



**FAKULTA STROJNÍ**  
**ZÁPADOČESKÉ**  
**UNIVERZITY**  
**V PLZNI**

# Disertační práce

k získání akademického titulu doktor  
ve studijním programu: Stavba strojů a zařízení

**INNOVATIVE DICHTKONZEPTE EINES COMMON RAIL  
HOCHDRUCKINJEKTORS**

**INOVATIVNÍ TĚSNIČÍ KONCEPTY VYSOKOTLAKÉHO  
VSTRIKOVACÉ TYPU COMMON RAIL**

**Ing. Zdeněk Reif**

Školitel: doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.

Plzeň, 2012

# Prohlášení o autorství

## Erklärung über die Urheberschaft

Předkládám tímto k posouzení disertační práci, jejíž rámcové téma je „Vysokotlaký injektor common rail“.

Tato práce je koncipována dle požadavků Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni, tj. obsahuje zejména shrnutí a zhodnocení poznatků ve studované oblasti a seznam souvisejících publikací.

Současně je přiložen seznam mých dalších aktivit a činností souvisejících s mým dosavadním prezenčním studiem na Západočeské univerzitě v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto doktorskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

Ich reiche diese Arbeit mit dem Thema „Hochdruck Common Rail Injektor“ zur Bewertung ein.

Diese Arbeit wurde nach den Anforderungen der Studien- und Prüfungsordnung der Westböhmisches Universität in Pilsen verfasst, d.h. sie beinhaltet insbesondere eine Zusammenfassung und Bewertung der Feststellungen aus dem untersuchten Fachbereich und eine Liste von zusammenhängenden Publikationen.

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Doktorarbeit selbstständig unter Anwendung der im Literaturverzeichnis angeführten Fachliteratur ausgearbeitet habe.

V Plzni dne / In Pilsen am:

podpis autora / Unterschrift des Autors

## Upozornění

### Urheberrechte

Podle Zákona o právu autorském. č.121/2000 Sb. § 12-17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků doktorské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora, firmy MBtech Powertrain GmbH & Co. KGaA a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Nach dem Gesetz über Urheberrecht Nr. 121/2000 des Gesetzbuches der Tschechischen Republik § 12-17 und dem Hochschulgesetz Nr. 111/1998 des Gesetzbuches der Tschechischen Republik ist die gesellschaftliche Nutzung der Ergebnisse der Doktorarbeit, inklusive der angeführten wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisse oder jeglicher Umgang mit diesen ausschließlich aufgrund eines Urhebervertrags und unter Zustimmung des Autors, der Firma MBtech Powertrain GmbH & Co. KGaA und der Fakultät für Maschinenbau der Westböhmisches Universität in Pilsen möglich.



# Zusammenfassung

Dieselmotoren stellen die bedeutendste Art von Triebwerken der zivilen See- und Binnenschiffe dar. Angesichts des von ihnen verbrauchten Brennstoffs stellen sie zugleich auch eine bedeutende Schadstoffquelle dar. Eine der Möglichkeiten zur Reduzierung der Partikelemissionen dieser Motoren ist die Erhöhung des Einspritzdrucks. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Suche eines neuen Dichtkonzepts für den Zusammenbau eines Common Rail (CR) Injektors eines mittelschnelllaufenden Dieselmotors im Leistungsbe- reich 500 – 1500 *kW/Zylinder*.

Die höchsten Einspritzdrücke der heutigen Common Rail Systeme, etwa 2100 – 2500 *bar*, werden in modernen LKW-Motoren erreicht. Obwohl das grundlegende Funktionsprinzip der Injektoren für Fahrzeug- und Schiffsmotoren gleich ist, kann die Technologie, mit welcher dieser hoher Druck erreicht worden ist, nicht in allen Fällen als direkt übertrag- bar aufgefasst werden. Der Grund dafür sind nicht nur unterschiedliche Abmessungen der Injektoren, sondern auch die Arbeitsbedingungen und Anforderungen, die auf sie gestellt werden.

CR-Injektoren sind per Magnetventil oder Piezoaktuator gesteuerte hydraulische Sys- teme, in denen der einzuspritzende Kraftstoff meistens auch die Rolle der Arbeitsflüs- sigkeit für die Umsetzung des Arbeitshubes übernimmt. Diese Verbindung ermöglicht eine einfachere Bauweise, verursacht aber zugleich Schwierigkeiten, insbesondere hohe mechanische und thermische Belastung, Werkstoffermüdung und Korrosion.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als Ausgangspunkt ein Bauteil eines bestehenden Prototypeninjektors an Schwachstellen untersucht und seine Geometrie optimiert um die Lebensdauer zu erhöhen. Dies diente als Grundlage für das Ableiten von vereinfachten Versuchsproben. Anschließend wurden vier innovative Dichtkonzepte entworfen und einer 2D und 3D Finite Element Method (FEM)-Simulation mit Hinblick auf ihre Dichtwirkung unterzogen. Von zwei Dichtkonzepten wurden Versuchsproben gefertigt und auf einem eigens aufgebauten Prüfstand experimentell untersucht.

# Anotace

Vznětové motory zaujímají první místo mezi pohonnými jednotkami civilních námořních a říčních plavidel. Vzhledem k jejich používanému palivu, kterým je často mazut, představují také významný činitel ve znečišťování životního prostředí. Jedna z možností, jak snížit emise tuhých částic produkované těmito motory, je zvýšení vstřikovacího tlaku. Tato práce se věnuje hledání nového těsnicího konceptu pro sestavu vstřikovacího injektoru Common Rail pro středněotáčkové vznětové motory výkonnostní třídy 500 – 1500 *kW/válec*.

Nejvyšší vstřikovací tlak dnešních systémů typu Common Rail, přibližně 2100 – 2500 *bar*, dosahují moderní motory nákladních silničních vozidel. Ačkoli je základní funkční princip injektorů lodních i vozidlových motorů shodný, nelze považovat použitou technologii jako volně přenositelnou mezi těmito dvěma odvětvími. Důvodem jsou nejen odlišné rozměry injektorů, ale též pracovní podmínky a požadavky, které jsou na ně kladeny.

Vstřikovače typu Common Rail jsou hydraulické systémy ovládané magnetickým ventilem nebo aktuátorem s piezokrystalem, ve kterých vstřikované palivo zároveň plní roli pracovního media pro pohon pracovního zdvihu jehly injektoru. Toto propojení umožňuje jednodušší stavbu, zároveň však přináší komplikace, především vysoké mechanické a teplotní zatížení komponent, únavu materiálu a korozi.

V rámci této práce byl nejprve díl existujícího prototypu vstřikovače zkoumán za účelem odhalení slabých míst a jeho geometrie byla optimalizována pro zvýšení životnosti. Tento díl poté sloužil jako výchozí bod pro odvození zjednodušených zkušebních vzorků. Byly navrženy 4 inovativní těsnicí koncepty, u kterých byla prostřednictvím 2D a 3D analýzy pomocí metody konečných prvků předpovězena míra jejich těsnicích vlastností. U dvou z těchto konceptů byly zhotoveny zkušební vzorky a podrobeny zkouškám na zvlášť zkonstruovaném zkušebním zařízení.

## Summary

The diesel combustion engines are presently the main means of powering the civilian naval and river fleet. Due to the fuel used, in many cases marine fuel oil, they are a significant contributor to environment pollution. One of the possibilities to lower the emissions of particulate matter of those engines is the increase in injection pressure. This thesis attempts to find a new sealing concept for the Common-Rail-Injector assembly of medium speed diesel engines with the power output of about 500 – 1500 *kW/cylinder*.

The highest injection pressure of State-of-the-Art Common Rail injectors, about 2500 *bar*, is achieved in modern truck engines. Even though the basic principle of injectors in marine and on-road engines is the same, the solution cannot be assumed directly transferrable between those two applications. The reason is not only the different size of the injectors but also the working conditions and requirements.

The CR-injectors are hydraulic systems, controlled by a magnetic valve or a piezo actuator, in which the injected fuel simultaneously acts as the driving fluid of the needle stroke. This combination enables a simplified design, on the other hand causes complications, especially high mechanical wear, material fatigue and corrosion.

This thesis uses an actual prototype injector as a starting point. A component of the injector has been evaluated and optimized as to fatigue life. This component was subsequently simplified into a specimen for the testing of sealing concepts. A total of four concepts has been devised and their sealing potential analyzed using 2D and 3D FEM analysis. Two of the concepts have been developed into hardware test specimens and their behavior evaluated by means of an especially designed test bed.

# Glossary

- 55A, 55B** Variante eines neuen Dichtkonzepts mit Dichtrillen. 31, 55, 74, 78, 85, 91, 124
- 5A, 5B** Variante eines neuen Dichtkonzepts mit Dichtrillen. 55, 59, 74, 78, 80, 85, 91, 124
- 6A, 6B** Variante eines neuen Dichtkonzepts mit sacklochartiger Geometrie. 31, 59, 87, 91, 124
- AF** Autofrettage. 50, 51
- BRT** Bruttoregistertonne. 11
- C** Bewertungskriterium der Kostenintensität. 31
- Catfines** Catfines oder Cat fines - Aluminium und Silizium Verbindungen zur katalytischen Aufspaltung von komplexen Kohlen-Wasserstoff Molekülen des Schweröls in einfachere.. 34
- CR** Common Rail. II, IV, 12–14, 16, 17, 22, 25, 26, 67
- D2T** Automatisierungssystem für Prüfstände. 62
- E2** Variante eines neuen Dichtkonzepts mit eingelegten Dichtelementen. 55, 59, 98, 99, 109, 124
- EDS** Engineering Design Science. 28, 71
- FEM** Finite Element Method. II, IV, 26, 55, 71, 75, 86, 89, 94, 95, 119, 123–125
- Geo 3** Variante eines neuen Dichtkonzepts mit integrierter Dichtlippe. 31, 55, 59, 111, 114, 117, 119
- HD** Hochdruck. 55, 59, 62, 86
- LKW** Lastkraftwagen. 11
- Marpol 73/78** Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe. 11, 25

MMC Metal Matrix Composites. 49

Nfz Nutzfahrzeug. 16

PCV Druckregelventil am Common Rail des Hochdruckerzeuges. 62

PD Pumpe-Düse. 13

PKW Personenkraftwagen. 11, 14, 21

PLD Pumpe-Leitung-Düse. 13

PM Pulvermetalurgie. 48

Prescale Messfolie zur Bestimmung des Kontaktdrucks zwischen zwei Bauteilen. 65

Q Bewertungskriterium der Qualität. 28, 31

SZ Schwärzungszahl. 25

T Bewertungskriterium der Zeitaufwendigkeit. 28, 31

TrP Transformationsprozess. 28

TS Technische System. 28

VCV Mengengrenzungsventil der Hochdruckpumpe des Hochdruckerzeugers. 62

VHCF Very High Cycle Fatigue. 38

# Symbolverzeichnis

$\Delta\sigma$	Beanspruchungsbereich [MPa].
$\delta_a$	Spannungsamplitude [MPa].
$\delta_m$	Mittelspannung [MPa].
$\epsilon_f$	Zyklischer Duktilitätskoeffizient [1].
$\epsilon_{ap}$	Amplitude der plastischen Deformation [1].
$\epsilon_{pAF}$	Plastische Deformation nach Autofrettage [1]
$\eta$	Dynamische Viskosität [Pa·s].
$\nu$	Poissonzahl [1]
$\rho$	Radius der Rissfront [ $\mu\text{m}$ ]
$\sigma_a$	Amplitude der zyklischen Belastung [MPa].
$\sigma_f$	Dauerfestigkeitsgrenze [MPa].
$\sigma_r$	Radialspannung [MPa]
$\sigma_t$	Tangentialspannung [MPa]
$\sigma_{AF}$	Restspannung nach Autofrettage [MPa]
$A$	Amplitudenverhältnis [1].
$BHN$	Härte nach Brinell [HB]
$K_I$	Spannungsintensitätsfaktor für den Spannungsmodus $I$ [ $\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ]
$M$	Biegemoment [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ]
$N$	Lastspielzahl [1].
$p_a$	Amplitude der Druckbelastung [bar].
$p_m$	Mittelwert der Druckbelastung [bar].
$R$	Spannungsverhältnis [1].

# Benutzte Software

- Pro/Engineer Wildfire 3.0
- Medina 8
- Permas 12
- ANSYS 11.0
- D2T Morphée
- L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X
- MS Office 2007, 2010

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
<b>1. Einführung</b>	<b>11</b>
1.1. Einspritzsysteme	12
1.1.1. Mittelschnelllaufende Viertakt – Dieselmotoren in der Schifffahrt	12
1.1.2. Das Common Rail Einspritzsystem	12
1.1.3. Injektoren	16
1.1.4. Injektoren für Großmotoren	21
1.1.5. Umweltschutz	22
<b>2. Aufgabenerfassung</b>	<b>26</b>
2.1. Aufgabenstellung	26
2.2. Engineering Design Science	28
<b>3. Analyse und allgemeine Lösungssuche</b>	<b>33</b>
3.1. Einsatzbedingungen, Belastung	33
3.1.1. Druckverlauf	33
3.1.2. Eigenschaften des Schweröls	34
3.1.3. Temperatur	35
3.1.4. Festlegung und Beschreibung des zu analysierenden Bauteils	35
3.2. Werkstoffermüdung und das Bruchverhalten	36
3.2.1. Wöhlerkurve in Licht moderner Untersuchungen	36
3.2.2. Einflüsse auf die Schwingfestigkeit	39
3.2.3. Bruchmechanik	43
3.3. Werkstoffwahl	46
3.3.1. Stahl	46
3.3.2. Gesinterte Werkstoffe	48
3.3.3. Verbundwerkstoffe	49
3.4. Fertigungsverfahren	50
3.4.1. Autofrettage	50
3.4.2. Wärmebehandlung	51
<b>4. Messverfahren</b>	<b>53</b>
4.1. Aufbereitung der Versuche und Berechnungen	53
4.1.1. Eingesetzte Proben	53
4.1.2. Optimierung der Probengeometrie	53
4.1.3. Probenaufbau für Messungen am Prüfstand	57
4.1.4. Prüfstand	60
4.1.5. Das Messverfahren	63



<b>5. Neue Dichtkonzepte</b>	<b>68</b>
5.1. Bestehendes Dichtkonzept	68
5.1.1. Simulation des Verhaltens des bestehenden Dichtkonzepts	68
5.2. Ideensuche zu neuen Dichtkonzepten	70
5.2.1. Dichtung	70
5.2.2. Optimierung der Dichtfläche	71
5.2.3. Erstellen eines neuen Dichtkonzepts	71
5.2.4. Untersuchungen neuartiger Dichtkonzepte	72
5.3. Dichtrillen	74
5.3.1. Möglichkeiten der Berechnung	74
5.3.2. Messergebnisse an Proben mit Dichtrillen	78
5.3.3. Zusammenfassung der Ergebnisse	85
5.4. Sacklochartige Geometrie	86
5.4.1. Einfluss auf die Dichteigenschaften	87
5.4.2. Berechnung des Kontaktdrucks zwischen zwei Bauteilen	89
5.4.3. Messungen an Proben mit Sacklochartiger Geometrie	91
5.4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse	94
5.5. Dichtung durch eingelegte Dichtelemente	95
5.5.1. Verlauf des Kontaktdrucks bei unterschiedlichen Varianten	95
5.5.2. Detaillierte Berechnungen der Variante E2	99
5.5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse	108
5.6. Dichtung durch integrierte Dichtlippe	110
5.6.1. Dichtlippe mit theoretischer Geometrie	110
5.6.2. Kontaktdruckuntersuchung fertigungsgerechter Varianten	111
5.6.3. Detaillierte Berechnungen der Variante Geo 3	117
5.6.4. Zusammenfassung der Ergebnisse	119
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>123</b>
6.1. Zusammenfassung des Arbeitsumfangs	123
6.2. Zusammenfassung der Ergebnisse aus Berechnung und Versuch	123
6.2.1. Dichtrillen	123
6.2.2. Sacklochartige Geometrie	124
6.2.3. Dichtung durch eingelegte Dichtelemente	124
6.2.4. Dichtung durch integrierte Dichtlippe	125
<b>7. Veröffentlichungen des Authors</b>	<b>126</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>127</b>
A.1. Messergebnisse von Proben P5 und P55	130
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>166</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>171</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>177</b>

# 1. Einführung

In der zivilen Hochseeflotte, die international etwa 90 000 Seeschiffe mit mehr als 100 Bruttoregistertonne (BRT) beträgt, dominiert der Dieselantrieb mit fast 97% sehr deutlich [43]. Insgesamt wurden im Jahr 2006 weltweit von der Handelsflotte ca. 7,4 Milliarden Tonnen an Gütern transportiert [11], was in den letzten 15 Jahren einen Anstieg von grob 85% darstellt.

Die steigenden Anforderungen an Umweltschutz erreichen nach der Industrie und dem Automobilsektor auch die Schifffahrt, was bereits Bemühungen um umweltfreundlichere Verbrennungsmotoren zur Folge hatte. In Mai 2005 ist die Marpol 73/78 Annex VI Vereinbarung in Kraft getreten, die den  $NO_x$  und  $SO_x$  Ausstoß von Motoren der Seeschiffe mit mehr als 130 kW Leistung reduzieren soll [2]. Die EU Richtlinie 2004/26/EG begrenzt wiederum die Emissionen von  $CO$ ,  $HC + NO_x$  und Partikeln der Binnenschiffe [3]. Es ist absehbar, dass in der Zukunft die Forderungen an die Senkung des Schadstoffausstoßes in der Schifffahrt weiter verstärkt werden.

Die Erhöhung des Einspritzdrucks wirkt sich auf die einzelnen Komponenten des Abgases unterschiedlich aus. Mit steigendem Einspritzdruck (sowie bei anderen Maßnahmen) sinkt die Partikelemission, der  $NO_x$  Ausstoß beispielsweise nimmt dagegen zu [50], [60], [67]. Dieser Effekt ist bekannt auch als Ruß –  $NO_x$  – Trade Off [20]. Deshalb kann die Hochdruckeinspritzung nur als ein Teil der Gesamtlösung zur Emissionsreduzierung betrachtet werden und es muss eine sorgfältige Abstimmung mit anderen Technologien erfolgen, damit es zu einer generellen Senkung des Schadstoffausstoßes kommt.

Bei der Lösungssuche muss uns bewusst sein, dass obwohl die Technologien für die Senkung der Emissionen bei Road und Non-Road Anwendungen vergleichbar sind, eine direkte Übertragung der Lösungen aus dem Road in den Non-Road Bereich nicht möglich ist [65]. Nichtsdestotrotz kann man die Automobilbranche in Bezug auf die Großmotoren als einen Wegweiser möglicher Weiterentwicklung und eine Inspirationsquelle sehen. Viele der folgenden Beispiele und Abbildungen, insbesondere in den ersten Kapiteln, die hauptsächlich dem Erläutern der Problematik dienen, stammen aus dem Bereich der Personenkraftwagen (PKW) oder Lastkraftwagen (LKW).

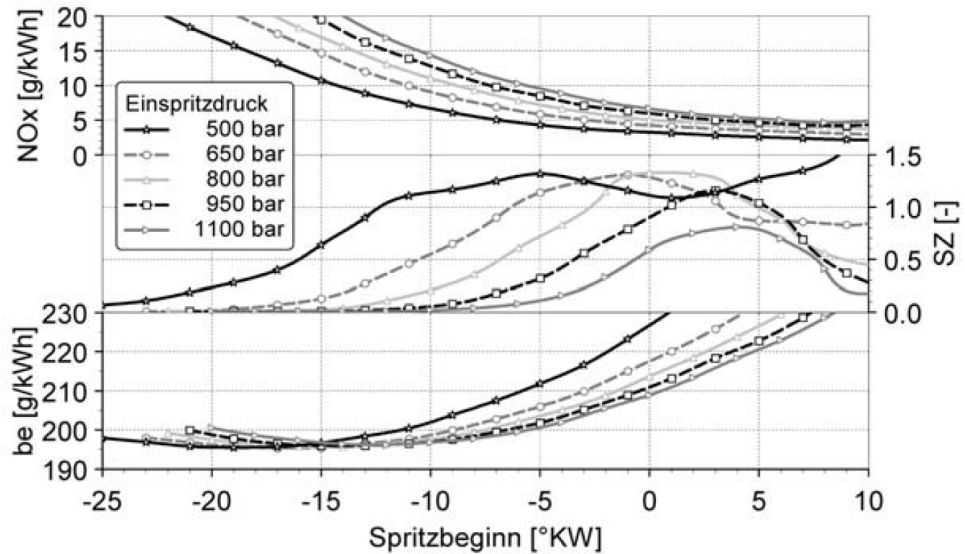


Abbildung 1.1.: Einfluss des Einspritzdrucks auf Abgaswerte [50]. Anstieg von  $NO_x$ , Senkung von Partikelemissionen (SZ) und des spezifischen Verbrauchs (be).

## 1.1. Einspritzsysteme

### 1.1.1. Mittelschnellaufende Viertakt – Dieselmotoren in der Schifffahrt

Als Mittelschnellläufer bezeichnet man üblicherweise Tauchkolbenmotoren mit Drehzahlen von  $300 \text{ min}^{-1}$  bis  $1200 \text{ min}^{-1}$ . Es handelt sich in großer Mehrheit der Fälle um Viertakter mit Kolbendurchmesser zwischen 200 und 600 mm, mittlerer Kolbengeschwindigkeiten 9 bis 11 m/s, mittleren effektiven Drücken bis zu 29 bar und dem Leistungsbereich von 100 kW/Zyl. bis 2000 kW/Zyl. Gängig sind Reihenmotoren mit 6 – 10 Zylindern und V-Motoren mit 12 – 20 Zylindern [50]. Anwendung finden sie einerseits in kleineren Schiffen, andererseits in großen Kreuzfahrtschiffen, Personen- und Autofähren usw. Motoren mit größeren Kolbendurchmessern setzen sich auch auf dem Sektor der Handelsschiffe durch, bei Containerschiffen, Massengutfrachtern und Tankern, als Konkurrenz zu langsam laufenden Zweitaktern. Weitere Verbreitung ermöglichte den Mittelschnellläufern das Wachstum auf dem Gebiet der schnellen Fähren [69].

### 1.1.2. Das Common Rail Einspritzsystem

Die Common Rail Einspritzung ist serienmäßig das erste Mal 1997 in dem Alfa Romeo 156 JTD erschienen [45]. Das CR System verdankt seinen Namen dem Hochdruckspeicher, der meistens die Form eines Rohres hat (Rail) und der für alle Injektoren einer

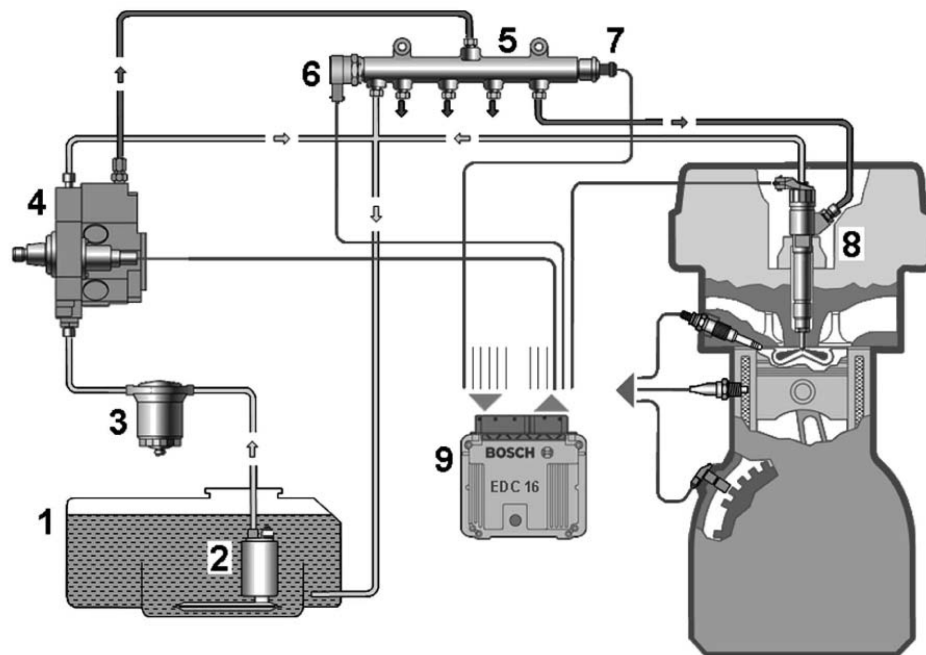


Abbildung 1.2.: Bestandteile des Common Rail Einspritzsystems [50]. 1 – Tank, 2 – Vorförderpumpe, 3 – Kraftstofffilter, 4 – Hochdruckpumpe, 5 – Hochdruckspeicher, 6 – Druckreglerventil, 7 – Drucksensor, 8 – Injektor, 9 – Steuergerät.

Zylinderbank gemeinsam ist. Es sind auch andere Bauweisen bekannt, mit besonderen Formen des Speichers oder mit mehreren Speichern pro Zylinderbank.

Die wesentlichen Bestandteile des CR sind in der Abbildung 1.2 dargestellt.

Der Unterschied zwischen CR und Pumpe-Düse (PD), dem anderen verbreiteten Hochdruckeinspritzsystem, liegt in der Entkopplung der Druckerzeugung von der Steuerung des Einspritzventils bei CR. Der Hochdruck wird von der Hochdruckpumpe stetig aufrechterhalten, sodass er unabhängig von der Lage des Einspritzventils zu Verfügung steht. Das Einspritzventil, realisiert bei den meisten Injektoren durch eine Einspritzdüse mit Düsennadel, ist betätigt durch einen Elektromagneten oder einen Stack von Piezokristallen, gesteuert durch eine elektronische Steuereinheit.

Die Vorteile eines CR – Systems gegenüber PD oder Pumpe-Leitung-Düse (PLD) sind [69]:

- der Einspritzdruck ist unabhängig von der Drehzahl. Es kann beliebiger Einspritzdruck bei beliebiger Drehzahl genutzt werden, hoher Einspritzdruck steht schon bei Leerlaufumdrehungen zur Verfügung
- Einspritzsteuerung kann beim laufenden Motor beliebig variiert werden, es gibt keine Beschränkung durch begrenzten Einstellbereich der Nocken
- kleineres Drehmoment der Nockenwelle ermöglicht eine höhere Leistungsdichte des Motors und seine kleineren Abmessungen

- höhere Effektivität und kleinere mechanischen Verluste ermöglichen Verbrauchssenkung
- einfacheres Design, niedrigere Gesamtkosten

Die Funktion des Hochdruckspeichers besteht hauptsächlich im Speichern eines solchen Kraftstoffvolumens, das eine störungsfreie Einspritzung ermöglicht. Das unter Druck stehende Volumen wirkt sich auch dämpfend auf die Druckwellen aus, die während des Einspritzvorgangs entstehen. Der Speicher hat in den meisten Fällen die Form eines Rohres, bei manchen Systemen für PKW-Motoren kann er aber z.B. auch kugelförmig ausgeführt werden.

Die CR Systeme für größere Motoren können im Unterschied zu den kleineren Ausführungen der PKW Hochdruckspeicher haben, die für eine Zylinderbank aus mehreren Teilen bestehen, die daher kostengünstiger zu fertigen sind. Die einzelnen Teile sind in dem Fall mittels Hochdruckleitungen miteinander verbunden (s. Abbildung 1.3).

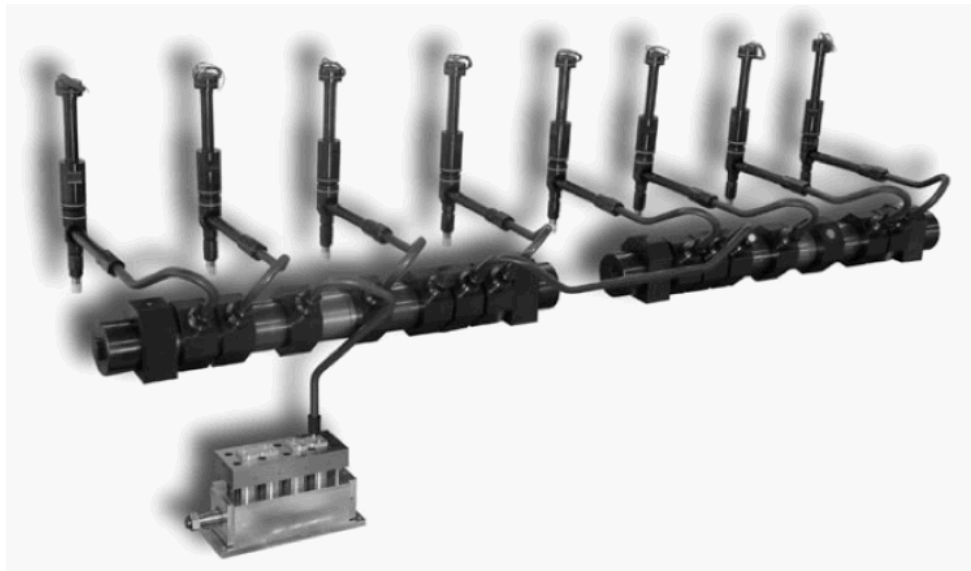


Abbildung 1.3.: CR System für einen Großmotor mit 2 MW Leistung [39].

Es wurden auch Systeme eingeführt, die auf einen klassischen gemeinsamen Speicher verzichten und diesen durch eine Mehrzahl von kleineren Speichern ersetzen, die in Hinsicht auf die Verbreitung von Druckwellen günstig angeordnet sind. So verfügt beispielsweise das von l'Orange entwickelte Einspritzsystem für den mtu BR8000 Motor über Einzelspeicher mit Volumen von 0,4l an jedem Injektor und 0,7l an der Hochdruckpumpe [36]. Das Ergebnis dieser Anordnung ist eine kleinere Beeinflussung der Injektoren untereinander und kleinere Abmessungen des Motors (Abbildung 1.4).

Das CR – System von Wärtsilä, das das erste Mal in 2003 in ein Schiff installiert worden ist, verfügt pro Zylinderbank über mehrere Druckspeicher und mehrere nockenbetriebene Hochdruckpumpen (s. Abbildung 1.5). Jede Hochdruckpumpe ist an einen Druckspeicher angeschlossen, der zwei Injektoren mit Brennstoff versorgt. Die Druckspeicher sind untereinander mit doppelwandigen Hochdruckleitungen verbunden.

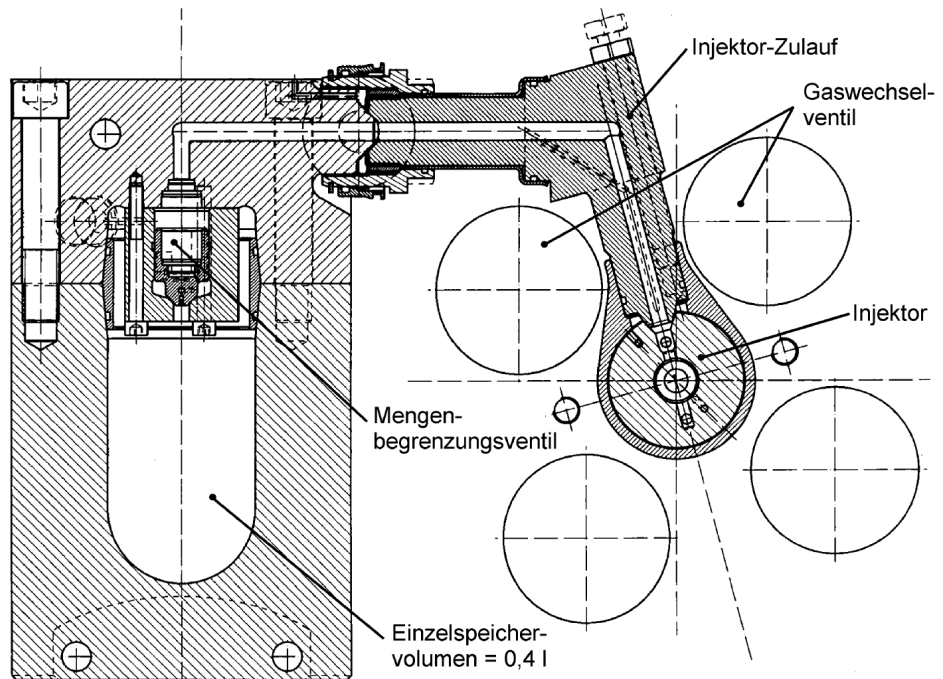


Abbildung 1.4.: Draufsicht eines Injektors mit Einzelspeicher [36].

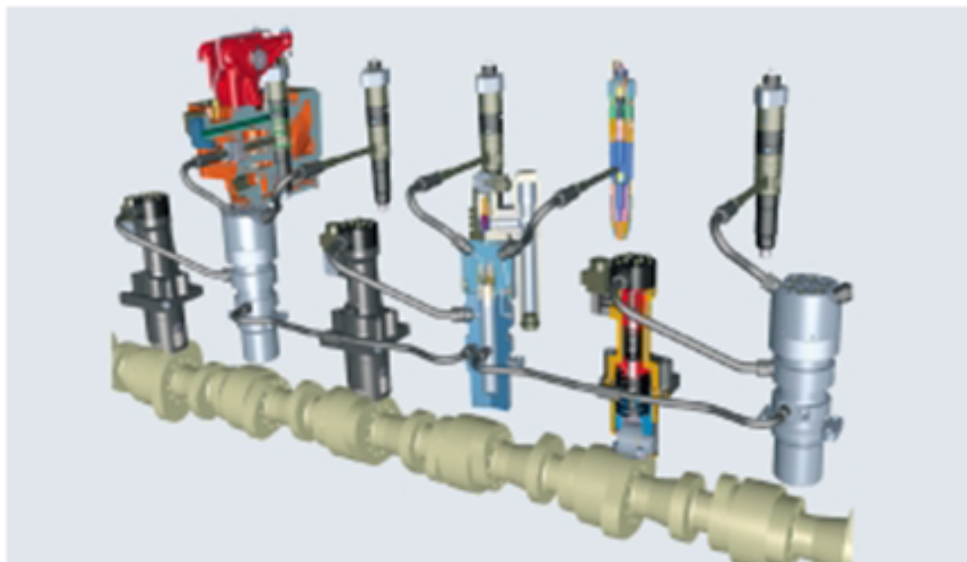


Abbildung 1.5.: Common Rail System von Wärtsilä [42].

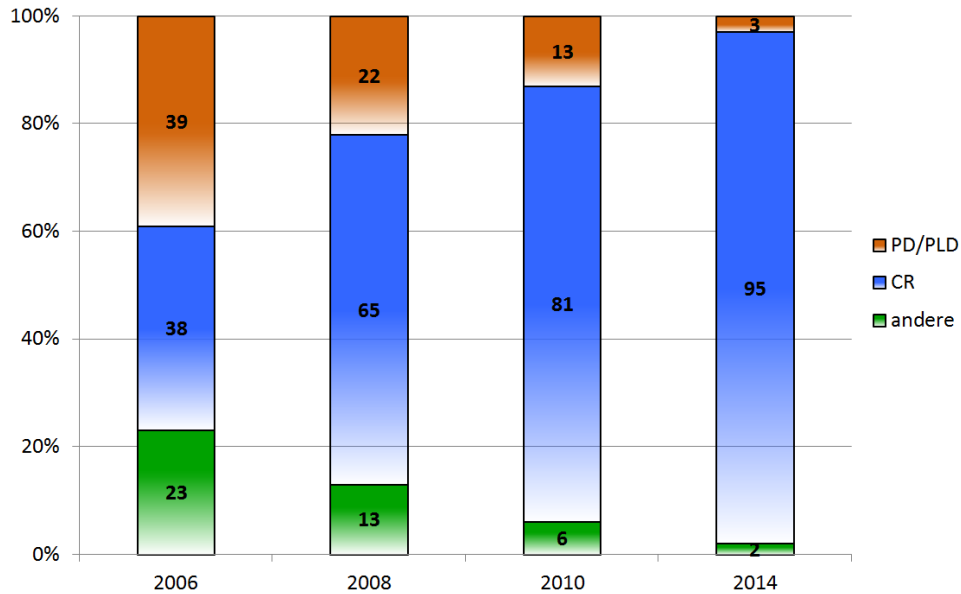


Abbildung 1.6.: Prozentuelle Vertretung von CR – Einspritzsystemen in Großmotoren, Prognose für Jahre 2010 – 2014 [24].

Gegenwärtig werden Einspritzdrücke in der Größenordnung von ca. 2000 *bar* in der Serie realisiert. Das Erreichen von 2500 *bar* wird im Bereich der Nutzfahrzeugmotoren etwa im Jahr 2012 erwartet. An CR – Systemen mit Einspritzdruck von 3000 *bar* wird bereits seit einigen Jahren sowohl für Nutzfahrzeug (Nfz) [24], als auch für Schiffsmotoren [33] gearbeitet. Einspritzdrücke von über 1800 *bar* werden in der Regel durch Druckübersetzung erreicht. Diese kann entweder im Injektor selbst oder vom Injektor getrennt erfolgen [68].

Der Anteil an Großmotoren, die mit CR Einspritzung ausgestattet sind, nimmt in den letzten Jahren zu und dieser Trend wird den Erwartungen nach weiter anhalten [24].

### 1.1.3. Injektoren

Der Injektor hat im Grunde genommen die Funktion eines Ventils, der den Kraftstoff aufbereiten und dem Brennraum zuführen soll. Dabei sind folgende Aspekte zu beachten.

Es muss der vorgegebene Einspritzverlauf eingehalten werden, mit genau definiertem Einspritzbeginn und –ende, ohne ungewollte Nachspritzer. Es muss eine genaue und reproduzierbare Menge eingespritzt werden, die möglichst gut für die Verbrennung aufbereitet werden soll. Das Öffnen und Schließen des Ventils muss ausreichend schnell sein, damit ggf. kontrolliertes Vor- und Nachspritzen realisiert werden kann. Diese Eigenschaften müssen mit hoher Zuverlässigkeit über eine beträchtliche Laufleistung des Motors gewährleistet werden. Der Injektor sollte darüber hinaus günstige Abmessungen in Hinsicht auf den Einbau in den Zylinderkopf haben.

Die grundlegenden Baugruppen des Injektors sind die Einspritzdüse, das hydraulische Steuersystem (bei einem direkt betätigten Injektor durch ein mechanisches ersetzt) und ein Magnet- oder ein Piezoaktuator. Diese Teile sind in dem Injektorkörper zusammengeslossen. Das Problem der Düse wird aufgrund der hohen Komplexität in dieser Arbeit nicht erörtert.

## Das hydraulische Steuersystem

In dem Injektor als einem hydraulischen System übt der einzuspritzende Kraftstoff zugleich die Funktion der Steuerflüssigkeit aus, die für das Öffnen und Schließen des Einspritzventils sorgt. Das Steuerventil des hydraulischen Steuerkreises wird entweder durch Elektromagneten oder Piezokristallen betätigt. Das Arbeitsprinzip des Injektors mit einem magnetbetätigten Steuerventil zeigt die Abbildung 1.7. Beim geschlossenen Injektor wird die Düsennadel (16) durch den Hochdruck im Steuerraum (6) nach unten gepresst und verschließt die Spritzlöcher (10). Beim Signal von der Steuereinheit hebt die Magnetspule (2) den Magnetanker (4) an und setzt so die Ablaufdrossel (12) frei. Dadurch entweicht der Hochdruck aus dem Steuerraum in den Rücklauf (1). Wegen der Zulaufdrossel (14) kann sich der Hochdruck in dem Steuerraum nicht wieder aufbauen. Der Hochdruck wirkt nun nur auf die Druckschulter der Düsennadel (8) und hebt die Nadel an. Die Geschwindigkeit, mit der die Nadel öffnet, hängt davon ab, wie schnell der Druck in der Steuerkammer sinkt, das heißt von dem Verhältnis zwischen der Zu- und Ablaufdrossel. Wird die Magnetspule abgeschaltet, verschließt der Magnetanker die Ablaufdrossel, der Hochdruck im Steuerraum baut sich wieder auf und die Nadel schließt. Die Geschwindigkeit hängt in diesem Fall von der Größe der Zulaufdrossel ab.

## Der Aktuator

Der nächste Schritt in der Entwicklung von Injektoren war das Ersetzen des Elektromagneten durch einen Piezoaktuator. Dieser hat kürzere Reaktionszeit und öffnet somit das Steuerventil schneller, sodass z.B. mehrere Voreinspritzungen und dadurch bessere Verbrennung möglich ist. So ein Injektor ist in der Abbildung 1.8 zu sehen. Der Unterschied zwischen einem Magnetventil- und einem Piezo – Injektoren besteht also nur in der Weise, auf welche das Steuerventil betätigt wird und hat keinen Einfluss auf das generelle Arbeitsprinzip der gesamten Injektoreinheit.

Bei einem direkt betätigten Piezo – Injektoren dagegen, wie etwa dem Direct Acting Diesel Common Rail System von Delphi [12], wird die Düsennadel direkt durch das Piezo – Stack betätigt. Der hydraulische Steuerkreis fällt also weg. Dieses System kann mit Drücken bis zu 2000 *bar* arbeiten.

Da die relative Dehnung der Piezokristalle sehr klein ist, besteht der Aktuator aus vielen Schichten, die beispielsweise bei dem in der Abbildung 1.8 dargestellten CR – System von Siemens die Dicke von jeweils 80  $\mu\text{m}$  haben und voneinander isoliert sind. Der gesamte Hub eines gängigen Piezo – Stacks für Injektoren der Fahrzeugbranche bewegt sich in der Größenordnung von ca. 50  $\mu\text{m}$ . Der Hub kann noch durch einen Verstärkungshebel



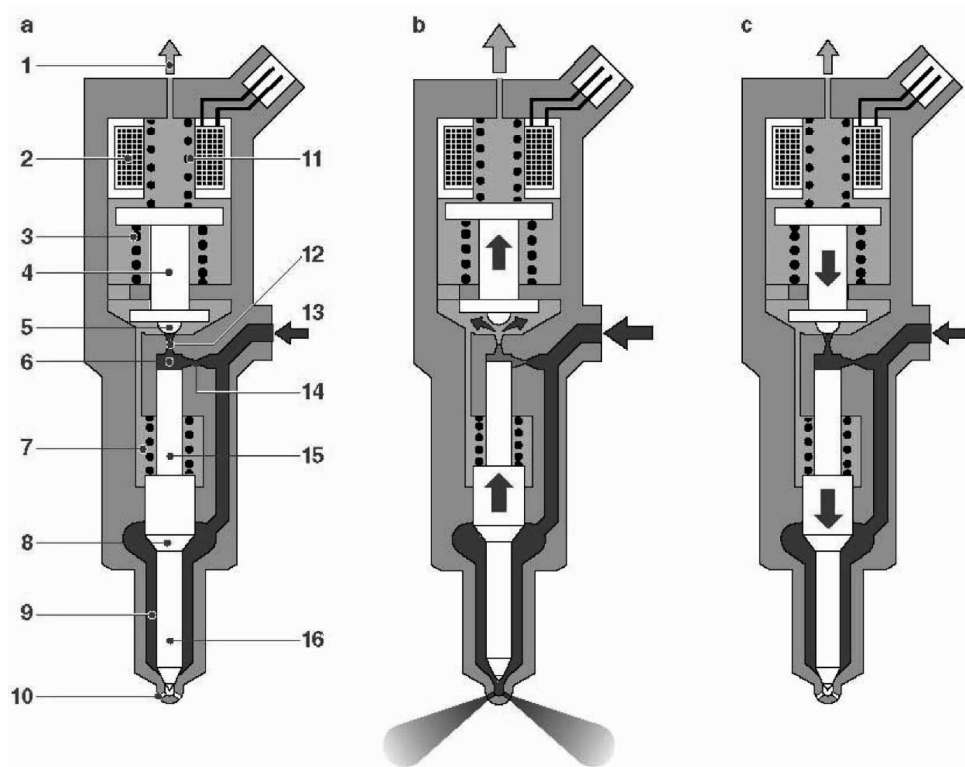


Abbildung 1.7.: Arbeitsprinzip des Injektors mit Magnetventil [50]. a) Ruhezustand, b) Injektor öffnet, c) Injektor schließt. 1 – Kraftstoffrücklauf, 2 – Magnetspule, 3 – Überhubfeder, 4 – Magnetanker, 5 – Ventilkugel, 6 – Ventilsteuerraum, 7 – Düsenfeder, 8 – Druckschulter der Düsennadel, 9 – Kammervolumen, 10 – Spritzloch, 11 – Magnetventilfeder, 12 – Ablaufdrossel, 13 – Hochdruckanschluss, 14 – Zulaufdrossel, 15 – Ventilkolben, 16 – Düsennadel.

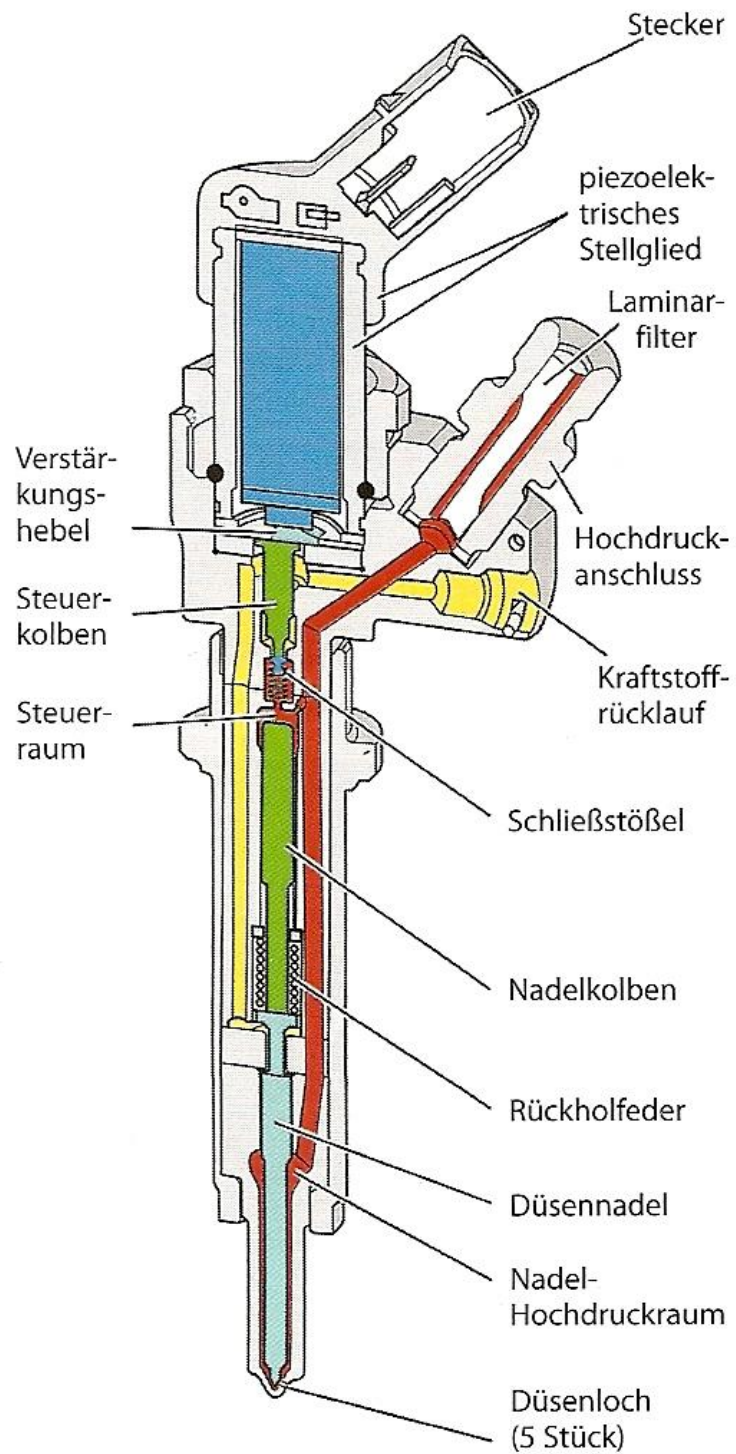


Abbildung 1.8.: Aufbau eines Piezo – Injektors von Siemens [45].

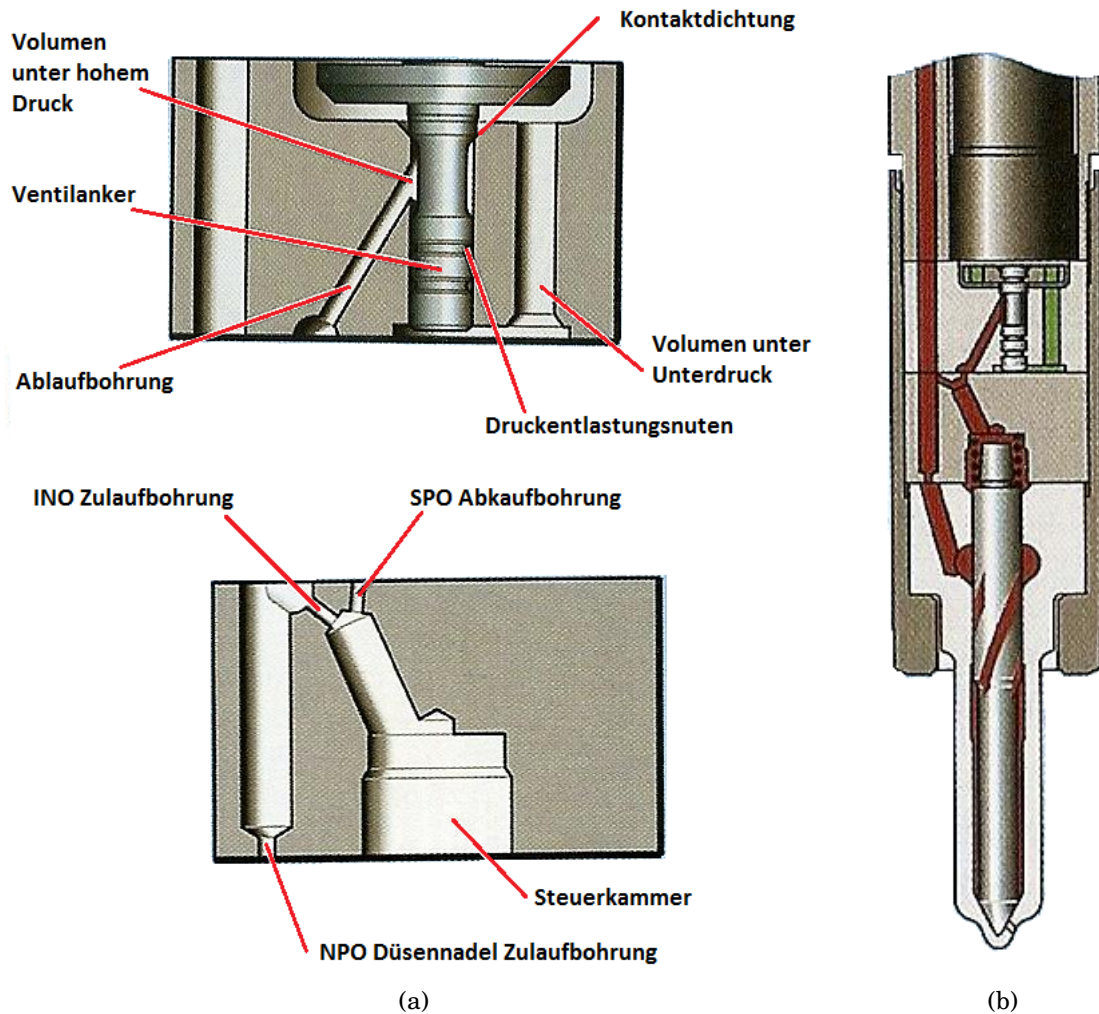


Abbildung 1.9.: Injektorsegmente und ihr Zusammenbau [45].

auf etwa das Zweifache übersetzt werden, was schon für das Betätigen des Steuerventils ausreicht. Die Anwendung von Piezo-Injektoren in Großmotoren wird in Kapitel 1.1.4 näher angesprochen.

### Injektorkörper und Zusammenbau des Injektors

Die einzelnen Teile sind in einem Injektorkörper untergebracht und werden gewöhnlicherweise durch eine Spannmutter zusammengehalten. Dadurch ergibt sich die Aufgabe, die Verbindung zwischen den Bauteilen so auszuführen, dass eine dauerhafte Dichtigkeit gegeben ist. Die aufeinander liegenden Dichtflächen sind in der Regel geschliffen und geläpft und die Dichtung wird durch die von der Spannmutter erzeugte Flächenpressung gewährleistet.

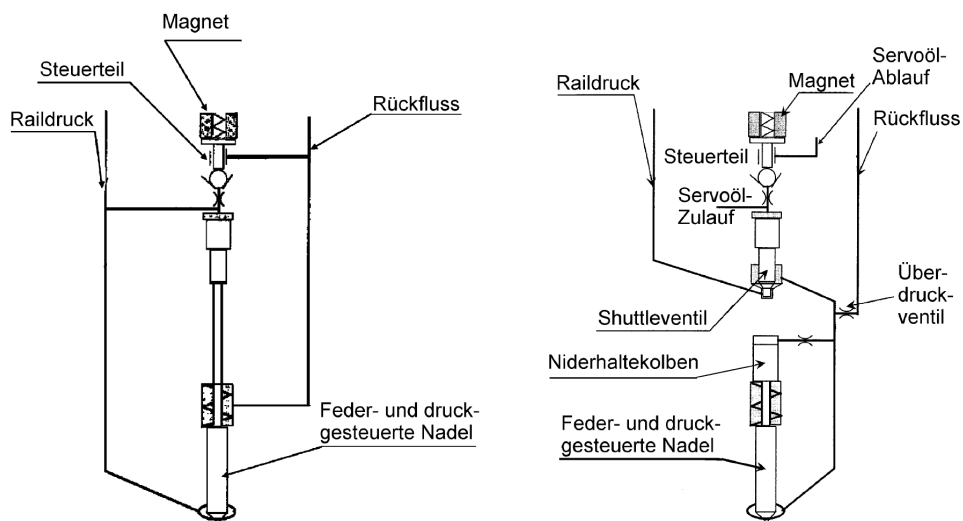


Abbildung 1.10.: Schema von einem Einkreis- (links) und Zweikreis – Injektor für die Schweröl Einspritzung [36].

#### 1.1.4. Injektoren für Großmotoren

Obwohl die Funktionsweise gleich ist, unterscheiden sich die Injektoren für Großmotor und Pkw nicht nur durch Größe. So haben beispielsweise Piezo-Injektoren bisher keine so große Anwendung in den Schiffsdieseln gefunden. Zum einen ist der erforderliche Hub größer, sodass ein entsprechend großer und teurer Piezo – Stack nötig wäre. Zudem sind die herrschenden Kräfte bei den im Verhältnis zum PKW – Injektor großen Abmessungen und Drücken hoch. Bei den langsamer laufenden Großmotoren kann man durch eine geeignete Anordnung der Magnete und Hydraulikkomponenten ausreichend kurze Betätigungszeiten der Düsennadel auch bei einem konventionellen Injektor mit Magnetventil erreichen [33].

Bei Injektoren für Großmotoren ist es unter anderem wichtig, auf die Temperatur besonders um den Nadelsitz und Sackloch zu achten. Dies ist besonders bei Motoren mit Schwerölbetrieb der Fall. Zu niedrige Temperatur wirkt sich nachteilig auf die Viskosität des Brennstoffes aus. Zu hohe Temperatur verursacht dagegen Verkokung im Bereich der Spritzlöcher und dementsprechend verschlechterte Emissionswerte. Um die Überhitzung bei Motoren mit Kolbendurchmesser bis ca. 300 mm zu verhindern, kann Kühlung durch gezielt erhöhte Brennstoffleckage realisiert werden. Der Weg dazu ist das entsprechende Auslegen der Toleranzen, sodass die Leckagemenge etwa 1% der eingespritzten Kraftstoffmenge beträgt [69]. Diese Lösung bringt allerdings einen entsprechend erhöhten Leistungsbedarf der Hochdruckpumpe mit sich. Bei Motoren über 300 mm Kolbendurchmesser können die Injektoren ihren eigenen Kühlkreis haben, der mit Wasser, Öl oder Kraftstoff versorgt wird.

Auch das hydraulische Steuersystem kann in Injektoren für Großmotoren unterschiedlich ausgeführt sein. Die Firma l'Orange bietet beispielsweise Schwerölinjektoren mit

zwei verschiedenen hydraulischen Steuersystemen an (Abbildung 1.10). Das Einkreis-System ähnelt den Injektoren von heutigen Fahrzeugmotoren. Es ist einfach und ermöglicht eine hohe Schaltgeschwindigkeit, indem der Hochdruck auch in der Spritzpause an der Nadel anliegt. In dem Zweikreis-System dagegen kommt es während der Spritzpause zum Absenken des Druckes an der Düsennadel. Das ermöglicht dem speziellen Niederhaltekolben, der über der Nadel angebracht ist, die Düse zuverlässig geschlossen zu halten, auch wenn es zu einem Defekt des Steuerkolbens kommen sollte [36]. Das verhindert einen eventuellen Dauereinspritzer, beugt dadurch einem ernsthaften Motorenschaden vor und ersetzt so die Funktion eines Mengengrenzungsventils. Die Schaltgeschwindigkeit ist jedoch niedriger als bei dem Einkreis-System. Als Vorteil des Zweikreis-Systems kann auch gesehen werden, dass das Magnetventil mit Servoöl arbeitet und mit dem Schweröl nicht in Kontakt kommt. Das Schweröl hat weltweit eine sehr schwankende Qualität, ist allgemein aber wesentlich abrasiver und chemisch aggressiver als das Servoöl für hydraulische Systeme.

Seitdem einige Häfen, vor allem an der Ostsee, wirtschaftliche Anregungen für Schiffe mit niedrigen  $NO_x$  Emissionen eingeführt haben, gibt es Nachfrage an Lösungen, die eine  $NO_x$  Senkung auch bei bestehenden Motoren bieten können. Eine davon ist die Direkteinspritzung von Wasser, die sich auf mehrere Weisen realisieren lässt – als Einspritzung der Emulsion von Brennstoff und Wasser, als geschichtete Einspritzung, bei der Brennstoff und Wasser in schneller Folge durch die selbe Düse eingespritzt werden oder mit Hilfe von Doppelnadel – Injektoren (Abbildung 1.12). Diese ersetzen die herkömmlichen Injektoren und verfügen über zwei Düsen und getrennte Brennstoff- und Wasserversorgung.

Die Tatsache, dass solche emissionsmindernden Technologien als Nachrüstlösungen für sich bereits in Betrieb befindende Motoren eingesetzt werden können, ist wegen der hohen Entwicklungs- und Herstellungskosten von Großmotoren ein großer Vorteil. Dies trifft, wenn auch nur im begrenzten Maße, ebenfalls auf die CR – Systeme allgemein zu.

### 1.1.5. Umweltschutz

Das steigende Umweltbewusstsein hat in den letzten Jahrzehnten zur Senkung der Emissionen in Industrie und Straßenverkehr geführt. So sinken die auf dem europäischen Festland produzierten Emissionen kontinuierlich trotz dem zunehmenden Verkehr und Produktion, der Schadstoffausstoß auf der See nimmt jedoch weiterhin zu (Tabelle 1.1).

Die Luftverschmutzung durch Transport verursacht Schäden, die als externe Kosten auch wirtschaftlich quantifizierbar sind. In europäischen Gewässern erreichten 2005 diese durch Schifffahrt verursachten Kosten rund 45 Milliarden Euro [47]. Der größte Anteil fällt dabei auf den Raum der Nordsee (Abbildung 1.13).

Der große Beitrag der Common Rail Einspritzung besteht in der Senkung des Russausstoßes, vor allem im unteren Drehzahlbereich. Dies ist wichtig nicht nur aus der

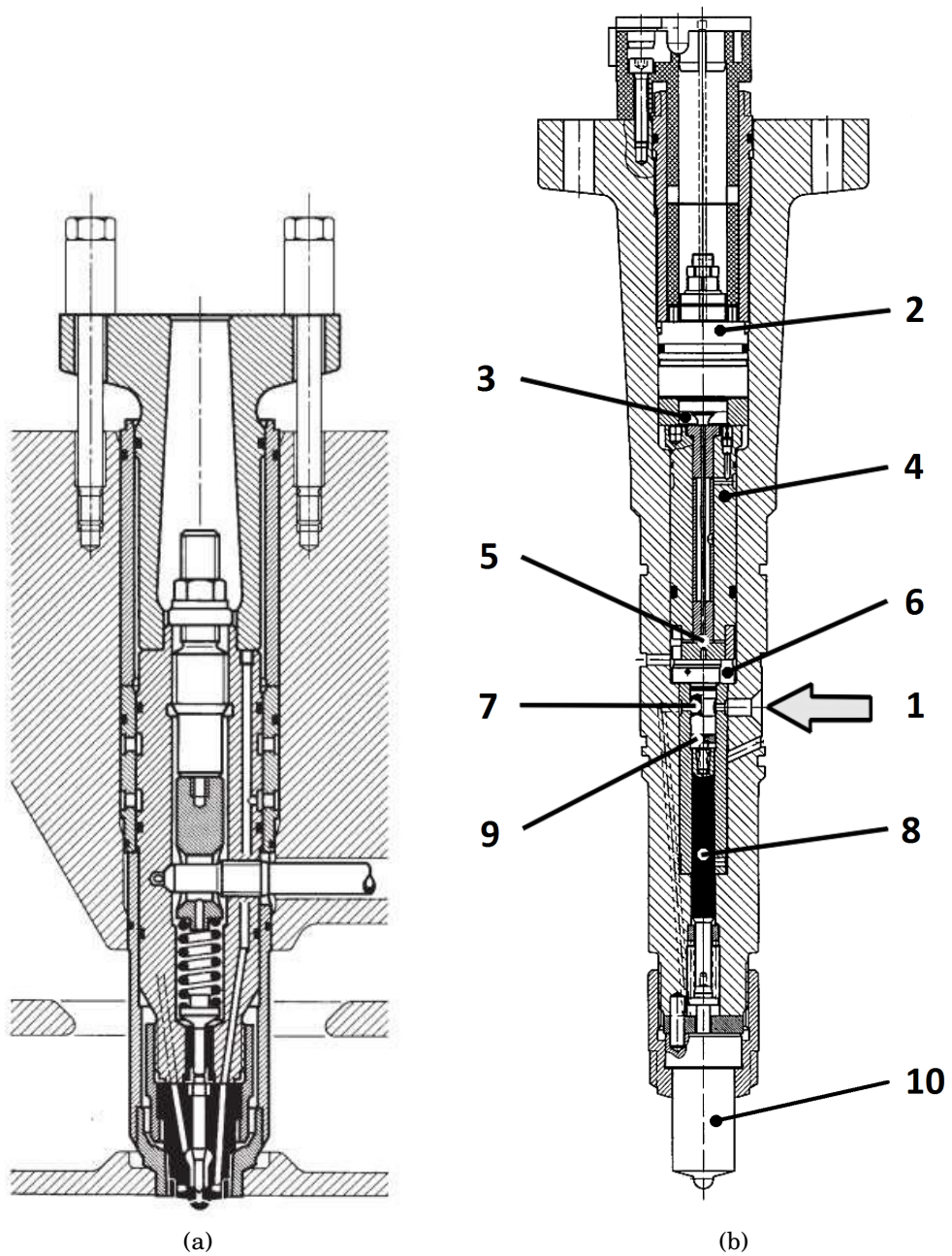


Abbildung 1.11.: Injektoren für Großmotoren. Links für den Motor L58/64 von MAN B&W Diesel mit  $1300\text{kW/Zyl}$  und  $400\text{ U/Min}$  [69], rechts Injektor von l'Orange für  $190\text{ kW/Zyl}$  [37]. 1 – Zulauf, 2 – Magnetspule, 3 – Magnetanker, 4 – Zwischenstück, 5 – Steuerventil, 6 – Kontrolleinheit, 7 – Zulaufdrossel, 8 – Druckstift, 9 – Zwischenventil, 10 – Düse.



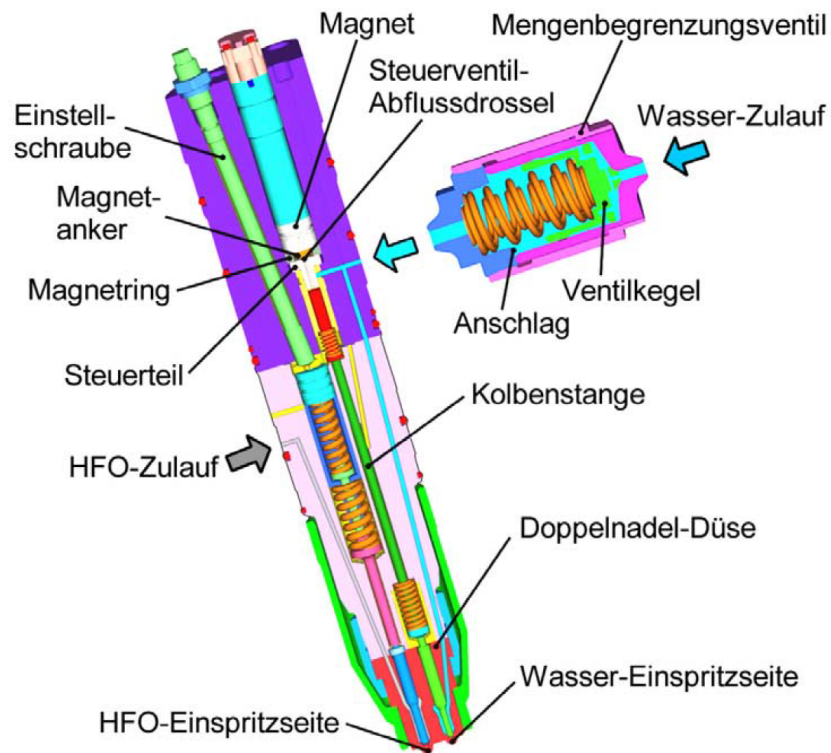


Abbildung 1.12.: Doppelnadel – Injektor für die Einspritzung von Kraftstoff und Wasser [36].

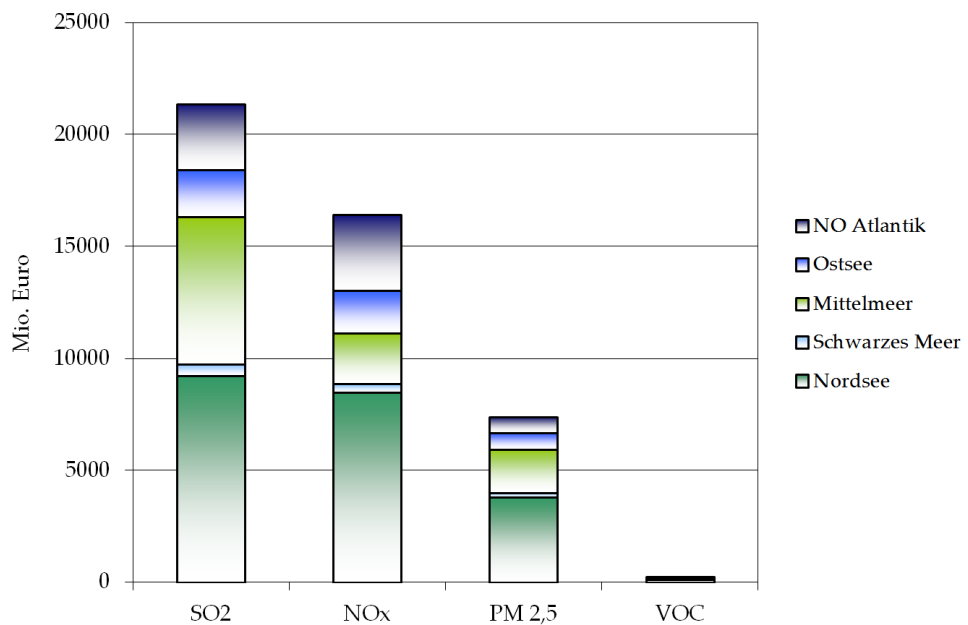


Abbildung 1.13.: Externe Kosten der Schifffahrt in europäischen Gewässern, verursacht durch Luftverschmutzung [47].

	SO <sub>2</sub> [ $\times 10^6 t$ ]		NO <sub>x</sub> [ $\times 10^6 t$ ]	
	Festland	See	Festland	See
1990	16,4	2,0	13,4	2,8
2000	5,8	2,6	9,5	3,6
2010	3,9 <sup>1</sup>	2,8 - 3,3 <sup>2</sup>	6,6	4,0 - 4,6

Tabelle 1.1.: Emissionen auf europäischem Festland und See [9].

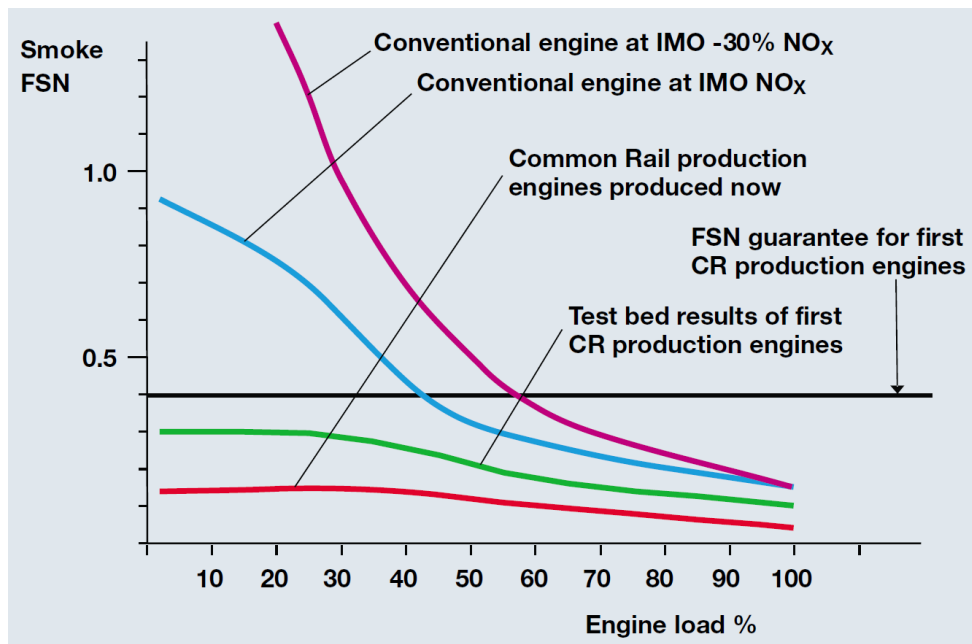


Abbildung 1.14.: Vergleich von Schwarzrauch zwischen Schiffsdieseln mit konventioneller Einspritzung und mit Common Rail [42].

Sicht des Umweltschutzes, sondern wird z.B. bei Passagierschiffen, aufgrund steigender Kundenanforderungen, immer mehr zu einer Notwendigkeit. Die Grafik 1.14 zeigt den Vergleich der Schwärzungszahl (SZ) von einem Motor mit Wärtsilä – CR – System im frühen Entwicklungsstadium auf dem Prüfstand, seine Weiterentwicklung unter Betriebsbedingungen und zwei Modellmotoren mit konventionellen Einspritzsystemen, die heutige Marpol 73/78 Werte für  $NO_x$  Ausstoß erfüllen, bzw. um 30% unterschreiten. Die beiden Motoren mit CR zeigen wesentlich niedrigeren Russausstoß gegenüber den Konkurrenten, besonders im Bereich unterhalb 50% der Maximallast, wie etwa beim Manövrieren in Häfen oder bei langsamer Marschfahrt.



## 2. Aufgabenerfassung

### 2.1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe dieser Arbeit besteht in dem Erstellen und der Erprobung eines Dichtkonzepts zur Anwendung in einem Common Rail (CR) - Injektor. Es soll das Abdichten eines Einspritzdrucks auf dem Niveau von 3000 *bar* angestrebt werden. Das Anwendungsgebiet des Injektors sind mittelschnelllaufende Dieselmotoren im Leistungsbereich zwischen 500 und 1500 *kW/Zylinder*, die beispielsweise in der Schifffahrt oder als stationäre Einheiten eingesetzt werden.

Es soll auf die erwarteten Schwierigkeiten in der Dichtung und Dauerfestigkeit eingegangen und eine entsprechende Wahl bezüglich Werkstoff, Fertigungstechnik und Bauteilgeometrie getroffen werden. Vorzugsweise sind neuartige Abdichtkonzepte zu erforschen mit der Zielsetzung, eine gute Dichtwirkung bei niedrigeren Herstellungskosten als bei dem gegenwärtigen State-of-the-Art Dichtkonzept zu erzielen. Konstruktionsmerkmale, die einen Einfluss auf strukturmechanische Eigenschaften haben, wie etwa hochdruckbeaufschlagte Bohrungen, sollen optimiert werden. Die vorgeschlagenen Lösungen sind mit entsprechenden FEM Simulationen zu belegen. Die erarbeiteten Lösungskonzepte gilt es durch eigens entworfene Testvorrichtungen und -verfahren zu prüfen, insbesondere die Dichtheit.

Das erforschte Dichtkonzept soll so entworfen werden, dass es zukünftig in einem Versuchsinjektor unter realitätsnahen Bedingungen erprobt werden kann. Die Auslegung eines solchen Versuchsinjektors würde den Anforderungen entsprechen, die in der Tabelle 2.1 zusammengefasst sind.

<b>Anforderungen an innere Eigenschaften des TS</b>	<b>Wert</b>	<b>B</b>	<b>W</b>	<b>Q/T/C</b>
<b>1. Leistungsparameter</b>				
Einspritzdruck	über 2000 bar	×		Q
Einspritzdruck	3000 bar		×	Q
Einspritzmenge bei Vollast	5000 mm <sup>3</sup> / ASP	×		Q
Hubfrequenz	20 Hz +10 / -15 Hz	×		Q
<b>2. Einsatzbedingungen</b>				
Zu verwendender Kraftstoff	Schweröl ISO 8217		×	Q
Leistungsklasse des Motors	500 – 1500 kW / Zyl	×		Q
Schmierung	durch Kraftstoff	×		Q
Betriebstemperatur	200°C ± 20°C	×		Q
Umgebungsbedingungen	Laborluft, 20°C ± 5°C		×	Q
<b>3. Bauweise</b>				
Steuerventil	2/2 Magnetventil	×		Q
Hydraulischer Steuerkreis	Einkreissystem	×		Q
Einspritzdüse	Zukaufteil		×	Q
Serienreife	Versuchsprototyp		×	Q
<b>4. Wirtschaftliche Anforderungen</b>				
Produktionskosten	vergleichbar mit Konkurrenzprodukten		×	C
Wartungsaufwand auf See und Festland	üblich betriebener Aufwand		×	T, C
Austausch einzelner Bauteile	mit gängigem Werkzeug		×	C
<b>5. Sonstige Anforderungen</b>				
Leckagemenge	max. 1% Einspritzmenge	×		Q
Lebensdauer	min. 5000 Betriebsstd.	×		Q

Tabelle 2.1.: Anforderungen an innere Eigenschaften eines kompletten Versuchsinjektors.

## 2.2. Engineering Design Science

Für die Lösungssuche eignet sich in diesem Fall die Konstruktionsmethodik der Engineering Design Science (EDS). Diese Vorgehensweise fördert die Suche nach neuartigen Lösungen indem das entwickelte Technische System (TS) anfangs möglichst abstrakt dargestellt wird. Dadurch werden keine potentiellen Lösungswege verfrüht geschlossen, in etwa weil sich das Entwicklungsprozess durch bekannte und eingelebte Lösungen beeinflussen lassen würde. Zu guten Informationsquellen über EDS zählen beispielsweise [53] und [25]. Die Anwendung von EDS unterstützt darüber hinaus den Entwickler bei der Analyse des TS in seinem gesamten Lebenszyklus, sodass wichtige Aspekte aller Lebensphasen, nicht nur der Einsatzphase, bei dem Entwurf beachtet werden.

Das Prinzip der Engineering Design Science (EDS) wurde in diesem Fall nicht auf die Entwicklung des alleinigen Dichtkonzepts angewendet, sondern auf die logisch breitere Baugruppe zweier Bauteile, zwischen welchen das Dichtkonzept zur Anwendung kommen soll.

Als erster Schritt gilt die Erstellung eines Black Box. Das TS ist abstrahiert bis auf ein schwarzes Kästchen, das die Eingänge unter der Einwirkung von Operanden in die gewünschten Ausgänge umwandelt. Die Abbildung 2.1 zeigt die Ein- und Ausgänge eines gesuchten Dichtkonzepts. Zu den wirkenden Operanden zählen der Mensch, unterschiedliche Technische Systeme, einfließende Informationen und Steuerimpulse, sowie die aktive Umgebung.

Das anschließende Transformationsprozess (TrP) beinhaltet die wichtigen Phasen der Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung, in welchen die Funktionsprozesse des Technischen Systems näher konkretisiert sind (s. Abbildung 2.2). Mit dem TrP als Grundlage wurde der hierarchische Baum erstellt (Abbildung 2.3), in dem die Funktionen in zusammenhängende Gruppen aufgeteilt sind. Ebenfalls angeführt sind die Ein-, bzw. Ausgänge von Energie und Information. Der hierarchische Baum dient als Ausgangspunkt für die Funktionsstruktur, die auf der Abbildung 2.4 dargestellt ist und die logischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Funktionen aufzeigt. Die Funktionsstruktur zeigt ebenfalls die Grenze des betrachteten technischen Systems und die Einflüsse, die von Außerhalb auf die betroffenen Funktionen wirken.

Diese Vorarbeit führte zu der Erstellung von mehreren theoretischen Dichtkonzepten, die im Abschnitt 5.2.3 aufgelistet sind. Jedes der Dichtkonzepte nutzt ein anderes Prinzip um die nötige Dichtwirkung aufzubringen. Als ein Zusammenschluss dieser Möglichkeiten wurden vier konkrete Dichtkonzepte abgeleitet und für eine nähere Untersuchung vorbereitet. Im Detail sind diese Konzepte im Abschnitt 5.2.4 beschrieben.

Die Tabelle 2.1 listet Anforderungen an den gesamten Injektor auf, in welchem das neue Dichtkonzept zum Einsatz kommen soll. Einige dieser Anforderungen können als Kriterien für die Bewertung des Dichtkonzepts, bzw. der einzelnen Varianten benutzt werden. Für die Bewertung wurde [34] angewendet. Dieses Werkzeug bietet eine gute Möglichkeit, vorliegende Varianten eines technischen Systems hinsichtlich einer Vielzahl von Kriterien zu bewerten, die in die Gruppen Qualität (Q), Zeitaufwendigkeit (T) und

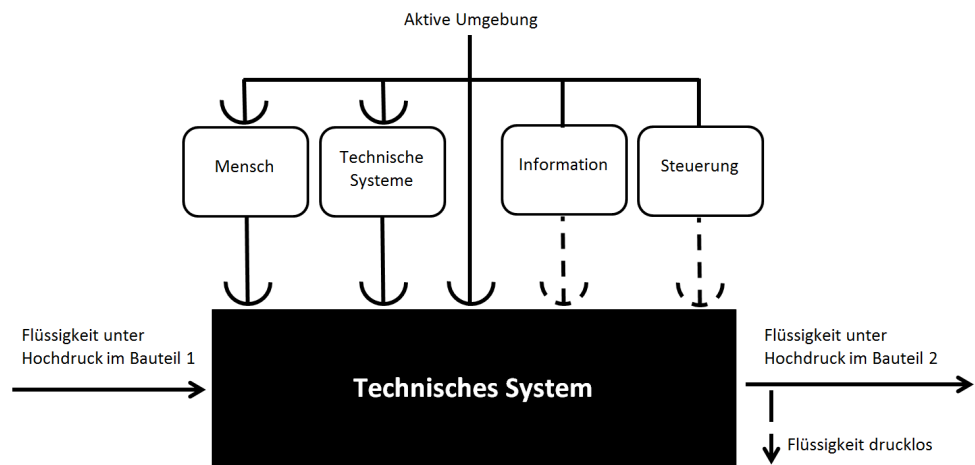


Abbildung 2.1.: Das Black-Box-Schema des untersuchten technischen Systems.

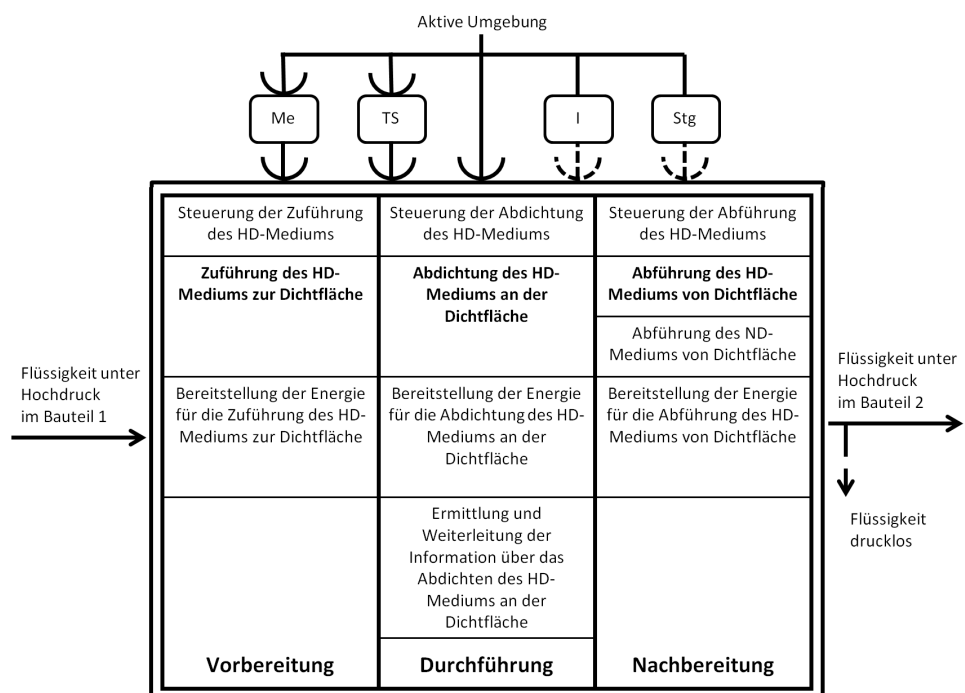


Abbildung 2.2.: Das Transformationsprozess des untersuchten technischen Systems.

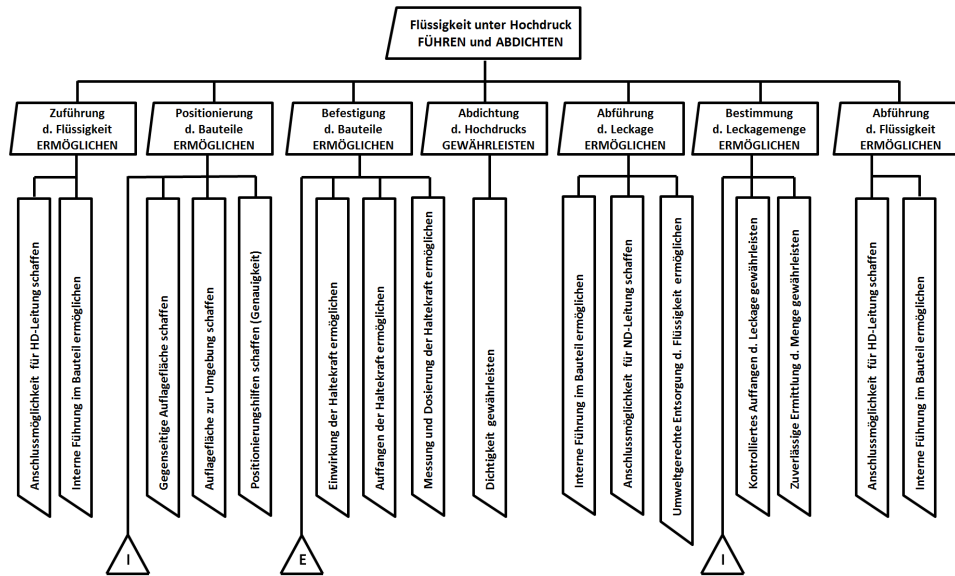


Abbildung 2.3.: Der hierarchische Baum des untersuchten technischen Systems.

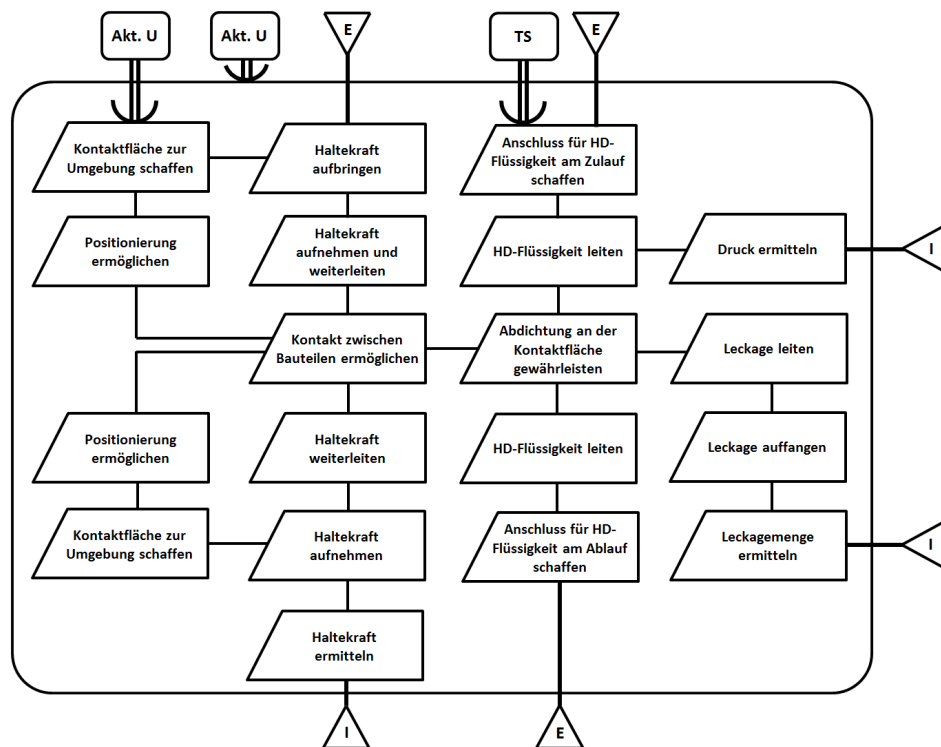


Abbildung 2.4.: Die Funktionsstruktur des untersuchten technischen Systems.

PRODUCT DESIGN SPECIFICATION (PDS) requirements on properties and behaviour of technical products		Existing solution		Geo 3		6A, 6B		E2		55A, 55B		Ideal solution		Class. QTCI
Req. on TS Reflective Properties&Behaviours related to TS LC Transformation Processes	Req. Value of TS charact and possibly Tolerances	Weight (1-4)	eval.	total	eval.	total	eval.	total	eval.	total	eval.	total	eval.	total
<b>(1) Req. to (main&amp;assisting) Operation Function/Effects:</b>														
Technical system:	0	0		0		0		0		0		0		0
• Leistungsparameter	0	0		0		0		0		0		0		0
- Einspritzdruck	über 2000 bar	4	3	12	1	4	1	4	2	8	3	12	4	16
- Einspritzmenge bei Volllast	5000 mm <sup>3</sup> /ASP	4	4	16	4	16	4	16	4	16	4	16	4	16
- Hubfrequenz	20 Hz +10 / -15 Hz	4	4	16	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
- max. Leckagemenge	max 1% Einspritzmenge	4	3	12	2	8	2	8	2	8	3	12	4	16
- Leistungsklasse des Motors	500 – 1500 kW / Zyl	4	3	12	2	8	2	8	2	8	3	12	4	16
• Arbeitsmedium	0	0		0		0		0		0		0		0
- Flüssigkeit für Messversuche	Prüfö Shell V-Öil 1404	4	3	12	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
- Schmierung	durch Kraftstoff	4	3	12	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
- Zu verwendender Kraftstoff	Schweröl ISO 8217	4	3	12	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
<b>(2) Req. other than to Operation Function/Effects:</b>														
• Umgebungsbedingungen:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Umgebungsbedingungen	Laborluft, 20oC +/-5oC	3	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
• Einsatz:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Betriebsart	Dauerlauf	3	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
• Lebensdauer:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Lebensdauer	min. 5000 Betriebsstd.	3	3	9	1	3	2	6	2	6	3	9	4	12
• Instandhaltung:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Wartungsaufwand	üblich betriebener Aufw.	3	2	6	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
• Halterung bei Versuch und in Betrieb:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Charakteristik	lösbar	4	3	12	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
• Betriebskosten:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Betriebskosten	minimal	4	3	12	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
<b>(3) Req. to Pre-Manufacturing and Manufacturing Phases:</b>														
• Eignung für Entwurf und Fertigungsvorbereitung:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Charakteristik	hoch	3	2	6	2	6	3	9	3	9	3	9	4	12
• Eignung für Fertigung und Montage:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Charakteristik	Maschinenfertigung	4	2	8	2	8	3	12	2	8	3	12	4	16
• Produktionsart:	0	0		0		0		0		0		0		0
- Charakteristik	Einzel fertigung / Kleinserie	3	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12

Abbildung 2.5.: Auszug der Bewertungskriterien des technischen Systems. Anwendung von [34].

Kostenintensität (C) aufgeteilt sind. Einen Auszug aus den Bewertungskriterien zeigt die Abbildung 2.5.

Das Ergebnis kann übersichtlich in einem Graphen dargestellt werden (Abbildung 2.6). Die horizontale Achse gibt Auskunft über die Qualität der Variante, d.h. wie gut die Anforderungen an die Funktionen des technischen Systems erfüllt werden. Die vertikale Achse dient gemeinsam der Bewertungskriterien der Zeit- und Kostenaufwendigkeit der Varianten. Die untersuchten Varianten werden darin mit einer hypothetischen, idealen Lösung verglichen. Die ideale Lösung erhält die volle Punktzahl in allen Bewertungskriterien und besetzt daher die obere rechte Ecke der Darstellung. Die realen Varianten werden entsprechend der Punktzahl aufgetragen, die sie im Verhältnis zu der idealen Lösung erzielt haben. Die Abbildung 2.7 zeigt eine zusammenfassende Wertung der Funktionseigenschaften der einzelnen Varianten.

Aus der Abbildung 2.6 ist ersichtlich, dass die Variante 55A, 55B nicht nur die beste, sondern auch eine ausgeglichene Bewertung von Q, T und C erzielt hat. Die restlichen Varianten erreichen eine ähnlich gute Wertung von Qualität, verursachen dabei aber höhere Kosten und Zeitaufwand. Die existierende Lösung schneidet in der Kostenwertung gemeinsam mit der Variante Geo 3 am schlechtesten ab.

Alle in diesem Abschnitt bewerteten Varianten wurden einer theoretischen und rechnerischen Untersuchung unterzogen. Für die praktische Untersuchung am Prüfstand wurden die Varianten 55A, 55B und 6A, 6B ausgewählt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Kapitel 5 beschrieben.

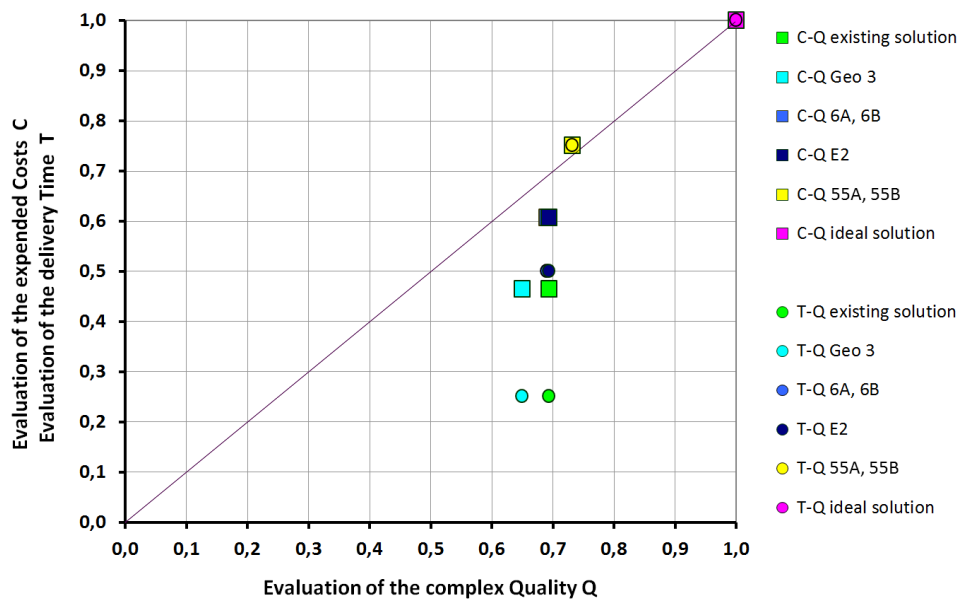


Abbildung 2.6.: Ergebnis der Bewertung hinsichtlich Qualität, Zeit- und Kostenansprüchen einzelner Varianten.

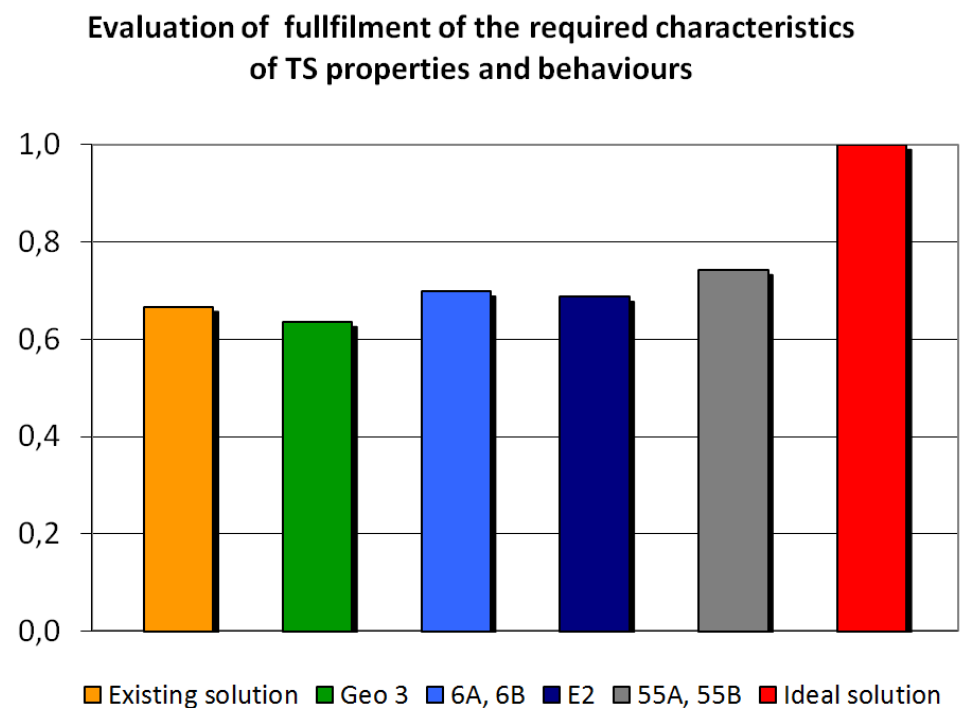


Abbildung 2.7.: Ergebnis der Bewertung hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen einzelner Varianten.

## 3. Analyse und allgemeine Lösungssuche

### 3.1. Einsatzbedingungen, Belastung

#### 3.1.1. Druckverlauf

Die Bauteile eines Einspritzsystems sind durch hohen Innendruck belastet, der einerseits einen hohen Mittelwert, andererseits auch Schwankungen mit deutlichem Ausschlag und kurzer Dauer aufweist. Diese Schwankungen sind im Wesentlichen zweierlei Ursprungs, wie im nächsten Absatz kurz geschildert wird. Die Druckwellen breiten sich durch die Leitungen aus und können auch entfernte Bauteile oder Systeme belasten. Ein Beispiel des Druckverlaufs in der Hochdruckleitung stellt die Abbildung 3.1 dar. Sie zeigt die Überlagerung der Schwingungen in einem System mit 8 Injektoren und Einspritzdruck von 1500 *bar*. Es handelt sich um einen Motor der Leistungsklasse 2-5 *MW*, dessen Einspritzsystem in [28] analysiert worden ist. Diese zeitlich veränderliche Beanspruchung, vereinfacht charakterisiert durch den Mittelwert  $p_m$  und die Amplitude  $p_a$ , bedeutet eine Gefahr hinsichtlich der Werkstoffermüdung.

Typischerweise bestehen die Schwankungen aus mehreren sich überlagernden Komponenten. Betrachtet man nur einen Injektor als isoliertes System, kann erstens ein Druckabfall nach jeder Öffnung der Einspritzdüse beobachtet werden, der eine logische Folge des Einspritzvorgangs ist. Danach folgt die Phase des Druckaufbaus. Da der Druck möglichst schnell wiederhergestellt werden muss, schwankt er üblicherweise erst deutlich über den Nominaldruck hinaus und wird dann heruntergeregelt. Die Dynamik dieses Abschnitts des Druckverlaufs ist abhängig von der Einstellung des Regelsystems und dem Zusammenspiel der betroffenen Komponenten des Einspritzsystems. Das schlagartige Schließen der Einspritzdüse durch die Nadel verursacht ebenfalls wesentliche hydraulische Stöße. Auch die Hochdruckpumpe, in der Regel eine Mehrkolbenpumpe, erzeugt Schwingungen, die eine vergleichsweise kleine Amplitude, aber eine hohe Frequenz aufweisen. Diese verschiedenen Schwankungen überlagern sich und bilden den Druckverlauf in dem Strang des Einspritzsystems der zu dem jeweiligen einen der vorhandenen Injektoren führt. Nicht zu vernachlässigen ist dann die Beeinflussung seitens der restlichen Injektorstränge. Es ist möglich, diese hydraulischen Schwankungen in dem System durch Konstruktionsmaßnahmen bis zu einer gewissen Grenze einzudämmen. Als hilfreich hat sich in dieser Hinsicht z. B. die Verwendung von integrierten Hochdruck-Einzelspeichern gezeigt (s. Abbildung 1.4) oder eine günstige Anordnung von Drosseln und Rückschlagventilen [28]. Mit funktionsbedingten Druckschwankungen muss allerdings weiterhin gerechnet werden.



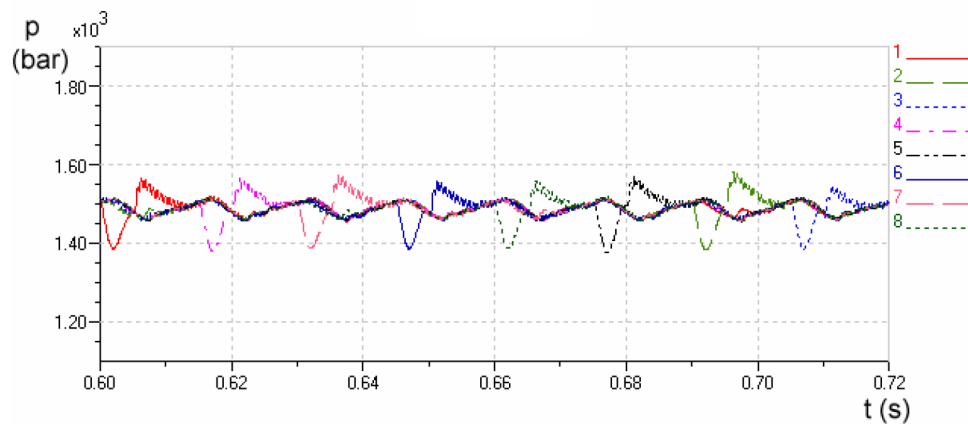


Abbildung 3.1.: Beispiel der Druckschwankungen in der Hochdruckleitung eines CR – Systems mit 8 Injektoren [28].

### 3.1.2. Eigenschaften des Schweröls

Das Schweröl, das als Treibstoff in der Schifffahrt dient, ist ein Rückstand aus den Erdöl verarbeitenden Raffinerien. Es enthält vor allem längere Kohlenwasserstoffmoleküle des alkanischen, alkenischen und cykloalkanischen Typs. Die wesentlich höhere Viskosität des Schweröls ( $30 - 700 \text{ mm}^2/\text{s}$  bei  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) gegenüber anderen Brennstoffen wie dem Dieselkraftstoff für Straßenfahrzeuge ( $2 - 3,5 \text{ mm}^2/\text{s}$  bei  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) begründet sich in der Länge der Molekülstränge, die sich bei Schweröl zwischen 20 und 70 und bei Diesel zwischen 10 und 20 Kohlenstoffatomen bewegt. Die Eigenschaften des Schweröls für die Schifffahrt werden durch die Richtlinie ISO 8217 in der letzten Revision aus dem Jahr 2005 bestimmt [13]. Je nach Güteklasse ändern sich außer der Viskosität auch andere Parameter, wie der Koksrückstand (Massenanteil  $10 - 22 \%$ ), Asche (Massenanteil  $0,10 - 0,15 \%$ ) und Schwefelinhalt (Massenanteil  $3,5 - 4,5 \%$ ). Der Wasseranteil  $0,5 \%$  (Vol.) und Inhalt an Aluminium und Silizium Verbindungen, sog. Catfines ( $80 \text{ mg/kg}$ ), ist den Klassen gemeinsam. Diese Werte beziehen sich auf den Treibstoff im Augenblick der Lieferung. Während des Aufbewahrens des Treibstoffs in Vorrattanks des Schiffes kann es zu weiterer Verunreinigung kommen, etwa durch Rost, Salzwasser usw. [57] Vor der Einspritzung muss der Treibstoff also gereinigt werden, wofür die Schiffe mit Aufbereitungsanlagen ausgestattet sind, die während der Fahrt kontinuierlich arbeiten. Der Separator dieser Anlagen gewährleistet die Entwässerung und Beseitigung der Catfines (mit Partikelgröße ca.  $5 \mu\text{m}$ ), der Vorwärmer erhöht die Temperatur des Treibstoffs auf über  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  um die für die Einspritzung geeignete Viskosität zu erreichen. Die am Ende des Aufbereitungsprozesses angebrachten Kraftstofffilter dienen als Sicherung der Reinigungsqualität und können in der Regel Partikel mit  $10 \mu\text{m}$  auffangen. Im Vergleich zum Dieselkraftstoff für Straßenfahrzeuge stellt beim Schweröl auch der wesentlich höhere Schwefelgehalt (ca.  $4 \%$  gegenüber  $0,001\%$ ) [13], [15] eine Belastung für das Einspritzsystem dar. In entwickelten Ländern gibt es Bemühungen, den Schadstoffinhalt gesetzlich zu senken. Mit dem Schwefelgehalt beschäftigen sich beispielsweise systematisch Richtlinien der Europäischen Kommission ([4], [5], [15], [7]). Diese Vorschriften beziehen sich allerdings immer nur auf das Hoheitsgebiet der

jeweiligen Länder. Beim Entwurf von Injektoren für Seeschiffe muss man also die Möglichkeit mit in Erwägung ziehen, dass minderwertiger Kraftstoff in anderen Ländern aufgenommen werden kann.

### 3.1.3. Temperatur

Die hohe Temperatur des Injektors wird verursacht durch die Wärme aus der Verbrennung, durch das Vorheizen des Schweröls während der Kraftstoffaufbereitung und durch die Verdichtung auf Einspritzdruck in der Hochdruckpumpe und evtl. im Druckübersetzer. Es wird Temperatur in der Größenordnung von 200 °C erwartet.

Das Vorheizen des Kraftstoffs ist nötig, um die Viskosität für die Einspritzung zu erreichen. Die allgemeine Abhängigkeit der Viskosität flüssiger Stoffe von der Temperatur kann durch eine exponentielle Beziehung ausgedrückt werden [51]. Häufig wird die Gleichung  $\eta = \eta_0 e^{-kT}$  verwendet, wo  $k$  und  $\eta_0$  flüssigkeitsspezifische Konstanten sind. In der Praxis können Viskositäten aus Diagrammen abgelesen werden. Ein Diagramm für verschiedene Schwerölklassen ist im Anhang auf der Abbildung A.1 zu sehen.

### 3.1.4. Festlegung und Beschreibung des zu analysierenden Bauteils

Als ein besonders belasteter Bauteil wurde die Arbeitskolbenführung zur Analyse ausgewählt. Dieser Bauteil muss die unten genannten Funktionen erfüllen und unterliegt dabei dem Verschleiß durch die Hubbewegungen des Arbeitskolbens und der Materialermüdung durch die Druckschwankungen im Brennstoff.

Die Arbeitskolbenführung hat insbesondere folgende Funktionen:

- den Arbeitskolben mit genügender Genauigkeit führen,
- Hochdruck in der Arbeitskammer gegen den niedrigen Druck im Rücklauf abdichten,
- Schmierung für die Kolbenbewegung ermöglichen,
- Kraftstoffzulauf zu dem Arbeitsraum ermöglichen,
- Entweichen des Kraftstoffs durch das Steuerventil ermöglichen,
- Zulauf- und Ablaufdrossel schaffen,
- Dichtung zu anliegenden Bauteilen schaffen,
- Weiterleitung von Leckagemenge von anderen Bauteilen in den Rücklauf ermöglichen.

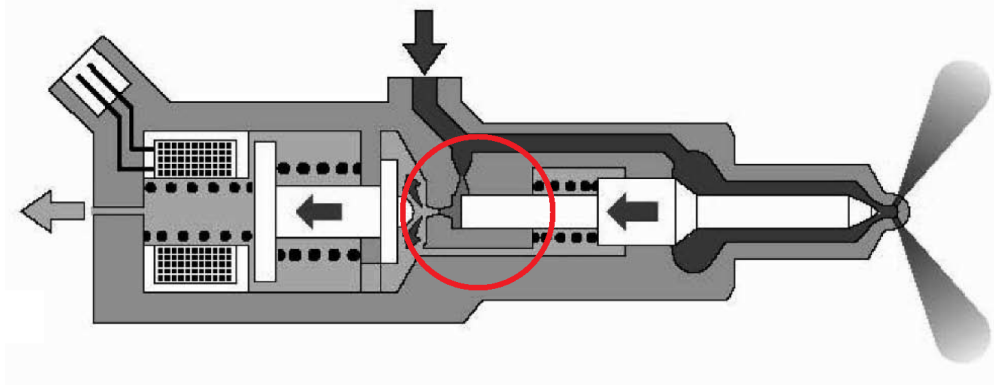


Abbildung 3.2.: Analysierter Bauteil.

## 3.2. Werkstoffermüdung und das Bruchverhalten

Die Ermüdung ist ein bekannter, überwiegend oberflächenbasierter Vorgang in Werkstoffen, die einer Belastung durch eine in der Zeit variable Größe ausgesetzt sind. Die aus der Belastung resultierende Spannung kann durch übliche Kennwerte charakterisiert werden: Beanspruchungsbereich  $\Delta\sigma$ , Spannungsamplitude  $\delta_a$ , Mittelspannung  $\delta_m$ , Spannungsverhältnis  $R$  und Amplitudenverhältnis  $A$ .

Die Ermüdung wirkt sich grundsätzlich negativ auf die Festigkeit des Bauteils aus und ist daher bei Bauteilen, die einer zyklischen Beanspruchung ausgesetzt sind, unbedingt zu berücksichtigen. Eine Reihe von Publikationen befasst sich mit dem Thema der Werkstoffermüdung tiefgehend.

### 3.2.1. Wöhlerkurve in Licht moderner Untersuchungen

Die Wöhlerkurve stellt die historisch erste Aufzeichnung der Wirkung dar, die Ermüdung auf Werkstoffe (in dem Fall der ersten Wöhlerkurve Stahl) ausübt. Die Grundlagen für ihr Erstellen liegen in Versuchen, die von August Wöhler bereits in den Jahren 1858 – 1870 durchgeführt worden sind. Obwohl diese Versuche und die daraus resultierenden Erkenntnisse ihre allgemeine Gültigkeit nicht verloren haben, ist es nötig, bei der Analyse des in dieser Arbeit beschriebenen Bauteils weitaus mehr Informationen zu berücksichtigen.

Die Gründe, warum die Wöhlerkurve in ihrer klassischen Form (s. Abbildung 3.3) nicht ausreicht, sind unter anderem:

- Die Wöhlerkurve wird aus Ergebnissen von Versuchen erstellt, die unter Laborbedingungen durchgeführt wurden. Die Charakteristik der Belastung ist meistens  $R = -1$  und  $A = \infty$  oder  $R = 0$  und  $A = 1$ , d.h. eine wechselnde und eine schwellende Belastung, wobei solche Belastungsfälle in der Praxis eher eine Ausnahme darstellen.

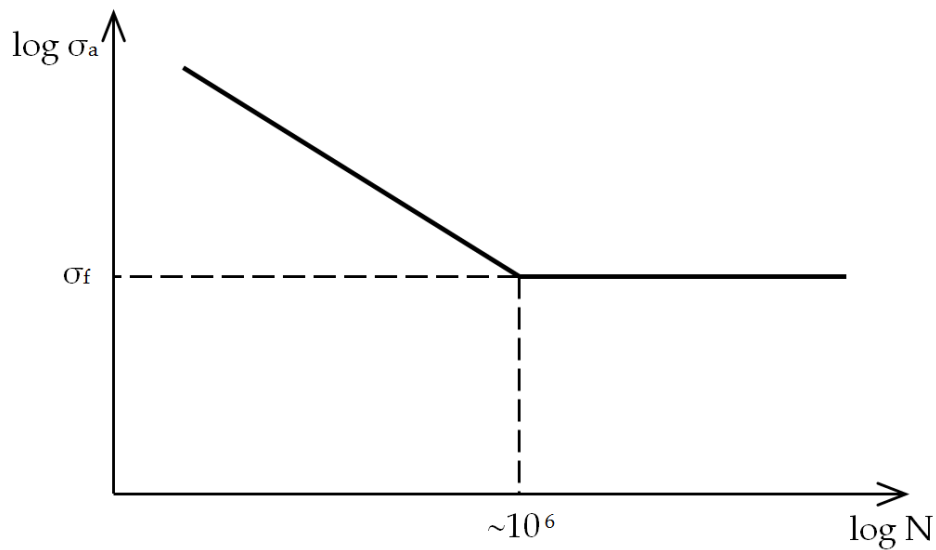


Abbildung 3.3.: Klassische Darstellung der Wöhlerkurve für Stahl.

- In die Erstellung einer Wöhlerkurve aus Messpunkten fließt außer den relevanten Messdaten auch ihre statistische Aufbereitung ein, die in verschiedenen Instituten in der Regel voneinander abweicht. In einer Studie von Finney und Mann [26] wurde an mehrere Institute der gleiche Datensatz verschickt mit dem Auftrag, aus den Messpunkten eine Wöhlerkurve auszuarbeiten. Wie stark der Einfluss der statistischen Datenverarbeitung sein kann zeigt die daraus resultierende Abbildung 3.4.
- Der Wöhlerversuch wird nach Normen durchgeführt, die nicht in allen Ländern den heutigen Ansprüchen an wissenschaftliche Arbeit entsprechen. Beispielsweise die aktuelle Fassung der deutschen Norm DIN 50100 aus dem Jahr 1978 unterscheidet sich kaum von der Fassung aus 1953 ([30] [6]).

Was die allgemeine Gültigkeit der Wöhlerkurve angeht, ist mit Abweichungen von der Realität vor allem im Bereich der Kurzzeitfestigkeit zu rechnen, wo die Lebensdauer überwiegend durch plastische Deformation bestimmt wird, wogegen die Wöhlerkurve alle Deformationen als rein elastisch ansieht. Im Bereich der Langzeit- und Dauerfestigkeit ist diese Annahme gerechtfertigt und die Kurve entspricht dem tatsächlichen Verhalten besser [17]. Obwohl aus der Aufgabenstellung dieser Arbeit die Verwendung von Stahl nicht zwingend hervorgeht, konzentriert sich die Suche als erstes auf diesen Werkstoff. Weitere Möglichkeiten der Werkstoffwahl werden im Kapitel 3.3 diskutiert.

Die Wöhlerkurve als die grundlegendste Informationsquelle über Ermüdungsverhalten ist allerdings nicht für alle Stahlsorten vorhanden. Für die erste Abschätzung der Werkstoffeigenschaften kann man sich folgender empirischen Annäherung bedienen [17].

$$\sigma_a = 1,62 \cdot R_m N^{-0,085} \quad (3.1)$$

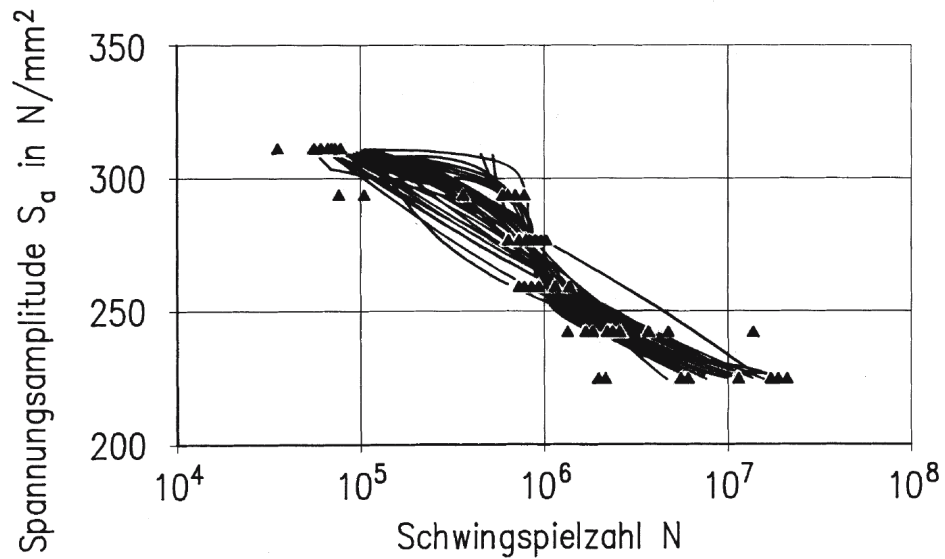


Abbildung 3.4.: Unterschiedliche Wöhlerkurven, die aus gleichen Messpunkten von unterschiedlichen Instituten erstellt worden sind (aus [30]).

die sich auf Messdaten und Beobachtungen stützt. Die Gültigkeit dieser Formel ist allerdings begrenzt auf  $10^3 < N < 10^6$  und auf Stahlsorten mit  $R_m < 1300\text{MPa}$ , weil es mit weiterer Steigerung der Zugfestigkeit in der Regel zu keiner nennenswerten Steigerung der Dauerfestigkeit kommt und der Wert  $\sigma_f \approx 690\text{MPa}$  angenommen wird. Ähnlich gibt es empirische Richtwerte der Dauerfestigkeitsgrenze  $\sigma_f$  als Funktion der  $BHN$ , und zwar

$$\sigma_f \approx 0,25BHN \quad (3.2)$$

für Werte  $BHN \leq 400HB$  und für  $BHN > 400HB$ .

Bei Stahl wird unter Einfluss der klassischen Arbeiten von Wöhler häufig vorausgesetzt, dass die Dauerfestigkeitsgrenze der Schwingzahl von  $2-5 \times 10^6$  Zyklen entspricht und weiter keine Rissgefahr besteht. Gegenwärtige Arbeiten, die sich mit dem Bereich der Very High Cycle Fatigue (VHCF) beschäftigen, fanden dagegen eine Abweichung von diesen Annahmen, die den Bereich über  $10^8$  Zyklen betrifft. Mehrere Autoren haben an der Wöhlerlinie ein Plateau bei  $10^6$  Zyklen beschrieben, gefolgt von einem weiteren Abfall (s. Abbildung 3.5a). Dieses Verhalten wurde als typisch gefunden für hochfeste Stähle und Kugellagerstähle, die auch aufgrund ihrer Aussetzung hoher Zyklenzahl in heutigen Anwendungen am häufigsten untersucht worden sind. Weiterhin wurde von Mayer [49] behauptet, dass sich dieses Verhalten häufiger beim Umlaufbiegeversuch, als bei anderen Belastungsarten demonstriert. Für den Stahl 100Cr6 führte Mayer eine Untersuchung mit Zug – Druck – Belastung von konstanter und variabler Spannungsamplitude durch. Seine Ergebnisse zeigten ein Verhalten ähnlich der Abbildung 3.5b, mit einem

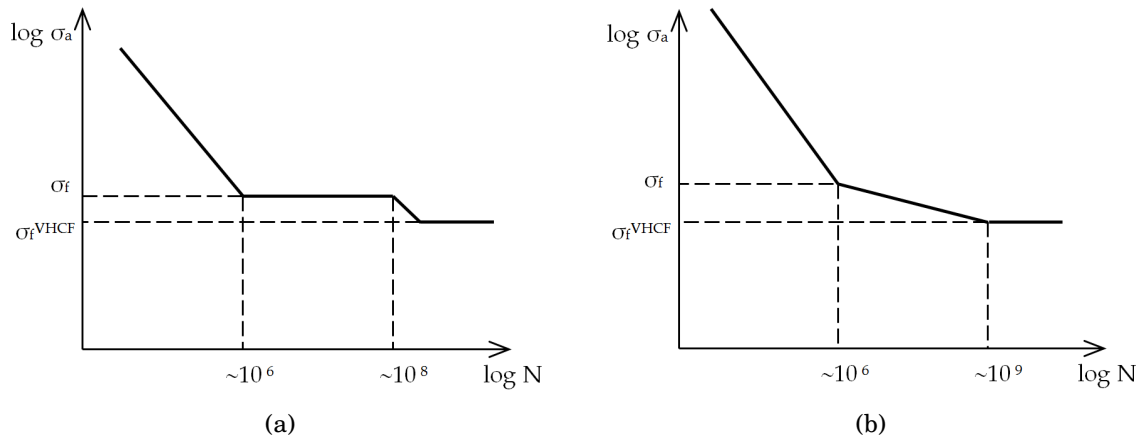


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung einer Lebensdauerlinie mit VHCF Bereich.

Dauerfestigkeitswert bei  $5 \times 10^8$  Zyklen für konstante und  $5 \times 10^9$  Zyklen für variable Spannungsamplitude.

Sehr wichtige Informationen über das Ermüdungsverhalten gibt auch die zyklische Spannungs-Dehnungskurve, die sich aus den Hysteresekurven für verschieden große Belastungsamplituden des Werkstoffs ergibt. Messdaten zeigen, dass die Kurve durch

$$\sigma_a = \sigma_f \left( \frac{\epsilon_{ap}}{\epsilon_f} \right)^2 \quad (3.3)$$

beschrieben werden kann, wo  $\epsilon_{ap}$  die Amplitude der plastischen Deformation und  $\epsilon_f$  der zyklische Duktilitätskoeffizient ist. Der Wert von  $n$  liegt meistens zwischen 0,1 und 0,2 [41]. In einigen Werkstoffen kommt es bei der zyklischen Belastung aufgrund von Veränderungen in der Mikrostruktur auch zu Veränderungen der Eigenschaften. Der Widerstand verschiedener Werkstoffe gegen die Verformung kann mit der steigenden Lastwechselzahl zunehmen (bei sog. zyklisch verfestigenden Werkstoffen) oder abnehmen (zyklisch entfestigende Werkstoffe). Diese Änderung der Eigenschaften tritt am Anfang der Belastung auf und nach einer gewissen Lastwechselzahl wird wieder ein stabiles Niveau erreicht [41]. Das Verhalten kann ungefähr abgeschätzt werden wie folgt: bei  $\frac{R_m}{R_{p0,2}} < 1,4$  ist eine Verfestigung, bei  $\frac{R_m}{R_{p0,2}} < 1,2$  eine Entfestigung wahrscheinlich [48].

### 3.2.2. Einflüsse auf die Schwingfestigkeit

Die Abhängigkeit der ertragbaren Amplitude von der Mittelspannung zeigt das Haigh – Diagramm. Auf der Abbildung 3.6 sind die möglichen Annäherungen dargestellt. Messdaten aus der allgemeinen Praxis fallen üblicherweise zwischen die Kurven nach Goodman und Gerber. Für unseren Belastungsfall mit dem Spannungsverhältnis  $R$  nahe

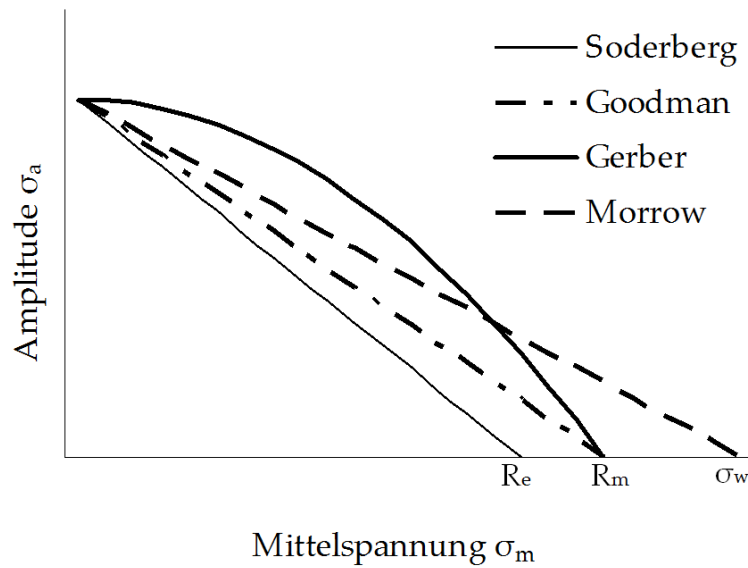


Abbildung 3.6.: Das Haigh – Diagramm für Stahl [17].  $\sigma_w$  - wahre Bruchspannung.

1, gibt es soweit wenig experimentelle Daten [17]. Angesichts dessen ist es angemessen, die konservative Annäherung nach Goodman zu verwenden.

Außer der Mittelspannung wird die Dauerfestigkeit auch von anderen bauteil- oder belastungsspezifischen Größen beeinflusst. Es trifft insbesondere der Einfluss der Oberflächengüte und -behandlung, Bauteilgröße, Temperatur und Korrosion zu, die in [41], [17], [56], [59] gut beschrieben sind.

Aus der Sicht der Spannungskonzentration ist die *Oberflächengüte* ein wichtiger Aspekt. Da die Lebensdauerexperimente gewöhnlich an polierten Proben durchgeführt werden, muss bei dem technischen Bauteil meistens mit einer Minderung der Eigenschaften gerechnet werden. Das Ausmaß dieser Minderung ist nicht nur durch die Rauheit allein bestimmt, sondern auch durch den jeweiligen Werkstoff. Allgemein kann gesagt werden, dass feinkörnige Werkstoffe mit homogener Struktur anfälliger für schlechte Oberflächengüte sind, als Werkstoffe mit grobem Korn. Empirische Näherungsgleichungen zum Erfassen des Oberflächeneinflusses sind selten, üblicherweise werden mindernde Koeffizienten aus Diagrammen abgelesen, wie etwa aus der Richtlinie [8]. Es muss zusätzlich bemerkt werden, dass es während plastischer Deformation zur Bewegung der Gitterfehler kommt, die bis auf die Bauteiloberfläche gelangen. Dadurch würde auch bei einem Bauteil mit ideal ebener Oberfläche durch die Belastung eine unebene Struktur entstehen, die mikroskopische Spannungskonzentratoren beinhaltet [41].

Es wurde durch Versuche bereits ausreichend erwiesen, dass sich *Druckspannungen in der Oberfläche* positiv und Zugspannungen negativ auf die Dauerfestigkeit eines Bauteils auswirken. So werden entweder mechanische Behandlungsmethoden, wie Kugelstrahlen, Aufdornen, Festwalzen etc., oder Wärmebehandlungsmethoden (Nitrieren, Aufkohlen, ...) angewendet, um die Lebensdauer des Bauteils zu steigern. Wichtig zu bedenken ist, dass sich durch das Anwenden solcher Methoden eine makroskopisch inhomogene Eigenschaftsverteilung in dem Bauteil bildet. Betrachten wir beispielsweise

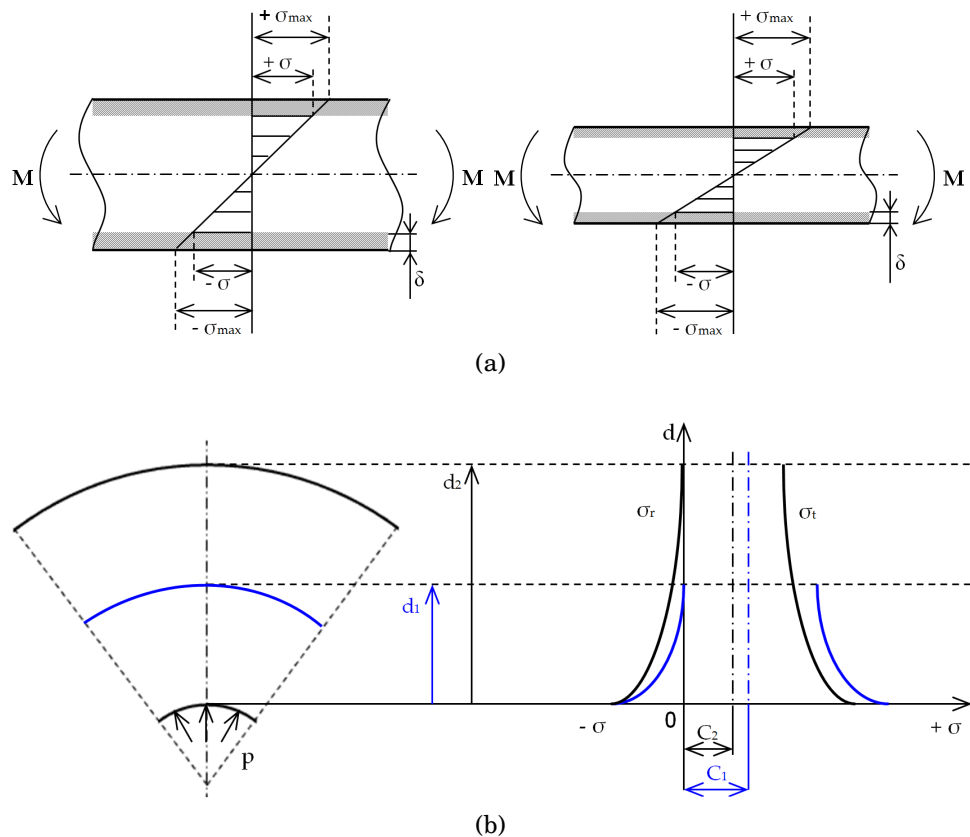


Abbildung 3.7.: Spannung in verschiedenen Bauteilen bei Biege- und Innendruckbelastung.

ein Bauteil mit einer deutlich verfestigten Oberfläche, können wir feststellen, dass für eine plastische Deformation der Oberfläche wesentlich höhere Spannungen nötig sind, als für die Deformation des Grundwerkstoffs in dem Kern. In dem Fall kann es passieren, dass ein etwaiger Ermüdungsris nicht auf der Oberfläche, sondern auf der Grenze zwischen der verfestigten Schicht und dem Grundwerkstoff entsteht [41]. Ein solcher Riss könnte dann durch optische Prüfverfahren nicht rechtzeitig entdeckt werden.

Der *Größeneinfluss* wird durch mehrere Aspekte begründet. Ermüdungsrisse werden grundsätzlich leicht an Stellen mit erhöhter Spannungskonzentration initiiert. Zu solchen Stellen gehören auch Inhomogenitäten in der Werkstoffstruktur, wie Inklusionen, harte Karbide, etc. Mit der zunehmenden Größe des Bauteils wachsen ihre absolute Anzahl im Werkstoffvolumen und die Anzahl solcher Stellen auf der Bauteiloberfläche. Damit ist die Initiierung eines Ermüdungsrisse im größeren Bauteil einfacher. Bei sehr großen Bauteilen (was hier allerdings nicht der Fall sein wird) kommt erschwerend die Tatsache hinzu, dass eine homogene Werkstoffstruktur bei dem Herstellungsverfahren schwieriger, oder gar unmöglich zu erhalten ist.

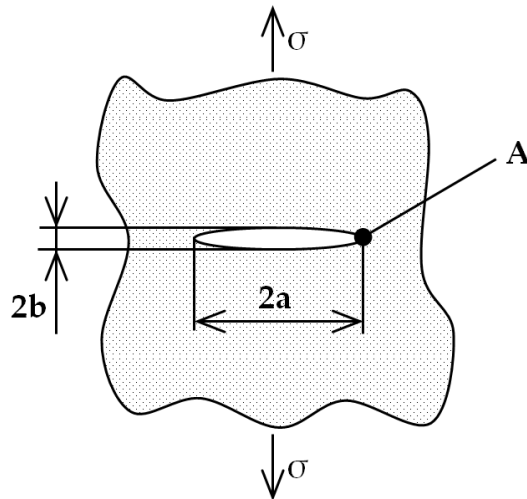
Der andere Aspekt des Größeneinflusses ist der Verlauf des Spannungsgradienten bei der Belastung. Die Abbildung 3.7 zeigt zwei Beispiele für unterschiedlich große Bauteile. Unter 3.7a sind Proben beim Biegeversuch abgebildet. Der Biegemoment  $M$  verursacht



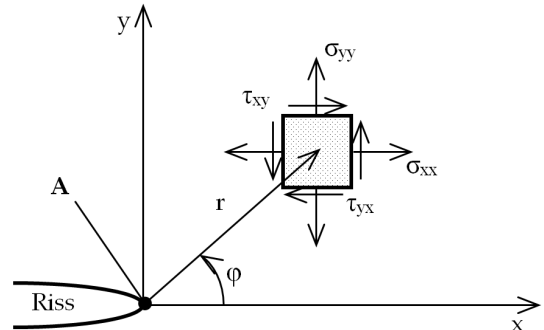
in beiden Proben eine gleich große Spannung  $\sigma_{max}$  auf der Oberfläche. Bedingt durch die größeren Abmessungen fällt in der größeren Probe die Spannung in radialer Richtung langsamer ab. Die Materialschicht, die einer bestimmten hohen Spannung  $\sigma$  ausgesetzt ist, hat demnach bei der größeren Probe eine größere Dicke  $\delta$ . Folglich steht unter hoher Spannung ein größeres Volumen, in dem es statistisch mehr Fehlstellen geben wird. Unter 3.7b sehen wir einen Ausschnitt eines unendlich langen dickwandigen Rohres. Wir betrachten zwei Varianten mit gleichem Bohrungs- und unterschiedlichen Außendurchmessern  $d_1$  und  $d_2$ . Der gleiche Innendruck  $p$  verursacht in beiden Bauteilen Spannungen  $\sigma_r$  in radialer und  $\sigma_t$  in tangentialer Richtung. Die Verläufe der Spannungen sind symmetrisch um eine Achse, die in der Entfernung  $C$  von der Vertikalachse liegt. Aus der Symmetrie ergibt sich ein kleinerer Wert von  $\sigma_t$  für größere Wanddicken. Die Größe der Integrationskonstante  $C$  ergibt sich aus den Randbedingungen und hängt von  $p$ ,  $d_1$  und  $d_2$  so ab, dass  $C$  bei steigendem  $d_2$  und konstanten restlichen Parametern fällt.

Der kombinierte Einfluss der zyklischen Belastung und *Korrosion* ist wesentlich schwerwiegender, als die beiden Einflüsse getrennt. Vereinfacht kann gesagt werden, dass einerseits das korrosive Medium die Metalloberfläche angreift und schädigt, wodurch Schwachstellen entstehen. Darüber hinaus entblößt der fortschreitende Ermüdungsrisser neues Material, das angegriffen werden kann. Das Prinzip der Passivierung, etwa durch das Bilden einer oxidierten Schicht auf der Oberfläche, versagt aus diesem Grund bei der Schwingbelastung. Die Korrosionsschädigung unter zyklischer Last ist ein sehr komplexer Prozess. Obwohl sich mit der Problematik zahlreiche Arbeiten befassen, sind vorhandene Daten aufgrund der großen Anzahl an Variablen und ihren Kombinationen bisher allgemein äußerst unzureichend [59]. Darüber hinaus zeigten beispielsweise einige Versuche von Barsom [18], dass auch Aspekte wie die Form der Lastkurve bestimmen, wie starken Einfluss die korrosive Umgebung auf die Dauerfestigkeit haben wird. Durch Testreihen belegte er, dass Proben, belastet durch einen „negativ“ sägezahnförmigen Spannungsverlauf ( $\searrow$ ), durch die Korrosion nicht beeinträchtigt worden sind, wobei die Proben mit „positiv“ sägezahnförmigen Spannungsverlauf ( $\nearrow$ ) schnelleren Risswachstum aufgewiesen haben. Darüber hinaus berichtet Fisher [27], dass bei unlegierten und legierten Stählen in korrosiver Umgebung ein ausgeprägter Dauerfestigkeitswert verschwindet und das Verhalten ähnelt z.B. dem von Leichtmetallen, deren Schwingfestigkeit auch nach  $10^6$  Zyklen kontinuierlich abfällt.

In dem konkreten Fall des Injektors, wo es sich bei dem korrosiven Medium um Schweröl handelt, kommen drei Arten der Korrosion in Frage, und zwar die chemische Korrosion (durch Reaktion von Schwefel aus dem Treibstoff mit den Elementen des Werkstoffs), die Reibkorrosion (in der Passungsfläche Kolben – Kolbenführung) und die Erosionskorrosion (verursacht durch die abrasive Wirkung der etwaigen Verunreinigungen im Brennstoff). Die Korrosionsanfälligkeit von Stählen wird allgemein durch einen erhöhten Chromanteil gemindert [17], [56]. Untersuchungen an Stählen, die in Raffinerien verwendet wurden, zeigen einen deutlichen Einfluss von Schwefel auf die Oberflächenschicht, begleitet durch Diffusion. Schwefelkorrosion wird verstärkt durch Temperatur und die Präsenz von Wasserstoff. Austenitische Stähle mit hohem



(a) Idealisierter elliptischer Riss in unendlicher Platte.



(b) Polarkoordinatensystem zur Beschreibung der Spannung vor dem Riss.

Chromgehalt zeigen bessere Resistenz gegenüber unlegierten oder schwach legierten Stählen [35]. Es sind Arbeiten vor allem aus dem Bereich der petrochemischen Industrie vorhanden (s. [35], [64], [46]), die sich dem Schwefeleinfluss widmen. In der Regel wird jedoch nur eine begrenzte Werkstoffgruppe betrachtet und auch die Einsatzbedingungen weichen ab. Ihre Schlussfolgerungen können also als allgemeiner Richtwert betrachtet werden. Mit dem Schwefeleinfluss auf Stahl befassen sich außerdem die McConomy und Couper-Gorman Diagramme.

Je nach Werkstoffart hat auch die Temperatur einen Einfluss auf Schwingfestigkeit. Bei unlegierten Stählen fängt der Abfall der Festigkeitskennwerten bereits bei 100 °C an [8]. In legierten Stählen wird die Grenze weiter nach oben verschoben. Kriechen wird bei der Wechselbelastung erst ab etwa halber Schmelztemperatur erwartet [17].

### 3.2.3. Bruchmechanik

Mit Hilfe der Bruchmechanik lassen sich die Geschwindigkeit und das Verhalten des Ermüdungsrisses analysieren und vorhersagen. Zu Verfügung stehen mehrere Konzepte, wie etwa das Nennspannungs-, Strukturspannungs-, Kerbspannungs- oder Rissfortschrittskonzept, zwischen denen je nach Aufgabe und Bauteilgeometrie entschieden wird [56]. Verschiedene Werkstoffarten weisen typisches Rissverhalten auf: linearelastisch (z.B. hochfeste Stähle), elastisch-plastisch (niedrig- und mittelfeste Stähle), voll plastisch (austenitische rostfreie Stähle), viskoplastisch (Metalle unter hoher Temperatur) etc. [16] Die Bruchmechanik stützt sich auf einige grundlegende Untersuchungen, Theoreme und Gleichungen. Die Basis besteht in der Betrachtung eines Risses, beispielsweise in einer ebenen, unendlichen Platte.

An der Rissfront kommt es zu einer Konzentration der Spannung. Für das linearelastische Verhalten wurde für die Spannung im Punkt A eines idealisierten elliptischen

Risses mit Abmessungen  $a \gg b$  folgende Gleichung vorgeschlagen [16]

$$\sigma_a = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (3.4)$$

wo  $\rho$  der Radius der Rissfront ist. Wie sich  $\rho$  Null nähert, steigt die Spannung ins Unendliche, was bedeuten würde, dass ein Bauteil mit Riss bei kleinster Belastung brechen würde. Diese Diskrepanz wird durch das Einführen einer kleinen, sich plastisch deformierbaren Zone an der Spitze des Risses beseitigt. Die Spannung in der Zone vor der Rissfront kann definiert werden, indem ein Polarkoordinatensystem eingeführt wird (s. Abbildung 3.8b). Unter seiner Verwendung können die Spannungen ausgedrückt werden als

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\phi) \quad (3.5)$$

wo  $K_I$  der Spannungsintensitätsfaktor für den Spannungsmodus  $I$  (Kraft bewirkt eine Rissöffnung) und  $f_{ij}$  eine Funktion der Koordinate  $\phi$  ist. Im linearelastischen, isotropen Werkstoff ergeben sich dann für das Spannungsfeld vor dem Riss folgende Beziehungen

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\phi}{2} \left( 1 - \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{3\phi}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\phi}{2} \left( 1 + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{3\phi}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{3\phi}{2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

und für ebenen Verzerrungszustand

$$\sigma_{zz} = \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (3.7)$$

mit  $\nu$  als Poissonzahl. Diese Gleichungen gelten nur in einer kleinen Zone unmittelbar vor dem Riss. Außerhalb von dieser Zone gilt ein Spannungszustand, der sich aus der äußeren Belastung, d.h. aus den Randbedingungen nach den Regeln der klassischen Festigkeitslehre ergibt. Aus den Gleichungen 3.6 geht hervor, dass das Spannungsfeld innerhalb der Zone, in der Entfernung  $r$  und Richtung  $\phi$  von der Rissfront, durch einen einzigen Parameter, den Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  charakterisiert ist. Folglich kann die Wirkung von jedem Riss durch diesen einzelnen Faktor beschrieben werden. Diese Erkenntnis ist eines der wichtigsten Konzepte der Bruchmechanik [16]. Für einige Rissgeometrien und Belastungsarten ist es möglich, eine geschlossene Lösung für  $K_I$  zu finden. Für komplizierte Geometrien oder Spannungszustände kann auf experimentelle Daten oder numerische Analyse zurückgegriffen werden. In der Abbildung 3.8 wird als Beispiel die Verteilung der reduzierten Spannung (von Mises) vor einem Riss dargestellt,

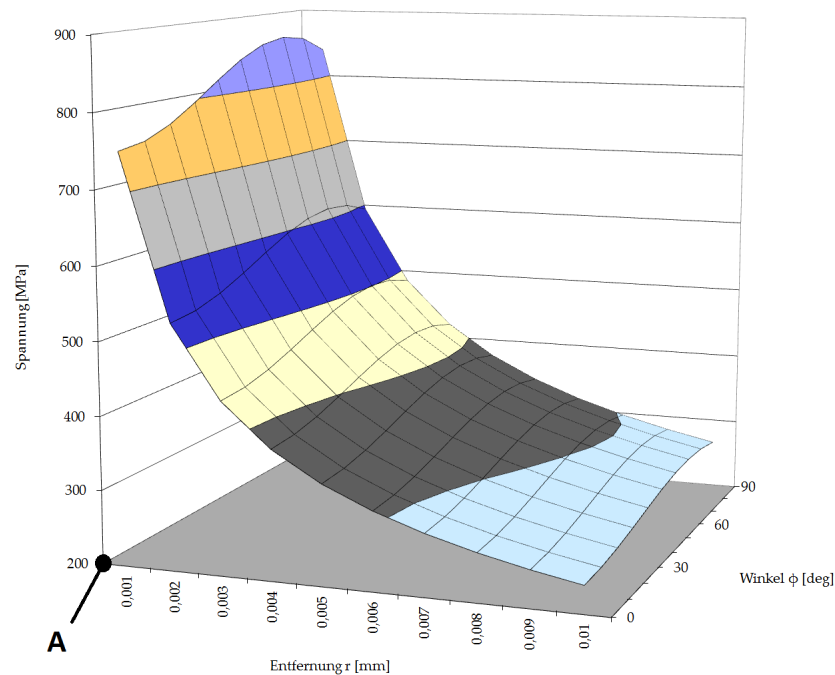


Abbildung 3.8.: Von-Mises-Spannung in der Zone vor einem Riss (ebener Spannungszustand).

der mit  $0,01 \text{ mm}$  Länge von der Seite in eine einseitig unendliche Platte fortschreitet. Die Platte befindet sich unter Zugspannung  $\sigma = 300 \text{ MPa}$ , die angesichts des kleinen Risses im Unendlichen angreift. Es wird das Koordinatensystem aus der Abbildung 3.8b verwendet, mit dem Ursprung in der Rissfront (Punkt A).

Der Fortschritt eines Risses durch den Werkstoff wird durch die Paris-Gleichung

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (3.8)$$

beschrieben, wo  $C$  und  $m$  werkstoffspezifische Konstanten sind. Es wurde in der Vergangenheit ohne Erfolg versucht, einen Zusammenhang zwischen dem Exponenten  $m$  und den statischen Festigkeitsparametern des Werkstoffs zu finden. Es zeigte sich allerdings ein Zusammenhang mit dem Exponenten  $n$  der zyklischen Spannungs – Dehnungskurve 3.3, und zwar sinkt  $m$  mit steigendem  $n$ . Dies bestätigt, dass auch für den Fortschritt des Risses die plastische Deformation eine bestimmende Größe ist [41].

Das Paris-Gesetz in der einfachsten Form 3.8 wird in der mittleren Phase des Ermüdungsvorgangs als gültig akzeptiert. Abweichend verhalten sich metallische Werkstoffe allerdings bei Belastung durch sehr kleine oder sehr große Spannungsamplituden, d.h. bei kleinen und großen Werten von  $\frac{da}{dN}$ , wenn der Riss nur langsam fortschreitet oder sich das Versagen durch Erreichen der Festigkeitsgrenze nähert (s. Abbildung 3.9). Der Bereich in der Nähe von  $K_c$  betrifft nur einige wenige Zyklen kurz vor Bruch und ist daher nicht besonders wichtig. Viel wichtiger ist der Bereich des langsamen

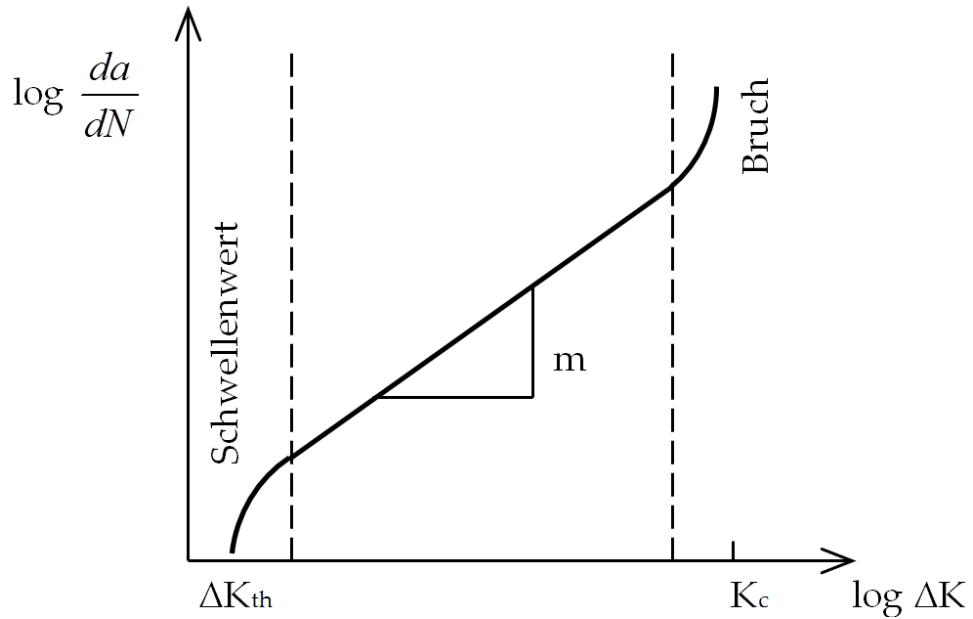


Abbildung 3.9.: Typisches Rissverhalten von Metallen (nach [16]).

Rissfortschritts und der Punkt  $\frac{da}{dN} = 0$ , der beim Wert  $\Delta K_{th}$  eintritt. Der werkstoffspezifische Schwellenwert  $\Delta K_{th}$  gibt die Belastungsgrenze an, unter der sich ein Riss nicht fortpflanzt. Eine gute Informationsquelle zum Schwellenwert verschiedener Werkstoffe stellt Taylor [62], [63] dar. Manchmal kann Rissfortschritt beobachtet werden, dessen Geschwindigkeit sich unter den Atomgitterabmessungen pro Belastungszyklus bewegt. Das bedeutet, dass sich der Riss nicht bei jedem Zyklus an seiner gesamten Front fortpflanzen kann [54].

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass alle für die linear-elastische Bruchmechanik angeführten Regeln nur dann gültig sind, wenn die plastische Zone vor der Rissfront sehr klein im Vergleich zu den Abmessungen des Bauteils ist. Wie sich die Spannung im Bauteil der Streckgrenze des Werkstoffes nähert, kann angenommen werden, dass sich ein verhältnismäßig großes Volumen im plastischen Zustand befindet. In dem Fall muss das Konzept der elastisch-plastischen Bruchmechanik angewendet werden.

### 3.3. Werkstoffwahl

#### 3.3.1. Stahl

Stahl stellt wohl den am gründlichsten untersuchten Werkstoff des heutigen Maschinenbaus dar und sein Verhalten hinsichtlich Ermüdung, Korrosion und Bearbeitung ist gut beschrieben. Seine Festigkeitswerte, die große Breite an Stahlsorten, gute Möglichkeiten zur Beschaffung und Bearbeitung lassen ihn als eine gute Wahl erscheinen. Angesichts der bisher beschriebenen Aspekte ergeben sich für die Wahl einer passenden Stahlsorte folgende Schlussfolgerungen.

- um der Schwefelkorrosion entgegen zu wirken, soll ein Stahl mit ausreichend Chrom und einem Zusatz von Molybdän verwendet werden
- um der Bildung von festigkeitsmindernden Nickelsulfiden vorzubeugen, sollen nickelhaltige Stähle vermieden werden
- um Spannungskonzentration in der Mikrostruktur zu verhindern, sollen Stähle mit martensitischer Struktur vermieden werden. Vorzuziehen ist das langsamere bainitische Abschrecken
- um gute Verschleißfestigkeit ohne die scharfe martensitische Struktur zu erreichen, sollte die Struktur von Sorbit geschaffen werden
- die Mikrostruktur des Stahles soll sehr feinen und gleichmäßigen Korn aufweisen
- es soll eine hohe Mikroreinheit des Werkstoffes angestrebt werden, um die Zahl von Einschlüssen zu minimieren. Aus diesem Grund ist beispielsweise das Verwenden von Stählen aus Siemens-Martin-Öfen, die allerdings in Westeuropa ohnehin nicht mehr in Betrieb sind, ausgeschlossen
- es kann zwischen austenitischen und ferritischen Stählen gewählt werden. Die ersteren weisen bessere Korrosionseigenschaften aus, die austenitische Struktur ist allerdings instabil. Die Struktur von Ferrit ist dagegen thermisch stabil, weist aber gewöhnlich schwächere mechanische Eigenschaften aus
- die einzelnen Stähle sollen zusätzlich mit Hinsicht auf ihre Eignung zu verschiedenen Wärme- und Oberflächenbehandlungen betrachtet werden

Aufgrund dieser Kriterien wurden Werkstoffe für die ersten Versuche an Proben vorgeschlagen, wie sie in der Tabelle 3.1 aufgelistet sind. Die Reihenfolge wurde nach der erwarteten Eignung für die Anwendung gewählt und sollte bei der Durchführung der Versuche beibehalten werden. Es wurden ebenfalls Stahlsorten vorgeschlagen, die einigen von den oben genannten Punkten nicht entsprechen, für den Fall, dass sich die erste Wahl als ungünstig zeigen sollte.

	DIN	W. Nr.	ČSN	Bemerkung
1.	42CrMo4	1.7225	15 142	Vergütungsstahl, Kaltfließpressstahl
2.	39CrMoV13-9	1.8523		Nitrierstahl
3.	X1CrNiCoMo12-8-5	1.6964		Maraging-ähnlicher Stahl
4.	X210CrW12	1.2436	19 437	Werkzeugstahl für Kaltarbeit
5.	X30CrMoN15-1	1.4108		Martensitic High Nitrogen Tool Steel

Tabelle 3.1.: Vorgeschlagene Stähle für die Arbeitskolbenführung

### 3.3.2. Gesinterte Werkstoffe

Durch Pulvermetallurgie (PM) hergestellte Werkstoffe und aus ihnen bestehende Bauteile stellen seit einiger Zeit eine interessante Alternative zu klassischen Herstellungsverfahren dar. Die größten Vorteile ergeben sich aus der Möglichkeit, verschiedene Pulver aus unterschiedlichen Werkstoffen zusammen zu mischen. Der durch das anschließende Pressen und Sintern entstandene Festkörper kann dann spezifische, maßgeschneiderte Werkstoffeigenschaften haben, die womöglich durch andere Verfahren nicht realisierbar wären.

Charakteristisch für die PM-Bauteile ist die Porosität, die von dem Druck beim Pressen sowie Temperatur und Zeit beim Sintern abhängt. Von der Porosität wickeln sich dabei die Ermüdungseigenschaften des Werkstoffes ab. Die Arbeit [52] zeigt, dass mit zunehmender Porosität das Verhältnis von Ermüdungsfestigkeit zur Festigkeitsgrenze abnimmt. Versuche, die Porosität durch Infiltration des fertigen Werkstoffes mit Kupfer zu mindern, führen zum Erhöhen der Dichte und Veränderung der Porenmorphologie. Obwohl diese beiden Aspekte sowohl bei niedrigfesten, als auch höherfesten PM-Werkstoffen beobachtet wurden (gesintertes reines Eisen und Distaloy AE+0,7C Stahl), führten sie zu Verbesserung der Ermüdungswerte nur bei dem niedrigfesten Werkstoff. Beim PM-Stahl konnte keine Verbesserung beobachtet werden [58].

Es wurde auch ausreichend bewiesen, dass oberflächennahe Poren oft die Initiierungsstelle des Ermüdungsbruchs darstellen. In Bauteilen mit niedrigerer Dichte (d.h. mit vielen Poren) ist die Größe und Form der Poren ein wichtiger Faktor zum Beeinflussen der Schwingfestigkeit. In Bauteilen mit höherer Dichte gewinnt dagegen der Einfluss der Wärmebehandlung an Wichtigkeit [40].

Um die Ermüdungsfestigkeit der pulvermetallurgischen Bauteile nachträglich zu erhöhen, können Methoden zur Oberflächenverdichtung angewendet werden [14]. Diese Methoden sind oft mechanischer Natur, wie das Rollieren oder kalibrierähnliche Verfahren.

Pulvermetallurgische Werkstoffe sind hinsichtlich Ermüdungseigenschaften vor allem aus zwei Gründen interessant. Erstens ist es möglich, durch das Mischen von Pulvern bestimmter Metalle gezielt einen Werkstoff mit genau definierten Eigenschaften herzustellen. Vorausgesetzt die Aufbereitung, vor allem das Mischen der Pulver wurde kompetent und gewissenhaft durchgeführt, ist die Mikrostruktur des Werkstoffes gleichmäßig.

Der zweite Aspekt ist das Verhalten eines Ermüdungsrisses beim Fortschritt durch den Werkstoff. Stößt ein Riss auf eine Pore, wird seine Front abgestumpft, was zum Stoppen des Risses führen kann. Um diesen Effekt zu erzielen, müssen die Poren eine günstige Form haben. Zum Charakterisieren der Porenform dient der Formfaktor. Lange, rissähnliche Poren haben einen Formfaktor nahe 0; gleichmäßige, kugelförmige Poren nahe 1. Der Formfaktor wird insbesondere durch Sintertemperatur, weniger stark durch Dichte beeinflusst. Dies wurde für Mo – Mn – Stähle in [40] und für Cu – und Cu – Ni – Stähle in [61] gezeigt.

Die Ermüdungsfestigkeit kann weiter auch durch entsprechende Leguren verbessert werden. Die Arbeit [40] und andere belegen allerdings, dass sich der Effekt der Legur nur bei Bauteilen mit einer höheren Dichte zeigt. Die festigkeitsmindernde Wirkung der Poren in Bauteilen niedrigerer Dichte (etwa  $\rho < 6,75\text{g/cm}^3$ ) übersteigt den Einfluss der günstigeren Struktur des Grundwerkstoffes.

### 3.3.3. Verbundwerkstoffe

Es handelt sich um Werkstoffe, die meistens aus zwei, manchmal auch mehreren verschiedenen Materialien bestehen. Die steifere Komponente, bezeichnet als Bewehrung, ist dabei eingebettet in der anderen, der sog. Matrix. Damit man einen Werkstoff als einen Verbundwerkstoff bezeichnen kann, muss der Anteil der Bewehrung größer als 5% sein, die Eigenschaften der Bewehrung und Matrix müssen sich voneinander deutlich unterscheiden und der Werkstoff muss durch Mischen der Komponenten hergestellt werden [55]. Aufgrund der vielen Varianten, die sich für die Wahl der Bewehrung und Matrix ergeben, können Verbundwerkstoffe mit den unterschiedlichsten Eigenschaften hergestellt werden. Die resultierenden Materialwerte sind gewöhnlich besser, als die der einzelnen Komponenten.

Aus der breiten Palette an Verbundwerkstoffen sind für unsere Anwendung wahrscheinlich die mit metallischer Matrize (MMC), vielleicht auch aus Keramik am interessantesten. Abgesehen von den Werkstoffen der Matrize und Bewehrung werden die Eigenschaften des Verbundes auch durch die Art und Anordnung der Bewehrung und durch die relative Richtung der Belastung zur Bewehrung bestimmt.

Bei Verbundwerkstoffen ist allerdings fraglich, inwiefern die inhomogene Struktur eine Gefahr hinsichtlich der Initiierung des Ermüdungsrissses darstellt. Es konnte beispielsweise festgestellt werden, dass eine Verstärkung der Aluminiumlegierung AA6061 mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Partikeln oder Kurzfasern in einer Verschlechterung der Lebensdauer resultiert und zwar deutlicher mit zunehmendem Anteil der Bewehrung [38]. Die Richtung der Belastung, bezogen auf den Verlauf der verstärkenden Bewehrung, ist ebenfalls extrem wichtig. Die Arbeit [31] zeigt, dass eine faserverstärkte Titanlegierung SCS-6/Timetal 834 bei einer Belastung senkrecht zur Faserrichtung sogar eine deutlich niedrigere Ermüdungsfestigkeit aufweist, als der unverstärkte Grundwerkstoff. Daraus ergibt sich das Bedürfnis, bei orientiert faserverstärkten Verbundwerkstoffen die Fasern der Belastungsrichtung entsprechend anzuordnen. Bei Bauteilen mit komplexer Form oder dreidimensionalen Spannungszuständen wäre eine solche Lösung entsprechend kostenintensiv oder gar unmöglich. In solchen Fällen müsste auf partikel- oder whiskerverstärkte Werkstoffe zurückgegriffen werden, mit der Gefahr, dass die nicht orientierten, zufällig angeordneten Bewehrungsteilchen auf der Bauteiloberfläche als Spannungskonzentratoren dienen werden.

Keramische Werkstoffe haben im Vergleich zu Stahl den klaren Nachteil in niedriger Zähigkeit und Duktilität. Aufgrund des spröden Verhaltens sind rein keramische Werkstoffe bei dynamischer Belastung meistens problematisch. Eine Verbesserung der Eigenschaften kann allerdings durch einen Verbund erreicht werden. Moderne, aus



mehreren Komponenten bestehende Keramiken erreichen Bruchzähigkeitswerte von ca.  $20 \text{ MPa}\sqrt{m}$ , wie etwa Faserverstärkter SiC/SiC, die allerdings immer noch unter den Werten für einfachste Stähle liegen. Die erhöhte Zähigkeit wurde dadurch erreicht, dass die spröde Matrizie mit den spröden Fasern durch ein schwaches oder ebenfalls sprödes Bindemittel zusammengebunden wird. Es kommt dann zu dem Effekt, dass der durch die Matrizie fortschreitende Riss das Bindemittel beschädigt, aber nicht in die Faser übergeht. So bleiben die Fasern auch nach dem Bruch der Matrizie intakt und überbrücken den Spalt [16]. Eine höhere Bruchzähigkeit ist ein Zeichen für einen langsameren Rissfortschritt. Bedenklich bleibt die Initiierung des Ermüdungsbruches, wie oben beschrieben. Da eine höhere Zähigkeit der faserverstärkten Verbundwerkstoffe durch eine absichtlich schwache Komponente (Bindemittel) erreicht wird, würde diese Komponente eine offensichtliche Initiierungsstelle darstellen.

## 3.4. Fertigungsverfahren

Die Fertigungsverfahren des ausgewählten Bauteils und der entsprechenden Probe (s. Kapitel 4.1.1) reichen vom Drehen über Bohren bis zum Schleifen und Läppen. Im folgenden Absatz wird auf einige vorgeschlagenen Fertigungsschritte eingegangen.

Die Form der Probe ist in Hinsicht auf die möglichst einfachen Fertigungsverfahren gewählt. Dagegen wirken die hohen Genauigkeitsanforderungen äußerst erschwerend.

Ausgehend von einer Stange als Halbzeug kann die grundlegende Geometrie durch Drehen gefertigt werden. Die vorgeschriebene hohe Genauigkeit bei großer Härte der Stirnfläche wird den Einsatz von Schleifen und Läppen erfordern. Die zentrale Bohrung wird ebenfalls durch Schleifen und eventuell Honen auf die entsprechende Toleranz gebracht werden müssen. Die dünnen Bohrungen des HD-Zulaufs und der Leckagekanäle stellen aufgrund des Verhältnisses zwischen Länge und Durchmesser eine Herausforderung dar.

Hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit ist auf niedrige Rauheit auf gefährdeten Stellen zu achten [27]. Weiter sind vor allem solche Fertigungsverfahren oder zusätzliche Oberflächenbehandlungen interessant, die in der Oberfläche eine Restspannung im Druckbereich schaffen. Zu solchen zählt beispielsweise das Kugelstrahlen, dessen Anwendung allerdings nur bedingt umsetzbar wäre. Eine weitere Möglichkeit, Druckspannungen in der Oberfläche zu erzeugen, stellt die Autofrettage dar.

### 3.4.1. Autofrettage

Die positive Wirkung von Autofrettage (AF) auf die Lebensdauer der Bauteile wurde durch viele Arbeiten bestätigt ([29], [19], [44], [21], [22]). Bei diesem Verfahren werden die Bohrungen kurzzeitig einem extrem hohen Innendruck ausgesetzt, der eine Plastifizierung einer dünnen Oberflächenschicht verursacht. Nach dem Druckabfall bleibt diese Schicht dank der plastischen Deformation gedehnt. Der umliegende Werkstoff, der sich

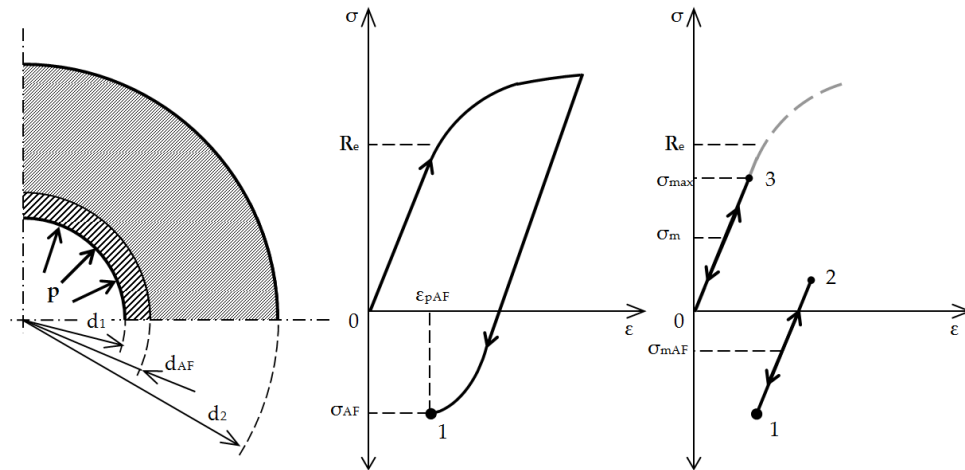


Abbildung 3.10.: Einfluss der Autofrettage auf das Werkstoffverhalten unter Beanspruchung.

nur elastisch verformt hat, drückt dann von außen auf diese Schicht. Die Autofrettage und ihr Einfluss ist auf der Abbildung 3.10 schematisch dargestellt.

Im Bild links sehen wir ein dickwandiges Rohr unter AF-Druck. Eine dünne Randschicht mit dem äußeren Durchmesser  $d_{AF}$  wurde plastisch verformt. Das erste  $\sigma - \epsilon$  Diagramm zeigt die Hysteresekurve des Vorgangs. Nach der Autofrettage befindet sich der Werkstoff im Zustand 1 unter der plastischen Deformation  $\epsilon_{pAF}$  und der Restspannung  $\sigma_{AF}$ . Dies ist der Ausgangspunkt für Belastung im Betrieb, die sich nun im elastischen Bereich auf der Linie 1-2 abspielt, mit der Mittelspannung  $\sigma_{mAF}$ , die nun im Druckbereich liegt. Im Vergleich dazu würden die gleichen Betriebsbedingungen ohne Autofrettage eine Belastung 0-3 verursachen, derer Mittelwert  $\sigma_m$  ungünstig im Zugbereich liegt.

Der nötige AF-Druck wird üblicherweise durch einen Berstversuch bestimmt, indem eine Probe bis zur Destruktion belastet wird. Das Autofrettieren kann bei bis zu 90% des Berstdruckes durchgeführt werden.

### 3.4.2. Wärmebehandlung

Es kommen auch andere Behandlungen, wie das Blind- oder Einsatzhärten, Aufkohlen, Nitrieren, Nitrocarburieren, Kurzzeitwärmebehandeln durch Laser in Frage.

Das Aufkohlen und Oberflächenhärten sind wohl die üblichsten dieser Verfahren. Sie schaffen eine harte, verschleißfeste Oberfläche durch die Diffusion von Kohlenstoff und die anschließende Gefügeumwandlung. Ohne Umwandlung kommt dagegen das Nitrieren aus, das für die Verbesserung der Eigenschaften nur die Diffusion der Stickstoffatome in das Gitter nutzt. Dadurch ist das Verfahren wesentlich verzugsarmer, da die Volumenänderung durch die Umwandlung in Austenit und zurück entfällt. Darüber hinaus ist die durch Nitrieren erzielte Steigerung der Verschleiß- und Ermüdungseigenschaften gewöhnlich höher, als durch Aufkohlen [27]. Nachteilig ist dagegen

die Notwendigkeit eines höherwertigen Werkstoffs. In diesem Zusammenhang stellt das Nitrocarburieren einen Kompromiss dar, indem es eine entsprechende Steigerung der Eigenschaften auch bei einfacheren Stahlsorten ermöglicht.

Eine weitere Möglichkeit, die Eigenschaften der Bauteiloberfläche zu verändern, stellt die Kurzzeitwärmebehandlung durch Laser dar. Mit Hilfe eines hochenergetischen Laserstrahls wird dabei versucht, eine bessere Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit zu erzielen [23]. Durch die Behandlung ergeben sich Härtetemperaturen von bis zu 1350 °C und Aufheiz- und Abkühlraten von bis zu 8000 K/s. Abhängig von der Temperatur konnten innerhalb der Laserspür in dem Gefüge des Stahls X30CrMoN15-1 unterschiedliche Veränderungen der ursprünglichen martensitischen Struktur beobachtet werden, bis hin zur vollständigen Austenitisierung. Ebenfalls abhängig von der Temperatur konnten in die Oberflächenschicht Zug-, Druckspannungen oder ihre Kombination in Längs- und Querrichtung der Laserspür eingebracht werden. Ergebnisse der Behandlung mit 1050 - 1100 °C haben eine Verbesserung der Verschleißrate und Korrosionseigenschaften im Salzwasser gezeigt. Allerdings kam es durch die inhomogene Struktur, bestehend aus gehärteten und angelassenen Zonen (bedingt durch einzelnen nebeneinander liegenden Laserspuren) zu einer Verschlechterung der Ermüdungseigenschaften in dem Maße, dass die Autoren in [32] eine gezielte Behandlung empfehlen, sodass in den wechselbeanspruchten Partien des Bauteiles keine angelassenen Zonen vorkommen. Da sich dies bei einem geometrisch komplizierten Bauteil nur schwierig gewährleisten lässt, sind die Möglichkeiten zum Einsatz dieser Technologie bei unserer Anwendung fraglich.

Aus diesen Gründen wird das Einsatzhärten, Autofrettage und Nitrieren, evtl. ihre sinnvolle Kombination als die beste Ausgangsstrategie angesehen.

## 4. Messverfahren

### 4.1. Aufbereitung der Versuche und Berechnungen

#### 4.1.1. Eingesetzte Proben

Obwohl die Proben nur eine Vereinfachung der realen Verbindung zwischen zwei Bauteilen darstellen sollen, wurde trotzdem Wert darauf gelegt, die Realität möglichst gut widerzuspiegeln. In den Proben werden sowohl Dichtfläche zwischen zwei Injektorsegmenten, als auch die kraftstoffführenden Bohrungen umgesetzt. Der Entwurf der Proben geht aus den Festigkeitsanalysen hervor (vgl. hierzu Kapitel 4.1.2), durch die eine verbesserte Kanalführung bestimmt worden ist. Es wurden Proben zur Untersuchung verschiedener Dichtkonzepte entworfen. Ihre Bezeichnung ist in der Tabelle 4.1 aufgeschlüsselt.

#### 4.1.2. Optimierung der Probengeometrie

Frühere Untersuchungen haben eine Schwachstelle an der Arbeitskolbenführung identifiziert. Es handelte sich um die Einmündung einer Zulaufbohrung in die mittige Bohrung der Kolbenführung, wie auf der Abbildung 4.2 markiert ist. Bei Versuchen am Gesamtinjektor traten an dieser Stelle Risse auf. Die Ausführung der Einmündung, wie sie auf der Abbildung 4.2 sowohl links, als auch rechts dargestellt ist, verursacht eine wesentliche Spannungsspitze. Die Risse, die daraus resultieren, verbreiteten sich in der Regel so, dass sie die Wandstärke zwischen den beiden Bohrungen überbrückt und diese verbunden haben.

Um die Spannung an der kritischen Stelle zu mindern, wurde im Rahmen dieser Dissertation eine neue Geometrie des Einmündungsbereichs entworfen, s. Abbildung 4.3. Die Schwachstelle des ursprünglichen Entwurfs bestand zum einen in dem scharfen Winkel, unter dem die Zulaufbohrung auf die Kolbenführung zugegangen ist, zum anderen aber auch in der Tatsache, dass sie direkt in die oberflächengehärtete Fläche der Kolbenführung eingemündet ist. Die durch die Härtung verursachte Sprödigkeit, zusammen mit der Kerbwirkung der Bohrung und den Mikrokerben aus der Bearbeitung haben zu der Initiierung eines Risses beigetragen, der sich anschließend unter der pulsierenden Belastung als Ermüdungsriss verbreitet hat. Der ursprüngliche Entwurf des Bauteils hat nicht genügend die Tatsache berücksichtigt, dass die Zulaufbohrung und die Kolbenführung verschiedene Funktionen erfüllen, die spezifische und sehr unterschiedliche Eigenschaften des Werkstoffes und der Formgebung erfordern. Eine wichtige Eigenschaft des neuen Entwurfs des Bauteils, bzw. der Probe, ist daher die

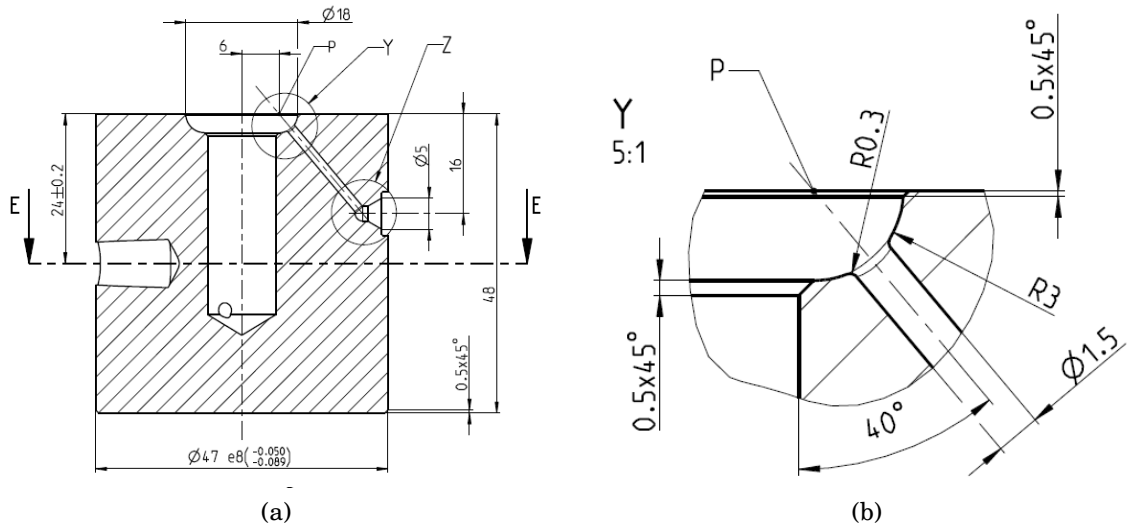


Abbildung 4.1.: Probe 5A für die Untersuchungen des Rillendichtkonzepts.

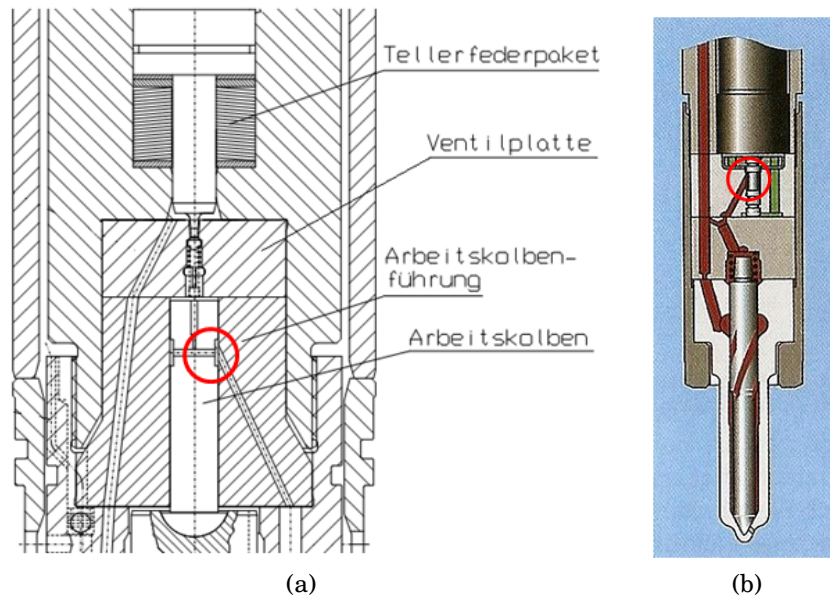


Abbildung 4.2.: Kritische Stelle am untersuchten Bauteil (a) und eine ähnliche Ausführung an einem Injektor für PKW-Motoren (b).

Bezeichnung	Beschreibung
5A, 5B	Proben zur Untersuchung des Rillendichtkonzepts. Ein Probenpaar besteht aus Probe 5A mit glatter und 5B mit gerillter Kontaktfläche. Beide Proben sind mit einer zentralen Kolbenführung, Aufnahmebohrungen für Heizpatronen und Bohrungen in der Kontaktfläche ausgeführt, die durchgehende Rücklaufkanäle darstellen. Proben vorhanden sowohl als virtuelle Bauteile für 3D FEM Untersuchungen, als auch physische Bauteile für Messungen.
55A, 55B	Weiter vereinfachte Proben zur Untersuchung des Rillendichtkonzepts. Ein Probenpaar besteht aus Probe 55A mit glatter und 55B mit gerillter Kontaktfläche. Im Vergleich zu 5A und 5B entfallen Kolbenführung, Rücklaufkanäle und Aufnahmebohrungen für Heizpatronen. Proben vorhanden sowohl als virtuelle Bauteile für 3D FEM Untersuchungen, als auch physische Bauteile für Messungen.
glsvar6	Untersuchung des Verhaltens von Sacklochartiger Geometrie in der Kontaktfläche. Proben vorhanden sowohl als virtuelle Bauteile für 3D FEM Untersuchungen, als auch physische Bauteile für Messungen.
Geo 3	Untersuchung der Dichtlippengeometrie. Weitere Varianten unterscheiden sich durch Radius, Höhe und Tiefe der Dichtlippengeometrie (R-H-T). Proben vorhanden nur als virtuelle Bauteile für 3D FEM Untersuchungen.
E2	Untersuchung von zweifachen Dichteinsätzen aus unterschiedlichen Werkstoffen. Proben vorhanden nur als virtuelle Bauteile für 3D FEM Untersuchungen.

Tabelle 4.1.: Kurzbeschreibung der untersuchten Dichtkonzepte.

räumliche Trennung der Mündung des Hochdruck (HD) Zulaufs von der Kolbenführung (s. Einzelheit Y auf Abbildung 4.1).

Es wurde der Einfluss dreier Größen auf die Spannung an der Mündung der Zulaufbohrung untersucht, nämlich des Radius der Mulde  $R_1$ , Radius der Kantenabrundung  $R_2$  und des Winkels der Zulaufbohrung  $\phi$ . Das aufgebaute halbsymmetrische 3D FEM-Modell beinhaltete ca. 35000 Tetra-Elemente in einem unstrukturierten, lokal verfeinerten Netz (s. Abbildung 4.4a). Eine Spannungsanalyse mit einer Belastung durch statischen Innendruck von 3000 *bar* hat Ergebnisse gebracht, die auf folgenden Abbildungen festgehalten sind. Die Spannung wurde an den Knoten auf der Oberfläche des Kantenradius und der Zulaufbohrung analysiert, die Nummerierung der Knoten zeigt die Abbildung 4.5.

Der Radius der Mulde  $R_1$  hat lediglich einen begrenzten Einfluss auf die Spannung. Die Berechnung zeigt einen ähnlichen Verlauf der untersuchten Varianten mit einem vergleichbar steilen Anstieg von ca. 500 auf ca. 1000 *MPa*. Der Maximalwert der Span-

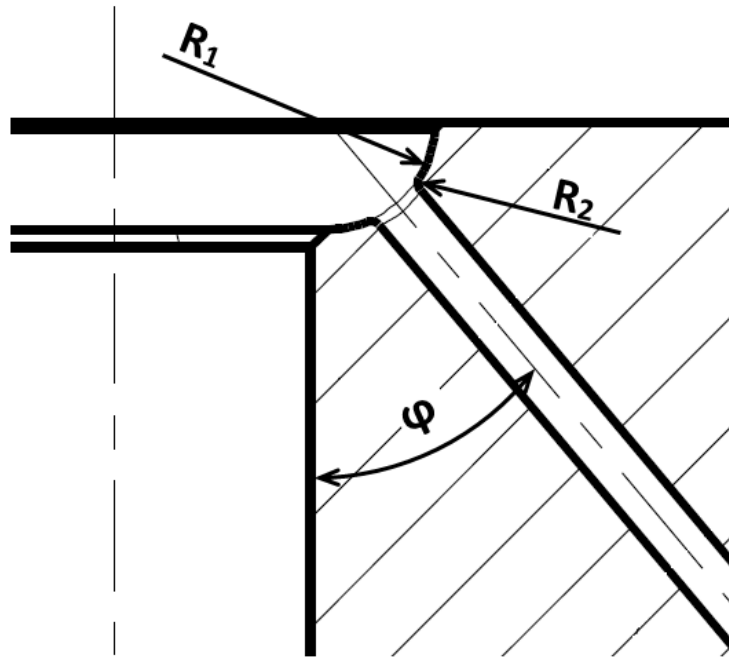
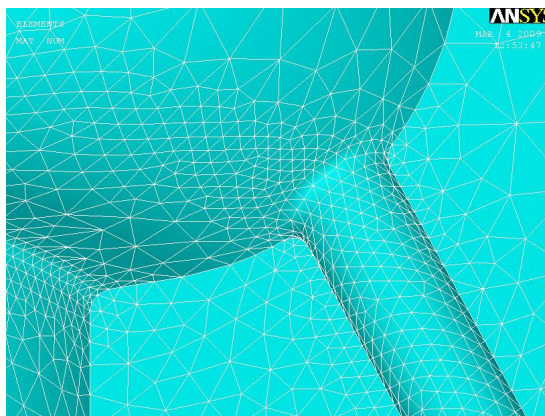
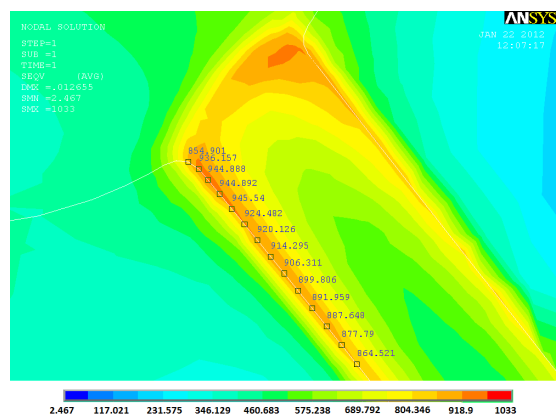


Abbildung 4.3.: Variierte Größen bei Spannungsanalyse im Bereich der Einmündung.



(a)



(b)

Abbildung 4.4.: Detail des 3D FEM Modells im Bereich der Kanalmündung und Beispiel der Ablesung der ermittelten Spannung.

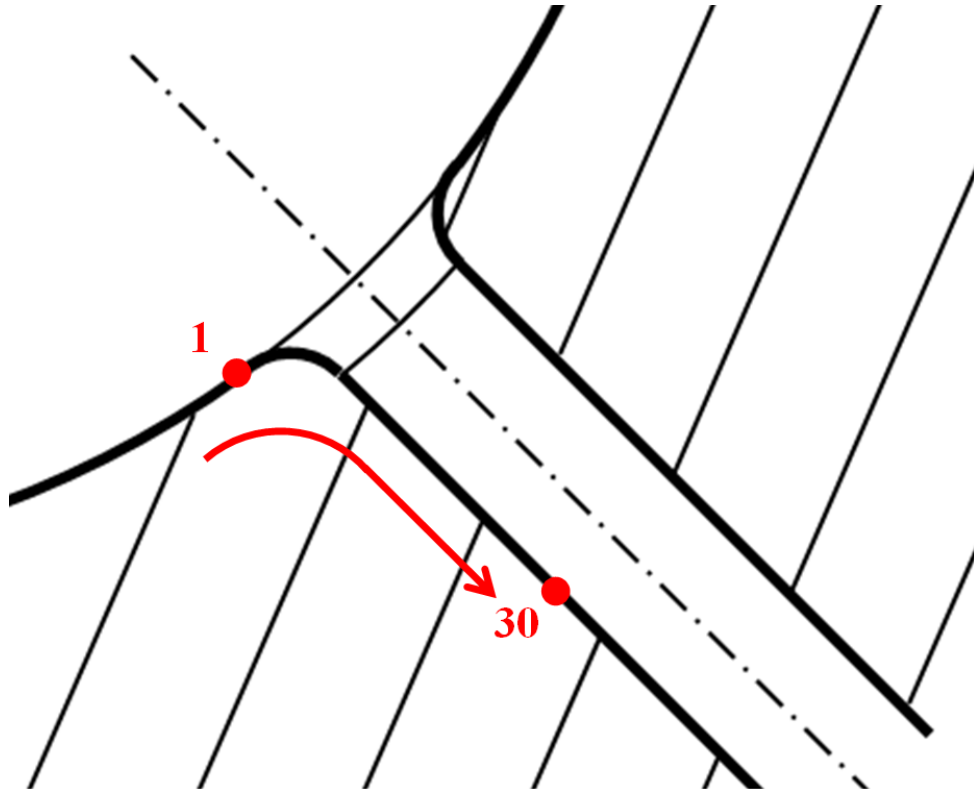


Abbildung 4.5.: Nummerierung der Knoten für die Auswertung.

nung liegt bei allen Varianten zwischen 1000 und 1100  $MPa$ . Die Spannungsverläufe für den Kantenradius zeigen zwischen den Werten  $R_2 = 0,1 \text{ mm}$  und  $R_2 = 0,7 \text{ mm}$  mehr Unterschiede, aber auch hier wird bei allen Varianten eine vergleichbar hohe Maximalspannung erreicht. Mit steigendem Radius verschiebt sich das Maximum weg von der Mündung und tiefer in die Zulaufbohrung. Einen deutlicheren Einfluss hat der Winkel  $\phi$ , unter dem die Zulaufbohrung in die Arbeitskammer einmündet. Mit dem Winkel zwischen  $25^\circ$  und  $55^\circ$  steigend, sinkt die Spannung in der untersuchten Region. Eine weitere Vergrößerung der Winkels bringt allerdings einen Anstieg der Spannung auf der gegenüber liegenden Seite der Bohrung. Das Variieren dieser Parameter zieht weitere Einflüsse nach sich. Beispielsweise erhöht sich mit dem steigenden Muldenradius  $R_1$  das Volumen der Arbeitskammer, welches die Schaltgeschwindigkeit des Injektors mitbestimmt und der Mündungswinkel ist bei der Konstruktion des Injektormoduls durch Platzverhältnisse und Verlauf angrenzender Kanäle beschränkt. Aufgrund der durchgeführten Analyse und nach dem Erwägen anderer Einflüsse wurde eine Geometrie mit Muldenradius  $R_1 = 3 \text{ mm}$ , Kantenradius  $R_2 = 0,3 \text{ mm}$  und Kanalwinkel  $\phi = 50^\circ$  gewählt, wie die Abbildung 4.1b veranschaulicht.

### 4.1.3. Probenaufbau für Messungen am Prüfstand

Alle Proben wurden so entworfen, dass ihr Einsatz in einem und demselben Aufbau möglich ist. Dies ist nicht nur aus der Sicht der Kostenreduzierung sinnvoll, sondern



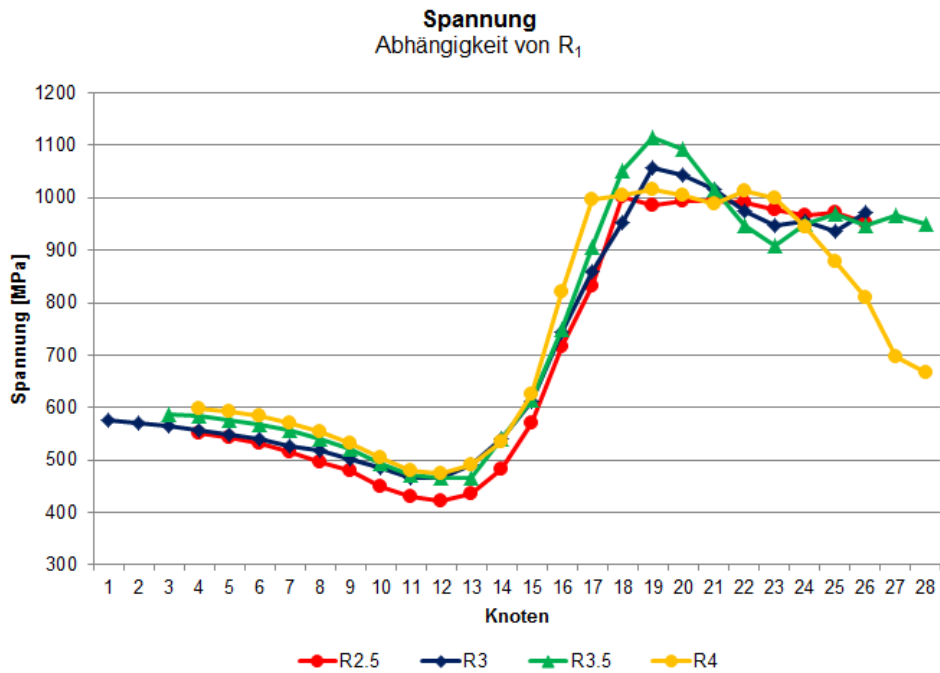


Abbildung 4.6.: Verlauf der Spannung entlang der Zulaufbohrung, Abhängigkeit vom Muldenradius  $R_1$ .

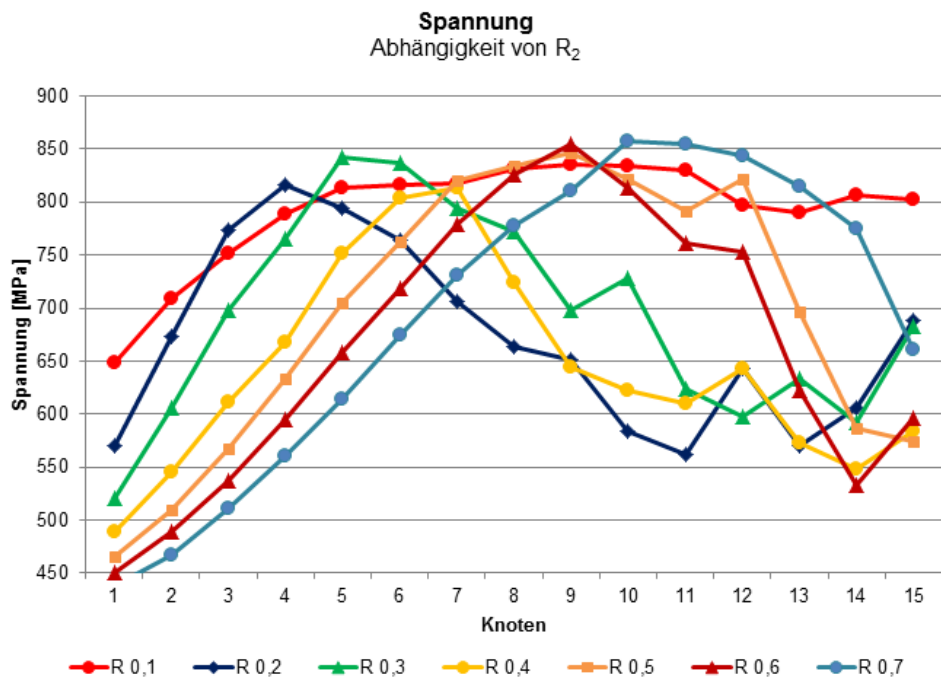


Abbildung 4.7.: Verlauf der Spannung entlang der Zulaufbohrung, Abhängigkeit vom Kantenradius  $R_2$ .

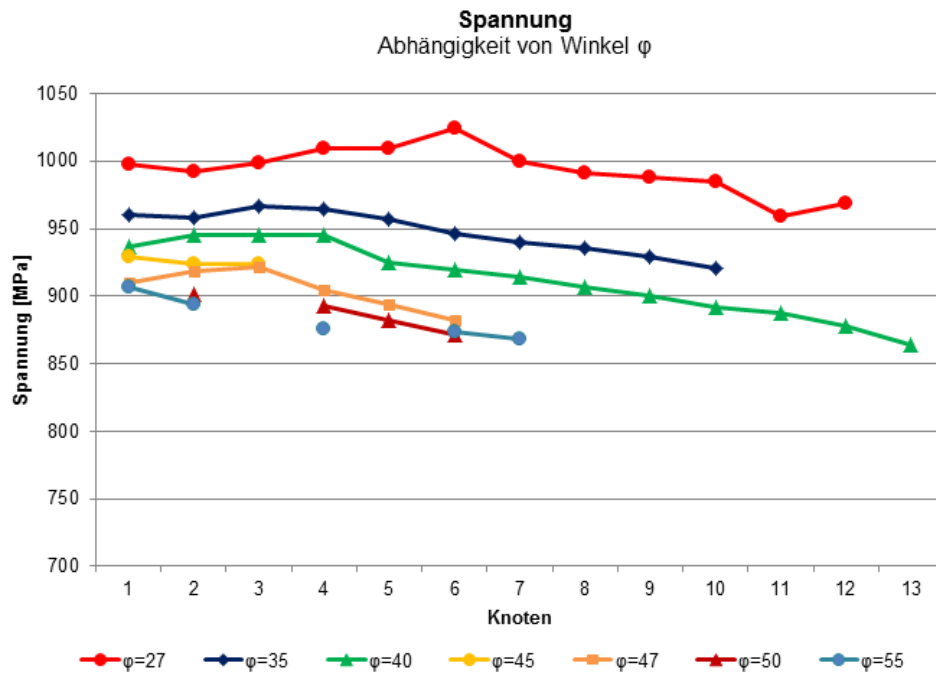


Abbildung 4.8.: Verlauf der Spannung entlang der Zulaufbohrung, Abhängigkeit vom Kanalwinkel  $\varphi$ .

auch für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse erforderlich.

Ein Aufbau, der auf der Abbildung 4.9 dargestellt ist, besteht immer aus zwei Proben (Abbildung 4.10). Auf diese Weise können die Interaktion zwischen einzelnen Bauteilen des Injektors (vgl. Abbildung 4.2b), das Verhalten der Kontaktfläche und ihre Dichteigenschaften untersucht werden. Jede Probe verfügt über separate Anschlussstellen, die mit HD-Leitungen oder Leitungen zum Abführen der Leckage belegt werden können. Diese Anordnung ermöglicht uns, je nach der Konstruktionsart jedes konkreten Probenpaars, entweder Leckagemengen aus unterschiedlichen Dichtflächen separat zu messen oder zwei unterschiedliche Varianten eines Dichtkonzepts bei einem Aufbau zu untersuchen. Ersteres wäre bei den Proben der Reihe 5A, 5B der Fall, wo es mit der Belegung von einem Hochdruckanschluss und zwei Leckageleitungen pro Probe möglich ist, separat die Leckagemenge zu bestimmen, die sich aus dem Spiel zwischen dem Kolben und der Führung ergibt, sowie die von der Dichtfläche zwischen den Proben. Letzteres trifft auf die Proben der Ausführung 6A, 6B, Geo 3 und E2 zu, die jeweils über zwei Hochdruckanschlüsse verfügen, die man unabhängig beaufschlagen kann.

Die entsprechende Flächenpressung in der Kontaktfläche, die je nach Konzept für die Dichtung zwischen den Proben sorgen soll, wird mittels eines Hydraulikzylinders aufgebracht. Der gewählte einfachwirkende Zylinder ist mit der maximalen Kraft von  $150\text{ kN}$  und einem Hub von  $100\text{ mm}$  ausreichend dimensioniert, um die für die Versuche benötigten Kontaktdrücke zu erreichen. Das Öffnen des Aufbaus nach dem Versuch wird durch eine in dem Zylinder eingebaute Feder realisiert. Aus diesem Grund wurde der Zulauf zum Zylinder mit einem zusätzlichen Ventil entworfen, das ein kontrolliertes

Ablassen des Mediums aus dem Zylinder ermöglicht.

Die Anpresskraft wird mittels einer Kraftmessdose (Position 5) erfasst. Mit Rücksicht auf die Dauerbelastung, die bei etwaigen Langzeitversuchen auftreten würde und auf die mögliche zusätzliche Temperaturbelastung bei beheizten Proben, wurde die Kraftmessdose überdimensioniert auf 500 *kN*.

Für die korrekte Funktion der Dichtkonzepte ist es wichtig die Anpresskraft so anzubringen, dass die Kontaktflächen beider Proben plan aufliegen. Aus diesem Grund wurden zwischen den Proben keine Passstifte verwendet und der Arbeitskolben, der in realen Injektoren durch mehrere Injektorsegmente ununterbrochen durchgeht, wurde an der Kontaktfläche der Proben zweigeteilt. Durch diese Anordnung wird keine Verspannung zwischen die Kontaktfläche und der zu ihr senkrechten Bohrungen eingebracht. Gleichzeitig sinken die Fertigungskosten der Proben im Vergleich zu einer Ausführung mit Passstiften und ausreichend genauen geometrischen Toleranzen. Darüber hinaus wird die Anpresskraft durch eine Kalotte übertragen (Position 29), die zusammen mit dem kugelig ausgeführten Lasteinleitknopf der Kraftmessdose Ungenauigkeiten des Aufbaus ausgleicht.

Um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, können die Proben auf entsprechende Temperatur beheizt werden, die auch in den Injektoren der Großmotoren herrscht. Hierzu dienen 6 Heizpatronen mit einer Leistung von jeweils 100 W. Mithilfe eines Steuergeräts kann die Temperatur auf einen beliebigen Wert zwischen 20 und 250 °C eingestellt werden. Die Temperatur in den Proben kann, je nach Probenart, durch Thermoelemente auf einer bis drei Messstellen entnommen werden. Ein Regler kann dabei die voreingestellte Temperatur automatisch beibehalten. Die erhöhte Temperatur ist sinnvoller Weise nur auf den Bereich der Proben beschränkt. Dafür sorgt eingebaute Thermoisolierung oberhalb und unterhalb der Proben (Position 7), die neben der hohen Temperatur gleichzeitig die Druckbelastung von der Anpresskraft übertragen muss. Als geeigneter Werkstoff wurde für die Thermoisolierung faserverstärkter Kunststoff DOGLAS 250 HQ gewählt, der eine Druckfestigkeit von 660 MPa und eine Anwendungstemperatur von 250 °C im Dauerbetrieb aufweist. Durch diese Parameter ist er für unseren Zweck ausreichend bei wesentlich niedrigeren Kosten im Vergleich zu anderen Werkstoffen mit ähnlichen Parametern, beispielsweise Keramik.

#### 4.1.4. Prüfstand

Zur Durchführung der Versuche wurde ein neuer Prüfstand aufgebaut, dessen Schema auf der Abbildung 4.11 und Umsetzung auf der Abbildung 4.12 zu sehen ist. Die wichtigsten Bestandteile des Prüfstands sind:

- Hochdruckerzeuger des Prüfdrucks (1)
- Hochdruckerzeuger des Anpressdrucks (2)
- Vorrichtung zur Aufnahme der Proben (3)
- Messeinrichtung zur Bestimmung der Leckagemenge (4)

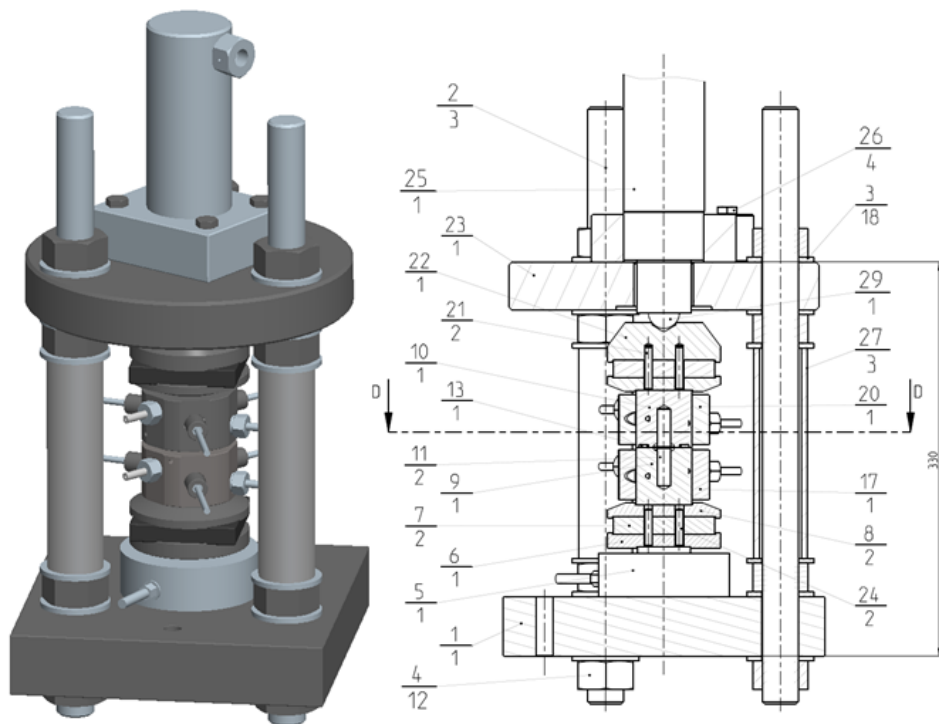


Abbildung 4.9.: Versuchsaufbau – Aufnahme der Versuchsproben.

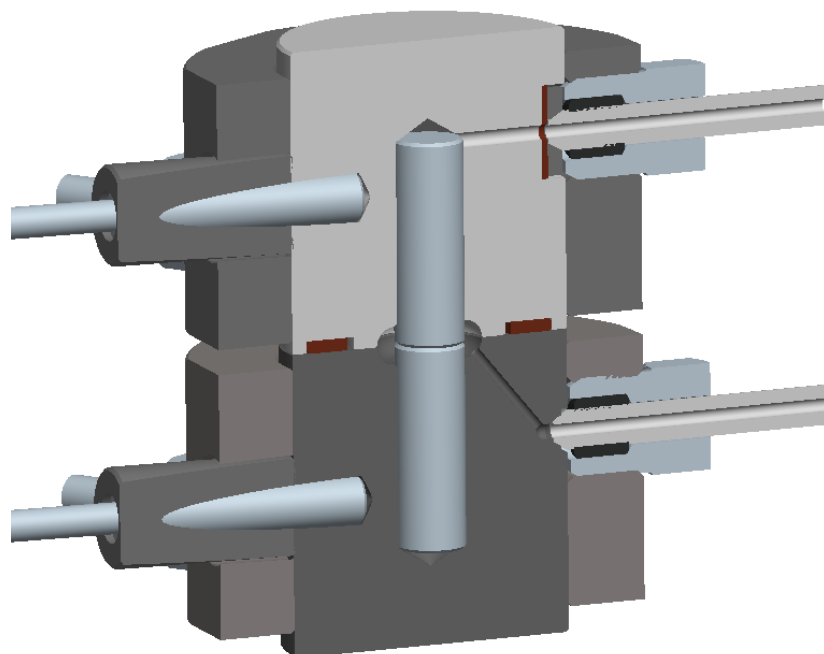


Abbildung 4.10.: Aufbau zweier Proben mit Anschlüssen für Hochdruck und Leckagemessung.

- Steuerungssystem (5)

Der Kern des Hochdruckerzeugers des abzudichtenden Prüfdrucks (1) stellt eine HD-Einspritzpumpe dar. Es handelt sich um ein serienmäßiges Bauteil eines Dieselmotors, der derzeit im SUV-Segment zum Einsatz kommt. Die HD-Einspritzpumpe verfügt über eine integrierte Vorförderpumpe, die die hydraulische Flüssigkeit aus dem Tank durch einen Filter ansaugt und die eigentliche Hochdruckpumpe mit einem konstanten Vorlaufdruck von ca. 4 *bar* versorgt. Mit dieser Mehrkolben-Einspritzpumpe bestückt ist der Druckerzeuger für den Druck von 2100 *bar* im Dauerbetrieb ausgelegt. Angetrieben wird die Hochdruckpumpe durch einen Starkstrom-Elektromotor. Vergleichbar mit dem Aufbau eines realen Einspritzsystems ist hinter der Pumpe ein rohrförmiger Hochdruckbehälter geschaltet, der über mehrere Ausgänge zum Anschluss von hydraulischen Verbrauchern verfügt. Der Druck im Druckbehälter wird von einem Druckregelventil am Common Rail des Hochdruckerzeugers (PCV) und einem Mengenbegrenzungsventil der Hochdruckpumpe des Hochdruckerzeugers (VCV) eingestellt. Das PCV ist am Druckbehälter angebracht und schaltet beim Erreichen des voreingestellten Druckes. Das VCV ist ein Bestandteil der Hochdruckpumpe und regelt das Volumen, welches von der Pumpe in den Druckbehälter gefördert wird. Eine Erhöhung des Druckes kann man in der Regel sowohl durch das Schließen des PCV, als auch Öffnen des VCV erreichen, meistens aber durch ein Zusammenspiel der beiden Maßnahmen. Der erzeugte Druck wird aus dem Behälter direkt in den Probenaufbau geführt. Hierzu wurde ein Hochdruckschlauch mit einem Berstdruck von 4000 *bar* angewendet.

Der Druckerzeuger ist zum Temperieren des Mediums sowohl mit einer elektrischen Heizung, als auch mit einem Kühler mit Wasser als Kühlmedium ausgestattet. Ein Sensor im Tank überwacht die Höhe des Ölspiegels um Schäden beim eventuellen Verlust des Mediums durch starke Leckage vorzubeugen. Außer den Messgrößen, die durch das D2T-Steuersystem erfasst sind, verfügen die Druckerzeuger über zusätzliche analoge Anzeigen des Vorlaufdrucks und Kühlwasserdrucks.

Die Haltekraft zum Zusammenhalten der beiden Proben kann mit einem Hochdruckerzeuger (2) geschaffen werden, der prinzipiell baugleich mit dem Hochdruckerzeuger des Prüfdrucks (1) ist. Alternativ wurde für die späteren Versuche eine Vereinfachung des Prüfstands vorgenommen, indem der Druck für die Haltekraft mittels einer hydraulischen Handpumpe erzeugt worden ist.

Da man bei dem Versuch mit hohem Druck und brennbaren Flüssigkeiten arbeitet, muss Wert auf entsprechende Sicherheitsvorkehrungen gelegt werden. Die Gefahr geht vor allem von der Hochdruckflüssigkeit hervor, die bei etwaiger Undichtigkeit in Form eines Strahls austreten könnte. Dieser Strahl wäre je nach Druckniveau im Stande schwere, unter Umständen tödliche Verletzungen beizufügen, was auch mit den toxischen Eigenschaften des verwendeten Prüföls zusammenhängt. Aus diesem Grund ist der Prüfstand in einer geschlossenen Prüfstandsbox aufgebaut und von außerhalb mittels eines PC basierten Automatisierungssystems Morphée gesteuert. Die Prüfstandsbox ist mit einer automatisierten Löschanlage mit Rauch- und Infrarotsensoren ausgestattet und der Prüfstand kann durch mehrere Notausschalter von innerhalb und außerhalb der Box abgeschaltet werden. Der Probenaufbau ist

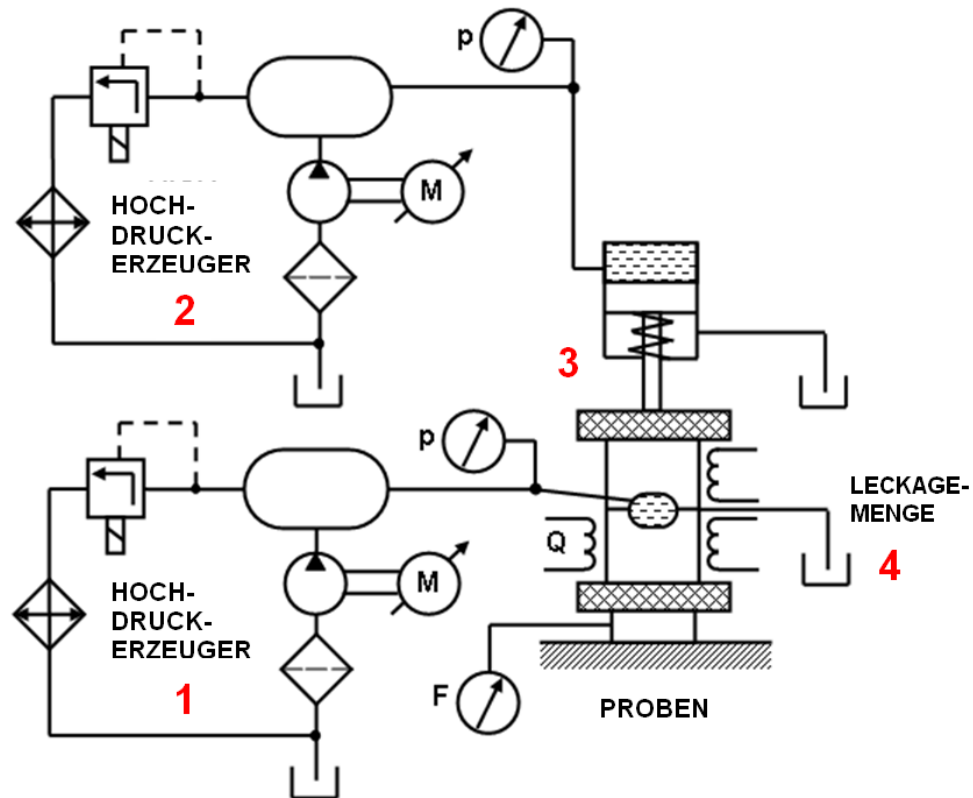


Abbildung 4.11.: Schema des Prüfstands.

gegen eine Überlastung des Hydraulikzylinders mit einem Druckbegrenzungsventil ausgestattet. Sollte es trotzdem zu einer Drucküberlastung kommen, fungieren die vier Ankerschrauben (Position 27 auf Abbildung 4.9) als eine Sollbruchstelle.

#### 4.1.5. Das Messverfahren

Die an dem beschriebenen Prüfstand realisierten Untersuchungen zur Bestimmung des Verhaltens der einzelnen Dichtkonzepte wurden mit statischem Druck durchgeführt. Das Ziel jeder einzelnen Untersuchung bestand darin, einen möglichst hohen Druck bei der Anwendung einer möglichst kleinen Anpresskraft abzudichten. Dementsprechend wurde folgende Vorgehensweise gewählt.

Nach dem Zusammenbau des Probenpaares wurde die minimale Anpresskraft von 5  $kN$  aufgebracht. Danach wurde der Probenaufbau mit Innendruck beaufschlagt. Der minimale Betriebsdruck des verwendeten Druckerzeugers betrug ca. 35 bar. Der Druck wurde langsam auf 100 bar gesteigert und danach in Schritten von 50 bar. Bei jedem neuen Druckniveau wurde eine Haltephase eingelegt um die Dichtheit zu prüfen. Der Druck wurde so lange erhöht, bis erste leichte Undichtigkeit aufgetreten ist, in welchem Fall die Leckage auf eine kontrollierte Weise durch die vorgesehene Leitung abgeführt worden ist.

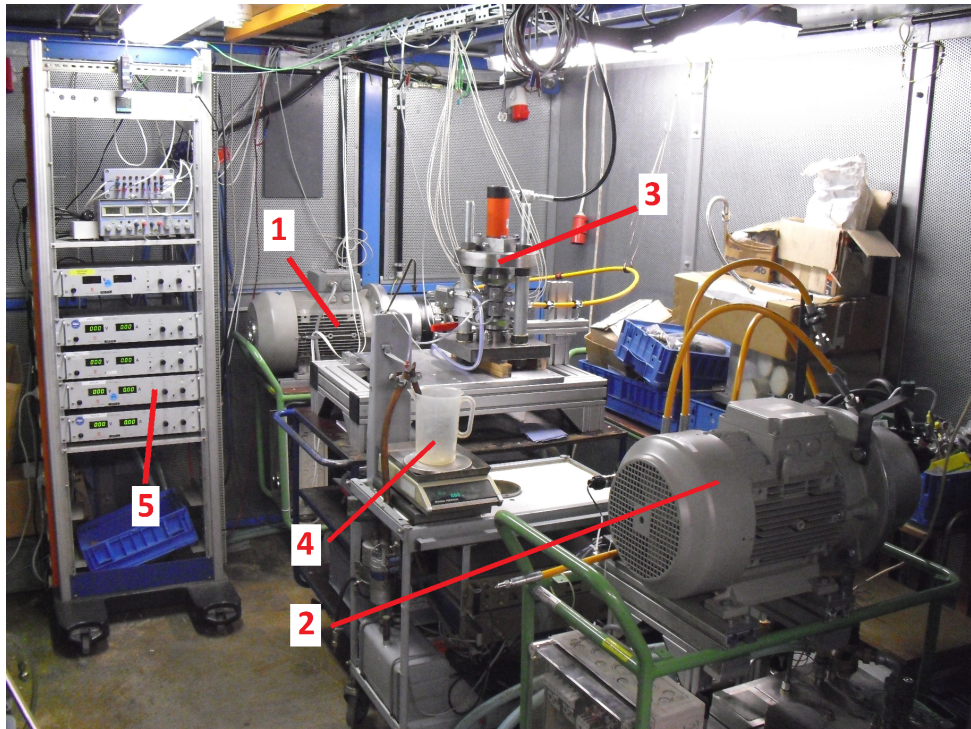


Abbildung 4.12.: Der Prüfstand.

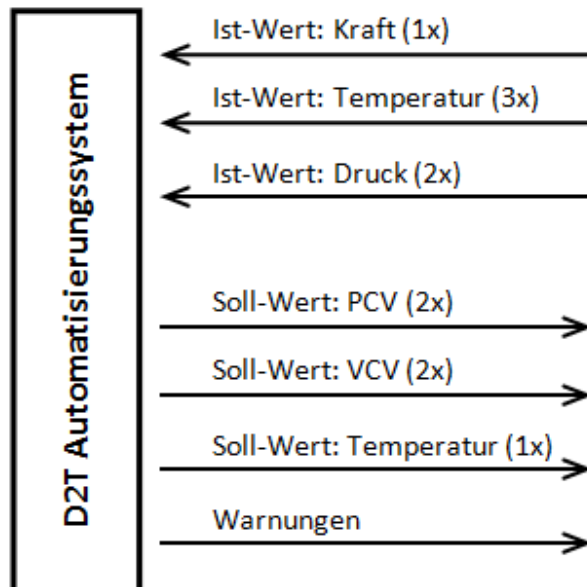


Abbildung 4.13.: Ein- und Ausgänge des D2T Steuerungssystems.



Um die Intensität der Leckage zu bestimmen, wurde eine dreißigminütige Messung vorgenommen, während der die Leckagemenge in einen auf einer digitalen Waage stehenden Behälter geleitet worden ist (Position 4 auf der Abbildung 4.12). Das Gesamtgewicht des Leckageöls wurde in minütigen Abständen aufgezeichnet. Somit entstand als Ergebnis jeder Messung eine Kurve mit 30 Datenpunkten, die die Entwicklung der Leckage über den Zeitraum einer halben Stunde darstellt. Die Messung wurde in der Regel für den gegebenen Wert des Drucks und Anpresskraft dreimal wiederholt und zwar so, dass für jede weitere Messung entweder der Druck oder sowohl der Druck, als auch die Anpresskraft neu eingestellt worden sind. Nach den Messungen der ersten leichten Leckage wurde die Anpresskraft auf ihrem Niveau belassen und der Innendruck erhöht, sodass die Intensität der Leckage zugenommen hat. Auf diesem Weg sind Messergebnisse entstanden, die eine Aussage ermöglichen, inwiefern sich die Leckage linear mit wachsendem Druck steigert. Folglich wurden Kombinationen von Druck und Anpresskraft getestet, die zu einer intensiveren Leckage führten, als in einem Motorbetrieb zulässig wäre.

Weil manche der Dichtkonzepte, insbesondere das Rillendichtkonzept, auch plastische Deformation der Proben vorausgesetzt haben, war es mit einem Satz Proben nötig, einer steigenden Tendenz der Anpresskraft zu folgen. Um die Kosten für die Herstellung neuer Proben zu senken, wurden die Proben so entworfen, dass sie nach einem kompletten Messzyklus neu geschliffen, geläpft und poliert werden konnten, sodass ihre Wiederverwendung möglich war.

Bei Dichtkonzepten, die auf einer ausreichenden Flächenpressung in der Kontaktfläche basieren, wurde ebenfalls der tatsächliche Kontaktdruck in der Kontaktfläche erfasst. Hierfür wurde die Druckmessfolie Prescale benutzt, die es ermöglicht, den tatsächlichen Kontaktdruck zwischen zwei Bauteilen zu ermitteln. Die Prescale Messfolien können, je nach Ausführung, Drücke von 0,2 bis 300 MPa aufzeichnen. Die Technologie beruht auf mikroskopischen, mit Farbe gefüllten Kapseln, die in eine Folie eingebettet sind. Wenn einem Druck ausgesetzt, platzen die Kapseln und die Folie verfärbt sich mit entsprechender Intensität. Die Kontaktdruckverteilung kann mit gewisser Genauigkeit abgelesen werden, indem die Verfärbung mit einer vom Hersteller gegebenen Farbskala verglichen wird (s. Abbildung 4.14). Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden Druckmessfolien für den Messbereich 10-50 MPa und 50-130 MPa verwendet. Die entsprechenden Farbskalen können im Anhang auf den Abbildungen A.2 und A.3 gefunden werden. Alternativ, wenn Messergebnisse mit einer größeren Genauigkeit ausgewertet werden müssen, können eingescannte Druckmessfolien mittels einer spezialisierten Software auszuwerten. Diese Möglichkeit wurde aufgrund der hohen Kosten nicht genutzt.

Als Medium wurde bei allen durchgeführten Versuchen Shell V-Oil 1404 verwendet, welches als Einspritzpumpenprüföl nach DIN ISO 4113 speziell für Prüfläufe von Einspritzpumpen entwickelt worden ist. Das Öl zeichnet sich durch eine enge Viskositätstoleranz, hohe Oxidationsstabilität, hohen Korrosionsschutz und gute Verschleiß-eigenschaften [10]. Seine Eigenschaften liegen möglichst nahe am Dieselmotorkraftstoff bei niedrigerer Brennbarkeit. Die Messungen mit Anwendung dieses Prüföls sind daher auf Dieselmotorkraftstoff verbrennende Motoren direkt übertragbar. Bei der Betrachtung von



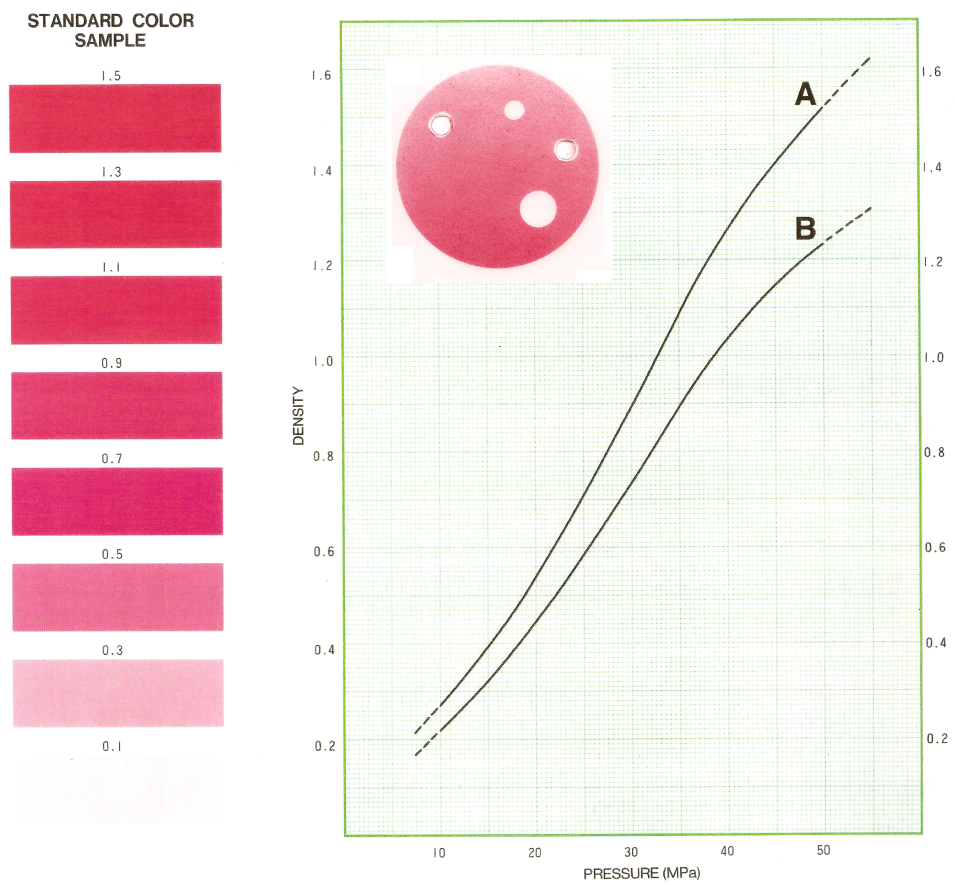


Abbildung 4.14.: Ein runder Abdruck einer Kontaktdruckmessung mittels der Prescale Druckmessfolie und die Farbskala zur Auswertung des Ergebnisses.

Injektoren, die mit Kraftstoffen mit anderer Viskosität arbeiten (wie z.B. mit Schweröl), müssen ggf. entsprechende Umrechnungen durchgeführt werden, um Aussagen über einzelne Dichtkonzepte treffen zu können. Unter Umständen wären die Messergebnisse überhaupt nicht übertragbar und es wären neue Messungen mit entsprechendem Medium nötig.

Bei den bisher durchgeführten Versuchen der Dichtkonzepte wurde der Einfluss der Temperatur nicht berücksichtigt, d.h. die Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Dank des Einsatzes eines Mediums mit niedriger Viskosität wurde eine Temperaturerhöhung nicht benötigt. Das Temperaturverhalten beider experimentell untersuchten Dichtkonzepte wurde vorläufig als nicht kritisch eingeschätzt. Messdaten zum Temperaturverhalten stehen derzeit nicht zu Verfügung und die Klärung dieser Frage bleibt noch offen.

Um die Aussagekräftigkeit der Dichtheitsuntersuchungen zu erhöhen, wäre es möglich, die Druckschwankungen nachzubilden, die Einspritzsysteme in der Realität belasten. Angesichts der hohen Frequenz der Schwingungen wäre es nicht möglich, diese durch die eigentliche Druckquelle, in unserem Fall den Druckerzeuger, bei einem anderen Prüfstands Aufbau beispielsweise durch einen Druckübersetzer, zu realisieren. Unser Druckerzeuger stellt lediglich die entsprechende Mittelspannung und einen Teil der realen Schwingungen zu Verfügung. Die Schwankungen, die bei Einspritzsystemen durch das schlagartige Öffnen und Schließen der Injektoren entstehen, könnten durch eine Anordnung und Betrieb zusätzlicher hydraulischer Bausteine geschaffen werden. Angesichts der Maximalwerte dieser Schwankungen können in der Literatur teilweise sehr unterschiedliche Werte gefunden werden. Einige Simulationen (beispielsweise in [28] zeigen Schwankungen von ca. 10-20% des Nenneinspritzdruckes, wogegen andere Fachleute aus dem Bereich der Einspritzung von Spitzenwerten von bis zum Zweifachen des Einspritzdruckmittelwerts berichten [33]. Eine Möglichkeit, um möglichst realitätsnahen Druckverlauf in dem System zu schaffen, wäre beispielsweise das Einbauen eines vollständigen CR-Injektors parallel oder in Serie mit dem Probenpaar. Die aus dem Betrieb dieses Injektors resultierenden Schwingungen könnten als Belastungsgröße für die Proben genutzt werden.

## 5. Neue Dichtkonzepte

### 5.1. Bestehendes Dichtkonzept

Das gegenwärtig häufig angewendete Dichtkonzept besteht aus ebenen, gehärteten und geläppten, ggf. polierten Flächen, wie in dem Kapitel 1 beschrieben worden ist. Die Dichtwirkung ergibt sich bei diesem Konzept ausschließlich aus der Anpresskraft, die in der Normalrichtung zur Kontaktfläche wirkt. Dies bedeutet, dass die Abdichtung höherer Drücke einer stärkeren äußeren Krafteinleitung bedarf, was in größere Deformationen resultiert. Wie frühere Versuche gezeigt haben, können diese Deformationen unter Umständen so groß sein, dass sie die Ebenheit der Kontaktfläche beeinflussen, sodass keine Dichtwirkung mehr möglich ist. Diese Erscheinung wird zusätzlich dadurch verschlimmert, dass die realen Injektorbauteile nur selten symmetrisch ausgeführt sind. Die durch die Anpresskraft verursachte Deformation ist in dem Fall ebenfalls unsymmetrisch und schwieriger zu analysieren, bzw. vorauszusagen.

Es wurde in früheren Versuchen die Möglichkeit erforscht, eine bessere Dichtwirkung durch eine Verkleinerung der Kontaktfläche und somit Erhöhung der Kontaktpressung zu erzielen. Die Kontaktfläche hatte in diesem Fall an einem bestehenden Bauteil die Form eines unsymmetrischen Zwischenringes (s. Abbildung 5.1). Es war nötig den in der Mitte anliegenden Hochdruck sowohl gegen den atmosphärischen Umgebungsdruck, als auch gegen den Niederdruck im Rücklaufkreis abzudichten. Das erzielte Ergebnis war nicht zufriedenstellend, als Ursache wurden die oben beschriebenen Erscheinungen vermutet.

Eine Härtung der Kontaktfläche bei diesem Konzept trägt zur Minderung der Deformation nicht bei, weil durch die Härtung lediglich die Festigkeitsgrenze, nicht aber das Elastizitätsmodul steigt. Folglich ist es dank der Härtung möglich, höhere Anpresskräfte anzubringen, ohne die Bauteile zu beschädigen, was allerdings durch die im Idealfall linear steigende, unsymmetrische Deformation nicht zu besseren Dichteigenschaften führen muss.

#### 5.1.1. Simulation des Verhaltens des bestehenden Dichtkonzepts

Auf Beobachtungen von früheren Injektorversuchen basierend ergab sich der Bedarf einer Simulation des Verhaltens einer Kontaktfläche zweier Bauteile mit einem durchgehenden Hochdruckkanal. Man hat eine Deformation im Bereich der Bohrungskanten vermutet, die durch die Wirkung des Innendrucks auf die Kanalwand hervorgerufen

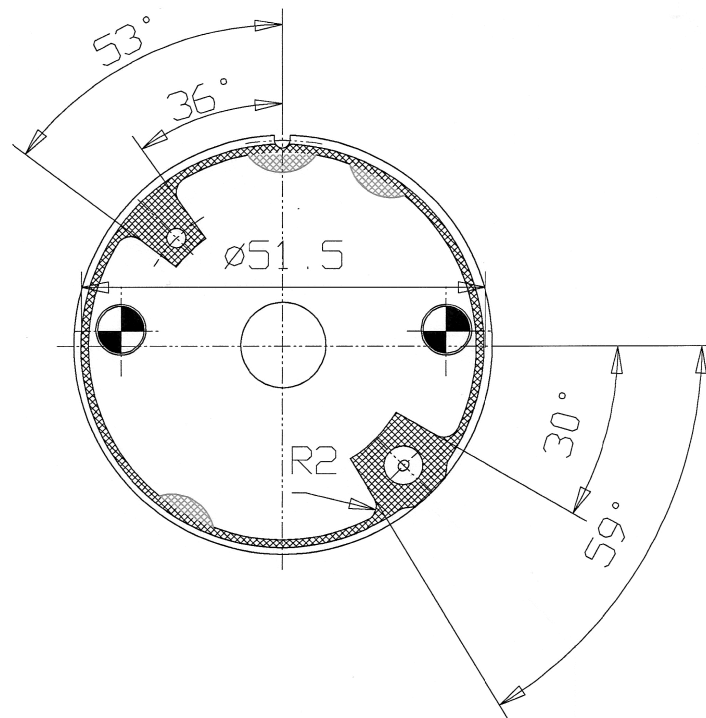


Abbildung 5.1.: Kontaktfläche eines bestehenden Injektorbauteils.

wird. Diese Deformation würde einen Spalt zwischen den Bauteilen öffnen, in welchen die Hochdruckflüssigkeit eindringen und ihn weiter öffnen würde. Zwecks der Simulation wurden einfache Proben modelliert, die äußerst fein vernetzt wurden. Die Kantenlänge der kleinsten Elemente betrug  $0,035 \text{ mm}$ . Die Bohrungskanten wurden mit Fasen  $0,2 \times 45^\circ$  versehen, um die Wirkung der Druckkraft in der Axialrichtung zu ermöglichen. Die Fase soll eine Idealisierung von Ungenauigkeiten in der Fertigung, Abnutzung und weiteren Aspekten darstellen, die eine ideal scharfe Kante verhindert hätten.

Eine Veranschaulichung der Berechnungsergebnisse ist auf der Abbildung 5.2 dargestellt. Das Ergebnis wurde durch mehrere Berechnungsdurchläufe erhalten, indem nach jeder Spaltöffnung die Druckkraft auf die neu entblößten Elemente aufgetragen worden ist. Die Abbildung 5.3 zeigt eine graphische Darstellung des sich in fünf Berechnungsschritten öffnenden Spaltes. Dieses Ergebnis wurde für den Innendruck von  $3000 \text{ bar}$  und die axiale Anpresskraft von  $5 \text{ kN}$  erhalten. Es wurden weiterhin Berechnungen für Anpresskräfte von  $10 \text{ kN}$  und  $20 \text{ kN}$  mit einem ähnlichen Ergebnis durchgeführt, Unterschiede gab es lediglich in der Länge der Spaltöffnung, die pro Berechnungsschritt anfällt. Erst bei einer Anpresskraft in der Größenordnung von  $50 \text{ kN}$  konnte keine Spaltöffnung mehr beobachtet werden. Da allerdings keine Abdichtung mittels hoher Axialkräfte angestrebt wird, kann diese Erkenntnis nicht als ein Hinweis auf einen Lösungsweg angesehen werden.

Aus den Bildern ist ersichtlich, dass die Öffnung des Spaltes, sobald sie einmal aufgetreten ist, immer weiter fortschreitet. Die theoretische Überlegung, dass es zu einem bestimmten Punkt zu einer etwaigen Aufstauung der Deformationsspannung in den

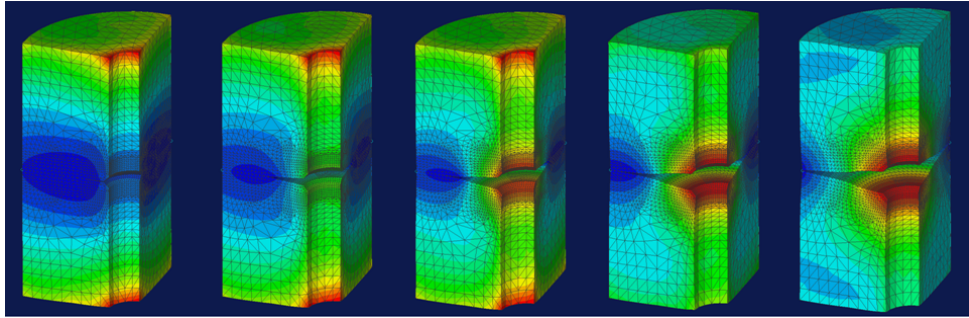


Abbildung 5.2.: Das Öffnen eines Spalts zwischen Injektorsegmenten.

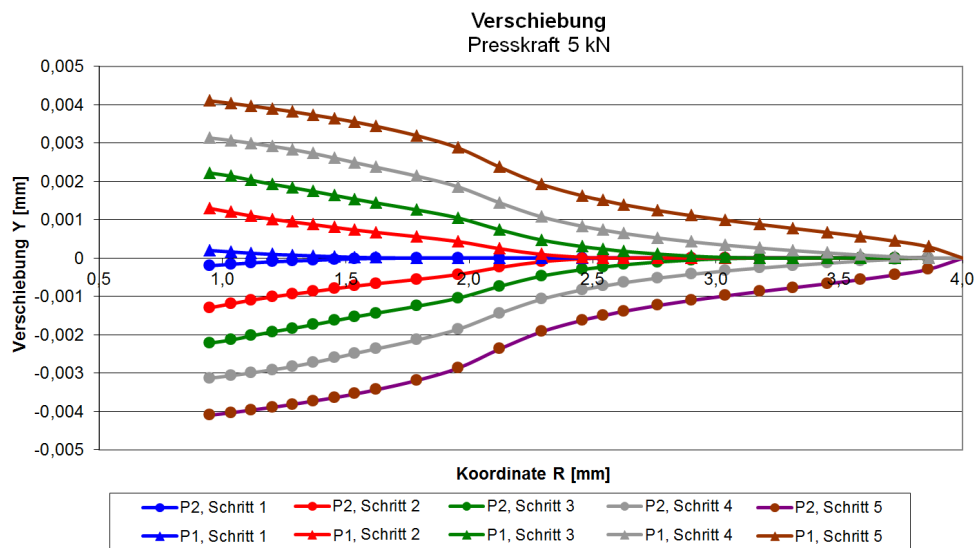


Abbildung 5.3.: Berechnete Größe der Deformation bei der Spaltöffnung. Innendruck 3000 bar, axiale Anpresskraft 5 kN.

Bauteilen kommen könnte, die eine weitere Öffnung des Spaltes verhindern würde, hat sich nicht bestätigt. Daraus ist zu schließen, dass bei der Suche nach einem neuen Dichtkonzept die Berechnungsergebnisse so zu interpretieren sind, dass fehlender Kontaktdruck am ersten Knoten der Kontaktfläche eine Undichtigkeit des Konzepts bedeutet.

## 5.2. Ideensuche zu neuen Dichtkonzepten

### 5.2.1. Dichtung

Der Aufbau des Injektors wurde bereits im Kapitel 1.1.3 näher beschrieben. Das gegenwärtig am gängigsten eingesetzte Dichtkonzept zwischen den einzelnen Bauteilen besteht aus gehärteten und polierten ebenen Flächen, die durch die Spannkraft der Überwurfmutter mit bestimmter Flächenpressung aufeinander aufliegen. Eine Maßnahme

zur Erhöhung der Dichtwirkung diesen Konzepts besteht in der Erhöhung der axialen Anpresskraft, mit der die beiden Injektorsegmente aufeinander gedrückt werden. Durch die erhöhte Krafteinwirkung kommt es zur elastischen Deformation der Teile und somit zum Verzug der Flächen. Das beeinträchtigt die Dichtwirkung negativ. Der Weg zur Beseitigung dieses Problems kann entweder durch die Optimierung der Kontaktfläche oder das Erstellen eines anderen Dichtkonzepts führen.

### 5.2.2. Optimierung der Dichtfläche

Unter der Optimierung der Dichtfläche werden Maßnahmen verstanden, die die Geometrie der planaren Dichtflächen des bestehenden Dichtkonzepts so verändern, damit die Dichtwirkung durch die mittels der Anpresskraft hervorgerufenen Deformation nicht verschlechtert, sondern verbessert wird. Der erste Schritt bei der Optimierung wäre das Anstreben einer geometrischen Achsensymmetrie, sodass eine gleichmäßige und damit leichter vorhersehbare Deformation eintritt. Weiter würde durch detaillierte Berechnung und FEM-Simulation das genaue Verhalten der Dichtfläche unter Belastung festgestellt und die bisher plane Dichtfläche so geformt werden, dass die Deformation eine gleichmäßige Flächenpressung zwischen den Kontaktflächen der beiden Injektorteile bewirkt. Dieser Lösungsweg wird im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter verfolgt.

### 5.2.3. Erstellen eines neuen Dichtkonzepts

Bei der Erstellung eines neuartigen Dichtkonzepts wurde aus folgender Ideensammlung ausgegangen. Die dort aufgelisteten Möglichkeiten nutzen verschiedene Prinzipien um die nötige Dichtwirkung aufzubringen. Diese Ideensammlung knüpft auf die EDS-Analyse an, die im Abschnitt 2.2 geschildert ist.

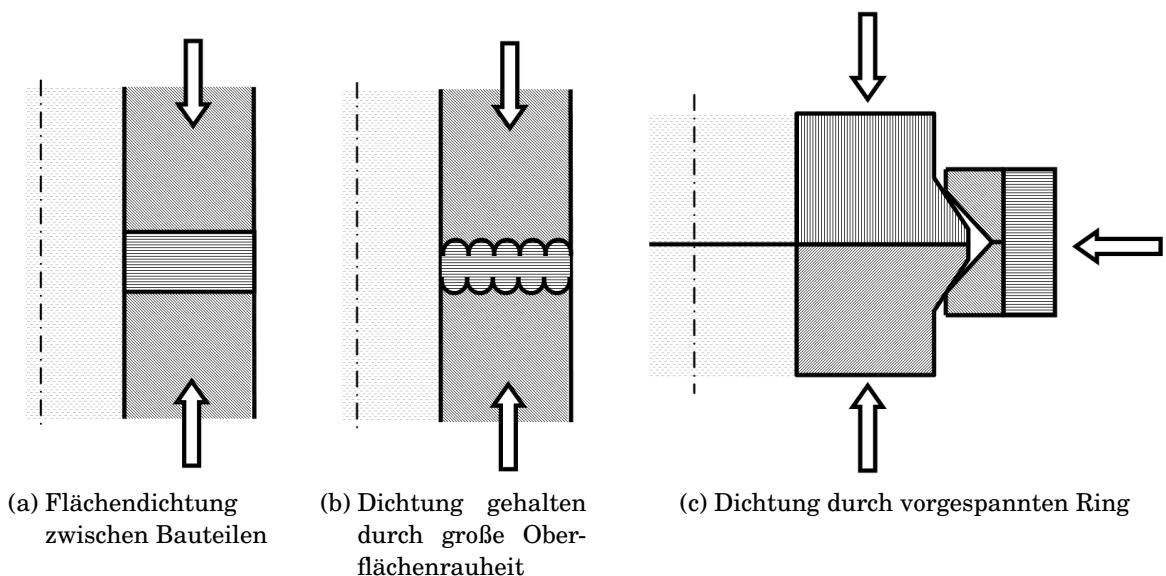
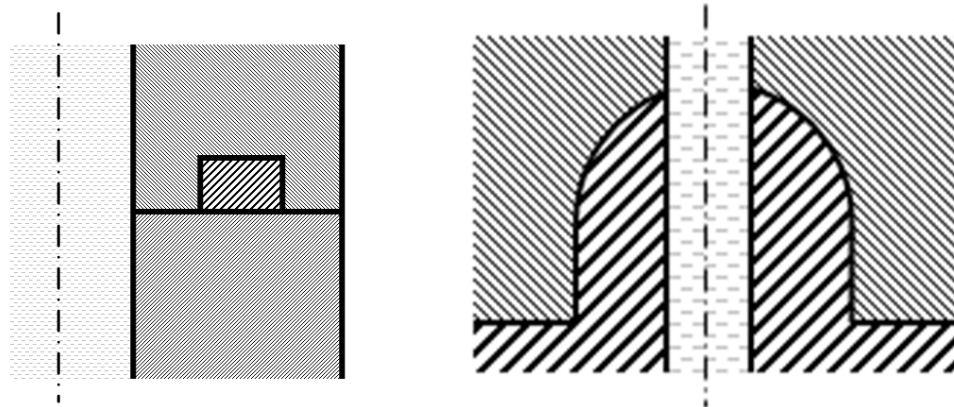


Abbildung 5.4.: Dichtung durch Dichtelemente unter Wirkung äußerer Kraft



(a) Unterschiedliche Wärmeausdehnung von Bauteil und Dichtung

(b) Unterschiedliche Wärmeausdehnung von zwei Bauteilen

Abbildung 5.5.: **Dichtung durch unterschiedliche Wärmeausdehnung**

Dichtungen, die ihre Funktion durch druckinduzierte Deformation erfüllen, würden unter Umständen einer ähnlichen Ermüdungsbelastung ausgesetzt, wie im Kapitel 3.2 erörtert. In dem Fall müsste der ermüdungsgerechten Auslegung eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, sodass entsprechende Dichtungseigenschaften über die gesamte oder einen angemessenen Anteil der Lebensdauer der Injektorbaugruppe gegeben sind. Es muss auch berücksichtigt werden, ob die geometrischen Gegebenheiten der jeweiligen Dichtweise die Dauerfestigkeit der Bauteile nicht beeinträchtigen (z.B. durch Einbringen von Kerben bei Rillen, gebrochenen Flächen usw.) Einige Dichtkonzepte können sich zusätzlich aufgrund relativ kleiner Abmessungen der Teile, hohen Druckniveaus und Temperatur als unrealistisch erweisen.

#### 5.2.4. Untersuchungen neuartiger Dichtkonzepte

Im weiteren Text sind Lösungsansätze, sowie Berechnungs- und Versuchsergebnisse von neuartigen Dichtkonzepten aufgeführt, die im Rahmen der Dissertation untersucht worden sind. Es wurde unter Anderem solchen Konzepten Aufmerksamkeit gewidmet, bei denen der abzudichtende Innendruck zu der eigentlichen Dichtwirkung beiträgt. Weil bei solchen Konzepten die dichtende Kraft unmittelbar an der abzudichtenden Stelle entsteht, entfällt die Notwendigkeit, diese Kraft von Außerhalb einzuführen. Das entlastet wesentlich die entsprechenden Bauteile und führt im Idealfall zu einem spannungs- und verzugsarmen Aufbau.

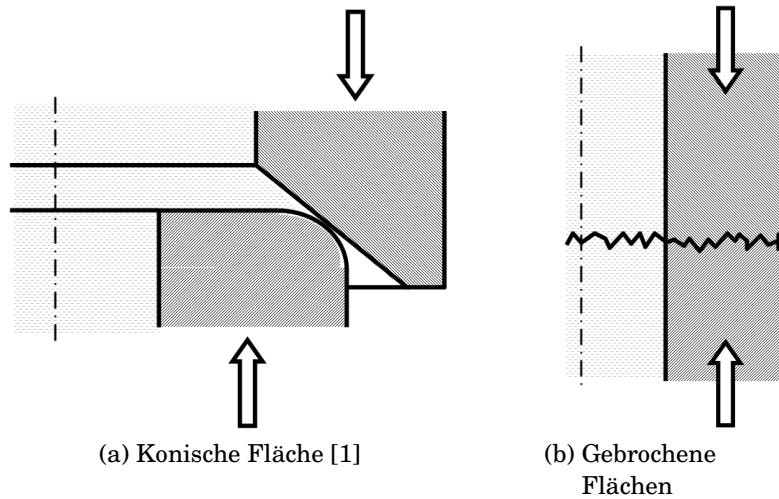


Abbildung 5.6.: **Dichtung durch Formschluss der Bauteile unter Wirkung äußerer Kraft**

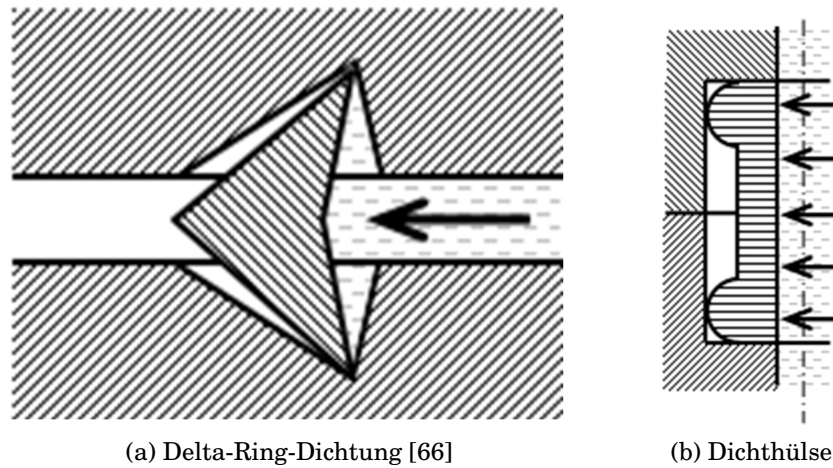


Abbildung 5.7.: **Dichtung durch sich deformierende Dichtelemente unter Wirkung der Flüssigkeit**

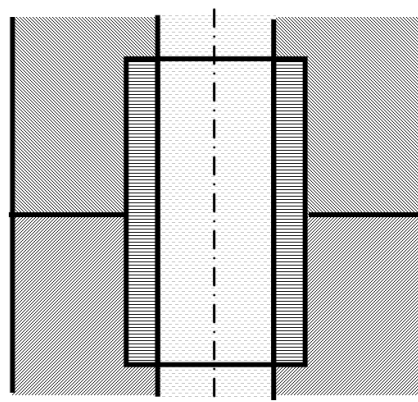


Abbildung 5.8.: **Hülse mit langer gepasster Fläche**



## 5.3. Dichtrillen

Das im Folgenden untersuchte Dichtkonzept basiert auf einem Formschluss zweier Injektorsegmente. Es wurde in zwei nacheinander folgenden Ausführungen untersucht, die die Bezeichnung 5A, 5B und 55A, 55B tragen. In beiden wurde die Kontaktfläche des Segments A plan mit entsprechender Ebenheit und Oberflächenrauheit ausgeführt und es wurde keine Wärmebehandlung vorgenommen. Die Kontaktfläche des Segments B wurde dagegen mit Rillen versehen und anschließend gehärtet. Diese Rillen, die die abdichtende Hochdruckkammer in zentrischen Kreisen umlaufen, sollen sich durch die Anpresskraft in die plane und weichere Fläche des Bauteils A einprägen und so die Dichtung gewährleisten. Hierfür ist wichtig, dass es sich bei den Rillen wirklich um zentrische Kreise und nicht um eine Spirale handelt.

Für die Funktionsweise und Lebensdauer der Bauteile sind unter anderem die Abmessungen der Rillen und die Größe des Härteunterschiedes wichtig. Für die Probe der Ausführung 55B wurden 16 kreisförmige Rillen der Tiefe  $0,12 \pm 0,05 \text{ mm}$  mit gegenseitigem Abstand von  $0,25 \text{ mm}$  vorgeschrieben, zu fertigen durch Drehen unter Verwendung eines Messers mit dem Spitzenwinkel von  $90^\circ$ . Für das anschließende Oberflächenhärten wurde eine Einhärtetiefe von  $0,4 \pm 0,3 \text{ mm}$  und zu erreichende Härte von  $58 \pm 4 \text{ HRC}$  vorgegeben. Das Gegenstück ohne Oberflächenhärtung erreichte nach den Angaben des Herstellers eine Härte von  $40 \pm 5 \text{ HRC}$ . Dadurch ergibt sich ein Härteunterschied von 13 bis 22 HRC, das für die Funktion des Dichtkonzepts genutzt werden kann.

### 5.3.1. Möglichkeiten der Berechnung

Da die Teile bei der Anwendung dieses Konzept den Bereich der elastischen Deformation verlassen und die Funktionsweise des Dichtkonzepts in plastischer Deformation besteht, erweist sich eine Berechnung des Verhaltens mit gängigen Berechnungswerkzeugen als schwierig. Ebenfalls die Geometrie der Rillen, die sich aus der Geometrie der Spitze

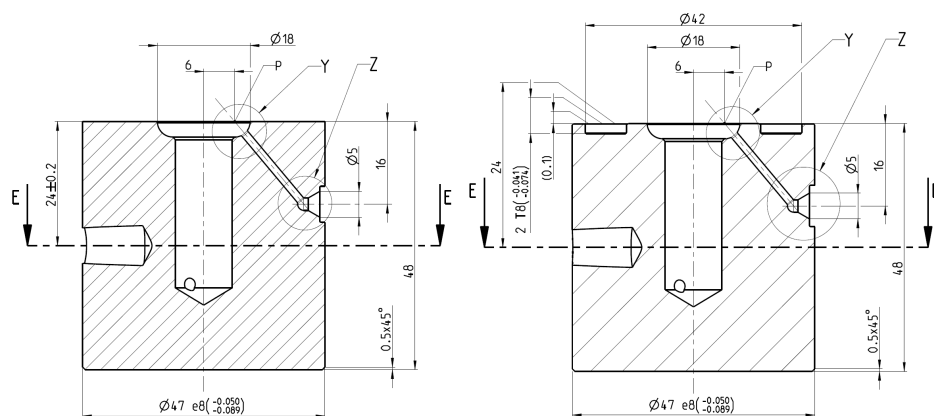


Abbildung 5.9.: Zeichnung der Proben 5A und B für die Erprobung des Rillenkonzpts.

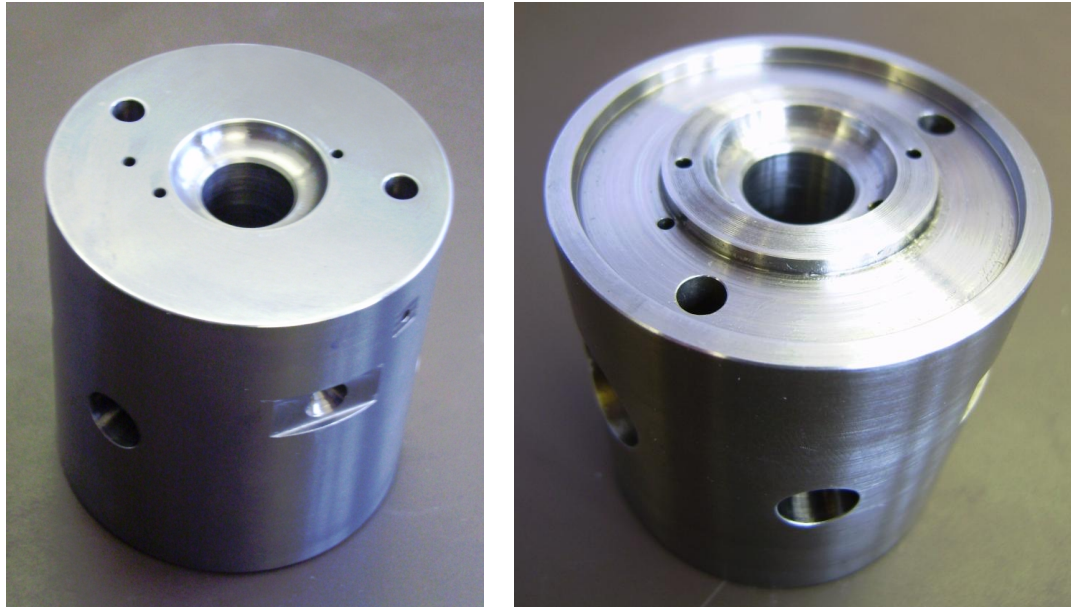


Abbildung 5.10.: Proben 5A und B für die Erprobung des Rillenkonzpts.

des bei der Herstellung verwendeten Schneidwerkzeugs ergibt, ist nur auf eine stark idealisierte Weise in einem Berechnungsmodell darstellbar. Die folgenden Abbildungen zeigen einen Versuch, trotz dieser Komplikationen Berechnungsergebnisse zu erhalten, um eine Abschätzung der Wirksamkeit des Dichtkonzepts durchführen zu können.

Ein Detail der Geometrie, auf der Abbildung 5.11 dargestellt, verdeutlicht die Schwierige Aufgabe einer Berechnung. Die Abmessungen, mit denen in diesem Fall umgegangen wird, sind dermaßen klein, dass die tatsächliche Geometrie der Rillen in eine vereinfachte, wellenförmige Struktur umgewandelt werden muss, um eine sinnvolle Vernetzung zu ermöglichen. Um möglichst genaue Ergebnisse erhalten zu können, besteht das angewendete Netz (s. Abbildung 5.12) ausschließlich aus Oktaederelementen und die durchschnittliche Kantenlänge beträgt in der radialen Richtung lediglich  $0,03 \text{ mm}$ . Bei der Berechnung wurden Daten zu elastisch-plastischen Materialeigenschaften verwendet. Trotz dieser Bemühungen ergab die Berechnung Werte, aufgrund welcher man keine eindeutige Aussage über das reale Verhalten treffen konnte. Aus der Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14 geht hervor, dass die Berechnung in Spannungsspitzen an jeweils dem ersten Knoten jeder Rille, der im Kontakt mit der Gegenfläche steht, resultiert. Diese Spannungsspitzen verzerren das Ergebnis der Berechnung umso mehr, dass zwischen zwei benachbarten Spitzen lediglich 3-5 weitere Knoten liegen. Das Berechnungsmodell war trotz diverser Parametereinstellungen nicht komplett im Stande eine zuverlässig realistische Darstellung der Spannung zu ermitteln. Abweichungen der Berechneten Spannungsverteilung gegenüber dem tatsächlichen Kontaktdruck, die mit Messungen mittels Druckmessfolie bestimmt worden sind (s. Abbildung 5.15), bestätigen in diesem Fall die begrenzte Aussagekräftigkeit der FEM-Simulation. Weitere Beurteilung des Dichtkonzepts wird deshalb in dieser Arbeit durch die Messergebnisse und nicht durch das Berechnungsmodell begründet.

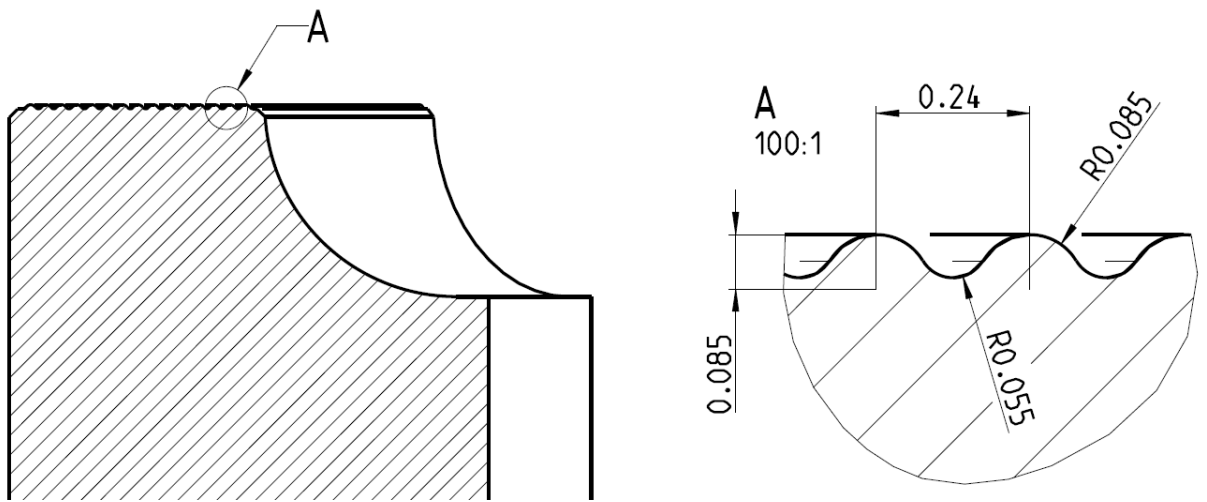


Abbildung 5.11.: Geometrie des Berechnungsmodells für das Rillenkonzep.

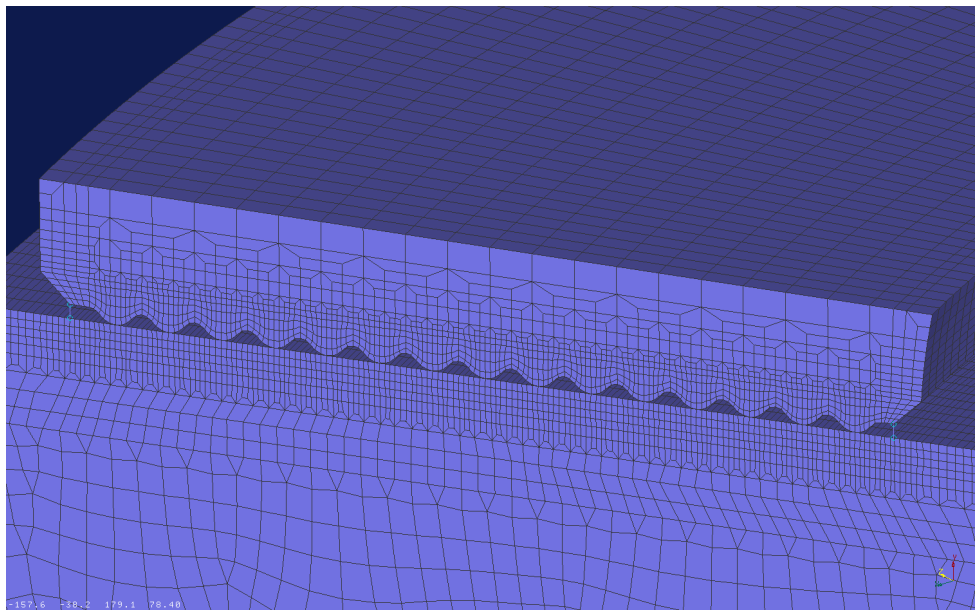


Abbildung 5.12.: Vernetzung des Berechnungsmodells für das Rillenkonzep.

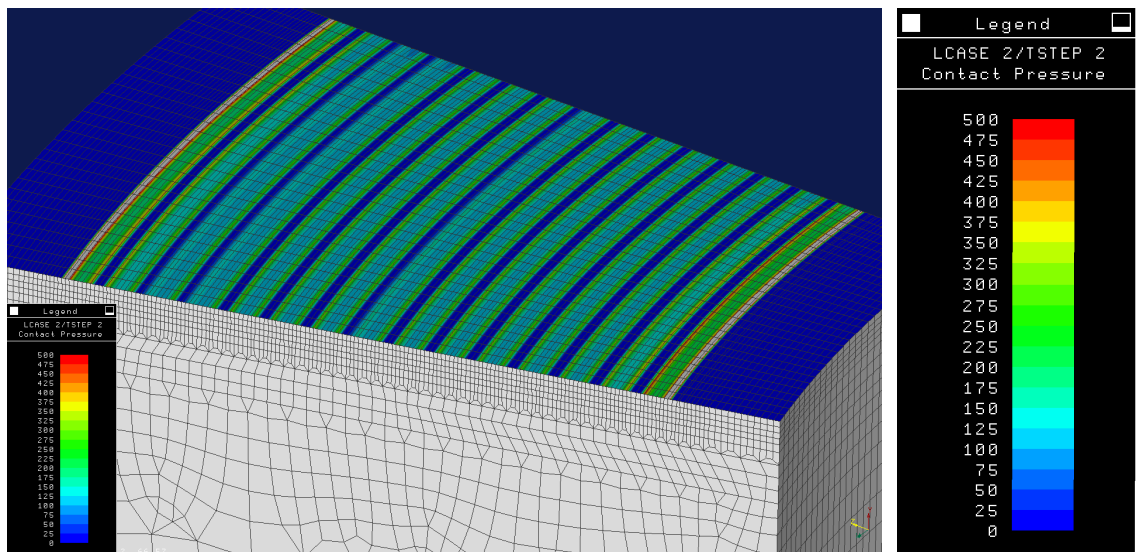


Abbildung 5.13.: Ergebnis der Kontaktdruckberechnung beim Rillenkonzepit.

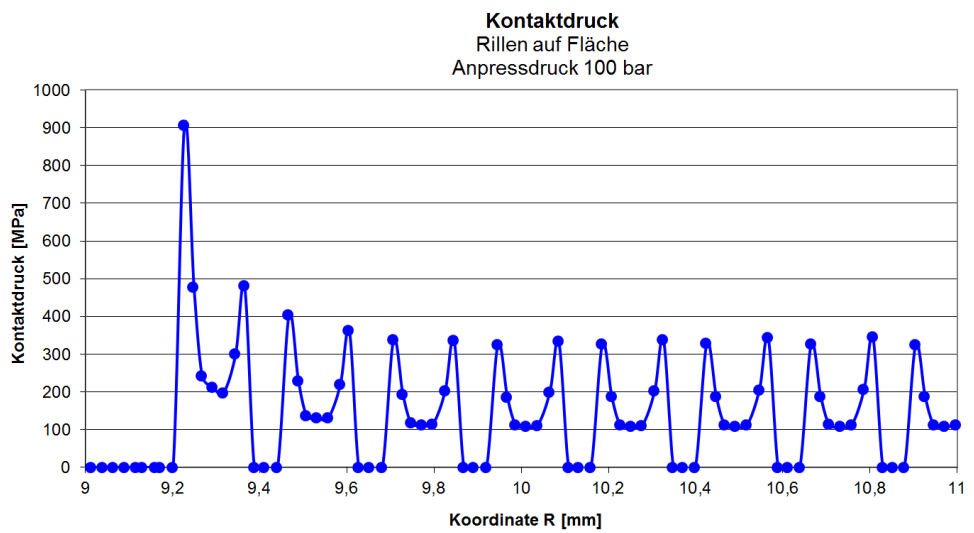


Abbildung 5.14.: Ergebnis der Kontaktdruckberechnung beim Rillenkonzepit.

### 5.3.2. Messergebnisse an Proben mit Dichtrillen

Für Untersuchungen des Rillenkonzpts wurden die Proben der Reihen 5A, 5B und 55A, 55B verwendet. Es wurden mehrere Serien von Messungen realisiert, wobei jede aus einzelnen Messreihen bestand. Die Messreihen Innerhalb einer Serie wurden der Anpresskraft nach aufsteigend durchgeführt, sodass die Einprägung der Dichtrillen während der Serie tiefer wurde. Zwischen den Serien wurde der Probenaufbau abgebaut und die Proben besichtigt. Die Probe 5A nach Versuch ist auf der Abbildung 5.16 zu sehen. Im Vergleich zu dem Stand vor Versuch (Abbildung 5.10) sind eingeprägte kreisförmige Spuren um die mittige Mulde gut sichtbar. Die Einprägung der Rillen wurde zusätzlich unter einem Mikroskop betrachtet, um ihre Tiefe und Verlauf zu bewerten. Ein typisches Bild der eingepprägten Rillen in der Probe A zeigen die Abbildungen 5.17 und 5.18. Das erste Bild verdeutlicht den Verlauf der Einprägungen im Vergleich zu den Spuren vom Fertigungsprozess. Für eine gute Dichtwirkung ist es wichtig, dass die marko- und mikroskopischen Unebenheiten der Oberfläche der Probe von der Einprägung überdeckt werden. Vor allem aus der detaillierten Abbildung 5.18 ist ersichtlich, dass die Einprägung der Dichtrillen die Kratzer in der Oberfläche unterbrechen. Eine Undichtigkeit als Ergebnis des gewählten Fertigungsprozesses sollte damit ausgeschlossen sein. Vor einer neuen Messserie wurde die Kontaktfläche der Probe A auf den Ausgangszustand nachgearbeitet, d.h. die Abdrücke des Vorversuchs wurden abgeschliffen und die Fläche neu geläpft. Die Probe B wurde ebenfalls unter Mikroskop nach Spuren von Beschädigung abgesucht. Die gehärtete Oberfläche der Rillen hat den Versuchen generell gut standgehalten und es konnte keine Beschädigung festgestellt werden, die eine Undichtigkeit zur Folge haben würde. Die Proben A und B konnten also wiederholt für Versuche verwendet und die Kosten begrenzt gehalten werden. Eine Mikroskopaufnahme der gehärteten Rillen der Probe 55B nach dem Versuch zeigt die Abbildung 5.19. Sichtbar ist eine Abnutzung der Spitzen, die bei den Rillen in der Mitte des Ringes ausgeprägter ist, als auf den beiden Rändern. Eine Aufnahme des selben Bereichs der Probe unter einem Winkel von ca.  $45^\circ$  (Abbildung 5.20) macht es deutlich, dass die Spitzen der Rillen während des Versuchs nicht beschädigt worden sind. Eine Wiederverwendung der Probe B für weitere Versuche ist also ohne Nacharbeit möglich.

Das angewendete Messverfahren und die dafür entwickelte und eingesetzte Technik ist im Kapitel 4 beschrieben. Zu den wichtigsten Ergebnissen der Messungen zählen die Angaben der Tabellen 5.1 und 5.2. Zu jeder Kombination von Anpresskraft und Innendruck ist die ermittelte Leckagemenge in  $[g/min]$  angeführt. Die Werte sind jeweils ein Durchschnitt aller durchgeführten Messreihen, in der Regel wurde jede Kraft-Druck Kombination mit drei Messreihen untersucht. Aus dem Vergleich beider Tabellen wird deutlich, dass die Leckagemenge des Probenpaares 5A, 5B größer ist, als des 55A, 55B. Der Unterschied zwischen den beiden Ausführungen ist der Grad ihrer Komplexität (s. den Abschnitt 4.1.1). Die vereinfachte Geometrie der Proben 55 schneidet dabei besser ab.

Der Grund für die schlechteren Dichteigenschaften der Probe 5 liegt anscheinend in den Bohrungen, die in der Dichtfläche angebracht worden sind, um durchgehende Kanäle wie etwa Rücklauf- oder Kühlkanäle zu simulieren, die bei realen Injektoren üblich



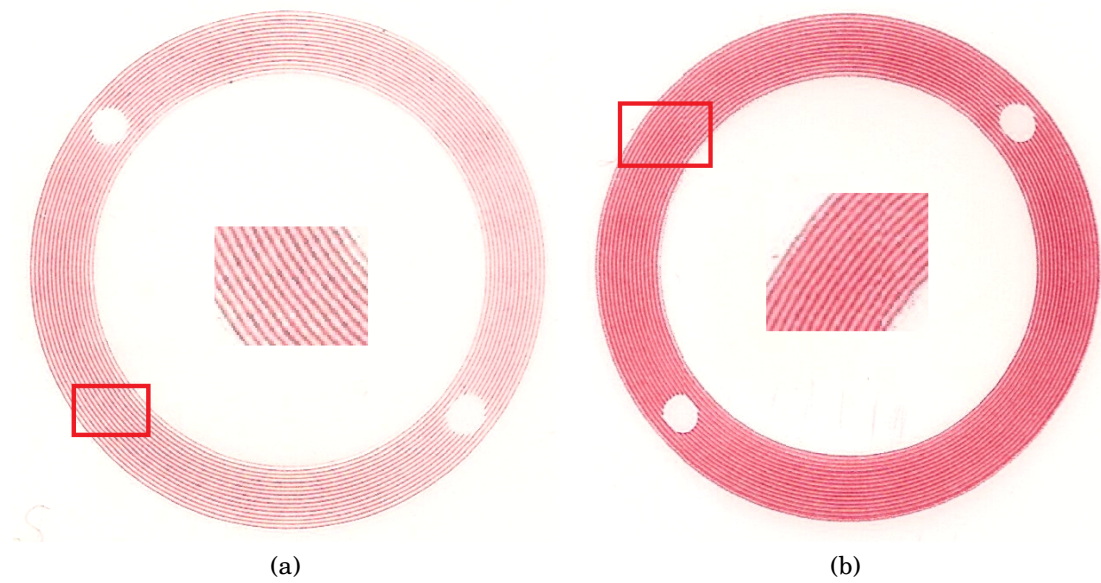


Abbildung 5.15.: Messergebnisse für Kontaktdruck des Rillendichtkonzepts bei einer Axialkraft von  $10,7 \text{ kN}$  ( $50 \text{ bar}$  Anpressdruck) und  $21,4 \text{ kN}$  ( $100 \text{ bar}$ ).

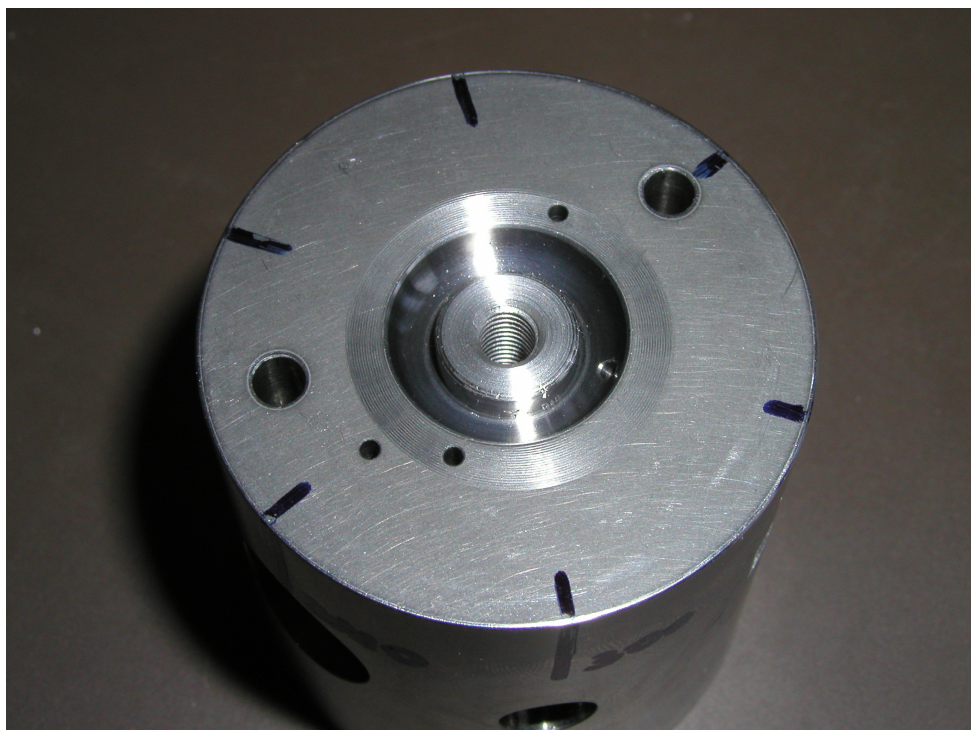


Abbildung 5.16.: Probe 5A mit Einprägung nach dem Versuch.

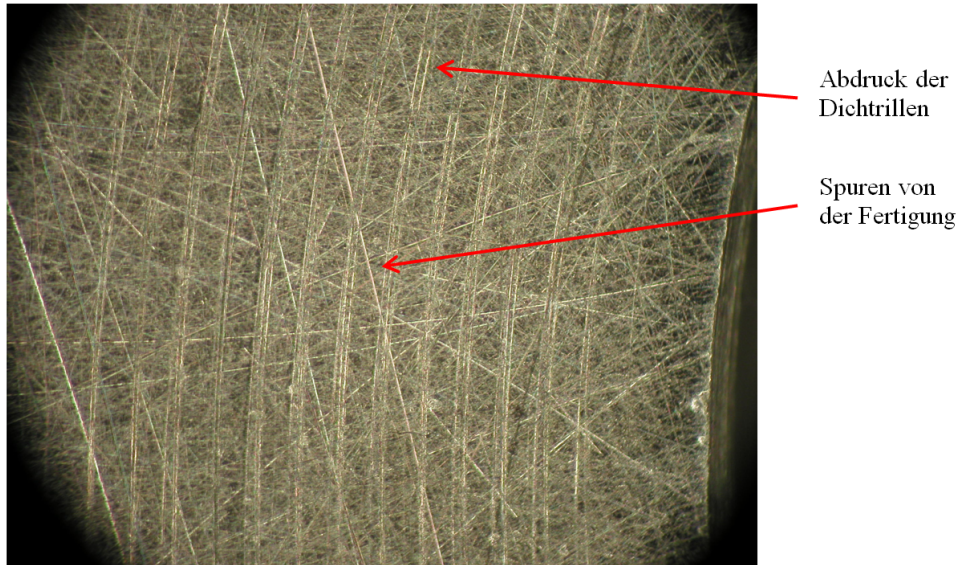


Abbildung 5.17.: Mikroskopbild der Einprägung nach dem Versuch in der Probe 5A.

sind. Diese Bohrungen sind z.B. in den Abdrücken in der Druckmessfolie auf der Abbildung 5.15 gut sichtbar. Als Resultat bleiben im Bereich dieser Bohrungen nur einige wenige der Dichtrillen ununterbrochen. Die Mikroskopaufnahmen der Gehärteten Rillen (Abbildung 5.19) lassen die Annahme zu, dass gerade die Rillen in der Mitte der Dichtfläche, die durch die Bohrungen unterbrochen wurden, einen größeren Teil der Dichtwirkung ausmachen, als die intakten Rillen in der Nähe der Ränder. Die Detailaufnahmen in der Abbildung 5.15 bestätigen, dass jeweils die erste Rille auf jeder Seite der Dichtfläche schwächer angepresst wird, als sie restlichen. Damit stellt die Unterbrechung der Rillen durch die in der Probe 5 gewählte Anordnung eine ernsthaftere Schwächung der Dichtwirkung dar, als ursprünglich vermutet. Die Einmündung der Bohrungen in die Dichtfläche wurde konstruktiv auf keine besondere Weise bestimmt. Um ihren negativen Einfluss zu mindern, wäre es ebenfalls möglich, den Bereich der Einmündung gezielt und überlegt zu entwerfen. Eine zusätzliche Abdichtung des Bereichs durch speziell angeordnete Dichtrillen würde die relativ einfache Fertigung auf einer Drehmaschine wesentlich komplizieren. Um sichere Dichteigenschaften zu erzielen, sollten daher durch die Dichtfläche verlaufende Bohrungen vermieden werden. Alternativ kann die Dichtfläche breiter entworfen werden.

Die Abbildung 5.23 zeigt eine Darstellung mehrerer Messreihen an den Proben 5A, 5B bei einem Innendruck von 300 *bar*. Die Anpresskraft der einzelnen Versuche reichte von 20 bis 35 *kN*. Die meisten Messreihen weisen einen konstanten Verlauf auf, die Ergebnisse von mehrerer Messreihen unter vergleichbaren Bedingungen sind in der Regel vergleichbar und reproduzierbar. Die Messreihe Nr. 109 weist anfänglich eine abfallende Tendenz auf. Dieses Verhalten wurde gelegentlich bei ersten Messreihen, die nach einer Abschaltung oder Umbau gefahren wurden, beobachtet. Nachfolgende Messungen bei gleichen oder veränderten Parametern verhielten sich weiter normal. Graphen und Messdaten der Untersuchungen sind in dem Abschnitt A.1 des Anhangs dieser Arbeit angeführt.



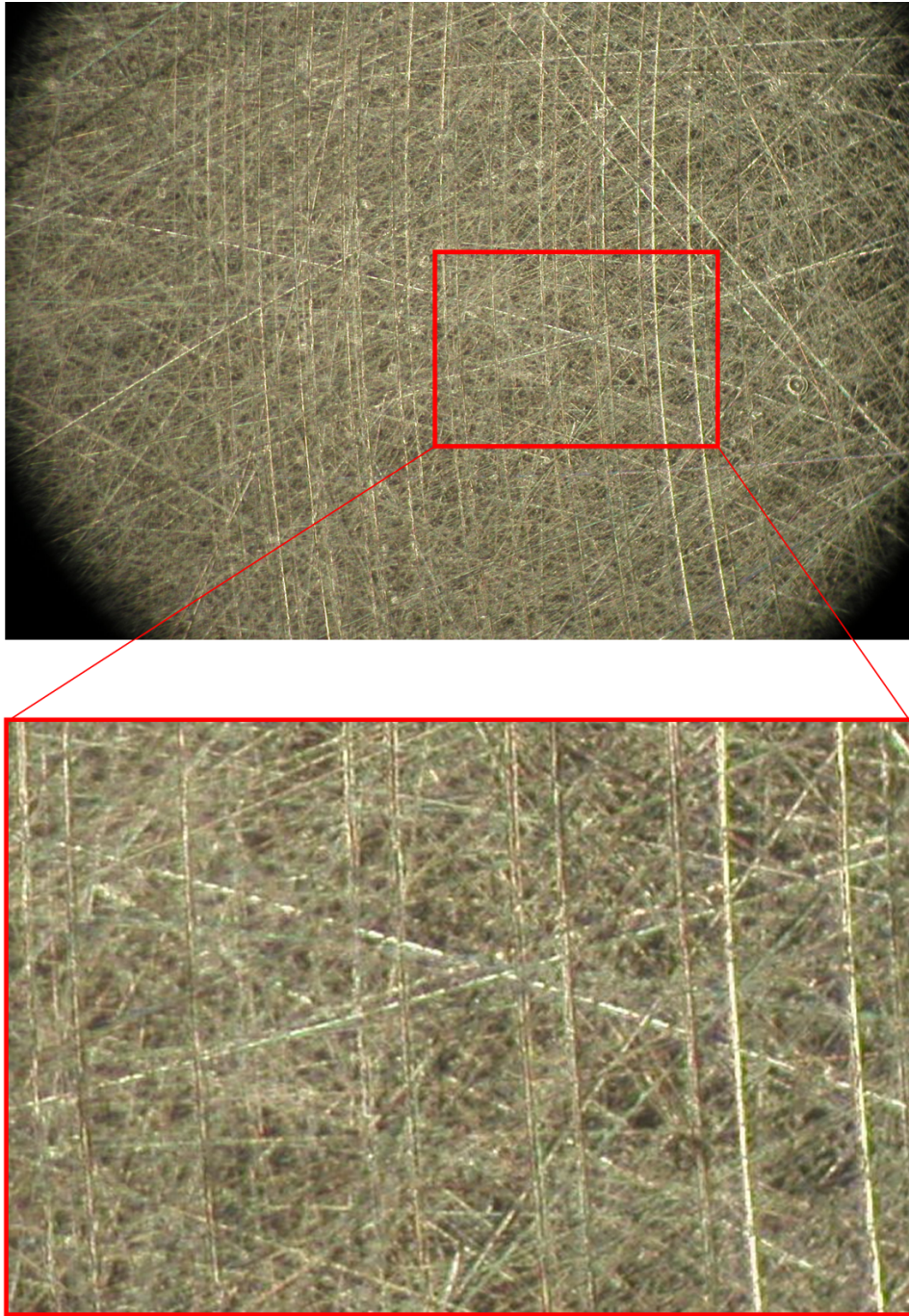


Abbildung 5.18.: Mikroskopbild und Detail der Einprägung nach dem Versuch in der Probe 5A.



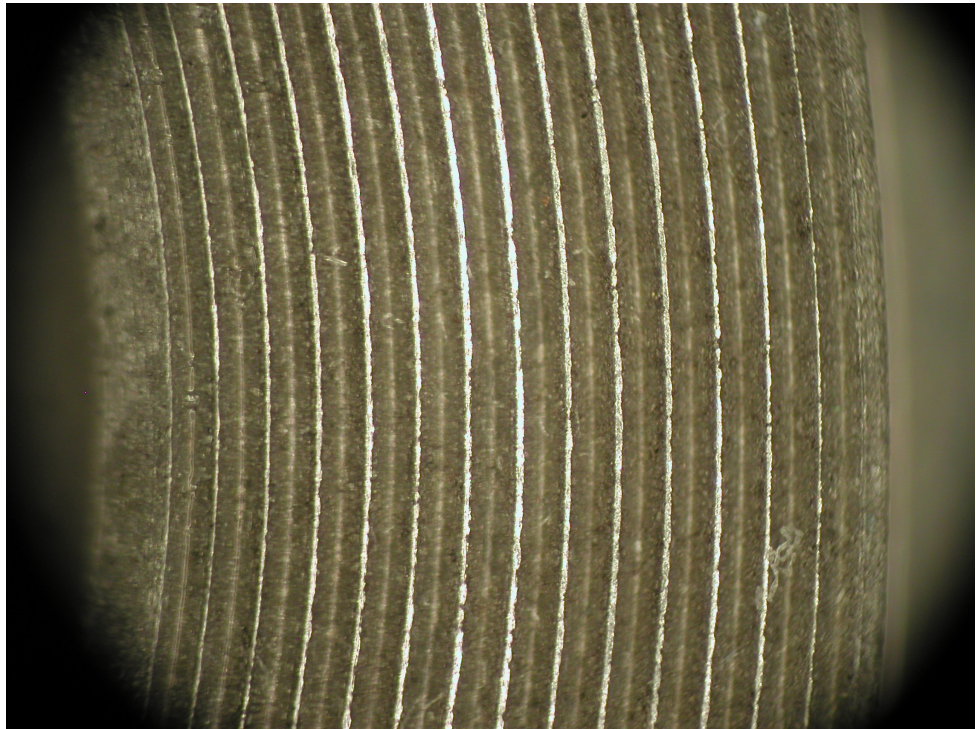


Abbildung 5.19.: Mikroskopbild der gehärteten Rillen in der Probe 5B nach dem Versuch.

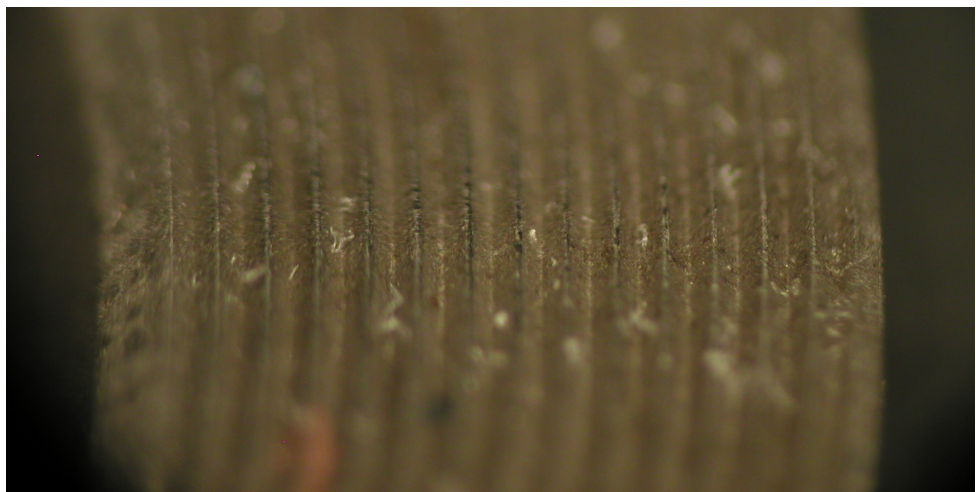


Abbildung 5.20.: Mikroskopbild der gehärteten Rillen in der Probe 5B nach dem Versuch, Blickwinkel ca.  $45^\circ$ .

		Innendruck [ <i>bar</i> ]					
		100	250	300	350	400	450
Kraft	20 <i>kN</i>	0,55	0,84	1,57			
	25 <i>kN</i>		0,81	1,09	1,25		
	30 <i>kN</i>		0,75	1,21	0,97	1,97	
	35 <i>kN</i>			0,30	0,41	0,80	0,80

Tabelle 5.1.: Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 5A, 5B in [*g/min*] bei unterschiedlicher Anpresskraft und Innendruck.

		Innendruck [ <i>bar</i> ]										
		250	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Kraft	15 <i>kN</i>	0,00	0,00	0,01								
	20 <i>kN</i>		0,00	0,01	0,00	0,00						
	25 <i>kN</i>			0,00	0,09	0,00						
	30 <i>kN</i>				0,00	0,00						
	35 <i>kN</i>					0,00	0,18					
	40 <i>kN</i>					0,00	0,00	0,02	2,13			
	45 <i>kN</i>								0,00	0,91		
	50 <i>kN</i>								0,00	0,00	0,20	
	55 <i>kN</i>										0,00	0,34

Tabelle 5.2.: Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 55A, 55B in [*g/min*] bei unterschiedlicher Anpresskraft und Innendruck.

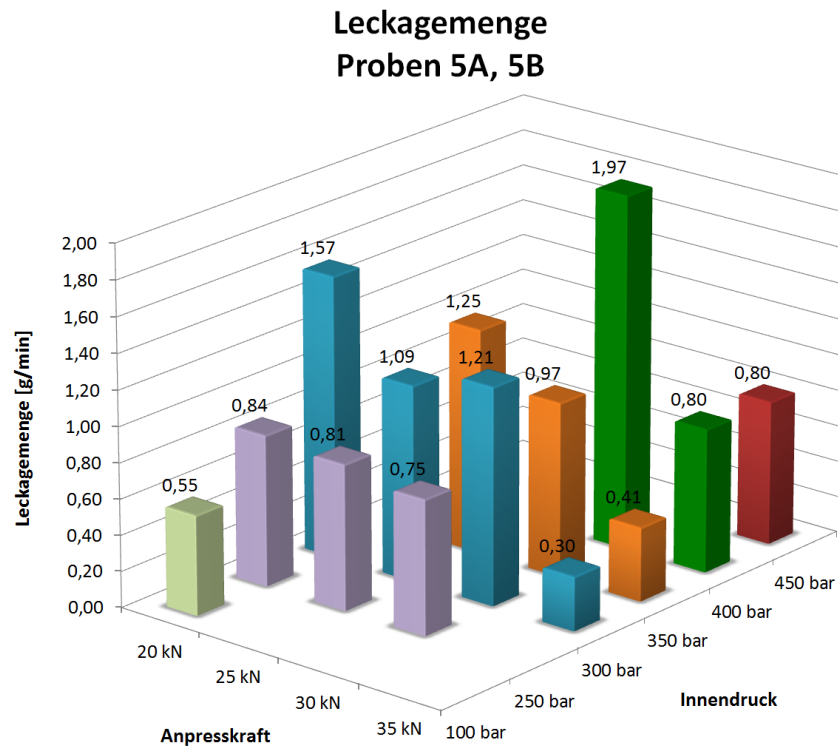


Abbildung 5.21.: Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 5A, 5B.

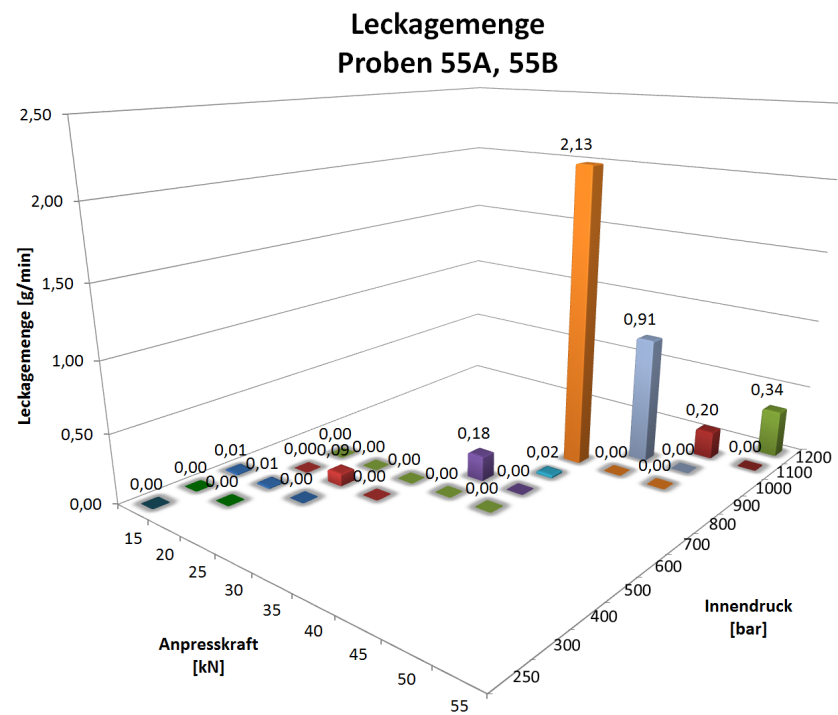


Abbildung 5.22.: Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 55A, 55B.

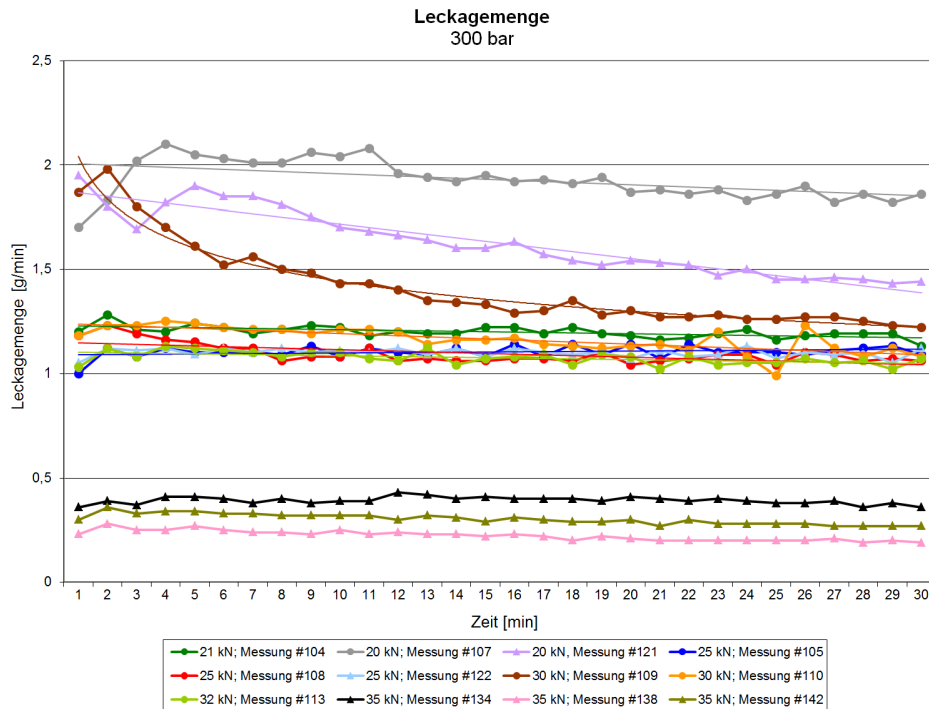


Abbildung 5.23.: Aufzeichnung über den Verlauf der Leckage bei einer Dichtheitsmessung mit 300 *bar*.

### 5.3.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei dem Versuch an den Proben 55A und 55B konnte der Innendruck von ca. 1200 *bar* mit mäßiger, kontrollierter Leckage abgedichtet werden. Generell bedeutete das Anwenden einer höheren Anpresskraft das Abdichten eines höheren Druckes oder die Verminderung der Undichtigkeit. Am Probenpaar 5A/5B konnte kein vergleichbar hohes Druckniveau erreicht werden (vgl. Tabellen 5.1 und 5.2). Die Ergebnisse aller Messungen sind zusätzlich auf den Abbildungen 5.21 und 5.22 graphisch dargestellt. Als Grundlage für die Erstellung dieser Ergebnisse dienten einzelne Messreihen, die näher in dem Abschnitt 4 beschrieben sind. Die Abbildung 5.23 zeigt eine Aufzeichnung der Leckagemenge bei mehreren Messreihen unter Prüfdruck von 300 *bar*.

Der Grund für die Abweichenden Ergebnisse der Untersuchungen an Proben 5A, 5B und 55A, 55B ist die kompliziertere Geometrie der Proben 5A und 5B, insbesondere die Bohrungen, die die Dichtrillen auf der Dichtfläche auf eine ungünstige Weise unterbrechen. Eine lokale konstruktive Anpassung der Einmündung der Bohrungen in die Dichtfläche wird als schwierig eingeschätzt, es wird deshalb empfohlen den Ring der Dichtrillen zu verbreitern, damit trotz der Unterbrechung genügend Dichtrillen intakt bleiben, oder durchgehende Bohrungen aus der Dichtfläche komplett auszuschließen.

Sowohl bei den Proben 5A, 5B, als auch 55A, 55B, konnten sich bei dem gewählten Härteunterschied des Probenpaares unter der Einwirkung der axialen Anpresskraft die Dichtrillen der Probe B in die Oberfläche der Probe A tief genug einprägen, sodass die

unebenheiten der Fläche und Spuren aus der Fertigung überdeckt werden konnten. Dies wurde durch Mikroskopaufnahmen bestätigt (s. Abbildung 5.18). Wiederholte Versuche zeigten die Wichtigkeit eines sorgfältigen Einbaus der Proben um eine gleichmäßige Verteilung der Kontaktpressung über die Auflagefläche zu erzielen. Durch die Anwendung einer geeigneten Einbauprozedur konnten nach dem Aus- und Einbau des Probenpaares reproduzierbare Ergebnisse erreicht werden. Es ist mit diesem Dichtkonzept auch möglich gewesen, durch das geeignete Zusammenspiel vom Druck und Anpresskraft eine kontrollierte Leckage zu erzielen, um beispielsweise die Kühlung eines Großinjektors zu unterstützen.

Die Berechnung erwies sich dagegen als schwierig. Die Dichtrillen müssen ihrer feinen Geometrie entsprechend vernetzt werden. Das Modell wurde für die Berechnung vereinfacht, aber möglichst realitätsgetreu aufgebaut (s. Abbildungen 5.11 und 5.12). Das Berechnungsergebnis ist durch die Tatsache geprägt, dass die Auflagefläche jeder Rille nur 7 Knoten und der Spalt zwischen zwei Rillen nur 3 Knoten breit ist. Daraus resultiert ein ungleichmäßiger Verlauf des Kontaktdrucks mit vielen Spannungsspitzen, wie die Abbildung 5.14 zeigt. Das mittlere Niveau im Bereich von  $100 \text{ MPa}$  entspricht dem Ergebnis, das mit einer Druckmessfolie unter den entsprechenden Bedingungen ermittelt worden ist (s. Abbildung 5.15). Unbestätigt blieb das Ergebnis der FEM-Berechnung, dass der Kontaktdruck an der ersten Rille im Vergleich zu den restlichen deutlich höher ist. Dies kann außer der Ungenauigkeit des Berechnungsverfahren auch an einer Unebenheit der Hüllfläche der Rillenspitzen liegen, auf die die Mikroskopaufnahme 5.19 hindeuten kann. Diese Aufnahme zeigt eine etwaige schwächere Abnutzung der Rillen in den Randbereichen der Dichtfläche im Vergleich zu den Rillen in der Mitte.

Die Dichtrillen zeigten das Potential, bei einer richtigen Auslegung ein verhältnismäßig günstiges Dichtkonzept zu werden. Die Dichteigenschaften können gegenüber der untersuchten Ausführung weiter verbessert werden, vor allem durch einen entsprechenden Entwurf der Dichtfläche, optimierten Verhältnis der Härte der beiden Teile und einer sorgfältigen Auslegung der Aufnahme der Injektorteile.

## 5.4. Sacklochartige Geometrie

Ein Merkmal heutiger Injektoren sind durchgehende HD-Kanäle mit Durchmessern, die der Injektorgröße und damit dem realisierten Einspritzvolumen entsprechen. Oft ergibt sich durch die jeweilige Konstruktionsart die Notwendigkeit einer Richtungsänderung dieser Kanäle, die entweder an der Kontaktfläche oder im Inneren eines Bauteils realisiert werden, wie die Abbildung 5.24 illustriert.

Der Bedarf, die Richtung des Kanalverlaufs zu ändern resultiert (zusammen mit anderen Aspekten) in der Notwendigkeit, den Injektor in mehrere Segmente aufzuteilen und führt so zu Komplikationen mit Hinblick auf die Dichtheit der Injektorbaugruppe. In diesem Abschnitt wird eine Möglichkeit analysiert, die Geometrie der Bohrungen so anzupassen, dass sie dem Dichtverhalten der Kontaktfläche zugute kommen.

Von besonderem Interesse ist die Geometrie der Abbildung 5.24 rechts. Diese zeigt eine Umlenkung des Kanals mittels zweier Bohrungen, die von verschiedenen Seiten gefertigt werden. So entsteht eine Art Sackloch von der Kontaktfläche ins Innere des Bauteils. Eine Innendruckbeaufschlagung diesen Kanals verursacht eine spezifische Deformation, die in diesem Kapitel näher untersucht wird.

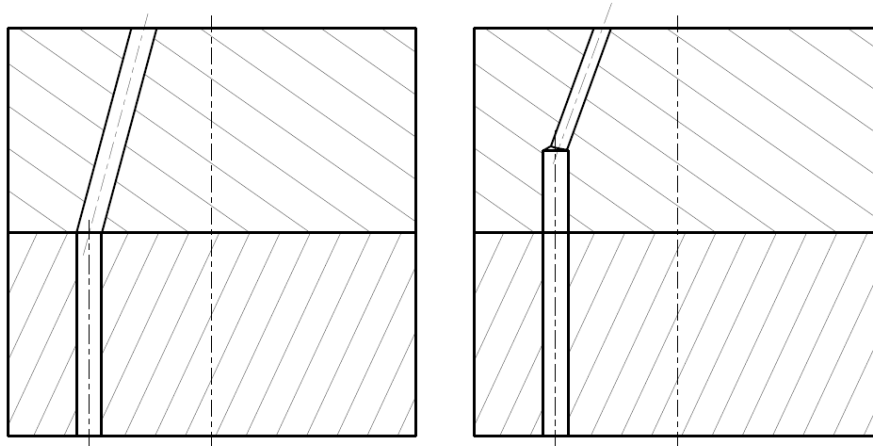


Abbildung 5.24.: Gängige Arten von Kanalführungen in Injektorsegmenten – schematische Darstellung.

### 5.4.1. Einfluss auf die Dichteigenschaften

Um die Verhältnisse auf unter Vorspannung stehenden Kontaktflächen, wie sie zwischen den Bauteilen vorkommen, besser zu verstehen, untersuchen wir zuerst rechnerisch das Verhalten eines der Bauteile ohne das entsprechende Gegenstück. Für den Zweck dieser vereinfachten Berechnung wird ein 3D-Modell der Probe 6A, 6B verwendet. Das Sackloch ist asymmetrisch positioniert, um der Realität möglichst nahe zu kommen. Nach der Einspannung der Probe auf der unteren Stirnfläche und Beaufschlagung des Sackloches mit Innendruck zeigen sich zwei Auswirkungen. Erstens hat die obere Stirnfläche als Resultat des auf den Boden des Sacklochs wirkenden Druckes die Tendenz auf der Seite nach unten abzusacken. Bei zwei aufeinander liegenden Bauteilen würde das eine ungünstige Wirkung in Bezug auf die Dichtheit bedeuten, weil die beiden Teile voneinander weggedrückt würden. Die zweite Auswirkung des Innendruckes ist jedoch vorteilhaft. Der Innendruck bewirkt nämlich gleichzeitig eine Ausweitung des Sacklochs, die eine Erhebung der Randkante zur Folge haben kann. Beim Kontakt zweier Bauteile verursacht dies eine Erhöhung des Kontaktdrucks in der unmittelbaren Nähe der Bohrung und trägt so zur Dichtwirkung bei. Das Verhalten der freien Oberfläche illustriert die Abbildung 5.25. Um das Sackloch herum beobachten wir eine Erhebung des Werkstoffs.

Deutlicher ist die Verformung graphisch auf der Abbildung 5.26 dargestellt. Bei der Koordinate  $R = 0$  befindet sich eine durchgehende Bohrung, bei  $R = -20$  das untersuchte

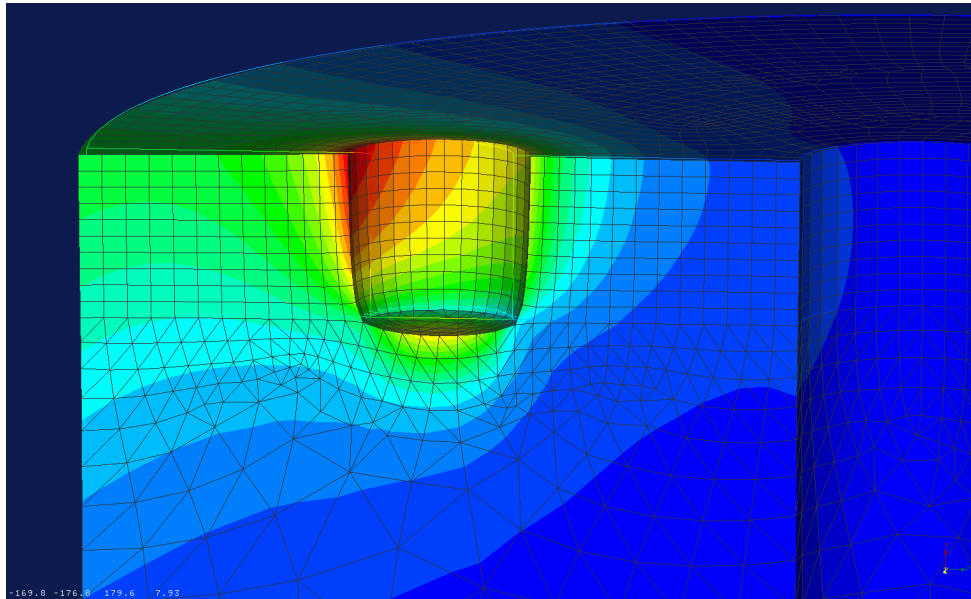


Abbildung 5.25.: Verformung der freien Oberfläche.

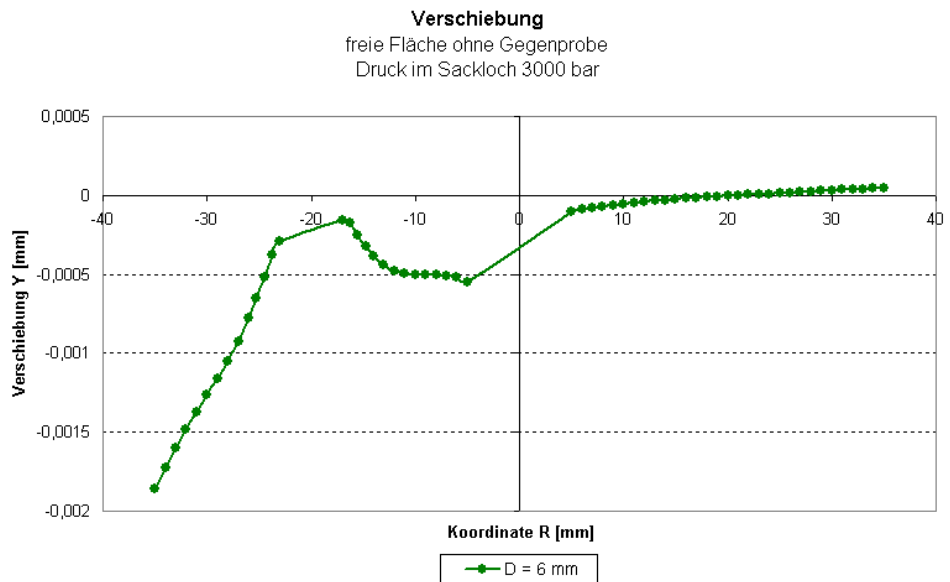


Abbildung 5.26.: Verhalten der freien Oberfläche.



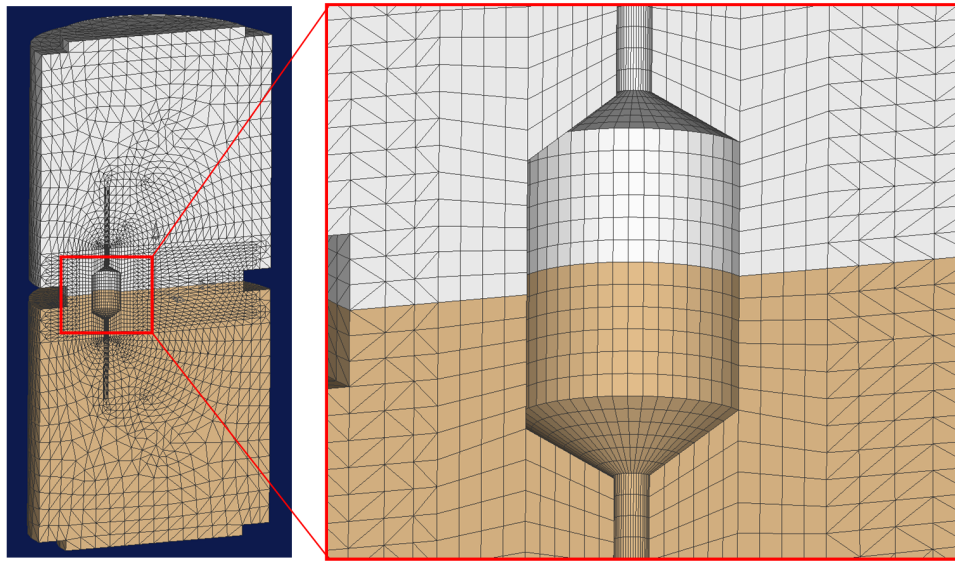


Abbildung 5.27.: Virtuelle Proben für Berechnung der Sacklochgeometrie.

Sackloch. Wie erwartet, weicht die Oberfläche auf der Seite des Sacklochs nach unten. Vom Sackloch in Richtung Außenkante ist die Verschiebung ausgeprägter, da wegen der Nähe der Kante die Bauteilsteifigkeit geschwächt ist.

#### 5.4.2. Berechnung des Kontaktdrucks zwischen zwei Bauteilen

Die Geometrie der für die FEM Berechnung erstellten Modelle wurde möglichst nahe an die Geometrie der später im Versuch verwendeten Proben, bzw. der realen Injektorbauteile gehalten. Hierfür wurde auf der Stirnfläche der zylindrischen Probe exzentrisch eine Bohrung platziert, derer Tiefe und Durchmesser bei der Berechnung variiert worden ist. Eine Anordnung zweier für die Berechnung benutzten Proben und ein Detail des Sackloches zeigt die Abbildung 5.26. In der Nähe des Sackloches wurden quadratische, im Rest des Modells Tetraederelemente verwendet.

Diese Modelle wurden dazu benutzt, die Auswirkung der positiven Überhöhung der Kante, wie sie im Absatz 5.4.1 beschrieben worden ist, zu analysieren. Die Auswirkung variiert in Abhängigkeit vom Innendruck, Lochdurchmesser und dessen Tiefe. In einer Berechnung für den Druck von 3000 bar und zwei Durchmesser  $D = 3\text{mm}$  und  $D = 6\text{mm}$  wurden entsprechende optimale Tiefen festgestellt, die den größten Anstieg an Kontaktdruck zwischen den Proben ergeben. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in der Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Es ergeben sich günstige Tiefen von ca.  $L = 1,3\text{mm}$  beim Lochdurchmesser von  $D = 3\text{mm}$  und  $L = 3,5\text{mm}$  bei  $D = 6\text{mm}$ . Dieser Effekt, sofern durch Versuche belegt, würde einen Entwurf von Injektorsegmenten ermöglichen, die verbesserte Dichteigenschaften bei konkretem Innendruck oder in einer begrenzten Druckspanne aufweisen.

Aus der Abbildung 5.30 ist die Verteilung des Kontaktdrucks auf der Kontaktfläche



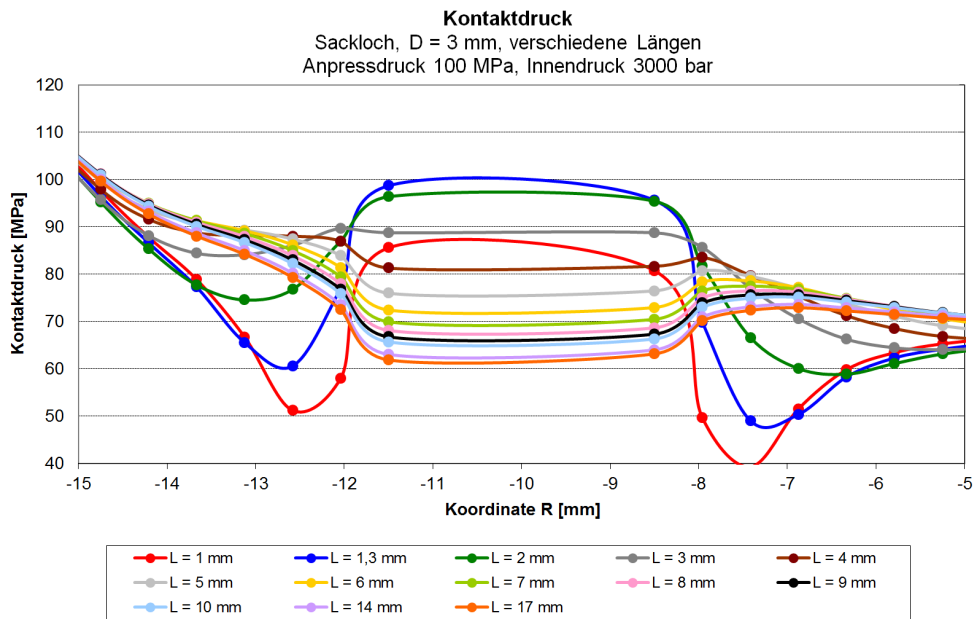


Abbildung 5.28.: Kontaktdruck um ein Sackloch mit D = 3 mm.

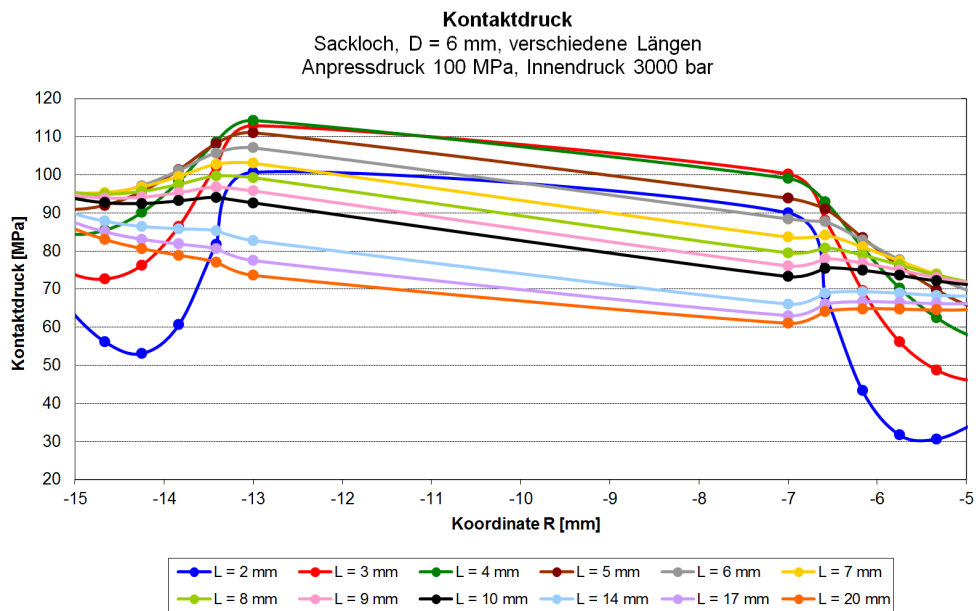


Abbildung 5.29.: Kontaktdruck um ein Sackloch mit D = 6 mm.

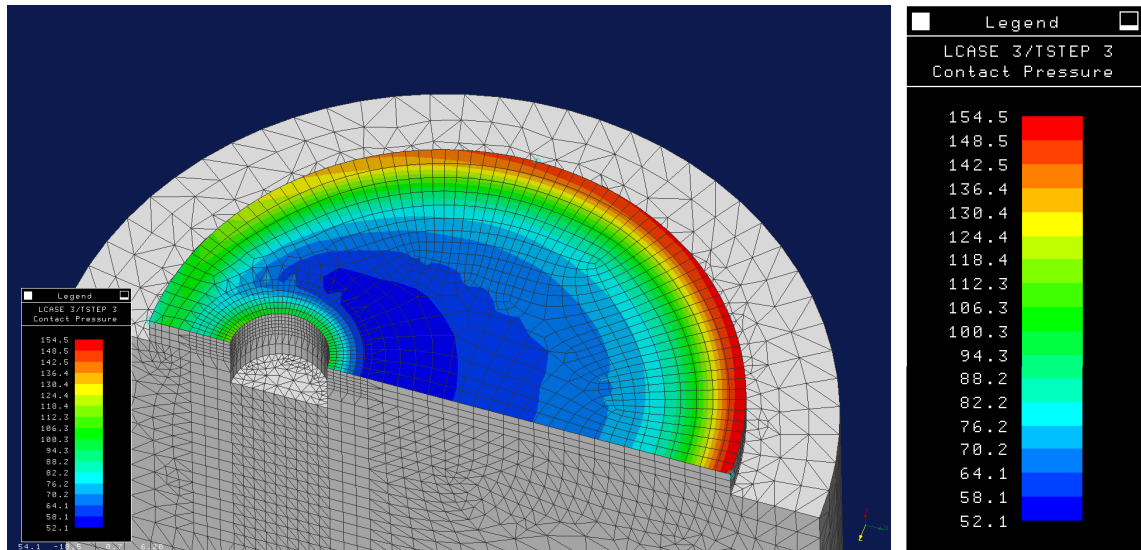


Abbildung 5.30.: Verteilung des Kontaktdrucks um ein Sackloch mit  $D = 6 \text{ mm}$ ,  $L = 4 \text{ mm}$ .

zwischen zwei baugleichen Berechnungsproben ersichtlich. Deutlich ist nicht nur die Erhöhung des Kontaktdrucks um das vereinfachte Sackloch, sondern auch die Übereinstimmung der Kontaktdruckwerte mit dem berechneten Verhalten der freien Oberfläche, das auf der Abbildung 5.26 dargestellt ist. Die Bereiche, in denen auf dem Graphen eine Erhebung der Oberfläche verzeichnet ist, weisen auch in der Berechnung mit aktivem Kontakt zwischen zwei Bauteilen eine höhere Flächenpressung auf. Außer dem Bereich um das Sackloch ist es ebenfalls der rechte Rand des Bauteils, welchem in dem Graphen die Koordinate  $R = 35 \text{ mm}$  entspricht.

### 5.4.3. Messungen an Proben mit Sacklochartiger Geometrie

Zwecks Sammlung konkreter Messdaten wurden Proben mit geometrischen Merkmalen entworfen, die durch Berechnung als aussichtsreich bestimmt worden sind. Untersucht wurden Proben zylindrischer Form, wobei ein Aufbau aus einem Probenpaar mit der Bezeichnung 6A und 6B besteht. An jedem Probenpaar wurden Sacklöcher mit Durchmesser  $D = 3 \text{ mm}$  und Tiefe  $L = 1,3 \text{ mm}$ , sowie  $D = 6 \text{ mm}$  und  $L = 3,5 \text{ mm}$  angebracht mit der Möglichkeit, die Sacklöcher einzeln mit Druck zu beaufschlagen. Alle Bohrungen sind exzentrisch platziert mit einem Abstand von  $10 \text{ mm}$  zur Mittelachse. Die Sacklöcher sind durch dünne Kanäle mit Hochdruck versorgt und es wurde Wert darauf gelegt, dass diese Kanäle das Verhalten der Kontaktfläche nicht beeinträchtigen. Eine der Proben ist auf den Abbildungen 5.31 und 5.32 zu sehen.

Für die Untersuchungen an den Proben der Reihe 6A, 6B wurde derselbe Aufbau genutzt, wie bei den Proben 5A, 5B und 55A, 55B. Besondere Aufmerksamkeit wurde der gleichmäßigen Verteilung der Axialkraft auf die gesamte Kontaktfläche gewidmet. Zwischen den Kontaktflächen wurde bei jedem Versuch die Druckmessfolie Prescale

mit dem Messbereich von 10-50 MPa angebracht. Folglich wurden die Sacklöcher mit Druck beaufschlagt. In einem Messverfahren ähnlich dem im Kapitel 5.3.2 an Dichtrillen wurde für jede axiale Anpresskraft der jeweils höchste mögliche Innendruck bestimmt, der abgedichtet werden kann. Als weiteres Ergebnis der Messung wurde die Verteilung des Kontaktdrucks untersucht. Die Abbildung 5.33a zeigt als Beispiel einen gleichmäßigen Abdruck bei kleiner Anpresskraft aus einem Einbauversuch ohne Innendruck. Durch eine Reihe dieser trockenen Versuche wurde die Einbauprozedur der Proben geprüft hinsichtlich der Zuverlässigkeit, mit der bei wiederholtem Einbau eine gleichmäßige Kontaktdruckverteilung erreicht werden kann. Die Abbildung 5.33b zeigt dagegen die Aufzeichnung eines Versagens der Dichtung bei der das Prüfol aus der rechten unteren Bohrung in Richtung Rand ausgetreten ist. Der Grund für das Versagen war eben eine ungleichmäßige Verteilung der Anpresskraft.

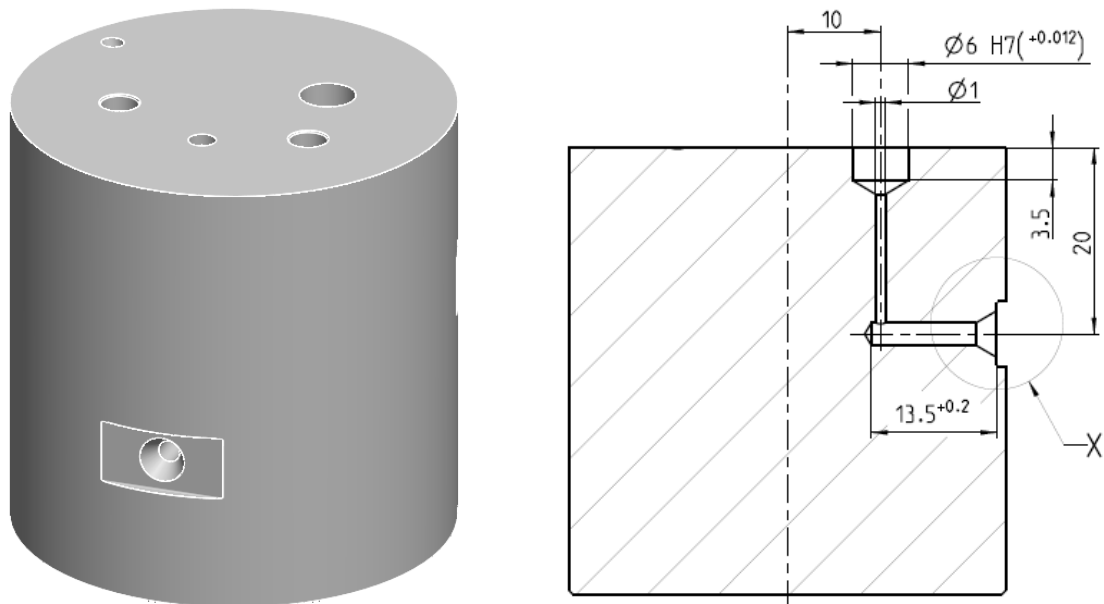


Abbildung 5.31.: Modell und Abmessungen der Probe 6A für Untersuchungen sacklochartiger Geometrien.

Die Abbildung 5.34 zeigt Abdrücke aus Dichtheitsversuchen mit Druckbeaufschlagung beider Bohrungen. Unter 5.34a eine Untersuchung mit Innendruck 450 bar und Anpresskraft 18 kN, unter 5.34b mit Innendruck 500 bar und Anpresskraft 15 kN. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass es auf diesem Druckniveau auf dem Rand des Sackloches zu keiner Erhöhung des Kontaktdrucks kommt. Der Innendruck reicht noch nicht aus, um eine ausreichende Ausweitung der Bohrung und das dadurch hervorgerufene Anheben der Bohrungskante zu bewirken. Ein weiteres Erhöhen des Innendrucks führte bei den durchgeführten Versuchen in der Regel zu einer starken Leckage und war nur in Verbindung mit einem wesentlichen Anstieg der axialen Anpresskraft möglich. Das ist allerdings im Widerspruch zu dem Vorsatz dieser Arbeit, eine ausreichende Dichtwirkung bei möglichst kleiner Anpresskraft zu erreichen. Eine Möglichkeit, dem

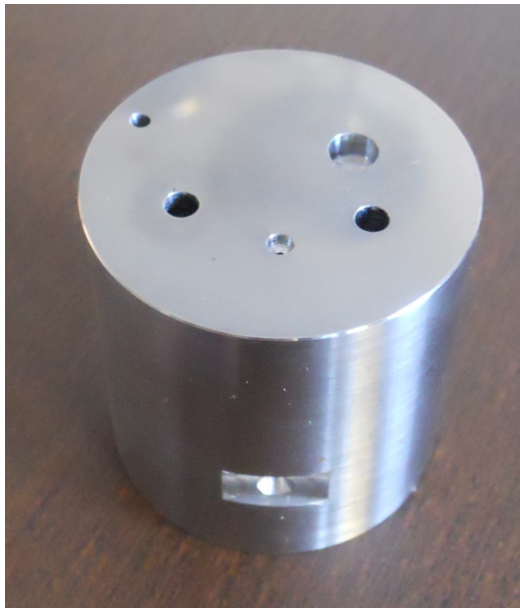


Abbildung 5.32.: Probe 6A.

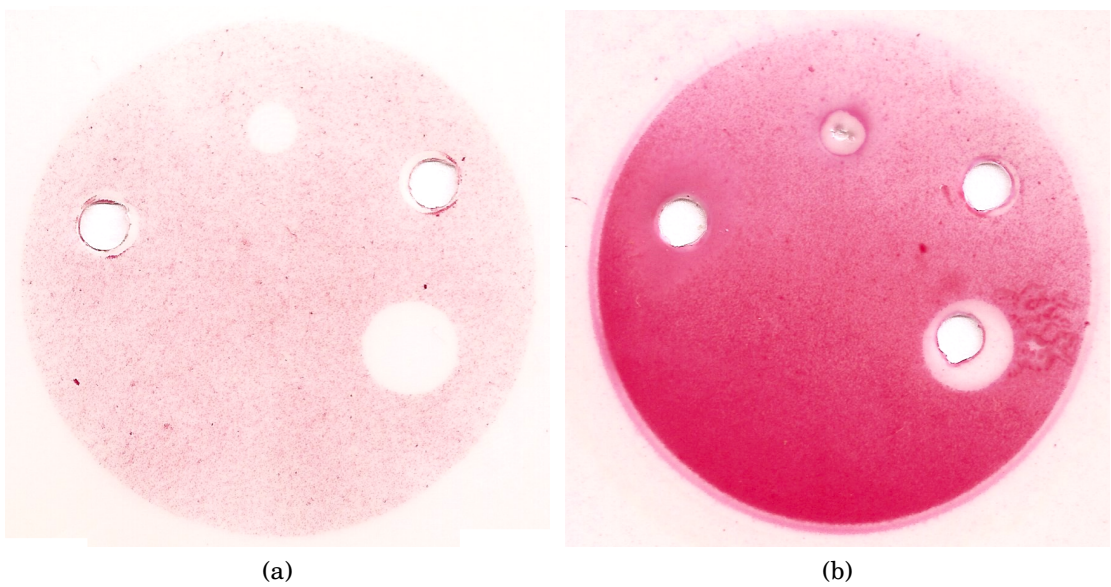


Abbildung 5.33.: Verteilung des Kontaktdrucks ermittelt an Proben 6. (a) Bei kleiner Anpresskraft als Teil eines trockenen Einbauversuchs. (b) Nach Dichtungsversagen während Versuchs mit unebenem Aufbau und starker Leckage.

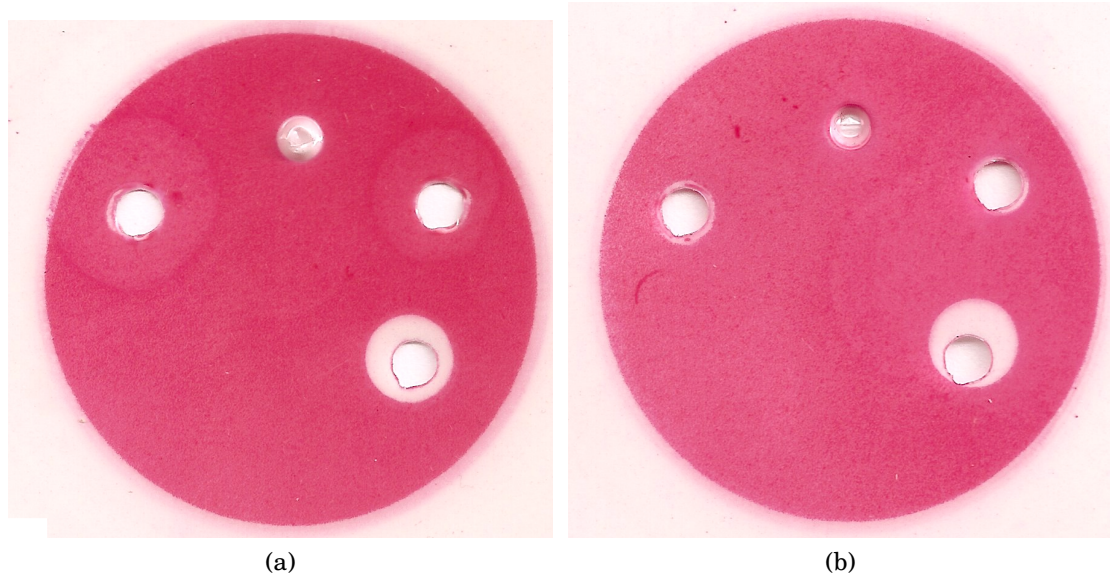


Abbildung 5.34.: Verteilung des Kontaktdrucks ermittelt an Proben 6 beim Versuch.

gewünschten Effekt näher zu kommen könnte im Variieren des Werkstoffs liegen. Mit einem ausreichend weichen Werkstoff würde die gewünschte Deformation schon bei niedrigerem Druck erreicht werden. Eine solche Wahl hätte allerdings Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit der Bauteile im realen Einsatz. Weitere Untersuchungen dieses Dichtkonzepts wurden daher nicht unternommen.

#### 5.4.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Dichtkonzept eines Sacklochs bietet bessere Möglichkeiten für die Berechnung, als das Rillendichtkonzept. Dies wurde auch genutzt, sodass dank der detaillierten FEM-Untersuchung (s. Abschnitt 5.4.2) eine klare Vorstellung über die erwartete Funktionsweise vor dem Experiment aufgestellt werden konnte. Das Konzept versucht, der nachteiligen globalen Wirkung des Sacklochs (d.h. dem "Kippen" der Kontaktfläche, s. Abbildung 5.26) durch das Verstärken des positiven lokalen Einflusses des Sacklochs (des Aufweitens" des Lochs, s. Abbildung 5.25) entgegen zu wirken. Um das Phänomen des Aufweitens zu unterstützen, wurde mittels einer FEM-Berechnung ein optimales Verhältnis der Tiefe des Sacklochs  $L$  zum seinem Durchmesser  $D$  gefunden (s. Abschnitt 5.4.2). Für den Durchmesser  $D = 3\text{mm}$  erwies sich die Tiefe  $L = 1,3\text{mm}$  als optimal, für  $D = 6\text{mm}$  wurde dann ein Bestwert von  $L = 3,5\text{mm}$  ermittelt. Aufgrund der Berechnungsergebnisse wurde ein Probenpaar entworfen und einer Reihe von Dichtheitsmessungen unterzogen. Der Kontaktdruck zwischen den Proben wurde mittels einer Druckmessfolie beobachtet (s. Abbildung 5.34). Die Messergebnisse blieben hinter den Erwartungen vor allem aufgrund der Tatsache, dass es nicht möglich war, mit der durch die Aufgabenstellung begrenzten Anpresskraft und der einfachen Ausführung der Proben ein ausreichend hohes Druckniveau zu erreichen. Die erreichten Drücke von ca.



500 MPa konnten keine ausreichend große Ausweitung der Sacklöcher bewirken, damit das Dichtkonzept zur Geltung kommt. Eine weitere Verbesserung der Funktion dieses Dichtkonzepts wäre beispielsweise durch eine Optimierung der Steifigkeit des Werkstoffs möglich. Dennoch wäre dieses Konzept für die Rolle einer sekundären Dichtung geeignet, die unterstützend zu einer primären Dichtung wirkt.

## 5.5. Dichtung durch eingelegte Dichtelemente

Das hier untersuchte Dichtkonzept besteht aus besonders entworfenen Dichthülsen, die in die Hochdruckkanäle eingefügt werden. Durch die Wirkung des Druckes kommt es zum Anpressen der Hülse an die Wand des Kanals, sodass die Dichtwirkung bei steigendem Druck verbessert wird.

### 5.5.1. Verlauf des Kontaktdrucks bei unterschiedlichen Varianten

Um Dichtheit zu gewährleisten, ist eine ausreichende Kontaktpressung zwischen der Hülse und Kanalwand in der gesamten Länge der Hülse notwendig. Hinweise auf geeignete Geometrie der Hülse wurden aus FEM Berechnungen gewonnen, indem mehrere Varianten untersucht worden sind. Bei dem geometrisch einfachsten Einsatz, bezeichnet als Variante 0, beobachtet man deutliche Spannungsspitzen, die sich ungünstig auf die Lebensdauer des Bauteils auswirken würden (s. Abbildung 5.35). Obwohl man gerade ausgeprägte Spannungsspitzen auf Bauteilkanten, die als ein Berechnungsergebnis erhalten wurden, nicht als Richtwert empfinden kann, muss trotzdem Aufwand betrieben werden, um ihre Entstehung auf tatsächlichem Bauteil zu verhindern. Die Spannungsspitzen ergeben sich auf den Kanten der beiden Injektorsegmente, wo wegen der gebrochenen Bohrungskanten die Hülse von der Bohrungswand nicht unterstützt werden kann. Die Kanten der Bohrungen wurden bei allen Varianten mit  $0,2 \times 45^\circ$  gebrochen.

Die Abbildung 5.35 weist zusätzlich auf ein weiteres Problem dieses Entwurfs hin, nämlich auf die nicht vorhandene Kontaktpressung an der oberen und unteren Kante des Einsatzes. Dies würde auf eine Undichtigkeit hindeuten, weil Flüssigkeit auf dieser Stelle zwischen die Hülse und Wand eindringen kann. Die Abbildung 5.36 zeigt den ersten Versuch, den Kontaktdruckverlauf an den Enden der Hülse zu verbessern, wozu die Rundung der äußeren und der Bruch der inneren Kante führen sollen. Die Auswirkung dieser Veränderungen ist minimal. Die weitere Vergrößerung des Kantenbruches auf  $0,35 \times 45^\circ$  bringt zwar eine Erhöhung des Kontaktdrucks an den Enden der Hülse, ist aber nach wie vor nicht ausreichend um Dichtheit zu erreichen (Abbildung 5.37).

Die weitere Variante, bezeichnet R01-B035-M015, bemüht sich um eine Reduzierung der Spannungsspitze in der Mitte des Aufbaus, die als Resultat der gebrochenen Kanten entstanden ist. Zu diesem Zweck wurde die eingefügte Hülse mit einer Nase

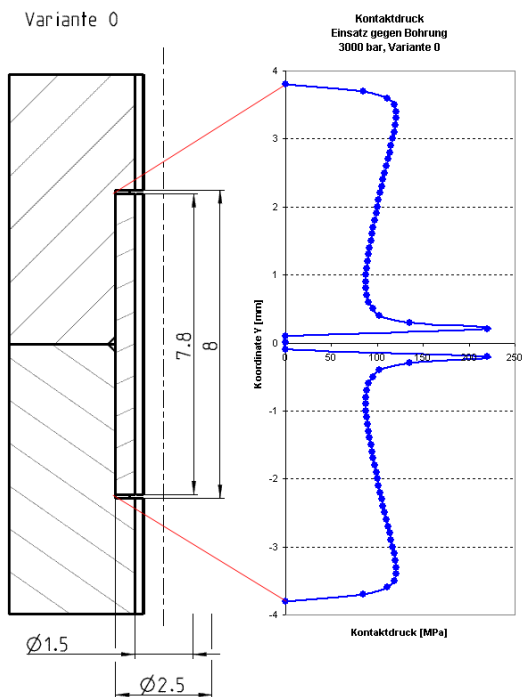


Abbildung 5.35.: Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante 0.

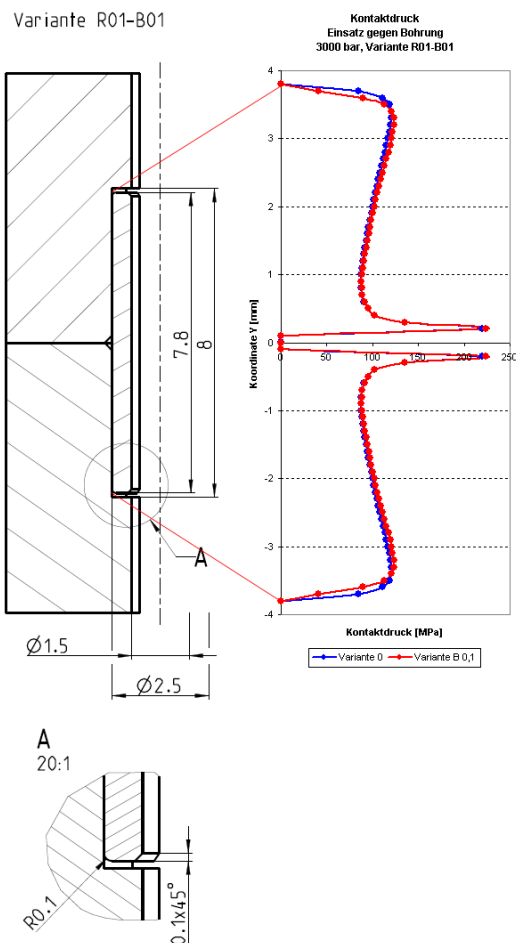


Abbildung 5.36.: Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante R01-B01.

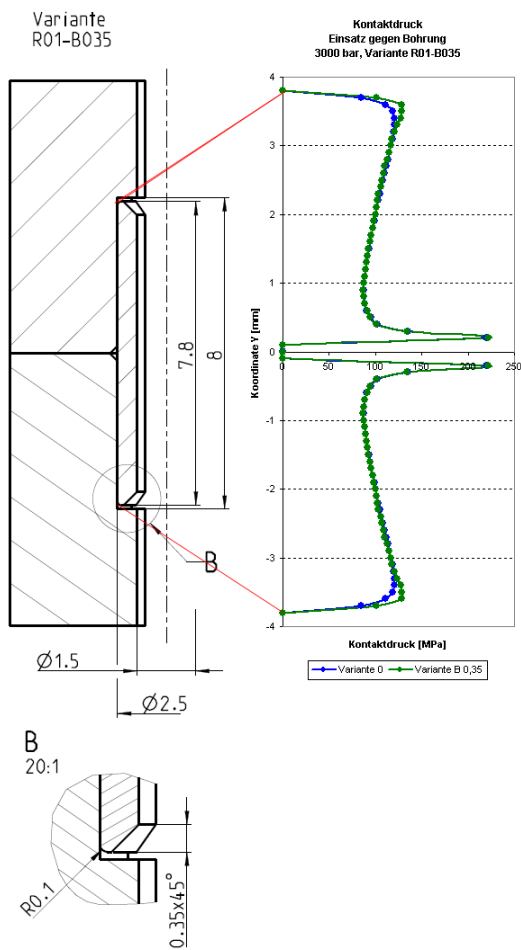


Abbildung 5.37.: Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante R01-B035.

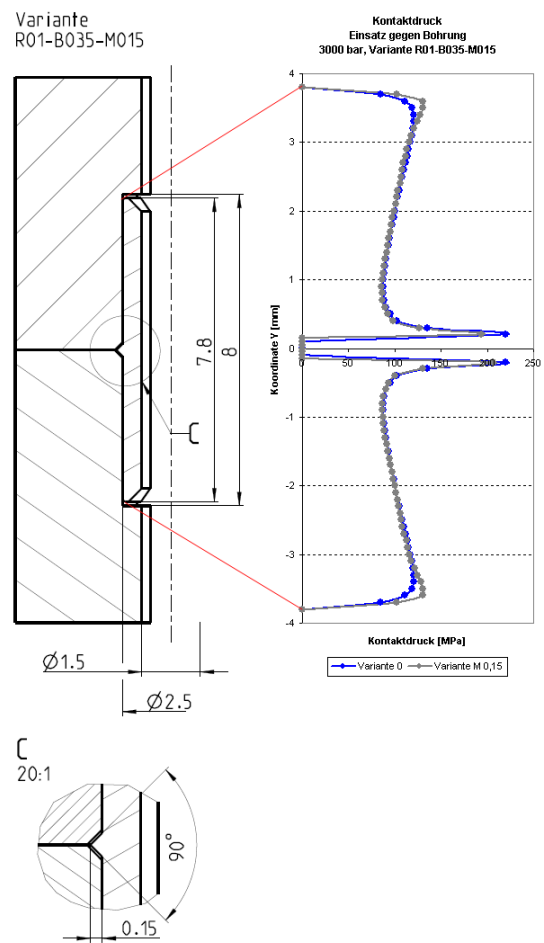


Abbildung 5.38.: Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Var. R01-B035-M015.



versehen, um den entsprechenden Bereich zu versteifen. Auf der Abbildung 5.38 sieht man die Wirkung an den letzten 2 Knoten vor der Bauteilkante, wo es zu einer leichten Reduzierung der Spannung gekommen ist. Bei einer etwaigen Umsetzung dieses Entwurfs ist wichtig zu berücksichtigen, dass es zu keiner so starken Deformation des Einsatzes kommen sollte, dass die versteifende Nase an den Fasen der gebrochenen Kanten ansetzen würde. Dies würde zu einer keilähnlichen Wirkung der Nase und zum Aufspreizen der Kontaktfläche zwischen den zwei Injektorsegmenten führen.

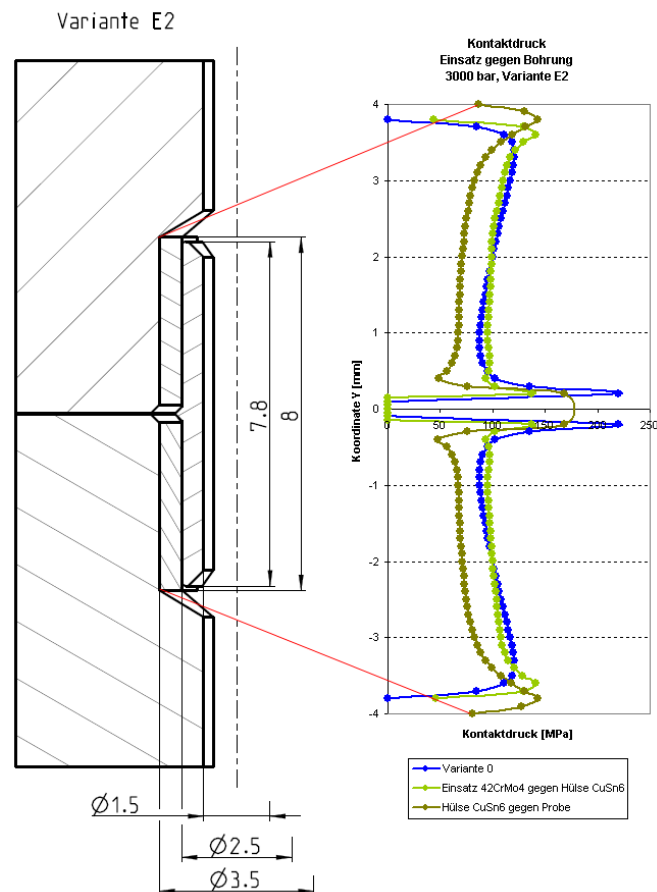
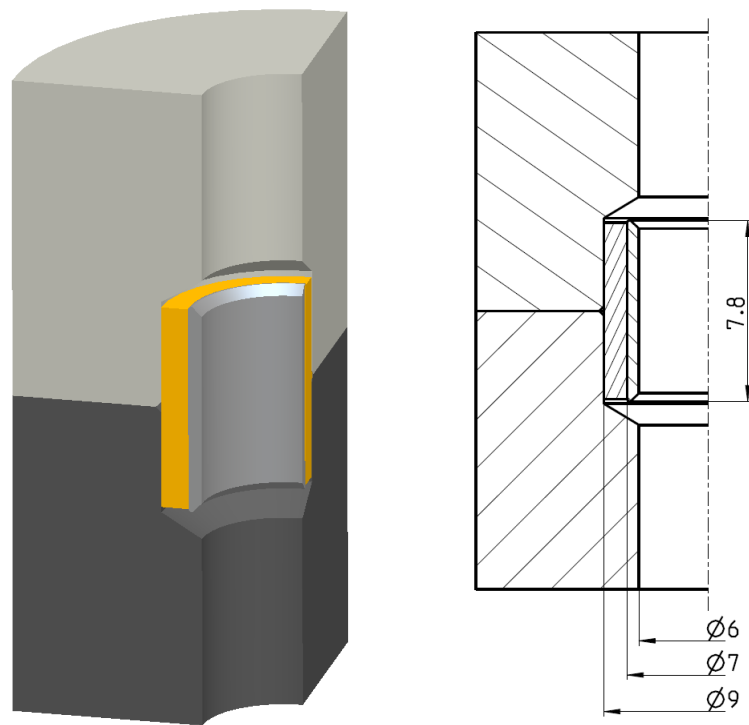


Abbildung 5.39.: Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante E2.

Eine Weiterentwicklung des Konzepts stellt die Variante E2 dar, die den beschriebenen Einsatz übernimmt und durch weitere Einsätze aus Bronze ergänzt. Die Funktion der Bronzehülsen besteht in dem Auffangen und der Verteilung der Kontaktkraft, sodass es zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Kontaktdrucks kommt. Wie aus der Abbildung 5.39 ersichtlich ist, ergibt sich bei dieser Variante im Gegensatz zu den früheren auch an den Kanten der Einsätze eine Flächenpressung größer als Null, was ein Hinweis auf Dichtigkeit des Konzepts wäre.

## 5.5.2. Detaillierte Berechnungen der Variante E2

Des Weiteren wurde das Verhalten der Variante E2 näher berechnet. Für den Kanaldurchmesser  $D = 6 \text{ mm}$  wurden Einsätze mit unterschiedlichen Dicken analysiert, die Ausführungen sind in der Abbildung 5.40 zusammengefasst. Für diese Berechnungen wurde die Bronzehülse als ein Teil modelliert, im Gegensatz zur Abbildung 5.39, wo es sich um zwei Teile handelt. Kontakte zwischen dem Dichteinsatz und der Bronzehülse, sowie zwischen der Hülse und Kanalwand wurden jeweils ohne Spiel oder Pressung ausgeführt.



Variantenbezeichnungen	Dicke der Bronzehülse			
	0,6 mm	0,8 mm	1,0 mm	
Dicke des Dichteinsatzes	0,5 mm	$D6 \times T05 \times T06$	$D6 \times T05 \times T08$	$D6 \times T05 \times T1$
	0,7 mm	$D6 \times T07 \times T06$	$D6 \times T07 \times T08$	$D6 \times T07 \times T1$
	0,9 mm	$D6 \times T09 \times T06$	$D6 \times T09 \times T08$	$D6 \times T09 \times T1$

Abbildung 5.40.: Untersuchte Ausführungen der Variante E2.

Die Ergebnisse der Berechnung können den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden. Die Dicke der Bronzehülse beeinflusst zum Einen den Verlauf des Kontaktdrucks zwischen dem Dichteinsatz und der Bronzehülse an den Kanten und in der Mitte des Aufbaus. Wie die Abbildung 5.41 zeigt, resultiert die steigende Dicke der Bronzehülse in einen Anstieg des Kontaktdruckes zum Dichteinsatz sowohl an seinen Enden, als auch über der Fase bei  $y = 0$ . Beides kann mit der größeren Steifigkeit der Hülse bei ihrer

größeren Dicke begründet werden, da eine steifere Hülse größeren Widerstand dem sich ausdehnenden Dichteinsatz leistet. Der Verlauf des Kontaktdrucks ist im Detail auf den Abbildungen 5.42 und 5.43 dargestellt.

Die Dicke des inneren Dichteinsatzes aus Stahl beeinflusst dagegen die Höhe des Kontaktdrucks zwischen Einsatz und Hülse auf der gesamten Länge der Kontaktfläche. Dichteinsätze mit größerer Dicke geben generell weniger Kontaktdruck auf die äußere Bronzehülse weiter. Aufgrund ihrer kleineren Flexibilität ist bei den dickeren Einsätzen auch die Spannungsspitze im Bereich der Kanten weniger ausgeprägt.

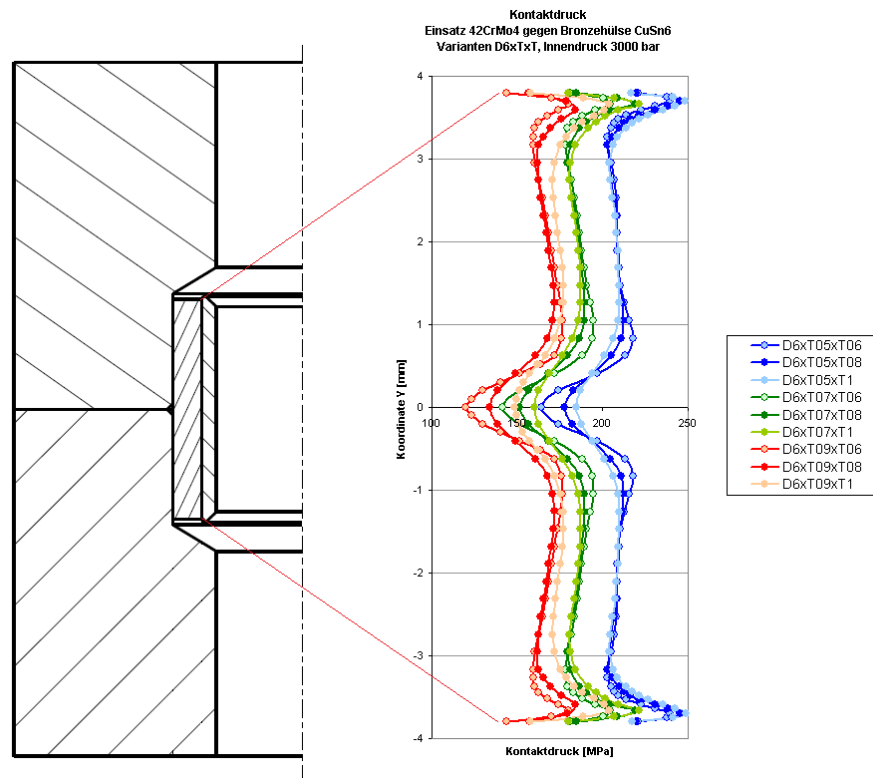


Abbildung 5.41.: Kontaktstress zwischen Dichteinsatz und Bronzehülse, Ausführungen der Variante E2, Innendruck 3000 bar.

Ein unterschiedlicher Verlauf des Kontaktstresses ergibt sich für die Kontaktfläche zwischen der Bronzehülse und der Kanalwand. Aus der Abbildung 5.44 ist ersichtlich, dass der an den Kanten der Hülse bei allen untersuchten Ausführungen kein Kontaktstress vorhanden ist. Je nach Ausführung handelt es sich um den ersten oder die ersten zwei Knoten. Dieses Ergebnis würde auf eine Undichtigkeit des Zusammenbaus deuten, bei der die Flüssigkeit zwischen der Bronzehülse und der Kanalwand bis zur Kontaktfläche der beiden Proben gelangen würde.

### Dichteinsätze mit geminderter Steifigkeit

Um die Undichtigkeit an der Einsatzkante zu beseitigen, wurden weitere Bemühungen unternommen, um den Kontaktstress zwischen Bronzehülse und Kanalwand an der

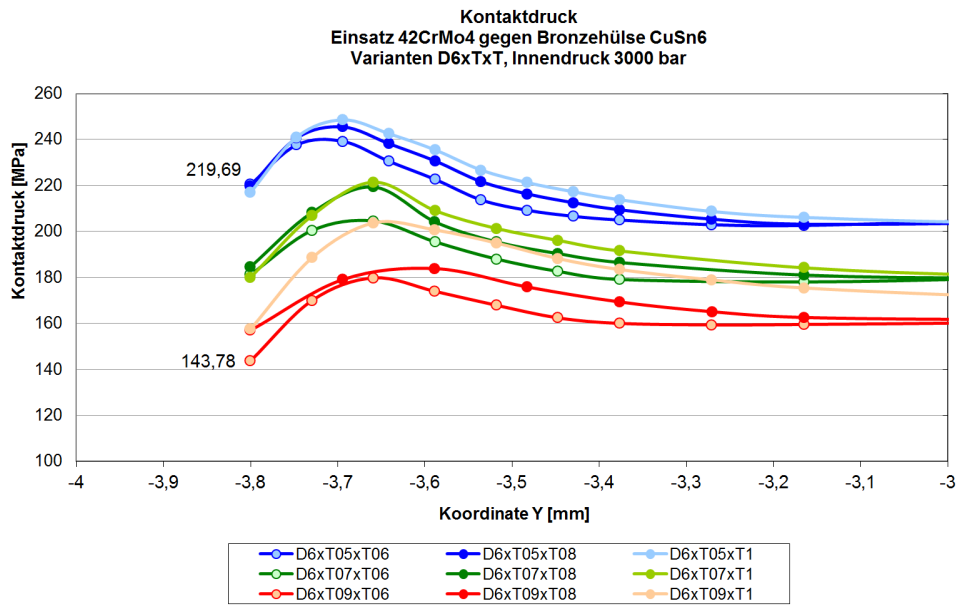


Abbildung 5.42.: Kontaktdruck zwischen Dichteinsatz und Bronzehülse, Detail des Bereichs der Einsatzkante.

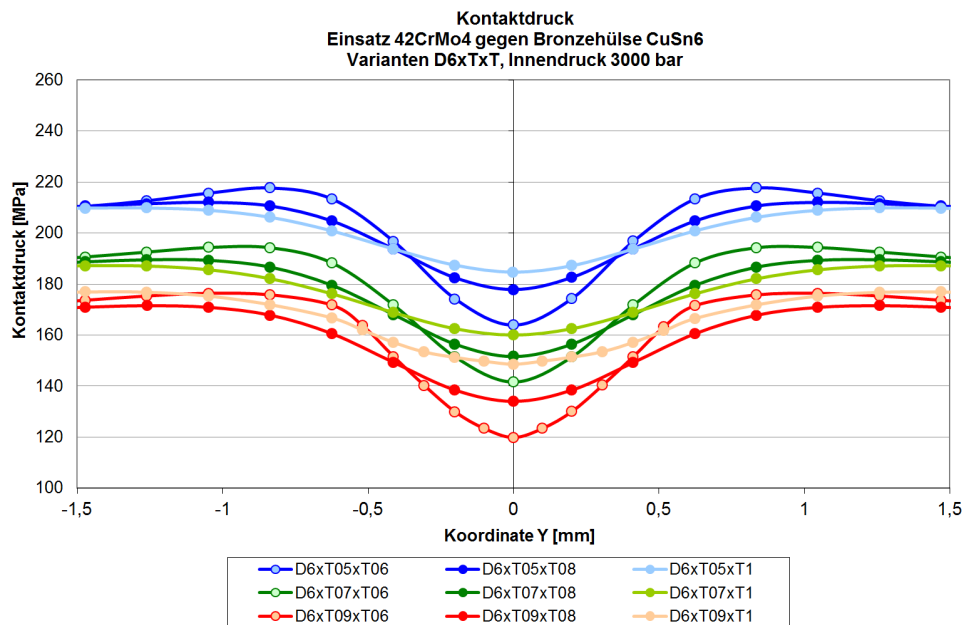


Abbildung 5.43.: Kontaktdruck zwischen Dichteinsatz und Bronzehülse, Detail des Bereichs der mittigen Fase.

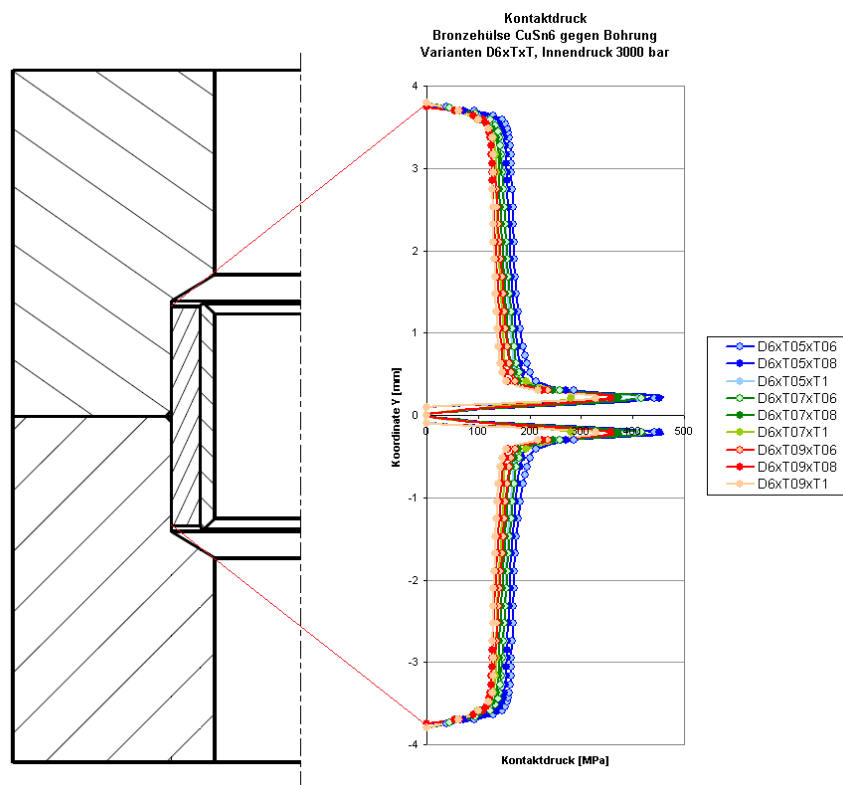


Abbildung 5.44.: Kontaktdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand, Ausführungen der Variante E2, Innendruck 3000 *bar*.

Kante zu erhöhen. Dies sollte durch eine bessere Kraftübertragung der durch den Innendruck generierten Anpresskraft in Richtung Kanalwand umgesetzt werden. Um die Kraftübertragung zu verbessern wurde der Versuch unternommen, die Steifigkeit des Dichteinsatzes an seinen Enden zu verkleinern. In der mittleren Sektion sollte die Steifigkeit erhalten bleiben, damit es möglichst zu keinem Anstieg der Spannungsspitze um die Koordinate  $y = 0$  kommt. Hierfür wurden zwei Ausführungen des Dichteinsatzes entworfen, die auf der Abbildung 5.45 zu sehen sind. Zum Einen war das ein Einsatz mit konischer Innenbohrung, bei dem die Wanddicke der mittleren Sektion  $0,9 \text{ mm}$  beträgt, zu den Enden hin jedoch auf  $0,5 \text{ mm}$  abfällt. Die Verbesserung der Kraftübertragung in radialer Richtung ergibt sich aus der Minderung der Fähigkeit, der Tangentialspannung standzuhalten. Die andere Ausführung rechnete mit einer konstanten Wanddicke von  $0,5 \text{ mm}$  in der gesamten Länge, der Einsatz wurde allerdings mit Einschnitten versehen, sodass biegsame Laschen entstehen. Zusätzlich wirkt der Innendruck im Bereich der Einschnitte direkt auf die Innenfläche der darunter liegenden Bronzehülse, was ihr Verhalten im Vergleich zu Ausführungen ohne Einschnitte ebenfalls verändern würde.

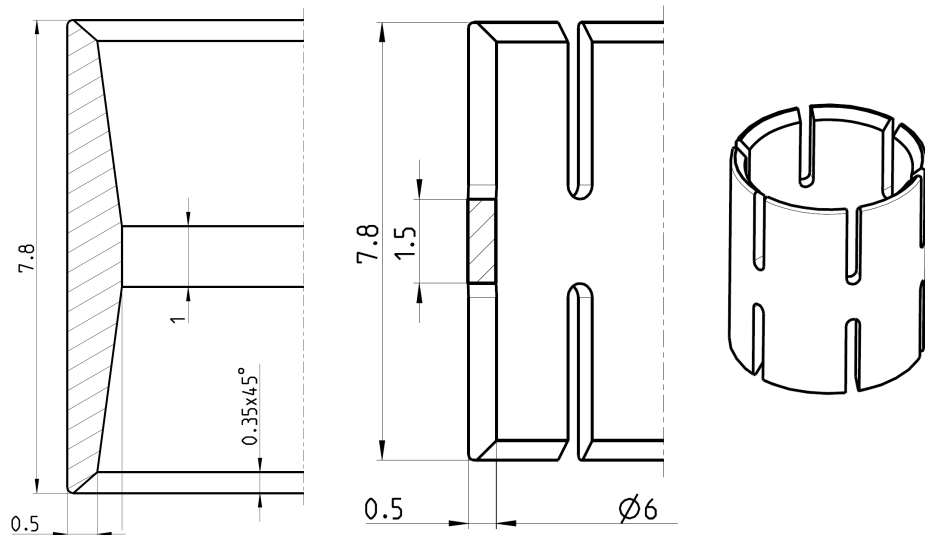


Abbildung 5.45.: Ausführungen des Dichteinsatzes mit verkleinerter Steifigkeit.

Das Ergebnis der Berechnung (Abbildung 5.46) zeigt, dass sich der konische Einsatz ähnlich verhält, wie gerade Einsätze mit entsprechenden Wanddicken. Der Kontaktdruck im Bereich der Koordinate  $y = 0$  entspricht der Ausführung  $D6 \times T09 \times T1$  mit der Wanddicke von  $0,9 \text{ mm}$ , der Kontaktdruck in der Nähe der Kanten dagegen der Ausführung  $D6 \times T05 \times T1$  mit der Wanddicke von  $0,5 \text{ mm}$ . Durch eine Variation der Wanddicke bei einem Einsatz kann also der Verlauf des Kontaktdrucks auf eine vorhersehbare Weise beeinflusst werden, sollte man beispielsweise einen konstanten Kontaktdruck der Länge des Einsatzes nach anstreben. Allerdings werden dieser Beeinflussung Grenzen gesetzt, die dem Verhalten der einfach ausgeführten Einsätze entsprechen. Aus der Sicht dieser Berechnungsergebnisse kann mit der konischen Ausführung der Innenbohrung keine Lösung des Dichtigkeitsproblems erzielt werden.

Die nächste Berechnung analysierte das Verhalten des mit 6 Einschnitten versehenen

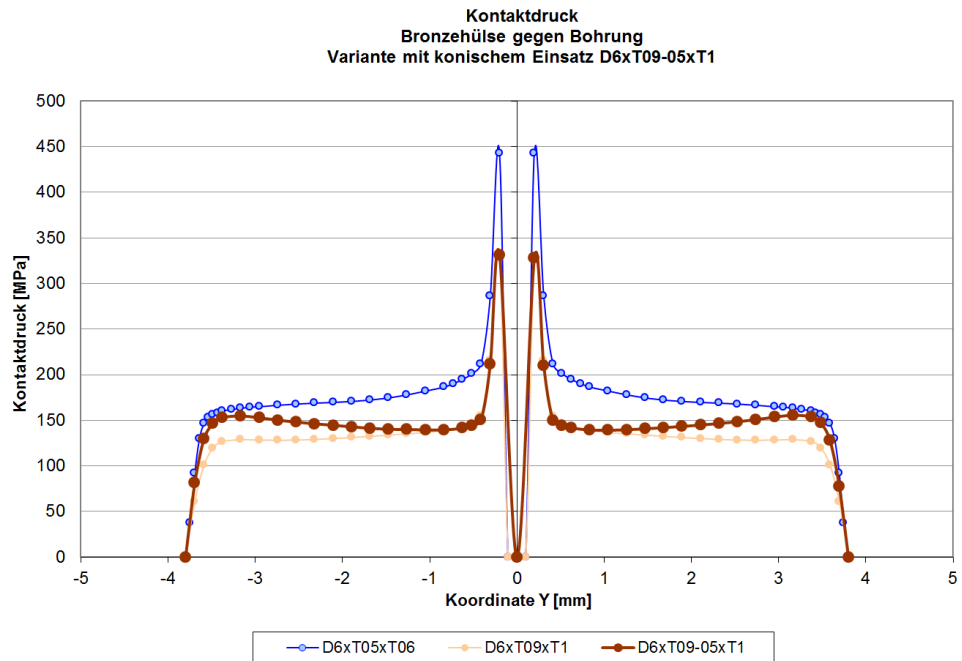


Abbildung 5.46.: Kontakttdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand, Einsatz mit konischer Bohrung.

Dichteinsatzes, der auf der Abbildung 5.45 zu sehen ist. Die Abbildung 5.47 zeigt den Verlauf des Kontakttdruckes zwischen dem Dichteinsatz und der Bronzehülse in der Mitte einer Lasche und zwischen der Bronzehülse und Kanalwand sowohl in der Mitte einer Lasche, als auch in der Mitte eines Einschnittes. Im Vergleich zu einfachen Einsätzen, deren Verhalten auf den Abbildungen 5.41 und 5.44 beschrieben sind, ergeben sich Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede. Der Verlauf des Kontakttdruckes zwischen Bronzehülse und Kanalwand im Bereich des Einschnittes entspricht tendenziell dem Verlauf auf der Abbildung 5.44. Vergleichbar ist der Wert zwischen den Y-Koordinaten -3 und -1, bzw. 1 und 3, der bei dem einfachen Einsatz leicht ansteigt, bzw. abfällt, bei dem mit Einschnitten versehenen Einsatz konstanter ist. Die kleinere Steifigkeit des Dichteinsatzes, verursacht durch die Teilung in 6 Laschen, zeigt sich an seinen Enden durch den schnelleren Anstieg des Kontakttdruckes. Im Bereich vom  $y = 0$  ist in der Mitte des Einschnittes die Spitze des Kontakttdruckes deutlich niedriger. Der Verlauf zwischen Hülse und Kanalwand im Bereich der Lasche kopiert viel enger den Druckverlauf zwischen Dichteinsatz und Bronzehülse. Vergleicht man die Abbildung 5.47 mit Der Verlust an Kontakttdruck zwischen den Kontaktpaaren Einsatz-Hülse und Hülse-Wand ist minimal, es wird nur sehr wenig Energie an die Deformation des Dichteinsatzes verbraucht und die radiale Anpresskraft wird gut weitergeleitet in Richtung Kanalwand, wo sie zur Generierung der Dichtwirkung verwendet werden kann. Der Unterschied ist gut sichtbar im Vergleich zur Abbildung 5.48, auf der die Druckverläufe der Kontaktpaare Dichteinsatz – Hülse und Hülse – Kanalwand für drei Varianten der einfach ausgeführten Einsätze dargestellt sind. Man sieht einen deutlichen Verlust an Kontakttdruck zwischen den zugehörigen Kontaktpaaren, was auf eine

merkliche Minderung der radial wirkenden Anpresskraft deutet. In diesen Fällen wurde ein größerer Teil die Druckenergie des flüssigen Mediums auf die elastische Deformation des steiferen, ohne Einschnitte ausgeführten inneren Dichteinsatzes verbraucht, was zum Verlust der radialen Anpresskraft führt. Man sieht auch, dass der Kontaktdruck zwischen der Bronzehülse und Kanalwand im Bereich der Lasche deutlich höher ausfällt, als bei der einfachen Ausführung. Im Bereich des Einschnittes ist der Kontaktdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand mit der einfachen Ausführung vergleichbar.

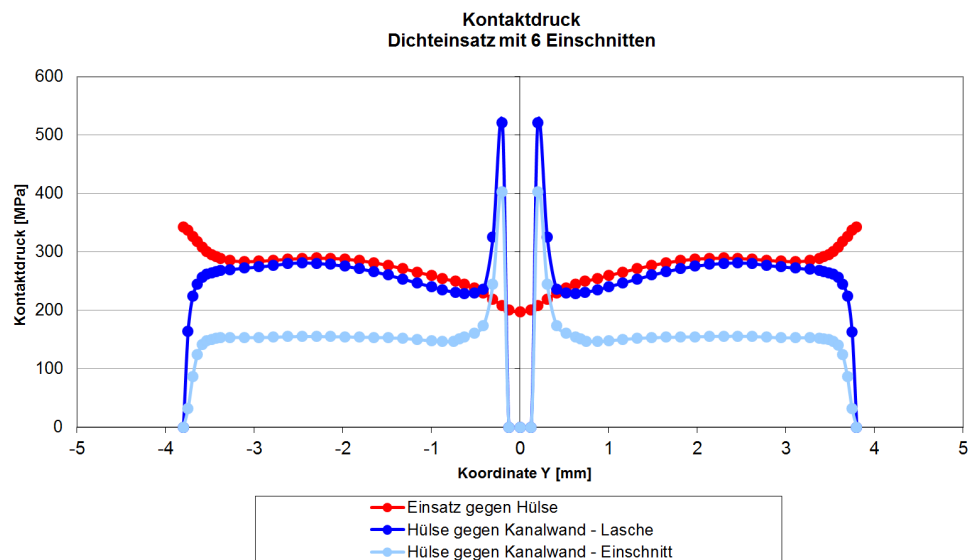


Abbildung 5.47.: Kontaktdruck beim Dichteinsatz mit 6 Einschnitten.

Auf der Abbildung 5.47 ist deutlich sichtbar, dass der Kontaktdruck zwischen der der Bronzehülse und Kanalwand bei dem Dichteinsatz mit Einschnitten variiert je nach dem, ob sich die Messstelle unter einer Lasche oder unter einem Einschnitt befindet. Der Verlauf des Kontaktdrucks in umlaufender Richtung kann für drei verschiedene Y-Koordinaten auf der Abbildung 5.49 abgelesen werden. In der Abhängigkeit vom Winkel schwankt der Kontaktdruck mit dem Minimum bei  $\phi = 30^\circ$ , d.h. im Bereich des Einschnittes und einem Maximum bei  $\phi = 60^\circ$ , also in der Mitte der Lasche. Bei den Werten auf der Fase der Bohrungskante handelt es sich um die bereits mehrmals angesprochene Spannungsspitze, wo die Angaben stets mit Vorsicht zu genießen sind. Den Verlauf an der Wandmitte, in der Grafik mit roter Linie dargestellt, kann man allerdings bereits als aussagekräftig ansehen. Die Kontaktdruckwerte an der Oberkante überzeugen erneut nicht.

Trotz der angeführten Verbesserungen, die mithilfe von dem Dichteinsatz mit Einschnitten erreicht worden sind, gelingt es nicht, an den Kanten der Bronzehülse Kontaktdruck größer Null herbei zu führen. Nichts desto trotz kann die Schlussfolgerung gemacht werden, dass mit Hilfe von Dichteinsätzen mit kleinerer Steifigkeit ein günstigeres Niveau des Kontaktdrucks erreicht werden kann. Dabei muss stets das Problem der auftretenden Spannungsspitzen im Auge behalten werden, wie bereits beschrieben.



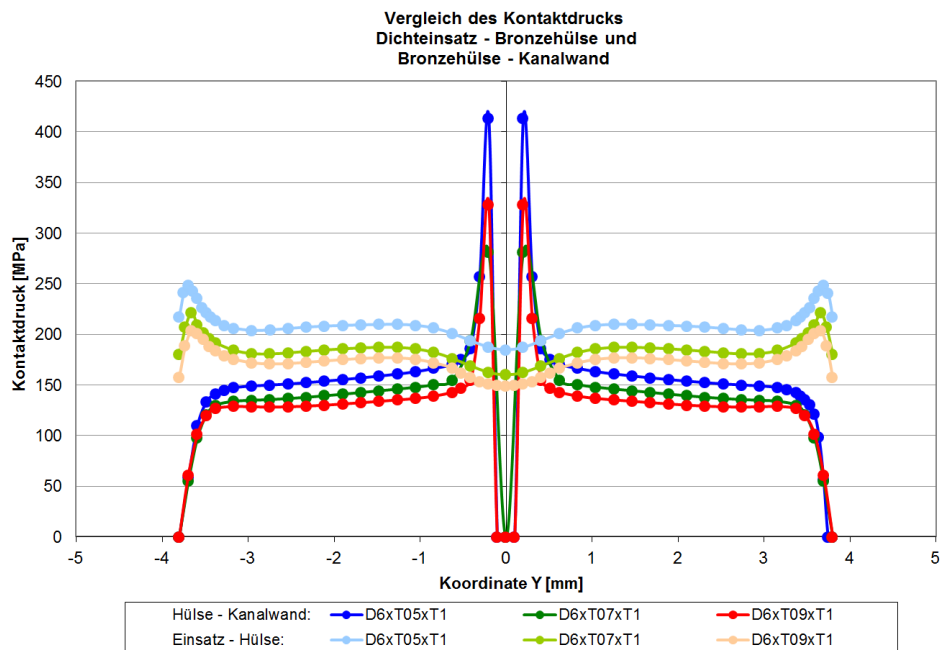


Abbildung 5.48.: Vergleich des Kontaktdrucks bei einfachen Dichteinsätzen.

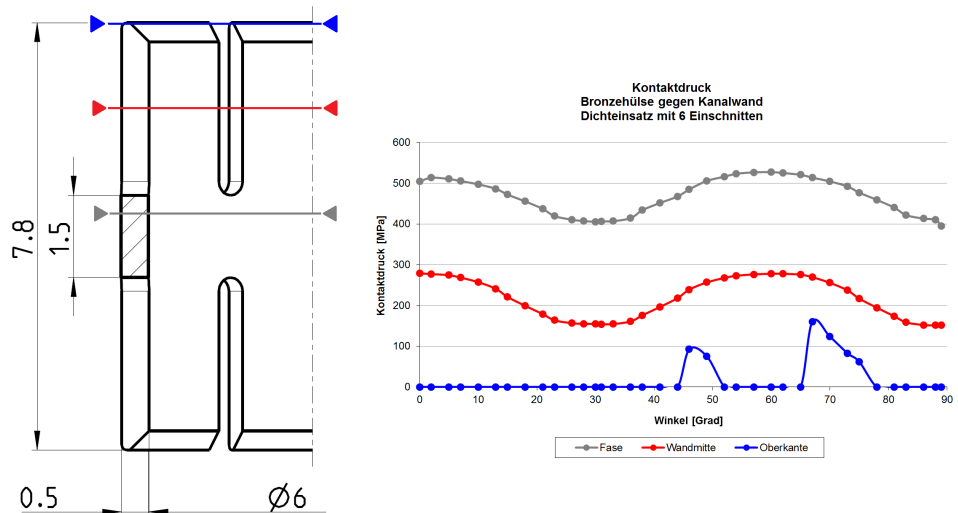


Abbildung 5.49.: Kontaktdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand, umlaufend.

## Bronzehülse mit Rillen auf der Stirnseite

Der Unterschied zwischen gutem Kontaktdruckverlauf unter dem Dichteinsatz und unbefriedigendem an der Kante der Bronzehülse führte zu der Entwicklung einer Geometrie der Hülse, die im Bereich der Kante abgeändert ist. Als Inspiration diente die  $0,35 \times 45^\circ$  Schräge des inneren Dichteinsatzes, die sich positiv auf die radiale Anpresskraft auswirkte. Es wurden zwei Ausführungen entworfen, bei denen die Stirnseite der Hülse jeweils mit einer Rille versehen war. Der Druck des flüssigen Mediums würde diese Rille ausweiten und so zu der Erhöhung der radialen Anpresskraft beitragen. Beide Ausführungen können auf der Abbildung 5.50 betrachtet werden. Bei ihrer Vernetzung wurde verstärkt Wert auf den Bereich der Rille und die Kontaktflächen der Bronzehülse mit der Kanalwand und dem Dichteinsatz gelegt. Die links abgebildete Geometrie, als Rille 1 bezeichnet, dient als Basis für die Untersuchung der Wirksamkeit des Konzeptes. Die Rille 2, abgebildet rechts, soll zeigen, ob durch Veränderungen der Rillengeometrie unterschiedliche Wirkung erzielt werden kann.

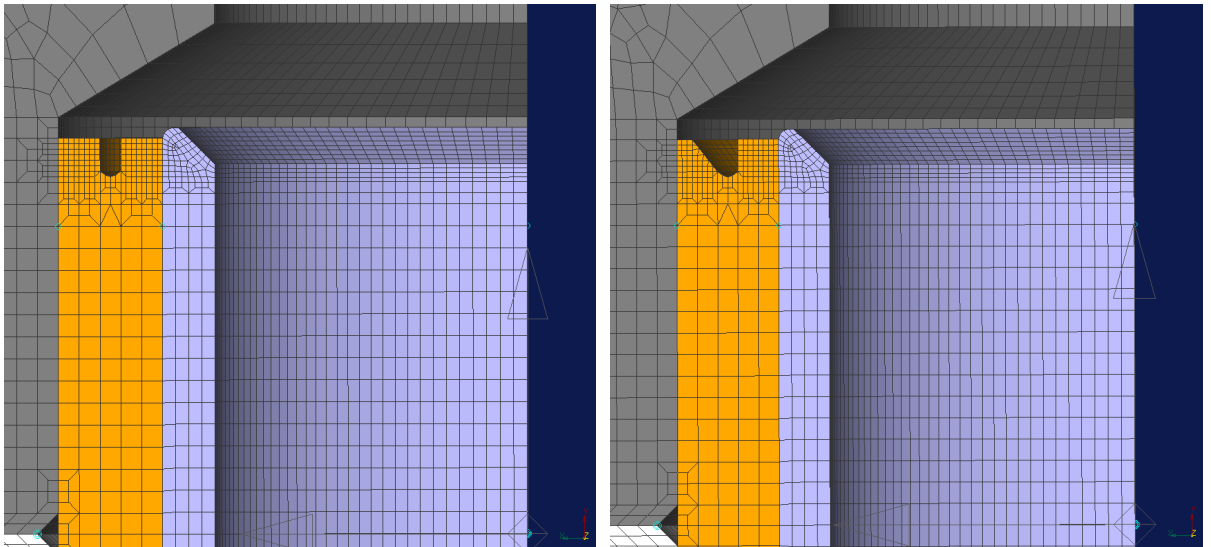


Abbildung 5.50.: Ausführungen der Bronzehülse mit Rillen auf der Stirnseite.

Einen Vergleich des Verhaltens der Hülsen mit und ohne Rillen zeigt die Abbildung 5.51. In roter Farbe ist die einfache Ausführung des Dichteinsatzes und Hülse ohne Rillen eingetragen. Die Wirkung der Rille macht sich bemerkbar im Bereich der Kante, also um die Koordinate  $y = 3,8$  und  $y = -3,8$ . Die Rille führt zum Anstieg des Kontaktdrucks in diesem Bereich, aber auch zu einem Abfall kurz vor der Kante. Es kommt also zu einer Öffnung der Rille, die Kanten stützen sich an den Gegenstücken und die Seitenwände der Hülse haben die Tendenz, in die Rille hinein zu knicken. Im Allgemeinen führt diese Ausführung zu einer deutlicher ausgeprägten Spannungsspitze, ohne dass der Kontaktdruck an der Kante den gewünschten Wert größer Null erreicht. Darüber hinaus kann kein wesentlicher Unterschied zwischen dem Verhalten der zwei Rillenausführungen festgestellt werden.

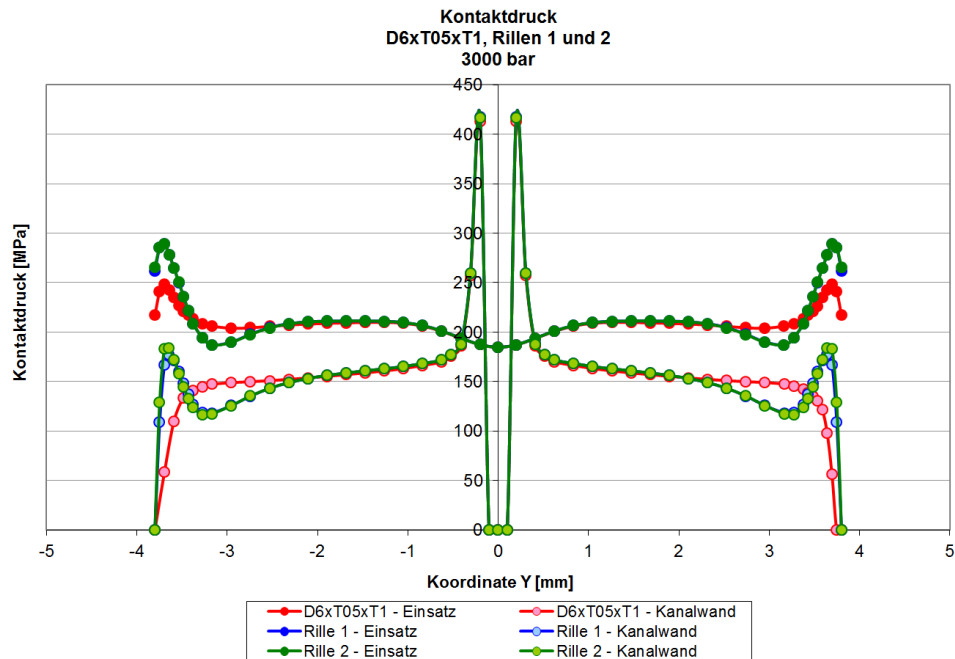


Abbildung 5.51.: Druckverlauf bei Ausführungen der Bronzehülse mit Rillen auf der Stirnseite.

### Bronzehülse mit Passung

Um den Kontaktdruck zwischen der Bronzehülse und der Kanalwand zu erhöhen, ist es möglich, die Hülse mit Übermaß gegenüber der Kanalbohrung zu entwerfen. So wird nicht nur die radiale Anpresskraft erhöht, sondern es wird zusätzlich eine Druckspannung in die Bronzehülse eingebracht, die einen positiven Einfluss auf die Dauerfestigkeit des Bauteils haben würde. Der Problematik von Ermüdung widmet sich das Kapitel 3.2. Es wurden mehrere Berechnungen von einer Bronzehülse mit Übermaß gegenüber der Kanalbohrung zwischen 0,0025 und 0,01 mm durchgeführt. In allen Fällen war die Hülse mit dem Dichteinsatz D6×T05×T1 versehen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind auf der Abbildung 5.52 zusammengefasst. Mit dem steigendem Übermaß kann man eine deutliche Steigerung des Kontaktdrucks sowohl zwischen der Bronzehülse und Kanalwand, als auch zwischen dem Dichteinsatz und der Bronzehülse beobachten. Ab dem Übermaß von 0,075 mm wurde ein Kontaktdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand größer Null erreicht.

### 5.5.3. Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Konzept eines Dichteinsatzes kombiniert das Funktionsprinzip einer Spaltendichtung mit dem eines selbstdichtenden Elements. Für die Analyse des Dichtprinzips galt es, den Bereich eines Übergangs einer geraden Bohrung zwischen zwei Injektorsegmenten abzudichten. Der Durchmesser der Bohrung betrug 1,5 mm. Der Ausgangspunkt dieses Lösungsweges war eine einfache Hülse, die in eine Ausweitung der Bohrung eingeführt

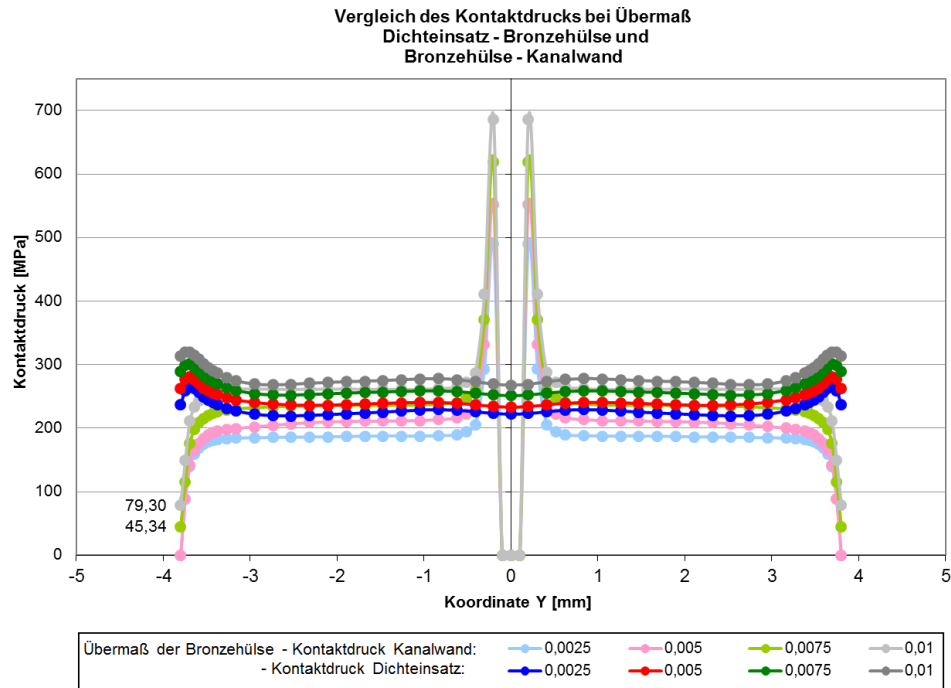


Abbildung 5.52.: Kontaktdruckverläufe bei unterschiedlichem Übermaß der Bronzehülse.

und in jedem der zwei Injektorsegmente mit jeweils einer Hälfte ihrer Länge positioniert wurde (s. Abbildung 5.35). Aus dieser Basisvariante wurden weitere Varianten abgeleitet mit einem steigendem Grad der Komplexität. Um die Kontaktpressung zwischen dem Einsatz und der Kanalwand zu verbessern, wurde zum Einen die Geometrie der Hülse an den Enden angepasst, zum Anderen sollte die Spannungsspitze in der Mitte der Hülse (an der Trennung zwischen den zwei Injektorsegmenten) abgeschwächt werden. Die vier zunächst untersuchten Ausführungen erfüllten die Vorstellungen nicht zufriedenstellend. Die weitere Variante mit der Bezeichnung E2 lieferte bessere Ergebnisse (vgl. Abbildung 5.39), indem man zwischen die Kanalwand und den Dichteinsatz noch eine zusätzliche Hülse aus Bronze einführte. Die Bronzehülse federt die Ungleichmäßigkeiten in der Spannungsverteilung ab und glättet somit den Verlauf des Kontaktdrucks. Um die Spannungsspitze in der Mitte weiter zu mindern, ist die Bronzehülse zweigeteilt.

Als Weiteres wurde der Einfluss der Dicke des stählernen Dichteinsatzes im Verhältnis zu der Dicke der Bronzehülse auf die Kontaktpressung untersucht. Für diese Untersuchungen, die für eine Bohrung mit dem Durchmesser  $6\text{ mm}$  durchgeführt worden sind, wurden 9 Varianten erstellt (s. Abbildung 5.40). Die Abbildungen 5.43 und 5.44 zeigen im Detail den Verlauf des Kontaktdrucks zwischen dem Dichteinsatz und der Bronzehülse am Ende und in der Mitte des Einsatzes. Aus den Graphen ist ersichtlich, wie sich die Spannung glätten lässt. Gute Ergebnisse weist die Variante  $D6 \times T09 \times T08$  auf. Die Abbildung 5.44 zeigt dagegen, dass das Problem der anfänglichen Variante 0, nämlich ein zu Null abfallender Kontaktdruck zwischen der Hülse und Kanalwand, nachwievor besteht. Deshalb wurde nach einem Weg gesucht, das Verhalten in der

Mitte der Hülse beizubehalten, aber an ihren Enden zu Ändern. Zwei Lösungsansätze sind auf der Abbildung 5.45 dargestellt. Der Dichteinsatz zeigte bei der Berechnung ein erwartetes Verhalten, der Kontaktdruck war kleiner im Bereich der größeren Wanddicke und stieg mit kleinerer Wanddicke an. Eine Verbesserung gegenüber den Einsätzen mit konstant kleiner Wanddicke konnte im Randbereich nicht erreicht werden. Das Ergebnis des zweiten Entwurf mit geminderter Steifigkeit zeigt unter Anderen die Abbildung 5.49. Hier konnte eine partielle Verbesserung im Randbereich erzielt werden, für eine zuverlässige Dichtwirkung reicht sie nicht aus.

Das nächste untersuchte Prinzip zur Erhöhung des Kontaktdrucks zwischen der Bronzehülse und Kanalwand zeigt die Abbildung 5.50. Die abzudichtende Flüssigkeit soll in die Rille auf der Stinseite eindringen, diese aufspreizen und an die Wand der Bohrung drücken. Auf der Abbildung 5.51 ist zu sehen, dass die Rillen tatsächlich einen Effekt haben, der Kontaktdruck steigt in den Randbereichen deutlich steiler an. Die Berechnung gibt allerdings immer noch am ersten Knoten einen Kontaktdruck gleich Null an. Auf die Zuverlässigkeit des numerischen Ergebnisses am ersten Knoten eines Modells wurde bereits auf einer anderen Stelle dieser Arbeit hingewiesen. Um die Sicherheit einer guten Dichtwirkung zu erlangen, könnte ein Dichteinsatz und Bronzehülse mit Übermaß eingesetzt werden, wie der letzte Paragraph des Abschnitts beschreibt. Laut FEM-Berechnung wäre ein Übermaß der Bronzehülse von  $0,075\text{ mm}$  ausreichend um bei  $3000\text{ bar}$  einen Kontaktdruck größer Null auf der gesamten Länge der Hülse zu gewährleisten.

## 5.6. Dichtung durch integrierte Dichtlippe

Eine weitere Möglichkeit der Abdichtung stellt eine integrierte Dichtlippe dar, die sich durch die Wirkung des Kraftstoffdruckes günstig verformt und so zu der Dichtung der Baugruppe beiträgt. Diese Dichtlippe muss für eine gute Dichtwirkung ausreichend flexibel und zugleich angesichts der Dauerfestigkeitsanforderungen robust genug entworfen sein. Ihre Geometrie sollte hinsichtlich der Fertigung nicht übermäßig komplex ausfallen, sodass auch Kanäle mit kleineren Durchmessern auf diese Weise abgedichtet werden können.

### 5.6.1. Dichtlippe mit theoretischer Geometrie

Um die generelle Funktionsweise des Konzepts zu untersuchen, wurde zuerst eine Geometrie entworfen, bei der die Aspekte der fertigungsgerechten Konstruktion außer Acht gelassen worden sind. Das Funktionsprinzip der Dichtlippe, die auf der Abbildung 5.53 dargestellt ist, beruht auf elastischer Deformation, generiert von dem abzudichtenden Innendruck. Durch seine Wirkung in der ausgeformten Tasche verbiegt sich die Lippe und es kommt zu einer Überhöhung der Bohrungskante über die Kontaktfläche, sodass beim Anliegen zweier Bauteile die Flächenpressung um die Bohrung herum erhöht wird. Das Ergebnis der Berechnung ist auf der Abbildung 5.54 zu sehen. Der

gleichmäßige Kontaktdruck von 55 – 60 MPa wurde von der Anpresskraft von 10 kN bewirkt. Um die mittige Bohrung ist die Wirkung der Dichtlippe deutlich sichtbar, der Kontaktdruck steigt auf 90 – 100 MPa. Am äußeren Rand ist das Ergebnis durch die angebrachte Randbedingung verzerrt, was sich als Abfall des Kontaktdrucks auf Null manifestiert. Eine Erhöhung des Kontaktdrucks von 50 auf 100 MPa ist ein Ergebnis der weichen Geometrie der Dichtlippe, die in dieser Ausführung wird nicht hergestellt werden können. Im folgenden Absatz werden realistischere Ausführungen untersucht mit dem Ziel, ein möglichst ähnliches Ergebnis zu erzielen.

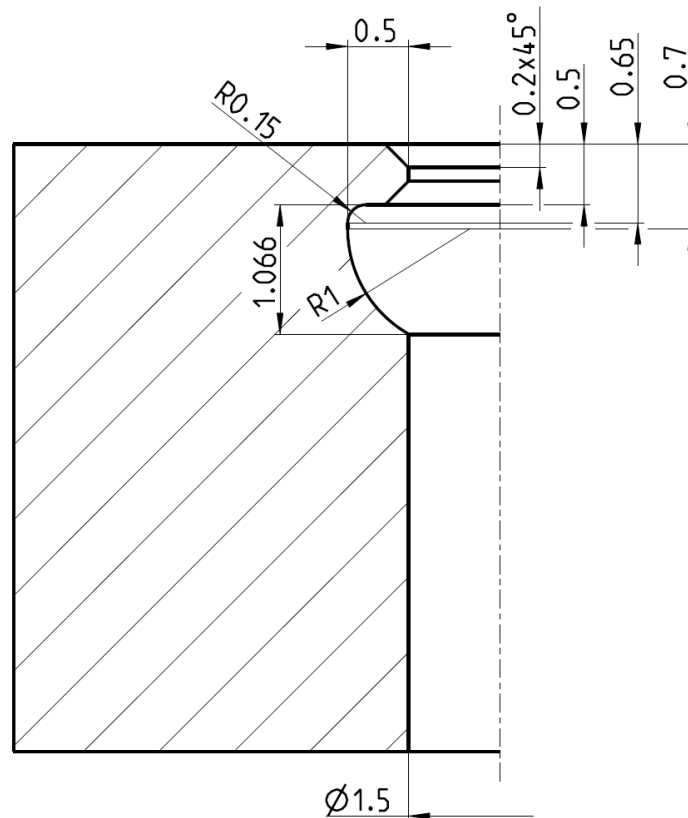


Abbildung 5.53.: Dichtlippe mit komplexer Geometrie.

## 5.6.2. Kontaktdruckuntersuchung fertigungsgerechter Varianten

Für den Entwurf einer fertigungsgerechten Variante des Dichtkonzepts mit integrierter Dichtlippe wurden zuerst drei geometrische Parameter identifiziert, die Einfluss auf die Wirksamkeit des Konzepts haben. Es handelt sich um den *Radius des Einstiches*  $R$ , seine *Tiefe*  $T$  und die Entfernung der oberen Kante des Einstiches von der Kontaktfläche, bezeichnet als *Höhe*  $H$ . Es wurden vier Ausführungen mit den Bezeichnungen Geo 3 A–D entworfen, die sich in den Parametern unterscheiden haben und auf der nachfolgenden Abbildung dargestellt sind.

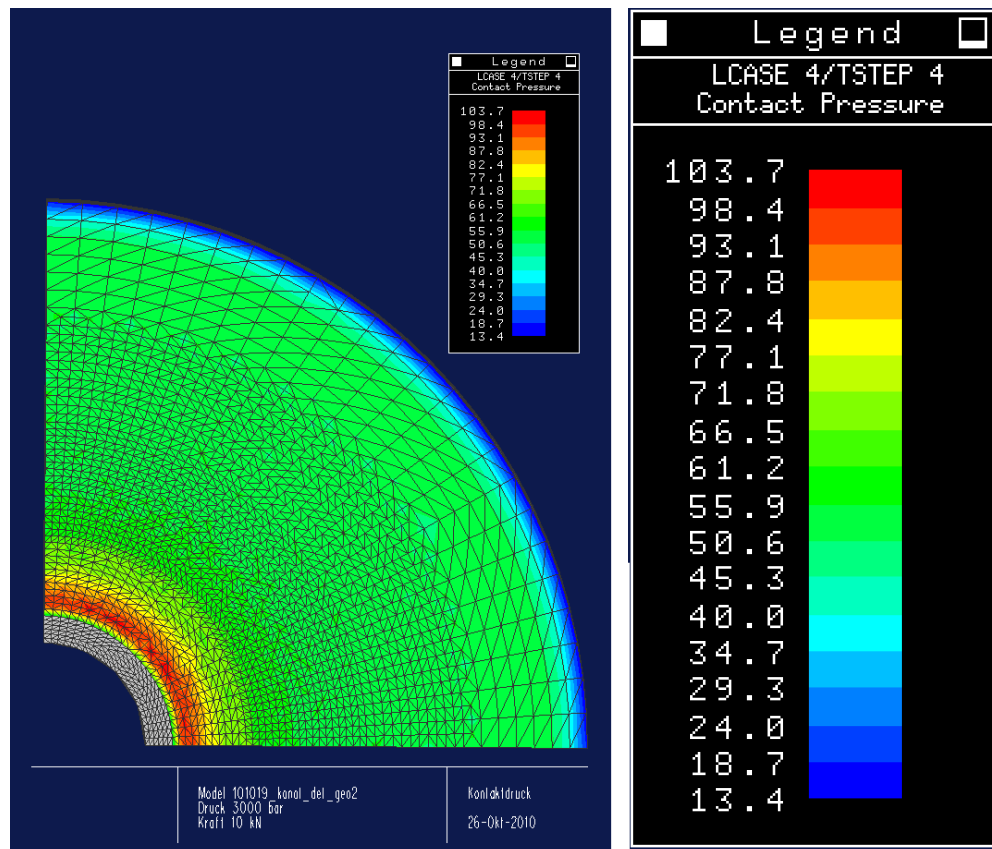


Abbildung 5.54.: Kontaktdruck resultierend aus der Anpresskraft und Wirkung der Dichtlippe.

	Geo 3A	Geo 3B	Geo 3C	Geo 3D
Geo 3A	×	steifer	steifer	
Geo 3B	weicher	×	steifer	weicher
Geo 3C	weicher	weicher	×	weicher
Geo 3D	steifer	steifer	steifer	×

Tabelle 5.3.: Gegenseitiges Verhältnis der Steifigkeiten der Ausführungen Geo3 A-D.

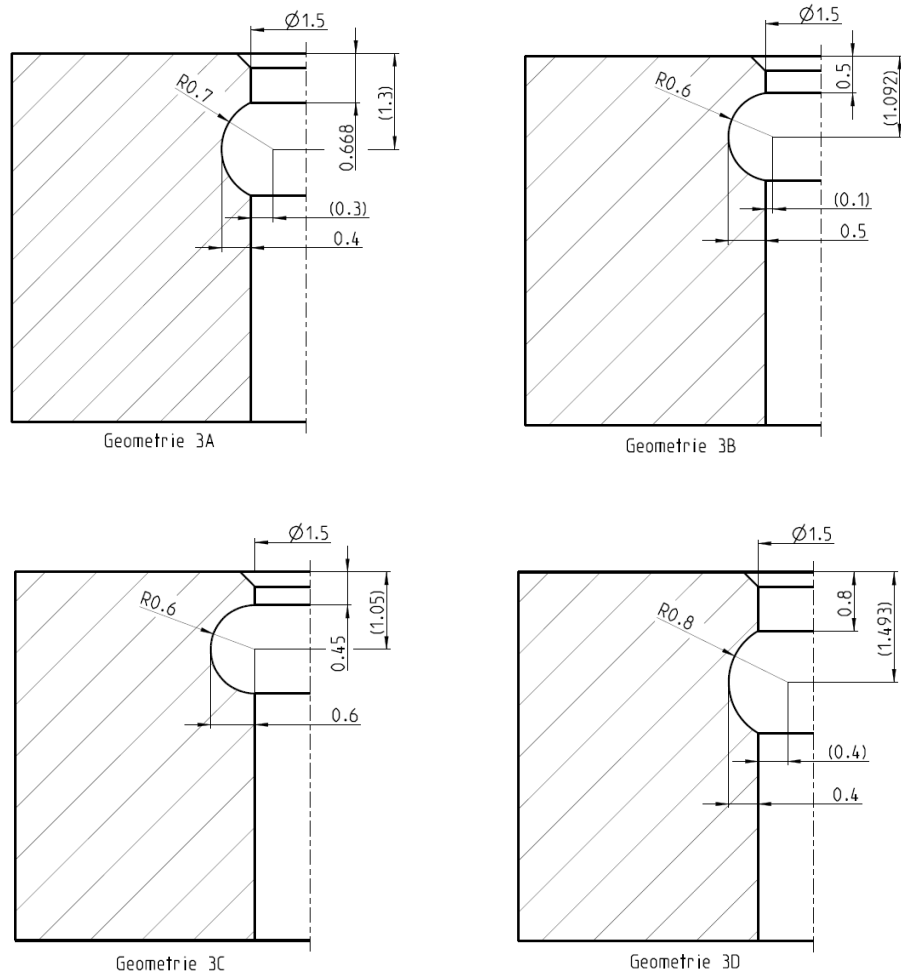


Abbildung 5.55.: Ausführungen Geo3 A–D des Dichtkonzepts mit integrierter Dichtlippe.



Das Verhältnis der Ausführungen untereinander ist in der Tabelle 5.3 festgehalten. Die Dichtlippe der Ausführung Geo 3C ist theoretisch die weichste, d.h. mit dem kleinsten Radius  $R$ , kleinstem Abstand zur Kontaktfläche  $H$  und größter Tiefe der Tasche  $T$ . Die Ausführung Geo 3D ist dagegen die härteste, die Ausführungen 3A und B bilden den Übergang zwischen den beiden Grenzzuständen. Die folgende Untersuchung sollte die generelle Verhaltensweise des Dichtkonzepts in Abhängigkeit von den Parametern  $R$ ,  $H$  und  $T$  feststellen. Hierfür wurden Berechnungsdurchläufe mit konstantem Druck von 3000 *bar* und axialen Anpresskräften von 5, 10, 15 und 20 *kN* durchgeführt. Die Graphen in den Abbildungen 5.56 und 5.57 stellen den Kontaktdruck zwischen zwei baugleichen Teilen dar. Aus den Kurven geht hervor, dass der positive Einfluss der Dichtlippe bei kleiner Anpresskraft am größten ist. Auffällig ist besonders die Wirkung der Varianten Geo 3B und Geo 3C bei der Anpresskraft von 5 *kN*. Mit steigender Axialkraft verliert sich die Wirkung der weicheren Dichtlippen und es überwiegt der Einfluss der größeren Steifigkeit, die die Axialkraft besser übertragen kann.

Da die Verwendung einer hohen Anpresskraft der Zielsetzung nicht entspricht, werden die Untersuchungen dieses Konzepts auf entsprechende Weise weitergeführt. Um festzustellen, welche der Parameter  $R$ ,  $H$ ,  $T$  den Kontaktdruck am meisten beeinflussen, wurden weitere Varianten berechnet. Als Grundlage für die Analyse wurde die Variante mit der Bezeichnung R7-H7-T4, d.h. mit der Geometrie mit  $R = 0,7 \text{ mm}$ ,  $H = 0,7 \text{ mm}$ ,  $T = 0,4 \text{ mm}$ , also angelehnt an die ursprüngliche Ausführung Geo 3A. In mehreren Berechnungsschritten wurde der Radius zwischen 0,5 und 0,7 *mm* variiert, die Höhe zwischen 0,4 und 0,7 *mm* und die Tiefe zwischen 0,4 und 0,7 *mm*. Insgesamt wurden 9 Varianten untersucht, zu ihrer Veranschaulichung dient die Abbildung 5.58.

Die Analyse wurde für die Axialkraft von 5 *kN* durchgeführt, bei der die Wirkung der Dichtlippe am deutlichsten ist. Auf den Kurven in der Abbildung 5.59 sehen wir, dass den größten Einfluss auf den Kontaktdruck die Tiefe des Einstiches hat. Eine Erhöhung der Tiefe von 0,5 auf 0,6 *mm* brachte einen deutlich steileren Anstieg des Kontaktdrucks auf den ersten 4 Knoten und gleichzeitig einen höheren Maximalwert. Eine weitere Vertiefung des Einstiches um 0,1 *mm* auf 0,7 *mm* erhöht den Wert des Kontaktdrucks an dem Kanalrand noch weiter und liefert zusätzlich einen Wert des Kontaktdrucks auf dem ersten Knoten größer Null. Im Weiteren Verlauf konvergieren alle drei Kurven zu dem Wert von ca. 90 *MPa*, den die Varianten übereinstimmend beim 13. Knoten erreichen, also in der Entfernung von der Bohrungskante ca. 1,3 *mm*.

Die weiteren Untersuchungen mit unterschiedlichem Radius  $R$  und Höhe  $H$  haben dagegen gezeigt, dass diese Parameter keinen so ausgeprägten Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Höhe  $H$ , also der Abstand des Einstichs zu der Kontaktfläche zeigt eine verhältnismäßig schwache Wirkung im Bereich der ersten 5 bis 6 Knoten, die sich im Wesentlichen im steileren Anstieg des Kontaktdrucks demonstriert, sodass der Maximalwert bei den kleineren Parametern früher erreicht wird. Erhöhung des Maximalwerts ist in diesem Fall nur sehr klein. Der Einfluss des Radius ist ebenso schwach und beschränkt sich auf den Bereich von einigen wenigen Knoten um das Maximalwert des Kontaktdrucks.

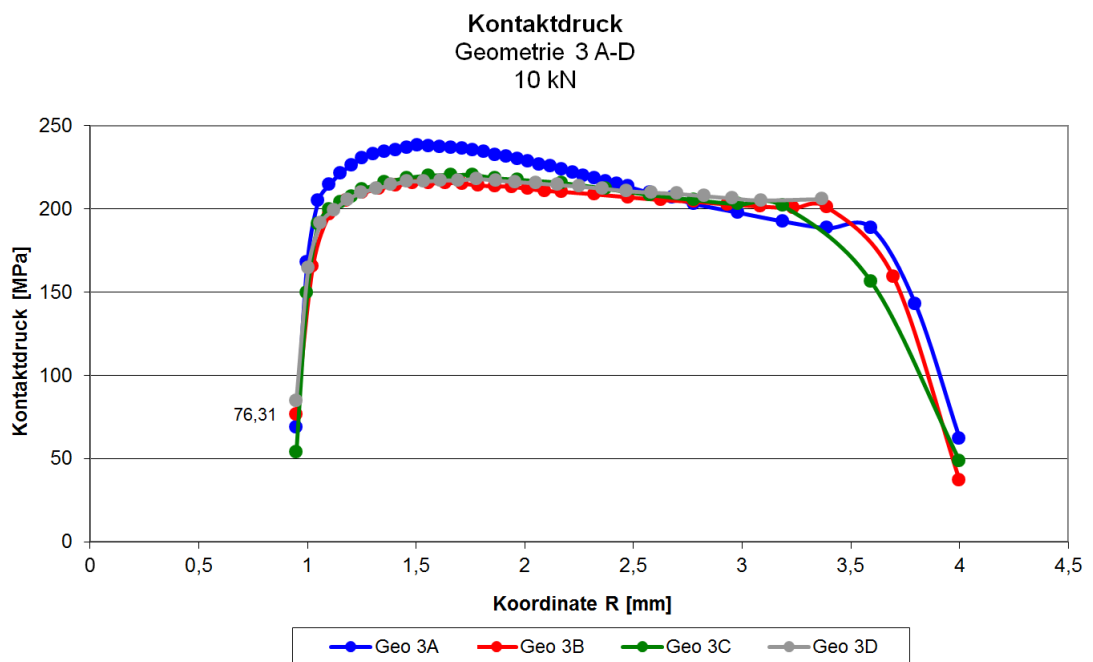
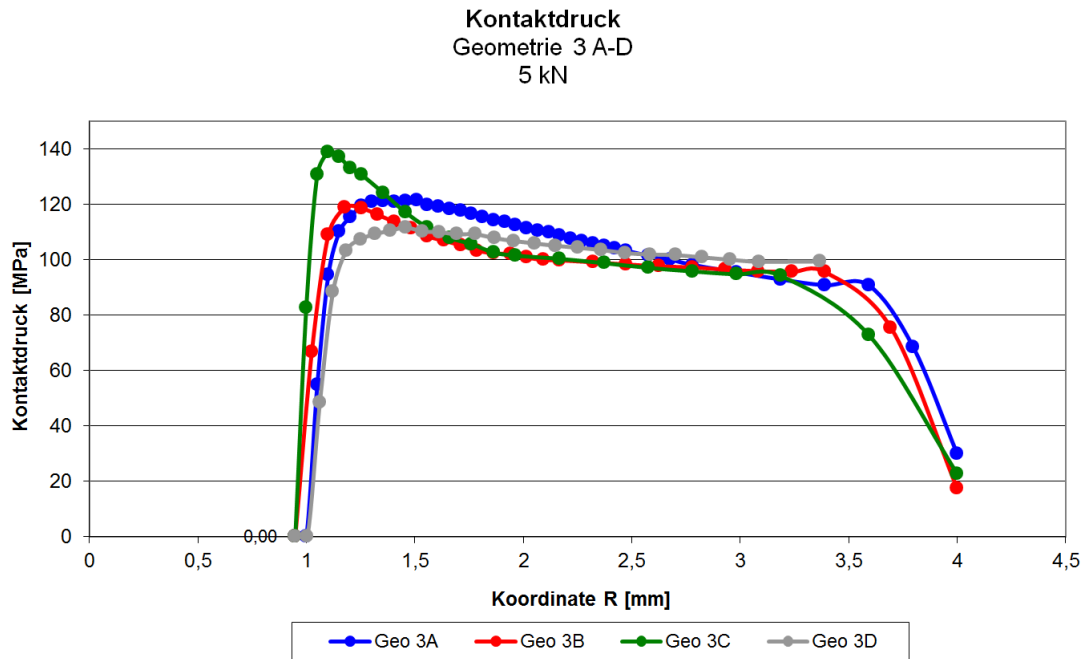


Abbildung 5.56.: Kontaktdruck der Ausführungen Geo3 A–D bei Anpresskraft von 5 und 10 kN und Innendruck 3000 bar.

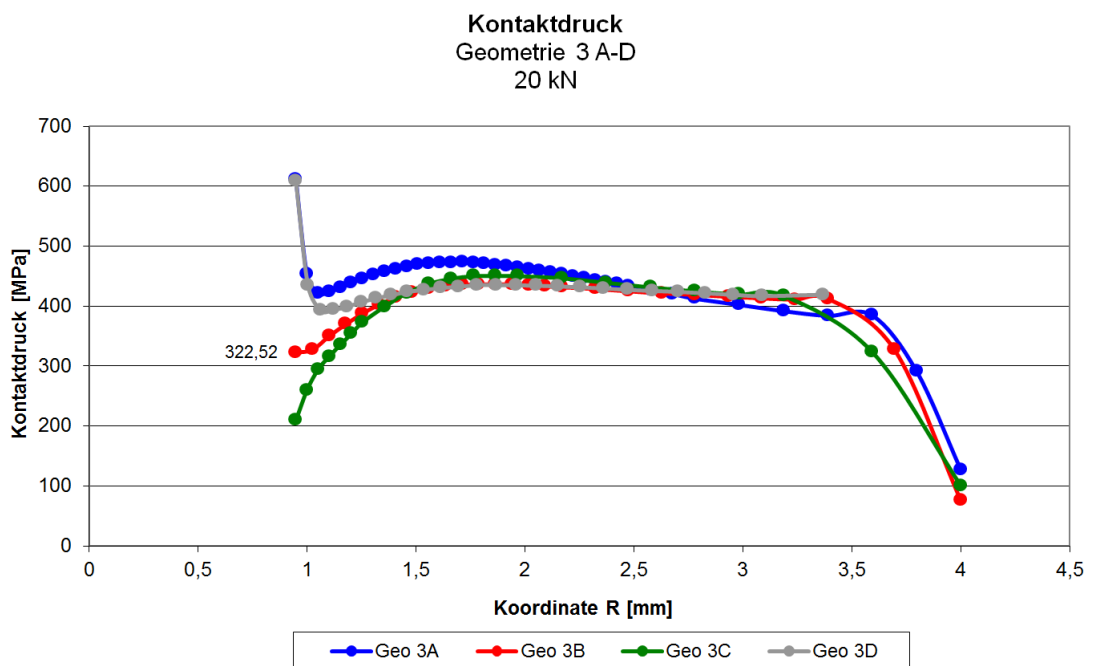
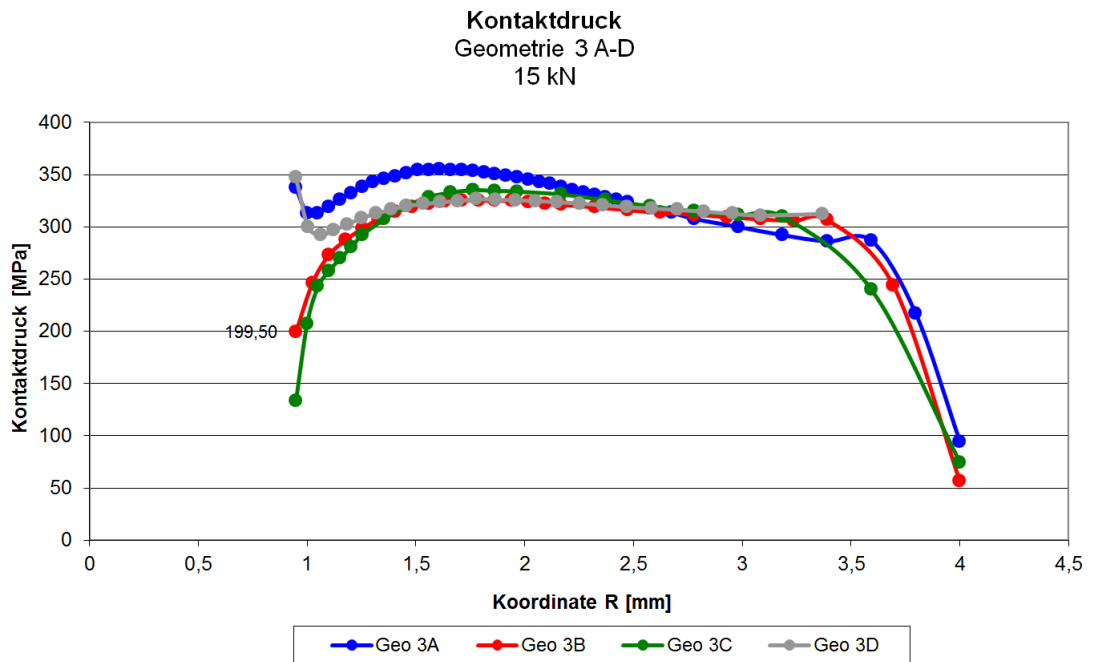


Abbildung 5.57.: Kontaktdruck der Ausführungen Geo3 A–D bei Anpresskraft von 15 und 20 kN und Innendruck 3000 bar.

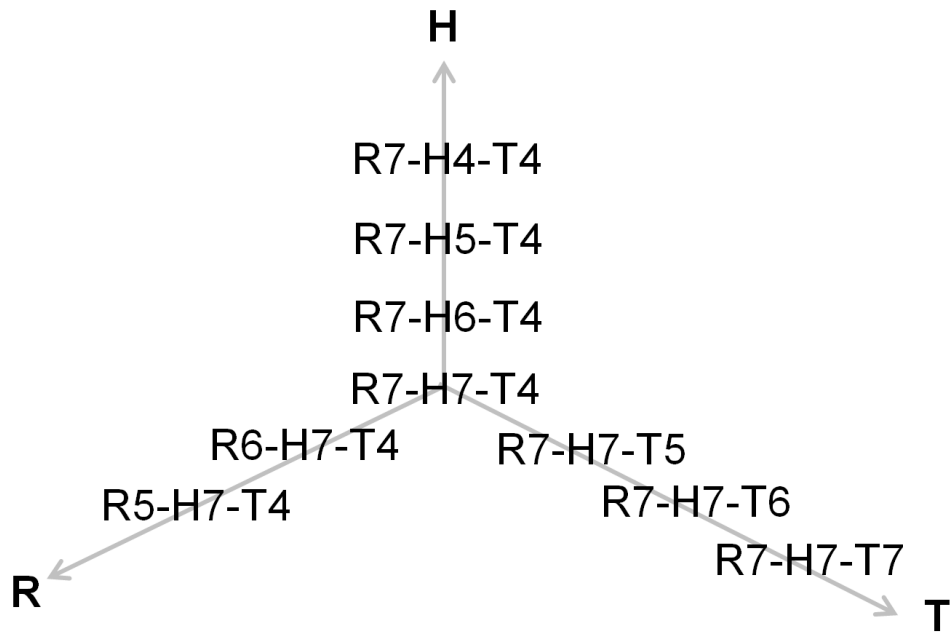


Abbildung 5.58.: Varianten für die Untersuchung des R-H-T Einflusses auf die Dichteigenschaften.

	H 0,4	H 0,5	H 0,6	H 0,7	H 0,8
R 0,4	R4-H4-T5	R4-H5-T5	R4-H6-T5	R4-H7-T5	R4-H8-T5
R 0,5	R5-H4-T5	R5-H5-T5	R5-H6-T5	R5-H7-T5	R5-H8-T5
R 0,6	R6-H4-T5	R6-H5-T5	R6-H6-T5	R6-H7-T5	R6-H8-T5
R 0,7	R7-H4-T5	R7-H5-T5	R7-H6-T5	R7-H7-T5	R7-H8-T5
R 0,8	R8-H4-T5	R8-H5-T5	R8-H6-T5	R8-H7-T5	R8-H8-T5

Tabelle 5.4.: Varianten der Dichtlippe mit festgelegter Tiefe  $T=5\text{mm}$ .

### 5.6.3. Detaillierte Berechnungen der Variante Geo 3

Mit Hinsicht auf einen fertigungsgerechten Entwurf wurde für die untersuchte Geometrie, d.h. für den Kanaldurchmesser von  $1,5\text{ mm}$ , die Tiefe der Tasche  $T = 0,5\text{ mm}$  gewählt. Dieser Wert wurde nach Absprachen mit Technologen als das Maximum bestimmt, sodass die Tasche durch Elektroerodieren gefertigt werden kann. Mit dieser Festlegung können die restlichen Parameter  $R$  und  $H$  variiert werden. Es ergeben sich 25 Varianten  $R_x-H_x-T_5$ , wie in der Tabelle 5.4 angeführt, die im Weiteren genauer untersucht werden, um die beste Konfiguration zu bestimmen.

Die Berechnungsergebnisse für axiale Kräfte 5, 10 und 15  $kN$  und einen Innendruck von 3000  $bar$  zeigen folgende Abbildungen. Übereinstimmend mit Berechnungen der Varianten Geo 3 A–D ist die berechnete Wirkung der Dichtlippe am größten bei Varianten

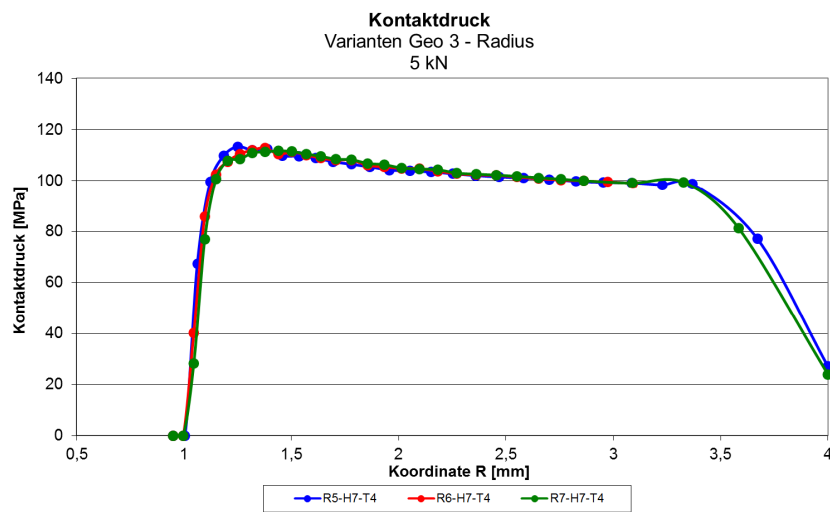
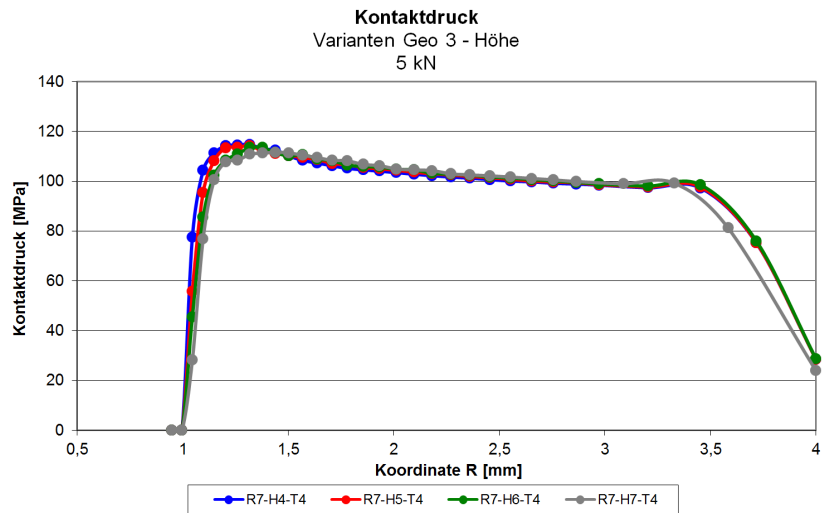
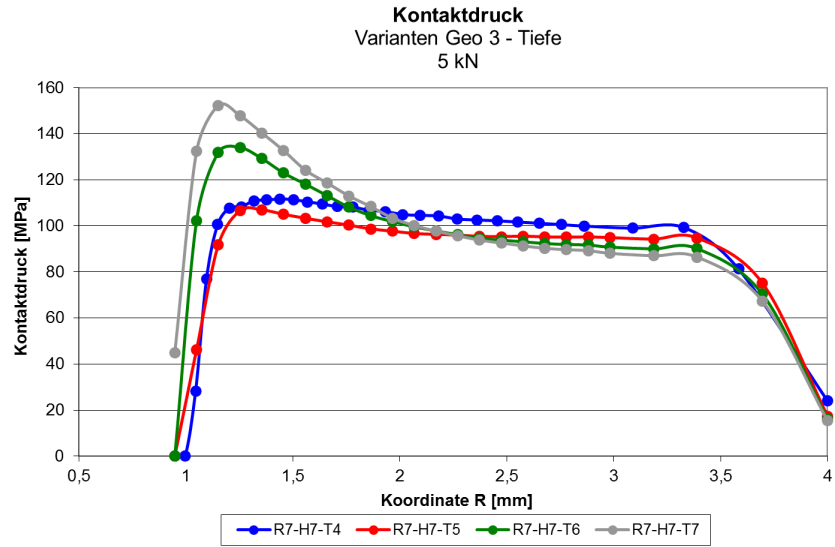


Abbildung 5.59.: Einfluss der Parameter R, H und T auf die Anpresskraft beim Innendruck 3000 bar.

mit sehr kleiner Steifigkeit (R4-H4-T5, R4-H5-T5, R5-H4-T5) und bei einer niedrigen Anpresskraft von  $5 \text{ kN}$ . Die Verwendung von diesen Varianten ist allerdings aus verschiedenen Gründen nicht realistisch, vor allem wegen der schwierigen Herstellbarkeit der Nut mit dem Radius  $R\ 0,4$  bei einer Tiefe von  $0,5 \text{ mm}$  oder der problematischen Lebensdauer gegeben durch niedrige Steifigkeit und kleine Wandstärke. Positiv fällt die Variante R6-H6-T5 auf. Sie zeichnet sich durch einen hohen und stabilen Kontaktdruck bei allen Kräften aus und weist keine übermäßigen Spannungsspitzen auf. Diese Variante wurde daher noch mal mit einem sorgfältig ausgelegten Netz berechnet, um eine Bestätigung des Ergebnisses zu erhalten.

Die Abbildung 5.61 zeigt die Vernetzung des Modells für die detaillierte Berechnung der Variante R6-H6-T5. Es wurde ein  $360^\circ$  Modell verwendet, das ausschließlich mit Oktaederelementen vernetzt worden ist. In dem Ausschnitt ist der Bereich der Kontaktfläche an der Bohrungskante zu sehen. Die Kantenlänge der Elemente in diesem Bereich beträgt ca.  $0,06 \text{ mm}$ , das Modell ist insgesamt aus ca.  $107000$  Solid-Elementen aufgebaut. Diese Variante wurde näher untersucht, wie die Abbildung 5.62 zeigt. Im Bereich der planen Kontaktfläche resultiert der Kontaktdruck lediglich aus der Anpresskraft und ist konstant. In der Nähe von der Bohrungskante sinkt der Kontaktdruck im Vergleich zu einer einfachen Ausführung ohne Dichtlippe weniger steil. Durch das Anbringen der Dichtlippe ist es also laut Berechnung möglich, dem Öffnen eines Spalts zwischen zwei anliegenden Injektorsegmenten entgegen zu wirken. Gleichzeitig bringt diese konstruktive Maßnahme Nachteile vor allem in der Fertigung. Die kraftstoffführenden Kanäle haben in der Regel einen Durchmesser in der Größenordnung von  $1 - 5 \text{ mm}$ , sodass das gewöhnliche Drehen oder Fräsen als Fertigungsverfahren des hinterschnittigen Bereichs der Dichtlippe nicht in Frage kommt. Durch das Elektroerodieren, beispielsweise, wäre eine solche Geometrie herstellbar.

#### 5.6.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Dichtkonzept der integrierten Dichtlippe nutzt das gleiche Prinzip wie die Dichtung durch sacklochartige Geometrie, und zwar wird der abzudichtende hydraulische Druck genutzt, um eine Dichtwirkung zu erzeugen. Dafür wurde zuerst eine angesichts der Funktion ideale Geometrie entworfen (s. Abbildung 5.53) und einer FEM-Analyse unterzogen. Das Ergebnis, dargestellt auf der Abbildung 5.54, zeigt eine deutliche Erhöhung der Kontaktdrucks um die Bohrungskante herum, welche die Dichtwirkung steigert. Um das Konzept in der Praxis einsetzen zu können, wurde nach einer fertigungsge-rechten Ausführung der Lippengeometrie gesucht, die zugleich die Dichteigenschaften beibehält. Aus diesem Grund wurden vier Varianten mit der Bezeichnung *Geo 3A-D* abgeleitet, die im Verhältnis zueinander unterschiedliche Steifigkeit der Dichtlippe aufweisen. Ihre Untersuchung ergab nützliche Hinweise für den Entwurf detaillierterer Berechnungsmodelle, an denen auch der Einfluss der einzelnen Parameter *Radius R*, *Höhe H* und *Tiefe T* untersucht worden ist. Ihre Bezeichnung und die Ergebnisse der Analyse zeigen die Abbildungen 5.58 und Abbildung 5.59. Es wurde festgestellt, dass die Tiefe der Nut unter der Dichtlippe den größten Einfluss auf den Kontaktdruck zum anliegenden Bauteil hat. Als maximale Tiefe der Nut, die im Inneren einer

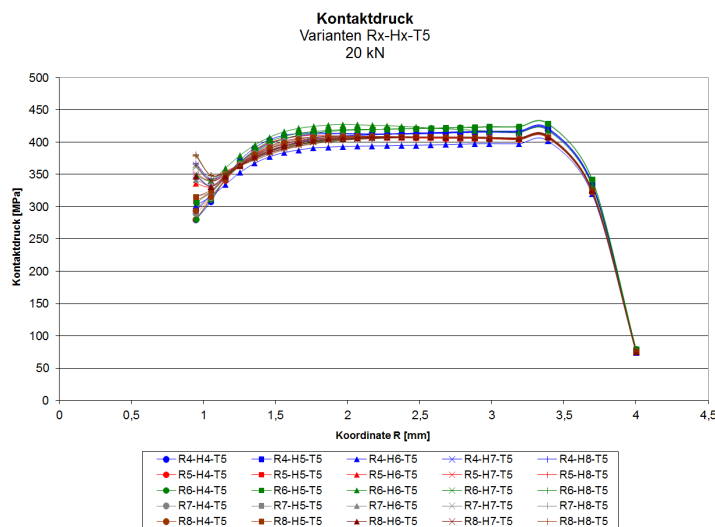
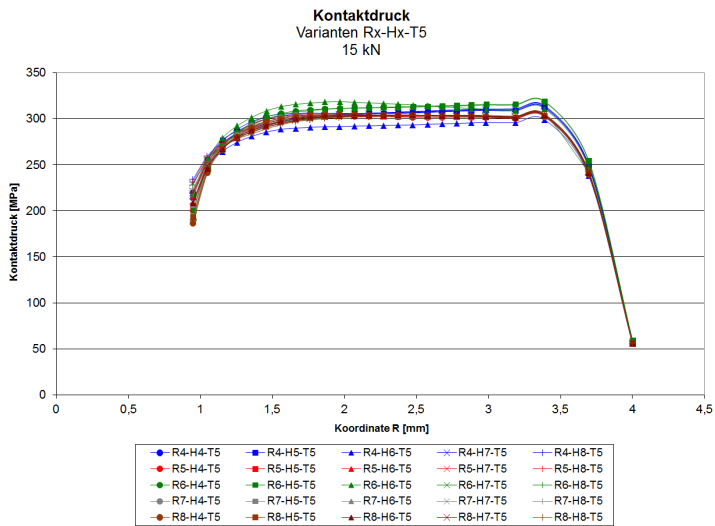
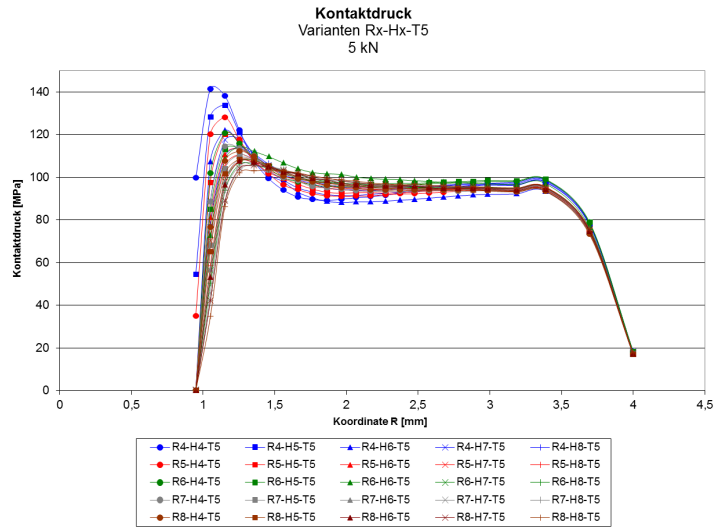


Abbildung 5.60.: Kontaktdruck der Varianten Rx-Hx-T5.

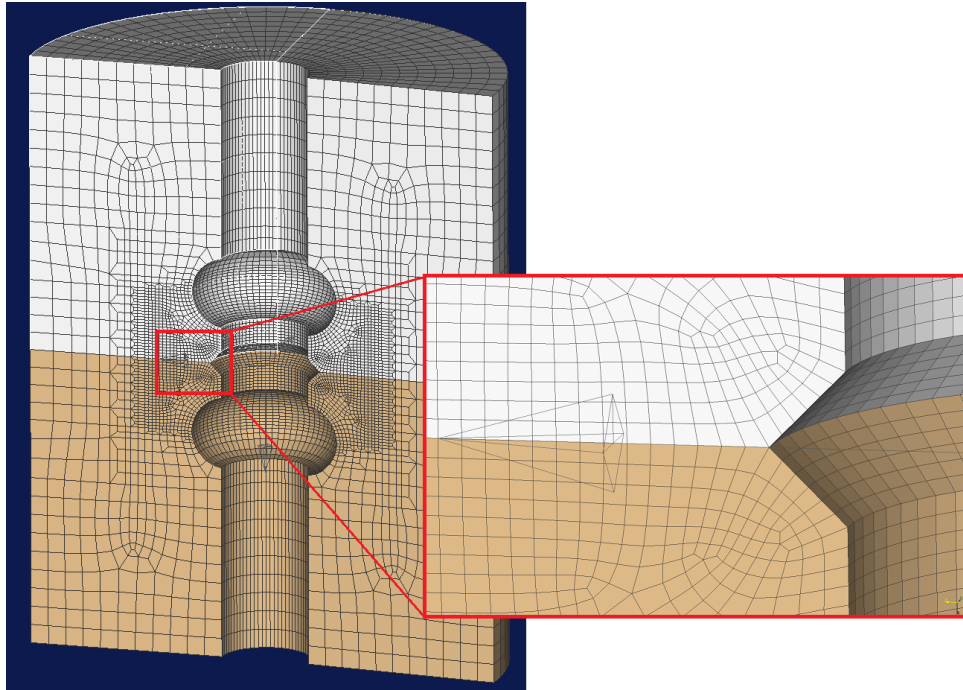


Abbildung 5.61.: Das vernetzte Modell für detaillierte Berechnung der Variante R6-H6-T5.

Bohrung mit dem Durchmesser  $1,5 \text{ mm}$  wurde  $T = 0,5 \text{ mm}$  bestimmt. In den darauf folgenden Berechnungen wurden noch mal die Parameter  $R$  und  $H$  variiert, um die beste Einstellung zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigt die Abbildung 5.60. Aus diesen Varianten wurde schließlich als beste die  $R6-H6-T5$  ausgewählt und an einem aufwendig vernetztem Modell (s. Abbildung 5.61) untersucht.

Das Ergebnis der Berechnung der besten ermittelten Variante zeigt die Abbildung 5.62. Es ist ersichtlich, dass die Wirkung der Dichtlippe einen Abfall in dem Kontaktdruck in der unmittelbaren Nähe der Bohrungskante nur abschwächen und nicht vollständig verhindern oder sogar übertreffen konnte. Daher kann dieses Dichtkonzept, ähnlich wie auch das Sackloch, nur als eine sekundäre Maßnahme empfohlen werden, um ein primäres Dichtkonzept im Bereich des hohen Druckniveaus zu unterstützen.



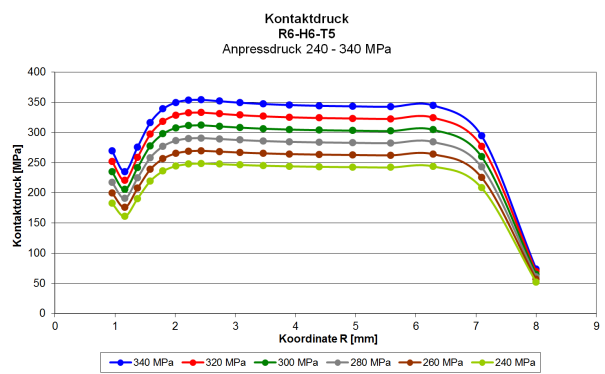
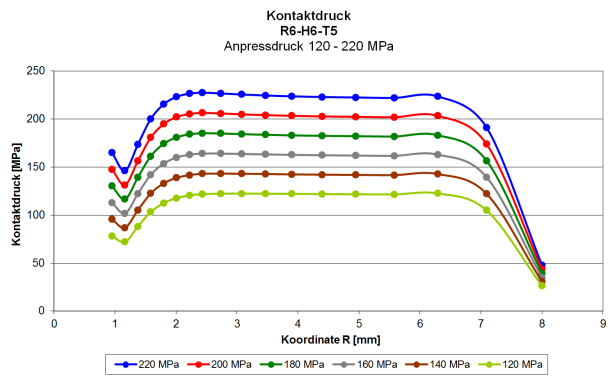


Abbildung 5.62.: Berechnungsergebnisse der Dichtlippe R6-H6-T5.

## 6. Zusammenfassung

### 6.1. Zusammenfassung des Arbeitsumfangs

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Segment eines Common-Rail Injektors untersucht. Die Schwerpunkte der Untersuchung lagen dabei zum Einen in der Erhöhung der Zeitfestigkeit oder dem Erreichen der Dauerfestigkeit der Einmündung einer mit Hochdruck belasteten Bohrung in die Arbeitskammer des Injektors, zum Anderen in der Abdichtung des Hochdrucks zwischen dem betroffenen und dem benachbarten Segment.

Um die Zeitfestigkeit des Segments zu erhöhen wurde die Geometrie der Einmündung analysiert (s. Abschnitt 4.1.2). Um eine Optimierung durchzuführen, wurde ebenfalls die Art der Oberflächenbehandlung in Erwägung gezogen, die funktionsbedingt auf konkreten Stellen des Segments angewandt werden muss. Folglich wurden mehrere Varianten entworfen und die auftretende Spannung in dem Bereich der Einmündung wurde für jede Variante durch FEM-Berechnung ermittelt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in den Entwurf der Versuchsproben eingeflossen, sodass die neue Geometrie der Einmündung in mehreren physischen Bauteilen umgesetzt und ihre Fertigungsgerechtigkeit bestätigt worden ist. Es wurden ebenfalls die Möglichkeiten zum Einsatz verschiedener Werkstoffe untersucht (Abschnitt 3.3). Neben gängigen und speziellen Stahlsorten wurden auch unkonventionelle Werkstoffe in Erwägung gezogen.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es gewesen, ein neuartiges Dichtkonzept zu finden, das kostengünstiger und einfacher in der Anwendung sein wird als das bestehende und gängige Dichtkonzept der hoch präzisen gehärteten Flächen. Es wurden mehrere Konzepte aufgestellt und auf ihre Eigenschaften zunächst rechnerisch und dann auch praktisch untersucht. Für die Dichtheitsuntersuchungen wurde ein Prüfstand aufgebaut (Abschnitt 4.1.4) und ein Messverfahren entwickelt (Abschnitt 4.1.5). Die Ergebnisse der Versuche und Berechnungen sind in folgenden Abschnitten beschrieben.

### 6.2. Zusammenfassung der Ergebnisse aus Berechnung und Versuch

#### 6.2.1. Dichtrillen

Das Rillendichtkonzept, dessen Prinzip näher im Abschnitt 5.3 beschrieben ist, erfüllte die Voraussetzung eines robusten Konzepts mit einer verhältnismäßig einfachen Fertigung und durchschnittlich aufwendigem Aufbau. Die Berechnung erwies sich aufgrund

der äußerst kleinen geometrischen Merkmale und der plastischen Deformation, die der Funktion des Dichtkonzepts zugrunde liegt, als schwierig und es konnten im Voraus keine zuverlässigen Vorhersagen über das Verhalten während des Versuchs gemacht werden. Der Versuch wurde mit Proben zweier Ausführungen durchgeführt, nämlich einer realistischeren 5A, 5B und einer vereinfachten 55A, 55B. Bessere Ergebnisse wurden aus den Messungen der einfacheren Proben 55A, 55B gewonnen, was in dem dazugehörigen Kapitel begründet worden ist. Unter Anwendung des eigens entworfenen Prüfstands konnte ein Druck von ca. 1200 bar abgedichtet werden, was bereits im Bereich von realistischen Einspritzdrücken liegt. Den Ergebnissen der Berechnung und des Versuchs sind die Abschnitte 5.3.1 und 5.3.2 gewidmet. Dieses Konzept kann eine Grundlage für weitere Untersuchungen darstellen.

### 6.2.2. Sacklochartige Geometrie

Die Funktion des Dichtkonzepts 6A, 6B wurde im Abschnitt 5.4 erläutert. Die ersten Berechnungen zeigten Potential des Konzepts auf, das anschließend durch detaillierte FEM-Untersuchungen bestätigt worden ist. Das entworfene Experiment wurde durch die Anwendung von unkonventionellen Messverfahren unterstützt, sodass es möglich war, die Spannungsverteilung zwischen den Kontaktflächen rückwirkend zu analysieren. Der Aufbau der Proben erwies sich als anspruchsvoller als beim Rillendichtkonzept, insbesondere das Erzielen einer zuverlässig gleichmäßigen Auflage des Probenpaars stellte eine Herausforderung dar. Die theoretischen Ergebnisse konnten durch die Messungen nicht vollständig nachgebildet werden (vgl. hierzu die Abschnitte 5.4.1 und 5.4.3). Der Grund dafür war wie Tatsache, dass die entsprechende Wirkung erst mit dem Erreichen eines relativ hohen Druckniveaus zu erwarten war. Die unter anderem aus Kostengründen gewählte einfache Bauweise der angewendeten Proben hat es nicht erlaubt, dieses Druckniveau zu erreichen. Das Dichtkonzept der sacklochartigen Geometrie kann deshalb wegen dem späten Einsetzen der Dichtfunktion nur als eine ergänzende Maßnahme aufgefasst werden. Der Einsatz als primäres Dichtkonzept wird nicht empfohlen und wäre nur unter Voraussetzung weiterer Untersuchungen denkbar, deren Ziel das Auffinden von Werkstoffen mit geeigneter Steifigkeit sein müsste.

### 6.2.3. Dichtung durch eingelegte Dichtelemente

Der Dichtung durch eingelegte Elemente ist der Abschnitt 5.5 gewidmet. Die Dichtweise dieses Konzepts beruht nicht nur auf einem Prinzip, sondern kombiniert eine Spaltendichtung, wie sie beispielsweise aus dem Turbinenbau bekannt ist, mit der dichtenden Wirkung des Innendrucks, der das Dichtelement gegen die Wände der kraftstoffführenden Bohrung drückt. Die detaillierte rechnerische Untersuchung hat Möglichkeiten und Schwachstellen des Konzepts aufgezeigt. Es wurden über 20 Varianten mittels FEM-Berechnung analysiert. Der Abschnitt 5.5.2 beschreibt die laut Berechnung wirkungsvollste, aber zugleich die komplizierteste Ausführung E2. Besonders

die Berechnung dieses Konzepts ist durch die mögliche Fehlerquelle geprägt, die sich aus der ungewissen Verhaltensweise des Randknotens eines Berechnungsmodells ergibt.

#### 6.2.4. Dichtung durch integrierte Dichtlippe

Auch das Funktionsprinzip der integrierten Dichtlippe, die im Abschnitt 5.6 beschrieben ist, basiert auf der Anpresskraft, die durch den abzudichtenden Innendruck hervorgerufen wird. Durch die hohe Steifigkeit der Dichtlippe ähnelt dieses Konzept der sacklochartigen Geometrie und es wären daher ähnliche Schwierigkeiten zu erwarten. Das Konzept wurde rechnerisch eingehend untersucht mit dem Ziel, eine optimale Geometrie hinsichtlich der Funktion zu ermitteln. Nach der ersten FEM-Analyse einer Ausführung mit einer komplexen, hinsichtlich der Funktion günstigen, aber für die Herstellung unmöglichen Ausführung, wurde der Einfluss dreier wichtigen geometrischen Parameter  $R$ ,  $H$  und  $T$  anhand von 4 Varianten untersucht. Als Ergebnis wurden anschließend 25 aussichtsreiche Varianten für weitere FEM Untersuchung abgeleitet um letztendlich eine davon mit einem aufwendig vernetzten Modell zu analysieren. Die Ergebnisse der Berechnung und Erfahrungen aus dem Versuch der sacklochartigen Geometrie weisen darauf hin, dass die Dichtlippe ebenfalls als ein sekundäres Dichtkonzept angewendet werden könnte, das erst nach dem Erreichen eines hohen Druckniveaus unterstützend wirken würde.

## 7. Veröffentlichungen des Authors

1. *Reif, Z.:* High Pressure Common Rail Injector. In Advanced Engineering. Ičići: Revelin d.o.o. 3(2009). S. 103-116. ISSN: 1846-5900.
2. *Reif, Z.:* High Pressure Common Rail Injector Problem Analysis. In CADAM 2009. Zigo Rijeka, 2009. S. 51-52. ISBN: 978-953-7142-38-4.
3. *Reif, Z.:* High Pressure Common Rail Injector. In SVOČ 2009. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. S. 211-215. ISBN: 978-80-7043-795-7.
4. *Reif, Z.:* Test Equipment for the Evaluation of Common Rail Injector Sealing Concepts. In ERIN 2010. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. S. 1-6. ISBN: 978-80-7043-883-1 s. 66. ISBN 978-80-7043-866-4.
5. *Reif, Z.:* Leakage Simulation at a Ring Gap Under High Pressure. In ES 2010. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. S. 1-6. ISBN: 978-80-7043-883-1.
6. *Reif, Z.:* Equipment for Testing of Sealing Concepts for Common Rail Injectors. In SVOČ 2010. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. S. 207-211. ISBN: 978-80-7043-884-8
7. *Vaněk, V.; Duník, M.; Kuda, M.; Reif, Z.:* Základy konstruování. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. ISBN: 978-80-7043-964-7.

# A. Anhang

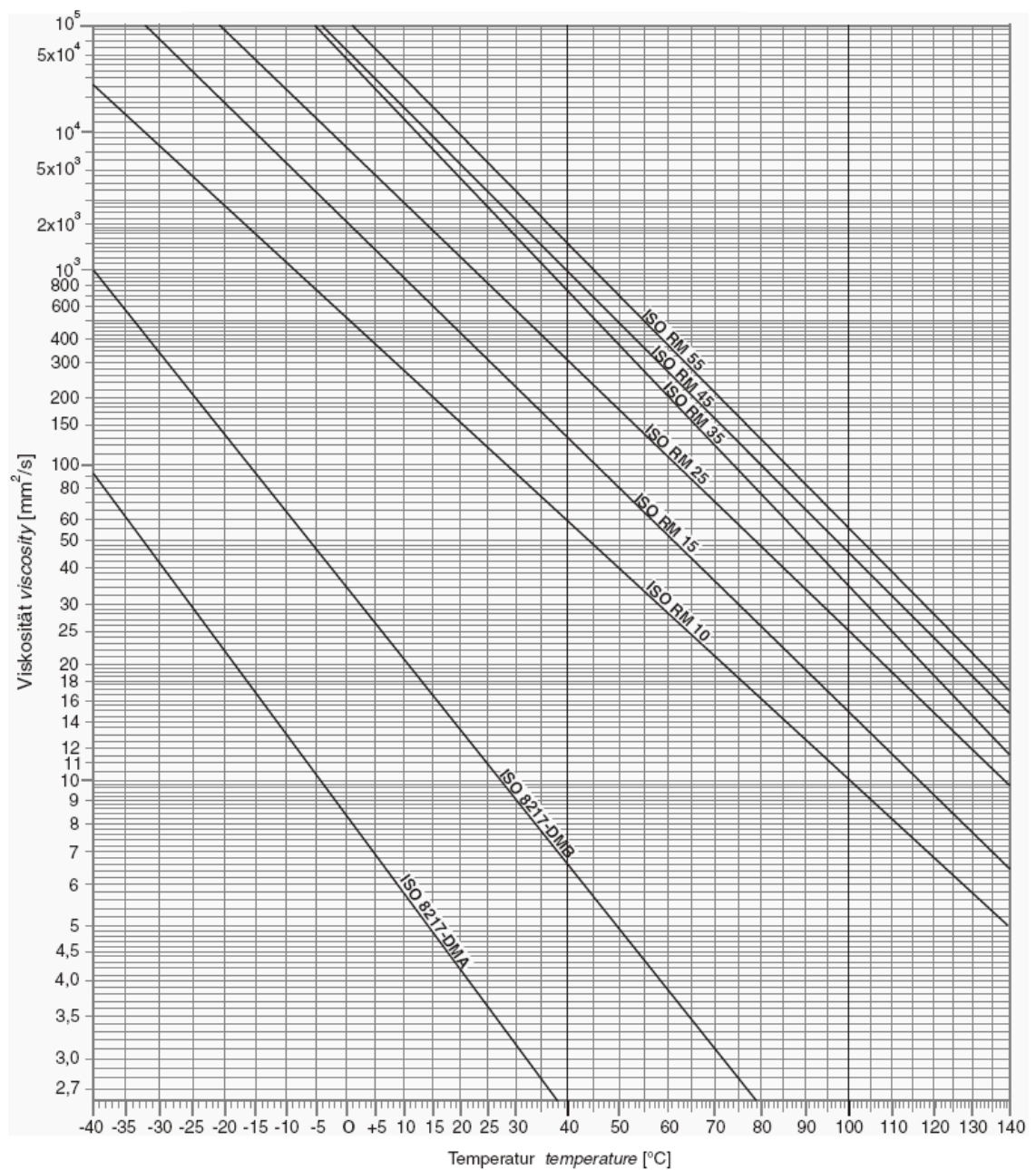


Abbildung A.1.: Viskosität von Schweröl in Abhängigkeit von Temperatur.



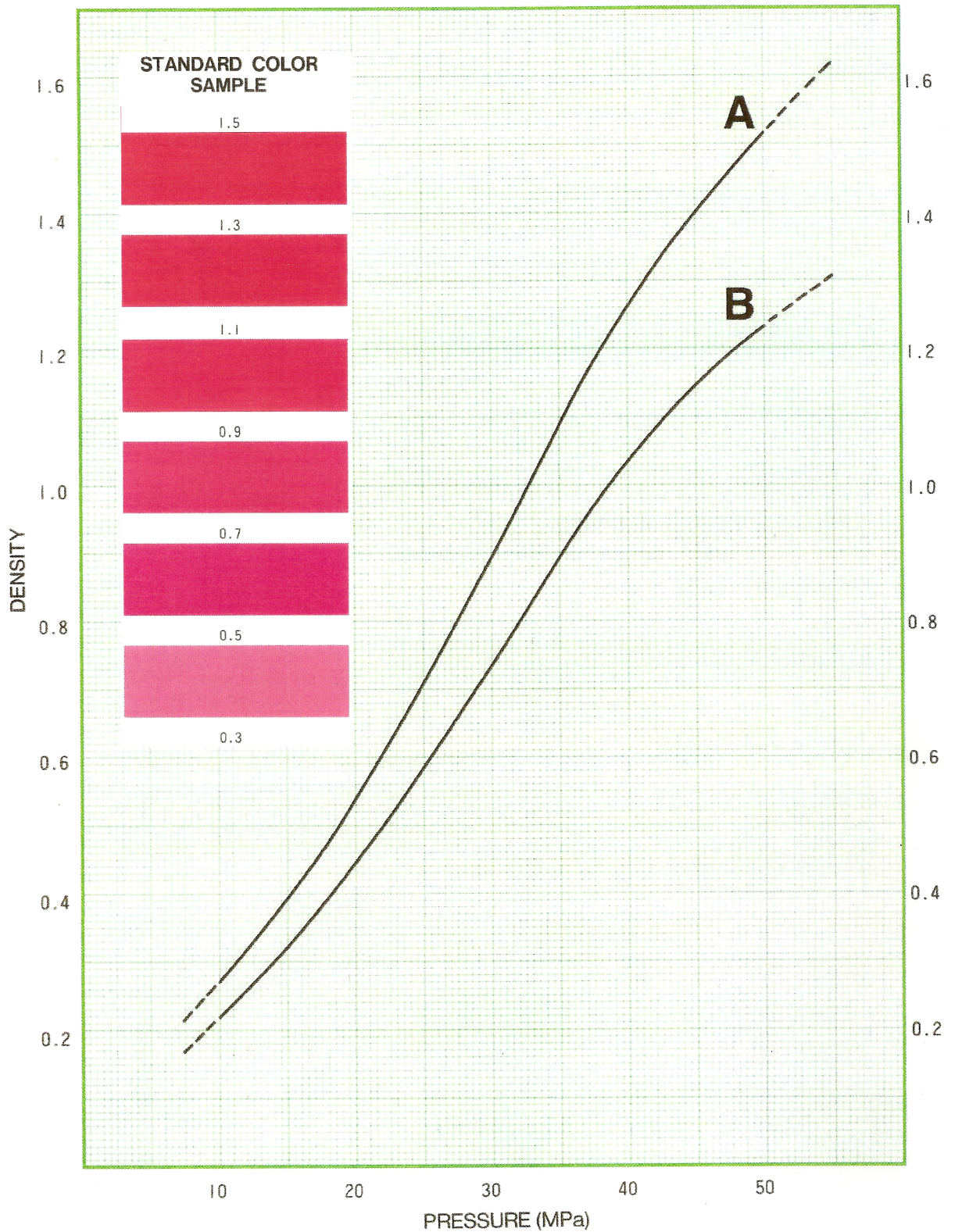


Abbildung A.2.: Farbskala der Prescale-Druckmessfolie für den Messbereich 10-50 MPa.



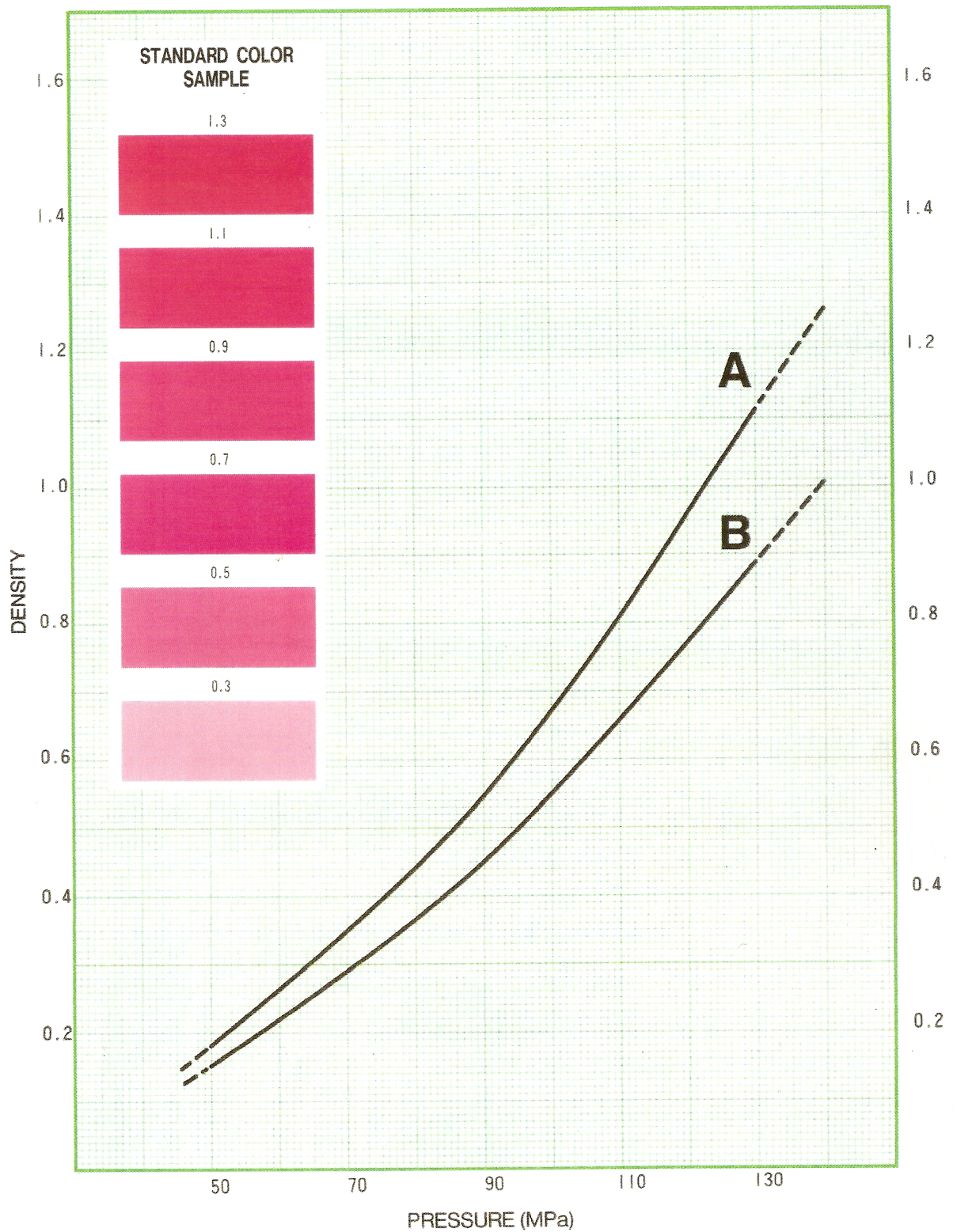


Abbildung A.3.: Farbskala der Prescale-Druckmessfolie für den Messbereich 50-130 MPa.



## A.1. Messergebnisse von Proben P5 und P55

Dichtheitsmessung				Messung Nr.: 102			
Datum:	24.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	101
Innendruck [bar]:	130	Normalkraft [kN]:	20	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	101
Temperatur Anfang:	22	Temperatur Ende:	23	Proben zusammeng.	NEU	aus Messung Nummer:	101
Notiz:	Proben vorbeschädigt von #100 (halbkreisförmiger Abdruck zwischen 300 und 120 Grad), Probenhalterung ergänzt um Kalotte oben						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage $\Sigma$ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage $\Sigma$ [g]	Leckage / Min [g/min]
1	22	0,59	0,59	16		8,9	0,54
2		1,2	0,61	17	23	9,42	0,52
3		1,78	0,58	18		9,97	0,55
4		2,35	0,57	19		10,5	0,53
5		2,98	0,63	20		11,04	0,54
6		3,55	0,57	21		11,57	0,53
7		4,05	0,5	22		12,1	0,53
8		4,68	0,63	23		12,62	0,52
9		5,2	0,52	24		13,2	0,58
10		5,74	0,54	25		13,78	0,58
11		6,26	0,52	26		14,35	0,57
12		6,77	0,51	27		14,92	0,57
13		7,3	0,53	28		15,5	0,58
14		7,84	0,54	29		16,08	0,58
15		8,36	0,52	30	23	16,63	0,55
Durchschnitt			0,55				

Abbildung A.4.: Messergebnis #102.

Dichtheitsmessung										Messung Nr.: 101	
Datum: 24.3.2011		Probe: 52		Kraft eingestellt: NEU		aus Messung Nummer:					
Innendruck [bar]: 120		Normalkraft [kN]: 10		Druck eingestellt: NEU		aus Messung Nummer:					
Temperatur Anfang: 19		Temperatur Ende: 22		Proben zusammenf.		NEU		aus Messung Nummer:			
Notiz: Proben vorbeschädigt von #100 (halbkreisförmiger Abdruck zwischen 300 und 120 Grad). Probenhalterung ergänz um Kalotte oben											
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,81	1,81								
2		3,6	1,79								
3		5,4	1,8								
4		7,04	1,64								
5		8,66	1,62								
6		10,3	1,64								
7		11,9	1,6								
8		13,5	1,6								
9		15	1,5								
10		16,53	1,53								
11		18,03	1,5								
12		19,5	1,47								
13		21,15	1,65								
14		23,26	2,11								
15		25,33	2,07								
16		27,35	2,02								
17		29,37	2,02								
18		31,3	1,93								
19		32,95	1,65								
20		34,73	1,78								
21		36,5	1,77								
22		38,38	1,88								
23		40,15	1,77								
24		41,98	1,83								
25		43,67	1,69								
26		45,3	1,63								
27		46,95	1,65								
28		48,58	1,63								
29		50,1	1,52								
30		51,62	1,52								
Durchschnitt											1,720667

Abbildung A.5.: Messergebnis #101.

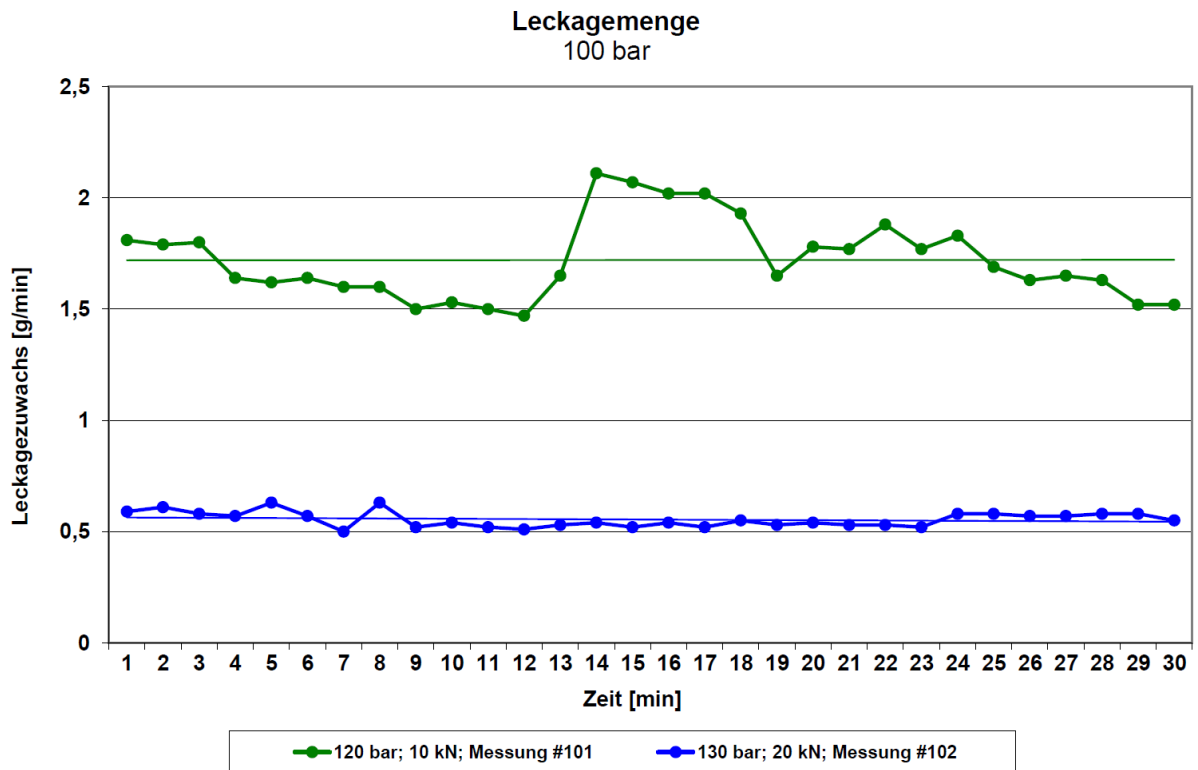


Abbildung A.6.: Messergebnisse 100 bar, P5A, P5B.

Dichtheitsmessung							
Datum: 27.7.2010			Messung Nr.: 26				
Innendruck [bar]: 240			Kraft eingestellt NEU				
Temperatur Anfang: 31			Normalkraft [kN]: 20				
Temperatur Ende: 33			aus Messung Nummer: 25				
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		2,02	2,02				
2		4,18	2,16				
3		6,31	2,13				
4		8,46	2,15				
5		10,58	2,12				
6		12,67	2,09				
7		14,68	2,01				
8		16,86	2,18				
9		18,91	2,05				
10		20,96	2,05				
11		23,09	2,13				
12		25,07	1,98				
13		27,15	2,08				
14		29,32	2,17				
15		31,48	2,16				
16		33,48	2,09				
17		35,57	2,09				
18		37,56	1,98				
19		39,54	1,98				
20		41,46	1,92				
21		43,68	2,22				
22		45,64	1,96				
23		47,67	2,03				
24		49,59	1,92				
25		51,5	1,91				
26		53,54	2,04				
27		55,46	1,92				
28		57,37	1,91				
29		59,4	2,03				
30		61,27	1,87				
Durchschnitt			2,042333				

Abbildung A.7.: Messergebnis #26.

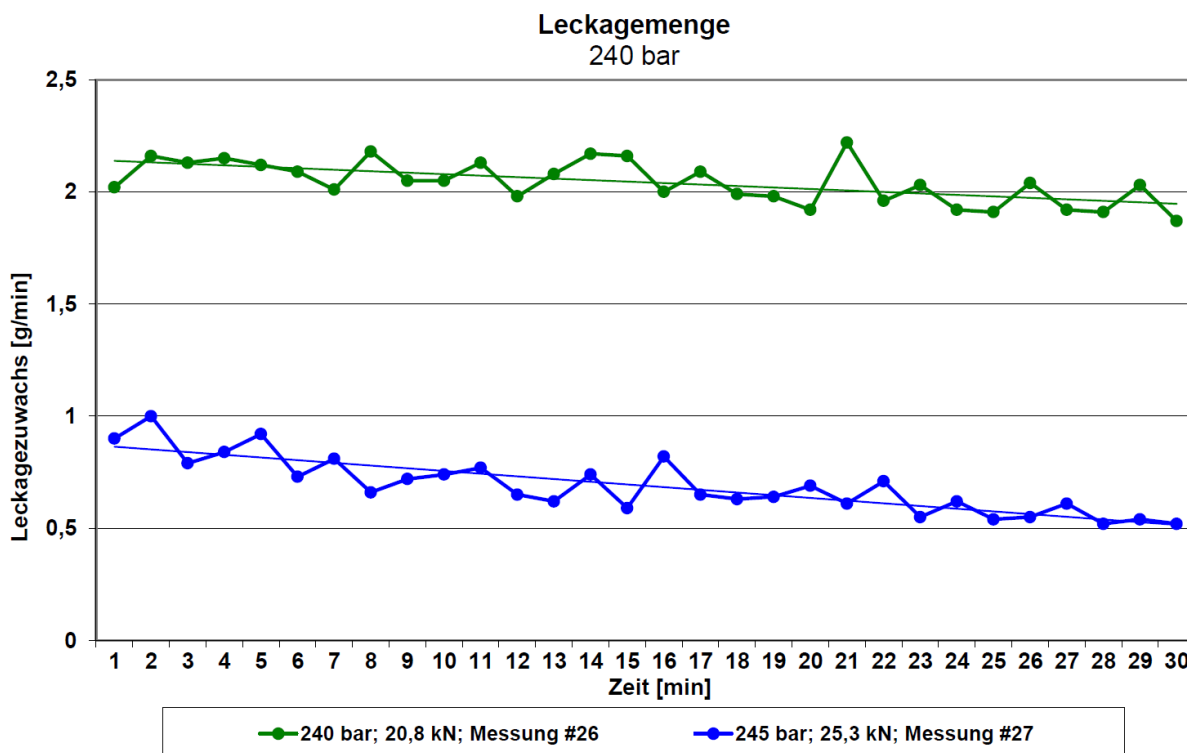


Abbildung A.8.: Messergebnisse 240 bar, P5A, P5B.

Dichtheitsmessung							
Datum:	24.3.2011	Probe:	52	Messung Nr.:	103		
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	21	Kraft eingestellt:	NEU aus Messung Nummer: 102		
Temperatur Anfang:	23	Temperatur Ende:	24				
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,87	0,87				
2		1,83	0,96				
3		2,77	0,94				
4		3,7	0,93				
5		4,59	0,89				
6		5,5	0,91				
7		6,42	0,92				
8		7,34	0,92				
9		8,21	0,87				
10		9,17	0,96				
11		10,02	0,85				
12		10,92	0,9				
13		11,79	0,87				
14		12,68	0,89				
15		13,59	0,91				
16		14,45	0,86				
17		15,33	0,88				
18		16,21	0,88				
19		17,11	0,9				
20		17,99	0,88				
21		18,88	0,89				
22		19,76	0,88				
23		20,63	0,87				
24		21,53	0,9				
25		22,43	0,9				
26		23,3	0,87				
27		24,15	0,85				
28		24,96	0,81				
29		25,85	0,89				
30		26,8	0,95				
<b>Durchschnitt</b>						<b>0,89</b>	

Abbildung A.9.: Messergebnisse #103.

Dichtheitsmessung							
Datum:	25.3.2011	Probe:	52	Messung Nr.:	106		
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	20	Kraft eingestellt:	NEU aus Messung Nummer: 105		
Temperatur Anfang:	19	Temperatur Ende:	21	Druck eingestellt:	NEU aus Messung Nummer: 101		
				Proben zusammen gebaut:	NEU aus Messung Nummer: 101		
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,6	1,6				
2		3,37	1,77				
3		5,09	1,72				
4		6,79	1,7				
5		8,49	1,7				
6		10,23	1,74				
7		11,96	1,73				
8		13,63	1,67				
9		15,33	1,7				
10		17,04	1,71				
11		18,75	1,71				
12		20,49	1,74				
13		22,19	1,7				
14		23,89	1,7				
15		25,55	1,66				
16		27,2	1,65				
17		28,8	1,6				
18		30,44	1,64				
19		31,98	1,54				
20		33,53	1,55				
21		35,05	1,52				
22		36,57	1,52				
23		38,03	1,46				
24		39,53	1,5				
25		41	1,47				
26		42,46	1,46				
27		43,92	1,46				
28		45,36	1,44				
29		46,8	1,44				
30		48,22	1,42				
<b>Durchschnitt</b>						<b>1,6</b>	

Abbildung A.10.: Messergebnis #106.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:	120
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	20	Druck eingestellt:	NEU
Temperatur Anfang:	22	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU
Notiz:					
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
1		0,96	0,96		
2		1,9	0,94		
3		2,74	0,84		
4		3,4	0,66		
5		4,23	0,83		
6		5,09	0,86		
7		5,99	0,9		
8		6,84	0,85		
9		7,57	0,73		
10		8,27	0,7		
11		9,08	0,81		
12		9,87	0,79		
13		10,6	0,73		
14		11,49	0,89		
15		12,38	0,89		
16		13,18	0,8		
17		14,04	0,86		
18		14,88	0,84		
19		15,7	0,82		
20		16,51	0,81		
21		17,27	0,76		
22		18,03	0,76		
23		18,77	0,74		
24		19,5	0,73		
25		20,27	0,77		
26		21,03	0,76		
27		21,76	0,73		
28		22,51	0,75		
29		23,21	0,7		
30		23,86	0,65		
Durchschnitt					0,79

Abbildung A.11.: Messergebnis #120.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:	123
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU
Temperatur Anfang:	26	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU
Notiz:					
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
1		0,84	0,84		
2		1,75	0,91		
3		2,46	0,71		
4		3,53	1,07		
5		4,43	0,90		
6		5,33	0,90		
7		6,20	0,87		
8		7,08	0,88		
9		7,97	0,89		
10		8,84	0,87		
11		9,73	0,89		
12		10,59	0,86		
13		11,51	0,92		
14		12,37	0,86		
15		13,22	0,85		
16		14,08	0,86		
17		14,95	0,87		
18		15,82	0,87		
19		16,67	0,85		
20		17,54	0,87		
21		18,40	0,86		
22		19,27	0,87		
23		20,13	0,86		
24		20,99	0,86		
25		21,83	0,84		
26		22,72	0,89		
27		23,57	0,85		
28		24,41	0,84		
29		25,25	0,84		
30		26,11	0,86		
Durchschnitt					0,87

Abbildung A.12.: Messergebnis #123.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	125
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	123
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	29	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	120
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,84	0,84				
2		1,73	0,89				
3		2,63	0,90				
4		3,53	0,90				
5		4,43	0,90				
6		5,32	0,89				
7		6,18	0,86				
8		7,07	0,89				
9		7,95	0,88				
10		8,83	0,88				
11		9,70	0,87				
12		10,56	0,86				
13		11,43	0,87				
14		12,31	0,88				
15		13,16	0,85				
16		14,03	0,87				
17		14,89	0,86				
18		15,75	0,86				
19		16,62	0,87				
20		17,45	0,83				
21		18,35	0,90				
22		19,18	0,83				
23		20,05	0,87				
24		20,90	0,85				
25		21,75	0,85				
26		22,58	0,83				
27		23,43	0,85				
28		24,27	0,84				
29		25,13	0,86				
30		25,98	0,85				
Durchschnitt							0,86

Abbildung A.13.: Messergebnis #125.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	127
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	122
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	28	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	120
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,65	0,65				
2		1,36	0,71				
3		2,09	0,73				
4		2,79	0,70				
5		3,49	0,70				
6		4,22	0,73				
7		4,90	0,68				
8		5,60	0,70				
9		6,35	0,75				
10		7,05	0,70				
11		7,78	0,73				
12		8,49	0,71				
13		9,21	0,72				
14		9,91	0,70				
15	10,94	10,56	0,65				
16	11,64	11,26	0,70				
17	12,35	11,97	0,71				
18	13,04	12,66	0,69				
19	13,74	13,36	0,70				
20	14,45	14,07	0,71				
21	15,15	14,77	0,70				
22	15,83	15,45	0,68				
23	16,54	16,16	0,71				
24	17,25	16,87	0,71				
25	17,96	17,58	0,71				
26	18,64	18,26	0,68				
27	19,34	18,96	0,70				
28	20,03	19,65	0,69				
29	20,72	20,34	0,69				
30	21,4	21,02	0,68				
Durchschnitt							0,7

Abbildung A.14.: Messergebnis #127.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	28.3.2011	Probe:	52	aus Messung Nummer: 114			
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	30	aus Messung Nummer: 113			
Temperatur Anfang:	22	Temperatur Ende:	23	aus Messung Nummer: 101			
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,73	0,73				
2		1,56	0,83				
3		2,35	0,79				
4		3,15	0,8				
5		4	0,85				
6		4,78	0,78				
7		5,59	0,81				
8		6,4	0,81				
9		7,19	0,79				
10		8,01	0,82				
11		8,78	0,77				
12		9,6	0,82				
13		10,4	0,8				
14		11,17	0,77				
15		11,97	0,8				
16		12,77	0,8				
17		13,54	0,77				
18		14,35	0,81				
19		15,1	0,75				
20		15,9	0,8				
21		16,7	0,8				
22		17,48	0,78				
23		18,27	0,79				
24		19,06	0,79				
25		19,87	0,81				
26		20,64	0,77				
27		21,42	0,78				
28		22,18	0,76				
29		22,96	0,78				
30		23,74	0,78				
Durchschnitt				<b>0,79</b>			

Abbildung A.15.: Messergebnis #114.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	28.3.2011	Probe:	52	aus Messung Nummer: 115			
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	30	aus Messung Nummer: 101			
Temperatur Anfang:	23	Temperatur Ende:	23	aus Messung Nummer: 101			
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,89	0,89				
2		1,8	0,91				
3		2,77	0,97				
4		3,69	0,92				
5		4,64	0,95				
6		5,52	0,88				
7		6,43	0,91				
8		7,36	0,93				
9		8,26	0,9				
10		9,16	0,9				
11		10,07	0,91				
12		10,97	0,9				
13		11,87	0,9				
14		12,79	0,92				
15		13,7	0,91				
16		14,59	0,89				
17		15,5	0,91				
18		16,39	0,89				
19		17,27	0,88				
20		18,15	0,88				
21		19,04	0,89				
22		19,92	0,88				
23		20,81	0,89				
24		21,68	0,87				
25		22,54	0,86				
26		23,42	0,88				
27		24,29	0,87				
28		25,17	0,88				
29		26,05	0,88				
30		26,91	0,86				
Durchschnitt				<b>0,89</b>			

Abbildung A.16.: Messergebnis #115.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:	129		
Datum:	28.3.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU		
Innendruck [bar]:	250	Normalkraft [kN]:	30	Druck eingestellt:	NEU		
Temperatur Anfang:	29	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU		
Notiz:				aus Messung Nummer:	128		
				aus Messung Nummer:	120		
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,54	0,54				
2		1,17	0,63				
3		1,76	0,59				
4		2,35	0,59				
5		2,95	0,6				
6		3,55	0,6				
7		4,15	0,6				
8		4,74	0,59				
9		5,34	0,6				
10		5,93	0,59				
11		6,52	0,59				
12		7,11	0,59				
13		7,71	0,6				
14		8,29	0,58				
15		8,87	0,58				
16		9,44	0,57				
17		10,03	0,59				
18		10,62	0,59				
19		11,21	0,59				
20		11,78	0,57				
21		12,37	0,59				
22		12,96	0,59				
23		13,54	0,58				
24		14,12	0,58				
25		14,69	0,57				
26		15,28	0,59				
27		15,89	0,61				
28		16,43	0,54				
29		17	0,57				
30		17,6	0,6				
Durchschnitt			0,58				

Abbildung A.17.: Messergebnis #129.

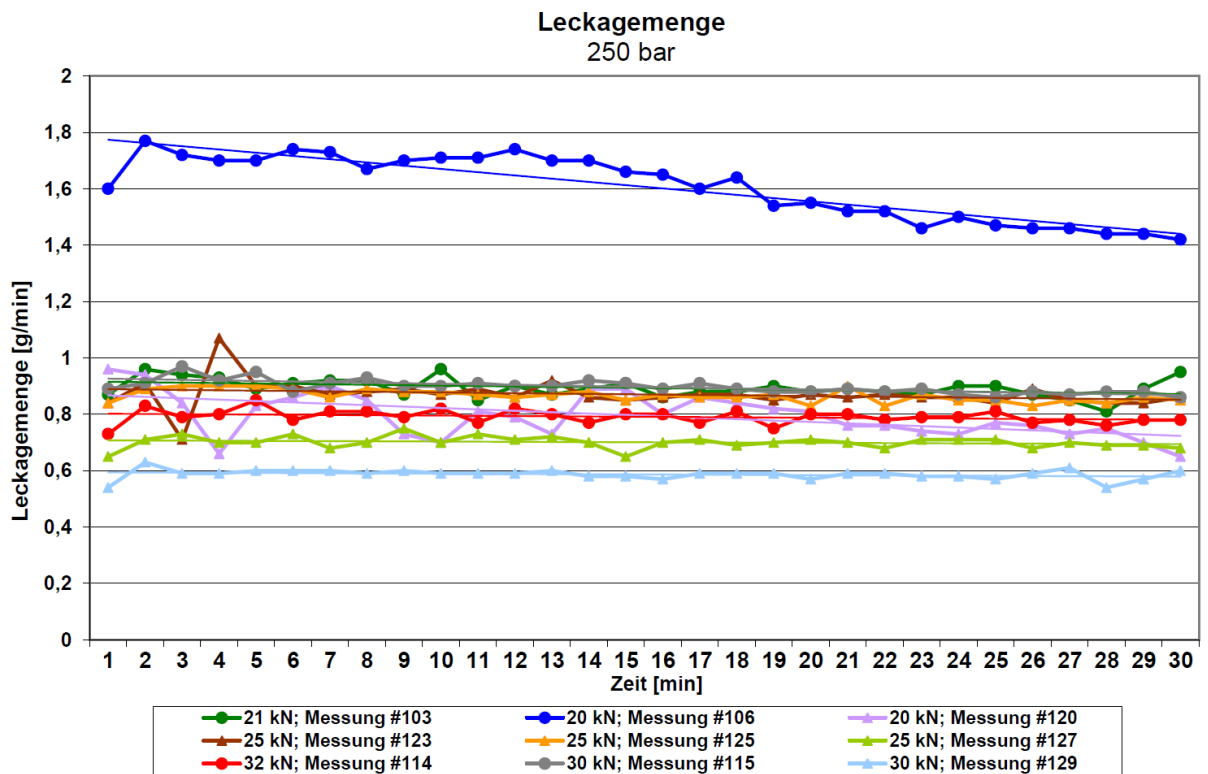


Abbildung A.18.: Messergebnisse 250 bar, P5A, P5B.



**Leckagemenge  
300 bar  
vorbeschädigte Proben**

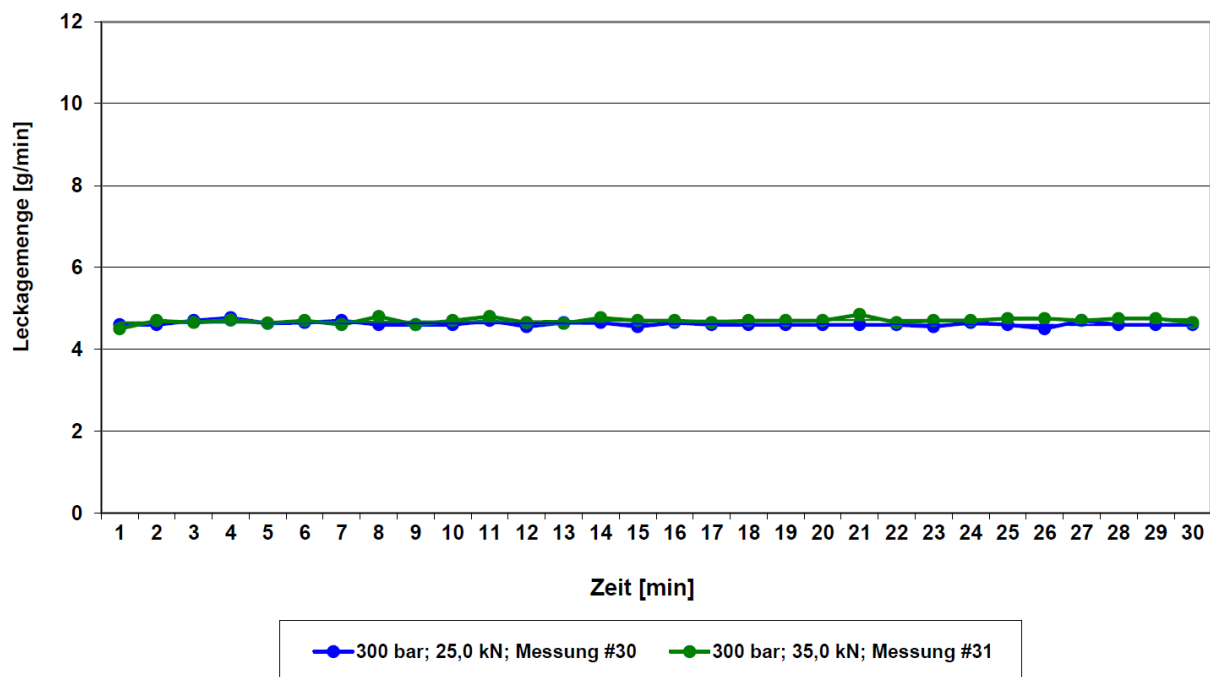


Abbildung A.19.: Messergebnisse 300 bar, P5A, P5B.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	24.3.2011	Probe:	52	104			
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	21	103			
Temperatur Anfang:	25	Temperatur Ende:	26	101			
Kraft eingestellt:		Druck eingestellt:					
NEU		NEU					
Proben zusammengebaut:		Proben zusammengebaut:					
NEU		NEU					
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,2	1,2				
2		2,48	1,28				
3		3,69	1,21				
4		4,89	1,2				
5		6,13	1,24				
6		7,35	1,22				
7		8,54	1,19				
8		9,75	1,21				
9		10,96	1,23				
10		12,2	1,22				
11		13,38	1,18				
12		14,58	1,2				
13		15,77	1,19				
14		16,96	1,19				
15		18,18	1,22				
16		19,4	1,22				
17		20,59	1,19				
18		21,81	1,22				
19		23	1,19				
20		24,18	1,18				
21		25,34	1,16				
22		26,51	1,17				
23		27,7	1,19				
24		28,91	1,21				
25		30,07	1,16				
26		31,25	1,18				
27		32,44	1,19				
28		33,63	1,19				
29		34,82	1,19				
30		35,95	1,13				
Durchschnitt			1,19				

Abbildung A.20.: Messergebnis #104.

Dichtheitsmessung										Messung Nr.:	107
Datum:	25.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	Temperatur	NEU	aus Messung Nummer:	106		
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	20,5	Druck eingestellt:	NEU	Temperatur	NEU	aus Messung Nummer:	106		
Temperatur Anfang:	21	Temperatur Ende:	22	Proben zusammengebaut:	NEU	Temperatur	NEU	aus Messung Nummer:	101		
Notiz:											
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,7	1,7								
2		3,53	1,83								
3		5,55	2,02								
4		7,85	2,1								
5		9,7	2,05								
6		11,73	2,03								
7		13,74	2,01								
8		15,75	2,01								
9		17,81	2,06								
10		19,85	2,04								
11		21,93	2,08								
12		23,99	1,96								
13		25,83	1,94								
14		27,75	1,92								
15		29,7	1,95								
16		31,62	1,92								
17		33,55	1,93								
18		35,46	1,91								
19		37,4	1,94								
20		39,27	1,87								
21		41,15	1,88								
22		43,01	1,86								
23		44,89	1,88								
24		46,72	1,83								
25		48,58	1,86								
26		50,48	1,9								
27		52,3	1,82								
28		54,16	1,86								
29		55,98	1,82								
30		57,84	1,86								
Durchschnitt											1,92

Abbildung A.21.: Messergebnis #107.

Dichtheitsmessung										Messung Nr.:	121
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	Temperatur	NEU	aus Messung Nummer:	120		
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	20	Druck eingestellt:	NEU	Temperatur	NEU	aus Messung Nummer:	120		
Temperatur Anfang:	23	Temperatur Ende:	23	Proben zusammengebaut:	NEU	Temperatur	NEU	aus Messung Nummer:	120		
Notiz:											
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,95	1,95								
2		3,75	1,8								
3		5,44	1,89								
4		7,26	1,82								
5		9,16	1,9								
6		11,01	1,85								
7		12,86	1,85								
8		14,67	1,81								
9		16,42	1,75								
10		18,12	1,7								
11		19,8	1,88								
12		21,46	1,86								
13		23,1	1,64								
14		24,7	1,6								
15		26,3	1,6								
16		27,93	1,63								
17		29,5	1,57								
18		31,04	1,54								
19		32,56	1,52								
20		34,1	1,54								
21		35,63	1,53								
22		37,15	1,52								
23		38,62	1,47								
24		40,12	1,5								
25		41,57	1,45								
26		43,02	1,45								
27		44,48	1,48								
28		45,93	1,45								
29		47,36	1,43								
30		48,8	1,44								
Durchschnitt											1,62

Abbildung A.22.: Messergebnis #121.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	105
Datum:	24.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	104
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	104
Temperatur Anfang:	26	Temperatur Ende:	26	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	101
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1	1				
2		2,12	1,12				
3		3,2	1,08				
4		4,32	1,12				
5		5,42	1,1				
6		6,52	1,1				
7		7,62	1,1				
8		8,71	1,09				
9		9,84	1,13				
10		10,92	1,08				
11		12,04	1,12				
12		13,14	1,1				
13		14,23	1,09				
14		15,35	1,12				
15		16,43	1,08				
16		17,57	1,14				
17		18,65	1,08				
18		19,79	1,14				
19		20,88	1,09				
20		22,02	1,14				
21		23,09	1,07				
22		24,23	1,14				
23		25,33	1,1				
24		26,43	1,1				
25		27,53	1,1				
26		28,62	1,09				
27		29,73	1,11				
28		30,85	1,12				
29		31,98	1,13				
30		33,07	1,09				
Durchschnitt							1,1

Abbildung A.23.: Messergebnis #105.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	108
Datum:	25.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	107
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	23	Temperatur Ende:	23	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	101
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,18	1,18				
2		2,41	1,23				
3		3,6	1,19				
4		4,76	1,16				
5		5,91	1,15				
6		7,03	1,12				
7		8,15	1,12				
8		9,21	1,06				
9		10,29	1,08				
10		11,37	1,08				
11		12,49	1,12				
12		13,55	1,06				
13		14,62	1,07				
14		15,68	1,06				
15		16,74	1,06				
16		17,81	1,07				
17		18,88	1,07				
18		19,94	1,06				
19		21,04	1,1				
20		22,08	1,04				
21		23,14	1,06				
22		24,21	1,07				
23		25,3	1,09				
24		26,39	1,09				
25		27,43	1,04				
26		28,53	1,1				
27		29,62	1,09				
28		30,68	1,06				
29		31,75	1,07				
30		32,81	1,06				
Durchschnitt							1,09

Abbildung A.24.: Messergebnis #108.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	121
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	121
Temperatur Anfang:	25	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	120
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		1,05	1,05			
2		2,17	1,12			
3		3,28	1,11			
4		4,4	1,12			
5		5,49	1,09			
6		6,61	1,12			
7		7,71	1,1			
8		8,83	1,12			
9		9,93	1,1			
10		11,04	1,11			
11		12,14	1,1			
12		13,26	1,12			
13		14,35	1,09			
14		15,47	1,12			
15		16,55	1,08			
16		17,67	1,12			
17		18,77	1,1			
18		19,86	1,09			
19		20,96	1,1			
20		22,03	1,07			
21		23,14	1,11			
22		24,22	1,08			
23		25,31	1,09			
24		26,44	1,13			
25		27,51	1,07			
26		28,61	1,1			
27		29,7	1,09			
28		30,8	1,1			
29		31,85	1,05			
30		32,97	1,12			
Durchschnitt						1,09

Abbildung A.25.: Messergebnis #122.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	28.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	109
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	30	Druck eingestellt:	NEU	101
Temperatur Anfang:	16	Temperatur Ende:	19	Proben zusammengebaut:	NEU	101
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		1,87	1,87			
2		3,85	1,98			
3		5,85	1,8			
4		7,35	1,7			
5		8,96	1,61			
6		10,48	1,52			
7		12,04	1,56			
8		13,54	1,5			
9		15,02	1,48			
10		16,45	1,43			
11		17,88	1,43			
12		19,28	1,4			
13		20,63	1,35			
14		21,97	1,34			
15		23,3	1,33			
16		24,59	1,29			
17		25,89	1,3			
18		27,24	1,35			
19		28,52	1,28			
20		29,82	1,3			
21		31,09	1,27			
22		32,36	1,27			
23		33,64	1,28			
24		34,9	1,26			
25		36,16	1,26			
26		37,43	1,27			
27		38,7	1,27			
28		39,95	1,25			
29		41,18	1,23			
30		42,4	1,22			
Durchschnitt						1,41

Abbildung A.26.: Messergebnis #109.

Dichtheitsmessung										Messung Nr.:	110
Datum:	28.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	109				
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	30	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:					
Temperatur Anfang:	19	Temperatur Ende:	21	Proben zusammen gebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	101				
Notiz:											
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,18	1,18								
2		2,41	1,23								
3		3,64	1,23								
4		4,89	1,25								
5		6,13	1,24								
6		7,35	1,22								
7		8,56	1,21								
8		9,77	1,21								
9		10,96	1,19								
10		12,17	1,21								
11		13,38	1,21								
12		14,58	1,2								
13		15,72	1,14								
14		16,88	1,16								
15		18,04	1,16								
16		19,21	1,17								
17		20,35	1,14								
18		21,48	1,13								
19		22,6	1,12								
20		23,73	1,13								
21		24,87	1,14								
22		25,98	1,11								
23		27,18	1,2								
24		28,26	1,08								
25		29,25	0,99								
26		30,48	1,23								
27		31,6	1,12								
28		32,68	1,08								
29		33,8	1,12								
30		34,88	1,08								
Durchschnitt											1,16

Abbildung A.27.: Messergebnis #110.

Dichtheitsmessung										Messung Nr.:	113
Datum:	28.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	112				
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	32	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:					
Temperatur Anfang:	22	Temperatur Ende:	22	Proben zusammen gebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	101				
Notiz:											
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,03	1,03								
2		2,15	1,12								
3		3,23	1,08								
4		4,36	1,13								
5		5,48	1,12								
6		6,59	1,11								
7		7,69	1,1								
8		8,77	1,08								
9		9,87	1,1								
10		10,97	1,1								
11		12,04	1,07								
12		13,1	1,06								
13		14,22	1,12								
14		15,26	1,04								
15		16,33	1,07								
16		17,41	1,08								
17		18,5	1,09								
18		19,54	1,04								
19		20,63	1,09								
20		21,71	1,08								
21		22,73	1,02								
22		23,81	1,08								
23		24,85	1,04								
24		25,9	1,05								
25		26,95	1,05								
26		28,02	1,07								
27		29,07	1,05								
28		30,13	1,06								
29		31,15	1,02								
30		32,22	1,07								
Durchschnitt											1,07

Abbildung A.28.: Messergebnis #113.

Dichtheitsmessung										Messung Nr.:	134
Datum:	18.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestell:	NEU	Temperatur	Leckage / Min	Leckage Σ	Leckage / Min	aus Messung Nummer:	
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestell:	NEU	Temperatur	Leckage / Min	Leckage Σ	Leckage / Min	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	22	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	Temperatur	Leckage / Min	Leckage Σ	Leckage / Min	aus Messung Nummer:	120
Notiz:											
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,36	0,36								
2		0,75	0,39								
3		1,12	0,37								
4		1,53	0,41								
5		1,94	0,41								
6		2,34	0,41								
7		2,72	0,38								
8		3,12	0,4								
9		3,5	0,38								
10		3,89	0,39								
11		4,28	0,39								
12		4,71	0,43								
13		5,13	0,42								
14		5,53	0,4								
15		5,94	0,41								
16		6,34	0,4								
17		6,74	0,4								
18		7,14	0,4								
19		7,53	0,39								
20		7,94	0,41								
21		8,34	0,4								
22		8,73	0,39								
23		9,13	0,4								
24		9,52	0,39								
25		9,9	0,38								
26		10,28	0,38								
27		10,67	0,39								
28		11,03	0,36								
29		11,41	0,38								
30		11,77	0,36								
Durchschnitt											0,39

Abbildung A.29.: Messergebnis #134.

Dichtheitsmessung										Messung Nr.:	138
Datum:	18.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestell:	NEU	Temperatur	Leckage / Min	Leckage Σ	Leckage / Min	aus Messung Nummer:	134
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestell:	NEU	Temperatur	Leckage / Min	Leckage Σ	Leckage / Min	aus Messung Nummer:	120
Temperatur Anfang:	33	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	Temperatur	Leckage / Min	Leckage Σ	Leckage / Min	aus Messung Nummer:	120
Notiz:											
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,23	0,23								
2		0,51	0,28								
3		0,76	0,25								
4		1,01	0,25								
5		1,28	0,27								
6		1,53	0,25								
7		1,77	0,24								
8		2,01	0,24								
9		2,24	0,23								
10		2,49	0,25								
11		2,72	0,23								
12		2,96	0,24								
13		3,19	0,23								
14		3,42	0,23								
15		3,64	0,22								
16		3,87	0,23								
17		4,09	0,22								
18		4,29	0,2								
19		4,51	0,22								
20		4,72	0,21								
21		4,92	0,2								
22		5,12	0,2								
23		5,32	0,2								
24		5,52	0,2								
25		5,72	0,2								
26		5,92	0,2								
27		6,13	0,21								
28		6,32	0,19								
29		6,52	0,2								
30		6,71	0,19								
Durchschnitt											0,22

Abbildung A.30.: Messergebnis #138.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:	142
Datum:	25.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU
Innendruck [bar]:	300	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU
Temperatur Anfang:	32	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU
Notiz:		Leckage / Min [g/min]		Leckage / Min [g/min]	
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
1		0,3	0,3		
2		0,66	0,36		
3		0,99	0,33		
4		1,33	0,34		
5		1,67	0,34		
6		2	0,33		
7		2,33	0,33		
8		2,68	0,32		
9		2,97	0,32		
10		3,29	0,32		
11		3,61	0,32		
12		3,91	0,3		
13		4,23	0,32		
14		4,54	0,31		
15		4,83	0,29		
16		5,14	0,31		
17		5,44	0,3		
18		5,73	0,29		
19		6,02	0,29		
20		6,32	0,3		
21		6,59	0,27		
22		6,89	0,3		
23		7,17	0,28		
24		7,45	0,28		
25		7,73	0,28		
26		8,01	0,28		
27		8,28	0,27		
28		8,55	0,27		
29		8,82	0,27		
30		9,09	0,27		
Durchschnitt			0,3		

Abbildung A.31.: Messergebnis #142.

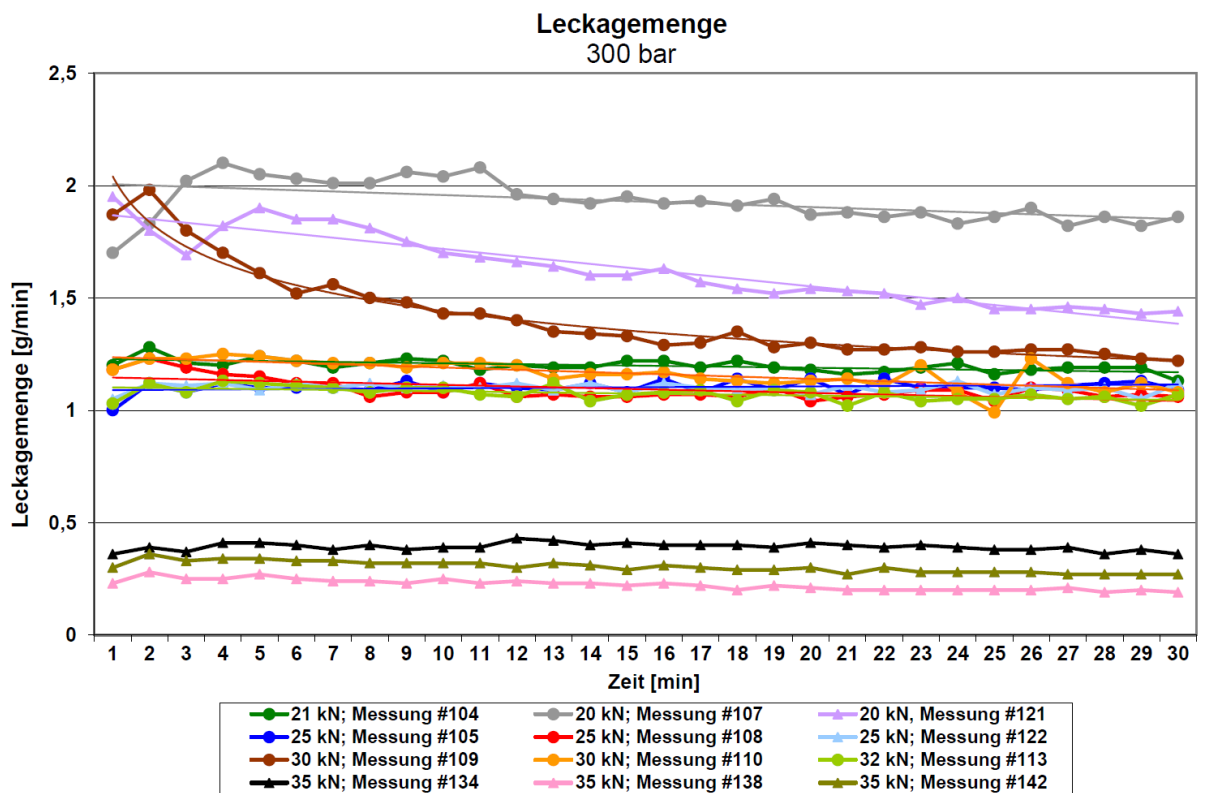


Abbildung A.32.: Messergebnisse 300 bar, P5A, P5B.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	124
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Temperatur Anfang:	27	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	120
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		1,28	1,28			
2		2,63	1,35			
3		3,99	1,36			
4		5,33	1,34			
5		6,66	1,33			
6		8,03	1,37			
7		9,35	1,32			
8		10,71	1,36			
9		12,07	1,36			
10		13,39	1,32			
11		14,75	1,36			
12		16,08	1,33			
13		17,44	1,36			
14		18,77	1,33			
15		20,10	1,33			
16		21,46	1,36			
17		22,82	1,36			
18		24,14	1,32			
19		25,49	1,35			
20		26,85	1,36			
21		28,18	1,33			
22		29,53	1,35			
23		30,85	1,32			
24		32,21	1,36			
25		33,53	1,32			
26		34,88	1,35			
27		36,20	1,32			
28		37,54	1,34			
29		38,86	1,32			
30		40,20	1,34			
Durchschnitt						1,34

Abbildung A.33.: Messergebnis #124.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	16.5.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	126
Innendruck [bar]:	360	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Temperatur Anfang:	29	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	120
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		1,24	1,24			
2		2,54	1,3			
3		3,86	1,32			
4		5,16	1,3			
5		6,45	1,29			
6		7,77	1,32			
7		9,07	1,3			
8		10,37	1,3			
9		11,67	1,3			
10		12,98	1,31			
11		14,27	1,29			
12		15,57	1,3			
13		16,85	1,28			
14		18,14	1,29			
15		19,43	1,29			
16		20,72	1,29			
17		22,00	1,28			
18		23,29	1,29			
19		24,57	1,28			
20		25,85	1,28			
21		27,14	1,29			
22		28,40	1,28			
23		29,63	1,23			
24		30,94	1,31			
25		32,21	1,27			
26		33,49	1,28			
27		34,77	1,28			
28		36,04	1,27			
29		37,32	1,28			
30		38,61	1,29			
Durchschnitt						1,28

Abbildung A.34.: Messergebnis #126.



Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	133			
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	25	aus Messung Nummer: 121			
Temperatur Anfang:	32	Temperatur Ende:		aus Messung Nummer: 120			
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,08	1,08				
2		2,23	1,15				
3		3,58	1,19				
4		4,58	1,18				
5		5,70	1,14				
6		6,82	1,12				
7		7,94	1,12				
8		9,12	1,18				
9		10,25	1,13				
10		11,40	1,15				
11		12,57	1,17				
12		13,69	1,12				
13		14,78	1,09				
14		15,99	1,21				
15		17,09	1,11				
16		18,23	1,14				
17		19,36	1,13				
18		20,50	1,14				
19		21,62	1,12				
20		22,78	1,16				
21		23,89	1,11				
22		24,96	1,07				
23		26,07	1,11				
24		27,22	1,15				
25		28,32	1,11				
26		29,44	1,12				
27		30,56	1,12				
28		31,70	1,14				
29		32,82	1,12				
30		33,95	1,13				
Durchschnitt				1,13			

Abbildung A.35.: Messergebnis #133.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	128			
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	30	aus Messung Nummer: 120			
Temperatur Anfang:	28	Temperatur Ende:		aus Messung Nummer: 120			
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,97	0,97				
2		1,94	0,97				
3		2,94	1,01				
4		3,93	0,99				
5		4,95	1,02				
6		5,95	1,01				
7		6,95	1,01				
8		7,93	0,98				
9		8,94	1,01				
10		9,94	1,01				
11		10,94	1,01				
12		11,97	1,03				
13		12,95	0,98				
14		13,96	1,01				
15		14,96	1,01				
16		15,99	1,03				
17		16,98	0,99				
18		17,98	1,01				
19		18,98	1,01				
20		19,98	1,01				
21		21,02	1,02				
22		22,03	1,01				
23		23,06	1,03				
24		24,07	1,01				
25		25,08	1,01				
26		26,08	1,01				
27		27,09	1,01				
28		28,1	1,01				
29		29,12	1,02				
30		30,15	1,03				
Durchschnitt				1			

Abbildung A.36.: Messergebnis #128.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	aus Messung Nummer:			
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	32	aus Messung Nummer:			
Temperatur Anfang:	29	Temperatur Ende:		aus Messung Nummer:			
Notiz:							
		Kraft eingestellt:	NEU	128			
		Druck eingestellt:	NEU	120			
		Proben zusammengebaut:	NEU	120			
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage $\Sigma$ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage $\Sigma$ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,86	0,86				
2		1,8	0,94				
3		2,7	0,9				
4		3,63	0,93				
5		4,56	0,93				
6		5,52	0,96				
7		6,43	0,91				
8		7,36	0,93				
9		8,29	0,93				
10		9,24	0,95				
11		10,2	0,96				
12		11,11	0,91				
13		12,06	0,95				
14		13,01	0,95				
15		13,94	0,93				
16		14,89	0,95				
17		15,83	0,94				
18		16,78	0,95				
19		17,73	0,95				
20		18,68	0,95				
21		19,64	0,96				
22		20,6	0,96				
23		21,54	0,96				
24		22,5	0,96				
25		23,45	0,95				
26		24,43	0,98				
27		25,36	0,93				
28		26,33	0,97				
29		27,3	0,97				
30		28,26	0,96				
Durchschnitt							<b>0,94</b>

Abbildung A.37.: Messergebnis #130.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	aus Messung Nummer:			
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	30	aus Messung Nummer:			
Temperatur Anfang:	32	Temperatur Ende:		aus Messung Nummer:			
Notiz:							
		Kraft eingestellt:	NEU	128			
		Druck eingestellt:	NEU	120			
		Proben zusammengebaut:	NEU	120			
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage $\Sigma$ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage $\Sigma$ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,92	0,92				
2		1,89	0,97				
3		2,91	1,02				
4		3,9	0,99				
5		4,86	0,96				
6		5,84	0,98				
7		6,83	0,99				
8		7,82	0,99				
9		8,81	0,99				
10		9,8	0,99				
11		10,79	0,99				
12		11,75	0,96				
13		12,76	1,01				
14		13,73	0,97				
15		14,72	0,99				
16		15,71	0,99				
17		16,68	0,97				
18		17,66	0,98				
19		18,65	0,99				
20		19,65	1				
21		20,64	0,99				
22		21,63	0,99				
23		22,6	0,97				
24		23,62	1,02				
25		24,58	0,96				
26		25,54	0,96				
27		26,54	1				
28		27,53	0,99				
29		28,51	0,98				
30		29,52	1,01				
Durchschnitt							<b>0,98</b>

Abbildung A.38.: Messergebnis #132.

Dichtheitsmessung					Messung Nr.:
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU
Temperatur Anfang:	24	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU
Notiz:					
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
1		0,45	0,45		
2		0,95	0,5		
3		1,45	0,5		
4		1,96	0,51		
5		2,46	0,5		
6		2,97	0,51		
7		3,46	0,49		
8		3,97	0,51		
9		4,47	0,5		
10		4,98	0,51		
11		5,46	0,48		
12		5,95	0,49		
13		6,44	0,49		
14		6,94	0,5		
15		7,42	0,48		
16		7,91	0,49		
17		8,41	0,5		
18		8,9	0,49		
19		9,42	0,52		
20		9,9	0,48		
21		10,4	0,5		
22		10,91	0,51		
23		11,41	0,5		
24		11,89	0,48		
25		12,38	0,49		
26		12,86	0,48		
27		13,33	0,47		
28		13,8	0,47		
29		14,27	0,47		
30		14,74	0,47		
Durchschnitt				0,49	

Abbildung A.39.: Messergebnis #135.

Dichtheitsmessung					Messung Nr.:
Datum:	18.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU
Temperatur Anfang:	33	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU
Notiz:					
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]
1		0,35	0,35		
2		0,73	0,38		
3		1,09	0,38		
4		1,47	0,38		
5		1,86	0,39		
6		2,22	0,36		
7		2,61	0,39		
8		3	0,39		
9		3,41	0,41		
10		3,81	0,4		
11		4,21	0,4		
12		4,58	0,37		
13		4,95	0,37		
14		5,33	0,38		
15		5,69	0,36		
16		6,07	0,38		
17		6,43	0,36		
18		6,79	0,36		
19		7,14	0,35		
20		7,49	0,35		
21		7,85	0,36		
22		8,18	0,33		
23		8,51	0,33		
24		8,85	0,34		
25		9,17	0,32		
26		9,5	0,33		
27		9,83	0,33		
28		10,17	0,34		
29		10,48	0,31		
30		10,8	0,32		
Durchschnitt				0,36	

Abbildung A.40.: Messergebnis #139.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	25.5.2011	Probe:	53	143			
Innendruck [bar]:	350	Normalkraft [kN]:	35	aus Messung Nummer: 140			
Temperatur Anfang:	32	Temperatur Ende:		aus Messung Nummer: 120			
Kraft eingestellt:		NEU	Temperatur				
Druck eingestellt:		NEU	Leckage Σ [g]				
Proben zusammengebaut:		NEU	Leckage / Min [g/min]				
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,4	0,4				
2		0,83	0,43				
3		1,25	0,42				
4		1,67	0,42				
5		2,09	0,42				
6		2,5	0,41				
7		2,9	0,4				
8		3,31	0,41				
9		3,73	0,42				
10		4,13	0,4				
11		4,51	0,38				
12		4,92	0,41				
13		5,31	0,39				
14		5,7	0,39				
15		6,08	0,38				
16		6,47	0,39				
17		6,84	0,37				
18		7,2	0,36				
19		7,59	0,39				
20		7,95	0,36				
21		8,32	0,37				
22		8,68	0,36				
23		9,04	0,36				
24		9,41	0,37				
25		9,74	0,33				
26		10,09	0,35				
27		10,44	0,35				
28		10,81	0,37				
29		11,11	0,3				
30		11,46	0,35				
Durchschnitt			0,38				

Abbildung A.41.: Messergebnis #143.

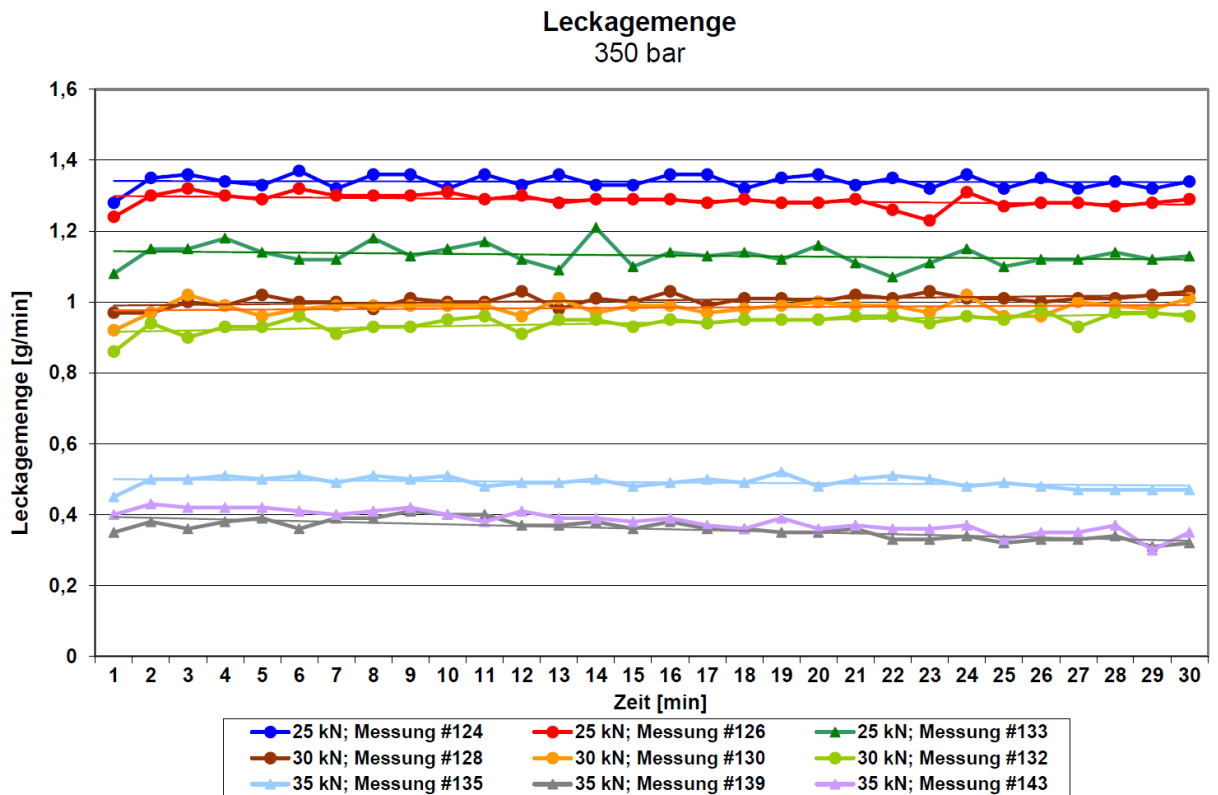


Abbildung A.42.: Messergebnisse 350 bar, P5A, P5B.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	111
Datum:	28.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	110
Innendruck [bar]:	400	Normalkraft [kN]:	31	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	21	Temperatur Ende:	22	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	101
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		2,43	2,43				
2		4,85	2,42				
3		7,73	2,58				
4		10,63	2,61				
5		13,44	2,69				
6		16,3	2,72				
7		19,15	2,74				
8		21,92	2,77				
9		24,7	2,78				
10		27,3	2,76				
11		29,85	2,65				
12		32,52	2,71				
13		35,1	2,68				
14		37,64	2,69				
15		40,25	2,68				
16		42,83	2,68				
17		45,37	2,67				
18		47,87	2,55				
19		50,35	2,48				
20		52,86	2,51				
21		55,25	2,59				
22		57,66	2,41				
23		60,1	2,44				
24		62,5	2,4				
25		64,8	2,3				
26		67,17	2,37				
27		69,44	2,27				
28		71,73	2,29				
29		74,02	2,26				
30		76,35	2,33				
Durchschnitt							2,54

Abbildung A.43.: Messergebnis #111.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	112
Datum:	28.3.2011	Probe:	52	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	111
Innendruck [bar]:	400	Normalkraft [kN]:	32	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	22	Temperatur Ende:	22	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	101
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		2,42	2,42				
2		4,91	2,46				
3		7,37	2,46				
4		9,76	2,39				
5		12,14	2,38				
6		14,51	2,37				
7		16,86	2,35				
8		19,18	2,32				
9		21,52	2,34				
10		23,86	2,34				
11		26,15	2,29				
12		28,45	2,3				
13		30,73	2,28				
14		32,98	2,25				
15		35,25	2,27				
16		37,48	2,23				
17		39,75	2,27				
18		41,89	2,14				
19		44,11	2,22				
20		46,23	2,12				
21		48,33	2,1				
22		50,42	2,09				
23		52,48	2,06				
24		54,54	2,06				
25		56,6	2,06				
26		58,66	2,06				
27		60,7	2,04				
28		62,73	2,03				
29		64,75	2,02				
30		66,73	1,98				
Durchschnitt							2,22

Abbildung A.44.: Messergebnis #112.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	16.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	131
Innendruck [bar]:	400	Normalkraft [kN]:	30	Druck eingestellt:	NEU	128
Temperatur Anfang:	30	Temperatur Ende:	30	Proben zusammengebaut:	NEU	120
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		1,12	1,12			
2		2,2	1,08			
3		3,37	1,17			
4		4,52	1,15			
5		5,7	1,18			
6		6,86	1,16			
7		8	1,14			
8		9,19	1,19			
9		10,34	1,15			
10		11,51	1,17			
11		12,7	1,19			
12		13,86	1,16			
13		15,02	1,16			
14		16,22	1,2			
15		17,36	1,14			
16		18,56	1,2			
17		19,71	1,15			
18		20,87	1,16			
19		22,05	1,18			
20		23,24	1,19			
21		24,34	1,1			
22		25,52	1,18			
23		26,72	1,2			
24		27,87	1,15			
25		29,04	1,17			
26		30,25	1,21			
27		31,43	1,18			
28		32,6	1,17			
29		33,77	1,17			
30		34,99	1,22			
Durchschnitt						1,16

Abbildung A.45.: Messergebnis #131.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	18.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	136
Innendruck [bar]:	400	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU	134
Temperatur Anfang:	27	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	120
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		0,62	0,62			
2		1,3	0,68			
3		1,98	0,68			
4		2,67	0,69			
5		3,36	0,69			
6		4,04	0,68			
7		4,72	0,68			
8		5,34	0,62			
9		6,07	0,73			
10		6,74	0,67			
11		7,42	0,68			
12		8,09	0,67			
13		8,72	0,63			
14		9,38	0,66			
15		10,04	0,66			
16		10,69	0,65			
17		11,33	0,64			
18		11,99	0,66			
19		12,63	0,64			
20		13,27	0,64			
21		13,91	0,64			
22		14,54	0,63			
23		15,18	0,64			
24		15,82	0,64			
25		16,46	0,64			
26		17,08	0,62			
27		17,72	0,64			
28		18,35	0,63			
29		18,96	0,61			
30		19,58	0,62			
Durchschnitt						0,65

Abbildung A.46.: Messergebnis #136.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	140
Datum:	25.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Innendruck [bar]:	400	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	23	Temperatur Ende:		Proben zusammen- gebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	120
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,6	0,6				
2		1,23	0,63				
3		1,87	0,64				
4		2,5	0,63				
5		3,14	0,64				
6		3,78	0,64				
7		4,42	0,64				
8		5,05	0,63				
9		5,71	0,66				
10		6,34	0,63				
11		6,98	0,64				
12		7,62	0,64				
13		8,24	0,62				
14		8,87	0,63				
15		9,52	0,65				
16		10,14	0,62				
17		10,8	0,66				
18		11,41	0,61				
19		12,04	0,63				
20		12,67	0,63				
21		13,31	0,64				
22		13,94	0,63				
23		14,57	0,63				
24		15,22	0,65				
25		15,86	0,64				
26		16,5	0,64				
27		17,14	0,64				
28		17,79	0,65				
29		18,44	0,65				
30		19,08	0,64				
Durchschnitt							0,63

Abbildung A.47.: Messergebnis #140.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	144
Datum:	25.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	140
Innendruck [bar]:	400	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	33	Temperatur Ende:		Proben zusammen- gebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	120
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,65	0,65				
2		1,35	0,7				
3		2,08	0,73				
4		2,74	0,68				
5		3,46	0,72				
6		4,13	0,67				
7		4,81	0,68				
8		5,48	0,67				
9		6,16	0,68				
10		6,83	0,67				
11		7,5	0,67				
12		8,17	0,67				
13		8,83	0,66				
14		9,5	0,67				
15		10,15	0,65				
16		10,82	0,67				
17		11,46	0,64				
18		12,12	0,66				
19		12,77	0,65				
20		13,4	0,63				
21		14,05	0,65				
22		14,69	0,64				
23		15,33	0,64				
24		15,97	0,64				
25		16,6	0,63				
26		17,24	0,64				
27		17,87	0,63				
28		18,51	0,64				
29		19,14	0,63				
30		19,76	0,62				
Durchschnitt							0,65

Abbildung A.48.: Messergebnis #144.

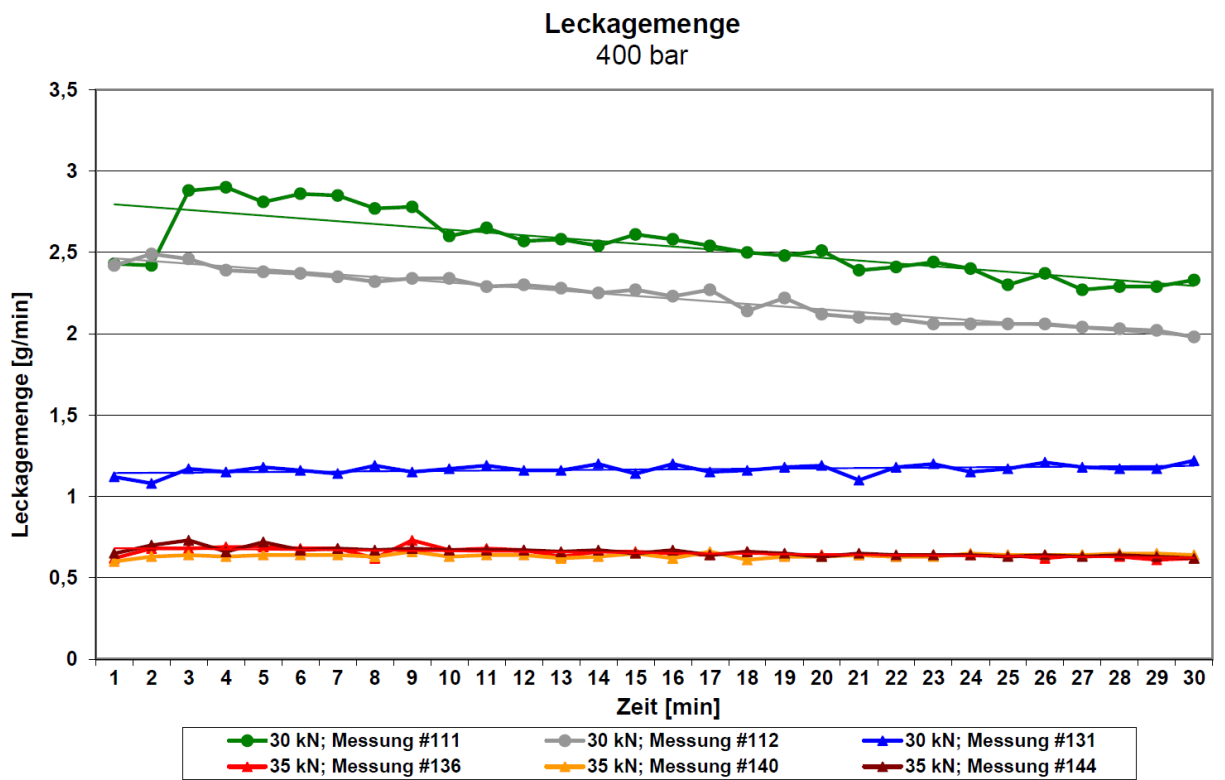


Abbildung A.49.: Messergebnisse 400 bar, P5A, P5B.



Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	18.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	137
Innendruck [bar]:	450	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU	134
Temperatur Anfang:	31	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	120
Notiz: Messung nach 13 Minuten unterbrochen, Druck von 0 neu aufgebaut						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		0,75	0,75			
2		1,56	0,81			
3		2,38	0,82			
4		3,2	0,82			
5		4,02	0,82			
6		4,82	0,8			
7		5,64	0,82			
8		6,46	0,82			
9		7,27	0,81			
10		8,08	0,81			
11		8,92	0,84			
12		9,7	0,78			
13	10,85	10,5	0,8			
14	11,45	11,1	0,6			
15	12,09	11,74	0,64			
16	12,73	12,38	0,64			
17	13,36	13,01	0,63			
18	13,99	13,64	0,63			
19	14,61	14,26	0,62			
20	15,22	14,87	0,61			
21	15,83	15,48	0,61			
22	16,43	16,08	0,6			
23	17,04	16,69	0,61			
24	17,64	17,29	0,6			
25	18,24	17,89	0,6			
26	18,83	18,48	0,59			
27	19,42	19,07	0,59			
28	20,01	19,66	0,59			
29	20,58	20,23	0,57			
30	21,16	20,81	0,58			
Durchschnitt						0,69

Abbildung A.50.: Messergebnis #137.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:
Datum:	25.5.2011	Probe:	53	Kraft eingestellt:	NEU	141
Innendruck [bar]:	450	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU	140
Temperatur Anfang:	31	Temperatur Ende:		Proben zusammengebaut:	NEU	120
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		0,86	0,86			
2		1,77	0,91			
3		2,66	0,89			
4		3,57	0,91			
5		4,49	0,92			
6		5,37	0,88			
7		6,25	0,88			
8		7,14	0,89			
9		8,04	0,9			
10		8,93	0,89			
11		9,81	0,88			
12		10,73	0,92			
13		11,58	0,85			
14		12,48	0,9			
15		13,34	0,86			
16		14,22	0,88			
17		15,09	0,87			
18		15,97	0,88			
19		16,85	0,88			
20		17,71	0,86			
21		18,58	0,87			
22		19,46	0,88			
23		20,33	0,87			
24		21,21	0,86			
25		22,07	0,86			
26		22,95	0,88			
27		23,83	0,88			
28		24,69	0,86			
29		25,57	0,88			
30		26,46	0,89			
Durchschnitt						0,88

Abbildung A.51.: Messergebnis #141.

Dichtheitsmessung				Messung Nr.:			
Datum:	25.5.2011	Probe:	53	145			
Innendruck [bar]:	450	Normalkraft [kN]:	35	aus Messung Nummer: 140			
Temperatur Anfang:	35	Temperatur Ende:		aus Messung Nummer: 120			
Kraft eingestellt:		Druck eingestellt:		NEU			
Proben zusammengebaut:		Proben zusammengebaut:		NEU			
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / [g/min]
1		0,84	0,84				
2		1,75	0,91				
3		2,61	0,86				
4		3,5	0,89				
5		4,38	0,88				
6		5,24	0,86				
7		6,13	0,89				
8		6,99	0,86				
9		7,88	0,89				
10		8,72	0,84				
11		9,6	0,88				
12		10,45	0,85				
13		11,35	0,9				
14		12,2	0,85				
15		13,02	0,82				
16		13,86	0,84				
17		14,71	0,85				
18		15,56	0,85				
19		16,4	0,84				
20		17,23	0,83				
21		18,08	0,85				
22		18,91	0,83				
23		19,78	0,87				
24		20,58	0,8				
25		21,41	0,83				
26		22,27	0,86				
27		23,06	0,79				
28		23,89	0,83				
29		24,73	0,84				
30		25,54	0,81				
Durchschnitt			<b>0,85</b>				

Abbildung A.52.: Messergebnis #145.

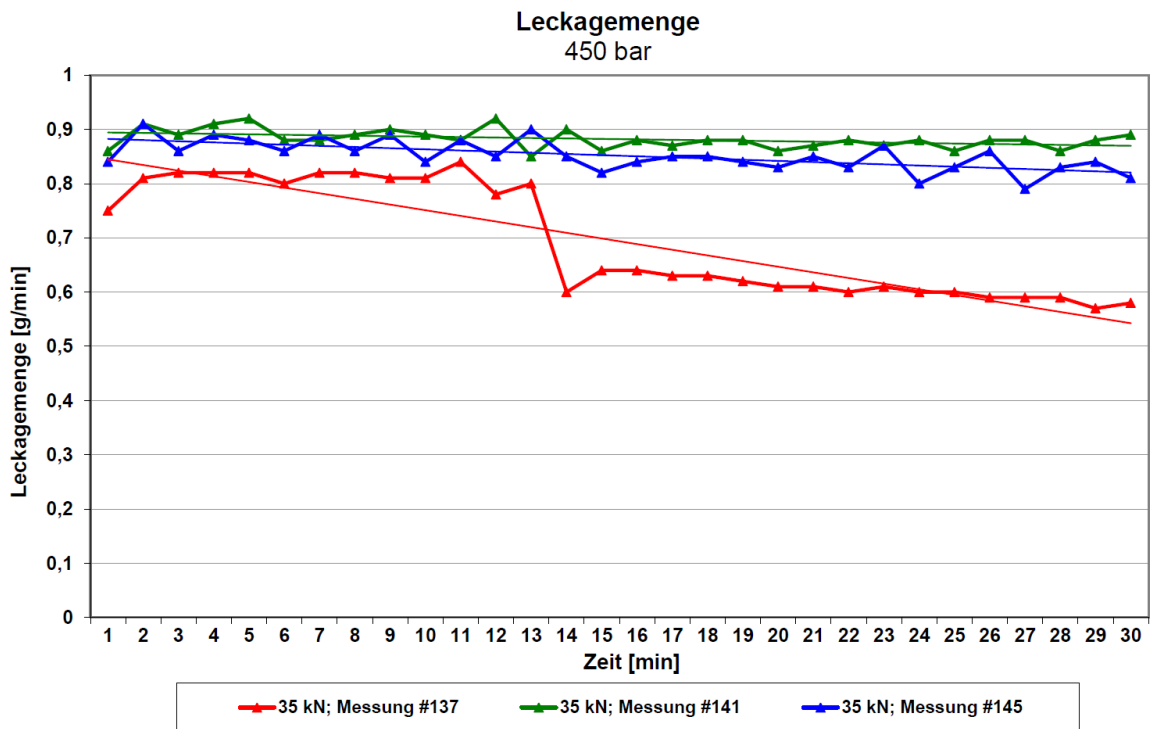


Abbildung A.53.: Messergebnisse 450 bar, P5A, P5B.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	220
Datum:	8.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	220
Innendruck [bar]:	400	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	23	Temperatur Ende:	23	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	219
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,13	0,13	16		1,43	0
2		0,3	0,17	17		1,43	0
3		0,47	0,17	18		1,43	0
4		0,77	0,3	19		1,43	0
5		1	0,23	20		1,43	0
6		1,1	0,1	21		1,43	0
7		1,18	0,08	22		1,43	0
8		1,27	0,09	23		1,43	0
9		1,35	0,08	24		1,43	0
10		1,37	0,02	25		1,43	0
11		1,4	0,03	26		1,43	0
12		1,42	0,02	27		1,43	0
13		1,43	0,01	28		1,43	0
14		1,43	0	29		1,43	0
15		1,43	0	30		1,43	0
Durchschnitt						0,09	

Abbildung A.54.: Messergebnis #220.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	221
Datum:	8.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	220
Innendruck [bar]:	500	Normalkraft [kN]:	25	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	24	Temperatur Ende:	24	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	219
Notiz: Messung angefangen bei Masse 11,16g							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		11,43	0,27	16		15,89	0,28
2		11,76	0,33	17		16,14	0,25
3		12,09	0,33	18		16,4	0,26
4		12,41	0,32	19		16,66	0,26
5		12,74	0,33	20		16,91	0,25
6		13,04	0,3	21		17,19	0,28
7		13,36	0,32	22		17,45	0,26
8		13,66	0,3	23		17,7	0,25
9		13,97	0,31	24		17,93	0,23
10		14,29	0,32	25		18,16	0,23
11		14,56	0,27	26		18,39	0,23
12		14,85	0,29	27		18,62	0,23
13		15,1	0,25	28		18,84	0,22
14		15,35	0,25	29		19,06	0,22
15		15,61	0,26	30		19,28	0,22
Durchschnitt						0,29	

Abbildung A.55.: Messergebnis #221.

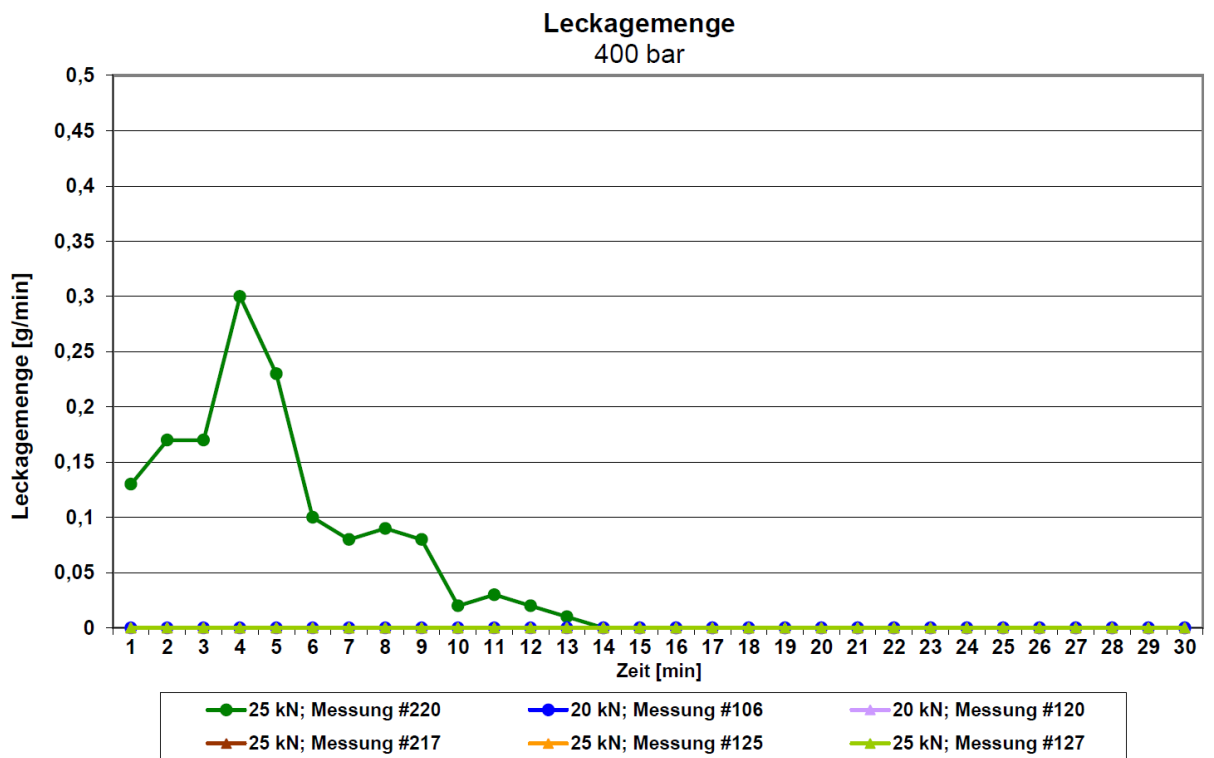


Abbildung A.56.: Messergebnisse 400 bar, P55A, P55B.

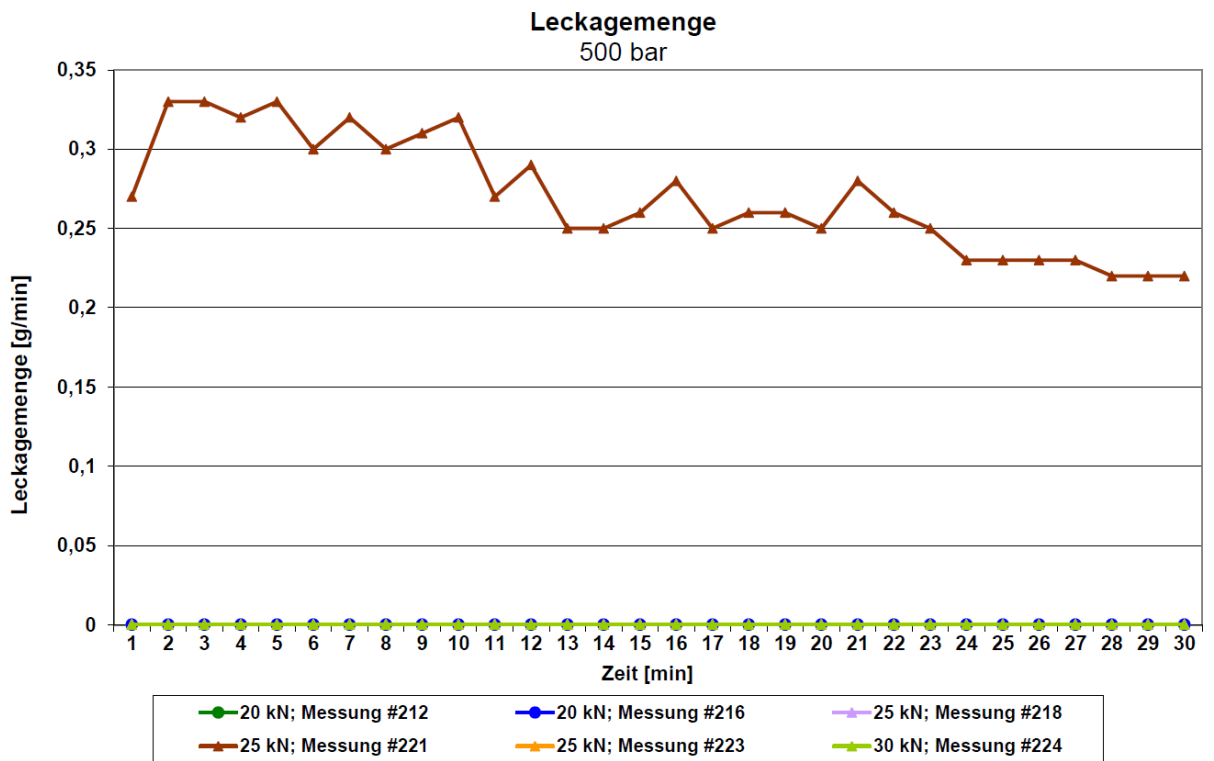


Abbildung A.57.: Messergebnisse 500 bar, P55A, P55B .

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	228
Datum:	8.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Innendruck [bar]:	700	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	20	Temperatur Ende:	21	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	221
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leakage Σ [g]	Leakage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leakage Σ [g]	Leakage / Min [g/min]
1		0,22	0,22	16		4,72	0,29
2		0,56	0,34	17		4,98	0,26
3		0,85	0,29	18		5,26	0,28
4		1,18	0,33	19		5,53	0,27
5		1,48	0,3	20		5,8	0,27
6		1,79	0,31	21		6,07	0,27
7		2,08	0,29	22		6,35	0,28
8		2,39	0,31	23		6,61	0,26
9		2,69	0,3	24		6,9	0,29
10		2,98	0,29	25		7,18	0,28
11		3,3	0,32	26		7,43	0,25
12		3,59	0,29	27		7,7	0,27
13		3,89	0,3	28		7,98	0,28
14		4,18	0,29	29		8,25	0,27
15		4,43	0,25	30		8,52	0,27
<b>Durchschnitt</b>							<b>0,29</b>

Abbildung A.58.: Messergebnis #228.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	229
Datum:	8.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	228
Innendruck [bar]:	700	Normalkraft [kN]:	35	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	21	Temperatur Ende:	21	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	221
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leakage Σ [g]	Leakage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leakage Σ [g]	Leakage / Min [g/min]
1		0,25	0,25	16		4,53	0,27
2		0,56	0,31	17		4,8	0,27
3		0,85	0,29	18		5,05	0,25
4		1,16	0,31	19		5,31	0,26
5		1,46	0,3	20		5,54	0,23
6		1,75	0,29	21		5,8	0,26
7		2,03	0,28	22		6,03	0,23
8		2,32	0,29	23		6,28	0,25
9		2,61	0,29	24		6,51	0,23
10		2,89	0,28	25		6,74	0,23
11		3,18	0,29	26		6,97	0,23
12		3,46	0,28	27		7,2	0,23
13		3,71	0,25	28		7,42	0,22
14		4	0,29	29		7,64	0,22
15		4,26	0,26	30		7,84	0,2
<b>Durchschnitt</b>							<b>0,28</b>

Abbildung A.59.: Messergebnis #229.

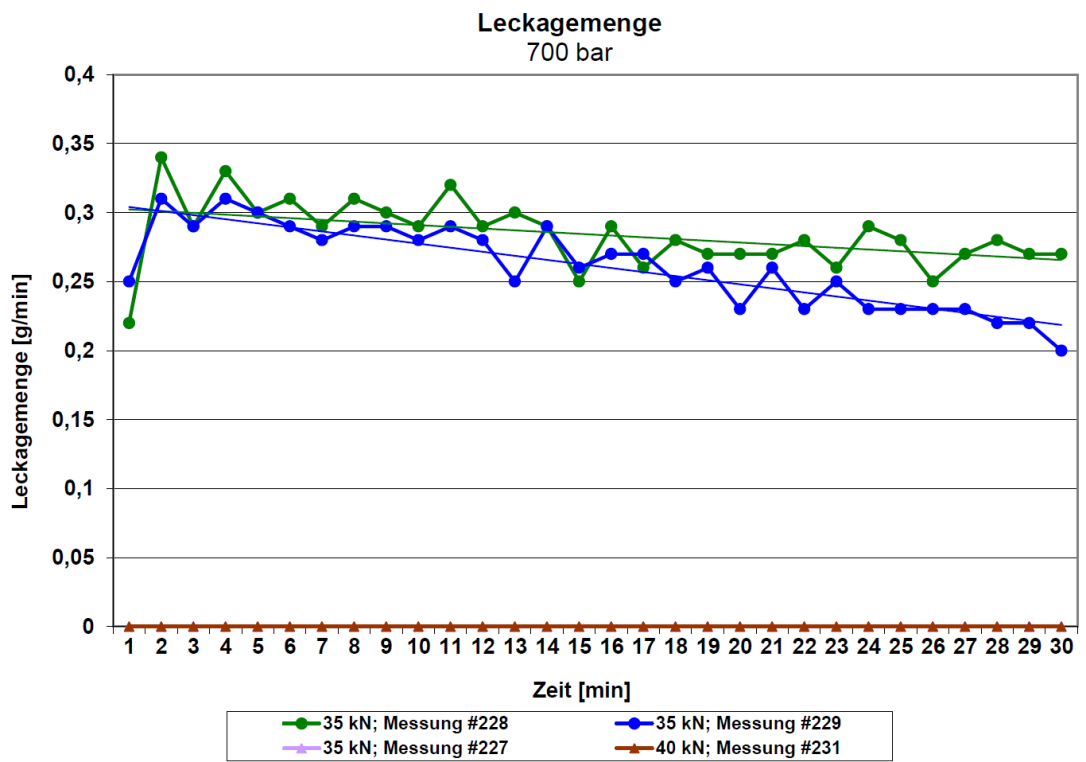


Abbildung A.60.: Messergebnisse 700 bar, P55A, P55B.

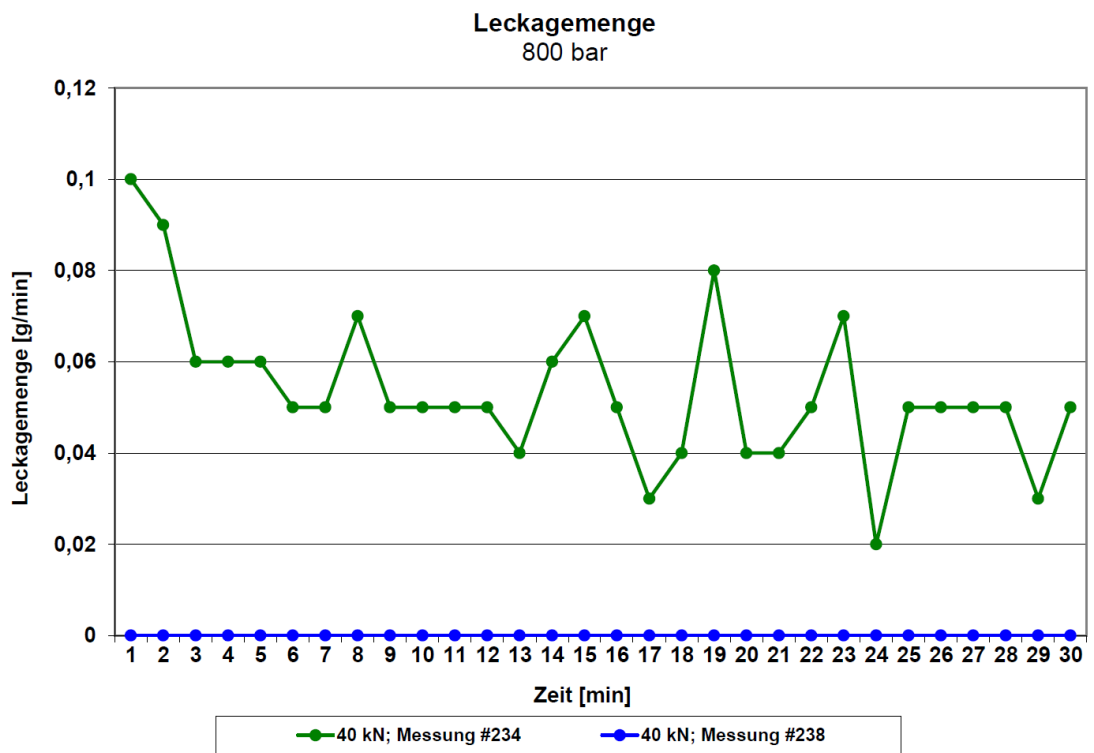


Abbildung A.61.: Messergebnisse 800 bar, P55A, P55B.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	234
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	Messung aus Nummer:	228
Innendruck [bar]:	800	Normalkraft [kN]:	40	Druck eingestellt:	NEU	Messung aus Nummer:	
Temperatur Anfang:	22	Temperatur Ende:	22	Proben zusammengebaut:	NEU	Messung aus Nummer:	221
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,1	0,1	16		0,96	0,05
2		0,19	0,09	17		0,99	0,03
3		0,25	0,06	18		1,03	0,04
4		0,31	0,06	19		1,11	0,08
5		0,37	0,06	20		1,15	0,04
6		0,42	0,05	21		1,19	0,04
7		0,47	0,05	22		1,24	0,05
8		0,54	0,07	23		1,31	0,07
9		0,59	0,05	24		1,33	0,02
10		0,64	0,05	25		1,38	0,05
11		0,69	0,05	26		1,43	0,05
12		0,74	0,05	27		1,48	0,05
13		0,78	0,04	28		1,53	0,05
14		0,84	0,06	29		1,56	0,03
15		0,91	0,07	30		1,61	0,05
Durchschnitt							0,06

Abbildung A.62.: Messergebnis #234.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	235
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	Messung aus Nummer:	230
Innendruck [bar]:	900	Normalkraft [kN]:	40	Druck eingestellt:	NEU	Messung aus Nummer:	
Temperatur Anfang:	23	Temperatur Ende:	23	Proben zusammengebaut:	NEU	Messung aus Nummer:	221
<b>Notiz:</b>							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		3,03	3,03	16		48,41	2,84
2		6,06	3,03	17		51,25	2,84
3		9,21	3,15	18		54,02	2,77
4		12,35	3,14	19		56,79	2,77
5		15,5	3,15	20		59,56	2,77
6		18,6	3,1	21		62,33	2,77
7		21,66	3,06	22		65,07	2,74
8		24,72	3,06	23		67,78	2,71
9		27,8	3,08	24		70,44	2,66
10		30,81	3,01	25		73,15	2,71
11		33,83	3,02	26		75,8	2,65
12		36,79	2,96	27		78,44	2,64
13		39,75	2,96	28		81,06	2,62
14		42,69	2,94	29		83,65	2,59
15		45,57	2,88	30		86,29	2,64
Durchschnitt							3,03

Abbildung A.63.: Messergebnis #235.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.: 239
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer: 230
Innendruck [bar]:	900	Normalkraft [kN]:	40	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Temperatur Anfang:	24	Temperatur Ende:	24	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer: 219
<b>Notiz:</b>						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		1,92	1,92	16		2,03
2		3,92	2	17		2,06
3		6,06	2,14	18		1,97
4		8,14	2,08	19		1,94
5		10,24	2,1	20		2,02
6		12,34	2,1	21		2,03
7		14,45	2,11	22		1,96
8		16,53	2,08	23		1,94
9		18,59	2,06	24		1,97
10		20,64	2,05	25		1,94
11		22,69	2,05	26		1,94
12		24,74	2,05	27		1,91
13		26,78	2,04	28		1,92
14		28,82	2,04	29		1,93
15		30,8	1,98	30		1,88
Durchschnitt						2,05

Abbildung A.64.: Messergebnis #239.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.: 240
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer: 230
Innendruck [bar]:	900	Normalkraft [kN]:	40	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Temperatur Anfang:	25	Temperatur Ende:	25	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer: 219
<b>Notiz:</b>						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		1,46	1,46	16		1,61
2		2,97	1,51	17		1,57
3		4,41	1,44	18		1,63
4		5,82	1,41	19		1,63
5		7,22	1,4	20		1,59
6		8,6	1,38	21		1,6
7		9,93	1,33	22		1,59
8		11,3	1,37	23		1,59
9		12,59	1,29	24		1,58
10		13,89	1,3	25		1,59
11		15,27	1,38	26		1,59
12		16,78	1,51	27		1,56
13		18,43	1,65	28		1,59
14		20,02	1,59	29		1,57
15		21,65	1,63	30		1,55
Durchschnitt						1,44

Abbildung A.65.: Messergebnis #240.



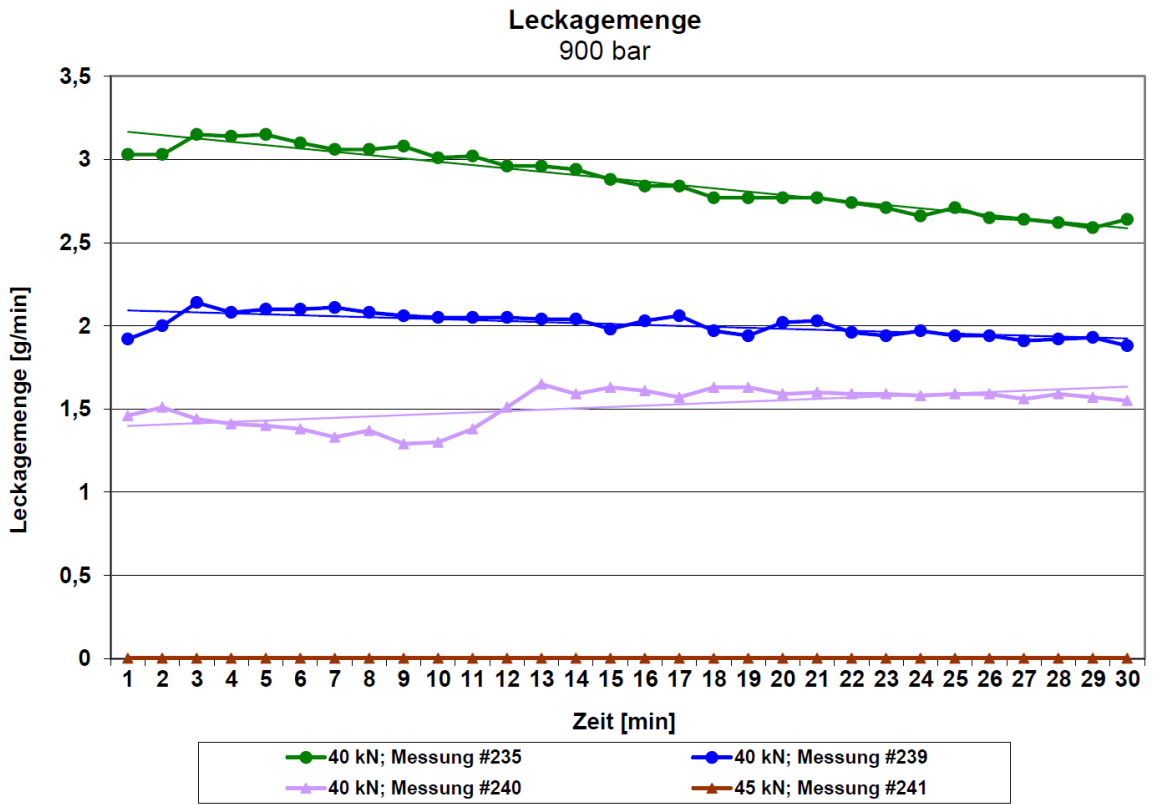


Abbildung A.66.: Messergebnisse 900 bar, P55A, P55B.

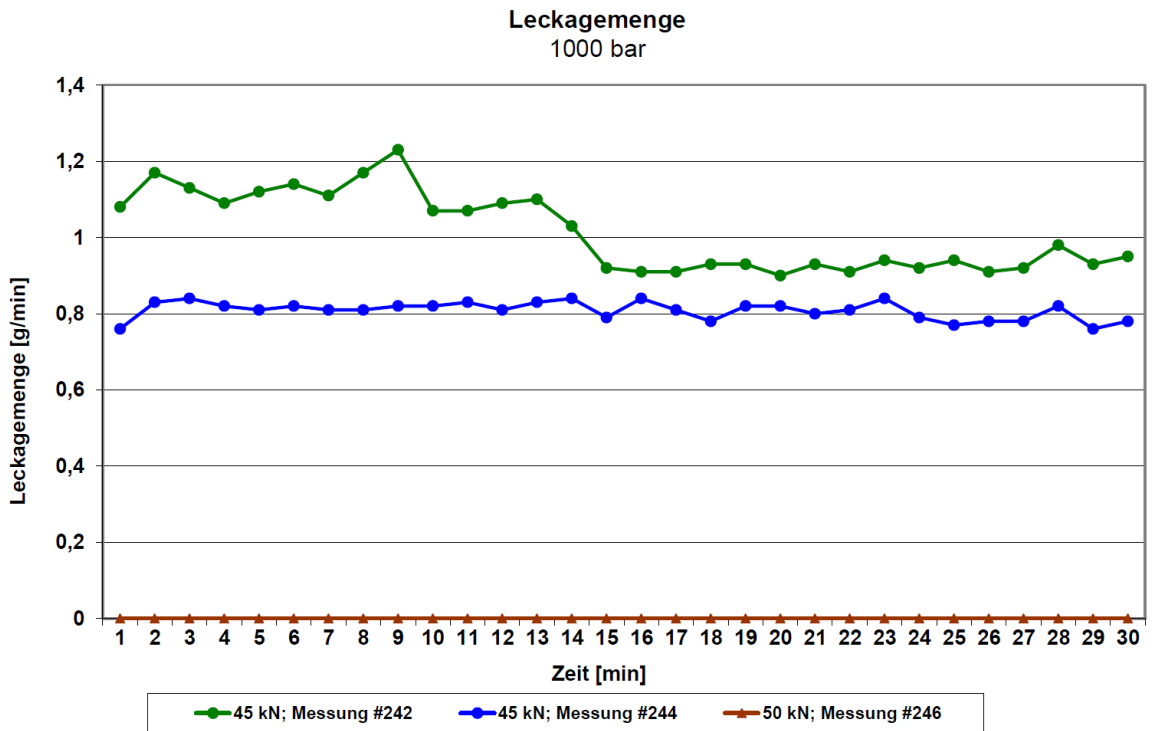


Abbildung A.67.: Messergebnisse 1000 bar, P55A, P55B.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	242
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Innendruck [bar]:	1000	Normalkraft [kN]:	45	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	25	Temperatur Ende:	25	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	219
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		1,08	1,08	16		17,43	0,91
2		2,25	1,17	17		18,34	0,91
3		3,38	1,13	18		19,27	0,93
4		4,47	1,09	19		20,2	0,93
5		5,59	1,12	20		21,1	0,9
6		6,73	1,14	21		22,03	0,93
7		7,84	1,11	22		22,94	0,91
8		9,01	1,17	23		23,88	0,94
9		10,24	1,23	24		24,8	0,92
10		11,31	1,07	25		25,74	0,94
11		12,38	1,07	26		26,65	0,91
12		13,47	1,09	27		27,57	0,92
13		14,57	1,1	28		28,55	0,98
14		15,6	1,03	29		29,48	0,93
15		16,52	0,92	30		30,43	0,95
Durchschnitt							1,1

Abbildung A.68.: Messergebnis #242.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.:	244
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	242
Innendruck [bar]:	1000	Normalkraft [kN]:	45	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:	
Temperatur Anfang:	25	Temperatur Ende:	25	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer:	219
Notiz:							
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]
1		0,76	0,76	16		13,08	0,84
2		1,59	0,83	17		13,89	0,81
3		2,43	0,84	18		14,67	0,78
4		3,25	0,82	19		15,49	0,82
5		4,06	0,81	20		16,31	0,82
6		4,88	0,82	21		17,11	0,8
7		5,69	0,81	22		17,92	0,81
8		6,5	0,81	23		18,76	0,84
9		7,32	0,82	24		19,55	0,79
10		8,14	0,82	25		20,32	0,77
11		8,97	0,83	26		21,1	0,78
12		9,78	0,81	27		21,88	0,78
13		10,61	0,83	28		22,7	0,82
14		11,45	0,84	29		23,46	0,76
15		12,24	0,79	30		24,24	0,78
Durchschnitt							0,81

Abbildung A.69.: Messergebnis #244.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.: 247
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Innendruck [bar]:	1100	Normalkraft [kN]:	50	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Temperatur Anfang:	26	Temperatur Ende:	26	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer: 219
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		0,2	0,2	16		3,44
2		0,43	0,23	17		3,64
3		0,67	0,24	18		3,85
4		0,9	0,23	19		4,05
5		1,13	0,23	20		4,25
6		1,35	0,22	21		4,43
7		1,58	0,23	22		4,63
8		1,8	0,22	23		4,83
9		2,03	0,23	24		5,02
10		2,25	0,22	25		5,22
11		2,48	0,23	26		5,42
12		2,67	0,19	27		5,62
13		2,86	0,19	28		5,81
14		3,04	0,18	29		6,01
15		3,24	0,2	30		6,21
Durchschnitt						0,21

Abbildung A.70.: Messergebnis #247.

Dichtheitsmessung						Messung Nr.: 249
Datum:	9.11.2011	Probe:	55	Kraft eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Innendruck [bar]:	1200	Normalkraft [kN]:	55	Druck eingestellt:	NEU	aus Messung Nummer:
Temperatur Anfang:	27	Temperatur Ende:	27	Proben zusammengebaut:	NEU	aus Messung Nummer: 219
Notiz:						
Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage Σ [g]	Leckage / Min [g/min]	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Leckage / Min [g/min]
1		0,42	0,42	16		5,71
2		0,77	0,35	17		6,04
3		1,13	0,36	18		6,38
4		1,50	0,37	19		6,67
5		1,91	0,41	20		6,96
6		2,36	0,45	21		7,29
7		2,68	0,32	22		7,61
8		3,02	0,34	23		7,94
9		3,38	0,36	24		8,24
10		3,74	0,36	25		8,57
11		4,08	0,34	26		8,91
12		4,44	0,36	27		9,24
13		4,79	0,35	28		9,60
14		5,06	0,27	29		9,94
15		5,38	0,32	30		10,28
Durchschnitt						0,35

Abbildung A.71.: Messergebnis #249.

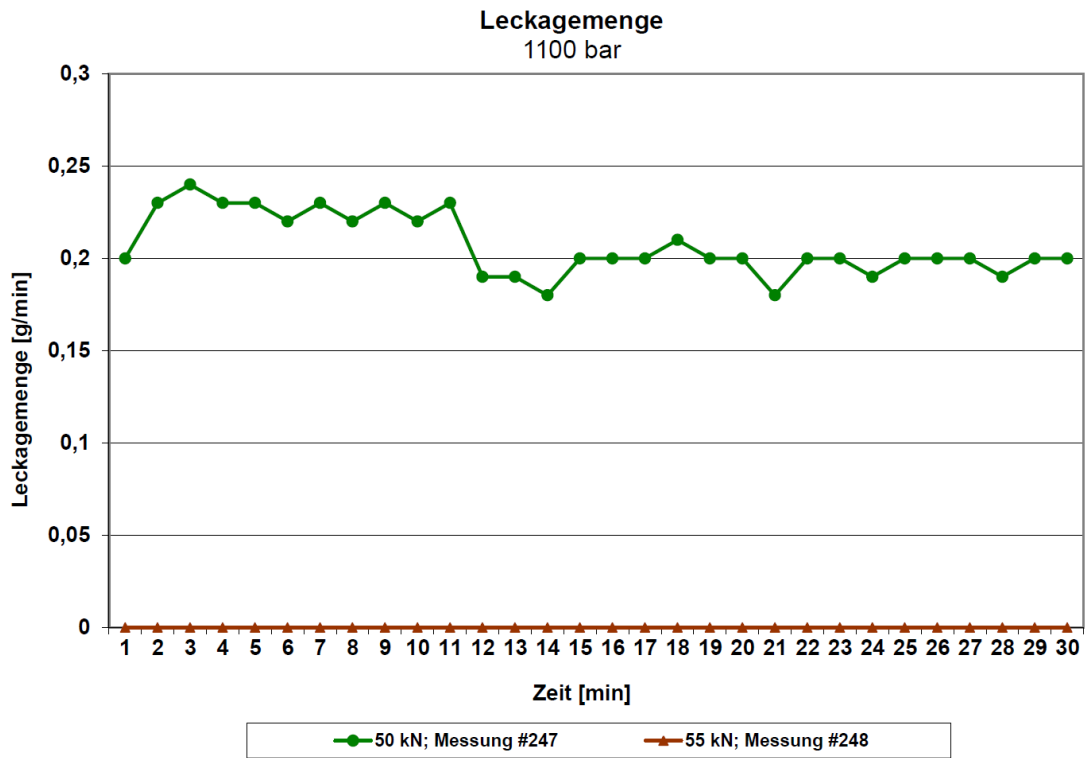


Abbildung A.72.: Messergebnis 1100 bar, P55A, P55B.

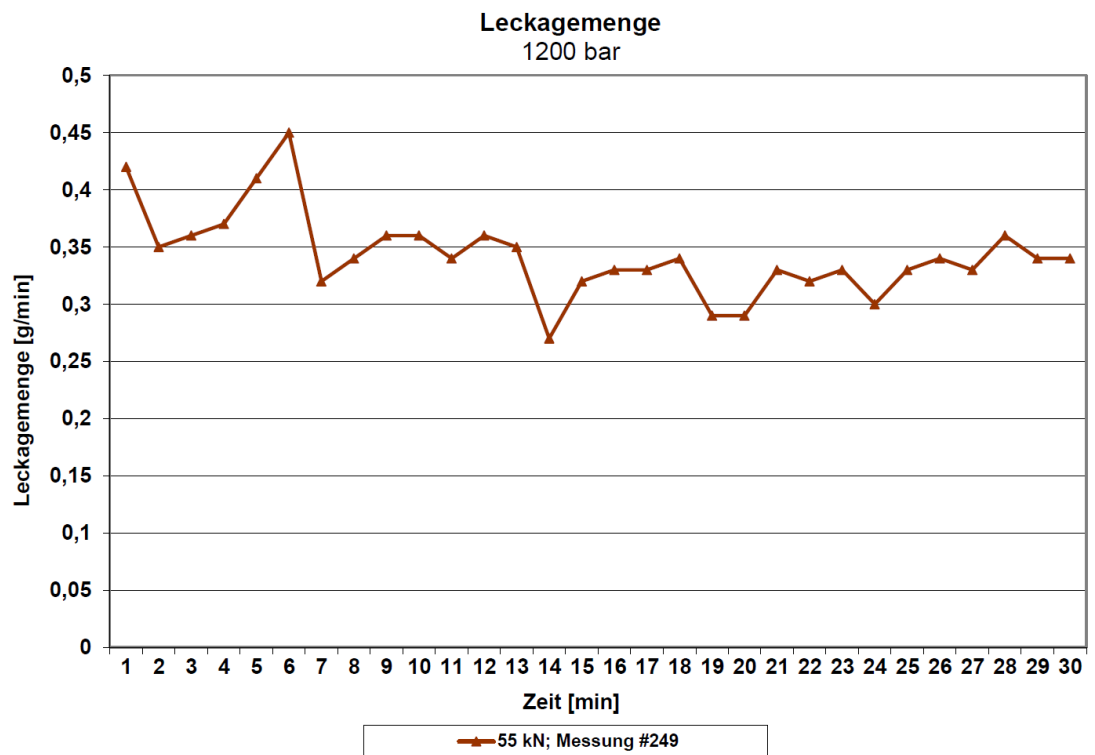


Abbildung A.73.: Messergebnis 1200 bar, P55A, P55B.

# Literaturverzeichnis

- [1] *Kraftstoffinjektor mit einer kegeligen Gehäusehochdruckdichtung.* Europäische Patentanmeldung EP 1 843 038 A1.
- [2] *MARPOL 73/78.* International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. Annex VI – Air Pollution.
- [3] *Richtlinie 2004/26/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte I.*
- [4] *Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates.*
- [5] *Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG vom 31.1.2007.*
- [6] *DIN 50100: Dauerschwingversuch. Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung.* Beuth Verlag, Berlin, Köln, 1978.
- [7] *RICHTLINIE 1999/32/EG DES RATES über eine Verringerung des Schwefelgehalts bestimmter flüssiger Kraft- oder Brennstoffe und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG, April 1999.*
- [8] *FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguß- und Aluminiumwerkstoffe.* VDMA-Verlag, Frankfurt/M, 2002. 4. Ausgabe.
- [9] *Needing attention.* Acid News, The Swedish NGO Secretariat on Acid Rain, Göteborg, May 2003. Fact sheet.
- [10] *Shell V-Oil 1404. Einspritzpumpenprüföl nach DIN ISO 4113.* Datenblatt. Shell Deutschland Oil GmbH. Hamburg, 2006.
- [11] *Review of Maritime Transport.* United Nations Conference on Trade and Development, 2007.
- [12] *Delphi Direct Acting Diesel Common Rail System.* Delphi Corporation, 2008. Produktbeschreibung.

- [13] *ISO Richtlinie: Mineralölerzeugnisse - Kraft- und Brennstoffe (Klasse F) - Anforderungen an Schifffahrtsbrennstoffe (ISO 8217:2005)*. Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [14] *Günstig und genau*. Konstruktionspraxis, Vogel Verlag, Würzburg, (5):22–23, 2009. ISSN 0937-4167.
- [15] *RICHTLINIE 2009/30/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG.*, April 2009.
- [16] ANDERSON, T. L.: *Fracture Mechanics. Fundamentals and Application*. CRC Press, Boca Raton, 1995. ISBN 0-8493-4260-0.
- [17] BANNANTINE, J. A.; COMER, J. J. H. J. L.: *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. Prentice Hall, New Jersey, 1990. ISBN 0-13-340191-X.
- [18] BARSOM, J.: *Effect of cyclic stress form on corrosion fatigue crack propagation below  $K_{Isc}$  in a high yield strength steel*. . *Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure*, . 424–436, Houston, 1972. National Association of Corrosion Eng.
- [19] BASARA, A.: *Evaluation of High Pressure Components of Fuel Injection Systems Using Speckle Interferometry*. 2007.
- [20] BAUMGARTEN, C.: *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-30835-5.
- [21] BERGMANN, J. W.; VORMWALD, M.: *Dauerfestigkeitssteigerung einatzgehärteter Hochdruckbauteile durch Autofrettage*. FVV-Heft 526, Vorhaben 784, Frankfurt, 2004.
- [22] BERGMANN, J. W.; VORMWALD, M.: *Betriebsfestigkeit gekerbter Hochdruckbauteile ohne und mit Autofrettage*. FVV-Heft 541, Vorhaben 880, Frankfurt, 2008.
- [23] BOHNE, C. E. A.: *Mikrostruktur und Eigenschaften des kurzzeitwärmebehandelten hochstickstofflegierten Werkzeugstahles X30CrMoN15-1*. . SEPOLD, G. E. A. (.): *Kurzzeitmetallurgie (Strahltechnik)*, . 18, . 77–96, Bremen, 2002. ISBN 3-933762-08-1.
- [24] DOHLE, U.: *Heavy Duty and Big Bore Engines: The Common Rail System as Key Technology for Low Emissions and Fuel Consumption*. . *Heavy Duty-, On- und Off-Highway-Motoren*, Augsburg, Dezember 2007.
- [25] EDER, W. E.; HOSNEDL, S.: *Introduction to design engineering: systematic creativity and management*. CRC Press, Boca Raton, 2010. ISBN 978-0-415-55557-9.

- [26] FINNEY, J. M.; MANN, J. Y.: *Fatigue S/N data in relation to variability in predicted life*. . *Proc. of a Symposium on Aircraft Structural Fatigue, Aeronautical Research Laboratories, Melbourne, 1976*.
- [27] FISHER, L. W.: *Selection of engineering materials and adhesives*. CRC Press, Boca Raton, 2005. ISBN 0-8247-4047-5.
- [28] GANSER, M.; MOSER, U.: *Common Rail Systeme für Dieselmotoren von 1 bis 5 Megawatt: Simulationsergebnisse von drei Systemvarianten*. . *HDD Konferenz, 2006*.
- [29] GREULING, S.; SEEGER, T. B. J. W.: *Autofrettage II*. FVV-Heft 704, Vorhaben Nr. 671, Frankfurt, 2001.
- [30] HAIBACH, E.: *Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006. ISBN-10 3-540-29363-9.
- [31] HAUSMANN, J. M.; EMURA, S. L. C.: *Cyclic behavior of transverse loaded titanium matrix composites*. . *Affordable Metal Matrix Composites for High Performance Applications II*, Warrendale, 2003. The Minerals, Metals and Materials Society. ISBN 0-87339-557-3.
- [32] HEITKEMPER, M. E. A.: *Laser Surface Treatment of the High Nitrogen Steel X30CrMoN15-1*. . *Proc. of the 6th Internat. Tooling Conf. on the Use of Tool Steels: Experience and Research*, . 2, . 785–795, Karlstadt, 2002.
- [33] HOHENTHAL VON, M.-Y.: *Wir brauchen keine Piezo- Injektoren*. ATZ online, Springer Automotive Media / GWV Fachverlage GmbH, Juli 2007.
- [34] HOSNEDL, S.; DVORÁK, J.: *Engineering Design Specification and Evaluations*. Westböhmisches Universität in Pilsen; MS Excel Vorlage, 2007.
- [35] HUCINSKA, J.: *Influence of Sulphur on High Temperature Degradation of Steel Structures in the Refinery Industry*. *Advances in materials science*, Gdańsk University of Technology, 6(2):16–25, 2006.
- [36] JORACH, R.W.; DOPPLER, H.: *Common-Rail-Einspritzung im Großmotorenbau. Herausforderungen und ihre Lösungen in Entwicklung und Produktion*. Diesel- und Benzindirekteinspritzung: Einspritzsysteme – Potenziale, Anwendungen, Zukunftsentwicklungen. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001.
- [37] JORACH, R. W.: *Common-Rail Injection Systems for Marine Applications – Status, Trends and Technological Strategies*. . *Proceedings of The 24th Motor Ship Marine Propulsion Conference*, Copenhagen, 2002.
- [38] KAINER, K. U.: *Metallische Verbundwerkstoffe*. Wiley-VCH, Weinheim, 2003. ISBN 3-527-30532-7.
- [39] KAMLEITNER, E. E. A.: *Re-design of the DEUTZ diesel engine series TBD 628 applying Common Rail and variable turbine geometry*. . *CIMAC Paper 233*, 2004.
- [40] KHORSAND, H. E. A.: *Fatigue of sintered steels (Fe - 1,5Mo - 3Mn - 0,7C)*. *Materials and Structures*, (37):335–341, 2004. ISSN 1359-5997.

- [41] KLESNIL, M.; LUKÁŠ, P.: *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. Academia, Prag, 1975.
- [42] KYTÖLÄ, K.; PARO, D.: *Successful features of the Wärtsilä common rail*. Marine News, Journal of the World Ship Society, (2), 2005.
- [43] LAUSCH, W.: *Seine Überlegenheit lässt den Schiffsdiesel weiter dominieren*.
- [44] LECHMANN, M.: *Entwicklung eines schwingbruchmechanischen Auslegungskonzeptes für innendruckbeanspruchte Bauteile mit ausgeprägten Druckeigen Spannungsfeldern*. Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 2007.
- [45] LINZING, R.: *Hochdruck - Dieselsysteme für PKW*. Krafthand Verlag Walter Schulz GmbH, Bad Wörishofen, 2004. ISBN 3-87441-090-0.
- [46] MACHADO, J. P. S. E. A.: *Effect of temperature on the level of corrosion caused by heavy petroleum on AISI 304 and AISI 444 stainless steel*. Material Research, 9(2):137–142, 2006. ISSN 1516-1439.
- [47] MAFFII, S.: *External Costs and Climate Impacts of Maritime Transport*. . Transport and climate change: A Greens / EFA conference, Bruxelles, 2007.
- [48] MANSON, S. S.; HIRSCHBERG, M. H.: *Fatigue: An interdisciplinary approach*. Syracuse University Press, Syracuse (N.Y.), 1964.
- [49] MAYER, H. E. A.: *Very high cycle fatigue properties of bainitic high carbon-chromium steel under variable amplitude conditions*. International Journal of Fatigue, (31):1300–1308, 2009. ISSN 0142-1123.
- [50] MOLLENHAUER, K.; TSCHÖKE, H.: *Handbuch Dieselmotoren*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-72164-2.
- [51] NOSKIEVIČ, J. E. A.: *Mechanika tekutin*. SNTL, Prag, 1987.
- [52] O'BRIEN, R. C.: *Fatigue Properties of P/M Materials*. . SAE Congress, Detroit, 1988.
- [53] PAHL, G.; BEITZ, W. S. H.-J. J. U.: *Engineering Design. A Systematic Approach*. Springer Verlag, 2007. ISBN 978-1-84628-318-5.
- [54] POOK, L. P.: *Metal Fatigue*. Springer, Dordrecht, 2007. ISBN 978-1-4020-5597-3.
- [55] PTÁČEK, L. E. A.: *Nauka o materiálu II.*. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [56] RADAJ, D.; VORMWALD, M.: *Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 3., 2007. ISBN 978-3-540-71458-3.
- [57] RÖDER, B.: *Schweröl - Ein ganz besonderer Saft?*. Verein Hanseatischer Transportversicherer, Hamburg – Bremen, 2008.
- [58] RODZIŇÁK, D.; DUDROVÁ, E. K. M.: *Fatigue Properties of Sintered Iron and Sintered Steel Distalloy AE+0,7C After Deformation and Copper Infiltration*. Acta Metallurgica Slovaca, 4(2):151–163, 2000. ISSN 1335 – 1532.



- [59] SCHIJVE, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Springer Science + Business Media, 2009. ISBN-13: 978-1-4020-6807-2.
- [60] SCHUBIGER, R. A.: *Untersuchungen zur Rußbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung: Thermodynamische Kenngrößen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie*. ETH Zürich, 2001.
- [61] SONSINO, C. M.: *Methods to determine relevant material properties for the fatigue design of powder metallurgy parts..* Powder Metallurgy International, 16(1):34–38, 1984. ISSN 0048-5012.
- [62] TAYLOR, D.: *A Compendium of Fatigue Thresholds and Growth Rates*. Engineering Materials Advisory Services, Warley, 1985. ISBN 0-947817-05-0.
- [63] TAYLOR, D.; JIANCHUN, L.: *Sourcebook on Fatigue Crack Propagation: Thresholds and Crack Closure*. Engineering Materials Advisory Services, Warley, 1993. ISBN 0-947817-58-1.
- [64] TEBBAL, S.; KANE, R. D.: *Assessment of Crude Oil Corrosivity*. . Tagungsband CORROSION 98, . Beitrag Nr. 578. NACE International, 1998.
- [65] TEETZ, C.: *Herausforderungen an zukünftige Off-Highway-Dieselmotoren - kann On-Highway-Technologie übertragen werden?..* Heavy Duty-, On- und Off-Highway-Motoren, Augsburg, Dezember 2007.
- [66] TIETZE, W.: *Handbuch Dichtungspraxis*. Vulkan-Verlag, Essen, 2003. ISBN 3-8027-3301-0.
- [67] WENZEL, S. P.: *Modellierung der Ruß- und NOx – Emissionen des Dieselmotors*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2006.
- [68] WINTERHAGEN, J.: *Common-Rail-Systeme mit 3.000 bar in der Entwicklung*. ATZ online, Springer Automotive Media / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008.
- [69] WOODYARD, D. F.: *Pounder's marine diesel engines and gas turbines*. Elsevier Ltd., Amsterdam, 2007. ISBN 0-7506-5846-0.

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Einfluss des Einspritzdrucks auf Abgaswerte [50]. Anstieg von $NO_x$ , Senkung von Partikelemissionen (SZ) und des spezifischen Verbrauchs (be).	12
1.2. Bestandteile des Common Rail Einspritzsystems. . . . .	13
1.3. CR System für einen Großmotor mit 2 MW Leistung [39]. . . . .	14
1.4. Draufsicht eines Injektors mit Einzelspeicher [36]. . . . .	15
1.5. Common Rail System von Wärtsilä [42]. . . . .	15
1.6. Prozentuelle Vertretung von CR – Einspritzsystemen in Großmotoren, Prognose für Jahre 2010 – 2014 [24]. . . . .	16
1.7. Arbeitsprinzip des Injektors mit Magnetventil. . . . .	18
1.8. Aufbau eines Piezo – Injektors von Siemens [45]. . . . .	19
1.9. Injektorsegmente und ihr Zusammenbau [45]. . . . .	20
1.10. Schema von einem Einkreis- (links) und Zweikreis – Injektor für die Schweröl Einspritzung [36]. . . . .	21
1.11. Injektoren für Großmotoren. . . . .	23
1.12. Doppelnadel – Injektor für die Einspritzung von Kraftstoff und Wasser [36].	24
1.13. Externe Kosten der Schifffahrt in europäischen Gewässern, verursacht durch Luftverschmutzung [47]. . . . .	24
1.14. Vergleich von Schwarzrauch zwischen Schiffsdieseln mit konventioneller Einspritzung und mit Common Rail [42]. . . . .	25
2.1. Das Black-Box-Schema des untersuchten technischen Systems. . . . .	29
2.2. Das Transformationsprozess des untersuchten technischen Systems. . . . .	29
2.3. Der hierarchische Baum des untersuchten technischen Systems. . . . .	30
2.4. Die Funktionsstruktur des untersuchten technischen Systems. . . . .	30
2.5. Auszug der Bewertungskriterien des technischen Systems. Anwendung von [34]. . . . .	31
2.6. Ergebnis der Bewertung hinsichtlich Qualität, Zeit- und Kostenansprüchen einzelner Varianten. . . . .	32
2.7. Ergebnis der Bewertung hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen einzelner Varianten. . . . .	32
3.1. Beispiel der Druckschwankungen in der Hochdruckleitung eines CR – Systems mit 8 Injektoren [28]. . . . .	34
3.2. Analysierter Bauteil. . . . .	36
3.3. Klassische Darstellung der Wöhlerkurve für Stahl. . . . .	37
3.4. Unterschiedliche Wöhlerkurven, die aus gleichen Messpunkten von unterschiedlichen Instituten erstellt worden sind (aus [30]). . . . .	38
3.5. Schematische Darstellung einer Lebensdauerlinie mit VHCF Bereich. . . . .	39
3.6. Das Haigh – Diagramm für Stahl [17]. $\sigma_w$ - wahre Bruchspannung. . . . .	40

3.7. Spannung in verschiedenen Bauteilen bei Biege- und Innendruckbelastung.	41
3.8. Von-Mises-Spannung in der Zone vor einem Riss (ebener Spannungszustand).	45
3.9. Typisches Rissverhalten von Metallen (nach [16]).	46
3.10. Einfluss der Autofrettage auf das Werkstoffverhalten unter Beanspruchung.	51
4.1. Probe 5A für die Untersuchungen des Rillendichtkonzepts.	54
4.2. Kritische Stelle am untersuchten Bauteil (a) und eine ähnliche Ausführung an einem Injektor für PKW-Motoren (b).	54
4.3. Variierte Größen bei Spannungsanalyse im Bereich der Einmündung.	56
4.4. Detail des 3D FEM Modells im Bereich der Kanalmündung und Beispiel der Ablesung der ermittelten Spannung.	56
4.5. Nummerierung der Knoten für die Auswertung.	57
4.6. Verlauf der Spannung entlang der Zulaufbohrung, Abhängigkeit vom Muldenradius $R_1$ .	58
4.7. Verlauf der Spannung entlang der Zulaufbohrung, Abhängigkeit vom Kantenradius $R_2$ .	58
4.8. Verlauf der Spannung entlang der Zulaufbohrung, Abhängigkeit vom Kanalwinkel $\phi$ .	59
4.9. Versuchsaufbau – Aufnahme der Versuchsproben.	61
4.10. Aufbau zweier Proben mit Anschlüssen für Hochdruck und Leckagemessung.	61
4.11. Schema des Prüfstands.	63
4.12. Der Prüfstand.	64
4.13. Ein- und Ausgänge des D2T Steuerungssystems.	64
4.14. Ein runder Abdruck einer Kontaktdruckmessung mittels der Prescale Druckmessfolie und die Farbskala zur Auswertung des Ergebnisses.	66
5.1. Kontaktfläche eines bestehenden Injektorbauteils.	69
5.2. Das Öffnen eines Spalts zwischen Injektorsegmenten.	70
5.3. Berechnete Größe der Deformation bei der Spaltöffnung. Innendruck 3000 <i>bar</i> , axiale Anpresskraft 5 <i>kN</i> .	70
5.4. <b>Dichtung durch Dichtelemente unter Wirkung äußerer Kraft</b>	71
5.5. <b>Dichtung durch unterschiedliche Wärmeausdehnung</b>	72
5.6. <b>Dichtung durch Formschluss der Bauteile unter Wirkung äußerer Kraft</b>	73
5.7. <b>Dichtung durch sich deformierende Dichtelemente unter Wirkung der Flüssigkeit</b>	73
5.8. <b>Hülse mit langer gepasster Fläche</b>	73
5.9. Zeichnung der Proben 5A und B für die Erprobung des Rillenkonzpts.	74
5.10. Proben 5A und B für die Erprobung des Rillenkonzpts.	75
5.11. Geometrie des Berechnungsmodells für das Rillenkonzpt.	76
5.12. Vernetzung des Berechnungsmodells für das Rillenkonzpt.	76
5.13. Ergebnis der Kontaktdruckberechnung beim Rillenkonzpt.	77
5.14. Ergebnis der Kontaktdruckberechnung beim Rillenkonzpt.	77
5.15. Messergebnisse für Kontaktdruck des Rillendichtkonzepts bei einer Axialkraft von 10,7 <i>kN</i> (50 <i>bar</i> Anpressdruck) und 21,4 <i>kN</i> (100 <i>bar</i> ).	79
5.16. Probe 5A mit Einprägung nach dem Versuch.	79

5.17. Mikroskopbild der Einprägung nach dem Versuch in der Probe 5A. . . . .	80
5.18. Mikroskopbild und Detail der Einprägung nach dem Versuch in der Probe 5A. . . . .	81
5.19. Mikroskopbild der gehärteten Rillen in der Probe 5B nach dem Versuch. . .	82
5.20. Mikroskopbild der gehärteten Rillen in der Probe 5B nach dem Versuch, Blickwinkel ca. 45°. . . . .	82
5.21. Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 5A, 5B. . . . .	84
5.22. Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 55A, 55B. . . . .	84
5.23. Aufzeichnung über den Verlauf der Leckage bei einer Dichtheitsmessung mit 300 bar. . . . .	85
5.24. Gängige Arten von Kanalführungen in Injektorsegmenten – schematische Darstellung. . . . .	87
5.25. Verformung der freien Oberfläche. . . . .	88
5.26. Verhalten der freien Oberfläche. . . . .	88
5.27. Virtuelle Proben für Berechnung der Sacklochgeometrie. . . . .	89
5.28. Kontaktdruck um ein Sackloch mit $D = 3$ mm. . . . .	90
5.29. Kontaktdruck um ein Sackloch mit $D = 6$ mm. . . . .	90
5.30. Verteilung des Kontaktdrucks um ein Sackloch mit $D = 6$ mm, $L = 4$ mm. . .	91
5.31. Modell und Abmessungen der Probe 6A für Untersuchungen sacklocharti- ger Geometrien. . . . .	92
5.32. Probe 6A. . . . .	93
5.33. Verteilung des Kontaktdrucks ermittelt an Proben 6. (a) Bei kleiner Anpresskraft als Teil eines trockenen Einbauversuchs. (b) Nach Dichtheits- versagen während Versuchs mit unebenem Aufbau und starker Leckage. . .	93
5.34. Verteilung des Kontaktdrucks ermittelt an Proben 6 beim Versuch. . . . .	94
5.35. Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante 0. . . . .	96
5.36. Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante R01-B01. . . . .	96
5.37. Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante R01-B035. . . . .	97
5.38. Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Var. R01-B035-M015. . . . .	97
5.39. Berechneter Verlauf des Kontaktdrucks, Variante E2. . . . .	98
5.40. Untersuchte Ausführungen der Variante E2. . . . .	99
5.41. Kontaktdruck zwischen Dichteinsatz und Bronzehülse, Ausführungen der Variante E2, Innendruck 3000 bar. . . . .	100
5.42. Kontaktdruck zwischen Dichteinsatz und Bronzehülse, Detail des Bereichs der Einsatzkante. . . . .	101
5.43. Kontaktdruck zwischen Dichteinsatz und Bronzehülse, Detail des Bereichs der mittigen Fase. . . . .	101
5.44. Kontaktdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand, Ausführungen der Variante E2, Innendruck 3000 bar. . . . .	102
5.45. Ausführungen des Dichteinsatzes mit verkleinerter Steifigkeit. . . . .	103
5.46. Kontaktdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand, Einsatz mit koni- scher Bohrung. . . . .	104
5.47. Kontaktdruck beim Dichteinsatz mit 6 Einschnitten. . . . .	105
5.48. Vergleich des Kontaktdrucks bei einfachen Dichteinsätzen. . . . .	106
5.49. Kontaktdruck zwischen Bronzehülse und Kanalwand, umlaufend. . . . .	106

5.50. Ausführungen der Bronzehülse mit Rillen auf der Stirnseite. . . . .	107
5.51. Druckverlauf bei Ausführungen der Bronzehülse mit Rillen auf der Stirnseite. . . . .	108
5.52. Kontaktdruckverläufe bei unterschiedlichem Übermaß der Bronzehülse. . .	109
5.53. Dichtlippe mit komplexer Geometrie. . . . .	111
5.54. Kontaktdruck resultierend aus der Anpresskraft und Wirkung der Dichtlippe. . . . .	112
5.55. Ausführungen Geo3 A–D des Dichtkonzepts mit integrierter Dichtlippe. . .	113
5.56. Kontaktdruck der Ausführungen Geo3 A–D bei Anpresskraft von 5 und 10 $kN$ und Innendruck 3000 $bar$ . . . . .	115
5.57. Kontaktdruck der Ausführungen Geo3 A–D bei Anpresskraft von 15 und 20 $kN$ und Innendruck 3000 $bar$ . . . . .	116
5.58. Varianten für die Untersuchung des R-H-T Einflusses auf die Dichteigenschaften. . . . .	117
5.59. Einfluss der Parameter R, H und T auf die Anpresskraft beim Innendruck 3000 $bar$ . . . . .	118
5.60. Kontaktdruck der Varianten Rx-Hx-T5. . . . .	120
5.61. Das vernetzte Modell für detaillierte Berechnung der Variante R6-H6-T5. .	121
5.62. Berechnungsergebnisse der Dichtlippe R6-H6-T5. . . . .	122
A.1. Viskosität von Schweröl in Abhängigkeit von Temperatur. . . . .	127
A.2. Farbskala der Prescale-Druckmessfolie für den Messbereich 10-50 MPa. . .	128
A.3. Farbskala der Prescale-Druckmessfolie für den Messbereich 50-130 MPa. .	129
A.4. Messergebnis #102. . . . .	130
A.5. Messergebnis #101. . . . .	131
A.6. Messergebnisse 100 bar, P5A, P5B. . . . .	131
A.7. Messergebnis #26. . . . .	132
A.8. Messergebnisse 240 bar, P5A, P5B. . . . .	132
A.9. Messergebnisse #103. . . . .	133
A.10. Messergebnis #106. . . . .	133
A.11. Messergebnis #120. . . . .	134
A.12. Messergebnis #123. . . . .	134
A.13. Messergebnis #125. . . . .	135
A.14. Messergebnis #127. . . . .	135
A.15. Messergebnis #114. . . . .	136
A.16. Messergebnis #115. . . . .	136
A.17. Messergebnis #129. . . . .	137
A.18. Messergebnisse 250 bar, P5A, P5B. . . . .	137
A.19. Messergebnisse 300 bar, P5A, P5B. . . . .	138
A.20. Messergebnis #104. . . . .	138
A.21. Messergebnis #107. . . . .	139
A.22. Messergebnis #121. . . . .	139
A.23. Messergebnis #105. . . . .	140
A.24. Messergebnis #108. . . . .	140
A.25. Messergebnis #122. . . . .	141
A.26. Messergebnis #109. . . . .	141

A.27.Messergebnis #110. . . . .	142
A.28.Messergebnis #113. . . . .	142
A.29.Messergebnis #134. . . . .	143
A.30.Messergebnis #138. . . . .	143
A.31.Messergebnis #142. . . . .	144
A.32.Messergebnisse 300 bar, P5A, P5B. . . . .	144
A.33.Messergebnis #124. . . . .	145
A.34.Messergebnis #126. . . . .	145
A.35.Messergebnis #133. . . . .	146
A.36.Messergebnis #128. . . . .	146
A.37.Messergebnis #130. . . . .	147
A.38.Messergebnis #132. . . . .	147
A.39.Messergebnis #135. . . . .	148
A.40.Messergebnis #139. . . . .	148
A.41.Messergebnis #143. . . . .	149
A.42.Messergebnisse 350 bar, P5A, P5B. . . . .	149
A.43.Messergebnis #111. . . . .	150
A.44.Messergebnis #112. . . . .	150
A.45.Messergebnis #131. . . . .	151
A.46.Messergebnis #136. . . . .	151
A.47.Messergebnis #140. . . . .	152
A.48.Messergebnis #144. . . . .	152
A.49.Messergebnisse 400 bar, P5A, P5B. . . . .	153
A.50.Messergebnis #137. . . . .	154
A.51.Messergebnis #141. . . . .	154
A.52.Messergebnis #145. . . . .	155
A.53.Messergebnisse 450 bar, P5A, P5B. . . . .	155
A.54.Messergebnis #220. . . . .	156
A.55.Messergebnis #221. . . . .	156
A.56.Messergebnisse 400 bar, P55A, P55B. . . . .	157
A.57.Messergebnisse 500 bar, P55A, P55B . . . . .	157
A.58.Messergebnis #228. . . . .	158
A.59.Messergebnis #229. . . . .	158
A.60.Messergebnisse 700 bar, P55A, P55B. . . . .	159
A.61.Messergebnisse 800 bar, P55A, P55B. . . . .	159
A.62.Messergebnis #234. . . . .	160
A.63.Messergebnis #235. . . . .	160
A.64.Messergebnis #239. . . . .	161
A.65.Messergebnis #240. . . . .	161
A.66.Messergebnisse 900 bar, P55A, P55B. . . . .	162
A.67.Messergebnisse 1000 bar, P55A, P55B. . . . .	162
A.68.Messergebnis #242. . . . .	163
A.69.Messergebnis #244. . . . .	163
A.70.Messergebnis #247. . . . .	164
A.71.Messergebnis #249. . . . .	164

A.72.Messergebnis 1100 bar, P55A, P55B. . . . .	165
A.73.Messergebnis 1200 bar, P55A, P55B. . . . .	165

# Tabellenverzeichnis

1.1. Emissionen auf europäischem Festland und See [9]. . . . .	25
2.1. Anforderungen an innere Eigenschaften eines kompletten Versuchsinjektors. . . . .	27
3.1. Vorgeschlagene Stähle für die Arbeitskolbenführung . . . . .	47
4.1. Kurzbeschreibung der untersuchten Dichtkonzepte. . . . .	55
5.1. Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 5A, 5B in [ <i>g/min</i> ] bei unterschiedlicher Anpresskraft und Innendruck. . . . .	83
5.2. Ermittelte Leckagemenge bei Versuchen an Proben 55A, 55B in [ <i>g/min</i> ] bei unterschiedlicher Anpresskraft und Innendruck. . . . .	83
5.3. Gegenseitiges Verhältnis der Steifigkeiten der Ausführungen Geo3 A-D. . .	112
5.4. Varianten der Dichtlippe mit festgelegter Tiefe $T=5mm$ . . . . .	117