Zeitpunkt bestimmt, ab dem das Öl eine geschlossene Umrandung des Dry-Spot gebildet hat. Die Umrandung entsteht durch das Aufeinandertreffen der einzelnen Fließfronten.

Das Volumen des Dry-Spot  $V_{Dry-Spot}$  wird aus der eingeschlossenen Fläche  $A_{Dry-Spot}$ , dem Faservolumengehalt  $\varphi$  und der Höhe der Kavität mit folgender Formel ermittelt:

$$V_{Dry-Spot} = A_{Dry-Spot} \cdot t \cdot (1 - \varphi) \quad (6.1)$$

Der Faservolumengehalt  $\varphi$  wird mit der Gleichung 4.1 berechnet. Die Höhe  $t$  der Kavität ergibt sich aus der jeweiligen Dicke der Abstandshalter. Die eingeschlossene Fläche wird mit Hilfe des Bildverarbeitungs- und Analyse Programms *ImageJ* ermittelt. Dazu werden zunächst die Videodateien mit dem Programm *Free Video to JPG Converter* in Einzelbilder umgewandelt. Zur Vorbereitung auf die automatisierte Bestimmung der sichtbaren Fläche des eingeschlossenen Gasvolumens müssen die Bilder in Abhängigkeit von einem Schwellwert in Binärbilder umgewandelt. Bei dem Schwellwert handelt es sich um einen in Vorversuchen definierten Helligkeitswert. Pixel mit ei-

ner geringeren Helligkeit werden schwarz, Pixel mit der gleichen oder einer höheren Helligkeit werden weiß dargestellt. Da der gefilmte Werkzeugausschnitt bei jedem Versuch derselbe ist, wird nur einmalig ein geeigneter Schwellwert für die Konvertierung der Bilder bestimmt. Nach dieser Konvertierung kann die Partikelanalyse (*Analyse Particles*) von *ImageJ* zur Bestimmung der Größe des Partikels und damit des Dry-Spot automatisch ermittelt werden. Der zu analysierende Bereich des Bildes wird um die angestrebte Position des Dry-Spot herum begrenzt. Dies verhindert, dass Bildfehler in den Randbereichen des Werkzeugs fälschlicherweise zur Fläche des Dry-Spot addiert werden. Für die automatisierte Erstellung der Binärbilder und die Analyse der Partikel werden angepasste Makros verwendet (s. Anhang A.1, A.2).

Ebenso wie das eingeschlossene Volumen aus der Fläche berechnet wird, wird daraus resultierend die eingeschlossene Stoffmenge bestimmt. Auf diese Weise wird das Volumen und der Druck ins Verhältnis zueinander gesetzt. Die Stoffmenge wird mit Hilfe des idealen Gasgesetzes und folgender Gleichung ermittelt:

$$n = \frac{p_{\text{Dry-Spot}} \cdot V_{\text{Dry-Spot}}}{R \cdot T} \quad (6.2)$$

Dabei entspricht  $V_{\text{Dry-Spot}}$  dem eingeschlossenem Gasvolumen,  $p_{\text{Dry-Spot}}$  dem Innendruck des Dry-Spot,  $T$  der Temperatur und  $R$  der universellen Gaskonstante [63].

Für die weitere Auswertung wird die Auflöszeit des Dry-Spot bestimmt. Sie ist als der Zeitraum definiert zwischen Beginn des Porenwanderns und vollständigem Verschwinden des Dry-Spot. Beide Zeitpunkte werden optisch aus den Videodaten ermittelt.

Ein zusätzliches Kriterium ist die Fließgeschwindigkeit der gelösten Poren. Sie wird anhand der gemessenen Druckwerte ermittelt. Dazu wird das Auftreten von charakteristischen Merkmalen im Druckverlauf an unterschiedlichen Sensorpositionen herangezogen. Die wandernden Poren erzeugen ein charakteristisches Ausschlag am Drucksensor (s. Abschnitt 6.2).

Zur Bestimmung der durchschnittlichen Porengeschwindigkeit werden die Position eines Sensors und der Zeitpunkt des Auftretens eines charakteristischen Merkmals (auftretendes Maximum im Druckverlauf; s. Abschnitt 6.2) an diesem Sensor in einem Weg-Zeit-Diagramm aufgetragen. Abbildung 6.1 zeigt exemplarisch ein solches Diagramm. Unter Annahme eines linearen Zusammenhangs ergibt sich aus der Steigung eine Geschwindigkeit. Da sich das Merkmal auf die wandernden Poren bezieht ist dies die Porengeschwindigkeit.

Es stehen somit für die Auswertung folgende Daten zur Verfügung:

- zeitlich synchronisierte Druckmesswerte
- Volumen des Dry-Spot
- Stoffmenge des Dry-Spot

- Auflösezeit des Dry-Spot
- Porengeschwindigkeit
- Daten der Umgebungsbedingungen

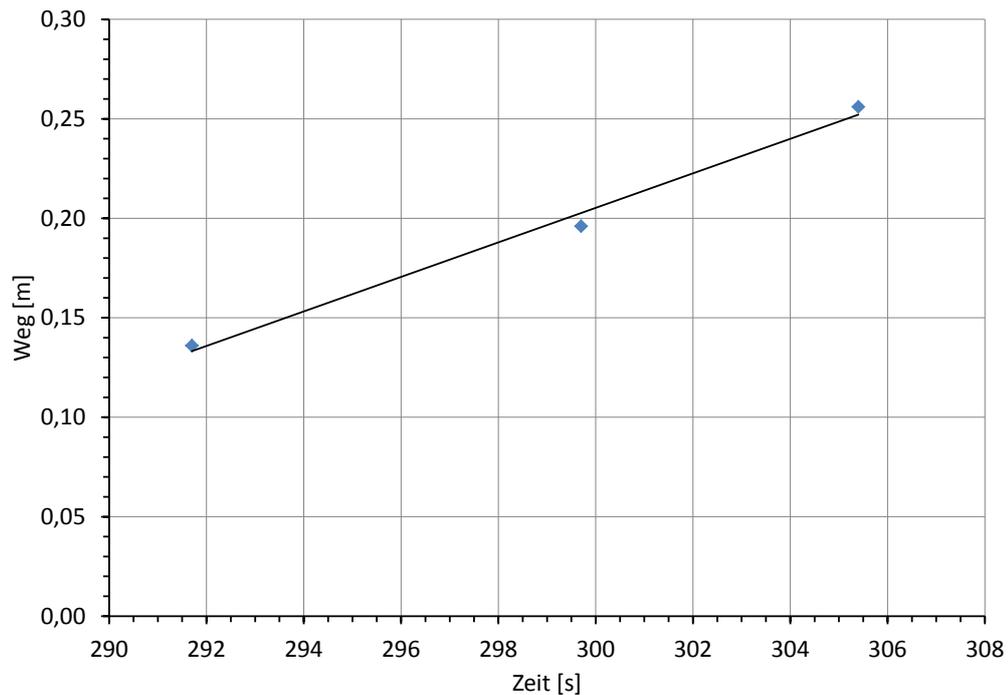


Abb. 6.1.: Exemplarisches Diagramm zur Berechnung der Porengeschwindigkeit im getränkten Fasermaterial

## 6.2. Betrachtung der Versuchsdurchführung

An dem Versuchsstand und Versuchsprozess aus vorangegangenen Vorversuchen [7] wurden Anpassungen und Erweiterungen durchgeführt. Dazu zählen u. a. eine Abschirmvorrichtung über dem Werkzeug für einheitliche Lichtverhältnisse, die Messung des Evakuierungsdrucks direkt am Werkzeug und die Einführung von Druckmessumformern (s. Abschnitt 4.3).

Die Änderungen dienen einer höheren Automatisierbarkeit bei dem Auswertungsprozess. Sie äußert sich darin, dass die Ermittlung der eingeschlossenen Fläche nach Auswahl der Versuchsbilder und eines Schwellwerts ohne weiteren manuellen Eingriff vollständig automatisiert erfolgt. Dies wird möglich, da die Umgebungsbedingungen für die Bildaufnahme aufgrund der Abschirmvorrichtung und der festen Kameraposition identisch sind. Außerdem ist durch die Einführung der Druckmessumformer erstmals der anliegende Druckgradient im Versuch überprüfbar. Des Weiteren ist mit den Sensoren der Innendruck des Dry-Spot messbar und somit auch die enthaltene Stoffmenge berechenbar. Das Einsatzspektrum des Werkzeugs ist durch die Erweiterung um einen Druckbehälter und mehreren Abstandshaltern unterschiedlicher Dicke vergrößert worden. Durch den Bau eines hitze- und druckbeständigen Kameragehäuses ist der Versuch auch innerhalb eines Autoklavs durchführbar, sodass das für die Luft- und Raumfahrt zertifizierte Harz *HexFlow<sup>®</sup> RTM 6*

eingesetzt werden kann. In Vorversuchen wurde das Kameragehäuse einer Temperatur von bis zu 180° im Autoklav ausgesetzt. Unter Zuführung von Außenluft bei Raumtemperatur mit einem maximalen Druck von 3 bar konnte die Temperatur der Kamera jederzeit innerhalb des vom Hersteller empfohlenen Temperaturbereichs gehalten werden (Kameratemperatursensor < 70 °C [31]).

Außerdem wird die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Versuche verbessert, d. h. ein gleicher Versuchsablauf und gleiche Ergebnisse bei gleichen Eingangsgrößen und Durchführung. Dies resultiert beispielsweise aus der Einführung von Markierungen auf der Glasscheibe zur Synchronisation der Schaltzeitpunkte und Verwendung desselben Injektionsbehälters bei den verschiedenen Versuchen (s. Abschnitt 4.3).

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit werden unterschiedliche Versuche mit gleichen Eingabeparametern verglichen. Dabei werden die folgenden Kriterien betrachtet:

- Form des Dry-Spot
- Position des Dry-Spot
- zeitliche Veränderung des gemessenen Drucks innerhalb des Dry-Spot

Abbildung 6.2 zeigt exemplarisch die Umriss der übereinander gelegten Flächen von Dry-Spot aus drei Versuchen (V014, V015, V017). Dabei sind bei den einzelnen Versuchen die Eingabeparameter nahezu identisch (s. Tabelle 6.1). Zu dem abgebildeten Zeitpunkt ist das eingeschlossene Volumen der Dry-Spot gleich. Das Lösen einzelner Poren steht kurz bevor. Es ist erkennbar, dass die Form der Dry-Spot untereinander sehr ähnlich ist. Des Weiteren ist die Position zweier Flächen (gelbe und blaue Linie) nahezu identisch. Die Schnittfläche der beiden Flächen entspricht 80 % der Vereinigung der beiden Flächen. Lediglich die Position der dritten Fläche (rote Linie) weicht von dieser Schnittfläche ab. 36 % der rot markierten Fläche liegen außerhalb der gemeinsamen Schnittfläche der blau und gelb markierten Fläche. Dies resultiert aus einer Verschiebung des Dry-Spot nach unten.

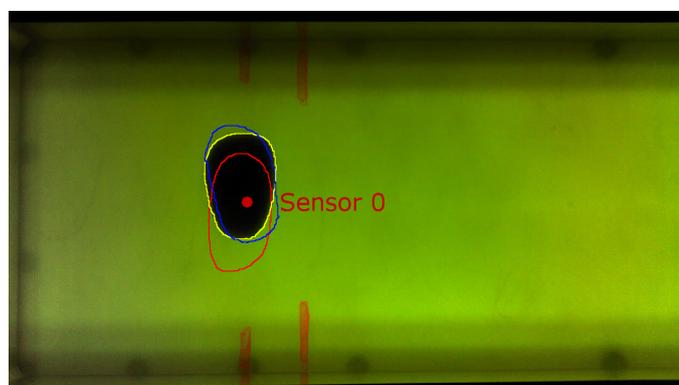


Abb. 6.2.: Vergleich der Form und Position der Dry-Spots bei drei Versuchen mit ident. Eingabeparametern

Versuchsname	Evakuierungsdruck [bar]	Injektionsdruck [bar]	Viskosität [Pa s]	Faservolumengehalt [%]
V014 (blau)	0,01	1,0203	0,31	10,51
V015 (gelb)	0,01	1,0196	0,31	10,51
V017 (rot)	0,01	1,0036	0,31	10,51

Tab. 6.1.: Eingabeparameter der Versuche zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit

Das Diagramm in Abbildung 6.3 zeigt exemplarisch den Druckverlauf am Sensor 0 der drei gleichen, zuvor schon betrachteten, Versuche mit identischen Eingabeparametern (s. Tabelle 6.1). Sensor 0 befindet sich im Bereich des Dry-Spot (s. Abbildung 4.4). Da die Schaltzeitpunkte während des Versuchs anhand von visuellen Kriterien festgelegt werden, kommt es zu geringfügigen zeitlichen Verschiebungen des Druckverlaufs zwischen mehreren Versuchen. Diese wurden im Diagramm in Abbildung 6.3 mittels Parallelverschiebung entlang der Zeitachse korrigiert.

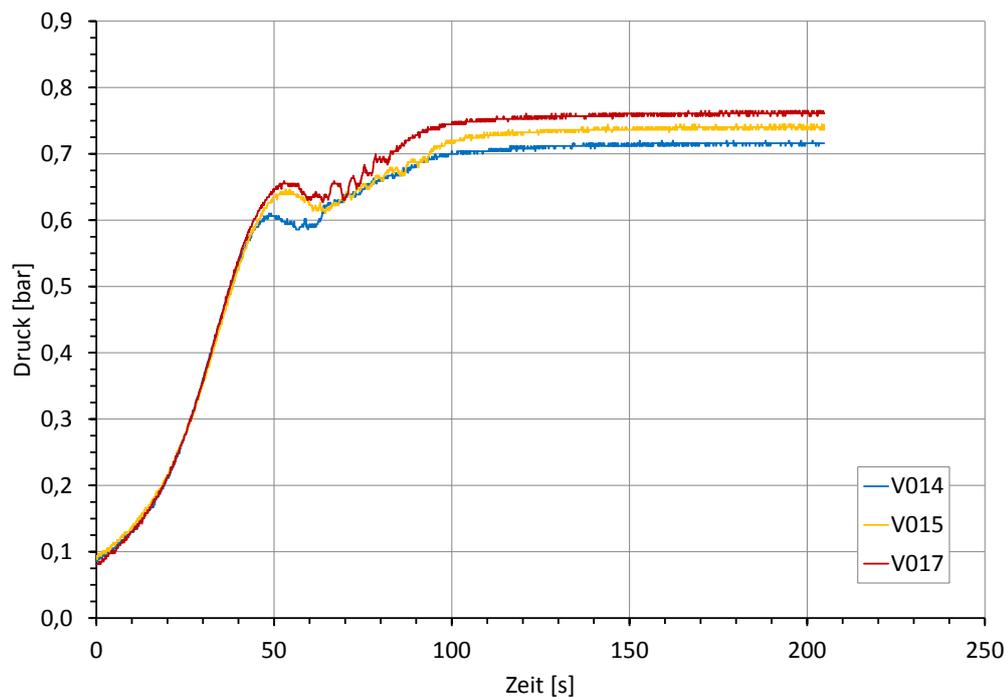


Abb. 6.3.: Vergleich der Druckmesskurven des Sensor 0 von drei Versuchen mit ident. Eingabeparametern

Deutlich ist der ähnliche zeitliche Verlauf der Druckmesswerte zwischen den Versuchen zu erkennen. Die Druckniveaus der einzelnen Kurven zum Ende des Versuchs weichen voneinander ab. Dies ist möglicherweise auf unterschiedliche Umgebungsbedingungen zurückzuführen. Wie in Tabelle A.2 dargestellt variieren Luftdruck (Injektionsdruck), Temperatur und relative Luftfeuchte geringfügig bei den Versuchen. Außerdem ist ab dem Zeitpunkt  $t = 62$  s der Drucksensor nicht mehr durchgehend im Dry-Spot. Deswegen sind größere Druckschwankungen im zeitlichen Verlauf zu erkennen. Insgesamt beträgt die maximale Druckdifferenz der Kurven zueinander  $p = 70$  mbar. Bezogen auf den Mittelwert der drei Kurven ist die maximale prozentuale Abweichung 17,8%. Zu Beginn der Kurven ist die relative Abweichung größer, da in diesem Bereich kleine Druckwerte gemessen werden. Sie nimmt immer weiter ab, da die Messwerte immer weiter steigen. Die pro-

zentuale Abweichung nimmt also mit der Zeit ab. Im Mittelwert liegt die prozentuale Abweichung bei 5,6%.

Die geringe Abweichung von Position und Form des Dry-Spot sowie die geringen Unterschiede der Druckmesskurven zeigen die Reproduzierbarkeit der Versuche. Eine identische Wiederholung eines Versuchs mit gleichen Eingabeparameter ist jedoch nicht möglich. Zu den Ursachen der Abweichung gehört u. a. die Verwendung des Glasfasernadelvlieses. Die Fasern sind im Vlies unregelmäßig angeordnet. Dies führt zu einer unterschiedlichen lokalen Permeabilität und somit zu einer variierenden Fließfrontgeschwindigkeit des Öls. Da mit jedem Versuch ein neues Vlies verwendet wird, resultiert hieraus eine unterschiedliche Form und Position des Dry-Spot. Des Weiteren variieren die Umgebungsbedingungen, wie Druck und relative Luftfeuchte. Somit ändert sich auch der Injektionsdruck, mit dem das Öl injiziert wird, geringfügig. Die Genauigkeit der Eingabeparameter ist also begrenzt. Der komplexe Versuchsaufbau erschwert zudem die vollständige Dichtigkeit des Werkzeugs, was ebenfalls einen Einfluss auf die eingeschlossene Gasmenge haben kann. Allerdings zeigte der Drucksensor auf der Evakuierungsseite des Werkzeugs keine entsprechenden Auffälligkeiten.

### 6.3. Betrachtung der Versuchsmessdaten

Der grundsätzliche Ablauf der Versuche ist bei unterschiedlichen Parametern immer gleich. Die auftretenden Phänomene werden beispielhaft an dem Versuch V026 erläutert (s. Abbildung 6.4). Die Eingabeparameter sind Tabelle A.2 zu entnehmen. Abbildung 6.5 zeigt das dazugehörige Diagramm, in dem der gemessene Druck über die Zeit aufgetragen ist. Die Druck-Zeit-Diagramme weiterer Versuche sind Anhang A.2 zu entnehmen.

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  s wird der Versuch gestartet. D. h. das Quetschventil der Injektionseinheit 1 wird geöffnet und das Fluid erreicht das Fasermaterial (1. Schalten). Da das Fluid keinen Bereich der Sensoren trifft entspricht der gemessene Druck an den Sensoren dem eingestellten Evakuierungsdruck. Danach beginnt die Ausbreitung des Fluids in der Kavität ( $t = 50$  s). Sobald die Fließfronten die jeweiligen Sensoren erreichen steigt der gemessene Druck ( $t = 150$  s).

Abbildung 6.4c zeigt das austretende Fluid aus den Angüssen der Injektionseinheit 2 zum Zeitpunkt  $t = 343$  s, nachdem diese zuvor geöffnet wurde und die an Injektionseinheit 3 angeschlossene Evakuierungsleitung (Ventil 4) geschlossen wurde (2. Schalten). Beim Schaltvorgang sinkt der Druck an den bereits benetzten Drucksensoren kurzzeitig ab, da nun über zwei Leitungen injiziert wird und der Evakuierungsdruck nur noch einseitig erzeugt wird. Es zeigt sich somit der kurzzeitige Übergang beim Schalten während dessen das Öl aus Injektionseinheit 1 mit geringerem Druck in die Kavität injiziert wird. Dies resultiert daraus, dass diese Einheit über die Zuleitung mit Injektionseinheit 2 verbunden ist, in welcher das Öl noch aufsteigen muss. Wenn die Zuleitung gefüllt ist, kommt es zum Druckanstieg da nun aus acht Angüssen das Fluid injiziert wird. Zu Beginn des Versuchs waren lediglich zwei Angüsse geöffnet. Je näher die Position des Sensors am Angusspunkt liegt, desto höher ist der Druckanstieg, da der Druck im Fluid vom Angusspunkt zur Evakuierungsseite im Werkzeug abnimmt. Dementsprechend ist bei Sensor 7 der Ausschlag am geringsten. Dieser liegt außerhalb des Bildbereichs.

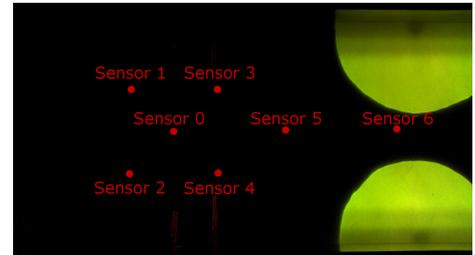
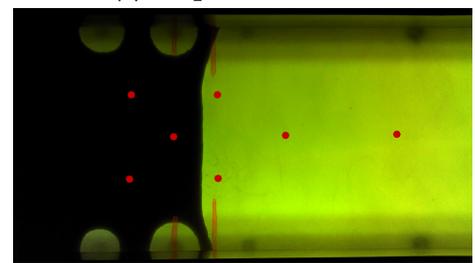
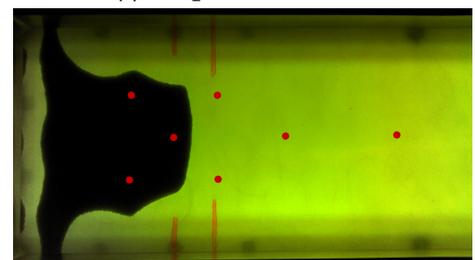
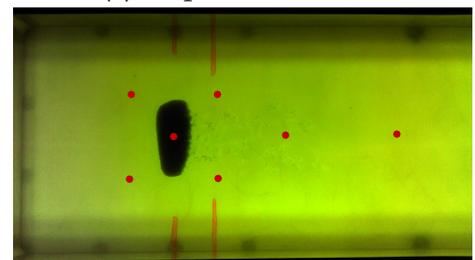
(a) Zeitpunkt  $t = 50$  s(b) Zeitpunkt  $t = 150$  s(c) Zeitpunkt  $t = 343$  s(d) Zeitpunkt  $t = 358,8$  s(e) Zeitpunkt  $t = 434,5$  s

Abb. 6.4.: Versuchsablauf

Sobald die Fließfronten von Einheit 2 sich vereinigt haben, werden die Ventile von Einheit 1 und 2 geschlossen und Injektionseinheit 3 geöffnet (3. Schalten). Ab diesem Zeitpunkt ändert die Fließfront, die die Vorderkante des Dry-Spot bilden wird, ihre Position kaum mehr. Zum Zeitpunkt  $t = 358,8$  s tritt das Fluid bereits aus dem Anguss aus. Dies ist zeitlich nach den Maxima der im benetzten Material liegenden Sensoren, da das Ventil bereits zu dem Zeitpunkt der Maxima geöffnet wurde. Zu diesem Zeitpunkt werden außerdem die Angüsse der Einheiten 1 und 2 geschlossen und der Injektionsdruck aus diesen Angüssen fällt weg. Somit fällt der gemessene Druck an den bereits in getränktem Material liegenden Sensoren ab. Erst langsam baut sich der Druck über Einheit 3 wieder auf.

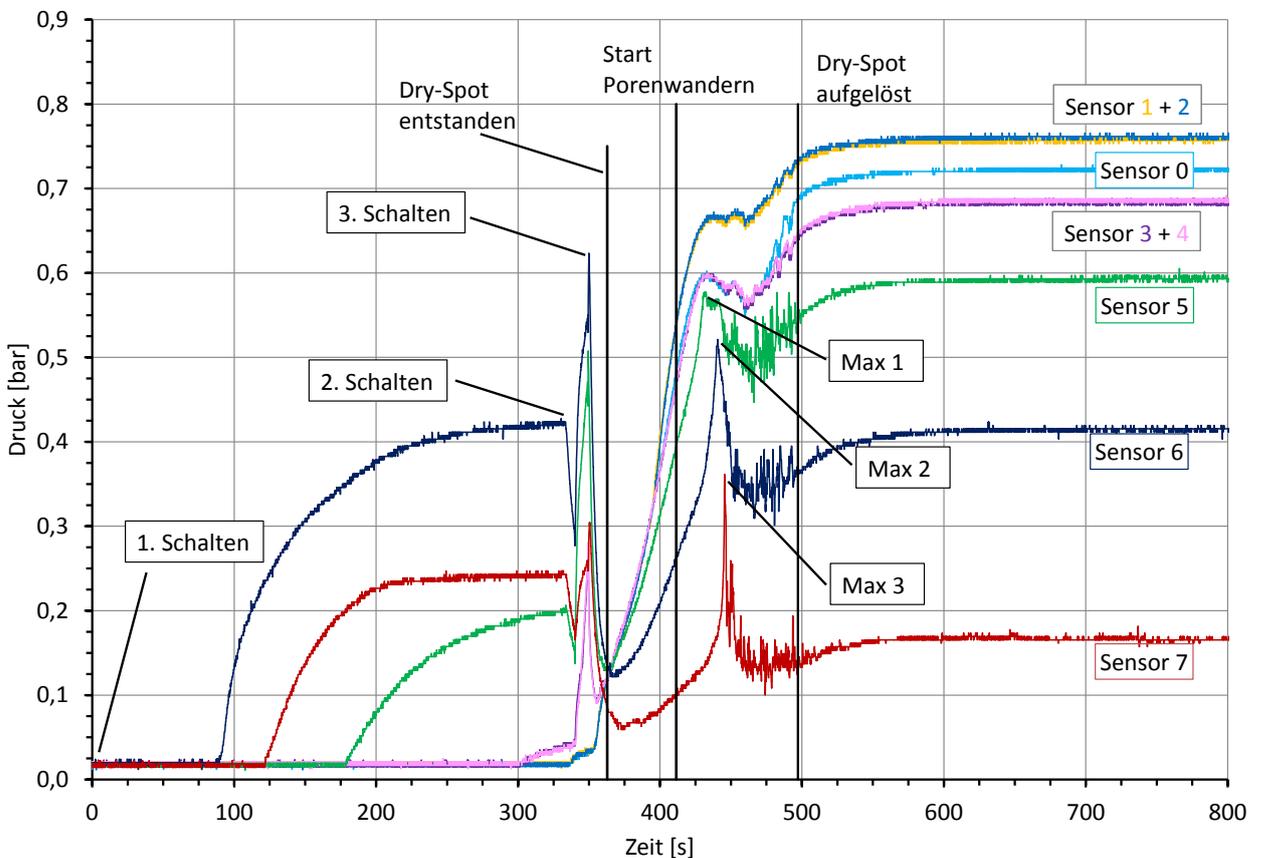


Abb. 6.5.: Druck-Zeit-Diagramm für den Versuch Vo26

Zu Beginn der Dry-Spot-Bildung fließt das Fluid von allen Seiten in den Einschluss. Im Folgenden wird die Grenze zwischen Dry-Spot und angrenzendem Fluid in Richtung Evakuierungsseite als Vorderkante bezeichnet. Die Hinterkante kennzeichnet hingegen die Grenze zwischen Dry-Spot und dem angrenzenden Fluid in Richtung Anguss (Injektionseinheit 3). Im Einschluss herrscht zunächst der Evakuierungsdruck. Aufgrund des Injektionsdrucks entsteht ein Druckgradient zwischen Anguss und Dry-Spot.

In einem anderen Versuch (V031) ist aufgrund einer Leckage erkennbar, dass sich an der Vorderkante ein Druckgradient in Richtung des Dry-Spot ausbildet. Kleine Gasporen, die aus der Leckage resultieren, wandern in den Dry-Spot. Weiter entfernt vom Dry-Spot bewegen sich die Poren jedoch

vom Dry-Spot weg und in Richtung Evakuierungsseite. Daraus lässt sich der in Abb. 6.6 dargestellte Druckverlauf in Phase 1 ableiten. Diese Druckverteilung sorgt dafür, dass die Vorderkante sich weiter in den Dry-Spot hineinbewegt.

Die Vorderkante des Dry-Spot ändert ihre Position allerdings nur wenig, während das Fluid aus Injektionseinheit 3 sich in Richtung Dry-Spot weiter ausbreitet (s. Abbildung 6.6: Phase 1). In der nachfolgenden Phase 2 haben sich der Innendruck des Dry-Spot und der Druck im angrenzenden Fluid in Richtung der Evakuierungsseite angeglichen. Darum bewegt sich die Vorderkante des Dry-Spot nicht mehr weiter. Der Stillstand der Gasporen in Versuch V031 zu diesem Zeitpunkt macht ebenfalls deutlich, dass der Druckgradient an der Vorderkante die Richtung wechselt. Für kurze Zeit ist der Betrag des Druckgradienten gleich null. Die Fließfront an der Hinterkante dringt dagegen weiterhin in den Dry-Spot ein. Da deswegen der Druck im Dry-Spot weiter ansteigt und den Druck im Fluid jenseits der Vorderkante übersteigt, beginnen sich Poren an der Vorderkante zu lösen. In Phase 3 ist der Innendruck des Dry-Spot größer als der Druck in dem Fluid in Richtung Evakuierungsseite. Aus diesem Grund setzt sich das Porenwandern an der Vorderkante weiter fort. Es besteht nun ein Druckgradient der vom Dry-Spot bis zur Evakuierungsseite gleich gerichtet ist.

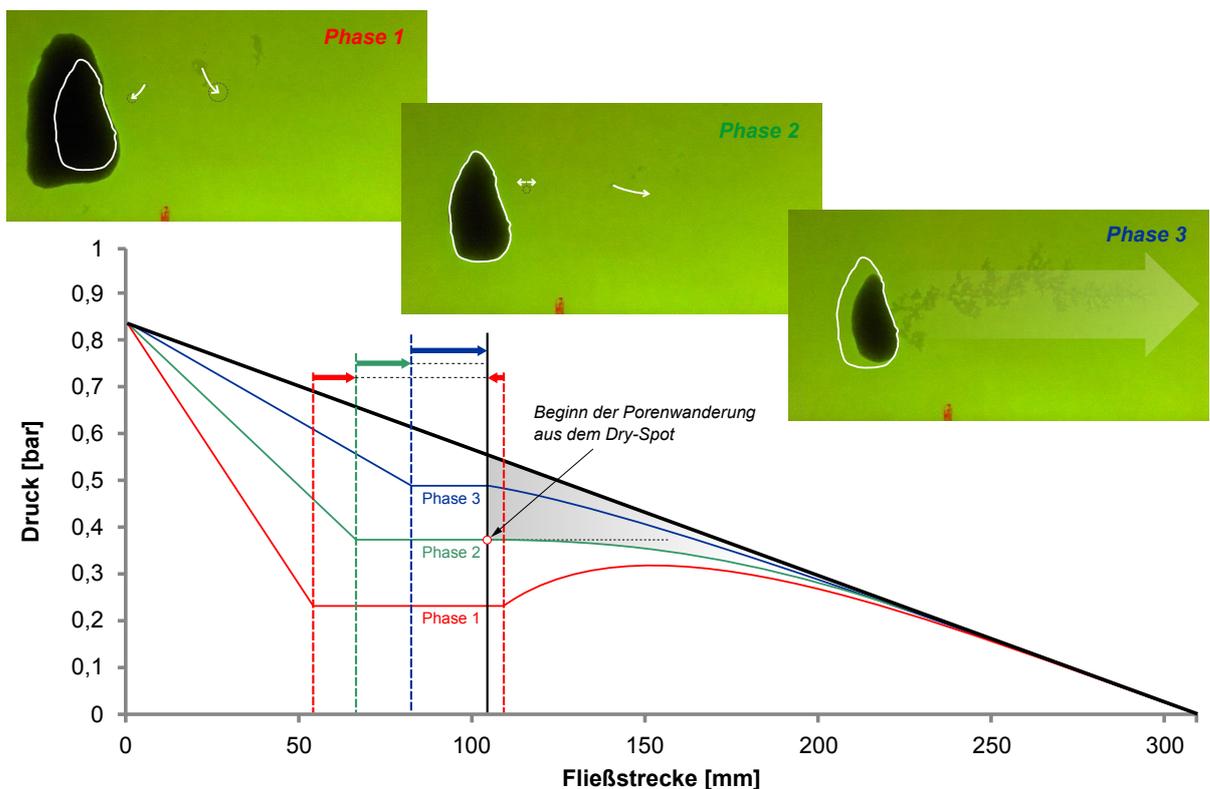


Abb. 6.6.: Schematische Darstellung des Druckgradienten in drei unterschiedlichen Phasen des Versuchs

Während des Porenwanderns ist der Übergang zwischen Dry-Spot und dem umliegenden Fluid in Richtung der Evakuierungsseite nicht mehr eindeutig abgegrenzt. Zum Zeitpunkt  $t = 434,5$  s (s. Abbildung 6.4e) sind die Poren bereits losgewandert, sind jedoch noch nicht an allen Sensoren in Richtung Evakuierungsdruck vorbeigelaufen.

Nachdem sich der Dry-Spot aufgelöst hat, ist das Fasermaterial vollständig getränkt und die gemessenen Drücke der einzelnen Sensoren werden kaum mehr durch mobile Poren gestört und beeinflusst. Es kommt zu einem stabilen Druckmesswert an den jeweiligen Sensoren und einem Ausgleich zwischen Evakuierungsdruck auf der einen und Injektionsdruck auf der anderen Seite. Es entsteht ein linearer Druckgradient. In Unterkapitel 6.4.1 wird dieser Druckgradient detailliert beschrieben.

Ein Abgleich der Druckmesswerte und der Videosequenzen zeigt, dass bevor die maximalen Druckwerte der einzelnen Sensoren erreicht sind, der Dry-Spot beginnt sich aufzulösen (s. Phase 2; Abbildung 6.6). Einzelne Poren lösen sich von dem Spot ab und bewegen sich in Richtung Evakuierungsseite. Dieser Zeitpunkt wird aus den Videodaten visuell bestimmt und in das Diagramm eingetragen (s. Start Porenwandern, Abbildung 6.5).

Bei Sensor 0 steigen die Druckmesswerte zum Startzeitpunkt des Porenwanderns ( $t = 411,4$  s) weiter an. Erst bei  $t = 433$  s bleibt der gemessene Druck an Sensor 0 näherungsweise konstant. Anschließend steigt der Druck ab  $t = 465$  s weiter an bis der maximal erreichbare Druck an Sensor 0 anliegt. Die Druckverläufe von Sensor 1 – 4 zeigen die gleichen Verläufe bei anderen Druckwerten.

Die Sensoren 5 – 7 zeigen beim Vorbeiwandern der Poren Druckschwankungen. Diese setzen ein kurze Zeit bevor die ersten Poren den Sensor erreichen. Dabei erzeugen sie ein lokales Maximum (s. Max 1, Max 2 und Max 3 in Abbildung 6.5). Auffällig ist dabei, dass das erste Maximum von Sensor 6 und 7 weit oberhalb des Druckwertes liegt, der sich später bei einem homogenen Druckgradienten einstellt. Alle nachfolgenden Ausschläge liegen unterhalb des Maximalwertes und liegen im Bereich des Druckwertes der sich bei homogenem Druckgradienten einstellt.

Diese Druckschwankungen lassen sich einem weiteren Phänomen zuordnen. Aus den Videodaten ist in diesem Zeitraum ein Pulsieren erkennbar. Die Poren wandern dabei schubweise in Richtung der Evakuierungsseite des Werkzeugs.

Die beschriebenen Ausschläge sind treten zeitlich versetzt auf. Dabei schlägt zuerst Sensor 5 aus, danach Sensor 6 und als letztes Sensor 7. Dies entspricht der ansteigenden Entfernung der Sensoren zum Dry-Spot. Im Vergleich mit den Videodaten wird deutlich, dass das Auftreten der Druckauschläge mit der Bewegung der Poren korreliert. Deshalb können sie für die in Kapitel 6.1 beschriebene Bestimmung der Porengeschwindigkeit genutzt werden. Die dazu benötigten charakteristischen Merkmale (s.o.) stellen dabei die beschriebenen Maxima dar. Die Ergebnisse der Berechnung werden für die Auswertung in Unterkapitel 6.4 genutzt.

Kleine Ausschläge im Zeitraum des Porenwanderns sind auch in den Kurven zu erkennen, bei denen sich keine Poren am Sensor vorbei bewegen (Sensoren 0 – 4). Diese Druckschwankungen treten scheinbar deswegen auf, weil die Druckschwankungen aufgrund von mobilen Poren im übrigen Bereich des getränkten Fasermaterials ausgeglichen werden.

Das erste Maximum zu Beginn des Porenwanderns an den Sensoren 5 – 7 resultiert möglicherweise aus einer Kombination von Effekten. Zum einen muss zunächst die Oberflächenspannung des Dry-Spot überwunden werden. Erst danach kommt es zum Loslösen der Poren. Das anschließende Lösen erfolgt bei einem geringeren Druck, da die Oberflächenspannung bereits überwunden wurde. Außerdem wird durch die Poren ein Volumen erzeugt, das das bestehende Fluid zunächst verdrängen muss. Anschließend ist ein Kanal für die weiteren Poren geschaffen und der gemessene Druck bei Vorbeiwandern der Poren ist geringer. Bei einem Versuch mit geringerem Faservolumengehalt ist aus den Videodaten erkennbar, dass sich zu Beginn keine einzelne Poren lösen. Das entweichende Volumen ist ein verbundener Kanal der sich von dem Dry-Spot bis zum Sensor erstreckt. Somit baut sich eine Verbindung zwischen diesen zwei Punkten auf. Der Innendruck des Dry-Spot wird an eine Stelle geleitet, die aufgrund des Druckgradienten zuvor einen geringeren Druck hatte.

Im Vergleich zu den anderen Versuchen zeigt sich, dass die Druckauschläge der Sensoren 5 – 7 mit steigender Viskosität abnehmen (s. Anhang A.2). Auch die Ausschläge an den unterschiedlichen Sensoren innerhalb eines Versuchs nehmen ab. Beispielsweise ist bei einem Versuch mit hoher Viskosität bei Sensor 7 kein Maximum mehr erkennbar (s. Abbildung A.11). Des Weiteren zeigen die Versuche, dass bei sinkendem Faservolumengehalt die Druckauschläge größer werden (vgl. Abbildung A.6).

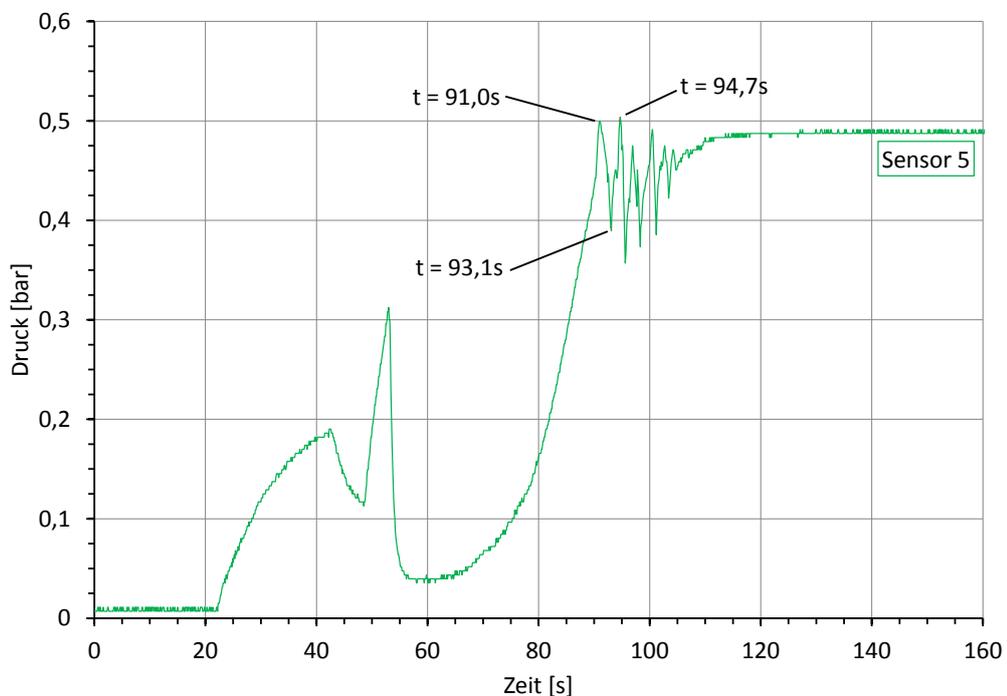
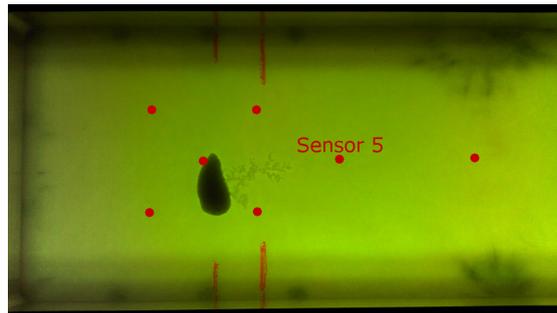


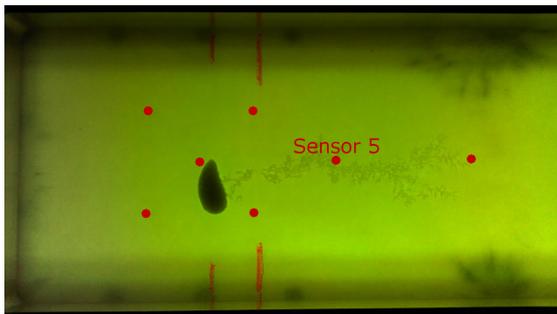
Abb. 6.7.: Druck-Zeit-Diagramm von Sensor 5 bei einem FVG  $\varphi = 5,25\%$

Wie bereits erläutert, stehen die Druckschwankungen ebenfalls in Verbindung mit dem Pulsieren. Bei einem Versuch (V031) mit geringem Faservolumengehalt ( $\varphi = 5,25\%$ ) zeigt sich das Pulsieren sehr deutlich. Die Druckwerte schwanken zwischen lokalen Minima und Maxima (s. Abbildung 6.7). Werte zwischen diesen Extremwerten stellen sich kaum ein. Zum Zeitpunkt  $t = 91,0\text{s}$  haben die Poren den Drucksensor 5 noch nicht erreicht, trotzdem zeigt sich bereits ein Ausschlag an diesem

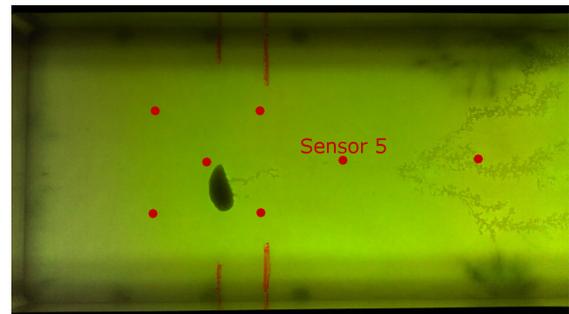
Sensor (s. Abb. 6.8a). Dieses Maximum entsteht durch die Bewegung der Poren. Diese schieben einen Bereich erhöhten Drucks vor sich her. Zum Zeitpunkt  $t = 93,1$  s ist bei Sensor 5 ein Minimum in dem Druck-Zeit-Diagramm erkennbar (Abb. 6.7). Ein Abgleich mit dem Video zeigt, dass zu diesem Zeitpunkt Poren am Sensor vorbeifließen (Abb. 6.8b). Bei dem nächsten Maximum ( $t = 94,7$  s) sind keine Poren am Drucksensor erkennbar (Abb. 6.8c). Jedoch ist auf diesem Bild der nächste Schub bereits sichtbar. Dies zeigt, dass das Maximum durch den nächsten Bereich erhöhten Drucks vor den Poren verursacht wird.



(a) Zeitpunkt  $t = 91,0$  s: keine Poren an Sensor 5



(b) Zeitpunkt  $t = 93,1$  s: Poren an Sensor 5



(c) Zeitpunkt  $t = 94,7$  s: keine Poren an Sensor 5

Abb. 6.8.: Porenwandern bei Auflösung des Dry-Spot

Ein Vergleich mit einem Versuch (V023) mit höherem FVG ( $\varphi = 10,51\%$ ) zeigt ebenfalls das erläuterte Phänomen. Hier ist das Porenwandern jedoch kontinuierlich. Lediglich zwischendurch kommt es zu kleinen Schüben. Abbildung 6.9 zeigt den Drucksensor 5 mit dem Porenwandern ab dem Zeitpunkt  $t = 318$  s. Im Gegensatz zum Versuch mit geringerem FVG sind die Maxima und Minima deutlich geringer ausgeprägt. Dazwischen sind weitere Druckschwankungen abzulesen, bei denen im Verhältnis zum Minimum weniger Poren am Sensor vorbei fließen, jedoch einen kontinuierlichen Fluss dokumentieren.

Während der Auflösung des Dry-Spot variiert scheinbar der Innendruck des Einschlusses. Sobald sich Poren vom Dry-Spot gelöst haben, sinkt der Innendruck und der Porenfluss wird gemindert. Der umgebende Druck im Fluid ist dementsprechend höher. Die hintere Fließfront von Injektions-einheit 3 drückt jedoch weiterhin auf den Dry-Spot. Es kommt zum erneuten Druckanstieg innerhalb des Dry-Spot und somit zum erneuten Loslösen der Poren. Der Druck im umgebenden Fluid ist in Richtung der Evakuierungsseite des Werkzeugs zu diesem Zeitpunkt wieder kleiner. Das Pulsieren ist bei einem geringerem Faservolumengehalt deutlicher erkennbar, die Permeabilität ist

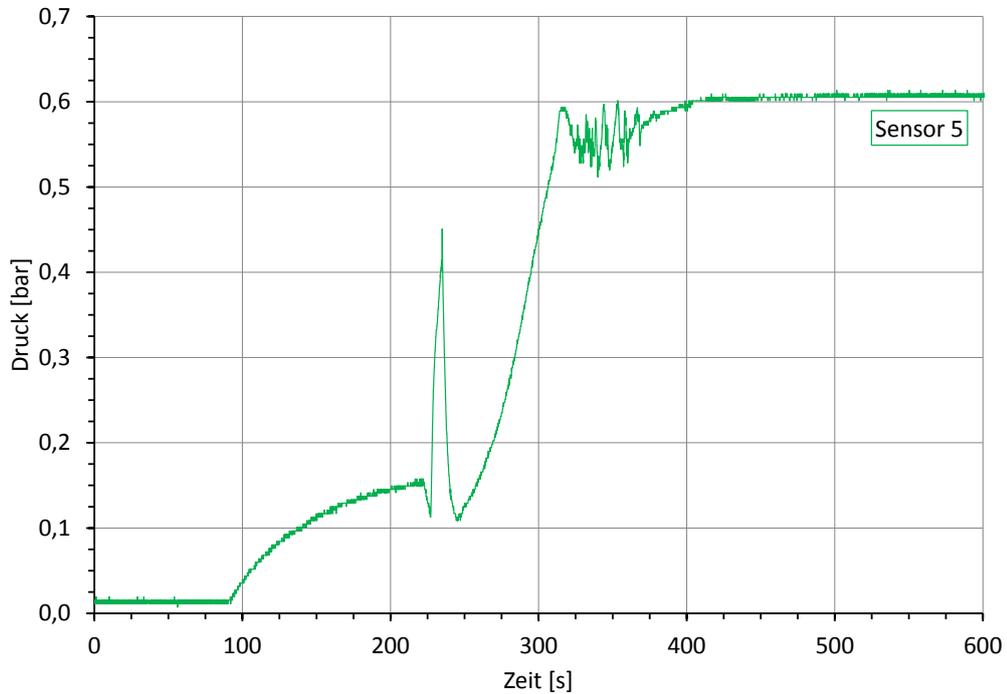
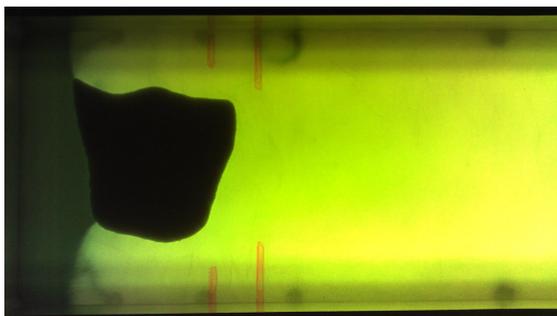


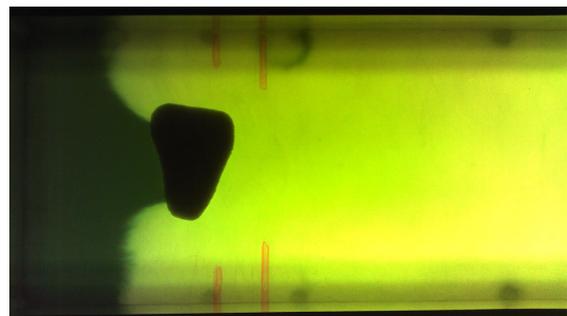
Abb. 6.9.: Druck-Zeit-Diagramm von Sensor 5 bei einem FVG  $\varphi = 10,51\%$

hier wesentlich höher (vgl. Tabelle 6.5). Damit können sich eine größere Anzahl von Poren lösen und es braucht mehr Zeit den Innendruck wieder aufzubauen. Auf diese Weise sind bei geringem Faservolumengehalt einzelne Schübe deutlicher erkennbar.

Zur Überprüfung, wie sich die aufeinander treffenden Fließfronten bei der Entstehung des Dry-Spot verhalten, wird der Versuch mit zwei unterschiedlich eingefärbten Ölen, aber identischer Viskosität durchgeführt. Wie zuvor erläutert, fließt bei der Entstehung des Dry-Spot das Fluid von von allen Seiten in den Einschluss, da hier der Druck zunächst geringer ist als in dem umgebenden Fluid. Abbildung 6.10a zeigt den Versuch zu dem Zeitpunkt, bei dem ausschließlich die Angüsse der dritten Injektionseinheit geöffnet sind. Die Injektionseinheit 3 ist auf den Bildern in Abbildung 6.10 auf der linken Seite.



(a) Zeitpunkt  $t = 368\text{ s}$



(b) Zeitpunkt  $t = 389\text{ s}$

Abb. 6.10.: Fließverhalten des Öls nach Öffnung der Angüsse auf der linken Seite (Injektionseinheit 3)

Der Dry-Spot bildet sich durch das Aufeinandertreffen der bereits vorhandenen Fließfronten (helles Öl) und dem neu austretenden Fluid (dunkles Öl). Dabei sind die Fließfronten der verschieden gefärbten Öle klar zuerkennen. Ein Austausch der beidem Öl an den Fließfronten findet dabei kaum statt.

Zum vorangeschrittenen Zeitpunkt ( $t = 389$  s, Abbildung 6.10b) hat die Größe des Dry-Spot sich minimiert. Deutlich zeigt sich, dass das an den Dry-Spot angrenzende Fluid in den Einschluss fließt. Die dunkle Fließfront, die nicht an den Dry-Spot grenzt ist im Gegensatz zu der am Einschluss zurückgeblieben. Zudem fließt der zurückgebliebene Teil der Fließfront weiterhin parallel in Richtung der Evakuierungsseite des Werkzeugs. An der dunklen Fließfront ist erkennbar, dass der Druckgradient zwischen Innendruck im Dry-Spot und Angusspunkt deutlich größer ist als der im umgebenden Fluid.

Im weiteren Verlauf des Versuchs zeigt sich, dass nach Auflösung des Dry-Spot die ungleichmäßige Fließfront des dunklen Öls erhalten bleibt. Aufgrund eines homogenen, linearen Druckgradienten behält diese ihre Geometrie. Außerdem wird ein weiteres Phänomen sichtbar. Das dunkle Öl fließt in den ersten Angusspunkt der zweiten Injektionseinheit. Diese besteht aus drei Angüssen, die mittels eines Angussstutzens verbunden sind. Die Verbindung wird durch eine Nut im Stutzen umgesetzt. Infolgedessen tritt das Öl aus dem dritten Angusspunkt wieder aus (s. Abbildung 6.11a). Am Rand des Werkzeugs, an dem die dunkle Fließfront in den ersten Angusspunkt läuft, bleibt sie etwas zurück. Nach weiteren 125 s ist erkennbar, dass die dunkle Fließfront am Rand des Werkzeugs (oberhalb von Angusspunkt 1) sich nicht wesentlich weiter ausgebreitet hat. Anders verhält es sich mit dem aus Anguss 3 wieder austretendem Öl. Dies ist im Verhältnis zu der ersten dunklen Fließfront erkennbar weiter, und somit schneller, geflossen (s. Abbildung 6.11b).

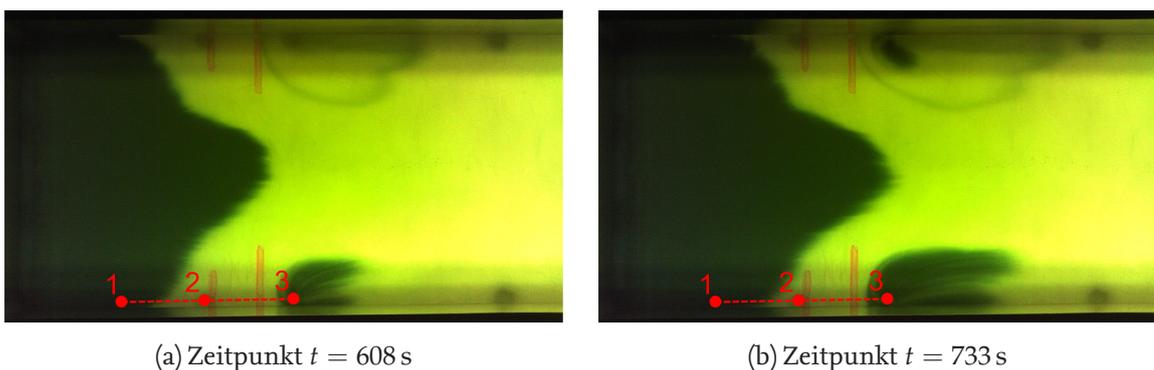


Abb. 6.11.: Fließverhalten des Öls bei Erreichen eines weiteren Angusspunktes

Der Angussstutzen bildet einen unerwünschten Bypass im Werkzeug, der die Homogenität im Druckgradienten beeinträchtigt. In dem Verbindungsstück ist kein Fasermaterial vorhanden und folglich ist hier die Permeabilität höher als in der mit Fasermaterial gefüllten Kavität des Werkzeugs. Daraus resultiert eine erhöhte Fließgeschwindigkeit des Fluids im Bypass. Dies erklärt die schnellere Fließgeschwindigkeit an Anguss 3 im Gegensatz zu der Fließgeschwindigkeit in der Kavität vor diesem Anguss. Abbildung 6.12 zeigt das Verhalten mittels einer Fließsimulation. In der Simulation ist erkennbar, dass lediglich im Randbereich der Kavität eine veränderte Fließgeschwindigkeit

auftritt. Der Dry-Spot wird jedoch in der Mitte der Kavität gebildet und somit kann das Phänomen wegen des geringen Einflusses bei der Auswertung vernachlässigt werden.

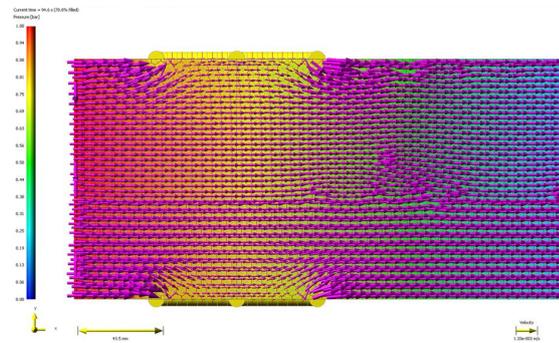


Abb. 6.12.: Fließsimulation der Matrix mit integrierten Angusstützen

## 6.4. Einfluss der Eingabeparameter auf die Entstehung und das Verhalten des Dry-Spot

In Abschnitt 6.2 ist dargelegt, dass die Ergebnisse der Versuche weitgehend reproduzierbar sind. Aufgrund der Komplexität des Aufbaus ist dennoch mit einer Streuung in den Ergebnissen zu rechnen. Für die weitere Versuchsauswertung wird deshalb aus den durchgeführten Versuchen für den jeweiligen Prozessparameter ein Versuch ausgewählt, der die folgenden Kriterien am besten erfüllt:

- gleichmäßige Ausbreitung der Fließfronten
- gleichmäßige Ausrichtung des Dry-Spot
- gleichmäßige Form des Dry-Spot
- maximale Länge des Zeitraums in der der Drucksensor innerhalb des Dry-Spot liegt

Die Versuche, die jeweils zur Auswertung herangezogen werden, sind in den jeweiligen Abschnitten angegeben. Eine Übersicht aller auswertbaren Versuche befindet sich im Anhang A.2.

Von der Mittelwertbildung aus den Messdaten wird in dieser Arbeit abgesehen. Dies liegt darin begründet, dass dabei Messwerte von Versuchen deren Durchführung den zuvor genannten Kriterien am besten entsprechen durch solche Messwerte beeinflusst werden, die aus Versuchen resultieren auf die dies nicht zu trifft. Die Kombination von mehreren gemittelten Werten zur Berechnung einer darauf basierender Größen (z. B. Stoffmenge) führt zu einer größeren Ungenauigkeit des berechneten Wertes. Aus diesem Grund erscheint die Betrachtung eines einzelnen Versuchs für die Auswertung geeigneter.

### 6.4.1. Einfluss des Druckgradienten

Der Druckgradient, der sich während des Versuchs einstellt, ist abhängig von dem Evakuierungsdruck im geschlossenen Werkzeug, dem anliegenden Injektionsdruck sowie dem Abstand zwischen Anguss und Fließfront. Im Rahmen dieser Arbeit werden Evakuierungsdruck und Injektionsdruck variiert. Durch Variation des Evakuierungsdrucks wird jedoch auch das eingeschlossene Volumen des Dry-Spot zu Beginn des Porenwanderns verändert. Dementsprechend wird im folgenden Abschnitt zwischen den Versuchen unterschieden, bei denen der Evakuierungsdruck respektive der Injektionsdruck variiert wird.

Bei einer linearen Druckverteilung ohne Störungen, wie beispielsweise einen Dry-Spot, ergeben sich konstante Druckgradienten an jeder Stelle im getränkten Fasermaterial. Der Betrag des Druckgradienten ist gleich dem Quotienten der Druckdifferenz zwischen Injektions- und Evakuierungsdruck und der Länge des Fasermaterials. Mit Hilfe der gemessenen Druckwerte und den Abständen der Sensoren wird der Gradient als Steigung der angenommenen Geraden durch die Druckmesswerte berechnet. Die Sensoren um den Dry-Spot (Sensoren 1 – 4) werden nicht mit in Berechnung einbezogen, da diese nicht entlang der Mittelachse liegen, um Randeffekte auszuschließen. Abbildung 6.13 zeigt die gemessenen Druckwerte der Sensoren 0, 5, 6 und 7 mit dem jeweiligen Abstand zueinander. Nach dem Versuch bildet sich ein homogener Druckgradient zwischen Fließfront und Anguss. Bei den Messwerten an den Sensoren stellt sich jeweils ein zeitlich konstanter Wert ein. Durch den Messfehler der Druckmessumformer ergeben sich leichte Schwankungen. Die eingezeichneten Druckwerte stellen entsprechend einen Mittelwert dar. Ausgehend von einem linearen Verlauf, wird die Steigung aus den gemessenen Werten ermittelt. Die Steigung ergibt den Druckgradienten  $\nabla p$ . Für alle Versuche mit unterschiedlichem Injektions- und Evakuierungsdruck wird auf diese Weise der Druckgradient bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Es wird deutlich, dass sich der Druckgradient mit steigendem Evakuierungsdruck verringert, während er sich mit steigendem Injektionsdruck vergrößert. Die geringere Variation des Evakuierungsdrucks hat auch geringere Unterschiede im Druckgradienten zur Folge. Der berechnete Druckgradient bei 0,03 bar liegt zwischen den Druckgradienten von 0,01 bar und 0,02 bar. Hierbei handelt es sich offensichtlich um das Resultat von Prozess- und Messfehlern, die aufgrund der geringen Differenz des Evakuierungsdrucks zum Tragen kommen.

Injektionsdruck $p_{Inj}$ [Pa]	Evakuierungsdruck $p_{Evak}$ [Pa]	Druckgradient $\nabla p$ [Pa/m]
1,0196	0,01	$324,2 \cdot 10^3$
0,9946	0,02	$301,2 \cdot 10^3$
1,0069	0,03	$306,5 \cdot 10^3$
1,9973	0,01	$687,9 \cdot 10^3$
2,9956	0,01	$1029,6 \cdot 10^3$

Tab. 6.2.: Druckgradient  $\nabla p$  in Abhängigkeit des Injektions- und Evakuierungsdrucks

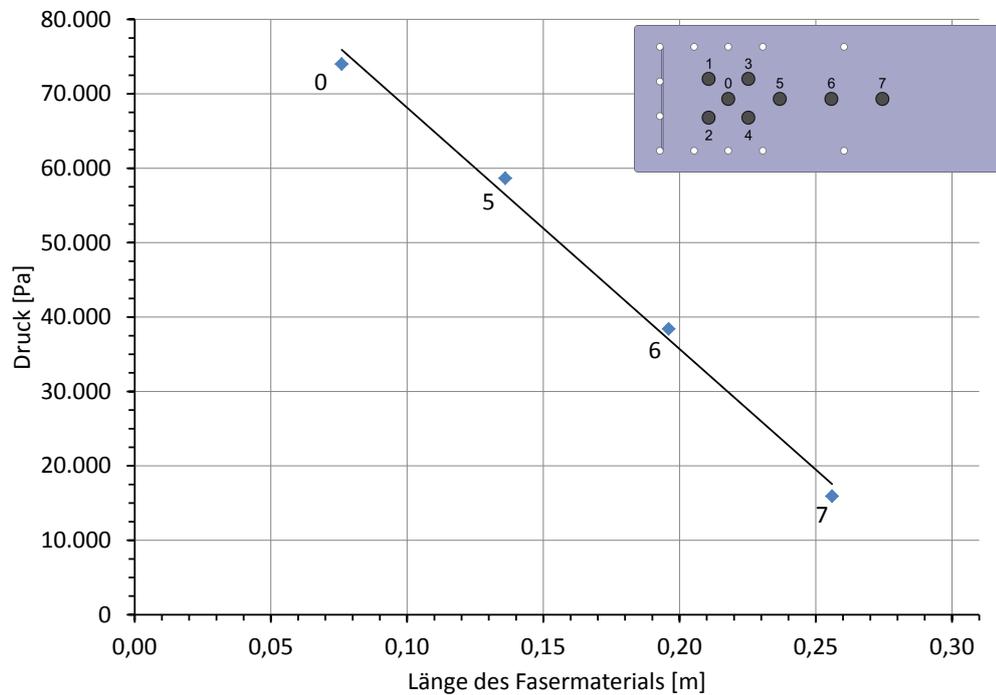


Abb. 6.13.: Exemplarisches Diagramm zur Berechnung des Druckgradienten

### Unterschiedlicher Druckgradient aufgrund der Variation des Evakuierungsdrucks

Tabelle 6.3 sind die Eingabeparameter der ausgewerteten Versuche mit unterschiedlichen Evakuierungsdrücken zu entnehmen. In Abbildung 6.14 ist das eingeschlossene Volumen des Dry-Spot über die Zeit bei den unterschiedlichen Evakuierungsdrücken aufgetragen. Um eine zeitliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten, die unabhängig von unterschiedlich großen Startvolumen ist, beginnt die Darstellung ab dem gleichen eingeschlossenen Referenzvolumen. Das Referenzvolumen entspricht dem Volumen des Dry-Spot von dem Versuch, bei dem sich der Dry-Spot zu Letzt geschlossen hat. Dies dient zur zeitlichen Synchronisierung um Auflösezeiten darstellen, ermitteln und vergleichen zu können. Entsprechend ist das eingeschlossene Volumen zum Zeitpunkt  $t = 0$  s bei allen Evakuierungsdrücken gleich.

Versuchsname	Prozessparameter (Stellgröße)	Evakuierungsdruck [bar]	Injektionsdruck [bar]	Druckgradient [Pa/m]	dyn. Viskosität [Pa s]	Faservolumengehalt [%]
V015	Druckgradient (Evakuierungsdruck <sub>o,01</sub> )	0,01	1,0196	$324,2 \cdot 10^3$	0,31	10,51
V020	Druckgradient (Evakuierungsdruck <sub>o,02</sub> )	0,02	0,9946	$301,2 \cdot 10^3$	0,31	10,51
V026	Druckgradient (Evakuierungsdruck <sub>o,03</sub> )	0,03	1,0069	$306,5 \cdot 10^3$	0,31	10,51

Tab. 6.3.: Versuchsplan mit variierendem Evakuierungsdruck

Grundsätzlich weisen die Kurven den gleichen Verlauf auf. Mit steigendem Evakuierungsdruck verlängert sich der Zeitraum bis der Dry-Spot sich vollständig aufgelöst hat. Der Zeitraum der Auflösung ist bei einem Evakuierungsdruck von 20 mbar und 30 mbar in etwa gleich groß. Die Differenz beträgt lediglich 3 s. Da der erzeugte Druckgradient bei den beiden Versuchen fast identisch ist, weicht auch der Auflösungszeitraum in den Versuchen kaum voneinander ab. Zusätzlich ist dies der Grund für den ähnlichen Verlauf der Kurven. Bei beiden nimmt das Volumen gleichmäßig mit betragsmäßig geringer werdender Steigung ab.

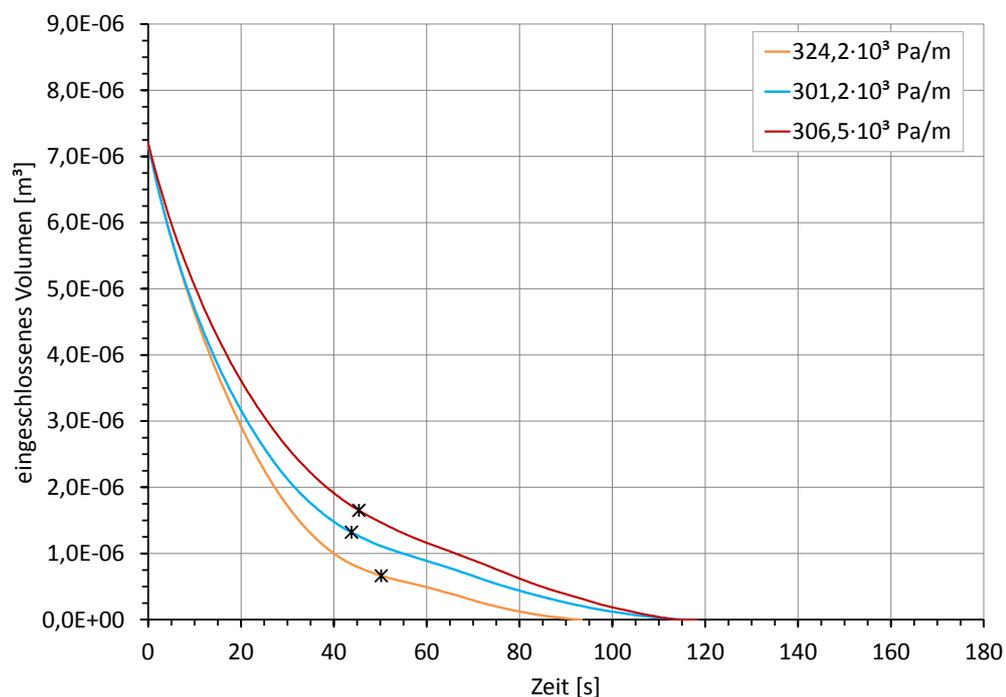


Abb. 6.14.: Volumen-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Evakuierungsdrucks

In Versuch V015 mit einem Druckgradienten von  $\nabla p = 324,2 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  lässt sich die Kurve hingegen in zwei Bereiche einteilen. Zu Beginn fällt sie stark ab, während sich im zweiten Bereich ein flacherer Verlauf zeigt. Diese Steigungsänderung resultiert aus den beiden unterschiedlichen Gründen für die Volumenänderung. Im ersten Bereich ändert sich das Volumen aufgrund der Komprimierung des eingeschlossenen Gases während des Voranschreitens der Fließfront. Je stärker sich der Innendruck des Dry-Spot und der Druck an der Fließfront angleichen, desto geringer fällt die Komprimierung und damit die Volumenänderung des Dry-Spot aus. Der zweite Bereich wird dominiert durch das Loslösen der Poren und die damit einhergehende Volumenänderung. Auf der der Fließfront gegenüberliegenden Seite des Dry-Spot ist der Druck im angrenzenden Öl zu Beginn höher als im Dry-Spot. Durch die Komprimierung folgt eine Druckerhöhung im Dry-Spot. Überschreitet der Druck im Dry-Spot den des angrenzenden Öls beginnt das Porenwandern. Im Verhältnis ist die Volumenänderung beim Komprimieren stärker als das Porenwandern. Der Übergangsbereich wird zeitlich kürzer und tritt dadurch deutlicher hervor, je eher der Innendruck des Dry-Spot dem Druck in der Fließfront entspricht.

Der Beginn des Porenwanderns ist im Diagramm für alle Kurven mit einem Kreuz markiert. Die Zeitpunkte variieren wenig und liegen zwischen  $t = 44$  s und  $t = 50$  s. Daraus ergibt sich, dass die Volumen bei denen sich die Poren beginnen sich zu lösen variieren. Es steigt bei steigendem Evakuierungsdruck an.

Abbildung 6.15 zeigt die eingeschlossene Stoffmenge, die sich mit Hilfe der gemessenen Druckwerte berechnet, über die Zeit. Der Verlauf aller drei Kurven ist bei variierendem Evakuierungsdruck ähnlich. Zunächst verringert die Stoffmenge nur langsam, anschließend zeigt der Graphen eine betragsmäßig größere Steigung. Im ersten Bereich wird der Dry-Spot durch Voranschreiten der hinteren Fließfront komprimiert. Im zweiten Bereich wird dieses Verhalten vom Loslösen der Poren aus dem Dry-Spot überlagert. Die Ausschläge zu Beginn der Kurve resultieren aus dem Fehler der gemessenen zugrunde liegenden Druckwerte. Zu Beginn sind diese klein und der relative Messfehler ist groß. Je größer der gemessene Druckwert ist, desto kleiner ist der relative Messfehler, da die absolute Messgenauigkeit der Sensoren klein ist im Verhältnis zur Höhe des gemessenen Drucks.

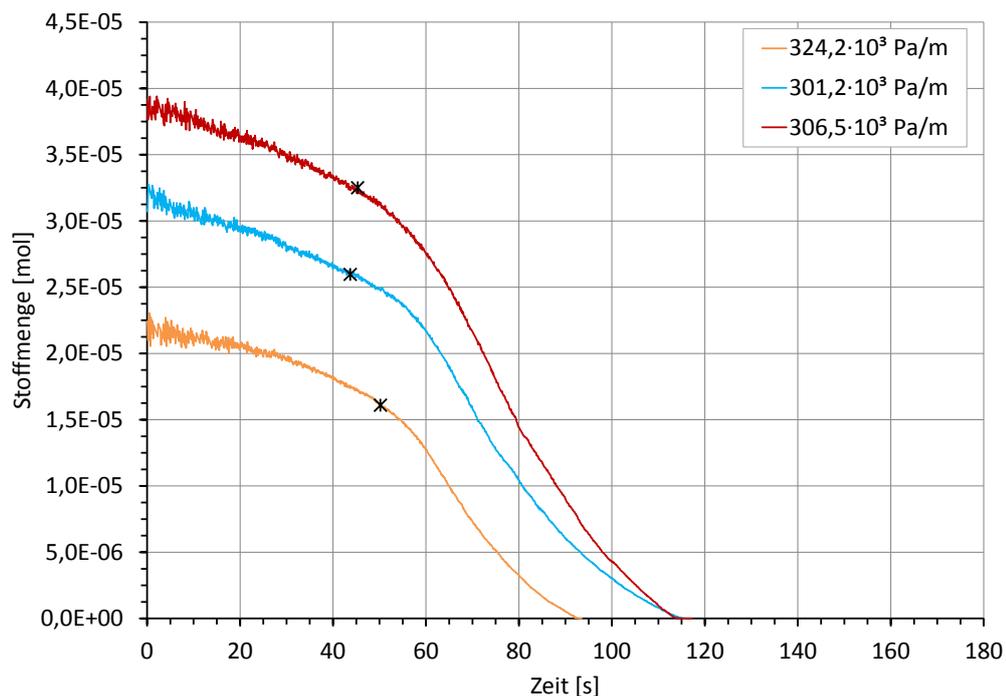


Abb. 6.15.: Stoffmenge-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Evakuierungsdrucks

Die Kreuze markieren den Startzeitpunkt des Porenwanderns. Bis zu diesem Zeitpunkt ist zu erwarten, dass die Stoffmenge konstant bleibt, da der Dry-Spot durch das angrenzende Öl abgeschlossen ist und kein weiteres Gas hinzukommt oder entweicht. Tatsächlich zeigt sich allerdings eine Verringerung der Stoffmenge. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Volumen aus den Videobildern, also einer zweidimensionalen Projektion, ermittelt wird. Anhand der sichtbaren Fläche wird auf das Volumen geschlossen.

Eine Abweichung zum realen Volumen (z. B. durch konkave Seitenwände) führt somit zu einem volumenabhängigen Fehler bei der Berechnung. Relativ zum ermittelten Volumen vergrößert sich der Fehler mit sinkendem Volumen. Entsprechend verkleinert sich das Produkt aus Druck und Volumen. Bei Anwendung des idealen Gasgesetzes (Gl. 6.2) ergibt sich dadurch, dass es sich um eine isotherme Zustandsänderung handelt und die entsprechenden Terme der Gleichung konstant sind, der im Diagramm dargestellte Effekt einer sich vermeintlich verringernden Stoffmenge.

Diese Annahme wird von dem Ergebnis einer Beispielrechnung unterstützt. Es wird angenommen, dass die Fließfront des Dry-Spot nicht senkrecht zur Bodenplatte verläuft, sondern mit der Bodenplatte einen Winkel von  $30^\circ$  einschließt. Daraus ergibt sich ein Differenzvolumen, das zum über die sichtbare Fläche ermittelte Volumen addiert wird. Auf Grundlage des so korrigierten eingeschlossenen Volumens lässt sich eine korrigierte Stoffmenge berechnen. Abbildung 6.16 zeigt die beispielhaften Verläufe der Stoffmenge über die Zeit. Zum Vergleich ist ebenfalls die ursprünglich errechnete Stoffmenge aus Versuch V015 mit einem Druckgradienten von  $\nabla p = 324,2 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Stoffmenge den erwarteten Verlauf zeigt. Damit erscheint ein volumenabhängiger Fehler sehr wahrscheinlich.

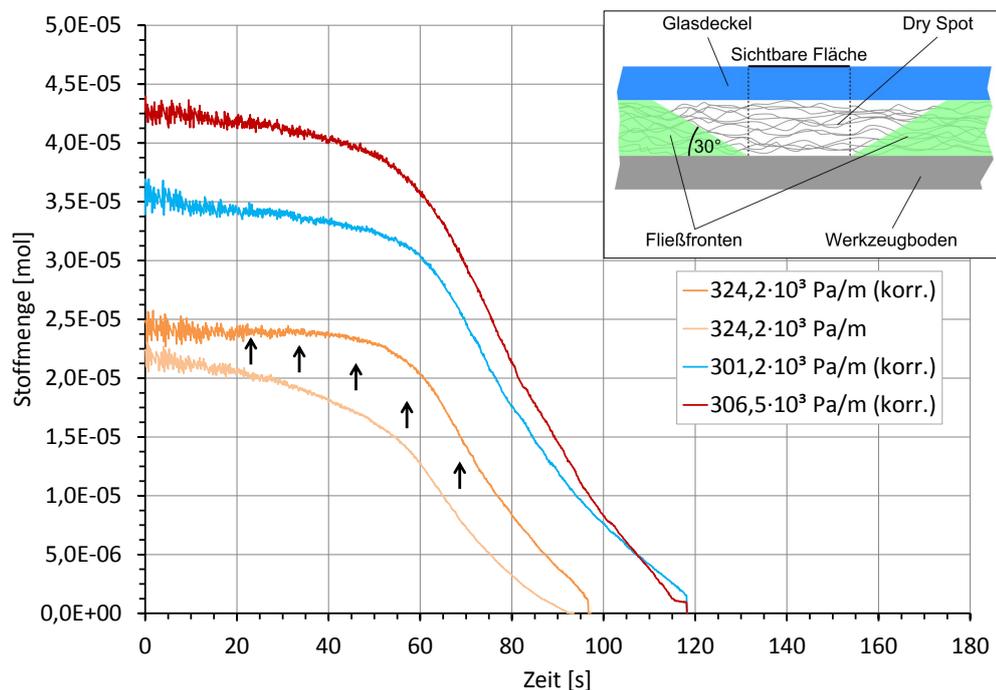


Abb. 6.16.: Darstellung des Stoffmenge-Zeit-Diagramms nach Korrektur der Stoffmenge

Andererseits ist mit den verwendeten Messverfahren nicht auszuschließen, dass die Stoffmenge bereits vor dem Porenwandern aufgrund von mikroskopischen Effekten abnimmt. Variationen in der Stoffmenge können vom Ausgasen des umschließenden Öls und dem Zurückbleiben von Gas hinter der eindringenden Fließfront verursacht werden.

In Abbildung 6.15 ist der gleiche Zeitbereich dargestellt wie im vorhergehenden Diagramm (Abbildung 6.14). Zum Zeitpunkt  $t = 0$  s ist das Volumen aufgrund der Synchronisation in allen drei Versuchen gleich, die Stoffmenge hingegen unterscheidet sich. Mit steigendem Evakuierungsdruck, d. h. steigendem Innendruck des Dry-Spot, nimmt die Stoffmenge zu. Dies entspricht dem idealen Gasgesetz, da Temperatur  $T$ , universelle Gaskonstante  $R$  und Volumen  $V_{Dry-Spot}$  sich bei  $t = 0$  s zwischen den Versuchen nicht unterscheiden. Somit hängt die Stoffmenge direkt mit dem anliegenden Innendruck zusammen. Der größte Druckgradient ergibt sich aus dem geringsten Evakuierungsdruck, da alle Versuche mit dem gleichen Injektionsdruck durchgeführt wurden. Entsprechend der gezeigten Zusammenhänge nimmt die Stoffmenge mit steigendem Druckgradienten ab. Der Beginn des Porenwanderns (markiert durch Kreuze) unterscheidet sich zeitlich nur geringfügig. Mit zunehmendem Innendruck im Dry-Spot steigt auch die Stoffmenge, bei der die Poren sich beginnen zu lösen. Obwohl auf dem Beginn des Porenwanderns ein charakteristischer Abfall der Stoffmenge folgt, ist dieses Merkmal nicht dazu geeignet den Beginn präzise zu kennzeichnen.

Abbildung 6.17 zeigt die durchschnittliche Porengeschwindigkeit bei den verschiedenen Druckgradienten. Die Porengeschwindigkeit ist nahezu identisch trotz variierender Evakuierungsdrücke. Die Abweichung des Versuchs mit  $\nabla p = 306,5 \cdot 10^3$  Pa/m beträgt lediglich 0,8 % zu den übrigen Versuchen. Zu beachten ist, dass die Geschwindigkeit der Poren ausschließlich entlang der Sensoren betrachtet wird. Da sich die Poren jedoch nicht geradlinig bewegen, ist die tatsächliche zurückgelegte Strecke zwischen zwei Sensoren häufig größer als für die Berechnung zugrunde gelegt. Für die Betrachtung des Porenwanderns ist die berechnete Geschwindigkeit jedoch ausreichend, da sie Aufschluss darüber gibt nach welcher Zeit die Poren ein Bauteil verlassen haben.

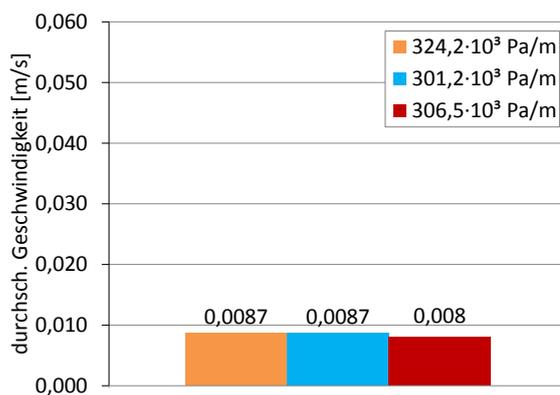


Abb. 6.17.: Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierendem Druckgradienten (Evakuierungsdruck)

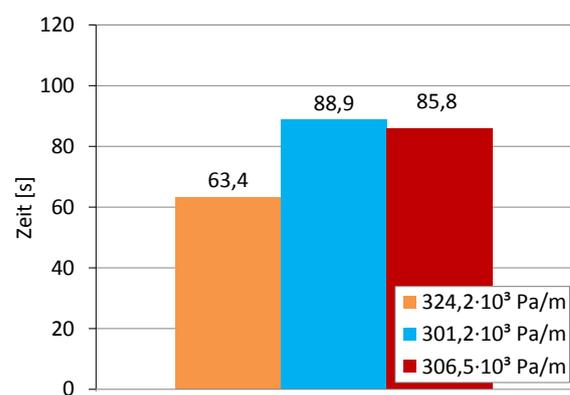


Abb. 6.18.: Auflösezeit des Dry-Spot bei variierendem Druckgradienten (Evakuierungsdruck)

In Abbildung 6.18 sind die Auflösezeiten der Dry-Spots bei den jeweiligen Druckgradienten dargestellt. Dabei ist der Auflösezeitraum als der Zeitraum definiert, bei dem sich die Poren beginnen zu lösen, bis der Dry-Spot sich vollständig aufgelöst hat. Auffällig ist, dass kein linearer Zusammenhang zwischen Zunahme des Evakuierungsdrucks und Auflösezeit des Dry-Spot zu bestehen scheint. Nach dem Gesetz von Darcy besteht jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit des Fluids und dem anliegenden Druckgradienten. Entsprechend muss auch

die Auflösezeit linear abhängig vom Druckgradienten sein. Die scheinbare Nichtlinearität in diesen Versuchsergebnissen beruht auf den fehlerbehafteten Druckgradienten, die sich wie bereits beschrieben, aus den geringfügig ändernden Evakuierungsdrücken ergibt.

#### Unterschiedlicher Druckgradient aufgrund der Variation des Injektionsdrucks

In Tabelle 6.4 sind die Eingabeparameter der Versuche mit unterschiedlichen Injektionsdrücken und daraus resultierende Druckgradienten aufgelistet. In dem in Abbildung 6.19 dargestellten Diagramm ist das eingeschlossene Gasvolumen des Dry-Spot über die Zeit aufgetragen. Der Verlauf der drei Graphen ist ähnlich zueinander, wie bereits in Abbildung 6.14. Dieser lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Im ersten Bereich fällt der Graph linear mit betragsmäßig großer Steigung. In diesem Bereich verringert sich das Volumen durch die voranschreitende Fließfront. Im zweiten Bereich verläuft der Graph ebenfalls nahezu linear, jedoch mit einer betragsmäßigen geringeren Steigung, was wiederum durch das Porenwandern verursacht wird. Wie oben beschrieben, ist die Volumenänderung aufgrund der voranschreitenden Fließfront größer als aufgrund des Porenloslösens. Der Übergang von dem ersten in den zweiten Bereich ist bei den Druckgradienten  $\nabla p = 687,9 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  und  $\nabla p = 1.029,6 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  deutlich kürzer als bei  $\nabla p = 324,2 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  (s.o.).

Versuchsname	Prozessparameter (Stellgröße)	Evakuie- rungsdruck [bar]	Injekti- onsdruck [bar]	Druckgra- dient [Pa/m]	dyn. Visko- sität [Pa s]	Faservolu- mengehalt [%]
V015	Druckgradient (Injektionsdruck <sub>1</sub> )	0,01	1,0196	$324,2 \cdot 10^3$	0,31	10,51
V020	Druckgradient (Injektionsdruck <sub>2</sub> )	0,01	1,9973	$687,9 \cdot 10^3$	0,31	10,51
V026	Druckgradient (Injektionsdruck <sub>3</sub> )	0,01	2,9956	$1029,6 \cdot 10^3$	0,31	10,51

Tab. 6.4.: Versuchsplan mit variierendem Injektionsdruck

Die eingezeichneten Kreuze markieren wieder den Beginn des sichtbaren Porenwanderns. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Versuchen (s. Abbildung 6.14), beginnt das Porenwandern zu unterschiedlichen Zeitpunkten und bei unterschiedlichen Volumina. Auffällig ist außerdem, dass die beiden Graphen bei fast 1,5-fachen Druckgradient ( $\nabla p = 687,9 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  zu  $\nabla p = 1.029,6 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$ ) nah beieinander liegen. Hingegen weicht der Graph bei  $\nabla p = 324,2 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  deutlich von den anderen beiden Graphen ab. Ein linearer Zusammenhang ist also nicht erkennbar, obwohl wie bereits beschrieben, das Gesetz von Darcy dies nahe legt.

Die dargestellten Graphen in Abbildung 6.20 zeigen die Stoffmenge über der Zeit. Die Kreuze markieren den Beginn des Loslösens der Poren. Der aufgetragene Zeitraum entspricht dem des zuvor beschriebenen Diagramms. Das Referenzvolumen des Dry-Spot ist für den Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  ebenfalls gleich gewählt. In diesen Versuchen wurde der Injektionsdruck, nicht aber der Evakuierungsdruck variiert. Entgegen der Erwartung sind die Anfangswerte der berechneten Stoffmenge jedoch nicht gleich. Zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  sind die Volumina synchronisiert. Die gemessenen

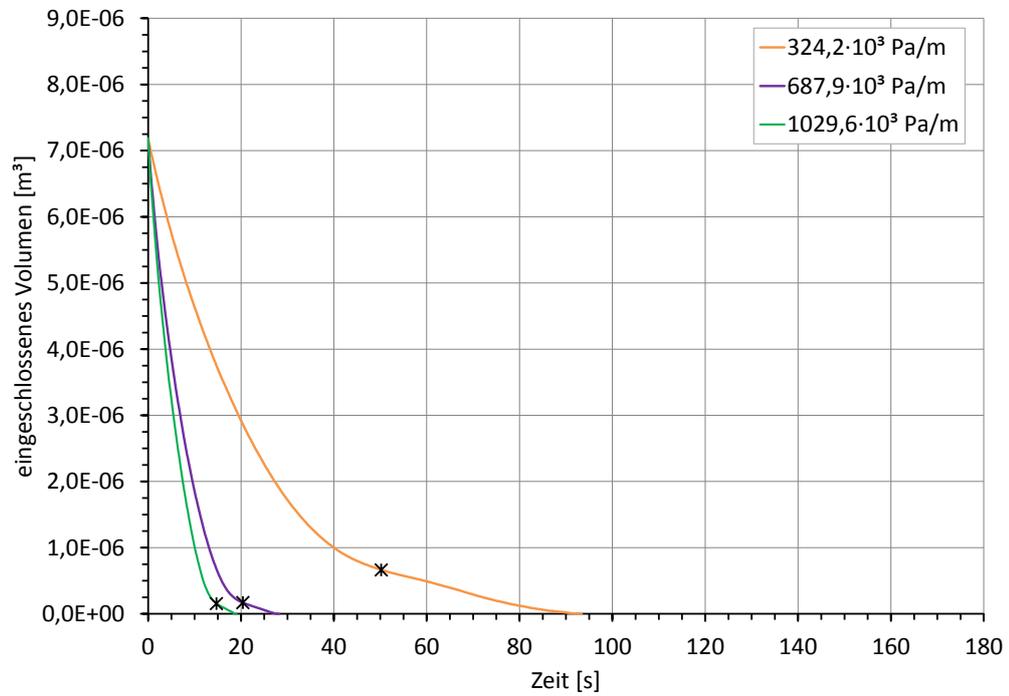


Abb. 6.19.: Volumen-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Injektionsdrucks

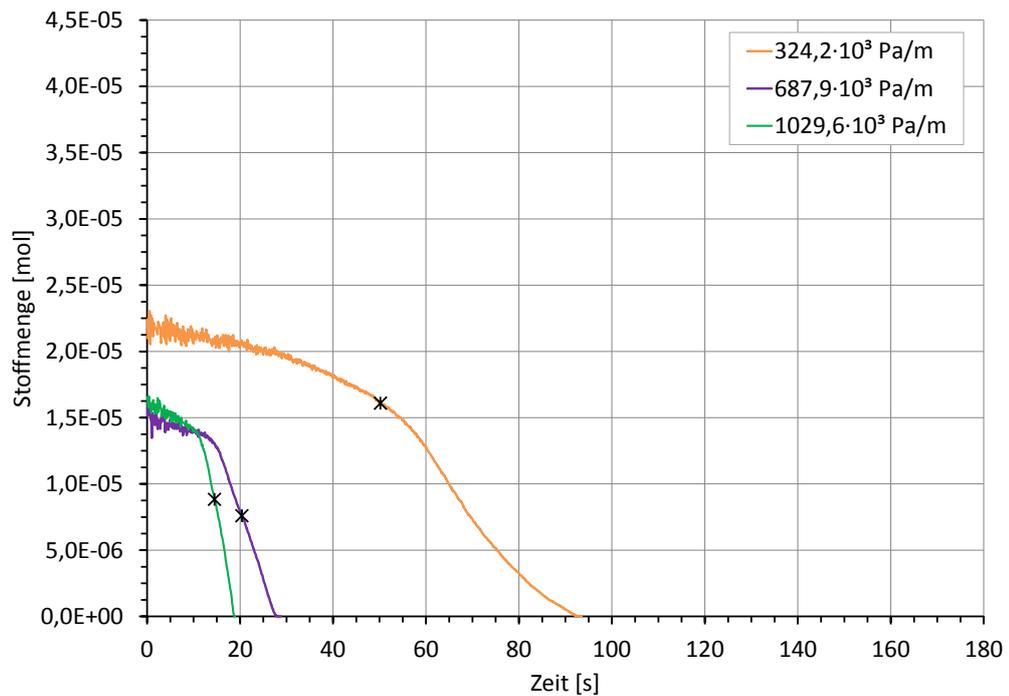


Abb. 6.20.: Stoffmenge-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Injektionsdrucks

Druckwerte unterscheiden sich jedoch, da die Dry-Spots in den jeweiligen Versuchen aufgrund der unterschiedlichen Stoffmenge bereits unterschiedlich lange komprimiert wurden. Wie schon in dem Diagramm (s. Abbildung 6.15) erkennbar sind die Kurven in zwei Bereiche einteilbar. Bis zu dem Zeitpunkt bis die Poren beginnen zu wandern, ist die Stoffmenge erneut nicht konstant. Bei den Kurven mit den Druckgradienten  $\nabla p = 687,9 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  und  $\nabla p = 1.029,6 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  ist eine deutliche Steigungsänderung in der Kurve erkennbar. Dies unterstreicht die deutlichere Ausprägung des Übergangs bei kürzeren Auflösezeiträumen des Dry-Spot. Der Übergang stimmt aber nicht überein mit dem Beginn des Porenwanderns. Aus den Videodaten ist vor dem Porenwandern kein Hinweis auf eine Änderung der Stoffmenge erkennbar.

In Abbildung 6.21 ist die durchschnittliche Porengeschwindigkeit dargestellt. Dabei steigt die Geschwindigkeit linear mit dem Druckgradienten an. Dem steht in Abbildung 6.22 die Auflösezeit des Dry-Spot gegenüber. Auffällig ist hier, dass die Auflösezeit nicht im gleichen Verhältnis abnimmt wie der Druckgradient steigt. Während der Druckgradient sich von  $\nabla p = 324,2 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  auf  $\nabla p = 687,9 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  verdoppelt, sinkt die Auflösezeit um ein Vierfaches. Der Druckgradient im letzten Versuch beträgt das 1,5-fache des zweiten Versuchs ( $\nabla p = 1.029,3 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$  zu  $\nabla p = 687,9 \cdot 10^3 \text{ Pa/m}$ ), während sich die Auflösezeit sich halbiert. Die Auflösezeit im ersten Versuch weicht aufgrund der größeren Stoffmenge ab (s. Abbildung 6.20). Wird die etwa doppelte Stoffmenge im ersten Versuch zu Beginn des Porenwanderns berücksichtigt, ergibt sich eine Auflösezeit von etwa 32 s und damit ein nahezu linearer Zusammenhang.

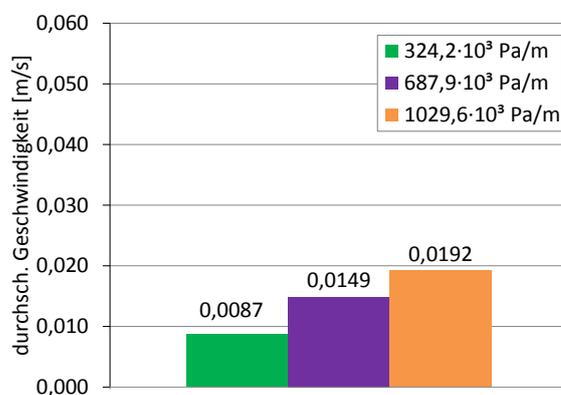


Abb. 6.21.: Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierendem Druckgradienten (Injektionsdruck)

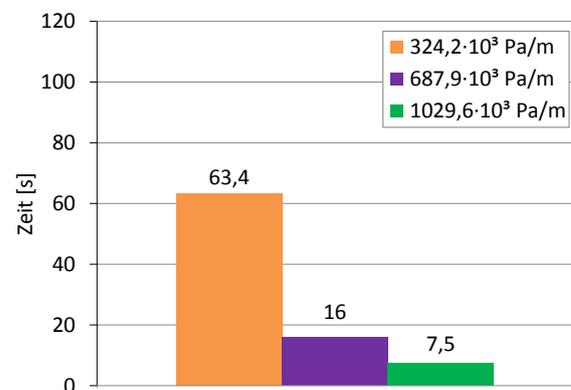


Abb. 6.22.: Auflösezeit des Dry-Spot bei variierendem Druckgradienten (Injektionsdruck)

## 6.4.2. Einfluss der Permeabilität

Die Permeabilität ist vom verwendeten Faserhalbezeug und dem Faservolumengehalt des Laminats abhängig (s. Tabelle 5.1). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Permeabilität durch Variation des FVG verändert. Mittels einer Kombination aus Dickenänderung des Abstandshalters des Werkzeugs und Lagenanzahl des Glasfasernadelvlieses wird dies umgesetzt (s. Abschnitt 4.3.2).

Die Permeabilität in Hauptflussrichtung  $K_{11}$  in der Ebene wird mit Hilfe eines DLR-internen Programms, basierend auf dem Gesetz von Darcy, ermittelt. Für die Bestimmung ist die Aufnahme einer sich zeitlich ausbreitende Fließellipse notwendig. Für die folgenden Versuche wird die Fließellipse eines Angusspunktes der ersten Injektionseinheit verwendet. In Abhängigkeit des Injektionsdrucks, der Viskosität des Fluids, des Faservolumengehalts, dem Angussdurchmesser sowie der Injektionszeit und der Länge der beiden Halbachsen der Ellipse berechnet das Programm die resultierende effektive Permeabilität  $K_{11}$ . Für die einzelnen verwendeten Faservolumengehalte ergeben sich die in Tabelle 6.5 berechneten Werte.

Faservolumengehalt $\varphi$ [%]	Permeabilität $K_{11}$ [m <sup>2</sup> ]
14,01	$5,75 \cdot 10^{-11}$
10,51	$1,41 \cdot 10^{-10}$
7,00	$2,22 \cdot 10^{-10}$
5,25	$9,64 \cdot 10^{-10}$

Tab. 6.5.: Permeabilität  $K_{11}$  in Abhängigkeit des Faservolumengehalts

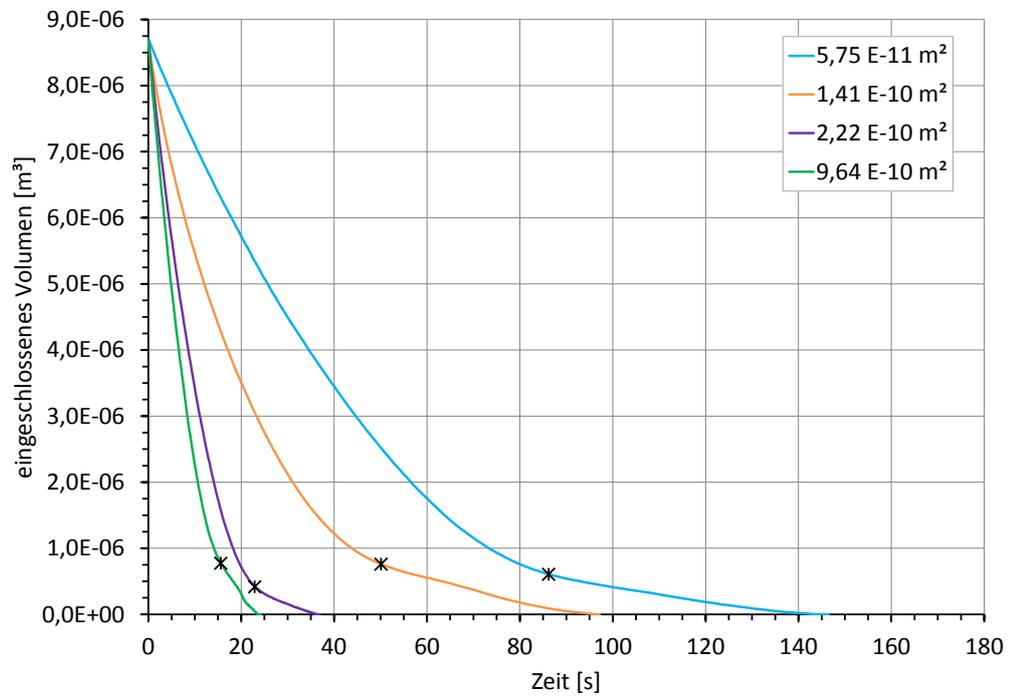
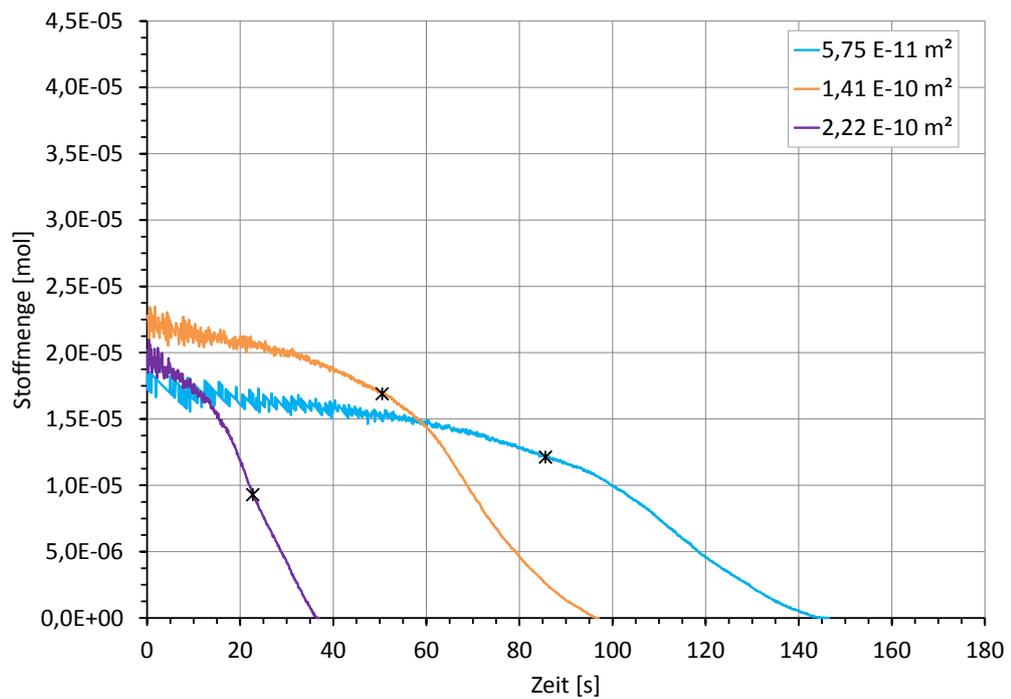
Die Tabelle zeigt, dass mit sinkendem Faservolumengehalt die Permeabilität steigt. Dabei ist die Permeabilität bei dem Faservolumengehalt von  $\varphi = 5,25$  % überproportional hoch. Sie ist kritisch zu betrachten, da zur Einstellung des geringen FVG der Abstandshalter so dick gewählt worden ist, dass Hohlräume entstanden, durch die das Fluid ohne Widerstand am Fasermaterial vorbeifließen konnte.

In Tabelle 6.6 sind die Eingabeparameter der Versuche aufgelistet, die für die weitere Auswertung verwendet werden. Das ermittelte eingeschlossene Gasvolumen ist über die Zeit für die unterschiedliche Permeabilitäten in dem dazugehörigen Diagramm in Abbildung 6.23 dargestellt.

Versuchsname	Prozessparameter	Evakuierungsdruck [bar]	Injektionsdruck [bar]	dyn. Viskosität [Pa s]	Faservolumengehalt [%]	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]
V029	Permeabilität <sub>14,01</sub>	0,01	0,9994	0,32	14,01	$5,75 \cdot 10^{-11}$
V015	Permeabilität <sub>10,51</sub>	0,01	1,0196	0,31	10,51	$1,41 \cdot 10^{-10}$
V062	Permeabilität <sub>7,00</sub>	0,01	0,9929	0,32	7,00	$2,22 \cdot 10^{-10}$
V031	Permeabilität <sub>5,25</sub>	0,01	0,9989	0,30	5,25	$9,64 \cdot 10^{-10}$

Tab. 6.6.: Versuchsplan mit variierender Permeabilität

Grundsätzlich zeigen alle Kurven den gleichen Verlauf. Die Kurven werden durch zwei Bereiche charakterisiert. Zu Beginn der Auflösezeit des Dry-Spot ist der Verlauf nahezu linear. Im zweiten Bereich der Kurve fällt die Steigung betragsmäßig im Verhältnis zum ersten Bereich ab (s.o.). Der weitere Verlauf ist ebenso näherungsweise linear. Die Markierungen in den jeweiligen Kurven kennzeichnen den Startzeitpunkt an dem sich Poren aus dem Dry-Spot lösen. Dieser Punkt markiert in etwa den Zeitpunkt ab dem sich die Steigung der Kurven ändert. Mit Ausnahme der Kurve mit einer Permeabilität von  $K_{11} = 2,22 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup> liegen die Markierungen etwa auf einer horizontalen Gerade und entsprechen somit näherungsweise dem gleichen eingeschlossenen Volumen. Wie in Tabelle 6.6 angegeben, wird bei dieser Versuchsreihe der Evakuierungsdruck bei unterschiedlicher

Abb. 6.23.: Volumen-Zeit-Diagramm bei unterschiedlicher Permeabilität  $K_{11}$ Abb. 6.24.: Stoffmenge-Zeit-Diagramm bei unterschiedlicher Permeabilität  $K_{11}$

Permeabilität konstant gehalten. Dies erklärt die gleichen Werte für das eingeschlossene Volumen. Des Weiteren ist erkennbar, dass bei sinkender Permeabilität der Auflöszeitraum des Dry-Spot steigt.

Die eingeschlossene Stoffmenge, aufgetragen über die Zeit ist für unterschiedliche Permeabilitäten in Abbildung 6.24 abgebildet. Sie ist nach Gleichung 6.2 mit dem gemessenen Druck und dem eingeschlossenen Volumen berechnet. Der Versuch mit der Permeabilität  $K_{11} = 9,64 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  ist nicht abgebildet, da sich bei diesem Versuch der Druckmessensor nicht innerhalb des Dry-Spot befunden hat. Dementsprechend ist auch nicht die korrekte Stoffmenge berechenbar. Wie in den bereits erläuterten Diagrammen, werden die dargestellten Kurven durch zwei Bereiche gekennzeichnet (s.o.). Wie auch in Abbildung 6.20 sind die Anfangswerte der Stoffmenge nahezu identisch. Dies resultiert daraus, dass der Evakuierungsdruck und somit der anliegende Druck im Dry-Spot über die Versuche nicht verändert wird. Die Kreuze markieren den Beginn des Porenwanderns. Die Stoffmenge bei Beginn des Porenwanderns unterscheidet sich bei den variierenden Permeabilitäten. Bei der Permeabilität  $K_{11} = 5,75 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$  und  $K_{11} = 1,41 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  markiert das Kreuz in etwa den Übergang zwischen Bereich eins und zwei. Dies ist bei  $K_{11} = 2,22 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  nicht der Fall. Hier ist die Markierung in etwa in der Mitte des zweiten Bereichs. Im Diagramm (s. Abbildung 6.20) tritt dies bei einem großen Druckgradienten und einem geringen Auflöszeitraum dieser Effekt ebenso auf.

In Abbildung 6.25 ist die durchschnittliche Porengeschwindigkeit bei variierender Permeabilität dargestellt. Bei abnehmender Permeabilität nimmt auch die Porengeschwindigkeit ab. Es ist kein linearer Zusammenhang erkennbar, da das Verhältnis zwischen Permeabilitätszunahme und Geschwindigkeitsabnahme nicht konstant ist. Das Diagramm in Abbildung 6.26 zeigt, dass die Auflöszeit mit sinkender Permeabilität zunimmt. Ähnlich wie bei der Porengeschwindigkeit wird hier ebenfalls kein linearer Zusammenhang ersichtlich. Auffälligkeiten sind in den beiden Diagrammen nicht erkennbar.

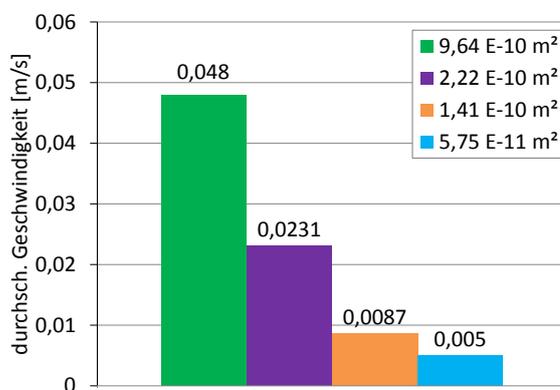


Abb. 6.25.: Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierender Permeabilität

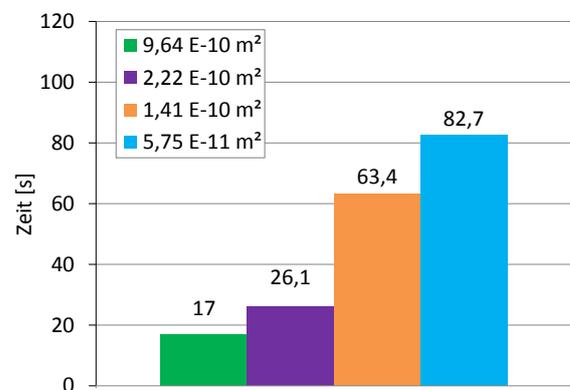


Abb. 6.26.: Auflöszeit des Dry-Spot bei variierender Permeabilität

### 6.4.3. Einfluss der Viskosität

Die Viskosität eines Fluids ist, wie in Tabelle 5.1 beschrieben, temperaturabhängig. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Viskosität durch die Wahl verschiedener Silikonöle mit unterschiedlicher Viskosität variiert. Die Temperatur entspricht bei allen Versuchen der Umgebungstemperatur und liegt im Bereich von  $23,1\text{ °C} \pm 2,1\text{ K}$ .

Die verwendeten Silikonöle werden vom Hersteller anhand ihrer kinematischen Viskosität kategorisiert. Als Parameter für die Fließsimulation sind diese jedoch nicht nutzbar, da hier nur die dynamische Viskosität als Eingabeparameter eingeht. Nach Gleichung 3.5 wird für die Umrechnung der kinematischen in die dynamische Viskosität die Dichte des Fluids benötigt. Diese steht bei den gemessenen Temperaturen (Raumtemperatur) nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wird die dynamische Viskosität mittels eines Rotationsviskosimeters bestimmt. Aufgrund der Abwärme des Viskosimeters ist hier ebenfalls erst eine Messung ab  $25\text{ °C}$  möglich. Diese Messwerte sind in Abbildung 6.27 für die unterschiedlichen Silikonöle aufgetragen. Per Extrapolation werden die benötigten Werte aus dem Diagramm für die gemessenen Temperaturen ermittelt. In Tabelle 6.7 sind die entsprechenden dynamischen Viskositäten mit den dazugehörigen Eingabeparametern aufgelistet.

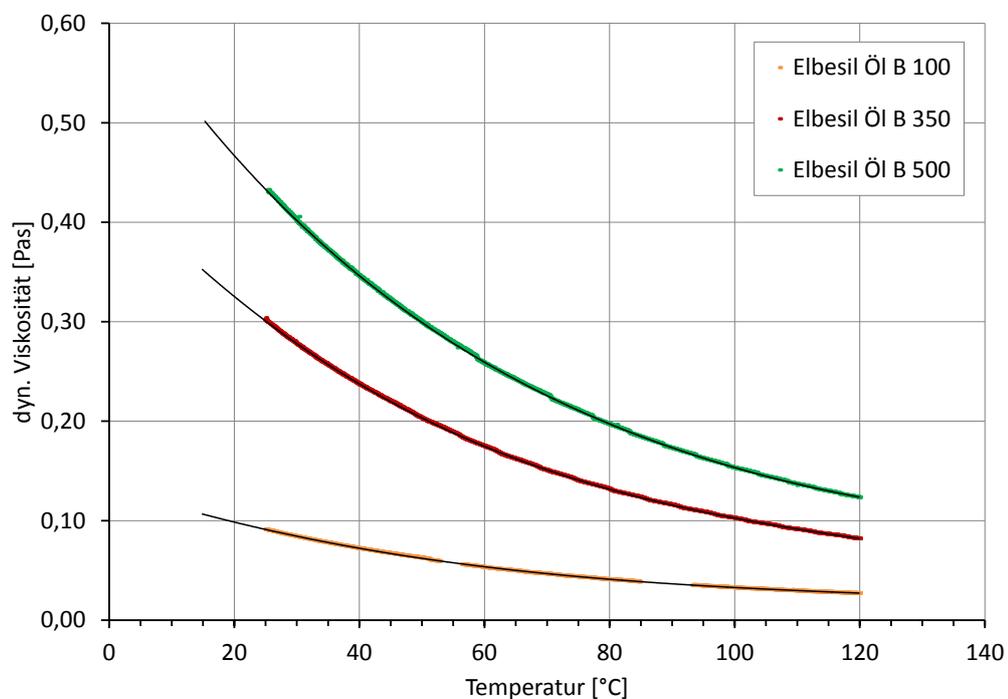


Abb. 6.27.: Verlauf variierender dynamischer Viskositäten in Abhängigkeit der Temperatur

Versuchsname	Prozessparameter	Evakuierungsdruck [bar]	Injektionsdruck [bar]	dyn. Viskosität [Pa s]	Faservolumengehalt [%]
V040	Viskosität <sub>0,09</sub>	0,01	1,0045	0,09	10,51
V015	Viskosität <sub>0,31</sub>	0,01	1,0196	0,31	10,51
V058	Viskosität <sub>0,45</sub>	0,01	0,9877	0,45	10,51

Tab. 6.7.: Versuchsplan mit variierender Viskosität

In Abbildung 6.28 ist das eingeschlossene Gasvolumen über die Zeit bei variierenden Viskositäten aufgetragen. Zum Startzeitpunkt ist das eingeschlossene Volumen der drei Kurven gleich. Erneut sind die beiden Bereiche in den Graphen erkennbar. Auch hier ist der Übergangsbereich bei einem kürzeren Auflöszeitraum deutlicher ausgeprägt. Die Kreuze markieren den Beginn des Porenwanderns. Da hier nicht der Evakuierungsdruck variiert wird, ist das Volumen zu Beginn des Porenwanderns bei den Versuchen ähnlich. Insgesamt verlängert sich der Zeitraum bis der Dry-Spot sich vollständig aufgelöst hat mit steigender Viskosität.

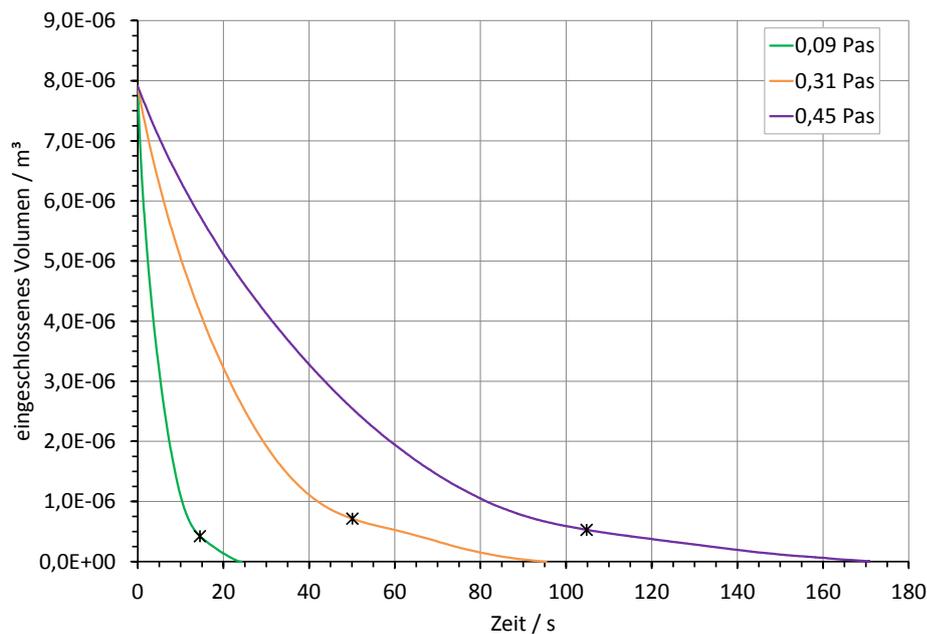


Abb. 6.28.: Volumen-Zeit-Diagramm bei variierenden Viskositäten

Abbildung 6.29 zeigt die berechnete Stoffmenge über die Zeit. Entsprechend des Diagramms in Abbildung 6.28 ist das Volumen zu Beginn gleich. Mit Ausnahme der Kurve mit einer Viskosität von  $\eta = 0,31$  Pa s sind die Anfangswerte der Stoffmenge somit gleich. Die Kurven zeigen untereinander die gleichen Verläufe und ähneln den Verläufen der zuvor beschriebenen Diagramme. Es bestehen zwei Bereiche in den Kurven. Genauso markieren die Kreuze wieder den Startzeitpunkt zu dem die Poren sich Beginnen zu lösen. Die Markierung befindet sich bei dem Versuch mit der geringsten Auflöszeit des Dry-Spot, hier bei einer Viskosität von  $\eta = 0,09$  Pa s, deutlich nach der Steigungsänderung in der Kurve.

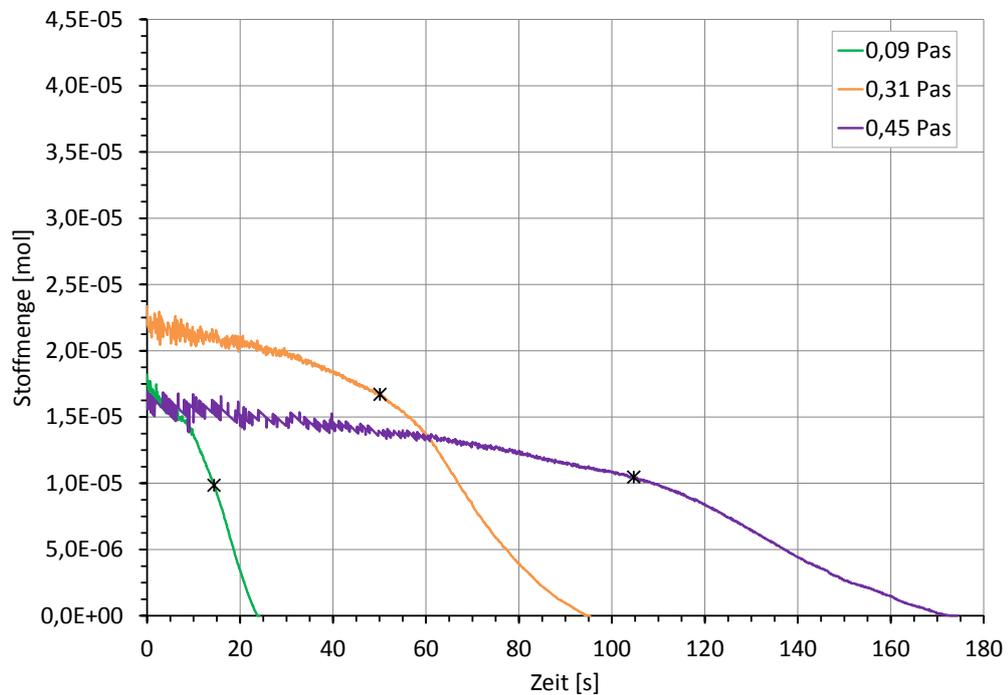


Abb. 6.29.: Stoffmenge-Zeit-Diagramm bei variierenden Viskositäten

In Abbildung 6.30 ist die durchschnittliche Porengeschwindigkeit bei unterschiedlicher Viskosität aufgetragen. Mit steigender Viskosität nimmt die Porengeschwindigkeit linear ab. Dieses Verhalten entspricht der Erwartung, da bei steigender Viskosität und identischem Druckgradienten der Widerstand für die Poren im Öl zunimmt. Da die gleiche Kraft auf die Poren wirkt, verringert sich ihre Geschwindigkeit.

Ebenso verhält sich die Auflösezeit bei unterschiedlichen Viskositäten, in Abbildung 6.31 erkennbar, linear. Hier nimmt die Auflösezeit mit steigender Viskosität zu. Der langsameren Abtransport der Poren erklärt das Verhalten.

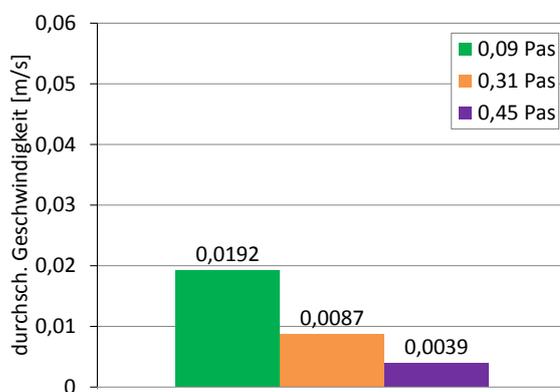


Abb. 6.30.: Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierender Viskosität

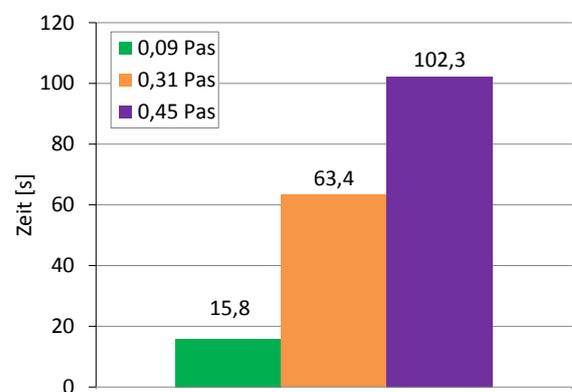


Abb. 6.31.: Auflösezeit des Dry-Spot bei variierender Viskosität

## 6.5. Allgemeine Erkenntnisse aus den Versuchsergebnissen

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse der vorangegangenen Auswertung kurz zusammengefasst.

- Trotz variierendem Druckgradienten (aufgrund des unterschiedlichen Evakuierungsdrucks) ergeben sich ähnliche Porengeschwindigkeiten. Die Auflösezeit des Dry-Spot hingegen variiert. Aufgrund der geringen Varianz des Druckgradienten ist die Aussagekraft der gezeigten Ergebnisse jedoch begrenzt.
- Mit steigendem Evakuierungsdruck steigt das Dry-Spot-Volumen bei dem die Poren beginnen sich zu lösen.
- Steigt der Druckgradient aufgrund eines höheren Injektionsdrucks, verkürzt sich der Auflösezeitraum des Dry-Spot linear. Dies deutet darauf hin, dass die Auflösung des Dry-Spot mit Hilfe des Gesetzes von Darcy erklärbar ist. Dieses beschreibt bereits einen linearen Zusammenhang zwischen Druckgradient und Fließgeschwindigkeit des Fluids.
- Die Permeabilität des Fasermaterials und die Viskosität des Öls haben, wie erwartet, entgegengesetzte Auswirkungen. Eine hohe Permeabilität oder eine geringe Viskosität haben eine verkürzte Auflösezeit des Dry-Spot und eine hohe Porengeschwindigkeit zur Folge.
- Keiner der untersuchten Eingabeparameter hat in Bezug auf die beobachteten Ausgabeparameter einen signifikant stärkeren oder schwächeren Einfluss als die übrigen Parameter. Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabegrößen ist meist nahezu linear.
- Kurz nach Entstehung des Dry-Spot zeigen sich zwischen Dry-Spot und Evakuierungsseite des Werkzeugs unterschiedlich gerichtete Druckgradienten (s. Phase 1 in Abschnitt 6.2). Deshalb dringen Fließfronten von allen Seiten in den Dry-Spot ein. Erst zum Zeitpunkt des Beginns des Porenwanderns ergibt sich ein von Dry-Spot bis zur Evakuierungsseite gleich gerichteter Druckgradient.
- Der Dry-Spot löst sich aufgrund zweier unterschiedlicher Phänomene auf. Zum einen aufgrund von Eindringen des Öls in Form einer Fließfront. Zum anderen durch Loslösen einzelner Poren aus dem Dry-Spot.
- Der Übergang zwischen beiden Phänomenen ist in den Diagrammen (Volumen-Zeit-Diagramm und Stoffmenge-Zeit-Diagramm) durch eine Steigungsänderung erkennbar. Die Steigungsänderung tritt umso stärker auf, je kürzer der Auflösezeitraum des Dry-Spot ist. So z. B. bei geringerer Viskosität, höherer Permeabilität oder größerem Druckgradienten.
- Bei Versuchen mit verhältnismäßig kurzer Auflösezeit des Dry-Spot zeigt sich nach der Berechnung der eingeschlossenen Stoffmenge, dass diese noch vor Beginn des Porenwanderns deutlich abnimmt. In der Videoanalyse zeigen sich hingegen keine Hinweise für eine vorzeitige Abnahme der Stoffmenge.
- In den Druck-Zeit-Diagrammen sind keine charakteristischen Merkmale erkennbar, die den Beginn des Porenwanderns zeitlich eindeutig kennzeichnen. Sowohl in den Volumen-Zeit-Diagrammen also auch in den Stoffmenge-Zeit-Diagrammen ist eine charakteristische Stei-

gungsänderung erkennbar. Der Zeitpunkt der Steigungsänderung stimmt jedoch nicht immer mit dem sichtbaren Beginn des Porenwanderns überein. Dies kann daraus resultieren, dass Poren bereits im Material vorhanden, aber aus der Kameraperspektive noch nicht sichtbar sind.

- Die Auflösung des Dry-Spot aufgrund des LoslöSENS von Poren beginnt zeitlich bevor der maximale Druckgradient sich eingestellt hat.
- Das Porenwandern verursacht charakteristische Druckschwankungen in der Kavität. Diese Schwankungen lassen sich sowohl an Sensoren detektieren, an denen sich die Poren vorbeibewegen, als auch (in abgeschwächter Form) an Sensoren an denen die Poren nicht unmittelbar vorbeiwandern.
- Die Amplitude der charakteristischen Druckschwankungen variiert je nach Viskosität des Öls und Permeabilität des Fasermaterials. Bei höherer Viskosität oder geringerer Permeabilität nimmt die Amplitude ab. Je weiter der Drucksensor vom Dry-Spot entfernt ist, desto geringer sind ebenfalls die Ausschläge.
- Die Poren bewegen sich nicht geradlinig durch das Fasermaterial. Trotzdem ist die Bestimmung der Porengeschwindigkeit entlang der Sensoren sinnvoll, da sie Aufschluss darüber gibt, nach welcher Zeit die Poren das Bauteil verlassen haben. Die angewandte Methode, die zeitliche Differenz des Auftretens der charakteristischen Druckschwankungen an den Sensoren zu ermitteln, bietet die Möglichkeit die Porengeschwindigkeit zu bestimmen.
- Das Porenwandern erfolgt schubweise, sodass sich ein Pulsieren beim Auflösen des Dry-Spot zeigt. Dabei wechseln sich Zeiträume, in denen sich viele Poren lösen, mit Zeiträumen, in denen sich wenige oder keine Poren lösen, ab. Statt mehrerer kleiner Poren kann auch eine große, gestreckte Pore auftreten.
- Die Druckschwankungen sind an den Sensoren bereits vor Eintreffen der Poren messbar, da ihnen aufgrund ihrer Bewegung durch das Fluid ein Bereich höheren Drucks vorangeht.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Verhalten von Dry-Spots experimentell analysiert. Außerdem wurden eine Reihe von Anpassungen an einem existierenden Versuchsstand vorgenommen um entsprechende Versuche zu ermöglichen.

Nach einer Einführung in die theoretischen Grundlagen in die Faserverbundtechnologie und LCM-Verfahren, wurde der aktuelle Stand der Technik beschrieben. Dabei wurde gezeigt, dass Gaseinschlüsse und ihre Mobilität während der Injektion eines LCM-Verfahrens eine Herausforderung darstellen, die Gegenstand aktueller Forschung ist. Die Vorteile des Einsatzes von Fließsimulationen von Injektionsprozessen, wie beispielsweise die Kostensenkung bei der Entwicklung von Bauteilen wurden genannt. Ebenso wurde gezeigt, dass das Gesetz von Darcy Grundlage vieler heutiger Fließsimulationen ist.

Die Arbeit beschreibt die Anpassung am Versuchsstand für Versuche bzgl. des Verhaltens von Dry-Spots. Dabei wurde der Versuchsstand und insbesondere das RTM-Werkzeug und die Injektionsstrategie angepasst. Die Änderungen hatten das Ziel die Automatisierbarkeit der Versuchsauswertung zu erhöhen und das Einsatzspektrum des Versuchsstands zu vergrößern. Zusätzlich sollte die Reproduzierbarkeit der Versuche verbessert werden. Die genannten Ziele wurden mit Hilfe unterschiedlicher Maßnahmen erreicht. Der Einsatz von Druckmessumformern ermöglichte die Auswertung neuer Daten aus den Versuchen, um so z. B. den erzeugten Druckgradienten überprüfen zu können. Die Integration der Druckmessumformer erforderte zusätzlich die Änderung des Beleuchtungskonzepts. Außerdem wurde die Injektionsstrategie optimiert und eine Abschirmvorrichtung mit Kamerafixierung zur Befestigung auf dem neuen Werkzeugunterbau entwickelt. Für die Injektion mit erhöhtem Druck wurde ein Druckbehälter konstruiert und integriert.

In Vorbereitung auf die Versuche wurde ein Versuchsplan erarbeitet um den Einfluss ausgewählter Parameter auf das Verhalten des Dry-Spot zu untersuchen. Die vorliegende Arbeit beschreibt anschließend die verwendeten Materialien und die Versuchsdurchführung.

In den durchgeführten Versuchen wurde mittels der entwickelten Injektionsstrategie ein Dry-Spot im Druckfeld eines RTM-Prozesses erzeugt. Die Prozessparameter Viskosität des Fluids, Permeabilität des Fasermaterials und anliegender Druckgradient in der Kavität wurden variiert und ihr Einfluss auf das Verhalten des Dry-Spot ausgewertet. Dabei standen die zeitliche Volumen- und Stoffmengenänderung des Dry-Spot sowie die Auflösezeit des Dry-Spot und die Geschwindigkeit der entstehenden Poren im Fokus.

In allen Versuchen löst sich der Dry-Spot zum einen aufgrund des Eindringens des Fluids in den Dry-Spot und zum anderen durch Loslösen einzelner Poren aus dem Dry-Spot auf. Die Auswertung der Versuche hat gezeigt, dass keiner der untersuchten Prozessparameter in Bezug auf die beobachteten Größen einen signifikant stärkeren oder schwächeren Einfluss hat als die übrigen Parameter. Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabeparametern ist meist nahezu linear, was der Anwendbarkeit des Gesetzes von Darcy entspricht. Entgegen der ursprünglichen Erwartung zeigen sich kurz nach Entstehung des Dry-Spot zwischen diesem und der Evakuierungsseite des Werkzeugs unterschiedlich gerichtete Druckgradienten. Erst zum Zeitpunkt des Beginns des Porenwanderns ergibt sich ein von Dry-Spot bis zur Evakuierungsseite gleich gerichteter Druckgradient. Das Loslösen der Poren und ihre Bewegung durch das Fluid verursachen charakteristische Druckschwankungen in der Kavität. Dies lässt sich sowohl in unmittelbarer Nähe der Poren, als auch in einiger Entfernung mittels der Drucksensoren detektieren. Das Porenwandern erfolgt schubweise. Es wechseln sich Zeiträume, in denen sich viele Poren lösen, mit Zeiträumen, in denen sich wenige oder keine Poren lösen, ab. Aufgrund ihrer Bewegung durch das Fluid geht den Poren ein Bereich höheren Drucks voran. Deshalb sind die charakteristischen Druckschwankungen bereits vor dem Eintreffen der Poren an den Sensoren messbar.

Die Versuchsergebnisse und die beschriebenen Beobachtungen sollen als Grundlage zur Validierung von Simulationen des Dry-Spot Verhaltens dienen. Die Durchführung der Simulationen und ihrer Validierung bieten sich als Inhalte für nachfolgender Arbeiten an. Das Verständnis des Verhaltens der Dry-Spots während des LCM-Verfahrens kann weiter verbessert werden, indem beispielsweise Versuche bzgl. der Wechselwirkung zwischen den Prozessparametern ausgeführt werden. Zusätzlich können der Einsatz anderer Faserhalbzeuge und höhere Faservolumengehalte sowie Versuche mit stärkerer Variation des Evakuierungsdrucks einen Beitrag dazu leisten. Um die mit Silikonöl erzeugten Versuchsergebnisse zu bestätigen, sollten Validierungsversuche mit einem in der Luft- und Raumfahrttechnik zertifizierten Harzsystem durchgeführt werden. Ein Großteil der Bestandteile des Versuchsstands ist nach den vorgenommenen Anpassungen bereits für die Nutzung im Autoklav geeignet. Im Hinblick auf die industrielle Anwendung von Drucksensoren zur Detektion des Porenwanderns ist die Untersuchung des Mindestabstands zwischen Position der Drucksensoren und mobilen Poren denkbar.

## Literaturverzeichnis

- [1] ALMEIDA, S. F. M. ; SANTOS NOGUEIRA NETO, Z. dos: Effect of void content on the strength of composite laminates. In: *Composite Structures* 28 (1994), Nr. 2, S. 139 – 148
- [2] ARBTER, R. : *Contribution to robust resin transfer molding*. Technische Hochschule ETH Zürich, 2008
- [3] AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE E.V. (HRSG.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. 3. Auflage. Vieweg und Teubner / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010
- [4] BARANDUN, G. A. ; ERMANNI, P. : Liquid composite moulding: Influence of flow front confluence angle on laminate porosity. In: *The 8th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCMS)*. Douai, France, 7 2006
- [5] BARANDUN, G. A.: *Injection strategies for liquid composite moulding processes*. Technische Hochschule ETH Zürich, 2009
- [6] BÖCKH, P. von ; SAUMWEBER, C. : *Fluidmechanik*. Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [7] BERTLING, D. : *Analyse und Simulation des Porenverhaltens im Druckfeld eines Liquid Composite Molding Prozesses*. FH Aachen, Masterarbeit, 2 2014
- [8] BICKERTON, S. ; ADVANI, S. G.: Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding processes. In: *Composites Science and Technology* 59 (1999), Nr. 15, S. 2215 – 2229
- [9] BOWLES, K. J. ; FRIMPONG, S. : Void Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite-Fiber-Reinforced Composites. In: *Journal of Composite Materials* 26 (1992), Nr. 10, S. 1487 – 1509
- [10] CHHABRA, R. P.: Non-Newtonian Fluids: An Introduction. In: KRISHNAN, J. M. (Hrsg.) ; DESHPANDE, A. P. (Hrsg.) ; KUMAR, P. B. S. (Hrsg.): *Rheology of Complex Fluids*. Springer New York, 2010, S. 3 – 34
- [11] CULLEN, R. K. ; GROVE, S. M. ; SUMMERSCALES, J. ; DHAKAL, H. N.: Flow convergence and void formation in resin-infused cored sandwich structures. In: *The 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM9)*. Montréal (Québec), Canada, 7 2008

- [12] DARCY, H. : *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris : Dalmont, 1856
- [13] DEMARÍA, C. ; RUIZ, E. ; TROCHU, F. : In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part I: Experimental results. In: *Polymer Composites* 28 (2007), Nr. 6, S. 797 – 811
- [14] DOMINGUEZ, J. ; OLIET, M. ; ALONSO, M. ; ROJO, E. ; RODRIGUEZ, F. : Structural, thermal and rheological behavior of a bio-based phenolic resin in relation to a commercial resol resin. In: *Industrial Crops and Products* 42 (2013), S. 308 – 314
- [15] EHRENSTEIN, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe - Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, 2006
- [16] ERMANNI, P. : *Composites Technologien*. Eidgenössische Hochschule Zürich, 2007
- [17] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Druckgeräte Richtlinie 97/23/EG*. Amtsblatt der EG L 181, 7 1997
- [18] FLEMMING, M. ; ZIEGMANN, G. ; ROTH, S. : *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995
- [19] FLEMMING, M. ; ZIEGMANN, G. ; ROTH, S. : *Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [20] FLEMMING, M. ; ZIEGMANN, G. ; ROTH, S. : *Faserverbundbauweisen: Halbzeuge und Bauweisen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [21] FRAYSSE, N. ; HOMSY, G. M.: An experimental study of rivulet instabilities in centrifugal spin coating of viscous Newtonian and nonNewtonian fluids. In: *Physics of Fluids* 6 (1994)
- [22] FRISHFELDS, V. ; LUNDSTRÖM, T. S. ; JAKOVICS, A. : Bubble motion through non-crimp fabrics during composites manufacturing. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39 (2008), Nr. 2, S. 243 – 251
- [23] FUCHS, H. ; ALBRECHT, W. : *Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*. 2. Auflage. Wiley-VCH Weinheim, 2012
- [24] GAUVIN, R. ; TROCHU, F. ; LEMENN, Y. ; DIALLO, L. : Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. In: *Polymer Composites* 17 (1996), Nr. 1, S. 34 – 42
- [25] GEBART, B. : Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM. In: *Journal of Composite Materials* 26 (1992), Nr. 8, S. 1100–1133

- [26] GUERDAL, Z. ; TOMASINO, A. P. ; BIGGERS, S. B.: Effects of processing induced defects on laminate response: Interlaminar tensile strength. In: *SAMPE Journal* 27 (1991), Nr. 4, S. 39 – 49
- [27] HAN, K. ; LEE, L. J.: Dry Spot Formation and Changes in Liquid Composite Molding: I – Experimental. In: *Journal of Composite Materials* 30 (1996), Nr. 13, S. 1458 – 1474
- [28] HAN, K. ; LEE, L. J. ; NAKAMURA, S. ; SHAFI, A. ; WHITE, D. : Dry Spot Formation and Changes in Liquid Composite Molding: II – Modeling and Simulation. In: *Journal of Composite Materials* 30 (1996), Nr. 13, S. 1475 – 1493
- [29] HESS, R. : *ETH - Laboratory of Composite Materials and Adaptive Structures - Research: Development of a Quality Control System and integrated Quality inspection for Liquid Composite Moulding*. <http://www.structures.ethz.ch/research/detail?id=8310>. – [Online; Stand 19. Dezember 2014]
- [30] HUANG, H. ; TALREJA, R. : Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. In: *Composites Science and Technology* 65 (2005), Nr. 13, S. 1964 – 1981
- [31] IDS IMAGING DEVELOPMENT SYSTEMS GMBH: *uEye Kamera-Handbuch*. Userhandbook, 2014
- [32] KANG, K. ; KOELLING, K. : Void transport in resin transfer molding. In: *Polymer Composites* 25 (2004), Nr. 4, S. 417 – 432
- [33] KANG, M. K. ; JUNG, J. J. ; LEE, W. I.: Analysis of resin transfer moulding process with controlled multiple gates resin injection. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31 (2000), Nr. 5, S. 407 – 422
- [34] KANG, M. K. ; LEE, W. I. ; HAHN, H. T.: Formation of microvoids during resin-transfer molding process. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000), Nr. 12 – 13, S. 2427 – 2434
- [35] KAPS, R. : *Kombinierte Prepreg- und Infusionstechnologie für integrale Faserverbundstrukturen*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2010
- [36] KICKERT, R. ; HORST, P. : *Faserverbundwerkstoffe*. Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, TU Braunschweig, 2011
- [37] KLEINEBERG, M. : *Präzisionsfertigung komplexer CFK-Profile am Beispiel Rumpfspant*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2008
- [38] KOOREVAAR, A. : How flow analysis technology improves the vacuum infusion process. In: *ACMC/SAMPE Conference on Marine Composites*. Plymouth, 9 2003
- [39] KUHLMANN, H. : *Strömungsmechanik*. Pearson Studium, 2007 (Ing Maschinenbau)

- [40] LAM, R. C. ; KARDOS, J. L.: The permeability and compressibility of aligned and cross-ply carbon fiber beds during processing of composites. In: *Polymer Engineering and Science* 31 (1991), Nr. 14, S. 1064 – 1070
- [41] LECLERC, J. S. ; RUIZ, E. : Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39 (2008), Nr. 12, S. 1859 – 1868
- [42] LEE, D. H. ; LEE, W. I. ; KANG, M. K.: Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), Nr. 16, S. 3281 – 3289
- [43] LUNDSTRÖM, S. T.: Bubble transport through constricted capillary tubes with application to resin transfer molding. In: *Polymer Composites* 17 (1996), Nr. 6, S. 770 – 779
- [44] LUNDSTRÖM, T. S.: Measurement of void collapse during resin transfer moulding. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28 (1997), Nr. 3, S. 201 – 214
- [45] LUNDSTRÖM, T. S. ; FRISHFIELDS, V. ; JAKOVICS, A. : Bubble formation and motion in non-crimp fabrics with perturbed bundle geometry. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41 (2010), Nr. 1, S. 83 – 92
- [46] MATHUR, R. ; FINK, B. K. ; ADVANI, S. : Use of Genetic Algorithms to Optimize Gate and Vent Locations for the Resin Transfer Molding Process. In: *Polymer Composites* 20 (1999), 4, Nr. 2, S. 167 – 178
- [47] MAZUMDAR, S. : *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press, 2001
- [48] MOHAN, R. V. ; SHIRES, D. R. ; TAMMA, K. K. ; NGO, N. D.: Flow channels/fiber impregnation studies for the process modeling/analysis of complex engineering structures manufactured by resin transfer molding. In: *Polymer Composites* 19 (1998), Nr. 5, S. 527 – 542
- [49] MULUGETA, E. : *Versuche zur Analyse des Porenverhaltens im Druckfeld eines Liquid Composite Molding (LCM) Prozesses*. Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, 4 2014
- [50] PARK, C. H. ; LEE, W. I.: Modeling void formation and unsaturated flow in liquid composite molding processes: a survey and review. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30 (2011), Nr. 11, S. 957 – 977
- [51] PARNAS, R. S. ; SALEM, A. J. ; SADIQ, T. A. ; WANG, H.-P. ; ADVANI, S. G.: The interaction between micro- and macro-scopic flow in RTM preforms. In: *Composite Structures* 27 (1994), Nr. 1 – 2, S. 93 – 107

- [52] PATEL, N. ; LEE, L. J.: Effects of fiber mat architecture on void formation and removal in liquid composite molding. In: *Polymer Composites* 16 (1995), Nr. 5, S. 386 – 399
- [53] PILLAI, K. M.: Modeling the Unsaturated Flow in Liquid Composite Molding Processes: A Review and Some Thoughts. In: *Journal of Composite Materials* 38 (2004), Nr. 23, S. 2097 – 2118
- [54] PRAKASH, R. : Significance of defects in the fatigue failure of carbon fibre reinforced plastics. In: *Fibre Science and Technology* 14 (1981), Nr. 3, S. 171 – 181
- [55] RÖSLER, J. ; HARDERS, H. ; BÄKER, M. : *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Vieweg und Teubner, 2008
- [56] RUIZ, E. ; ACHIM, V. ; SOUKANE, S. ; TROCHU, F. ; BRÉARD, J. : Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), Nr. 3 – 4, S. 475 – 486
- [57] SCHÜRMAN, H. : *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2007
- [58] SHAFI, V. : *Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien*. Kaiserslautern : Universität Kaiserslautern, 1996
- [59] SIGLOCH, H. : *Technische Fluidmechanik*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- [60] SMITH, R. A.: Composite defects and their detection. In: *Materials Science and Engineering* 3 (2009), S. 103 – 143
- [61] SUMMERSCALES, J. : Manufacturing defects in fibre-reinforced plastics composites. In: *Non-Destructive Testing Condition Monitoring* 36 (1994), Nr. 12, S. 936 – 942
- [62] TONG, L. ; MOURITZ, A. ; BANNISTER, M. : *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. Elsevier, 2002
- [63] WEIGAND, B. ; KÖHLER, J. ; WOLFERSDORF, J. von: *Thermodynamik kompakt*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- [64] WITTEN, E. ; JAHN, B. : *Composites-Marktbericht 2011: Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Chancen*. Industrievereinigung verstärkter Kunststoffe, 9 2011
- [65] YOUNG, W. B. ; FONG, K. ; HAN, L. H. ; LEE, L. J.: Flow simulation in molds with preplaced fiber mats. In: *Polymer Composites* 12 (1991), Nr. 6, S. 391 – 403
- [66] ZHU, H. ; LI, D. ; ZHANG, D. ; WU, B. ; CHEN, Y. : Influence of voids on interlaminar shear strength of carbon/epoxy fabric laminates. In: *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 19 (2009), S. 470 – 475

- [67] ZHU, J. ; WEI, S. ; YADAV, A. ; GUO, Z. : Rheological behaviors and electrical conductivity of epoxy resin nanocomposites suspended with in-situ stabilized carbon nanofibers. In: *Polymer* 51 (2010), Nr. 12, S. 2643 – 2651

# Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

## Tabellen

Tab. 2.1	Werkstoffkennwerte der verschiedenen Glasfaserarten [3], [15] . . . . .	4
Tab. 4.1	Faservolumengehalt in Abhängigkeit der Vlieslagenanzahl und Abstandshalterdicke	26
Tab. 5.1	Prozessparameter mit den dazugehörigen Stellgrößen . . . . .	36
Tab. 5.2	Versuchsplan . . . . .	37
Tab. 6.1	Eingabeparameter der Versuche zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit . . . . .	46
Tab. 6.2	Druckgradient $\nabla p$ in Abhängigkeit des Injektions- und Evakuierungsdrucks . . . . .	57
Tab. 6.3	Versuchsplan mit variierendem Evakuierungsdruck . . . . .	58
Tab. 6.4	Versuchsplan mit variierendem Injektionsdruck . . . . .	63
Tab. 6.5	Permeabilität $K_{11}$ in Abhängigkeit des Faservolumengehalts . . . . .	66
Tab. 6.6	Versuchsplan mit variierender Permeabilität . . . . .	66
Tab. 6.7	Versuchsplan mit variierender Viskosität . . . . .	70
Tab. A.1	Gewicht von 7 Vliesproben (je 4 Lagen Vlies, $A = 5.625 \text{ mm}^2$ ) . . . . .	86
Tab. A.2	Auswertbare Versuche; Versuche mit bester Erfüllung der Kriterien (s. Kapitel 6.4) sind markiert . . . . .	87

## Abbildungen

Abb. 2.1	Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von Glasfasern nach [18], [23]	4
Abb. 2.2	Typische Bindungsarten von Fasergeweben [20] . . . . .	6
Abb. 2.3	LCM-Verfahren: Vorbereitung, Preforming, Harzinjektion, Aushärtung, Entformen [16]. . . . .	7
Abb. 2.4	SLI-Verfahren [35] . . . . .	9
Abb. 2.5	RTM-Verfahren [37] . . . . .	9
Abb. 2.6	Kategorien der Tränkungsstrategien . . . . .	10

Abb. 3.1	Dry-Spots im ausgehärteten Faserverbundbauteil (Ausschnitt Flügelvorderkante) [29] . . . . .	12
Abb. 3.2	Entstehung von Dry-Spots aufgrund von zusammenlaufenden Fließfronten nach [5] . . . . .	12
Abb. 3.3	Vergleich von simultaner und progressiver Injektion nach [33] . . . . .	13
Abb. 3.4	Schematische Darstellung eines Ausschnitts eines Faserhalbzeugs mit „Dual-Scale“ Porosität [50] . . . . .	14
Abb. 3.5	Schematische Darstellung der Auswirkung von niedrigen und hohen Fließgeschwindigkeit nach [56] . . . . .	14
Abb. 3.6	Anteil Mikro- und Makroporen in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der Kapillarzahl nach [41] . . . . .	15
Abb. 3.7	Ausbreitungsarten von Fließfronten . . . . .	19
Abb. 3.8	Viskositätsverlauf von Epoxidharzsystemen bei unterschiedlichen Temperaturen nach [62] . . . . .	20
Abb. 4.1	Ablaufdarstellung der angepassten Injektionsstrategie . . . . .	22
Abb. 4.2	RTM-Werkzeug . . . . .	23
Abb. 4.3	Gruppierung der Angusspunkte in Injektionseinheiten . . . . .	24
Abb. 4.4	Positionen der Drucksensoren (So-S7) auf der Aluminiumplatte . . . . .	27
Abb. 4.5	Schematische Darstellung der Befestigung der Drucksensoren an der Aluminiumplatte . . . . .	28
Abb. 4.6	Versuchsstand . . . . .	29
Abb. 4.7	Schematische Darstellung des Druckbehälters . . . . .	30
Abb. 4.8	Schematische Darstellung des Kameragehäuses . . . . .	31
Abb. 4.9	Abschirmvorrichtung aus MDF-Platten . . . . .	33
Abb. 4.10	Faserwinkeldetektion unterschiedlicher Materialien . . . . .	34
Abb. 4.11	Ergebnis des Transparenzversuchs; Vlies der Fa. <i>Sahlberg</i> (2. v. l.) erreicht die beste Transparenz . . . . .	35
Abb. 5.1	Werkzeugaufbau . . . . .	39
Abb. 6.1	Exemplarisches Diagramm zur Berechnung der Porengeschwindigkeit im getränkten Fasermaterial . . . . .	44
Abb. 6.2	Vergleich der Form und Position der Dry-Spots bei drei Versuchen mit ident. Eingabeparametern . . . . .	45
Abb. 6.3	Vergleich der Druckmesskurven des Sensor 0 von drei Versuchen mit ident. Eingabeparametern . . . . .	46
Abb. 6.4	Versuchsablauf . . . . .	48
Abb. 6.5	Druck-Zeit-Diagramm für den Versuch Vo26 . . . . .	49
Abb. 6.6	Schematische Darstellung des Druckgradienten in drei unterschiedlichen Phasen des Versuchs . . . . .	50
Abb. 6.7	Druck-Zeit-Diagramm von Sensor 5 bei einem FVG $\varphi = 5,25\%$ . . . . .	52
Abb. 6.8	Porenwandern bei Auflösung des Dry-Spot . . . . .	53
Abb. 6.9	Druck-Zeit-Diagramm von Sensor 5 bei einem FVG $\varphi = 10,51\%$ . . . . .	54

Abb. 6.10 Fließverhalten des Öls nach Öffnung der Angüsse auf der linken Seite (Injektionsseinheit 3) . . . . .	54
Abb. 6.11 Fließverhalten des Öls bei Erreichen eines weiteren Angusspunktes . . . . .	55
Abb. 6.12 Fließsimulation der Matrix mit integrierten Angussstutzen . . . . .	56
Abb. 6.13 Exemplarisches Diagramm zur Berechnung des Druckgradienten . . . . .	58
Abb. 6.14 Volumen-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Evakuierungsdrucks . . . . .	59
Abb. 6.15 Stoffmenge-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Evakuierungsdrucks . . . . .	60
Abb. 6.16 Darstellung des Stoffmenge-Zeit-Diagramms nach Korrektur der Stoffmenge . . .	61
Abb. 6.17 Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierendem Druckgradienten (Evakuierungsdruck) . . . . .	62
Abb. 6.18 Auflösezeit des Dry-Spot bei variierendem Druckgradienten (Evakuierungsdruck)	62
Abb. 6.19 Volumen-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Injektionsdrucks . . . . .	64
Abb. 6.20 Stoffmenge-Zeit-Diagramm in Abhängigkeit des Druckgradienten durch Variation des Injektionsdrucks . . . . .	64
Abb. 6.21 Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierendem Druckgradienten (Injektionsdruck) . . . . .	65
Abb. 6.22 Auflösezeit des Dry-Spot bei variierendem Druckgradienten (Injektionsdruck) . .	65
Abb. 6.23 Volumen-Zeit-Diagramm bei unterschiedlicher Permeabilität $K_{11}$ . . . . .	67
Abb. 6.24 Stoffmenge-Zeit-Diagramm bei unterschiedlicher Permeabilität $K_{11}$ . . . . .	67
Abb. 6.25 Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierender Permeabilität . . . . .	68
Abb. 6.26 Auflösezeit des Dry-Spot bei variierender Permeabilität . . . . .	68
Abb. 6.27 Verlauf variierender dynamischer Viskositäten in Abhängigkeit der Temperatur .	69
Abb. 6.28 Volumen-Zeit-Diagramm bei variierenden Viskositäten . . . . .	70
Abb. 6.29 Stoffmenge-Zeit-Diagramm bei variierenden Viskositäten . . . . .	71
Abb. 6.30 Durchsch. Porengeschwindigkeit bei variierender Viskosität . . . . .	71
Abb. 6.31 Auflösezeit des Dry-Spot bei variierender Viskosität . . . . .	71
Abb. A.1 Druckprüfung des Vlieses - Abstandshalterdicke über Druck . . . . .	88
Abb. A.2 Druckprüfung des Vlieses - Faservolumengehalt über Druck . . . . .	88
Abb. A.3 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo15 . . . . .	89
Abb. A.4 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo20 . . . . .	89
Abb. A.5 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo29 . . . . .	90
Abb. A.6 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo62 . . . . .	90
Abb. A.7 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo31 . . . . .	91
Abb. A.8 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo35 . . . . .	91
Abb. A.9 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo36 . . . . .	92
Abb. A.10 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo40 . . . . .	92
Abb. A.11 Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo58 . . . . .	93
Abb. A.12 Deckel der Abschirmvorrichtung . . . . .	95
Abb. A.13 Bodenplatte der Abschirmvorrichtung . . . . .	96

Abb. A.14 kurze Seitenwand der Abschirmvorrichtung . . . . . 97

Abb. A.15 lange Seitenwand der Abschirmvorrichtung . . . . . 98

Abb. A.16 Abstandshalter für das Werkzeug . . . . . 99

Abb. A.17 Behälter für den Druckbehälter . . . . . 100

Abb. A.18 Obere Platte für den Druckbehälter . . . . . 101

Abb. A.19 Untere Platte für den Druckbehälter . . . . . 102

Abb. A.20 Oberer *PTFE*-Stutzen für den Druckbehälter . . . . . 103

Abb. A.21 Unterer *PTFE*-Stutzen für den Druckbehälter . . . . . 104

Abb. A.22 Aluminiumplatte für das RTM-Werkzeug . . . . . 105

Abb. A.23 Hülse für den Druckmessumformer . . . . . 106

Abb. A.24 Kameraeinstellungen – Teil 1 . . . . . 107

Abb. A.25 Kameraeinstellungen – Teil 2 . . . . . 108

Abb. A.26 Kameraeinstellungen – Teil 3 . . . . . 109

# A Anhang

## A.1. Tabellen

Probe	Gewicht g
1	12,0535
2	12,7227
3	12,7456
4	12,2817
5	12,3253
6	11,4538
7	12,4612

Tab. A.1.: Gewicht von 7 Vliesproben (je 4 Lagen Vlies,  $A = 5.625 \text{ mm}^2$ )

Versuche	Vakuumdruck [bar]	Injektionsdruck [bar]	Temperatur [°C]	rel. Feuchte [%]	dyn. Viskosität [N/(m <sup>2</sup> s)]	Faservolumengehalt [%]
→	0,01	1,0203	22,8	56,8	0,31	10,51
	0,01	1,0196	23,6	54,9	0,31	10,51
	0,01	1,0036	23,6	51,1	0,31	10,51
→	0,02	0,9950	22,1	51,9	0,32	10,51
	0,02	0,9946	23,2	53,3	0,31	10,51
	0,02	0,9977	23,9	58,3	0,31	10,51
→	0,03	1,0063	23,8	53,7	0,31	10,51
	0,03	1,0066	23,7	53,9	0,31	10,51
	0,03	1,0069	23,7	54,6	0,31	10,51
→	0,01	0,9977	22,5	58,0	0,31	14,01
	0,01	0,9994	21,5	57,8	0,32	14,01
	0,01	0,9996	22,8	57,9	0,31	14,01
→	0,01	0,9929	21,0	44,8	0,32	7,00
	0,01	0,9937	21,5	43,2	0,32	7,00
→	0,01	0,9989	25,2	52,2	0,30	5,25
	0,01	1,9992	22,4	51,2	0,31	10,51
	0,01	1,9992	23,5	51,4	0,31	10,51
→	0,01	1,9973	22,8	49,5	0,31	10,51
→	0,01	2,9956	23,3	49,7	0,31	10,51
	0,01	2,9966	23,6	50,4	0,31	10,51
→	0,01	1,0045	23,4	53,4	0,09	10,51
	0,01	1,0132	22,7	46,7	0,09	10,51
	0,01	0,9956	22,7	54,2	0,09	10,51
	0,01	0,9915	22,2	44,9	0,09	10,51
→	0,01	1,0133	23,0	44,4	0,45	10,51
	0,01	0,9877	22,9	45,2	0,45	10,51
	0,01	0,9903	21,5	48,2	0,46	10,51

Tab. A.2.: Auswertbare Versuche; Versuche mit bester Erfüllung der Kriterien (s. Kapitel 6.4) sind markiert

## A.2. Diagramme

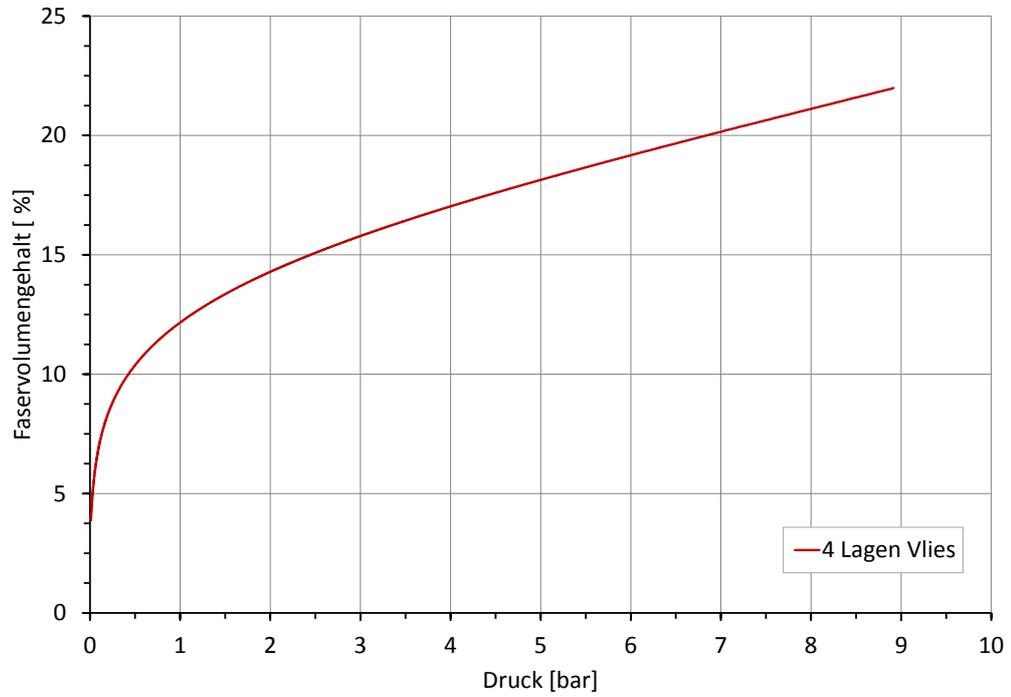


Abb. A.1.: Druckprüfung des Vlieses - Abstandshalterdicke über Druck

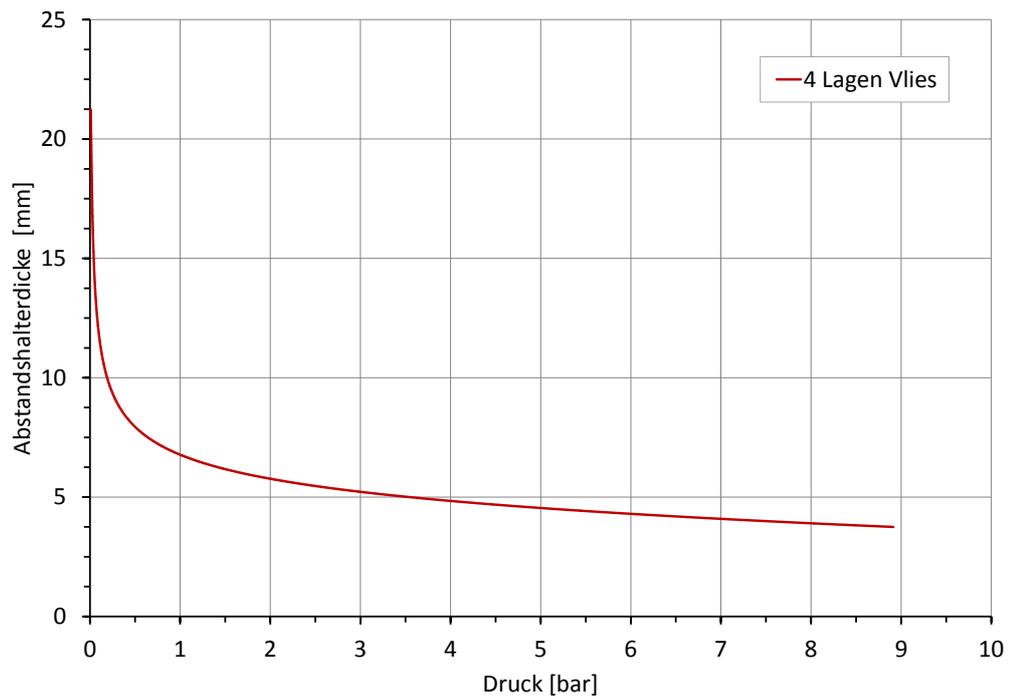


Abb. A.2.: Druckprüfung des Vlieses - Faservolumengehalt über Druck

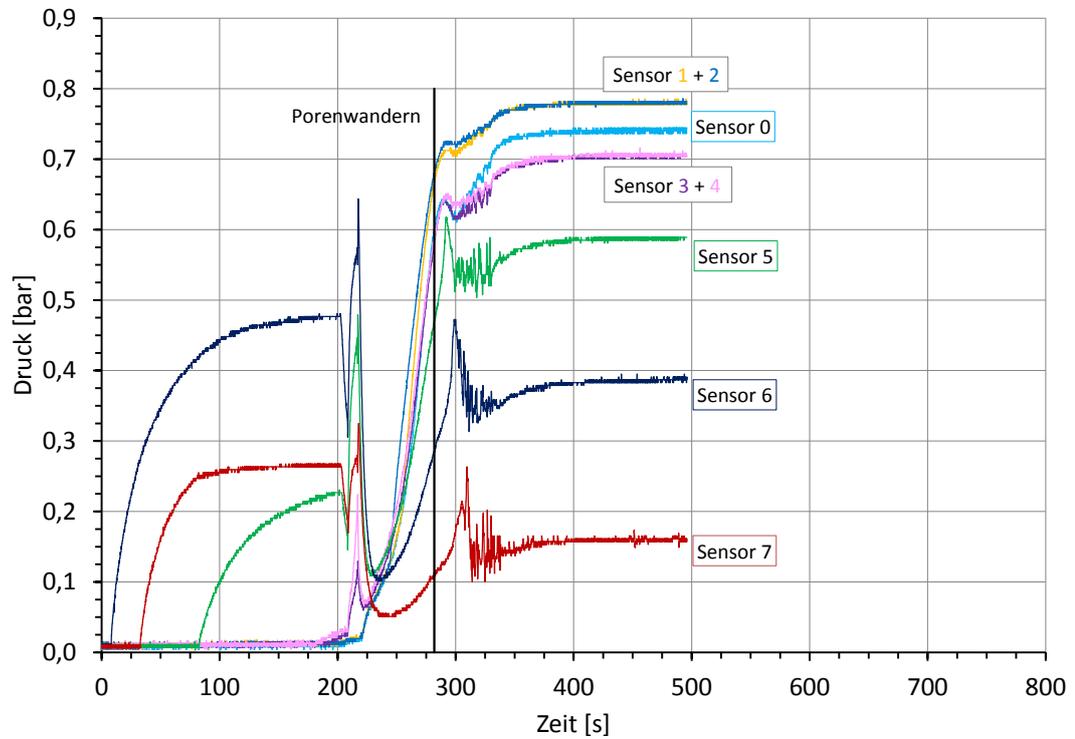


Abb. A.3.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo15; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmen

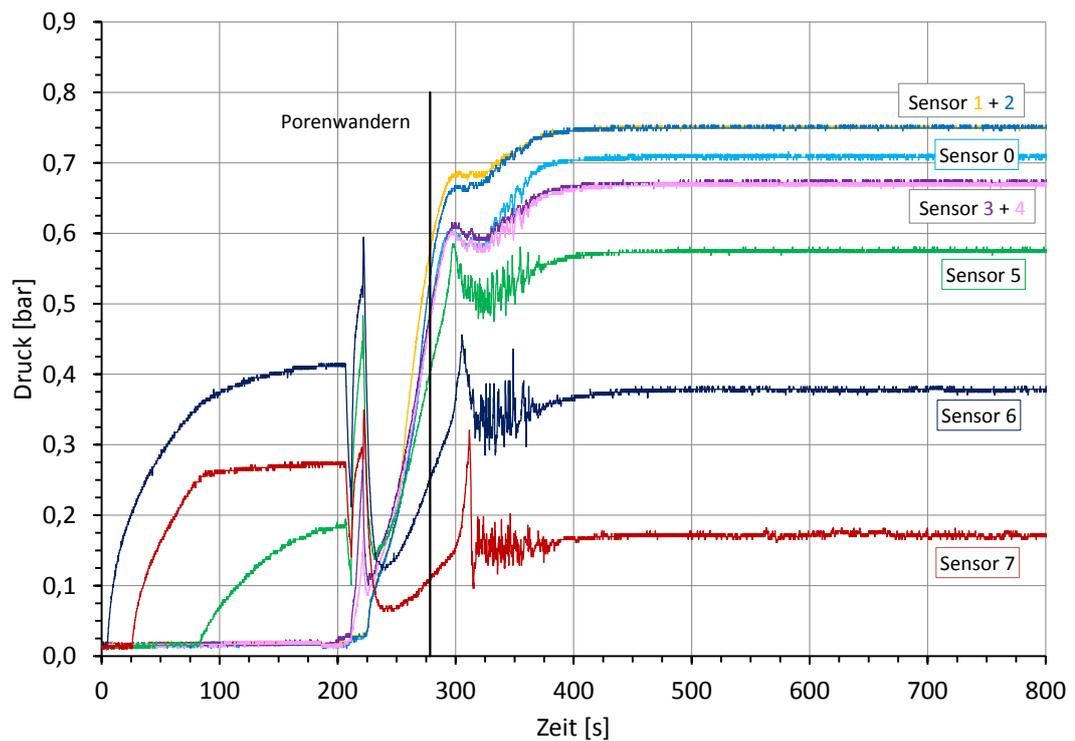
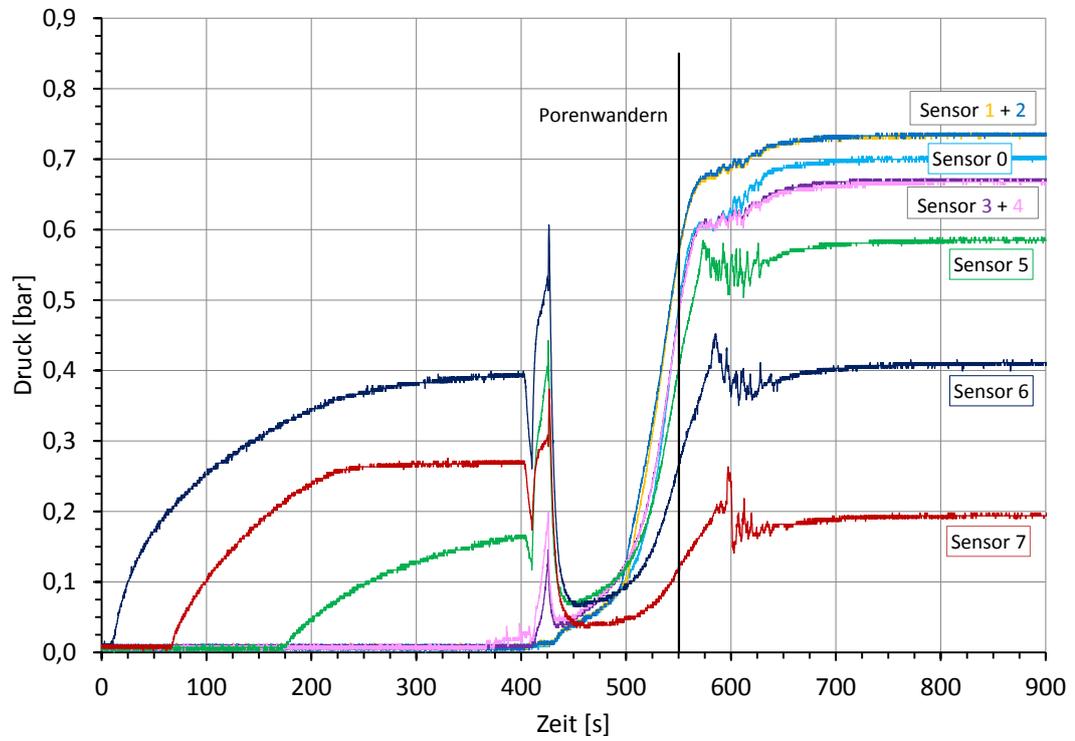
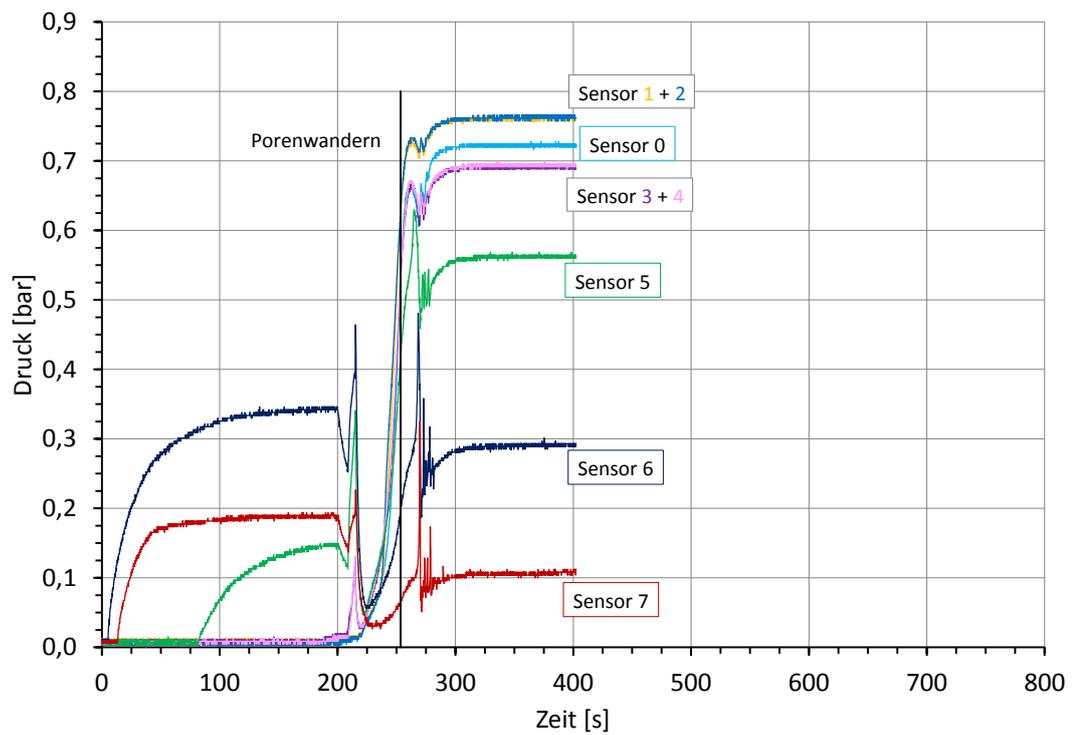


Abb. A.4.: Druck-Zeit-Diagramm von Versuch Vo20; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmen

Abb. A.5.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo<sub>29</sub>; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmenAbb. A.6.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo<sub>62</sub>; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmen

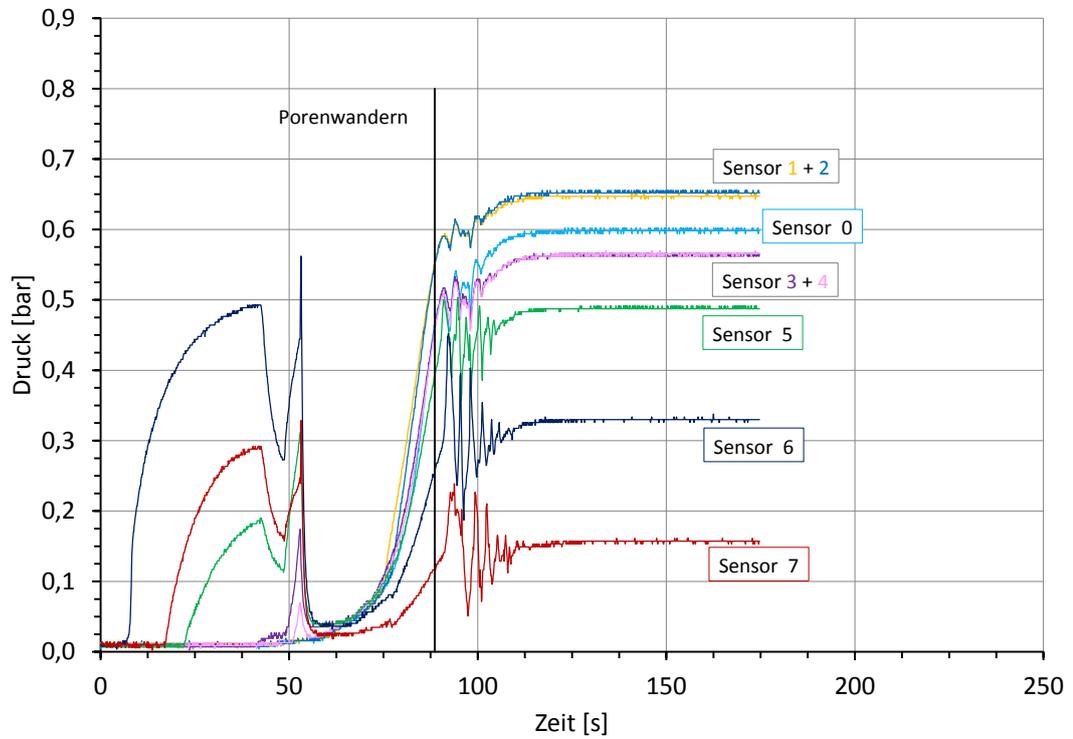


Abb. A.7.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo31; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmen

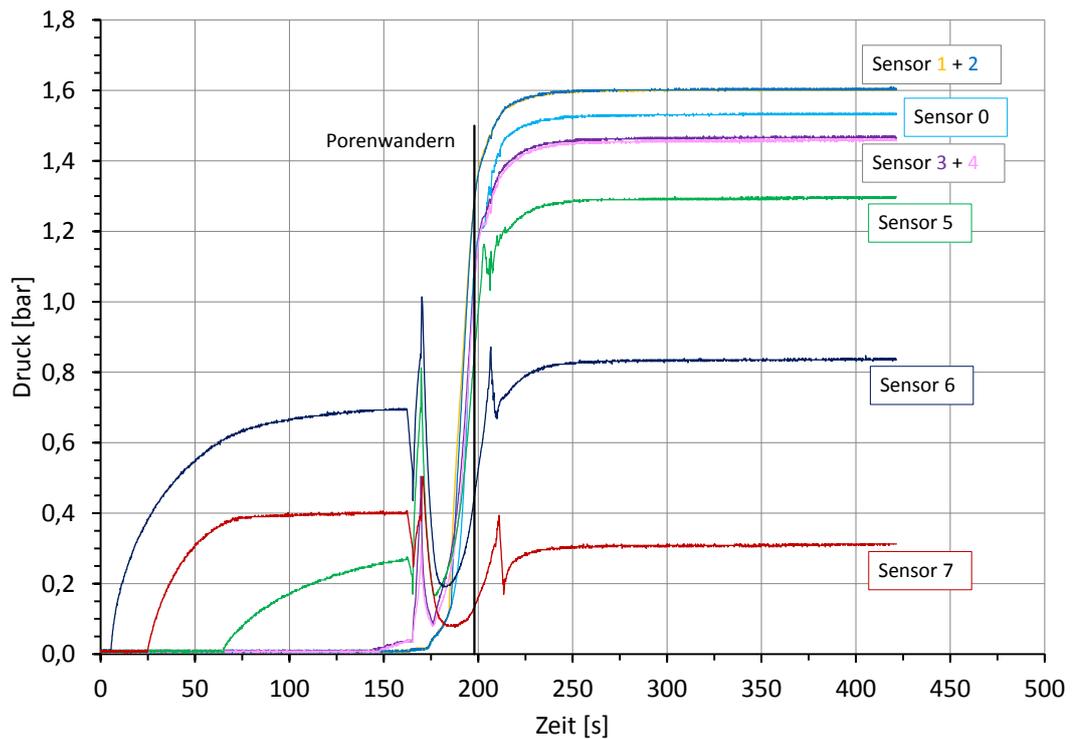
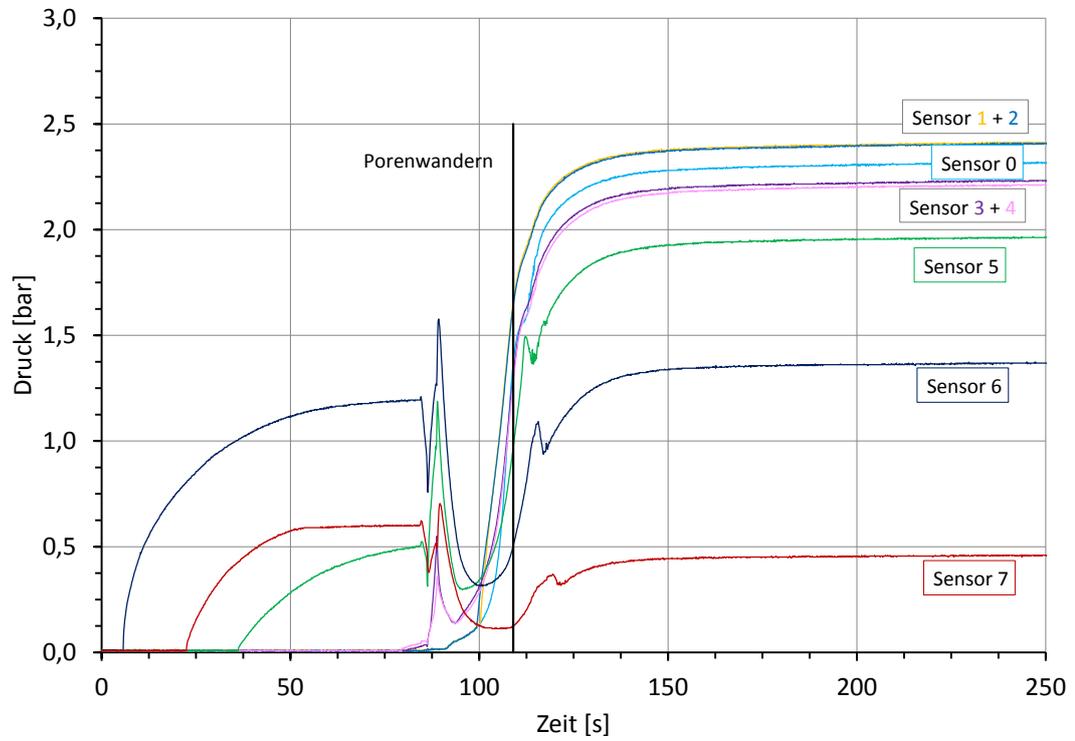
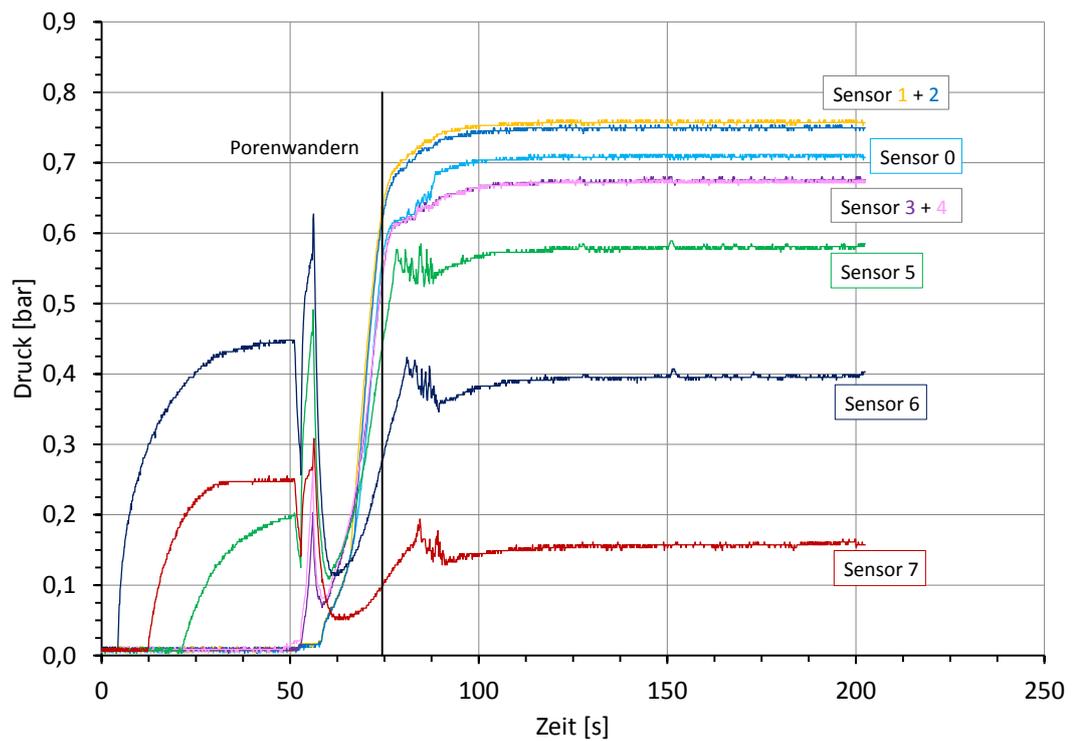


Abb. A.8.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo35; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmen

Abb. A.9.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo<sub>36</sub>; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmenAbb. A.10.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo<sub>40</sub>; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmen

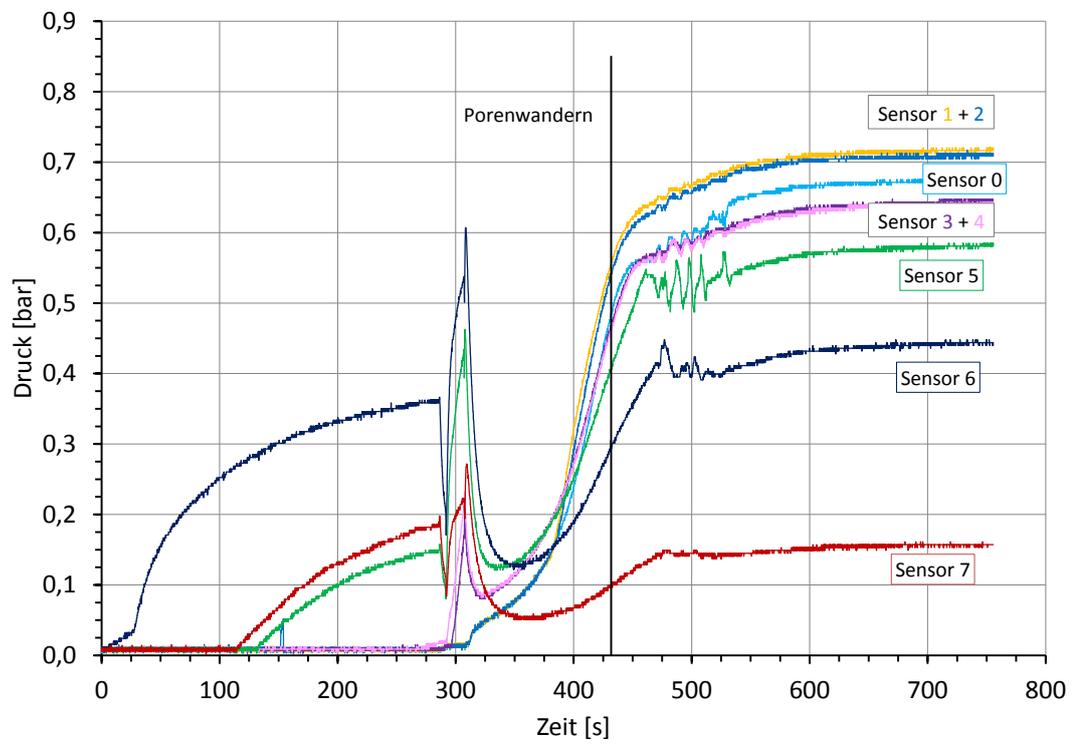


Abb. A.11.: Druck-Zeit-Diagramm von Vo58; Eingabeparameter sind Tab. A.2 zu entnehmen

### **A.3. Technische Zeichnungen**

Die folgenden technischen Zeichnungen dienen lediglich zur Übersicht, da die Angaben des jeweiligen Maßstabs nicht korrekt sind. Auf der beiliegenden Daten-DVD befinden sich die Zeichnungen in Originalgröße.

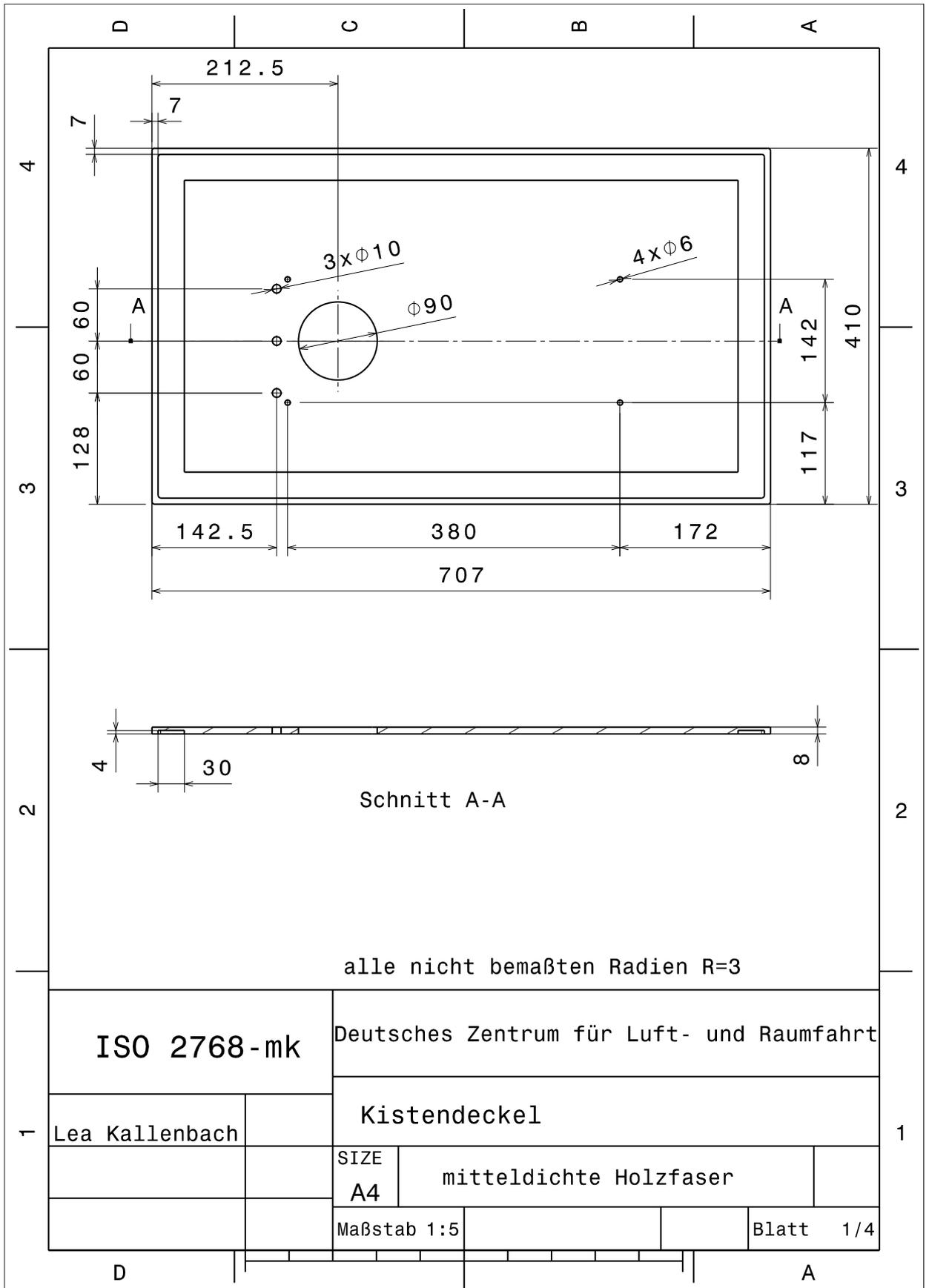


Abb. A.12.: Deckel der Abschirmvorrichtung

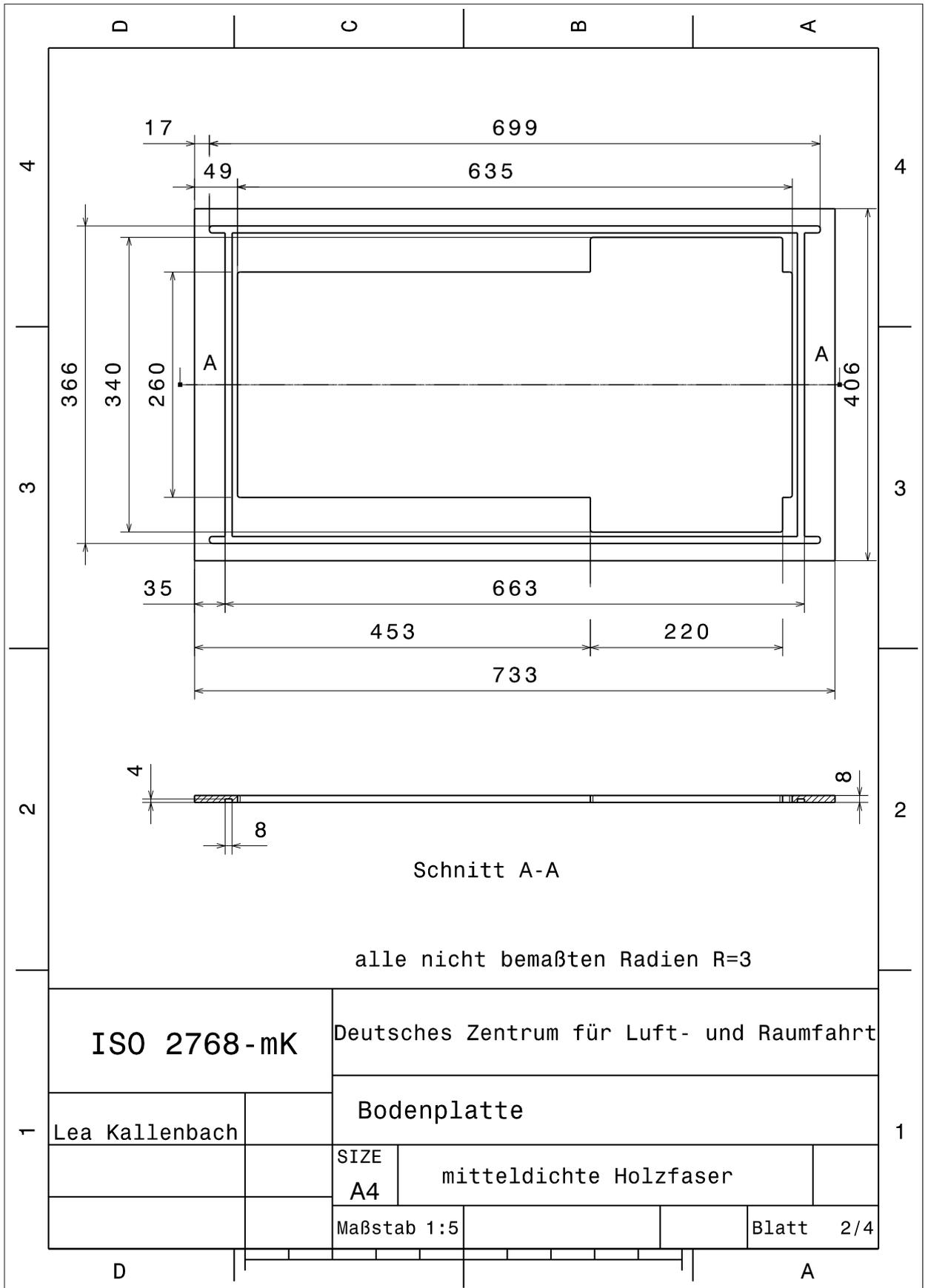


Abb. A.13.: Bodenplatte der Abschirmvorrichtung

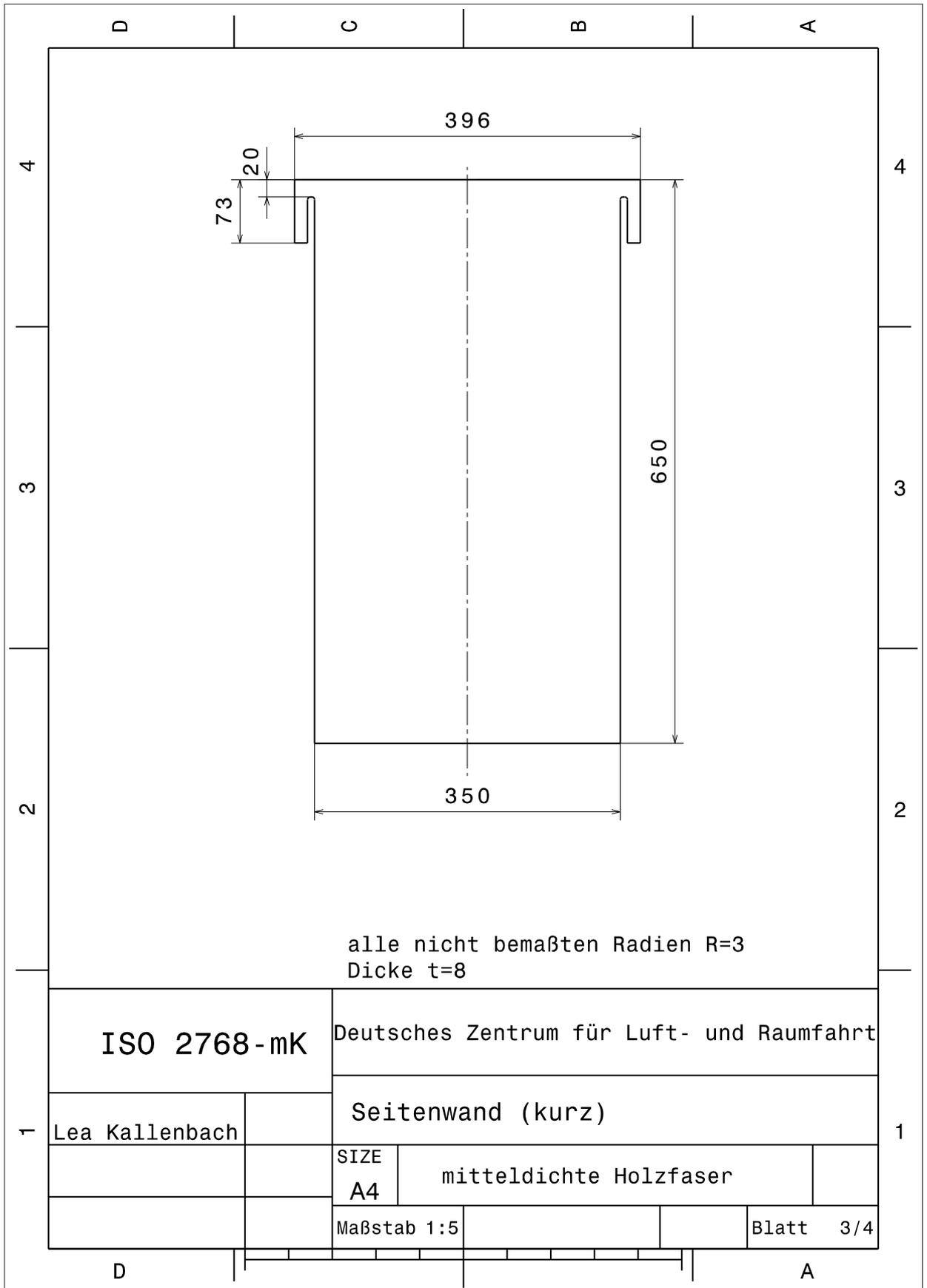


Abb. A.14.: kurze Seitenwand der Abschirmvorrichtung

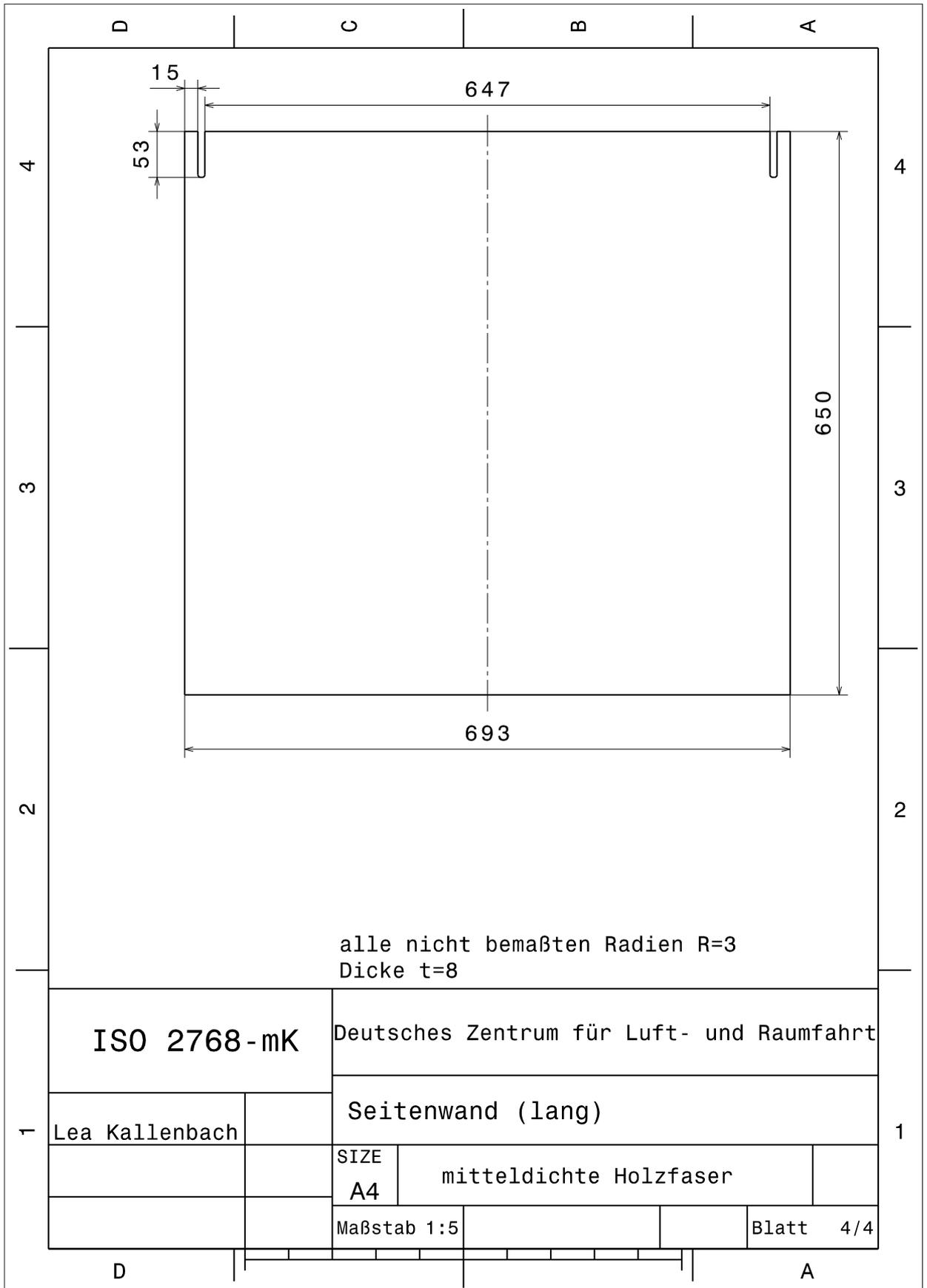


Abb. A.15.: lange Seitenwand der Abschirmvorrichtung

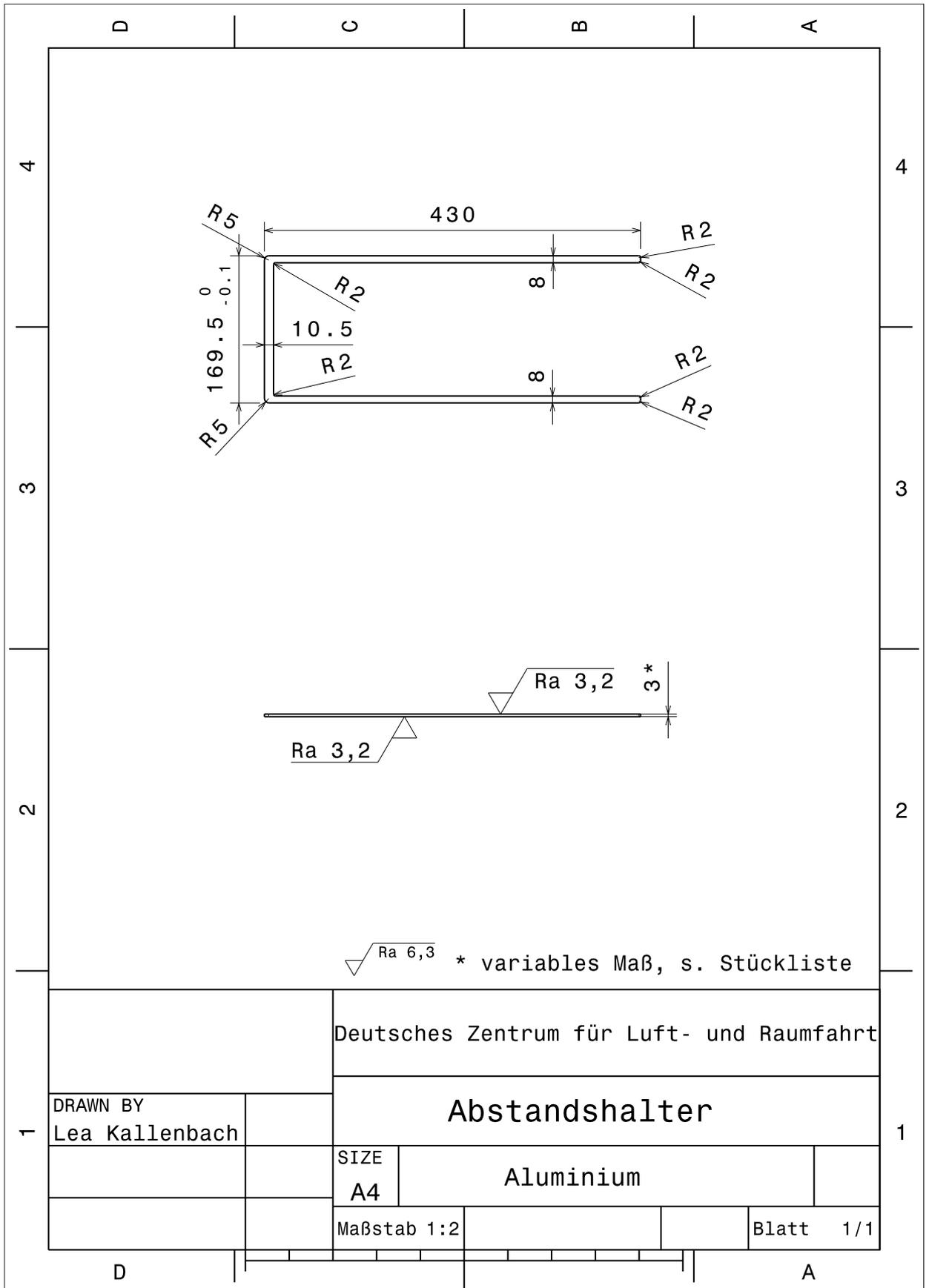


Abb. A.16.: Abstandshalter für das Werkzeug

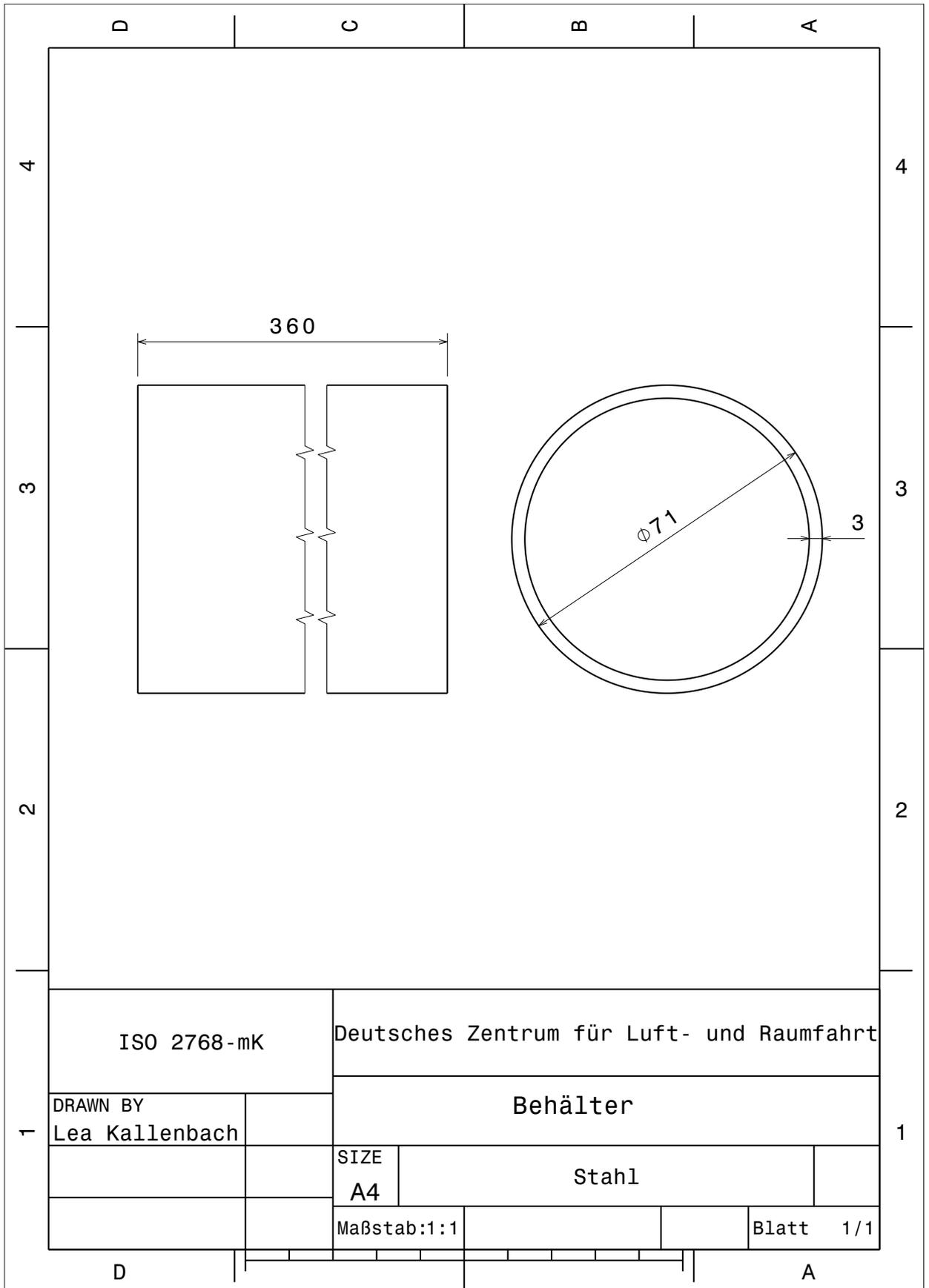


Abb. A.17.: Behälter für den Druckbehälter

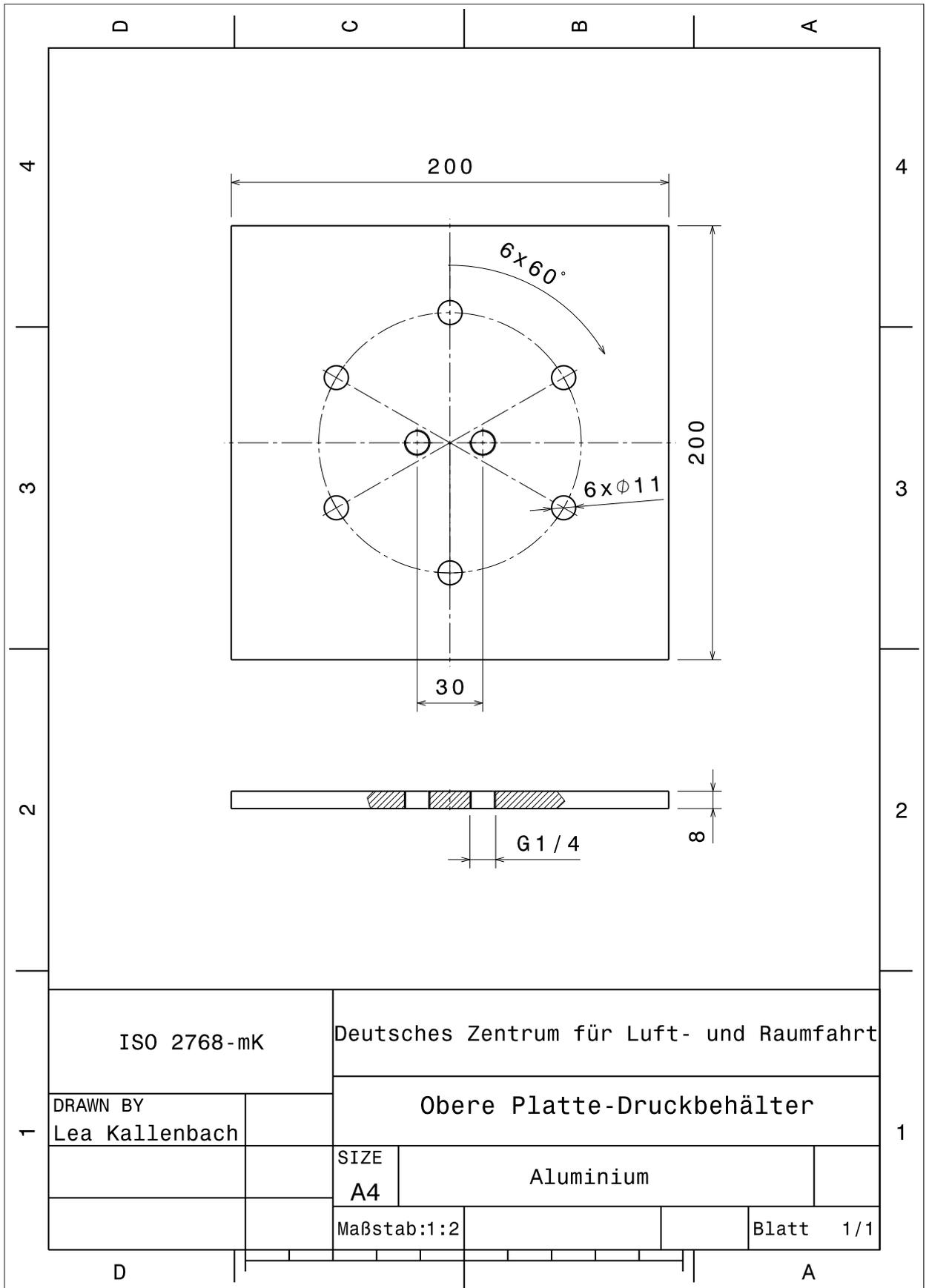


Abb. A.18.: Obere Platte für den Druckbehälter

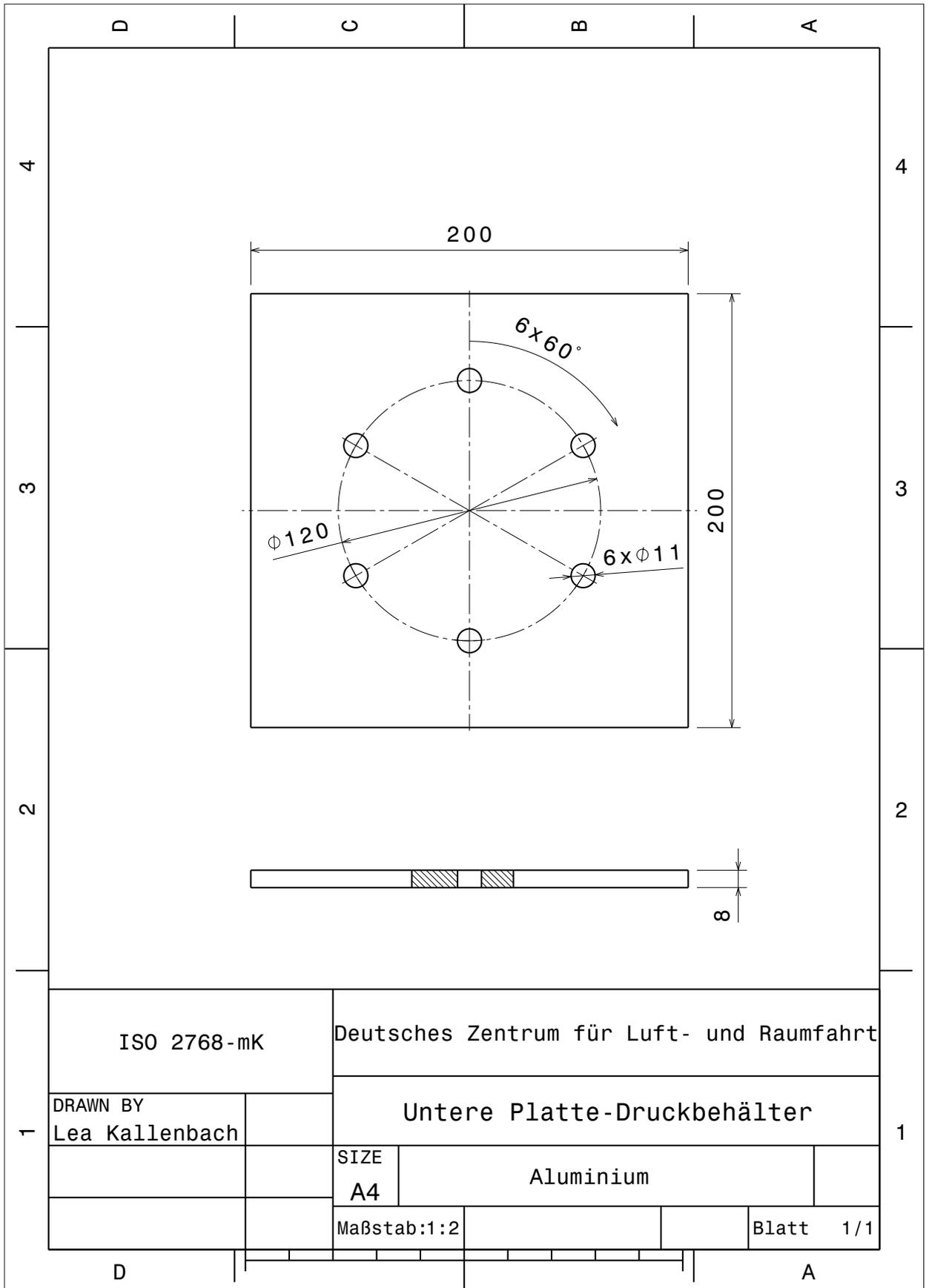


Abb. A.19.: Untere Platte für den Druckbehälter

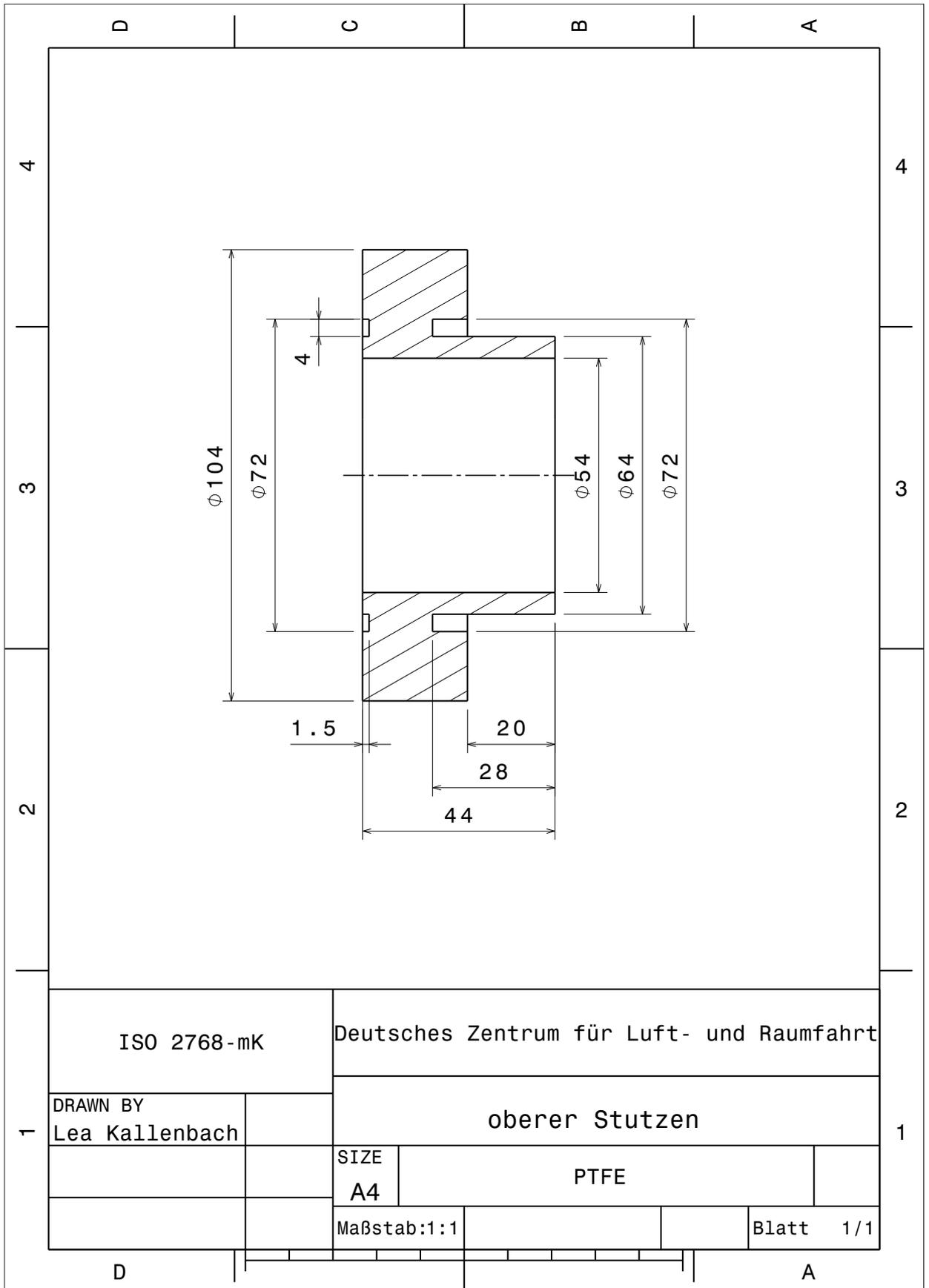


Abb. A.20.: Oberer PTFE-Stutzen für den Druckbehälter

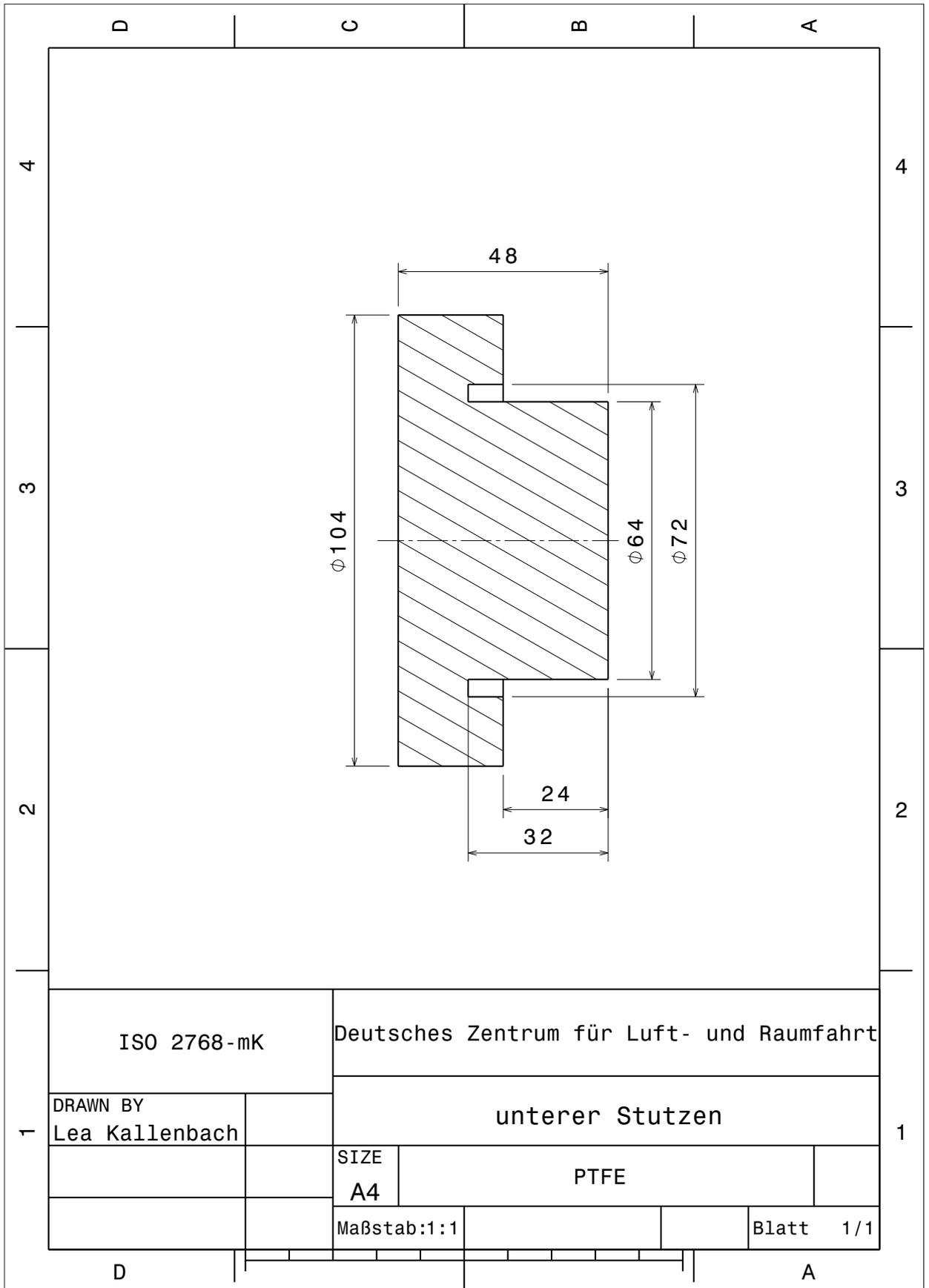


Abb. A.21.: Unterer PTFE-Stutzen für den Druckbehälter

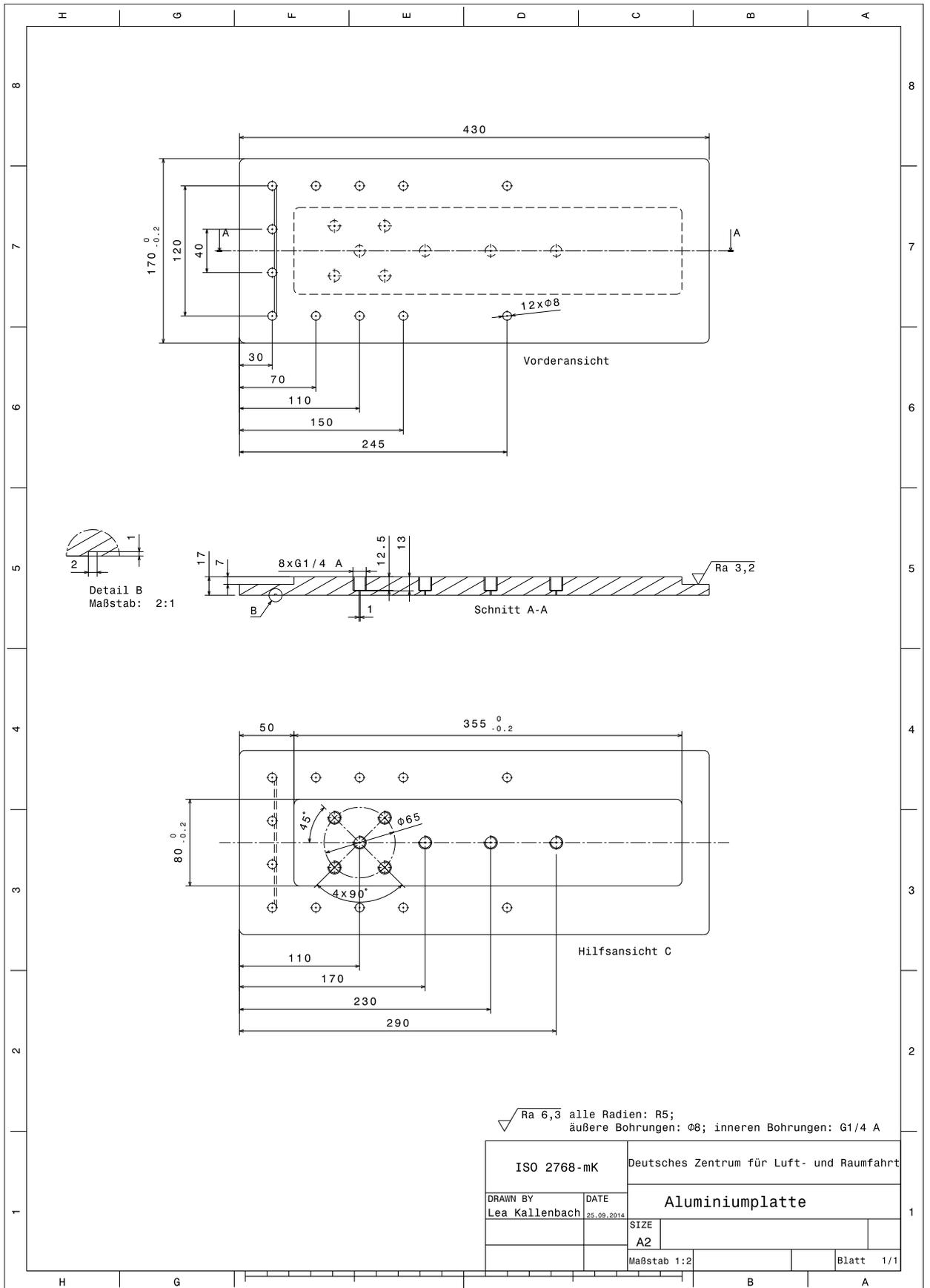


Abb. A.22.: Aluminiumplatte für das RTM-Werkzeug

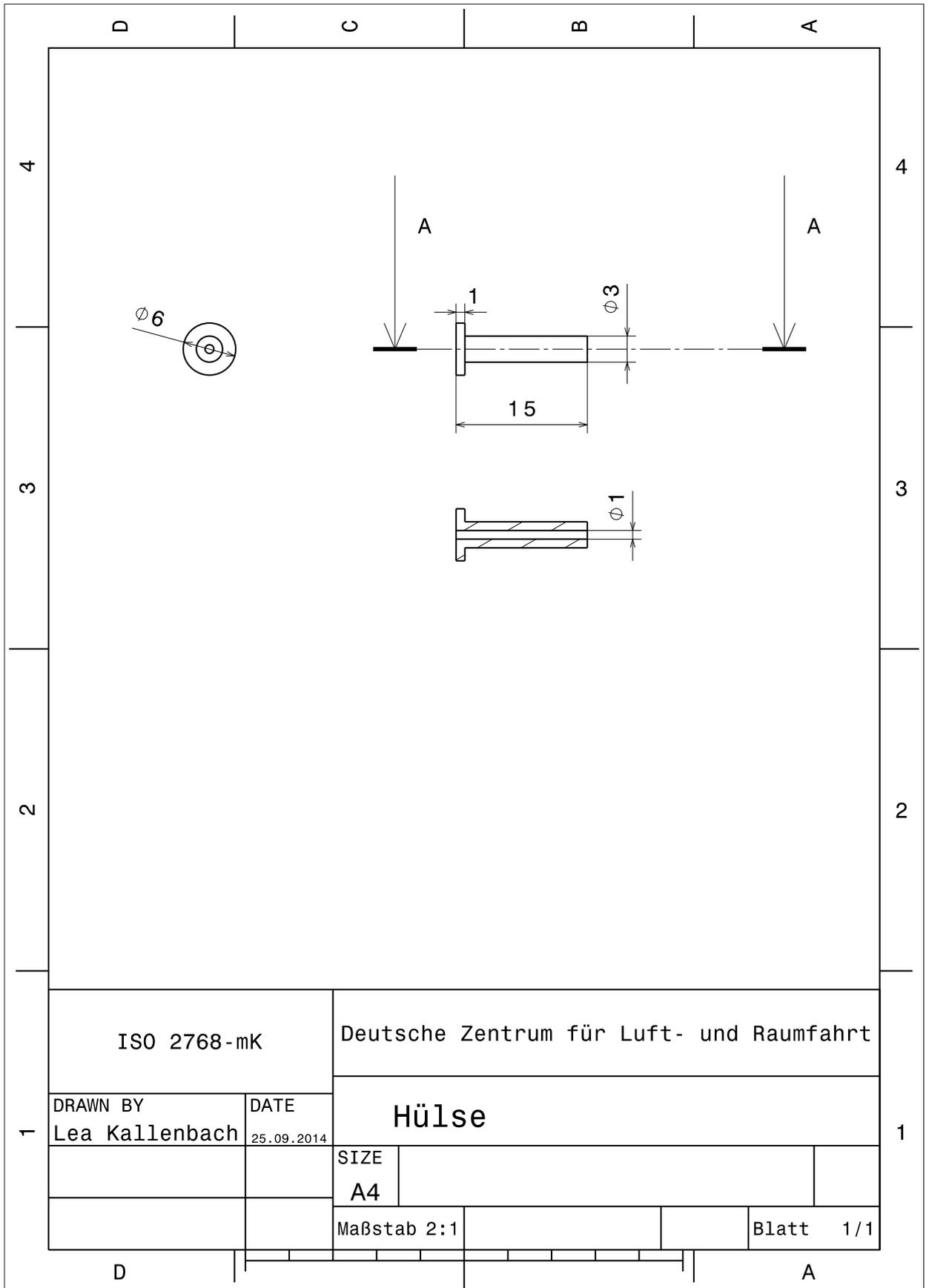
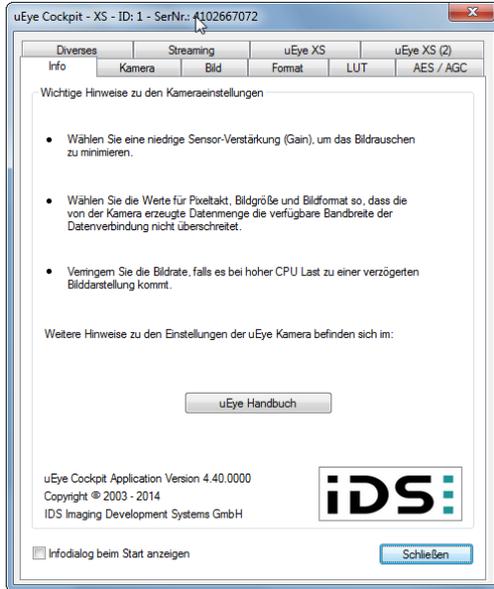
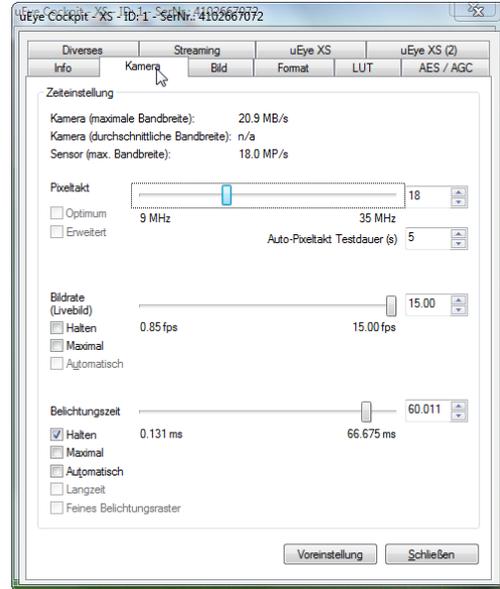


Abb. A.23.: Hülse für den Druckmessumformer

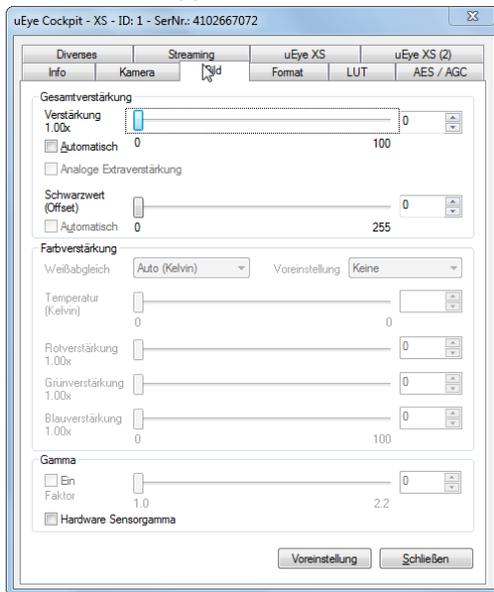
### A.4. Kameraeinstellungen



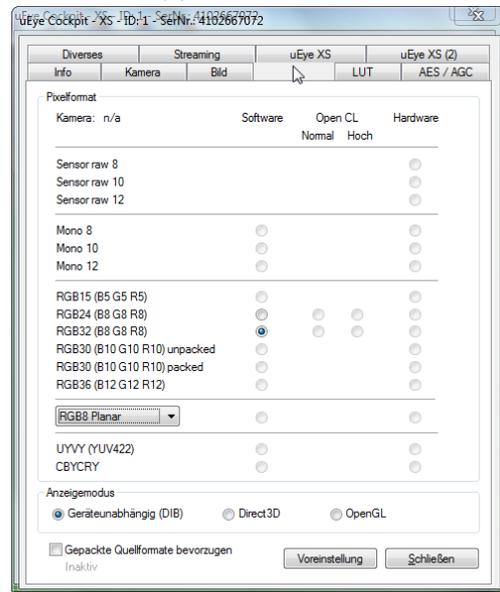
(a) Reiter Info



(b) Reiter Kamera

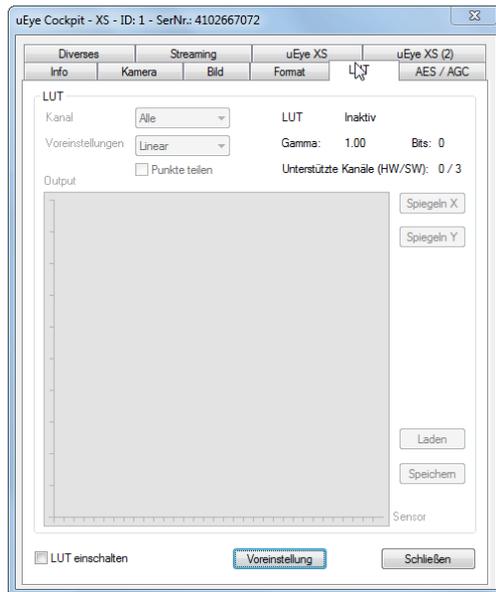


(c) Reiter Bild

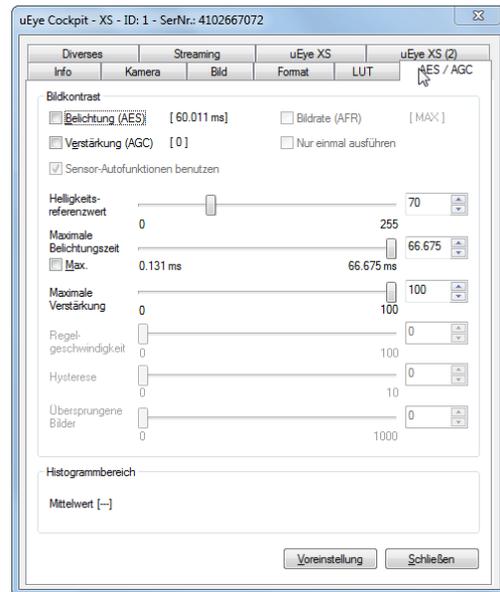


(d) Reiter Format

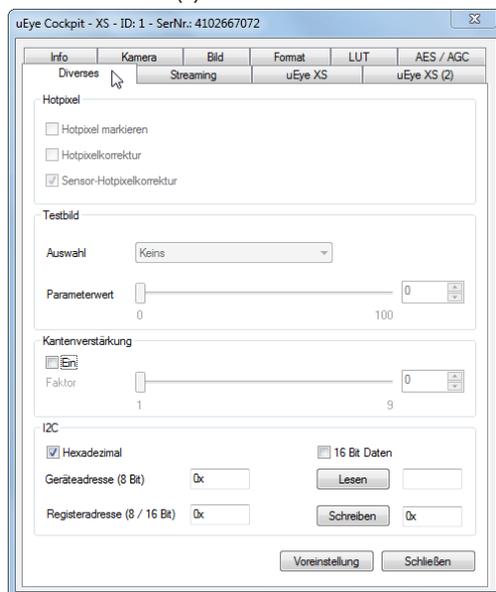
Abb. A.24.: Kameraeinstellungen – Teil 1



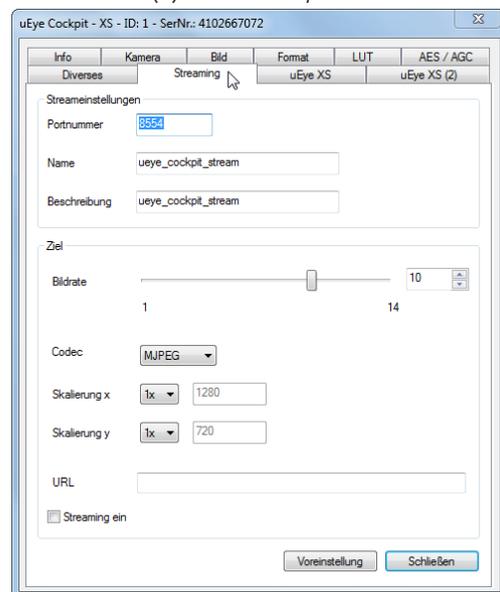
(a) Reiter LUT



(b) Reiter AES/AGC

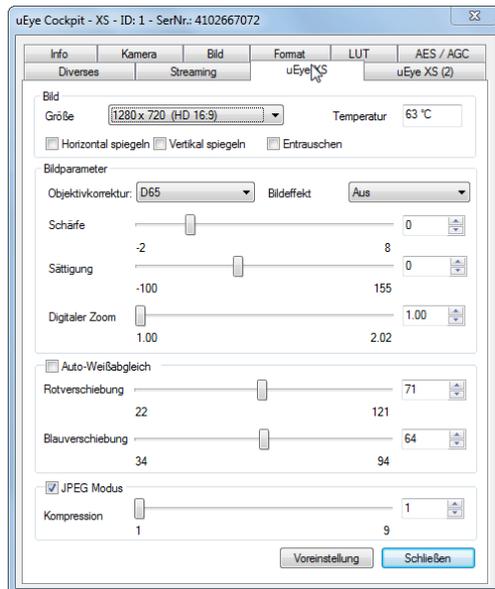


(c) Reiter Diverses

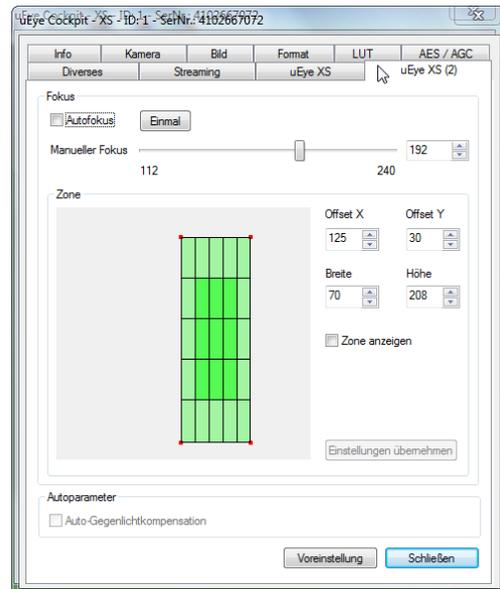


(d) Reiter Streaming

Abb. A.25.: Kameraeinstellungen – Teil 2



(a) Reiter uEye XS



(b) Reiter uEye XS (2)

Abb. A.26.: Kameraeinstellungen – Teil 3

## A.5. Makros für die automatisierte Versuchsauswertung

```
1
2 //Conversion JPG to B/W TIFF Lea Kallenbach (Dominic Bertling) 07.09.2014
3
4 macro "Convert JPG to B/W TIFF" {
5
6 dir = getDirectory("Choose a Directory");
7 list = getFileList(dir);
8
9 // Create a directory next to chosen dir
10 outputDir = dir+File.separator+".." +File.separator+"TIFF";
11 File.makeDirectory(outputDir);
12 if (!File.exists(outputDir))
13     exit("Unable to create directory");
14
15 setBatchMode(true);
16 for (i=0; i<list.length; i++){
17     showProgress(i, list.length);
18     open(dir+list[i]);
19
20     //run("Threshold ...");
21     // Color Thresholder 1.480
22     // Autogenerated macro, single images only!
23     min=newArray(3);
24     max=newArray(3);
25     filter=newArray(3);
26     a=getTitle();
27     run("HSB Stack");
28     run("Convert Stack to Images");
29     selectWindow("Hue");
30     rename("0");
31     selectWindow("Saturation");
32     rename("1");
33     selectWindow("Brightness");
34     rename("2");
35     min[0]=0;
36     max[0]=255;
37     min[1]=0;
38     max[1]=255;
39     min[2]=0;
40     max[2]=42;
41
42     selectWindow("0");
43     close();
44     selectWindow("1");
45     close();
46     selectWindow("2");
47     setThreshold(min[2], max[2], "B&W");
48     run("Make Binary");
49     rename(a);
50
51 // Save
```

```
52 saveAs("tiff", outputDir+File.separator+list[i]);
53 close();
54 }
55 }
```

Quelltext A.1: ImageJ Makro zur Umwandlung der JPG Bilder in Binärbilder

```
1 macro "Analyze Particles – Black Background" {
2
3 setOption("Limit to Threshold", false);
4 setOption("BlackBackground", true);
5 setBackground(0,0,0); // black
6 setForeground(255,255,255); // white
7
8 dir = getDirectory("Choose a Directory");
9 list = getFileList(dir);
10 setBatchMode(true);
11
12 for (i=0; i<list.length; i++){
13 showProgress(i, list.length);
14 open(dir+list[i]);
15
16 run("Set Scale...", "distance=625 known=120 pixel=1 unit=mm");
17
18 makeRectangle(693, 116, 503, 533);
19
20 run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing
21 summarize include holes");
22 close();
23 }
24 selectWindow("Summary");
25 saveAs("Text", dir+"Auswertung_ImageJ.txt");
26 }
27 }
```

Quelltext A.2: ImageJ Makro zur Auswertung der Dry-Spot Fläche

## A.6. Datenblätter

### A.6.1. Datenblatt des Glasfasernadelvlieses

**Technisches Datenblatt /  
Technical specification sheet**



**isoGLAS® - Nadelvlies  
isoGLAS® - needlemat**

<b>Typische Einsatzgebiete:</b>	<b>Typical applications:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maschinenbau</li> <li>• Heizkessel, Klimageräte</li> <li>• Werft- und Schiffsbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apparatus construction</li> <li>• Boilers, Air-conditioning appliances</li> <li>• yard- and ship building</li> </ul>

<b>Lieferdaten / Supply data:</b>	
Dicke / Thickness	3 ... 25 mm (Rollenware / rolls), 25 ... 75 mm (Plattenware / sheets)
Dichte / Density	75 ... 150 kg / m <sup>3</sup> (Rollen / rolls), 140 ... 185 kg / m <sup>3</sup> (Platten / sheets)
Breite / width:	1000 mm (andere Breiten auf Anfrage / other widths upon request)
Länge / length:	10 ... 50 m (Rollenware / rolls) 1000 ... 2000 mm (Plattenware / sheets)
Verpackung / Packing	
Rollenware / rolls	auf Hülse gewickelt, in Folie verpackt wound on cardboard tubes, wrapped in plastic
Plattenware / sheets	auf Paletten / on pallets

<b>Allgemeine Angaben / General data</b>	
Fasertyp / type of fibres	E-Glas / E-Glass
Anwendungsgrenztemperatur / application limit	450 °C
Anwendungsgrenztemp. kurzzeitig / brief peaks up to	550 °C
Farbe / colour	weiß / white
Bindemittel / Binders	ohne Bindemittel / without binders
Lagerung / Storage	trocken lagern / keep dry
Geruch / Smell	geruchlos / odourless
Zulassungen / Approvals	
• Bauaufsichtl. Prüfzeugnis / Building Supervisory Certificate	Brandklasse A1 nach DIN 4102 / Incendiary class A1 acc. to DIN 4102
• EG-Baumusterprüfbesch. / EC-Type Examination Certificate	114.505 Modul B - See-BG / Module B
• USCG Modul B	164.109/EC0736/114.505

<b>Physikalische Kennwerte / physical properties</b>										
Dicke / Thickness	3 - 6 mm > 6 mm	DIN EN ISO 9073-2	[mm]	-1 / +2 ± 2						
Flächengewicht / Area weight		DIN EN 29 073 T1								
		Rollen/rolls	[%]	± 15						
		Platten/sheets	[%]	± 15						
Abmessungen / Dimensions										
Breite / width		DIN EN 1773	[%]	± 5						
Länge / length		DIN EN 1773	[%]	± 5						
Brandverhalten / Combustion behaviour		unbrennbar nach DIN 4102 / incombustible acc. DIN 4102								
physiologisches Verhalten / Physiological behaviour		unbedenklich / not hazardous								
toxikologisches Verhalten / Toxic behaviour		ungefährlich / not hazardous								
Wärmeleitfähigkeit exemplarisch für RG = 156 kg/m <sup>3</sup> Thermal conductivity exemplary for unit of volume = 156 kg/m <sup>3</sup>										
	°C	50	100	150	200	250	300	400	500	550
	W/mK	0.039	0.045	0.051	0.059	0.068	0.078	0.10	0.13	0.14

Bei der Vielseitigkeit der Einbau- und Betriebsbedingungen sowie der Anwendungs- und Verfahrenstechnik können die Angaben in diesem Datenblatt nur als unverbindliche Richtlinien gelten.	With the variety of installation and service conditions as well as of application and process engineering, the data of this sheet can only be taken as a non-binding guide.
---	---

==Modalwert (Typischer Wert) / modal value (typical value)	Ausgabe / issue: 11.09	Änderungsstand / modification: 5.2
--	------------------------	------------------------------------

## A.6.2. Datenblatt des Silikonöls

### Technische Information Technical Information



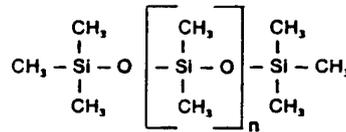
MB-ElbesilÖle B neu

Seite 1

## ELBESIL-ÖLE B

ELBESIL-ÖLE B sind Polydimethylsiloxane (PDMS), die in Viskositätseinstellungen von 0,65 bis 100 000 cSt geliefert werden. Sie sind wasserklare Flüssigkeiten mit weitgehender Geruchs- und Geschmacksneutralität.

Durch folgende Formel  
läßt sich die Struktur der  
ELBESIL-ÖLE B veranschaulichen:



Aufgrund der einmaligen Kombination hervorragender Eigenschaften eignen sich ELBESIL-ÖLE B für eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Die wichtigsten Eigenschaften sind:

- Ausgeprägte wasserabstoßende Eigenschaften
- Geringe Temperaturabhängigkeit der Viskosität
- Wärme und Kältebeständigkeit
- Ausgeprägte Oberflächenaktivität
- Hohe Grenzflächenspannung gegen Wasser u. org. Polymere
- Gute dielektrische Eigenschaften über einen breiten Temperatur und Frequenzbereich
- Hohe Kompressibilität
- Chemische und physiologische Indifferenz

#### Daraus ergeben sich folgende typische Anwendungsgebiete:

- Trennmittel:** Entformung von Kautschuk- und Kunststoffteilen, einmaliger dünner Auftrag ermöglicht viele Trennvorgänge. Kein Aufbau in den Formen.
- Gleitmittel:** Kunststoffe, Gummi, Schaumstoffe, Kunststofflager, Schneidwerkzeuge, Nähgarn erhalten ausgezeichnete Gleiteigenschaften und werden gleichzeitig wasserabweisend.
- Antischaum:** Mineral- und Pflanzenöle, sowie viele nichtwässrige Systeme werden durch äußerst geringe Zusätze entschäumt.
- Polituren:** Auto- und Möbelpolituren, Schuh- und Bodenpflegemittel werden wasserabstoßend und erhalten einen glatten und glänzenden Film.
- Kosmetika:** In Handcremes, Sonnenbräunungsmitteln, Haarspray, und anderen Formulierungen entsteht ein schützender, nicht fettender Film, der gegen wässrige Medien beständig ist, ohne die Hautatmung zu behindern.

#### L. BÖWING GMBH

Delkenheimer Str. 18  
65719 Hofheim a.Ts. Germany  
Tel: 0 61 45 / 20 91  
Fax: 0 61 45 / 20 92  
e-Mail: boewing@t-online.de  
Internet: <http://www.boewing.de>

#### Chemische Fabrik

Öle, Emulsionen, Entschäumer,  
Fette, Kautschuk, Spray  
Trennmittel und Gleitmittel  
basierend auf Silikon oder  
anderen Wirkstoffen

#### Chemical Factory

oils, emulsions, antifoams,  
rubber, spray, grease  
release agent and slide agent  
based on silicone or other  
substances

## Technische Information Technical Information



MB-ElbesilÖle B neu

Seite 2

- Hydrauliköle:** Stoßdämpfer, Pumpen, Bremszylinder, Stabilität gegen Scherbeanspruchung, hohe Kompressibilität.
- Dielektra:** Transformatoren, Kondensatoren, Hochspannungsröhren, Kühlmittel für wärmeabgebende Baueinheiten.
- Dämpfungsmedien:** Drehzahlregler, nautische und aeronautische Instrumente, Kreiselkompass, Meßschreiber, Zeitregler, Überlastrelais, Tonabnehmer.  
Nahezu keine Veränderungen bei Temperaturen bis über 200 °C.
- Hydrophobierung:** Textilien, Schichtstoffe, Keramik, Isolatoren, Glas.  
Ausgeprägte Hydrophobie, kein Nährboden für Bakterien und Pilze.

### Eigenschaften der Standardviskositäten

Diese Werte sind nicht zur Aufnahme in Materialspezifikationen bestimmt.

Tabelle I

Viskosität <sup>2</sup> bei 25°C, mm <sup>2</sup> /s	Flammpunkt <sup>3</sup> (DIN 51376) in °C	Tropfpunkt <sup>4</sup> in °C	Dichte <sup>5</sup> bei 25°C g/cm <sup>3</sup>	Viskositäts- temperatur- koeffizient <sup>6</sup>	Ausdehnungs- koeffizient (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> *°C) *10 <sup>-4</sup>
0,65	-1	-68	0,76	0,31	-
1,0	33	< -90	0,82	0,37	-
3,0	> 60	< -90	0,90	0,51	-
5,0	> 130	< -80	0,92	0,55	-
10	> 160	< -80	0,945	0,56	10,0
20	> 200	< -70	0,955	0,575	9,7
50	> 250	-55	0,96	0,59	9,5
100	> 275	-55	0,963	0,59	9,4
200	> 300	-50	0,966	0,595	9,35
350	> 300	-50	0,968	0,595	9,25
500	> 300	-50	0,969	0,60	9,25
1.000	> 320	-50	0,97	0,60	9,2
5.000	> 320	-50	0,97	0,60	9,2
10.000	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
12.500	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
30.000	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
60.000	> 320	-45	0,97	0,60	9,2
100.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
300.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
500.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
1.000.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2
2.000.000	> 320	-40	0,98	0,60	9,2

<sup>1</sup> In dieser Tabelle sind nur Standard-Viskositäten angegeben.  
Es können jedoch Viskositätseinstellungen bis zu 2.500.000 mm<sup>2</sup>/s geliefert werden.

<sup>2</sup> nach ASTM-D-445, Anhang C.

<sup>3</sup> im offenen Tiegel nach ASTM-D-92.

<sup>4</sup> nach ASTM-D-97-39, Abschnitt 5-7. Infolge von Unterkühlungseinflüssen liegen die nach dieser Methode ermittelten Tropfpunkte tiefer als diejenigen Temperaturen bei denen die Silikonöle nach Lagerung bei tiefen Temperaturen über längere Zeit fest werden.

### L. BÖWING GMBH

Delkenheimer Str. 18  
65719 Hofheim a.Ts. Germany  
Tel: 0 61 45 / 20 91  
Fax: 0 61 45 / 20 92  
e-Mail: boewing@t-online.de  
Internet: http://www.boewing.de

### Chemische Fabrik

Öle, Emulsionen, Entschäumer,  
Fette, Kautschuk, Spray  
Trennmittel und Gleitmittel  
basierend auf Silikon oder  
anderen Wirkstoffen

### Chemical Factory

oils, emulsions, antifoams,  
rubber, spray, grease  
release agent and slide agent  
based on silicone or other  
substances

Technische Information  
 Technical Information



MB-ElbesilÖle B neu

Seite 3

Tabelle II

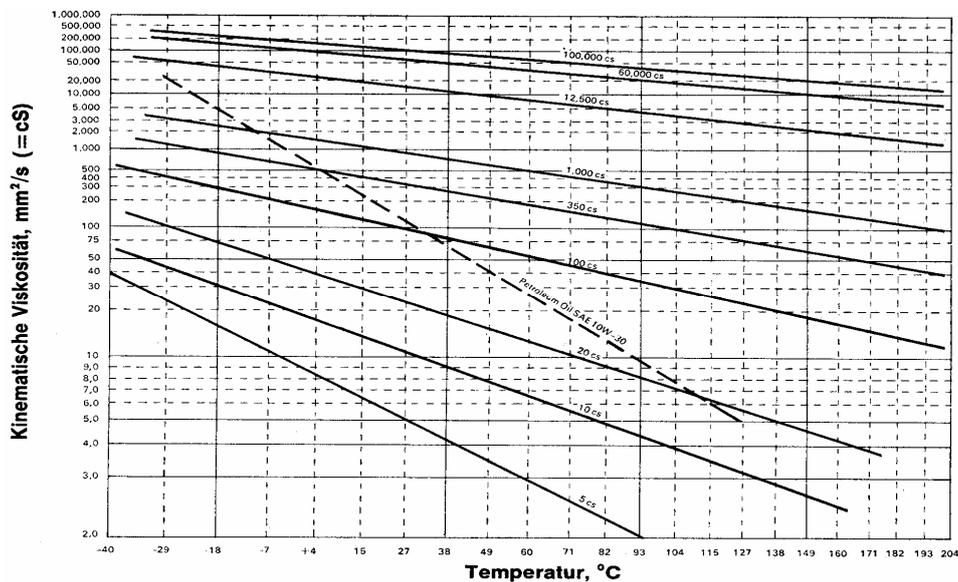
Viskosität <sup>2</sup> bei 25°C, mm <sup>2</sup> /s	Brechungs- index bei 25°C <sup>7</sup>	Oberflächen- spannung bei 25°C, mN/m	Wärmeleit- fähigkeit bei 50°C W/m·K
0,65	1,3750	15,9	0,1004
1,0	1,3880	17,4	0,1046
3,0	1,3970	18,0	0,1172
5,0	1,3960	19,2	0,1155
10	1,3990	20,2	0,1139
20	1,4001	20,6	0,1423
50	1,4020	20,8	0,1506
100	1,4030	20,9	0,1548
200	1,4030	21,0	0,1548
350	1,4035	21,1	0,1590
500	1,4035	21,1	0,1590
1.000	1,4035	21,2	0,1590
5.000	1,4037	21,4	0,1590
10.000	1,4037	21,4	0,1590
12.500	1,4037	21,5	0,1590
30.000	1,4037	21,5	0,1590
60.000	1,4037	21,5	0,1590
100.000	1,4037	21,5	0,1590
300.000	1,4037	21,5	0,1590
500.000	1,4037	21,5	0,1590
1.000.000	1,4037	21,5	0,1590
2.000.000	1,4037	21,5	0,1590

<sup>5</sup> nach ASTM-D-1298.

<sup>7</sup> nach ASTM-D-1218.

<sup>6</sup>Viskositäts-Temperatur-Koeffizient:  $1 \cdot \frac{\text{Viskosität bei } 99^\circ\text{C}}{\text{Viskosität bei } 38^\circ\text{C}}$

Viskosität/Temperaturkurve für ELBESIL ÖL B



L. BÖWING GMBH

Delkenheimer Str. 18  
 65719 Hofheim a.Ts. Germany  
 Tel: 0 61 45 / 20 91  
 Fax: 0 61 45 / 20 92  
 e-Mail: boewing@t-online.de  
 Internet: http://www.boewing.de

Chemische Fabrik

Öle, Emulsionen, Entschäumer,  
 Fette, Kautschuk, Spray  
 Trennmittel und Gleitmittel  
 basierend auf Silikon oder  
 anderen Wirkstoffen

Chemical Factory

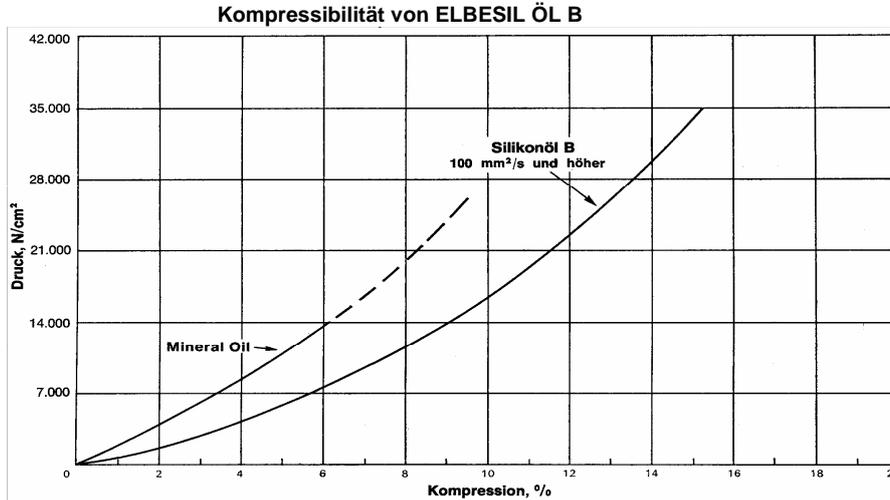
oils, emulsions, antifoams,  
 rubber, spray, grease  
 release agent and slide agent  
 based on silicone or other  
 substances

Technische Information  
 Technical Information



MB-ElbesilÖle B neu

Seite 4



Die Druckabhängigkeit der Dichte von ELBESIL Ölen B ist groß. Sie nimmt mit steigender Viskosität ab. Die adiabatische Kompressibilität von Ölen mit einer Viskosität > 100 mPa/s ist bei 25°C  $100 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ . Sie nimmt mit steigender Temperatur zu.

**Dielektrisches Verhalten**

Viskosität $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Temp. °C	Dielektrizitätszahl $\epsilon_r$ nach DIN 53483		Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$ nach DIN 53483		Spezifischer Durchgangswiderstand $\rho_D$ in $\Omega \cdot \text{cm}$ nach DIN 53482 Meßspannung 100 V 1-Minutenwert
		50 Hz	800 Hz	50 Hz	800 Hz	
		3	-50	3	2,9	
	0	2,8	2,6	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{14}$
	100	2,4	2,3	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{13}$
	200	2,1	2,1	$15,5 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{12}$
20	-50	3	3,0	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{16}$
	0	2,9	2,8	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{15}$
	100	2,4	2,4	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{14}$
	200	2,2	2,2	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{13}$
50	-50	3,1	3,0	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{15}$
	0	3	2,9	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{14}$
	100	2,6	2,4	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{13}$
	200	2,3	2,2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{13}$
100	-50	3,1	3,0	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{16}$
	0	2,9	2,8	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{15}$
	100	2,5	2,5	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{14}$
	200	2,4	2,2	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{13}$
60 000	-50	3,4	3,4	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{16}$
	0	2,9	2,9	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{15}$
	100	2,7	2,5	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{13}$
	200	2,5	2,3	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{13}$

**L. BÖWING GMBH**

Delkenheimer Str. 18  
 65719 Hofheim a.Ts. Germany  
 Tel: 0 61 45 / 20 91  
 Fax: 0 61 45 / 20 92  
 e-Mail: boewing@t-online.de  
 Internet: http://www.boewing.de

**Chemische Fabrik**

Öle, Emulsionen, Entschäumer,  
 Fette, Kautschuk, Spray  
 Trennmittel und Gleitmittel  
 basierend auf Silikon oder  
 anderen Wirkstoffen

**Chemical Factory**

oils, emulsions, antifoams,  
 rubber, spray, grease  
 release agent and slide agent  
 based on silicone or other  
 substances

## Technische Information Technical Information



MB-ElbesilÖle B neu

Seite 5

### Sonder-Viskositäten

Das Abmischen von ELBESIL ÖL B unterschiedlicher Viskosität gestattet die Einstellung jedes gewünschten Viskositätsgrades. Das Fluid kann zwar in einer Reihe von Standard-Viskositäten geliefert werden; gelegentlich erfordern jedoch bestimmte Anwendungen ein Fluid einer zwischen den Standard-Viskositäten liegenden Viskosität. Für diesen Fall wenden Sie sich bitte an den Vertrieb der L. Böwing GmbH. Sondereinstellungen der Viskosität sind ohne Probleme möglich und können auch in kleineren Mengen geliefert werden.

### Löslichkeit

Lösungsmittel für sämtliche Typen: aromatische u. aliphatische Kohlenwasserstoffe  
Chlorkohlenwasserstoffe, Äther, Ester, höhere Alkohole, Ketone.

Lösungsmittel für niedrigvisk. Typen bis ca. 20 cSt.: Aceton, Äthanol, Butanol, Isopropylalkohol, Dioxan.

### Chemische Eigenschaften

ELBESIL-ÖLE B sind chemisch inerte Stoffe. Sie wirken auf Metalle, wie Eisen, Kupfer, Zinn, Aluminium, Chrom, Nickel, usw. nicht ein. Durch schwache Säuren oder Alkalien werden sie nicht angegriffen. Eine Zersetzung wird jedoch durch konzentrierte Säuren (Schwefel- u. Salpetersäure), aggressive Gase (Chlor) oder konzentrierte Alkalien - besonders in der Wärme - herbeigeführt.

### Lagerbeständigkeit

ELBESIL ÖLE B sind bei sachgemäßer Lagerung unbegrenzt lange mindestens jedoch 12 Monate haltbar. Sie sind auch klimatischen Einflüssen gegenüber unempfindlich.

<b>Verpackung</b>	Kunststoffgebinde á	5, 10 und 25 kg netto
	Einwegfässer á	200 kg netto
	Container á	1000 kg netto

Die in diesem Merkblatt aufgeführten Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und dienen der näheren Beschreibung des Produktes. Verbindliche Rückschlüsse auf bestimmte Eigenschaften oder Anwendungsmöglichkeiten können hieraus nicht gezogen werden. Änderungen behalten wir uns bei technischem Fortschritt vor. Beratungen erfolgen nach bestem Wissen, jedoch unverbindlich. Wir haften nicht wegen Unterlassung einer Beratung.

### L. BÖWING GMBH

Delkenheimer Str. 18  
65719 Hofheim a.Ts. Germany  
Tel: 0 61 45 / 20 91  
Fax: 0 61 45 / 20 92  
e-Mail: boewing@t-online.de  
Internet: <http://www.boewing.de>

### Chemische Fabrik

Öle, Emulsionen, Entschäumer,  
Fette, Kautschuk, Spray  
Trennmittel und Gleitmittel  
basierend auf Silikon oder  
anderen Wirkstoffen

### Chemical Factory

oils, emulsions, antifoams,  
rubber, spray, grease  
release agent and slide agent  
based on silicone or other  
substances

**EU-SICHERHEITSDATENBLATT**

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 und Verordnung (EU) Nr. 453/2010 (REACH)

**Elbesil Öl B 100 - 2000**

Artikelnummer 40XX/007-036

Bearbeitet: 05.08.2013

Version: 5

Sprache: de-DE

Gedruckt: 09.08.2013

Seite: 1 von 7

**ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs bzw. des Gemischs und des Unternehmens****1.1 Produktidentifikator**

Handelsname: Elbesil Öl B 100 - 2000

**1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird**

Allgemeine Verwendung: Für chemische Produktion.  
Dämpfungsmedium im Maschinenbau.  
Das Produkt ist ausschließlich für den industriellen Gebrauch bestimmt.

**1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt**

Firmenbezeichnung: L. Böwing GmbH

Straße/Postfach: Hafestraße 15

PLZ, Ort: 65439 Flörsheim

Deutschland

E-Mail: info@boewing.de

Telefon: 06145-2091

Telefax: 06145-2092

Auskunft gebender Bereich: Telefon: 06145-2091, E-Mail: boewing@t-online.de

Weitere Angaben: Dieses Sicherheitsdatenblatt gilt für die folgenden Produkte:  
4007 - Elbesil Öl B 100  
4036 - Elbesil Öl B 200  
4009 - Elbesil Öl B 350  
4010 - Elbesil Öl B 500  
4011 - Elbesil Öl B 1000  
4012 - Elbesil Öl B 2000

**1.4 Notrufnummer**

Telefon: 06145-2091

Diese Nummer ist nur zu Bürozeiten besetzt.

**ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren****2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs****Einstufung gemäß EG-Verordnung 1272/2008 (CLP)**

Dieses Gemisch ist als nicht gefährlich eingestuft.

**Einstufung gemäß Richtlinie 67/548/EWG oder 1999/45/EG**

Diese Zubereitung ist als nicht gefährlich eingestuft.

**2.2 Kennzeichnungselemente****Kennzeichnung (CLP)**

Gefahrenhinweise: entfällt

Sicherheitshinweise: entfällt

**Kennzeichnung (67/548/EWG oder 1999/45/EG)**

R-Sätze: entfällt

S-Sätze: entfällt

**EU-SICHERHEITSDATENBLATT**

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 und Verordnung (EU) Nr. 453/2010 (REACH)

**Elbesil Öl B 100 - 2000**

Artikelnummer 40XX/007-036

Bearbeitet: 05.08.2013

Version: 5

Sprache: de-DE

Gedruckt: 09.08.2013

Seite: 2 von 7

**2.3 Sonstige Gefahren**

Messungen bei Temperaturen ab ca. 150 °C haben ergeben, dass durch oxidativen Abbau eine geringe Menge Formaldehyd abgespalten wird.

**ABSCHNITT 3: Zusammensetzung / Angaben zu Bestandteilen**

3.1 Stoffe: nicht anwendbar

**3.2 Gemische**

Chemische Charakterisierung:

Polydimethylsiloxan (PDMS):  $(C_2 H_6 O Si)_n = (-Si(CH_3)_2-O-)_n$   
Silikonöl, Gruppe mittel-viskos

RTECS-Nummer: TQ2690000

**ABSCHNITT 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen****4.1 Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen**

- Bei Eintätmen: Für Frischluft sorgen. Bei Unwohlsein ärztlichen Rat einholen.
- Nach Hautkontakt: Nach Kontakt mit der Haut zuerst das Mittel mit einem trockenen Tuch entfernen und dann die Haut mit reichlich Wasser abspülen. Bei Hautreaktionen Arzt aufsuchen.
- Nach Augenkontakt: Sofort bei geöffnetem Lidspalt 10 bis 15 Minuten mit fließendem Wasser spülen. Anschließend Augenarzt aufsuchen.
- Nach Verschlucken: Reichlich Wasser in kleinen Schlucken trinken lassen.  
Kein Erbrechen herbeiführen. Bei Beschwerden Arzt aufsuchen.

**4.2 Wichtigste akute oder verzögert auftretende Symptome und Wirkungen**

Nach Verschlucken: Übelkeit, Erbrechen, Durchfall.  
Nach Augenkontakt: Schwach reizend.  
Folgende Symptome können auftreten: Rötung, Schmerzen.

**4.3 Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung**

Symptomatische Behandlung.

**ABSCHNITT 5: Maßnahmen zur Brandbekämpfung****5.1 Löschmittel**

Geeignete Löschmittel: Löschpulver, Schaum, Kohlendioxid.

Aus Sicherheitsgründen ungeeignete Löschmittel:

Wasser-Sprühnebel, Wasservollstrahl

**5.2 Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren**

Schwer brennbar.  
Im Brandfall können entstehen: Siliciumdioxid, Spuren von unvollständig verbrannten Kohlenwasserstoffen, Formaldehyd, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.

**5.3 Hinweise für die Brandbekämpfung**

Besondere Schutzausrüstung bei der Brandbekämpfung:

Umgebungsluftunabhängiges Atemschutzgerät und Chemikalienschutzanzug tragen.

**EU-SICHERHEITSDATENBLATT**

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 und Verordnung (EU) Nr. 453/2010 (REACH)

**Elbesil Öl B 100 - 2000**

Artikelnummer 40XX/007-036

Bearbeitet: 05.08.2013

Version: 5

Sprache: de-DE

Gedruckt: 09.08.2013

Seite: 3 von 7

**ABSCHNITT 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung****6.1 Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren**

Für ausreichende Lüftung sorgen. Geeignete Schutzkleidung tragen.  
Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.

**6.2 Umweltschutzmaßnahmen**

Eindringen in Erdreich, Gewässer oder Kanalisation verhindern.

**6.3 Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung**

Mit flüssigkeitsbindendem Material (Sand, Kieselgur, Säurebinder, Universalbinder) mechanisch aufnehmen und in geeigneten Behältern zur Entsorgung bringen.

Zusätzliche Hinweise: Besondere Rutschgefahr durch auslaufendes/verschüttetes Produkt.

**6.4 Verweis auf andere Abschnitte**

Siehe ergänzend Kapitel 8 und 13.

**ABSCHNITT 7: Handhabung und Lagerung****7.1 Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung**

Hinweise zum sicheren Umgang:

Die beim Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen sind zu beachten.

Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz:

Offene Flammen vermeiden.

**7.2 Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten**

Anforderungen an Lagerräume und Behälter:

Behälter trocken und dicht geschlossen halten. Kühl aufbewahren.

Lagerklasse:

10 = Brennbare Flüssigkeiten, soweit nicht LGK 3

**7.3 Spezifische Endanwendungen**

Es liegen keine Informationen vor.

**ABSCHNITT 8: Begrenzung und Überwachung der Exposition/Persönliche Schutzausrüstungen****8.1 Zu überwachende Parameter**

Zusätzliche Hinweise: Enthält keine Stoffe mit Arbeitsplatzgrenzwerten.

**8.2 Begrenzung und Überwachung der Exposition**

Für gute Belüftung des Arbeitsraumes und/oder Absaugeinrichtung am Arbeitsplatz sorgen.

**Begrenzung und Überwachung der Exposition am Arbeitsplatz**

Atemschutz: Falls Dämpfe auftreten, ist Atemschutz erforderlich.

Filter Typ A (= gegen Dämpfe von organischen Verbindungen) gemäß EN 14387 benutzen.

Handschutz:

Schutzhandschuhe gemäß EN 374.

Handschuhmaterial: Nitrilkautschuk

Die Angaben des Herstellers der Schutzhandschuhe zu Durchlässigkeiten und Durchbruchzeiten sind zu beachten.

Augenschutz:

Dicht schließende Schutzbrille gemäß EN 166.

Körperschutz:

Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung tragen.

**EU-SICHERHEITSDATENBLATT**

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 und Verordnung (EU) Nr. 453/2010 (REACH)

**Elbesil Öl B 100 - 2000**

Artikelnummer 40XX/007-036

 Bearbeitet: 05.08.2013  
 Version: 5  
 Sprache: de-DE  
 Gedruckt: 09.08.2013

Seite: 4 von 7

Schutz- und Hygienemaßnahmen:

Bei der Arbeit nicht essen und trinken.  
 Vor den Pausen und bei Arbeitsende Hände waschen.

**ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften****9.1 Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften**

Aussehen:	Form: flüssig Farbe: farblos
Geruch:	geruchlos
Geruchsschwelle:	keine Daten verfügbar
pH-Wert:	7
Schmelzpunkt/Schmelzbereich:	-49 - -42 °C
Siedepunkt/Siedebereich:	keine Daten verfügbar
Flammpunkt/Flammbereich:	> 320 °C
Verdampfungsgeschwindigkeit:	keine Daten verfügbar
Entzündlichkeit:	keine Daten verfügbar
Explosionsgefahr:	keine Daten verfügbar
Explosionsgrenzen:	keine Daten verfügbar
Dampfdruck:	keine Daten verfügbar
Dampfdichte:	keine Daten verfügbar
Dichte:	0,96-0,97 g/mL
Wasserlöslichkeit:	praktisch unlöslich
Verteilungskoeffizient n-Octanol/Wasser:	keine Daten verfügbar
Selbstentzündlichkeit:	keine Daten verfügbar
Thermische Zersetzung:	> 250 °C
Viskosität, dynamisch:	keine Daten verfügbar
Viskosität, kinematisch:	100-2.000 mm <sup>2</sup> /s
Explosive Eigenschaften:	keine Daten verfügbar
Brandfördernde Eigenschaften:	keine Daten verfügbar

**9.2 Sonstige Angaben**

Zündtemperatur:	ca. 450 °C (DIN 51794)
Weitere Angaben:	keine Daten verfügbar

**ABSCHNITT 10: Stabilität und Reaktivität****10.1 Reaktivität**

siehe 10.3

**10.2 Chemische Stabilität**

Das Produkt ist unter normalen Lagerbedingungen stabil.

**10.3 Möglichkeit gefährlicher Reaktionen**

Keine gefährlichen Reaktionen bekannt.

**10.4 Zu vermeidende Bedingungen**

keine Daten verfügbar

**EU-SICHERHEITSDATENBLATT**

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 und Verordnung (EU) Nr. 453/2010 (REACH)

**Elbesil ÖI B 100 - 2000**

Artikelnummer 40XX/007-036

Bearbeitet: 05.08.2013  
Version: 5  
Sprache: de-DE  
Gedruckt: 09.08.2013

Seite: 5 von 7

**10.5 Unverträgliche Materialien**

keine Daten verfügbar

**10.6 Gefährliche Zersetzungsprodukte**

Schwer brennbar.

Im Brandfall können entstehen: Siliciumdioxid, Spuren von unvollständig verbrannten Kohlenwasserstoffen, Formaldehyd, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.

Thermische Zersetzung: &gt; 250°C

**ABSCHNITT 11: Toxikologische Angaben****11.1 Angaben zu toxikologischen Wirkungen**

Toxikologische Wirkungen: Akute Toxizität (oral): Fehlende Daten.  
Akute Toxizität (dermal): Fehlende Daten.  
Akute Toxizität (inhalativ): Fehlende Daten.  
Ätzung/Reizung der Haut: Fehlende Daten.  
Augenschädigung/-reizung: Fehlende Daten.  
Sensibilisierung der Atemwege: Fehlende Daten.  
Sensibilisierung der Haut: Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Einstufungskriterien nicht erfüllt. Nicht sensibilisierend  
Keimzellmutagenität/Genotoxizität: Fehlende Daten.  
Karzinogenität: Fehlende Daten.  
Reproduktionstoxizität: Fehlende Daten.  
Wirkungen auf und über die Muttermilch: Fehlende Daten.  
Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition): Fehlende Daten.  
Spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition): Fehlende Daten.  
Aspirationsgefahr: Fehlende Daten.

**Symptome**

Nach Verschlucken: Übelkeit, Erbrechen, Durchfall.  
Nach Augenkontakt: Schwach reizend.  
Folgende Symptome können auftreten: Rötung, Schmerzen.

**Allgemeine Bemerkungen**

Die folgenden Angaben beziehen sich auf die Komponente Polydimethylsiloxan:  
Messungen bei Temperaturen ab ca. 150 °C haben ergeben, dass durch oxidativen Abbau eine geringe Menge Formaldehyd abgespalten wird.

**ABSCHNITT 12: Umweltbezogene Angaben****12.1 Toxizität**

Wassergefährdungsklasse: 1 = schwach wassergefährdend  
Sonstige Hinweise: Kein Hinweis auf Bioakkumulationspotential.

**12.2. Persistenz und Abbaubarkeit**

Sonstige Hinweise: Das Produkt ist biologisch nicht abbaubar. Siloxane werden aus dem Wasser durch Sedimentierung oder Adsorption an Schlammpartikel entfernt.

**EU-SICHERHEITSDATENBLATT**

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 und Verordnung (EU) Nr. 453/2010 (REACH)

**Elbesil ÖI B 100 - 2000**

Artikelnummer 40XX/007-036

Bearbeitet: 05.08.2013

Version: 5

Sprache: de-DE

Gedruckt: 09.08.2013

Seite: 6 von 7

**12.3 Bioakkumulationspotenzial**

Verteilungskoeffizient n-Octanol/Wasser:

keine Daten verfügbar

**12.4 Mobilität im Boden**

keine Daten verfügbar

**12.5 Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung**

keine Daten verfügbar

**12.6 Andere schädliche Wirkungen**

Allgemeine Hinweise: Eindringen in Erdreich, Gewässer oder Kanalisation verhindern.

**ABSCHNITT 13: Hinweise zur Entsorgung****13.1 Verfahren der Abfallbehandlung****Produkt**Abfallschlüsselnummer: 07 02 99 = Abfälle aus HZVA von Kunststoffen, synthetischem Gummi und Kunstfasern  
HZVA = Herstellung, Zubereitung, Vertrieb und Anwendung

Empfehlung: Sondermüllverbrennung mit behördlicher Genehmigung.

**Verpackung**

Abfallschlüsselnummer: 15 01 02 = Verpackungen aus Kunststoff

Empfehlung: Entsorgung gemäß den behördlichen Vorschriften.  
Nicht kontaminierte und restentleerte Verpackungen können einer Wiederverwertung zugeführt werden.**ABSCHNITT 14: Angaben zum Transport****14.1 UN-Nummer**

entfällt

**14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung**

Nicht eingeschränkt

**14.3 Transportgefahrenklassen**

entfällt

**14.4 Verpackungsgruppe**

entfällt

**14.5 Umweltgefahren**

Meeresschadstoff: Nein

**14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender**

Kein Gefahrgut im Sinne dieser Transportvorschriften.

**14.7 Massengutbeförderung gemäß Anhang II des MARPOL-Übereinkommens 73/78 und gemäß IBC-Code**

keine Daten verfügbar

**EU-SICHERHEITSDATENBLATT**

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 und Verordnung (EU) Nr. 453/2010 (REACH)

**Elbesil Öl B 100 - 2000**

Artikelnummer 40XX/007-036

 Bearbeitet: 05.08.2013  
 Version: 5  
 Sprache: de-DE  
 Gedruckt: 09.08.2013

Seite: 7 von 7

**ABSCHNITT 15: Rechtsvorschriften****15.1 Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch****Nationale Vorschriften - Deutschland**

Lagerklasse: 10 = Brennbare Flüssigkeiten, soweit nicht LGK 3

Wassergefährdungsklasse: 1 = schwach wassergefährdend

**Nationale Vorschriften - Großbritannien**

DG-EA-Code (Hazchem): -

**Nationale Vorschriften - USA**

TSCA: listed

Gefahrbewertungssysteme: NFPA Hazard Rating:

Health: 1 (Slight)

Fire: 1 (Slight)

Reactivity: 0 (Minimal)

HMIS Version III Rating:

Health: 1 (Slight)

Flammability: 1 (Slight)

Physical Hazard: 0 (Minimal)

Personal Protection: A



HEALTH	1
FLAMMABILITY	1
PHYSICAL HAZARD	0
A	

**15.2 Stoffsicherheitsbeurteilung**

keine Daten verfügbar

**ABSCHNITT 16: Sonstige Angaben****Weitere Informationen**

Grund der letzten Änderungen:

Allgemeine Überarbeitung

Angelegt:

10.02.2010

**Datenblatt ausstellender Bereich**

Ansprechpartner: siehe Abschnitt 1: Auskunft gebender Bereich

Für Abkürzungen und Akronyme siehe ECHA:

Leitlinien zu den Informationsanforderungen und zur Stoffsicherheitsbeurteilung, Kapitel R.20 (Verzeichnis von Begriffen und Abkürzungen).

Die Angaben in diesem Datenblatt sind nach bestem Wissen zusammengestellt und entsprechen dem Stand der Kenntnis zum Überarbeitungsdatum. Sie sichern jedoch nicht die Einhaltung bestimmter Eigenschaften im Sinne der Rechtsverbindlichkeit zu.



www.sumdat.com/geprueft

### A.6.3. Datenblatt des Kontrastmittels

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/  
2006 (REACH)  
Druckdatum 15.02.2012  
Überarbeitet 15.02.2012  
**Helling Fluo H 800 Oel**

#### 1. BEZEICHNUNG DES STOFFES BZW. DER ZUBEREITUNG UND DES UNTERNEHMENS

**Handelsname** Helling Fluo H 800 Oel  
Art.-Nr. 0,5 Liter = 616.000.033  
Art.-Nr. 1 Liter = 616.000.034  
Art.-Nr. 10 Liter = 616.000.032

**Hersteller / Lieferant** Helling GmbH  
Spökerdamm 2, D-25436 Heidgraben  
Telefon +49 4122 9220, Telefax +49 4122 922201  
E-Mail info@helling.de  
Internet www.helling.de

**Auskunftgebender Bereich** Verkauf NDT  
Telefon +49 4122 922245  
Telefax +49 4122 922201  
E-Mail (sachkundige Person) info@helling.de

**Notfallauskunft** Zentrale  
Telefon +49 4122 9220

**Empfohlene(r) Verwendungszweck(e)**  
Zusatz von 500 - 2000 ppm  
Dichtigkeitsprüfung an Öl- und Treibstoffaggregaten

**Wirkung des Stoffes / der Zubereitung**  
Sichtbarmachung von Undichtigkeiten durch charakteristische Fluoreszenz

#### 2. MÖGLICHE GEFAHREN

**Zusätzliche Gefahrenhinweise für Mensch und Umwelt**  
Nicht unverdünnt in Gewässer gelangen lassen  
Empfehlung: 1:500 verdünnen

#### 3. ZUSAMMENSETZUNG/ANGABEN ZU BESTANDTEILEN

**Beschreibung**  
Mineralöldestillat, Fluoreszenz-Farbstoff

##### Gefährliche Inhaltsstoffe

CAS-Nr.	EG-Nr.	Bezeichnung	[Gew-%]	Einstufung gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 [CLP/GHS]
68411-75-6	270-45-4	C.I. Solvent Red 175	> 20	

**Zusätzliche Hinweise**  
Der vollständige Wortlaut der hier aufgeführten R-Sätze wird unter Punkt 16 wiedergegeben.

#### ! 4. ERSTE-HILFE-MASSNAHMEN

**Allgemeine Hinweise**  
Ständigen und langandauernden Hautkontakt vermeiden.

**Nach Einatmen**  
entfällt

**Nach Hautkontakt**  
Bei Berührung mit der Haut mit Wasser und Seife abwaschen.

**! Nach Augenkontakt**  
Unter Schutz des unverletzten Auges ausgiebig mit Wasser spülen.

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/  
2006 (REACH)

Druckdatum 15.02.2012

Überarbeitet 15.02.2012

**Helling Fluo H 800 Oel**

---

**Nach Verschlucken**

Im unwahrscheinlichen Fall des Verschluckens sofort Arzt hinzuziehen.

**Hinweise für den Arzt / Mögliche Symptome**

Rötung, Reizung, Schwellung von Haut oder Schleimhäuten

**Hinweise für den Arzt / Mögliche Gefahren**

Haut- und Schleimhautreizung bei längerer Einwirkung möglich.

**Hinweise für den Arzt / Behandlungshinweise**

Symptomatisch behandeln.

---

**5. MASSNAHMEN ZUR BRANDBEKÄMPFUNG**

**Geeignete Löschmittel**

ABC-Pulver

**Aus Sicherheitsgründen ungeeignete Löschmittel**

Wasser

**Besondere Gefährdungen durch den Stoff oder die Zubereitung selbst, seine Verbrennungsprodukte oder entstehende Gase**

Bei Brand sind gefahrbestimmende Rauchgase: Kohlenmonoxid ( CO )

**Besondere Schutzausrüstung bei der Brandbekämpfung**

Beim Löschen Atemschutz anlegen.

**Sonstige Hinweise**

keine

---

**6. MASSNAHMEN BEI UNBEABSICHTIGTER FREISETZUNG**

**Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen**

Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.

**Umweltschutzmaßnahmen**

Abtrennung über Ölscheider.

**Verfahren zur Reinigung**

Mechanisch aufnehmen. Reste mit Wasser und Netzmittelzusatz entfernen.

**Zusätzliche Hinweise**

keine

---

**7. HANDHABUNG UND LAGERUNG**

**Hinweise zum sicheren Umgang**

Bei sachgemässer Verwendung keine besonderen Massnahmen erforderlich.

**Hinweise zum Brand- und Explosionsschutz**

Das Produkt ist schwer entflammbar, jedoch brennbar.

**Anforderung an Lagerräume und Behälter**

Nur in Originalbehältern lagern

**Zusammenlagerungshinweise**

keine

**Weitere Angaben zu den Lagerbedingungen**

nicht bei Temperaturen unter 0°C lagern

**Lagerklasse** 10

**Angaben zur Lagerstabilität**

Lagerzeit: 12 Monate.

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/

2006 (REACH)

Druckdatum 15.02.2012

Überarbeitet 15.02.2012

**Helling Fluo H 800 Oel****8. BEGRENZUNG UND ÜBERWACHUNG DER EXPOSITION/PERSÖNLICHE SCHUTZAUSRÜSTUNG****Zusätzliche Hinweise zur Gestaltung technischer Anlagen**

Siehe Kapitel 7. ; keine darüberhinausgehenden Massnahmen erforderlich.

**Atemschutz**

nicht erforderlich

**Handschutz**

Durchdringungszeit: &gt;480 min

Empfehlung: Handschuhe aus 740 Dermatril, Schichtstärke mind. 0,1 mm.

**Augenschutz**

Bei Gefahr von Spritzern Schutzbrille verwenden

**Körperschutz**

im Allgemeinen nicht erforderlich

**Allgemeine Schutzmaßnahmen**

Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.

**Hygienemaßnahmen**

Bei der Arbeit nicht essen und trinken.

Nach der Arbeit gründlich waschen.

**! 9. PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN****Form**

Flüssigkeit

**Farbe**

rot

**Geruch**

petroleumartig

**Wichtige Angaben zum Gesundheits- und Umweltschutz sowie zur Sicherheit**

	Wert	Temperatur	bei	Methode	Bemerkung
<b>pH-Wert im Lieferzustand</b>					nicht anwendbar
<b>Säurezahl</b>					nicht anwendbar
<b>Erstarrungstemperatur</b>	-60 °C				
<b>Flammpunkt</b>	> 85 °C				
<b>Zündtemperatur</b>	204 °C				
<b>Untere Explosionsgrenze</b>	0,9 Vol-%				
<b>Obere Explosionsgrenze</b>	7,0 Vol-%				
<b>Dampfdruck</b>	0,04 hPa	20 °C			
<b>Dichte</b>	0,89 g/cm <sup>3</sup>	20 °C			
<b>Relative Dampfdichte</b>	> 5				
<b>Löslichkeit in Wasser</b>					nicht mischbar
<b>Löslichkeit / Andere</b>				polare Lösemittel	
<b>Verteilungskoeffizient (log POW)</b>					nicht bestimmt

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/  
2006 (REACH)  
Druckdatum 15.02.2012  
Überarbeitet 15.02.2012  
**Helling Fluo H 800 Oel**

	Wert	Temperatur	bei	Methode	Bemerkung
<b>Viskosität dynamisch</b>	25 - 100 mPa*s	25 °C			
<b>Lösemitteltrennprüfung</b>					nicht anwendbar
<b>Lösemittelgehalt</b>	0 %				
<b>Explosionsgefahr</b>					keine

#### 10. STABILITÄT UND REAKTIVITÄT

##### Zu vermeidende Bedingungen

Erwärmung über 100°C

##### Zu vermeidende Stoffe

Unverträglich mit starken Oxidations- und Reduktionsmitteln, starken Säuren und Basen

##### Gefährliche Zersetzungsprodukte

keine bei bestimmungsgemäßer Verwendung

#### 11. TOXIKOLOGISCHE ANGABEN

##### Akute Toxizität/Reizwirkung / Sensibilisierung

	Wert/Bewertung	Spezies	Methode	Bemerkung
<b>LD50 Akut Oral</b>	> 5000 mg/kg	Ratte		
<b>LD50 Akut Dermal</b>	> 5000 mg/kg	Kaninchen		
<b>LC50 Akut Inhalativ</b>	2,2 mg/l (4 h)	Ratte		keine Daten verfügbar
<b>Reizwirkung Haut</b>	leicht reizend	Kaninchen		
<b>Reizwirkung Auge</b>	leicht reizend	Kaninchenauge		
<b>Sensibilisierung Haut</b>				keine Daten verfügbar
<b>Sensibilisierung Atemwege</b>				keine Daten verfügbar

##### Subakute Toxizität - Cancerogenität

	Wert	Spezies	Methode	Bewertung
<b>Subakute Toxizität</b>				keine Daten verfügbar
<b>Subchronische Toxizität</b>				keine Daten verfügbar
<b>Chronische Toxizität</b>				keine Daten verfügbar
<b>Mutagenität</b>				keine
<b>Reproduktions- Toxizität</b>				keine
<b>Cancerogenität</b>				keine

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/

2006 (REACH)

Druckdatum 15.02.2012

Überarbeitet 15.02.2012

**Helling Fluo H 800 Oel****! 12. UMWELTBEZOGENE ANGABEN****Angaben zur Elimination (Persistenz und Abbaubarkeit)**

	Eliminationsgrad	Analysenmethode	Methode	Bewertung
<b>Physiko-chemische Abbaubarkeit</b>	nicht anwendbar			
<b>Biologische Abbaubarkeit</b>			OECD 301 B	nicht leicht abbaubar
<b>Leichte Abbaubarkeit</b>	keine Daten für die Zubereitung	verfügbar		
<b>Biologische Eliminierbarkeit</b>	keine Daten für die Zubereitung	verfügbar		

**Verhalten in Umweltkompartimenten**

Produkt kann in Organismen angereichert werden.

**Ökotoxische Wirkungen**

	Wert	Spezies	Methode	Bewertung
<b>Fisch</b>	LC50 > 5500 mg/l (96 h)	Oncorhynchus mykiss	OECD 203	
<b>Daphnie</b>	NOEC > 5000 mg/l (168 h)			
<b>Alge</b>	EC50 1000 mg/l (96)			
<b>Bakterien</b>				keine Daten für die Zubereitung verfügbar

**Verhalten in Kläranlagen**

Bei sachgemässer Einleitung geringer Konzentrationen in adaptierte biologische Kläranlagen sind Störungen der Abbauproduktivität von Belebtschlamm nicht zu erwarten.

**Atmungshemmung kommunalen Belebtschlamm**

	Wert	Methode	Bemerkung
<b>EC 50</b>			nicht bestimmt

**Weitere ökologische Hinweise**

	Wert	Methode	Bemerkung
<b>OC</b>			nicht bestimmt
<b>CSB</b>			nicht bestimmt
<b>BSB</b>			nicht bestimmt
<b>AOX-Wert</b>	kein		

**Enthält rezepturgemäß Schwermetalle und/oder Verbindungen gemäß der EG-Richtlinie (76/464EWG)**

keine

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/  
2006 (REACH)  
Druckdatum 15.02.2012  
Überarbeitet 15.02.2012  
**Helling Fluo H 800 Oel**

**! 13. HINWEISE ZUR ENTSORGUNG**

Abfallschlüssel	Abfallname
05 01 05*	verschüttetes Öl

Mit Stern (\*) markierte Abfälle gelten als gefährliche Abfälle im Sinne der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle.

**! Empfehlung für das Produkt**

Entsorgung zu thermischer Verwertung.

**! Empfehlung für die Verpackung**

Stoffliche Verwertung EAK-Schlüssel-Nr. 150102  
Vollständig entleerte Verpackungen können einem Recycling zugeführt werden.

**! Empfohlenes Reinigungsmittel**

Organ. Lösemittel, ggfs. Wasser mit Zusätzen

**! Allgemeine Hinweise**

Geringe Reste mit dem Behälter entsorgen

**! 14. ANGABEN ZUM TRANSPORT****Landtransport ADR/RID (GGVSEB)**

Kein Gefahrgut

**Seeschifftransport IMDG (GGVSee)**

nicht IMDG-Code unterstellt

**Lufttransport ICAO/IATA-DGR**

not restricted

**! 15. RECHTSVORSCHRIFTEN****! Gefährbestimmende Komponenten zur Etikettierung**

Destillate (Erdöl), mit Wasserstoff behandelte leichte naphthenhaltige

**! Kennzeichnung gemäß 67/548/EWG oder 1999/45/EG**

**Xn** Gesundheitsschädlich

**! R-Sätze**

65 Gesundheitsschädlich: kann beim Verschlucken Lungenschäden verursachen.

**! S-Sätze**

23 Dampf nicht einatmen.  
36/37 Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe und Schutzkleidung tragen.  
45 Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, dieses Etikett vorzeigen).

**Nationale Vorschriften**

**Störfallverordnung** nicht anwendbar aufgrund geringer Mengen

**! Technische Anleitung (TA) Luft Bemerkungen**

nicht anwendbar aufgrund geringer Mengen

**Wassergefährdungsklasse** 2 Anhang 2 VwVwS

**VOC Richtlinie**

**VOC Gehalt** -0 %  
**VOC Wert** -0 g/L

Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/

2006 (REACH)

Druckdatum 15.02.2012

Überarbeitet 15.02.2012

**Helling Fluo H 800 Oel**

---

**! 16. SONSTIGE ANGABEN**

**! Schulungshinweise**

die Angaben in diesem Sicherheitsdatenblatt verwenden

**! Empfohlene Verwendung und Beschränkungen**

Verwendung nur nach Gebrauchsanweisung unter Beachtung der Warnhinweise

**! Weitere Informationen**

Die Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse und dienen dazu, das Produkt im Hinblick auf die zu treffenden Sicherheitsvorkehrungen zu beschreiben. Sie stellen keine Zusicherung von Eigenschaften des beschriebenen Produktes dar.

**! Quellen der wichtigsten Daten**

Sicherheitsdatenblätter der Rohstoffe



1

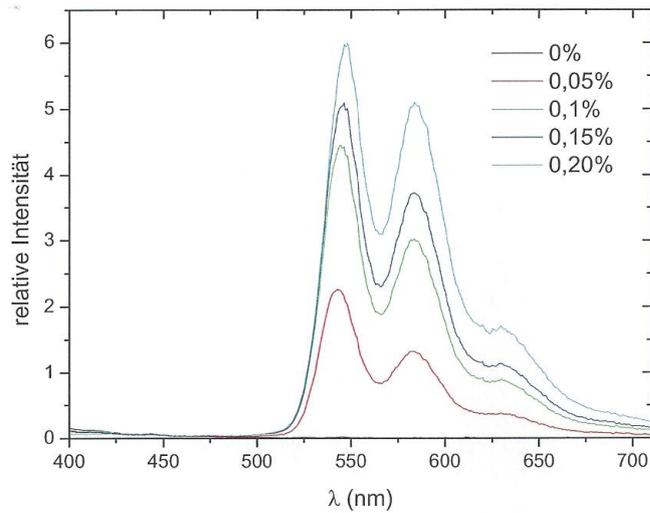


Abbildung 1: Spektrale Bestrahlungsstärken  $E_{\lambda}(\lambda)$  von 4965-Öl mit verschiedenen H800-Konzentrationen.



2000 ppm(0,2%)      1500ppm(0,15%)      1000ppm (0,1%)      500ppm (0,05%)      0ppm(0%)

Abbildung 1a: Anzeigevermögen von 4965-Öl mit verschiedenen H800-Konzentrationen.

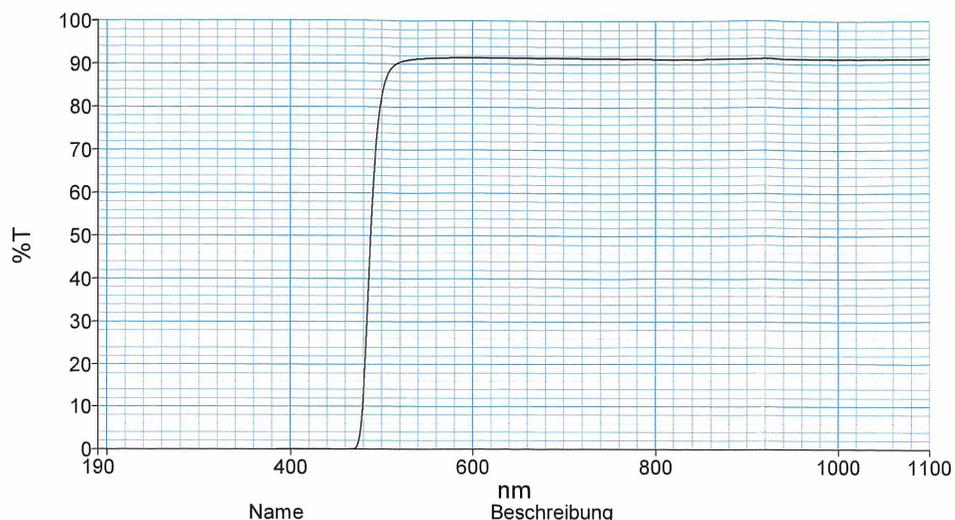
Öl 4965 zeigt nach einer Dotierung mit H800 Konzentrat unter UV-Bestrahlung (365 nm) eine Fluoreszenz im grün-gelb-roten Spektralbereich mit Hauptmaximum bei 546 nm und Nebenmaxima bei 584 und 631nm.

# Transmissionsmessung mit PerkinElmer® Lambda 35



A.6.4. Datenblatt des Farbglasfilters

Transmissionsspektrum (190 - 1100 nm)



Y500-13-0263\_2mm.Sample.Cycle1 Filter Y 500 (HEBO)

**LASER COMPONENTS GmbH**  
 Werner-von-Siemens-Str. 15  
 82140 Olching / Germany  
 Tel. +49 8142 2864-0  
 Fax +49 8142 2864-11  
 info@lasercomponents.com  
 www.lasercomponents.com

**LASER COMPONENTS GmbH**  
 Werner-von-Siemens-Str. 15  
 82140 Olching / Germany  
 Tel. +49 8142 2864-0  
 Fax +49 8142 2864-11  
 info@lasercomponents.com  
 www.lasercomponents.com

### Ergebnistabelle

Proben ID	Beschreibung	Size	Charge	T = 50 % bei
Y500-13-0263_2mm.Sample.Cycle1	Filter Y 500 (HEBO)	50,0 x 50,0 x 2,00 mm	Y500-13-0263_2mm	487,1

### Messparameter

Start Wellenlänge (nm)	1100
End Wellenlänge (nm)	190
Spalt (nm)	2
Scangeschw. (nm/min)	480
UV Lampe	Yes
Vis Lampe	Yes
Lampenwechsellpunkt (nm)	326

1407-2114-02

Anwender: Strässer

Methode: Transmission 190 - 1100 nm

Messung: 20-Sep-13 14:57:11

## A.6.5. Datenblatt der Druckmessumformer

Elektronische  
Druckmesstechnik

### Druckmessumformer Für allgemeine industrielle Anwendungen Typ A-10

WIKA Datenblatt PE 81.60



#### Anwendungen

- Maschinenbau
- Schiffsbau
- Mess- und Regelungstechnik
- Hydraulik und Pneumatik
- Pumpen und Kompressoren

#### Leistungsmerkmale

- Messbereiche von 0 ... 0,6 bis 0 ... 1.000 bar
- Nichtlinearität 0,25 % oder 0,5 %
- Ausgang 4 ... 20 mA, DC 0 ... 10 V, DC 0 ... 5 V und weitere
- Elektrischer Anschluss: Winkelstecker Form A und C, Rundstecker M12 x 1, Kabelausgang 2 m
- Prozessanschluss G 1/4 A DIN 3852-E, 1/4 NPT und weitere



Druckmessumformer Typ A-10

#### Beschreibung

Der Druckmessumformer Typ A-10 für allgemeine industrielle Anwendungen besticht nicht nur durch seine kompakte Bauform, vielmehr bietet er exzellente Qualität zu einem extrem günstigen Preis.

Der Anwender kann zwischen einer Nichtlinearität von 0,25 % oder 0,5 % wählen. Ein kostenloses Testprotokoll informiert über die bei der Fertigung aufgenommenen Messpunkte.

Der Typ A-10 ist durch die internationalen Zulassungen cULus und GOST-R für den weltweiten Einsatz gerüstet. Die notwendigen unterschiedlichen Druckeinheiten und Prozessanschlüsse für die jeweiligen Einsatzbedingungen sind kurzfristig verfügbar.

## Messbereiche

Relativdruck										
<b>bar</b>	<b>Messbereich</b>	<b>0 ... 0,6</b>	<b>0 ... 1</b>	<b>0 ... 1,6</b>	<b>0 ... 2,5</b>	<b>0 ... 4</b>	<b>0 ... 6</b>	<b>0 ... 10<sup>1)</sup></b>	<b>0 ... 16<sup>1)</sup></b>	
	Überlast-Druckgrenze	1,2	2	3,2	5	8	12	20	32	
	<b>Messbereich</b>	<b>0 ... 25<sup>1)</sup></b>	<b>0 ... 40</b>	<b>0 ... 60</b>	<b>0 ... 100</b>	<b>0 ... 160</b>	<b>0 ... 250</b>	<b>0 ... 400</b>	<b>0 ... 600</b>	
	Überlast-Druckgrenze	50	80	120	200	320	500	800	1.200	
	<b>Messbereich</b>	<b>0 ... 1.000</b>								
	Überlast-Druckgrenze	1.500								
<b>psi</b>	<b>Messbereich</b>	<b>0 ... 15</b>	<b>0 ... 25</b>	<b>0 ... 30</b>	<b>0 ... 50</b>	<b>0 ... 100</b>	<b>0 ... 160<sup>1)</sup></b>	<b>0 ... 200<sup>1)</sup></b>	<b>0 ... 300<sup>1)</sup></b>	
	Überlast-Druckgrenze	30	60	60	100	200	290	400	600	
	<b>Messbereich</b>	<b>0 ... 500</b>	<b>0 ... 1.000</b>	<b>0 ... 1.500</b>	<b>0 ... 2.000</b>	<b>0 ... 3.000</b>	<b>0 ... 5.000</b>	<b>0 ... 10.000</b>		
	Überlast-Druckgrenze	1.000	1.740	2.900	4.000	6.000	10.000	17.400		
Absolutdruck										
<b>bar</b>	<b>Messbereich</b>	<b>0 ... 1</b>	<b>0 ... 1,6</b>	<b>0 ... 2,5</b>	<b>0 ... 4</b>	<b>0 ... 6</b>	<b>0 ... 10</b>	<b>0 ... 16</b>	<b>0 ... 25</b>	
	Überlast-Druckgrenze	2	3,2	5	8	12	20	32	50	
<b>psi</b>	<b>Messbereich</b>	<b>0 ... 15</b>	<b>0 ... 25</b>	<b>0 ... 30</b>	<b>0 ... 50</b>	<b>0 ... 100</b>	<b>0 ... 150</b>	<b>0 ... 200</b>	<b>0 ... 300</b>	
	Überlast-Druckgrenze	30	60	60	100	200	290	400	600	
Vakuum- und +/- Messbereich										
<b>bar</b>	<b>Messbereich</b>	<b>-1 ... 0</b>	<b>-1 ... +0,6</b>	<b>-1 ... +1,5</b>	<b>-1 ... +3</b>	<b>-1 ... +5</b>				
	Überlast-Druckgrenze	2	3,2	5	8	12				
	<b>Messbereich</b>	<b>-1 ... +9</b>	<b>-1 ... +15</b>	<b>-1 ... +24</b>						
	Überlast-Druckgrenze	20	32	50						
<b>psi</b>	<b>Messbereich</b>	<b>-30 inHg ... 0</b>	<b>-30 inHg ... +15</b>	<b>-30 inHg ... +30</b>	<b>-30 inHg ... +60</b>	<b>-30 inHg ... +100</b>				
	Überlast-Druckgrenze	30	60	60	150	250				
	<b>Messbereich</b>	<b>-30 inHg ... +160</b>	<b>-30 inHg ... +200</b>	<b>-30 inHg ... +300</b>						
	Überlast-Druckgrenze	350	450	600						

1) Wird das Medium Wasser gemessen, empfiehlt sich eine erhöhte Überlast-Druckgrenze.

Die angegebenen Messbereiche sind auch in kg/cm<sup>2</sup>, MPa und kPa verfügbar.  
Weitere Messbereiche auf Anfrage erhältlich

### Vakuumfestigkeit

Ja

## Ausgangssignal

Signalart	Signal
Strom (2-Leiter)	4 ... 20 mA
Spannung (3-Leiter)	DC 0 ... 10 V
	DC 0 ... 5 V
	DC 1 ... 5 V
	DC 0,5 ... 4,5 V
Ratiometrisch (3-Leiter)	DC 0,5 ... 4,5 V

Weitere Ausgangssignale auf Anfrage erhältlich.

Je nach Signalart gelten folgende Bürden:

Strom (2-Leiter):  $\leq$  (Hilfsenergie - 8 V) / 0,02 A

Spannung (3-Leiter):  $>$  maximales Ausgangssignal / 1 mA

Ratiometrisch (3-Leiter):  $>$  4,5k

## Spannungsversorgung

### Hilfsenergie

Ausgangssignal	Hilfsenergie	
	Standard	Option
4 ... 20 mA	DC 8 ... 30 V	DC 8 ... 35 V <sup>2)</sup>
DC 0 ... 10 V	DC 14 ... 30 V	DC 14 ... 35 V
DC 0 ... 5 V	DC 8 ... 30 V	DC 8 ... 35 V
DC 1 ... 5 V	DC 8 ... 30 V	DC 8 ... 35 V
DC 0,5 ... 4,5 V	DC 8 ... 30 V	DC 8 ... 35 V
DC 0,5 ... 4,5 V ratiometrisch	DC 5 V $\pm$ 10 %	-

2) Nicht möglich bei Nichtlinearität 0,25 % BFSL

Die Versorgung des Druckmessumformers muss durch einen energiebegrenzten Stromkreis gemäß 9.3 der UL/EN/IEC 61010-1 oder LPS gemäß UL/EN/IEC 60950-1 oder Class 2 gemäß UL1310/UL1585 (NEC oder CEC) erfolgen. Die Stromversorgung muss für den Betrieb oberhalb 2.000 m geeignet sein, falls der Druckmessumformer ab dieser Höhe verwendet wird.

### Gesamtstromaufnahme

Strom (2-Leiter):           Signalstrom, max. 25 mA  
 Spannung (3-Leiter):    8 mA  
 Ratiometrisch (3-Leiter): 8 mA

## Genauigkeitsangaben

Der Typ A-10 ist optional mit einer verbesserten Nichtlinearität erhältlich. Je nach ausgewählter Nichtlinearität ergeben sich die folgenden Werte:

	Standard	Option
Nichtlinearität nach BFSL (IEC 61298-2)	$\leq \pm 0,5$ % der Spanne	$\leq \pm 0,25$ % der Spanne
Messabweichung des Nullsignals	Typisch: $\leq \pm 0,5$ % der Spanne Maximal: $\leq \pm 0,8$ % der Spanne	Typisch: $\leq \pm 0,15$ % der Spanne Maximal: $\leq \pm 0,4$ % der Spanne
Genauigkeit bei Raumtemperatur <sup>3)</sup>	$\leq \pm 1$ % der Spanne	$\leq \pm 0,5$ % der Spanne $\leq \pm 0,6$ % der Spanne (bei DC 0 ... 5 V)

3) Einschließlich Nichtlinearität, Hysterese, Nullpunkt- und Endwertabweichung (entspricht Messabweichung nach IEC 61298-2), kalibriert bei senkrechter Einbaulage mit Prozessanschluss nach unten

### Nichtwiederholbarkeit

$\leq 0,1$  % der Spanne

### Signalrauschen

$\leq \pm 0,3$  % der Spanne

### Temperaturfehler bei 0 ... 80 °C

- Typisch: 1 % der Spanne
- Maximal: 2,5 % der Spanne

### Langzeitdrift

$\leq \pm 0,1$  % der Spanne

## Zeitverhalten

### Einschwingzeit

< 4 ms

### Einschaltzeit

< 15 ms

## Referenzbedingungen (nach IEC 61298-1)

### Temperatur

15 ... 25 °C

### Luftdruck

860 ... 1.060 mbar

### Luftfeuchte

45 ... 75 % relativ

### Hilfsenergie

DC 24 V

### Einbaulage

beliebig

## Einsatzbedingungen

### Schutzart (nach IEC 60529)

siehe Tabelle „Spezifikationen“

### Vibrationsfestigkeit

10 g (IEC 60068-2-6, bei Resonanz) <sup>4)</sup>

20 g auf Anfrage erhältlich <sup>5)</sup>

4) Bei GL Zulassung und Messbereich 0 ... 0,6 bar nur mit Genauigkeit 1% machbar

5) Bei GL Zulassung nur für Messbereich > 0 ... 1 bar machbar

### Schockfestigkeit

500 g (IEC 60068-2-27, mechanisch)

### Lebensdauer

10 Millionen Lastwechsel

### Temperaturen

Zulässige Temperaturbereiche		
	Standard	Option
Umgebung	0 ... +80 °C	-30 ... +100 °C
Medium	0 ... +80 °C	-30 ... +100 °C
Lagerung	-20 ... +80 °C	-30 ... +100 °C

## Prozessanschlüsse

Norm	Gewindegröße
EN 837	G 1/6 B <sup>6)</sup>
	G 1/4 B
	G 1/4 Innengewinde
	G 1/4 Innengewinde mit Flanschanschluss <sup>7)</sup>
	G 3/8 B
DIN 3852-E <sup>8)</sup>	G 1/2 B
	G 1/4 A
ANSI/ASME B1.20.1	G 1/2 A
	M14 x 1,5
	1/8 NPT <sup>6)</sup>
DIN 16288	1/4 NPT
	1/4 NPT Innengewinde
ISO 7	1/2 NPT
	M20 x 1,5
	R 1/4
KS	R 3/8
	R 1/2
	PT 1/4
SAE <sup>8) 9)</sup>	PT 1/2
	PT 3/8
	7/16-20 UNF O-Ring BOSS

6) Maximaler Messbereich 400 bar

7) Maximaler Messbereich 100 bar

8) Maximale Überlastgrenze von 600 bar

9) Maximal zulässige Temperatur -10 ... +100 °C

Alle Prozessanschlüsse verfügen standardmäßig über eine Kanalbohrung mit Durchmesser 3,5 mm.

Optionale Durchmesser für:

- G 1/4 A DIN 3852-E: Ø 6 mm, Ø 0,6 mm, Ø 0,3 mm
- 1/4 NPT: Ø 6 mm, Ø 0,6 mm, Ø 0,3 mm

### Dichtungen

Für die Prozessanschlüsse folgender Normen stehen die aufgelisteten Dichtwerkstoffe zur Verfügung.

Norm	Standard	Option
EN 837	Kupfer	CrNi-Stahl
DIN 3852-E	NBR	FKM
SAE	FKM	-

Die unter „Standard“ aufgelisteten Dichtungen sind im Lieferumfang enthalten.

## Elektrische Anschlüsse

### Spezifikationen

Bezeichnung	Schutzart	Aderquerschnitt	Kabeldurchmesser	Kabelmaterial
<b>Winkelstecker DIN 175301-803 A</b>				
■ mit Gegenstecker	IP 65	bis max. 1,5 mm <sup>2</sup>	6 ... 8 mm	-
■ mit angespritztem Kabel	IP 65	3 x 0,75 mm <sup>2</sup>	6 mm	PUR
<b>Winkelstecker DIN 175301-803 C</b>				
■ mit Gegenstecker	IP 65	bis max. 0,75 mm <sup>2</sup>	4,5 ... 6 mm	-
■ mit angespritztem Kabel	IP 65	4 x 0,5 mm <sup>2</sup>	6,2 mm	PUR
<b>Rundstecker M12 x 1 (4-polig)</b>				
■ ohne Gegenstecker	IP 67	-	-	-
■ gerade mit angespritztem Kabel	IP 67	3 x 0,34 mm <sup>2</sup>	4,3 mm	PUR
■ gewinkelt mit angespritztem Kabel	IP 67	3 x 0,34 mm <sup>2</sup>	4,3 mm	PUR
<b>Kabelausgang</b>				
■ ungeschirmt <sup>10)</sup>	IP 67	3 x 0,34 mm <sup>2</sup>	4 mm	PUR
■ OEM-Ausführung, ungeschirmt <sup>11)</sup>	IP 67	3 x 0,14 mm <sup>2</sup>	2,85 mm	TPU

10) Nicht machbar mit GL Zulassung  
11) bis max. 90 °C

Die angegebenen Schutzarten (nach IEC 60529) gelten nur im gesteckten Zustand mit Gegensteckern entsprechender Schutzart.

Gegenstecker (mit und ohne Kabel) sind auch separat als Zubehör erhältlich.  
Kabellängen jeweils in 2 m oder 5 m lieferbar

### Kurzschlussfestigkeit

S+ gegen 0V

### Verpolschutz

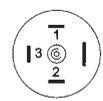
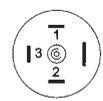
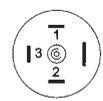
U<sub>B</sub> gegen 0V

### Isolationsspannung

DC 500 V

### Anschlussschemen

Alle Stecker mit angespritztem Kabel haben die gleiche Farbbelegung wie der ungeschirmte Kabelausgang.

<p><b>Winkelstecker DIN 175301-803 A</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>2-Leiter</th> <th>3-Leiter</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td> <p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 2</p> <p>S+ -</p> </td> <td> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> </td> </tr> </tbody> </table>		2-Leiter	3-Leiter		<p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 2</p> <p>S+ -</p>	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>	<p><b>Kabelausgang, ungeschirmt</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>2-Leiter</th> <th>3-Leiter</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td> <p>U<sub>B</sub> braun</p> <p>0V blau</p> <p>S+ -</p> </td> <td> <p>braun</p> <p>blau</p> <p>schwarz</p> </td> </tr> </tbody> </table>		2-Leiter	3-Leiter		<p>U<sub>B</sub> braun</p> <p>0V blau</p> <p>S+ -</p>	<p>braun</p> <p>blau</p> <p>schwarz</p>
	2-Leiter	3-Leiter											
	<p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 2</p> <p>S+ -</p>	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>											
	2-Leiter	3-Leiter											
	<p>U<sub>B</sub> braun</p> <p>0V blau</p> <p>S+ -</p>	<p>braun</p> <p>blau</p> <p>schwarz</p>											
<p><b>Winkelstecker DIN 175301-803 C</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>2-Leiter</th> <th>3-Leiter</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td> <p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 2</p> <p>S+ -</p> </td> <td> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> </td> </tr> </tbody> </table>		2-Leiter	3-Leiter		<p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 2</p> <p>S+ -</p>	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>	<p><b>Kabelausgang, OEM-Ausführung, ungeschirmt</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>2-Leiter</th> <th>3-Leiter</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td> <p>U<sub>B</sub> braun</p> <p>0V blau</p> <p>S+ -</p> </td> <td> <p>braun</p> <p>blau</p> <p>schwarz</p> </td> </tr> </tbody> </table>		2-Leiter	3-Leiter		<p>U<sub>B</sub> braun</p> <p>0V blau</p> <p>S+ -</p>	<p>braun</p> <p>blau</p> <p>schwarz</p>
	2-Leiter	3-Leiter											
	<p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 2</p> <p>S+ -</p>	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>											
	2-Leiter	3-Leiter											
	<p>U<sub>B</sub> braun</p> <p>0V blau</p> <p>S+ -</p>	<p>braun</p> <p>blau</p> <p>schwarz</p>											
<p><b>Rundstecker M12 x 1 (4-polig)</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>2-Leiter</th> <th>3-Leiter</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td> <p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 3</p> <p>S+ -</p> </td> <td> <p>1</p> <p>3</p> <p>4</p> </td> </tr> </tbody> </table>		2-Leiter	3-Leiter		<p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 3</p> <p>S+ -</p>	<p>1</p> <p>3</p> <p>4</p>	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>U<sub>B</sub></td> <td>Positiver Versorgungsanschluss</td> </tr> <tr> <td>0V</td> <td>Negativer Versorgungsanschluss</td> </tr> <tr> <td>S+</td> <td>Analogausgang</td> </tr> </tbody> </table>	U <sub>B</sub>	Positiver Versorgungsanschluss	0V	Negativer Versorgungsanschluss	S+	Analogausgang
	2-Leiter	3-Leiter											
	<p>U<sub>B</sub> 1</p> <p>0V 3</p> <p>S+ -</p>	<p>1</p> <p>3</p> <p>4</p>											
U <sub>B</sub>	Positiver Versorgungsanschluss												
0V	Negativer Versorgungsanschluss												
S+	Analogausgang												

## Werkstoffe

### Messstoffberührte Teile

< 10 bar: CrNi-Stahl 316L  
 ≥ 10 bar: CrNi-Stahl 316L und 13-8 PH

### Nicht messstoffberührte Teile

- CrNi-Stahl 316L
- HNBR
- PA

Werkstoffe für Dichtungen siehe „Prozessanschlüsse“  
 Werkstoffe der Kabel siehe „Elektrische Anschlüsse“

### Druckübertragungsmedium

< 0 ... 10 bar relativ: Synthetisches Öl  
 ≤ 0 ... 25 bar absolut: Synthetisches Öl  
 ≥ 0 ... 10 bar relativ: Trockene Messzelle

## CE-Konformität

### Druckgeräterichtlinie

97/23/EG

### EMV-Richtlinie

2004/108/EG EN 61326 Emission (Gruppe 1, Klasse B) und  
 Störfestigkeit (industrieller Bereich)

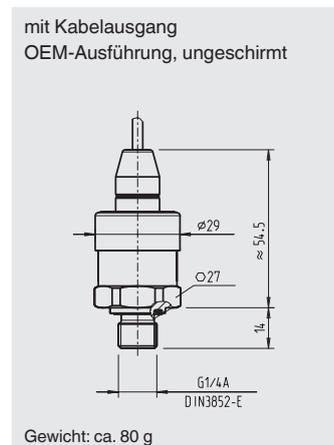
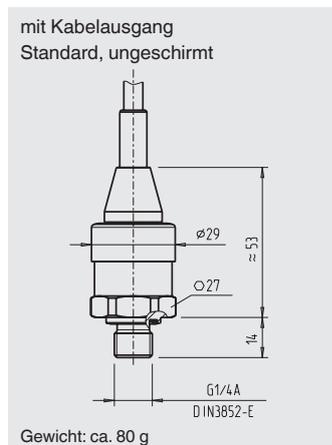
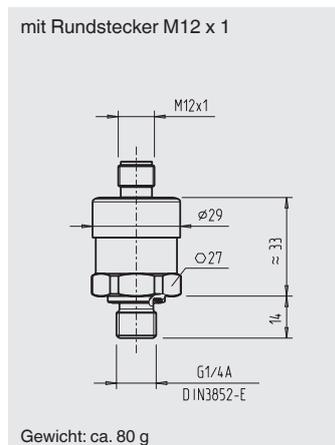
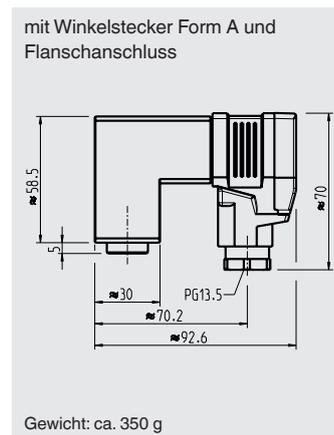
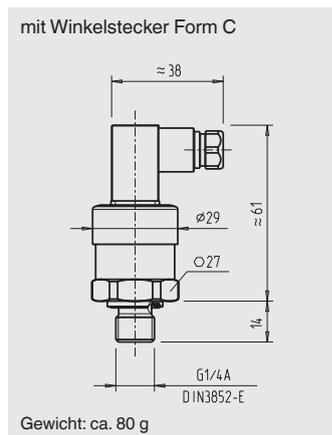
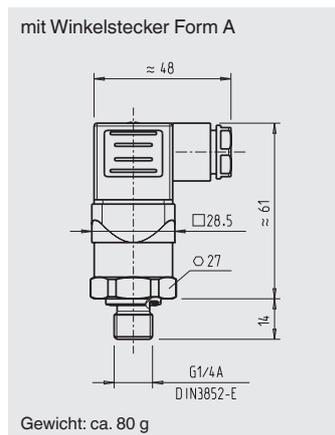
## Zulassungen

- **cULus**, Sicherheit (z. B. elektr. Sicherheit, Überdruck, ...) USA, Kanada
- **GOST-R**, Einfuhrzertifikat, Russland
- **GL**, Schiffe, Schiffbau (z. B. Offshore), Deutschland

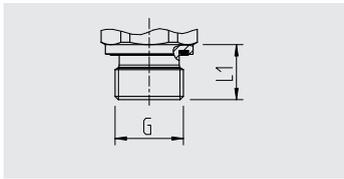
Zulassungen siehe Internetseite.

## Abmessungen in mm

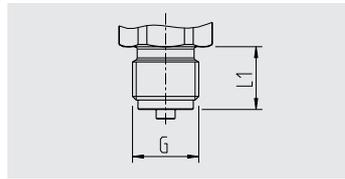
### Druckmessumformer



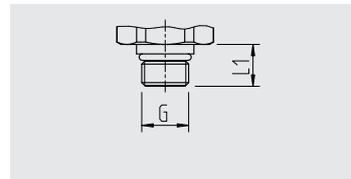
**Prozessanschlüsse**



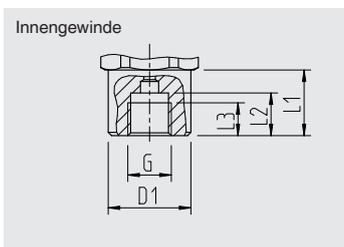
G	L1
G ¼ A DIN 3852-E	14
G ½ A DIN 3852-E	17
M14 x 1,5	14



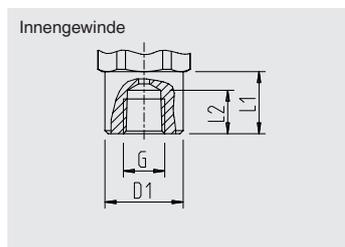
G	L1
G ¼ B EN 837	13
G ⅜ B EN 837	16
G ½ B EN 837	20
M20 x 1,5	20



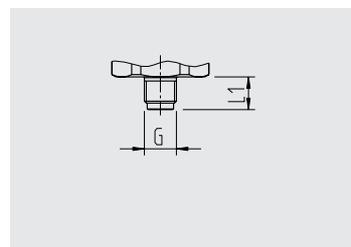
G	L1
7/16-20 UNF BOSS	12,85



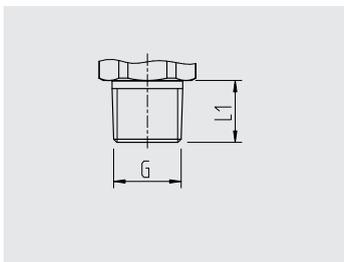
G	L1	L2	L3	D1
G ¼ EN 837	20	13	10	Ø 25



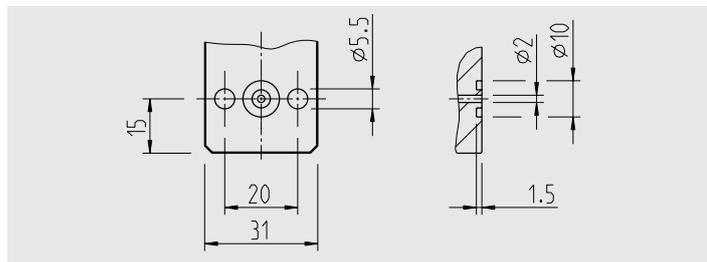
G	L1	L2	D1
¼ NPT	20	14	Ø 25



G	L1
G ⅜ B EN 837	10



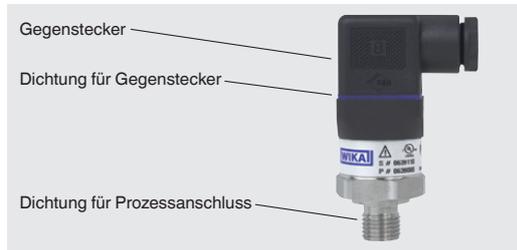
G	L1
⅛ NPT	10
¼ NPT	13
½ NPT	19
R ¼	13
R ⅜	15
R ½	19
PT ¼	13
PT ⅜	15
PT ½	19



G ¼ innen mit Flansanschluss Abmessungen siehe Zeichnung

Angaben zu Einschraubblöchern und Einschweißstutzen siehe Technische Information IN 00.14 unter [www.wika.de](http://www.wika.de)

## Zubehör und Ersatzteile



### Gegenstecker

Bezeichnung	Bestellnummer		
	ohne Kabel	mit 2 m Kabel	mit 5 m Kabel
<b>Winkelstecker DIN 175301-803 C</b>	1439081 <sup>12)</sup>	11225823	11250194
<b>Winkelstecker DIN 175301-803 A</b>			
■ mit Verschraubung, metrisch	11427567	11225793	11250186
■ mit Verschraubung, conduit	11022485	-	-
<b>Rundstecker M12 x 1, 4-polig</b>			
■ gerade	2421262	11250780	11250259
■ gewinkelt	2421270	11250798	11250232

12) Stecker nicht für A-10 mit GL-Zulassung zulässig.

### Dichtungen für Gegenstecker

Bezeichnung	Bestellnummer
Winkelstecker DIN 175301-803 A	1576240
Winkelstecker DIN 175301-803 C	11169479

### Dichtungen für Prozessanschluss

Bezeichnung	Bestellnummer			
	Cu	CrNi-Stahl	NBR	FKM
G ¼ EN 837	11250810	11250844	-	-
M14 x 1,5	-	-	1537857	1576534
G ½ EN 837	11250861	11251042	-	-
M20 x 1,5	11250861	11251042	-	-
G ¾ EN 837	11251051	-	-	-
G ¼ DIN 3852-E	-	-	1537857	1576534
G ½ DIN 3852-E	-	-	1039067	1039075

Nur die aufgelisteten Zubehör- und Ersatzteile verwenden, ansonsten führt dies zum Verlust der Zulassung.

### Bestellangaben

Typ / Messbereich / Ausgangssignal / Hilfsenergie / Nichtlinearität / Temperaturbereich / Prozessanschluss / Dichtung / Elektrischer Anschluss

© 2011 WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, alle Rechte vorbehalten.  
Die in diesem Dokument beschriebenen Geräte entsprechen in ihren technischen Daten dem derzeitigen Stand der Technik.  
Änderungen und den Austausch von Werkstoffen behalten wir uns vor.



**WIKAL Alexander Wiegand SE & Co. KG**  
Alexander-Wiegand-Straße 30  
63911 Klingenberg/Germany  
Tel. +49 9372 132-0  
Fax +49 9372 132-406  
info@wika.de  
www.wika.de

## A.7. Daten-DVD

Auf der Daten-DVD befinden sich folgende Dateien:

- Datenblätter der verwendeten Materialien
- Kameraeinstellungen der *uEye XS*
- Makros zur automatisierten Versuchsauswertung
- CAD-Dateien und technische Zeichnungen der konstruierten Bauteile
- ausgewählte Versuchsvideos
- Messdaten der Druckmessumformer
- Thermo-Hygro-Barometer-Messdaten
- digitale Version der Arbeit