



RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu ak- tuellen Fragestellungen im Hinblick auf druck- führende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb – Los 1: Regelwerks- und Ad-hoc-Themen

Arbeitspaket 1 - Absicherung der Leckratenbestimmung
bei Leckagen in Dampferzeuger-Heizrohren

Vorhaben 4717Ro1370

AUFTRAGNEHMER:IN
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Ludwig Stumpfrock
Fabian Silber



Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb

- Los 1: Regelwerks- und Ad-hoc-Themen

Arbeitspaket 1 - Absicherung der Leckratenbestimmung bei Leckagen in Dampferzeuger-Heizrohren

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung im Rahmen der Ressortforschung des BMU (ReFoPlan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:innen wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.

BASE-RESFOR-014/21

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2021110329426

Berlin, November 2021

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

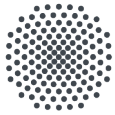
RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Ludwig Stumpfrock
Fabian Silber

030 184321-0
www.base.bund.de

Erscheinungsdatum: November 2021



Universität Stuttgart



Materialprüfungsanstalt
Universität Stuttgart

Abschlussbericht Final Report

FKZ 4717R01370

Vorhaben

**Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen
Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von
Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb**

AP1:

Ad hoc Aufgaben

**Absicherung der Leckratenbestimmung bei Leckagen in
Dampferzeuger-Heizrohren**

BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

30.09.2020

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Hinweis:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) mit dem Förderkennzeichen 4717R01370 gefördert. Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen. Die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart und die Autoren übernehmen keine Haftung für Schäden, die aufgrund von weiterführenden oder fehlerhaften Anwendungen der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse auftreten.

Abschlussbericht Final Report

FKZ 4717R01370

Vorhaben

**Zentrale Untersuchungen und Auswertung zu aktuellen
Fragestellungen im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von
Kernkraftwerken im Leistungsbetrieb**

AP1:

Ad hoc Aufgaben

**Absicherung der Leckratenbestimmung bei Leckagen in
Dampferzeuger-Heizrohren**

Autoren / Authors: Dr.-Ing. Ludwig Stumpfrock
Fabian Silber, M. Sc.

BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Dienststelle / Performing Organization: Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart
Berichtsdatum / Publication Date: September 2020
MPA Berichts-Nr. / MPA Report-No.: 8483 000 001

Inhalt

	Seite
1	9
1.1	9
1.2	9
1.3	10
1.4	10
2	12
2.1	13
2.2	14
2.3	16
3	17
3.1	18
3.2	20
3.3	22
3.4	24
3.5	27
3.6	30
3.7	33
3.8	36
3.9	38
3.10	40
3.11	41
3.11.1	41
3.11.2	42
3.11.3	43
3.12	44
3.13	45
4	49
5	50

Kurzfassung

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Verbesserung des Verständnisses der Grundlagen zur quantitativen Beschreibung des Ausströmverhaltens aus dünnwandigen Komponenten. Hierzu wurde eine Datenbasis mit gemessenen Leckraten an Bohrungen, definierten Spalten und Ermüdungsrissen erzeugt. Darüber hinaus wurden optische Untersuchungen der Ausströmung an diesen Probekörpern zur quantitativen Beschreibung des Ausströmvorganges durchgeführt. Diese optischen Untersuchungen verfolgten das Ziel den Phasenwechsel beim Ausströmvorgang zu dokumentieren und schufen damit die Grundlage zur Beschreibung der Leckage an dünnwandigen Komponenten. Folgende Einzelzielsetzungen wurden bearbeitet:

- Auslegung der Leckblenden, Planung des Versuchsaufbaus, Planung der Umbaumaßnahmen, Anfertigen von Fertigungszeichnungen
- Herstellung der Leckblenden, Durchführen der Leckratenuntersuchungen, Leckratenmessungen bei Leckage frei in die Umgebung und mit Kondensator sowie in Wasser
- Durchführung von optischen Untersuchungen mit Highspeed-Kamera

Hierzu wurden Untersuchungen am FSI-Kreislauf der MPA Universität Stuttgart durchgeführt. Für die Leckratenmessungen wurden drei verschiedene Arten von Leckageblenden gefertigt. An diesen Basisgeometrien, repräsentiert durch Spalte, Ermüdungsrisse und Bohrungen, wurden umfangreiche Leckratenmessungen durchgeführt. Die optischen Untersuchungen mittels Highspeedkamera liefern einen maßgeblichen Beitrag bei der Beurteilung des metastabilen einphasigen Ausströmvorgangs und damit einen Beitrag zur Modellentwicklung zur Leckratenabschätzung. Ein Einfluss des Umgebungsmediums auf den Ausströmvorgang und damit auf die zu erwartende Leckrate konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht gefunden werden, sodass Leckratenexperimente bei freier Ausströmung in Luft repräsentative Ergebnisse für die Validierung von Leckratenmodellen auch bei Ausströmung in Wasserumgebung liefern.

Abstract

The overall goal of the project is to improve the understanding of the fundamentals for the quantitative description of the outflow behavior from thin-walled components. For this purpose, a database with measured leak rates at holes, defined gaps and fatigue cracks was generated. In addition, optical examinations of the outflow regime were carried out with these specimens for a quantitative description of the outflow regime on the discharge side. The aim of these optical examinations was to document the phase change during the discharge process and thus to create the basis for describing the leakage on thin-walled components. The following individual objectives were derived from the overall objective:

- Design of the leakage apertures, planning of the test set-up, planning of the modification measures, preparation of production drawings
- Manufacturing of leak apertures, implementation of leak rate tests, leak rate measurements with free discharge into the environment and with a condenser as well as discharge in water
- Optical examinations with a high-speed camera

For this purpose, investigations were carried out on the FSI test loop of the MPA University of Stuttgart. Three different types of leakage openings were manufactured for the leak rate measurements. Extensive leak rate measurements were carried out on these basic geometries, represented by gaps, fatigue cracks and holes. The optical investigations using a high-speed camera make a significant contribution to the assessment of the metastable single-phase outflow process and thus a contribution to the development of models for estimating leakage rates. An influence of the ambient medium (air or water) on the outflow process and thus on the expected leak rate could not be found within the scope of these investigations, so that leak rate experiments with free outflow in air provide representative results for the validation of leakage rate models even with outflow in a water environment.

Abkürzungen

DE-HR	Dampferzeuger Heizrohr
DFU	Druckführende Umschließung
DWR	Druckwasserreaktor
FE	Finite Elemente
FSI	Fluid-Struktur-Interaktion
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
KKW	Kernkraftwerk
MPA	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	mm ²	Fläche
COA	mm ²	Crack opening area, Rissöffnungsfläche
COD	mm	Crack opening displacement, Rissöffnung
c _v	-	Durchflussbeiwert
2c	mm	Gesamte Risslänge
d _h	mm	Hydraulischer Durchmesser
l	mm	Strömungskanallänge
R _z	µm	Rauhigkeit
t	mm	Wanddicke
θ	°C	Temperatur
ζ	-	Strömungswiderstand

Indizes

Symbol	Bedeutung
ex	Exterior, Außenseite
in	Inlet, Innenseite
L	Links
M	Mitte
R	Rechts

1 Einleitende Bemerkungen

Dampferzeuger stellen eine wichtige Komponente in Druckwasserreaktoren dar. Im Dampferzeuger wird die Wärme der Kernreaktion vom Primärkühlmittel auf das Sekundärmedium übertragen, wobei letzteres in die Gasphase übergeht. Um diesen Wärmeübertrag effizient zu ermöglichen, ist eine möglichst dünne Trennwand und eine möglichst große Oberfläche erforderlich. In DWR wird dies durch eine Vielzahl U-förmiger Rohre realisiert, den Dampferzeuger-Heizrohren (DE-HR). Die große Oberfläche und die geringe Wanddicke machen die DE-HR zu einer besonders sensiblen Stelle der druckführenden Umschließung (DFU), was zu einer genauen Beschäftigung mit Schädigungen und Integrität der Rohre motiviert.

1.1 Ausgangssituation

Im August 2018 wurden in einem deutschen DWR bei einer Prüfung der Dampferzeuger-Heizrohre volumetrische Korrosionsbefunde und lineare Anzeigen festgestellt. Die Schäden weisen eine Tiefe bis teilweise 91% der Wanddicke von 1,2 mm auf. Diese Defekte werfen die Frage nach möglichen Versagensarten wie auch nach der erwarteten Leckrate im Fall von wanddurchdringenden Defekten auf. Eine Leckage im Dampferzeuger-Heizrohr stellt zum einen einen potenziellen Freisetzungspfad mit Containment-Bypass dar, zum anderen ist auch die Erosionsschädigung eines benachbarten Heizrohrs durch das Auftreffen des aus dem Leck austretenden Strahls von Bedeutung [1].

Während die Bewertung kritischer wanddurchdringender Risse in DE-HR gut abgesichert ist, sind die Bewertung und Vorhersagen von Leckraten, die durch Schäden in Dampferzeuger-Heizrohren entstehen, mit nicht quantifizierbaren Unsicherheiten versehen. Die Berechnung der zweiphasigen Ausströmung durch Leckagen in dickwandigen Komponenten basiert auf zahlreichen Experimenten und gut validierten Berechnungsmodellen. Bei einem Leck in einem dünnwandigen Heizrohr ist zu beachten, dass das Medium durch einen relativ kurzen Kanal strömt, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Reibung an der Wand eine untergeordnete Rolle spielt. Demgegenüber ist der Einfluss des Einströmbereichs von besonderer Bedeutung. Weiterhin findet die Ausströmung von der Primär- zur Sekundärseite bei Betrieb ins Medium Wasser statt und der Phasenübergang des Fluids kann außerhalb des Risskanals liegen. Ferner unterscheidet sich auch die detektierbare Leckrate von der eines Lecks mit Ausströmung in die Containment-Atmosphäre.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Untersuchungen sollen Experimente an der MPA Universität Stuttgart durchgeführt werden, die eine genauere Vermessung und Bestimmung der Phänomene bei

der Durchströmung von Defekten in dünnwandigen Rohren erlauben. Für die Versuche kommen Modelldefekte in Form von Bohrungen und Schlitzten und Rissen in Frage, die in dünne Platten der Wanddicke 1,2 mm und kleiner eingebracht werden, siehe Abbildung 1.1. Diese Leckblenden sollen in Versuchen mit ein- und zweiphasiger Ausströmung in Luft und in Wasser eingesetzt werden.

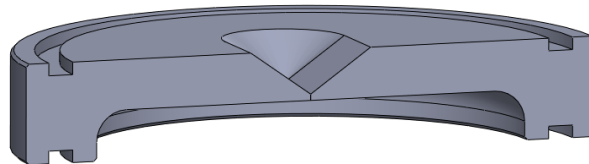


Abbildung 1.1: Blende mit reduzierter Wanddicke

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Verbesserung des Verständnisses und der Grundlagen bei Leckagevorgängen an dünnwandigen Bauteilen. Aus der übergeordneten Zielsetzung leiten sich die folgenden Einzelzielsetzungen ab:

- Leckratenmessungen an dünnwandigen Versuchskörpern mit Rissen, Spalten und Bohrungen
- Optische Untersuchung der Ausströmung zur qualitativen Einordnung der Strömung im Spalt in Ein- oder Mehrphasen-Strömung
- Ausströmversuche in Wasser zur Bestimmung des Einflusses des Umgebungsmediums

Die Ausrichtung des Forschungsvorhabens stellt eine logische und notwendige Ergänzung und Weiterführung zu den bisherigen und laufenden Arbeiten der Antragssteller dar [2].

1.3 Bezug

Bei Wirbelstromprüfungen im Rahmen wiederkehrender Revisionen im KKW Neckarwestheim wurden an Dampferzeuger-Heizrohren in allen vier Dampferzeugern Wanddickenschwächungen festgestellt. Die gefundenen Anzeigen lassen sich in zwei Schadenscharakteristiken unterscheiden. Neben volumenartigen punkt- bis kegelförmigen Wanddickenschwächungen traten lineare, rissartige Wanddickenschwächungen in Umfangsrichtung auf [1].

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Partner im Vorhaben ist die GRS. Das Verbundvorhaben war in folgende Arbeitspakete gegliedert:

AP 1: Vorarbeiten (MPA)

AP 1.1: Auslegung der Leckblenden

AP 1.2: Planung des Versuchsaufbaus und Anfertigung von Fertigungszeichnungen

AP 1.3: Durchführen der Umbaumaßnahmen

AP 2: Experimentelle Untersuchungen (MPA)

AP2.1: Leckratenmessungen bei Leckage in Luft

AP2.2: Leckratenmessungen bei Leckage in Wasser

AP 3: Numerische Arbeiten Untersuchungen mit Modellentwicklung (GRS)

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse des AP1 und AP2 berichtet. Die GRS berichtet über durchgeführte Arbeiten des AP3 in einem eigenen Bericht.

2 Versuchsaufbau am FSI Kreislauf

Zur experimentellen Untersuchung der Leckausströmung an Rissen und Spalten in dünnwandigen Bauteilen wie Dampferzeuger-Heizrohren wird an der MPA Universität Stuttgart der Fluid-Struktur-Interaktions-Versuchskreislauf (FSI-Kreislauf) eingesetzt. Der FSI-Kreislauf wurde in vorangegangenen Vorhaben ausgelegt und aufgebaut [2], [3] und im Rahmen dieses Vorhabens entsprechend den Vorhabenszielen ausgebaut und modifiziert, siehe Abbildung 2.1. Der FSI-Kreislauf kann im Bereich von etwa 5 bar bis maximal 80 bar Rohrrinnendruck und im Bereich von 15 °C bis maximal 280 °C Wassertemperatur betrieben werden, siehe Abbildung 2.2. Die Steuerung der Anlage erfolgt aus sicherheitstechnischen Gründen von einer abgeschirmten Leitwarte aus und ist weitgehend automatisiert. Im Betrieb wird zusätzlich zu den Messwertaufzeichnungen der Schaltzustand aller Hauptkomponenten der Anlage gespeichert. Neben der Erfassung der Leckrate über einen Kondensatauffangbehälter mit Kraftmessdose wird der Massenstrom mit Coriolis-Durchflussmessern an drei Positionen im Kreislauf gemessen. In den folgenden Abschnitten werden die im Rahmen dieses Projektes zur Erreichung der Vorhabensziele erforderlichen Umbaumaßnahmen am FSI-Kreislauf beschrieben.

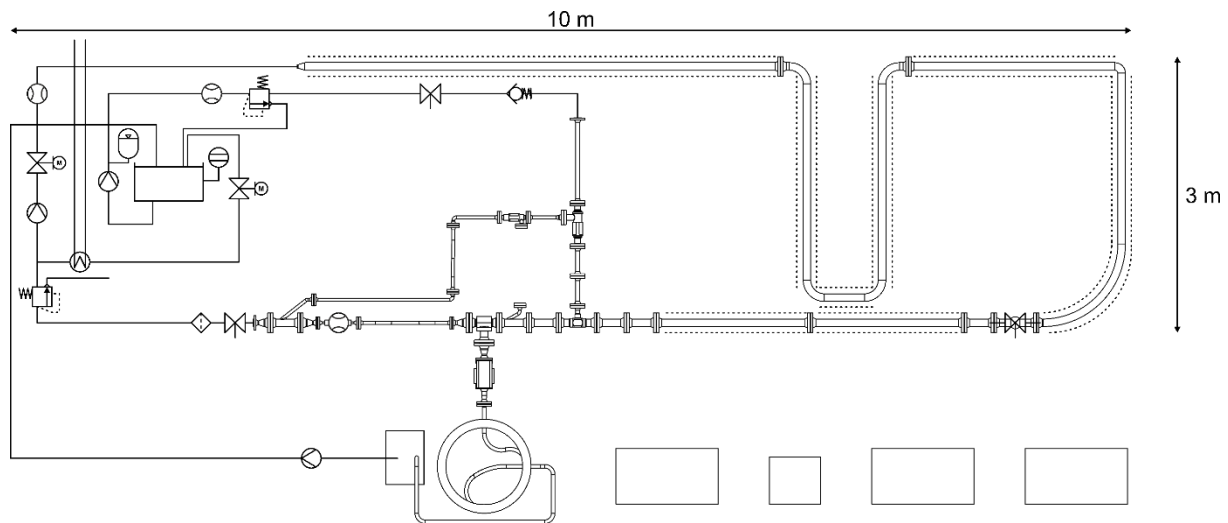


Abbildung 2.1: Schaltbild des FSI-Kreislaufs

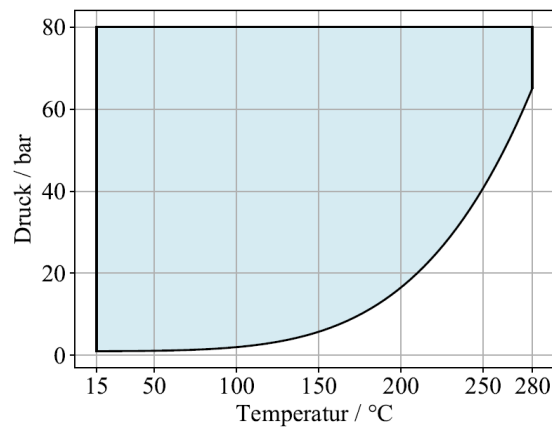


Abbildung 2.2: Verfügbarer Parameterraum (Druck und Temperatur) für Leckratenuntersuchungen am FSI-Kreislauf

2.1 Ausströmung in Luft mit Leckratenerfassung

Zur Erfassung der Leckrate im gesamten Parameterraum (Druck und Temperatur) ist dem Leckmodul mit Kugelhahn ein Kondensator angeschlossen. Dieser erlaubt es dampfförmige Leckraten bis 200 g/s vollständig zu kondensieren und leitet das Kondensat in den dafür vorgesehenen Auffangbehälter. Dieser Versuchsaufbau wurde bereits in vorausgegangenen Vorhaben erfolgreich eingesetzt, siehe Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 [2].

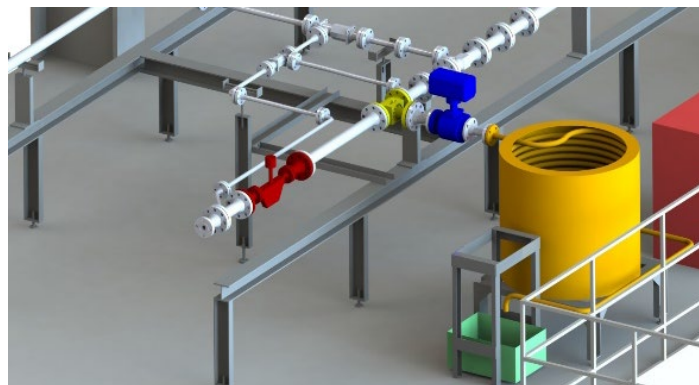


Abbildung 2.3: Konfiguration des FSI-Kreislaufs zur Leckratenerfassung mit Leckmodul (gelb), Kugelhahn (blau) und Kondensator (orange) sowie Kondensatauffangbehälter (grün) und Coriolis-Durchflussmesser (dunkelrot)

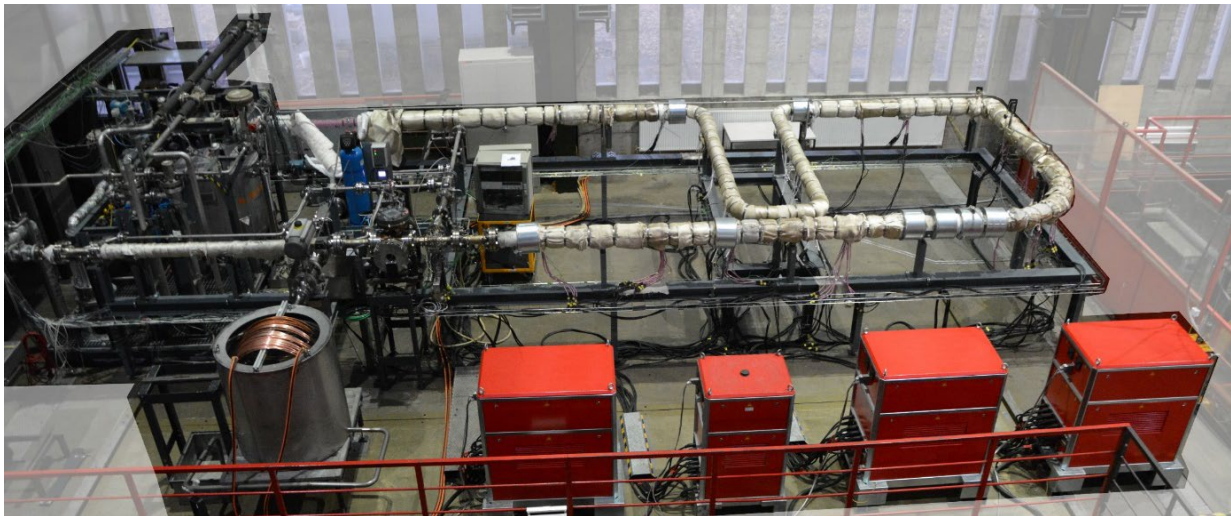


Abbildung 2.4: Aufnahme des FSI-Kreislaufs

2.2 Ausströmung in Luft mit optischer Untersuchung

Zur optischen Untersuchungen bei freier Ausströmung in Luft wird das Leckmodul konstruktiv verändert. Der Flanschanschluss mit Nennweite 80 an den Kugelhahn wird durch einen offenen Flanschring ersetzt, siehe Abbildung 2.5. Der mit bis zu 260 °C ausströmende Dampf wird hierbei in einer Einhausung mit Acrylglas eingefangen, teilweise kondensiert und verbleibender Dampf abgeleitet, siehe Abbildung 2.6. Der austretende Strahl wird innerhalb der Einhausung mit einem Rohrkrümmer nach unten umgelenkt. Damit wird die Anzahl der sich bildenden Wassertropfen reduziert da der Strahl tangential im Rohrkrümmer auftrifft und nicht rechtwinklig auf der Acrylglasscheibe auftrifft. Zur optischen Erfassung wird die Highspeedkamera MotionXtra NX7-S2 mit Makroobjektiv eingesetzt. Die Kamera mit Objektiv wird über Bleche vor Wärmestrahlung abgeschirmt. Ein Lüfter erzeugt eine gerichtete Luftströmung in Blickrichtung der Kamera und verhindert damit, dass Dampf oder Wassertropfen durch die Objektivöffnung in der Acrylglaseinfassung ausströmen. Mit diesem Aufbau lässt sich für ausgewählte Probestkörper der gesamte Parameterraum abfahren. Die Aufnahmen mit der Kamera werden, wie die Steuerung des gesamten Kreislaufs, von der Leitwarte aus kontrolliert. Eine Aufnahme des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Das Bild zeigt eine Draufsicht auf den Versuchsaufbau. Im linken Bildbereich ist das Stativ mit der Highspeedkamera mit Objektiv und Beleuchtungseinheit zu erkennen. Die Acrylglaseinhausung ist zentral im Bild angeordnet. Im rechten unteren Bereich ist das modifizierte Leckmodul und Teile der Rohrleitung des Hauptstranges des FSI-Kreislaufs zu erkennen.

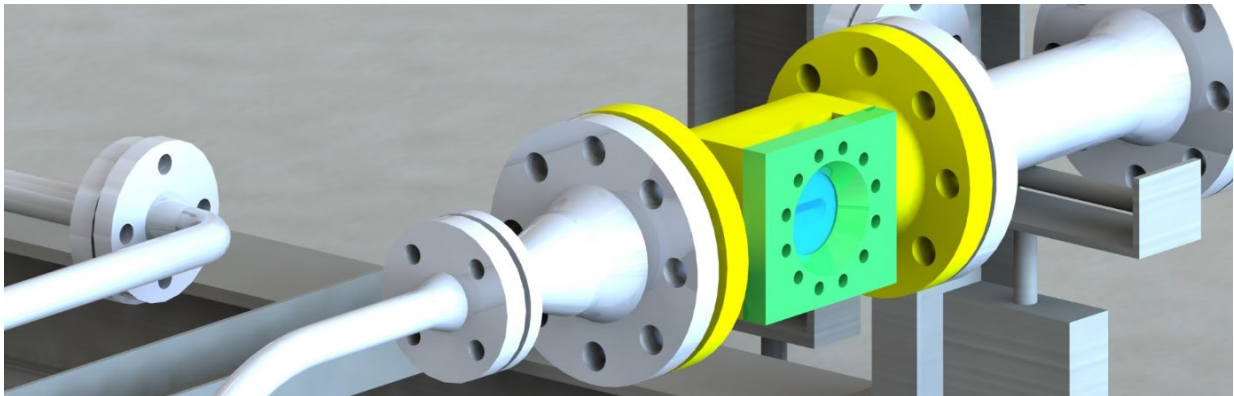


Abbildung 2.5: Konstruktiv angepasstes Leckmodul (gelb) mit offenem Flansching (grün) und Probekörper (blau) zur optischen Untersuchung der Leckausströmung

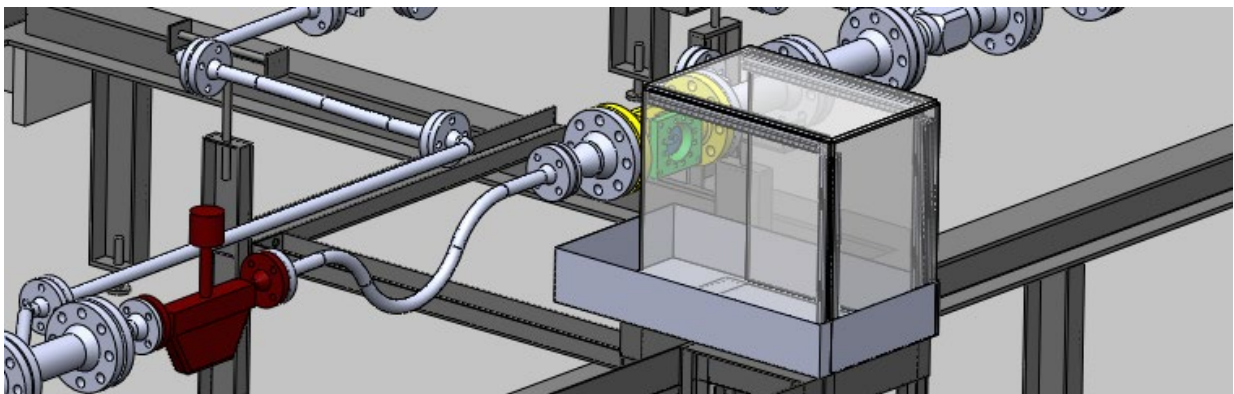


Abbildung 2.6: Planung des konstruktiv angepassten Leckmoduls mit Acrylgläseinfassung zur optischen Untersuchung der Leckausströmung

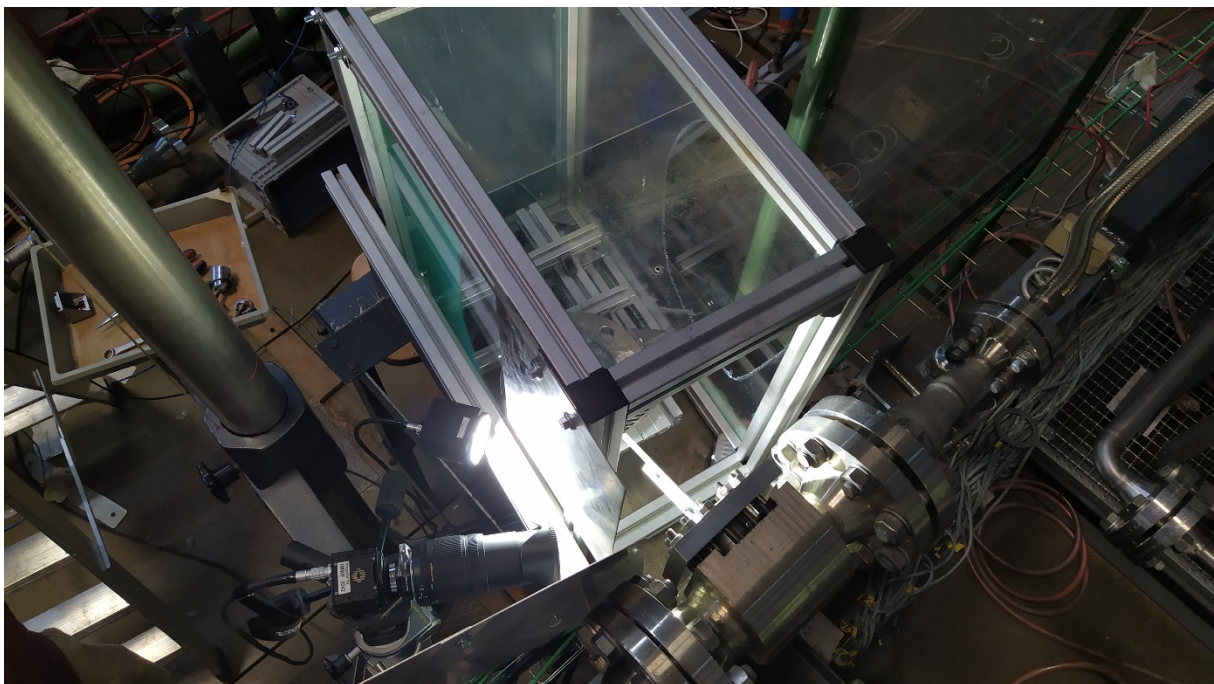


Abbildung 2.7: Experimenteller Aufbau zur optischen Untersuchung der Leckausströmung

2.3 Ausströmung in Wasserbecken mit Leckratenerfassung

Zur Untersuchung des Einflusses des Umgebungsmediums auf den Ausströmvorgang und damit die zu erwartende Leckrate werden Ausströmversuche in ein Wasserbecken durchgeführt. Hierzu wird der Kondensator entfernt und am Leckmodul ein Wasserbecken mit Überlauf angeflanscht. Dieses ist bis zur Überlaufkante mit Wasser gefüllt, so dass einströmendes Wasservolumen über die Überlaufkante in den Leckageauffangbehälter ausströmen kann, siehe Abbildung 2.8. Mit diesem Aufbau sind Leckratenmessungen im Temperaturbereich bis 100 °C, kurzzeitig auch darüber, möglich. Abbildung 2.9 zeigt zwei Fotografische Aufnahmen des Aufbaus für diese Untersuchungen aus zwei verschiedenen Perspektiven. Deutlich zu erkennen ist jeweils der Wasserbehälter und das Leckmodul.

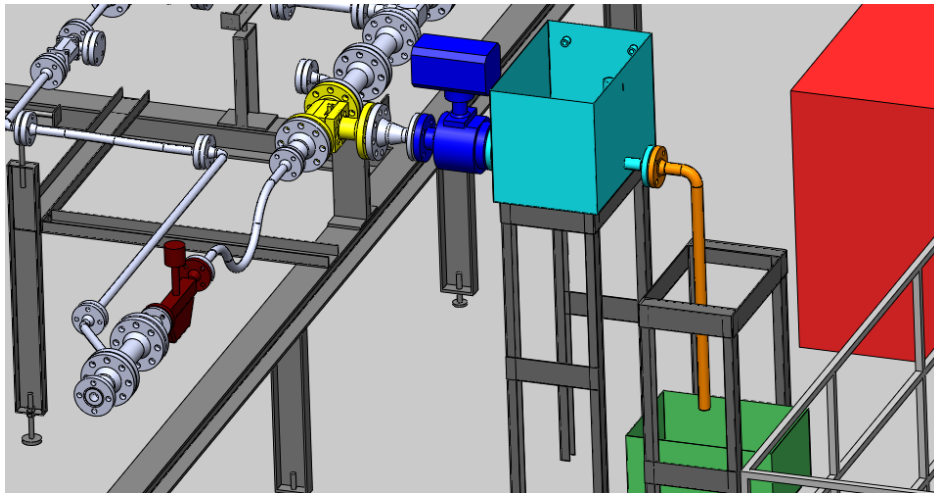


Abbildung 2.8: Aufbau mit Leckmodul (gelb) und Wasserbecken (türkis) zur Untersuchung der Leckausströmung in Wasserumgebung.

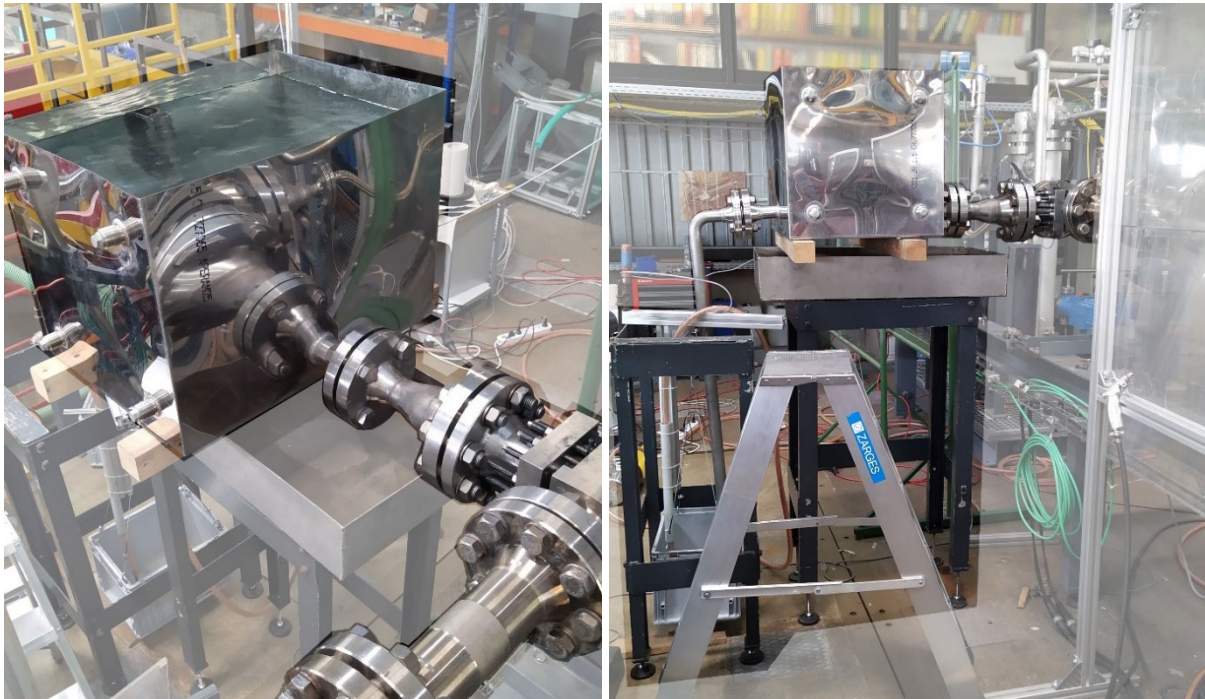


Abbildung 2.9: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Ausströmung in Wasser

3 Durchgeführte Untersuchungen

Im Folgenden werden die im Rahmen des Vorhabens angefertigten Versuchskörper sowie die durchgeführten Messungen beschrieben. Abbildung 3.1 zeigt einen Ausschnitt der technischen Zeichnung eines Versuchskörpers mit Bohrung. Alle hier untersuchten Probekörper weisen einen Außendurchmesser von 95 mm auf. In den folgenden Kapiteln wird zunächst auf die Versuchskörper mit Bohrung, siehe Abbildung 3.2, eingegangen. Daran anschließend wird auf den Probekörper mit Ermüdungsriss eingegangen, siehe Abbildung 3.3. Abschließend werden die Ergebnisse der drei Messkampagnen an Versuchskörpern mit definierten Spalten, siehe Abbildung 3.4, beschrieben.

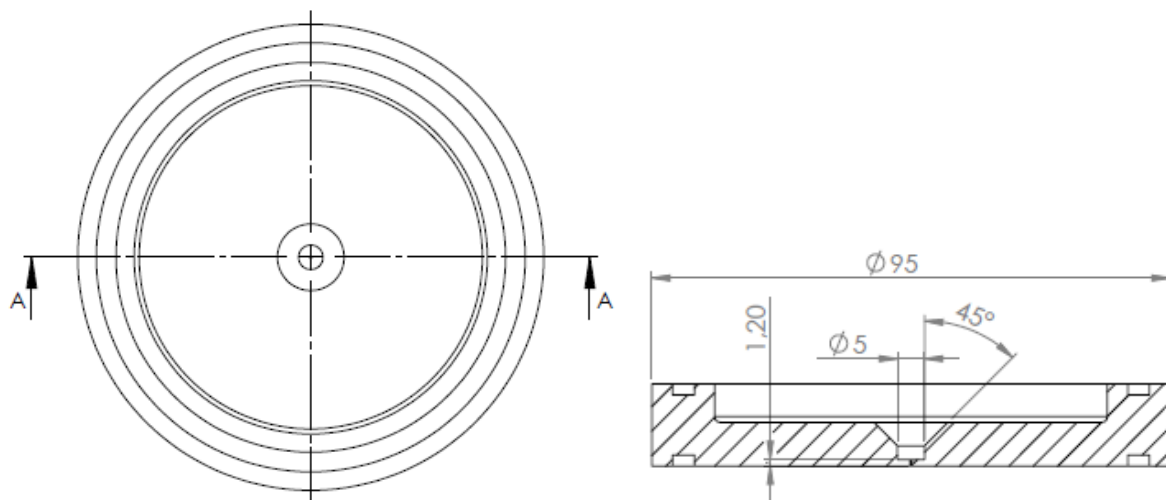


Abbildung 3.1: Technische Zeichnung der Versuchskörper mit Bohrung

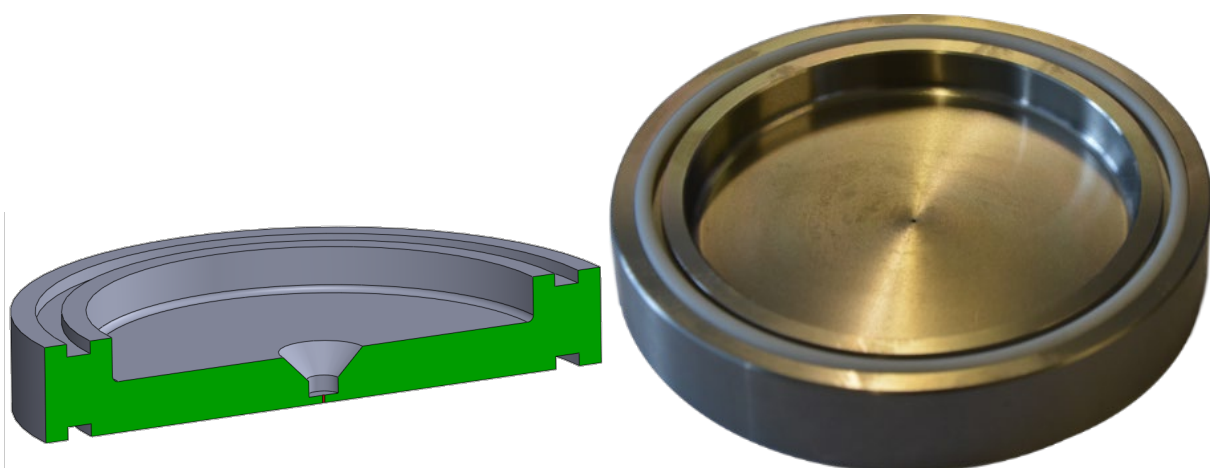


Abbildung 3.2: Schnittdarstellung eines Versuchskörpers mit Bohrung

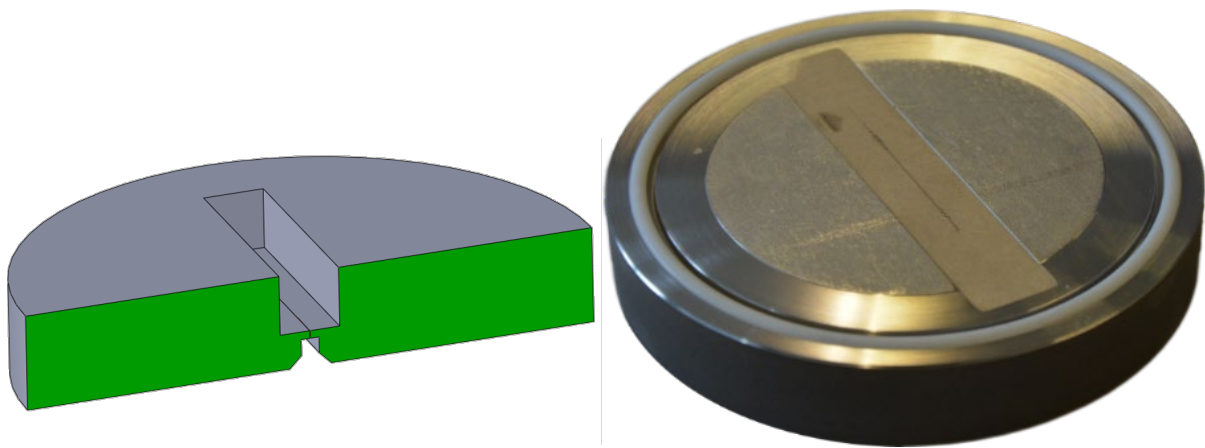


Abbildung 3.3: Schnittdarstellung eines Versuchskörpers mit Ermüdungsrisse

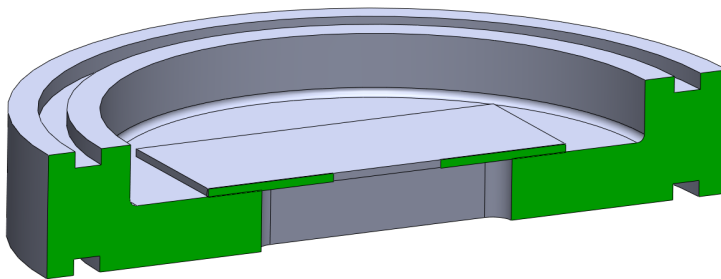


Abbildung 3.4: Versuchskörper mit definiertem Spalt

3.1 Versuchskörper VS030

Die Fertigungszeichnung für den hier beschriebenen Versuchskörper VS030 (Durchmesser der Bohrung $\approx 0,30$ mm) ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zur Ermittlung der Durchmesser an Ein- und Austritt des Leckkanals wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt, siehe Abbildung 3.5. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.1 angegeben. Leckratenmessungen wurden im Bereich von 20 °C bis 270 °C für Drücke zwischen 10 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht. Die ermittelten Leckraten sind in Abbildung 3.6 visualisiert.

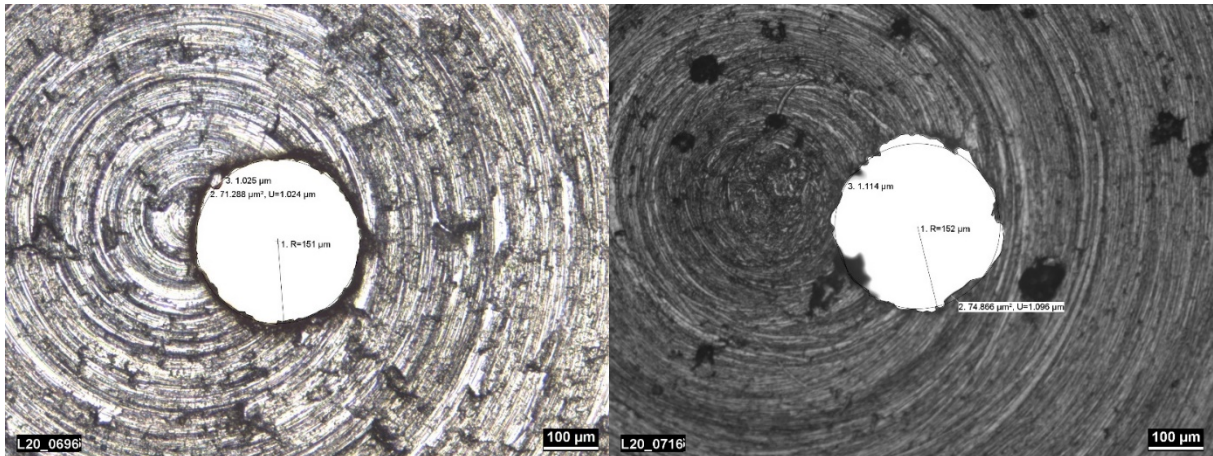


Abbildung 3.5: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintritts- (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper VS030

Tabelle 3.1: Geometrische Eckdaten von VS030

Wanddicke	t	1,24 mm
Rauigkeit	R _z	7,4 μm
Austrittsdurchmesser	d _{h,ex}	0,304 mm
Eintrittsdurchmesser	d _{h,in}	0,302 mm
Relative Länge	l/d _h	4,08 ... 4,11

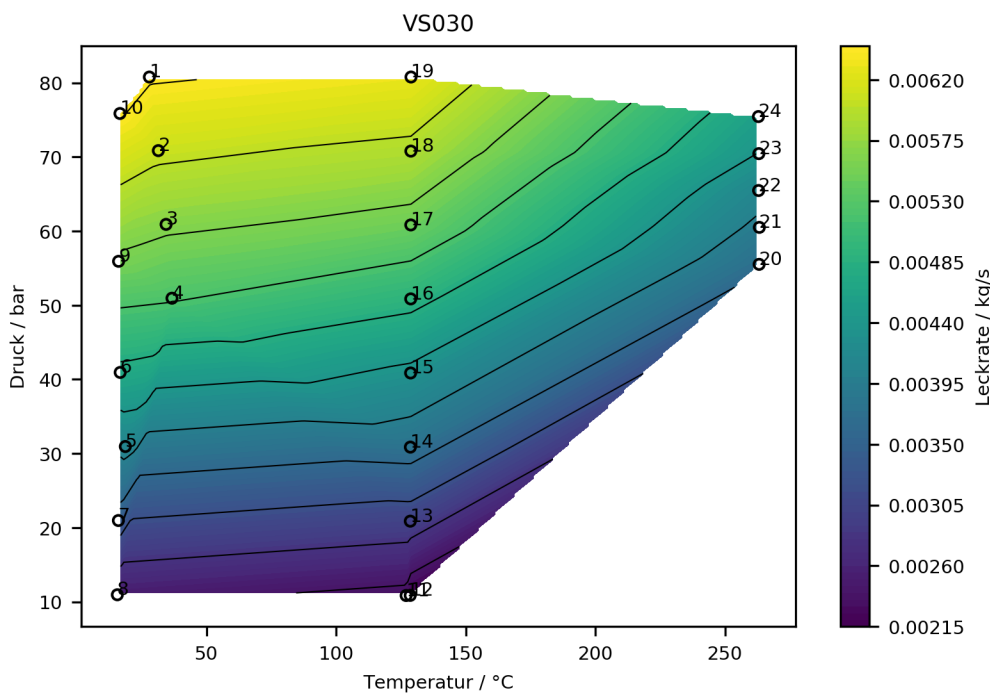


Abbildung 3.6: Darstellung der Leckrate an VS030 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

3.2 Versuchskörper VS040

Die Fertigungszeichnung für den hier beschriebenen Versuchskörper VS040 (Durchmesser der Bohrung $\approx 0,40$ mm) ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zur Ermittlung der Durchmesser an Ein- und Austritt des Leckkanals wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt, siehe Abbildung 3.7. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.2 angegeben. Leckratenmessungen wurden im Bereich von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ für Drücke zwischen 10 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht. Die ermittelten Leckraten sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Ausströmversuche in Luft wurden weitgehend im gesamten Parameterfeld verteilt und gemäß ihrer Ausprägung – reiner Freistrahler oder Freistrahler mit Nassdampfkegel – durch Auswertung der Highspeedaufnahmen in Abbildung 3.9 kategorisiert. Eine Erläuterung zur Kategorisierung des austrittseitigen Strömungsregimes findet sich in Abbildung 3.20.

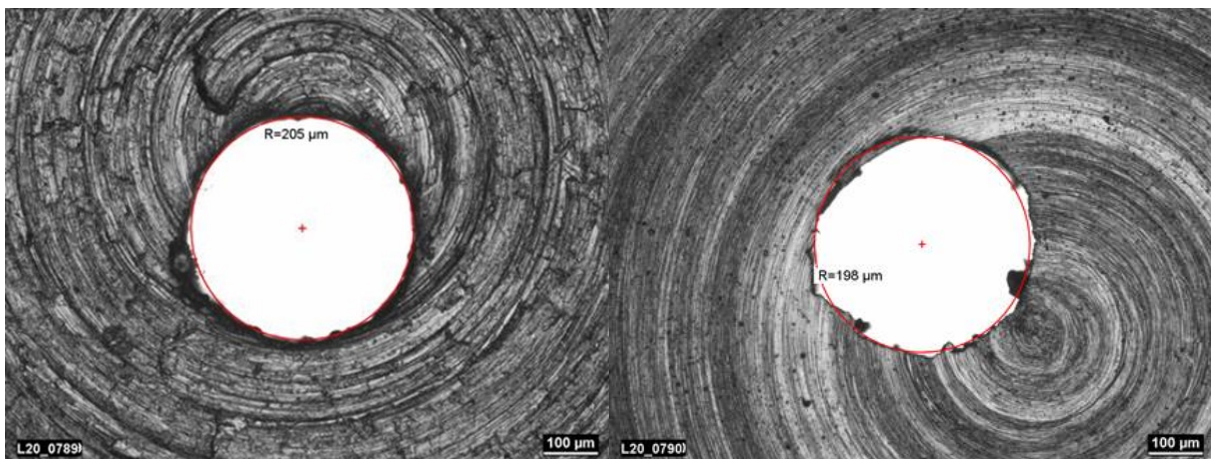


Abbildung 3.7: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintritts- (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper VS040

Tabelle 3.2: Geometrische Eckdaten von VS040

Wanddicke	t	1,24 mm
Rauigkeit	R_z	7,4 μm
Austrittsdurchmesser	$d_{h,ex}$	0,396mm
Eintrittsdurchmesser	$d_{h,in}$	0,41 mm
Relative Länge	l/d_h	3,02 ... 3,13

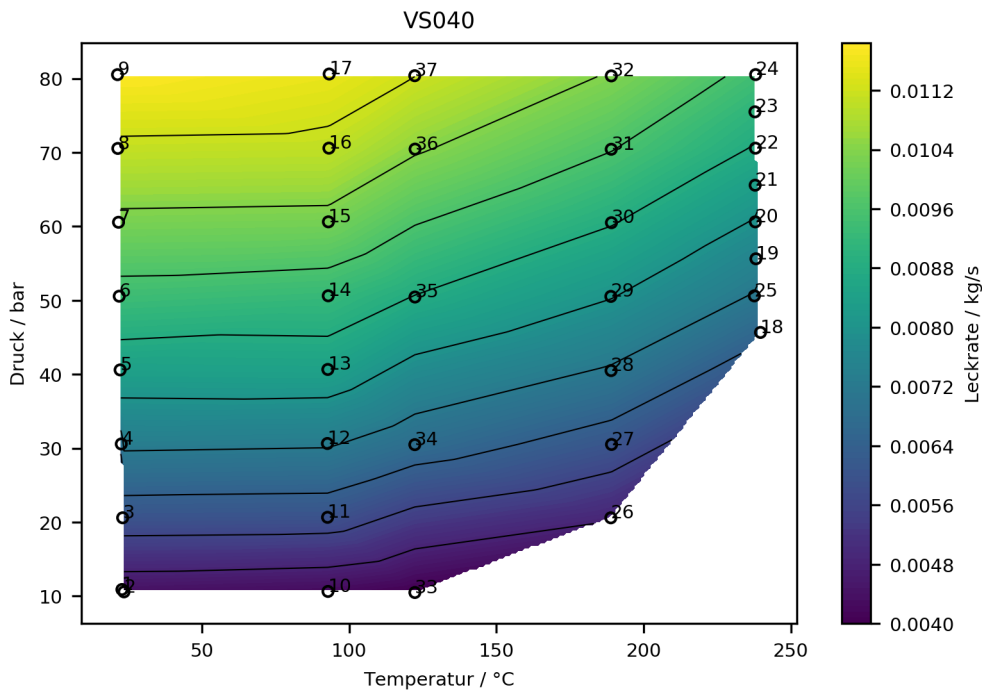


Abbildung 3.8: Darstellung der Leckrate an VS040 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.

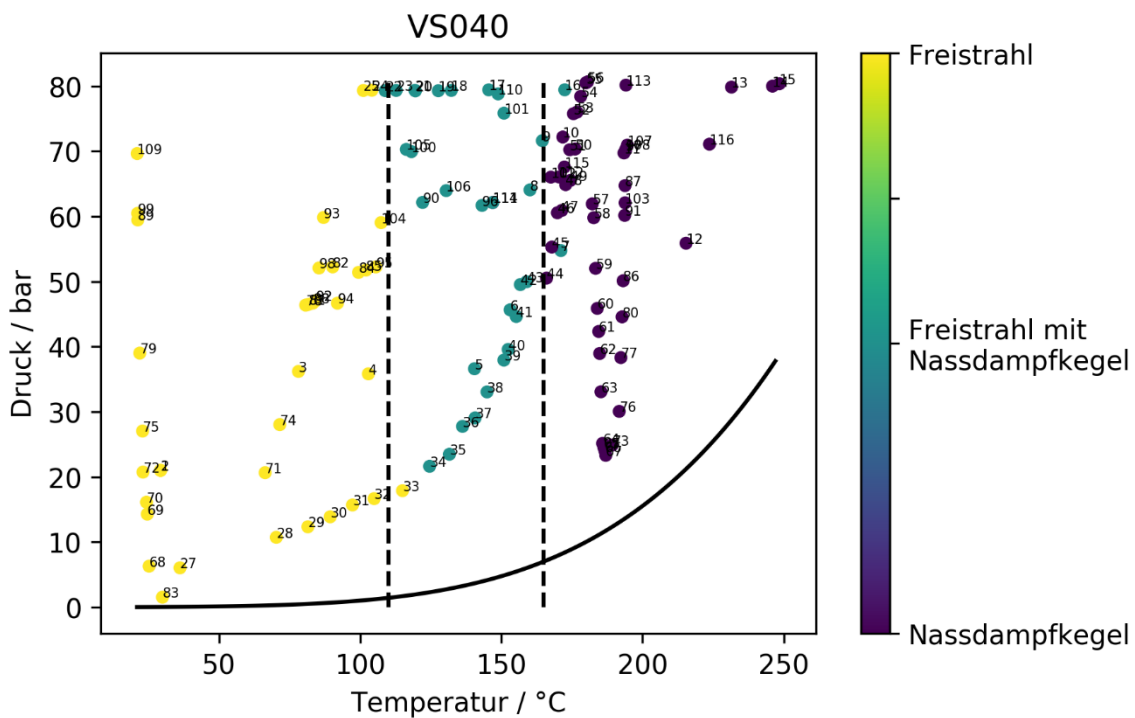


Abbildung 3.9: Kategorisierung des Ausströmvorgangs abhängig von der Ausbildung eines Freistrahls oder einer Nassdampfkegels bei der optischen Untersuchung mit High-Speed-Kamera, Erläuterung siehe Abbildung 3.20.

3.3 Versuchskörper VS045

Die Fertigungszeichnung für den hier beschriebenen Versuchskörper VS045 (Durchmesser der Bohrung $\approx 0,45$ mm) ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zur Ermittlung der Durchmesser an Ein- und Austritt des Leckkanals wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt, siehe Abbildung 3.10. Abbildung 3.11 zeigt einen leichten Grataufwurf an der Eintrittskante. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.4 angegeben. Leckratenmessungen wurden nur bei Raumtemperatur für Drücke zwischen 10 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht. Die ermittelten Leckraten sind für Raumtemperatur in Abbildung 3.12 dargestellt. Die optischen Ausströmversuche in Luft liegen im gesamten Parameterfeld verteilt und dienen zur Kategorisierung gemäß der Ausprägung des Strömungsregimes – reiner Freistrahl oder Freistrahl mit Nassdampfkegel – durch Auswertung der Highspeedaufnahmen. Die Kategorisierung ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Eine Erläuterung zur dieser Abbildung findet sich in Abbildung 3.20.

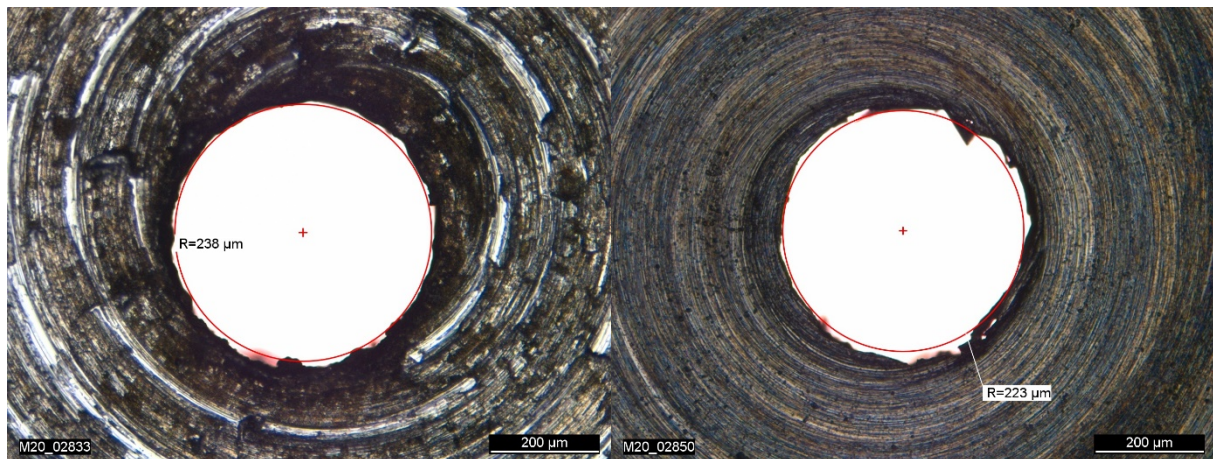


Abbildung 3.10: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintritts- (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper VS045

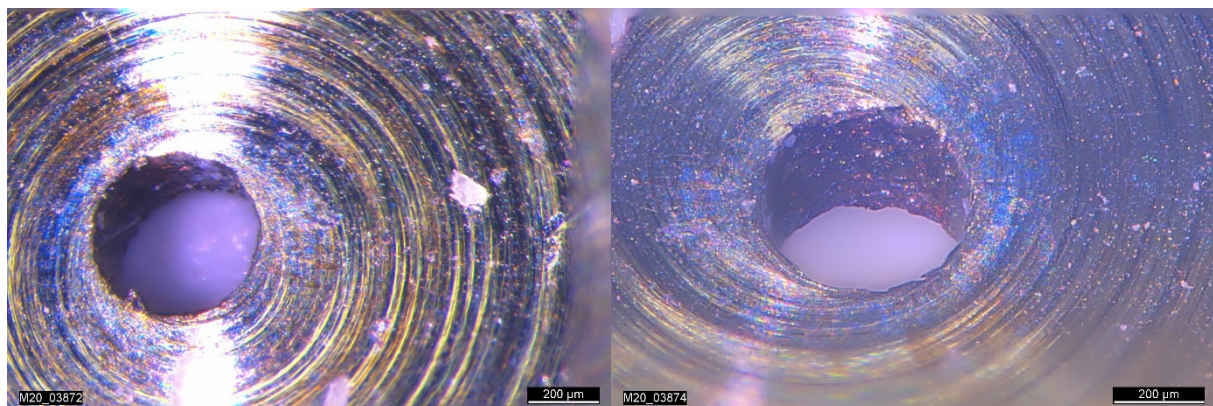


Abbildung 3.11: Lichtmikroskopische, durch Bildkombinationsalgorithmen erzeugte, Aufnahme der Eintrittsöffnung mit Blick in den Leckkanal

Tabelle 3.3: Geometrische Eckdaten von VS045

Wanddicke	t	0,65 mm
Rauigkeit	R _z	7,4 µm
Austrittsdurchmesser	d _{h,ex}	0,476 mm
Eintrittsdurchmesser	d _{h,in}	0,446 mm
Relative Länge	l/d _h	1,33 ... 1,39

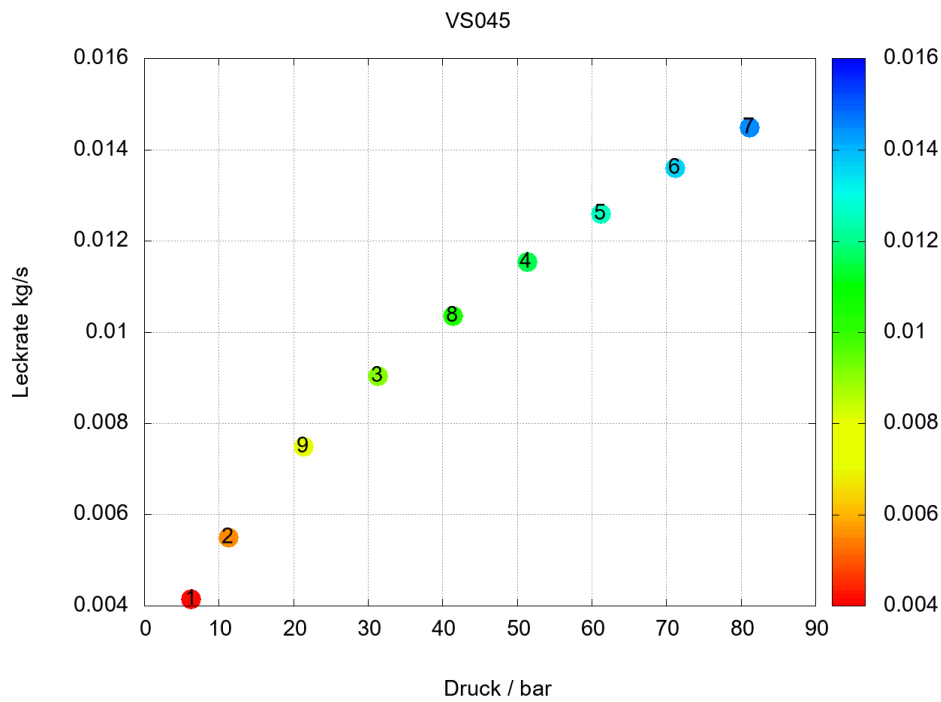


Abbildung 3.12: Darstellung der Leckrate an VS045 bei RT in Abhängigkeit des Drucks mit Reihenfolge der durchgeführten Messungen.

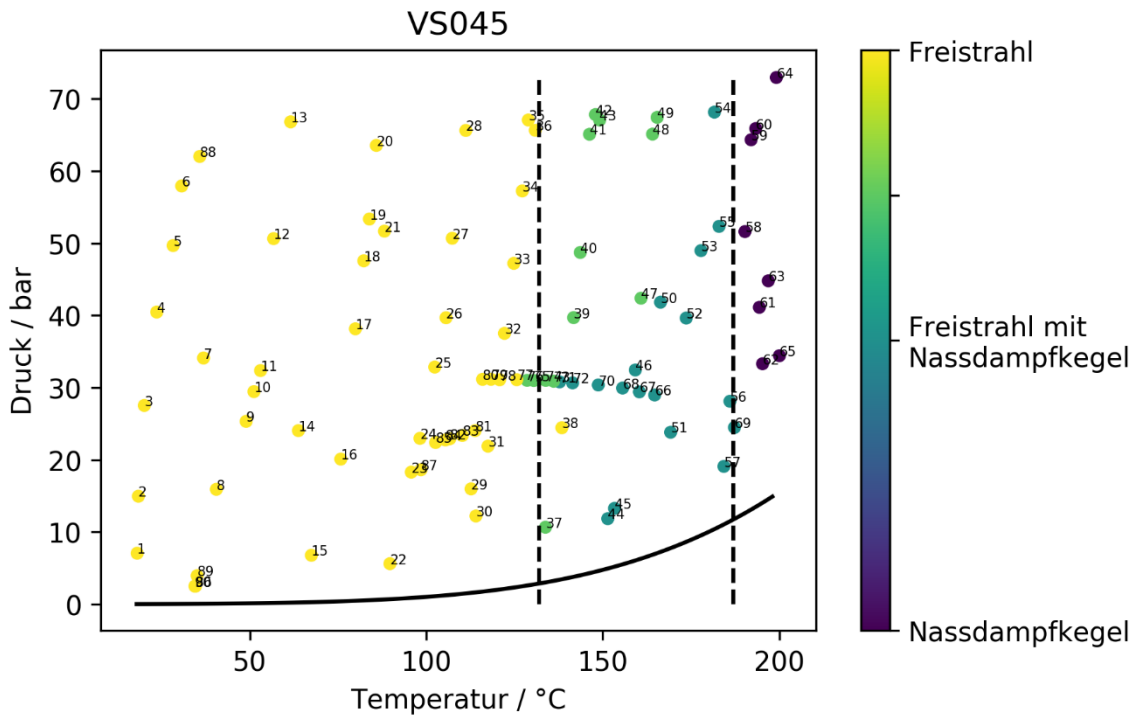


Abbildung 3.13: Kategorisierung des Ausströmvorgangs abhängig von der Ausbildung eines Freistrahls oder einer Nassdampfkegels bei der optischen Untersuchung mit High-Speed-Kamera. Die Zahlen im Diagramm dokumentieren die Reihenfolge der Versuche. Erläuterung siehe Abbildung 3.20.

3.4 Versuchskörper VS055

Die Fertigungszeichnung für den hier beschriebenen Versuchskörper VS055 (Durchmesser der Bohrung $\approx 0,55$ mm) ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zur Ermittlung der Durchmesser an Ein- und Austritt des Leckkanals wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt, siehe Abbildung 3.14. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.4 angegeben. Leckratenmessungen wurden für Drücke zwischen 10 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde im Temperaturbereich von 20 °C bis 270 °C frei in Luft bzw. für 20 °C und 120 °C in Wasser eingeströmt. Die ermittelten Leckraten sind für Ausströmung in Luftumgebung in Abbildung 3.15 und für die Einströmung in Wasser in Abbildung 3.16 dargestellt. Die Ausströmversuche in Luft zur optischen Untersuchung wurden in ausgewählten Bereichen des Parameterfelds durchgeführt und gemäß ihrer Ausprägung – reiner Freistrahls oder Freistrahls mit Nassdampfkegel – durch Auswertung der Highspeedaufnahmen kategorisiert. Das Ergebnis dieser Einteilung ist in Abbildung 3.17 dargestellt.

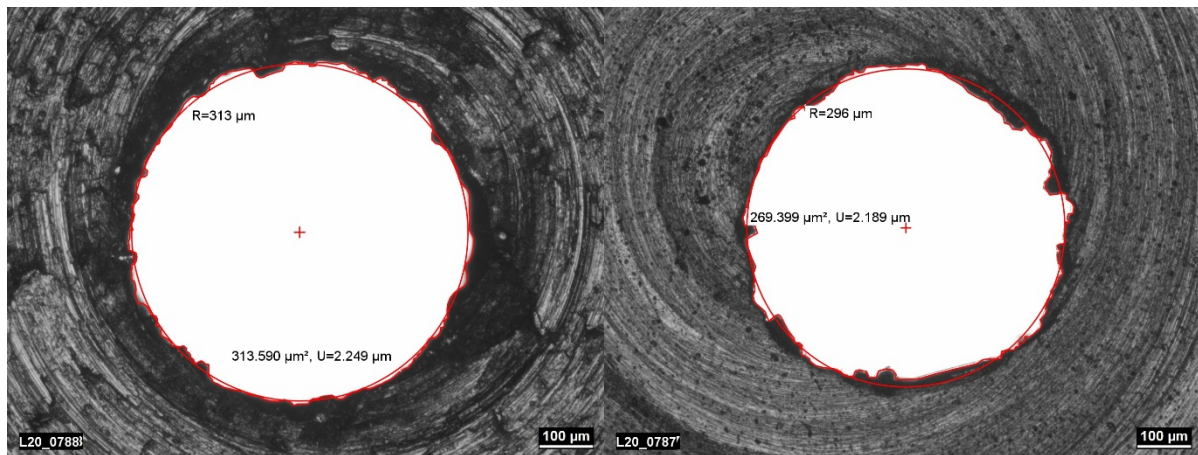


Abbildung 3.14: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintritts- (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper VS055

Tabelle 3.4: Geometrische Eckdaten von VS055

Wanddicke	t	1,2 mm
Rauigkeit	R _z	7,4 µm
Austrittsdurchmesser	d _{h,ex}	0,592 mm
Eintrittsdurchmesser	d _{h,in}	0,626 mm
Relative Länge	l/d _h	1,96 ... 2,1

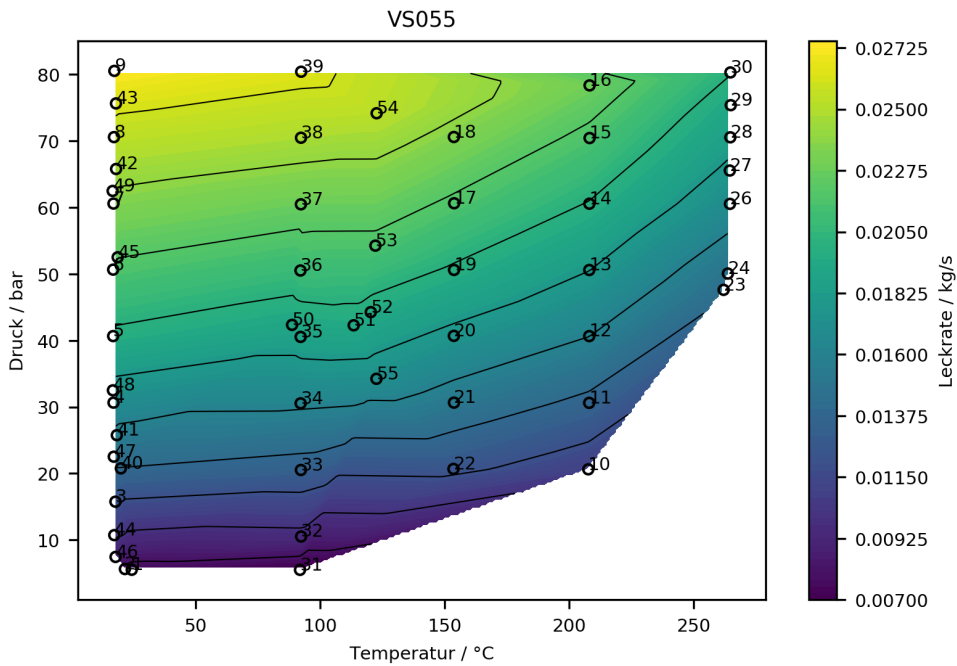


Abbildung 3.15: Darstellung der Leckrate an VS055 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Luft

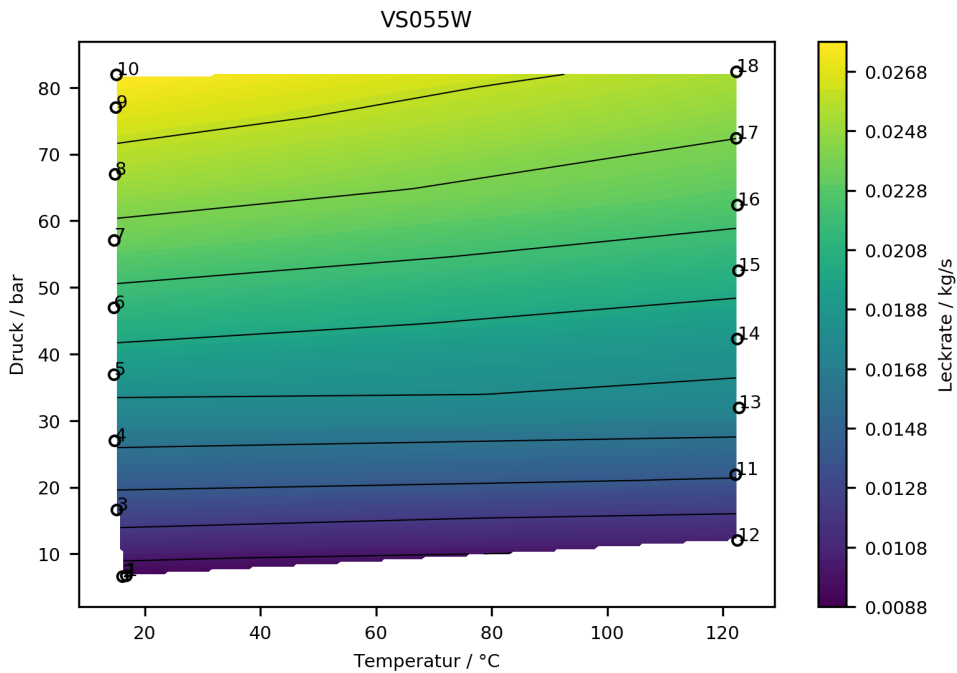


Abbildung 3.16: Darstellung der Leckrate an VS055 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Wasser

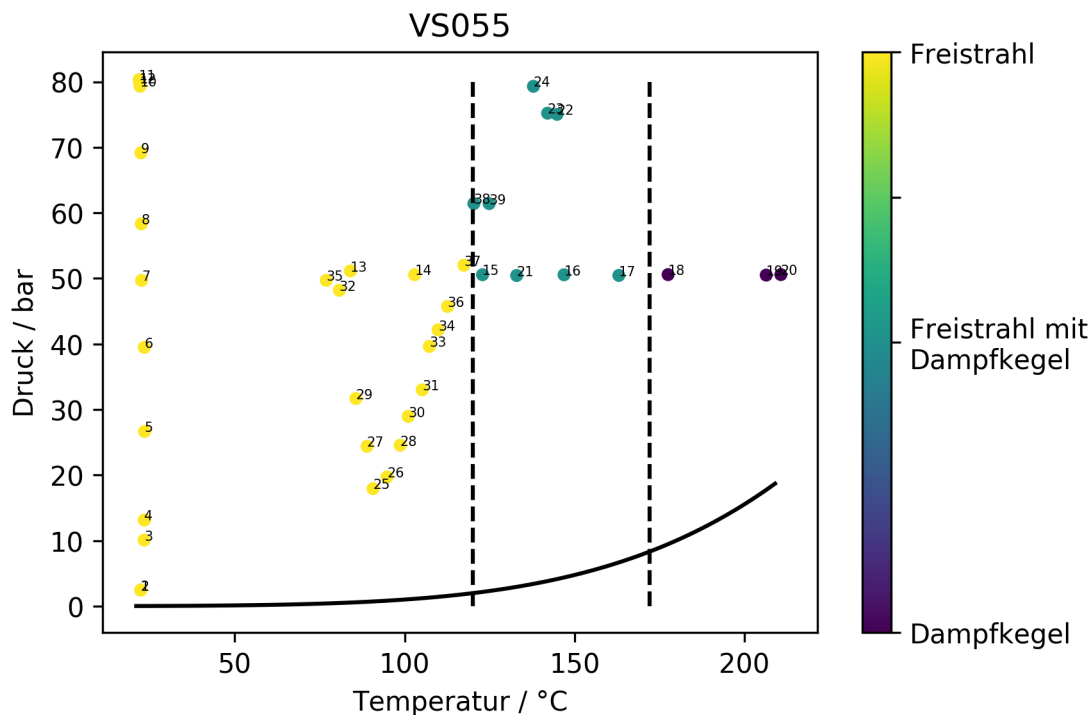


Abbildung 3.17: Kategorisierung des Ausströmvorgangs in Luft abhängig von der Ausbildung eines Freistrahls oder einer Nasdampfkegels bei der Optischen Untersuchung mit High-Speed-Kamera, Erläuterung siehe Abbildung 3.20

3.5 Versuchskörper VS060

Die Fertigungszeichnung für den hier beschriebenen Versuchskörper VS060 (Durchmesser der Bohrung $\approx 0,60$ mm) ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zur Ermittlung der Durchmesser an Ein- und Austritt des Leckkanals wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt, siehe Abbildung 3.18. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.2 angegeben. Abweichend von den zuvor beschriebenen Versuchskörpern weist VS060 einen längeren Leckkanal von 8 mm auf. Leckratenmessungen wurden im Bereich von 20 °C bis 250 °C und für Drücke zwischen 10 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht. Die ermittelten Leckraten sind in Abbildung 3.19 dargestellt. Die Ausströmversuche in Luft wurden weitgehend im gesamten Parameterfeld verteilt und gemäß ihrer Ausprägung – reiner Freistrah oder Freistrah mit Nasdampfkegel – durch Auswertung der Highspeedaufnahmen in Abbildung 3.20 kategorisiert. Der Versuchskörper VS060 wurde bereits in einem früheren Vorhaben gefertigt und untersucht [2]. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden über die bereits vorhandenen Leckratenuntersuchungen hinaus eine optische Untersuchung des Ausströmverhaltens durchgeführt. Die Angabe der Leckrate in diesem Bericht hat ergänzenden Charakter.

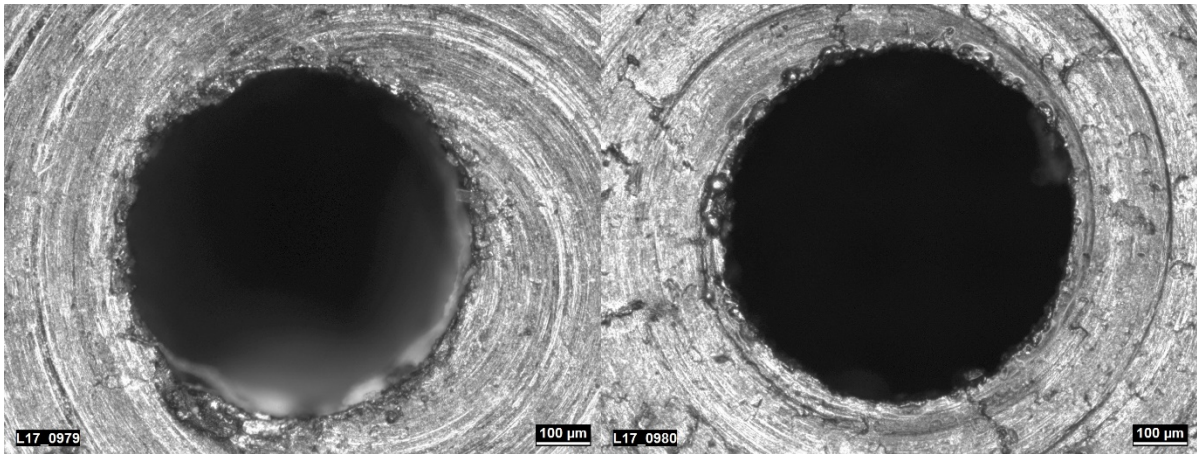


Abbildung 3.18: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintritts- (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper VS060

Tabelle 3.5: Geometrische Eckdaten von VS060

Wanddicke	t	8 mm
Rauigkeit	R _z	7,4 µm
Austrittsdurchmesser	d _{h,ex}	0,646 mm
Eintrittsdurchmesser	d _{h,in}	0,634 mm
Relative Länge	l/d _h	12,38 ... 12,62

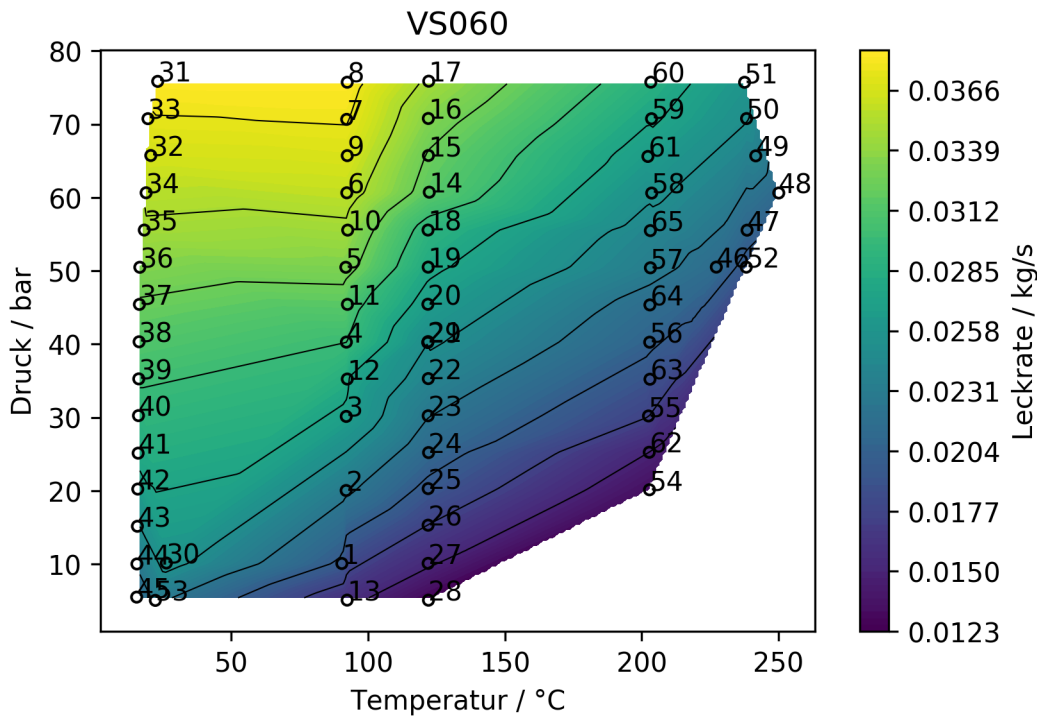


Abbildung 3.19: Darstellung der Leckrate an VS060 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Luft.

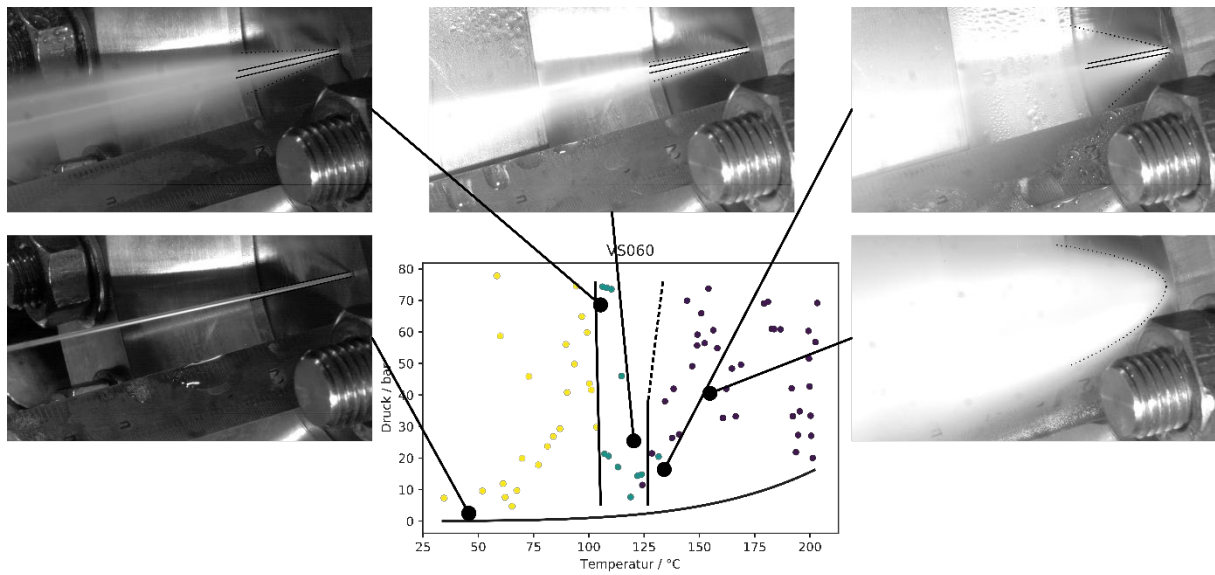


Abbildung 3.20: Erläuterung zur Kategorisierung des Ausströmvorgangs, siehe
 Abbildung 3.21

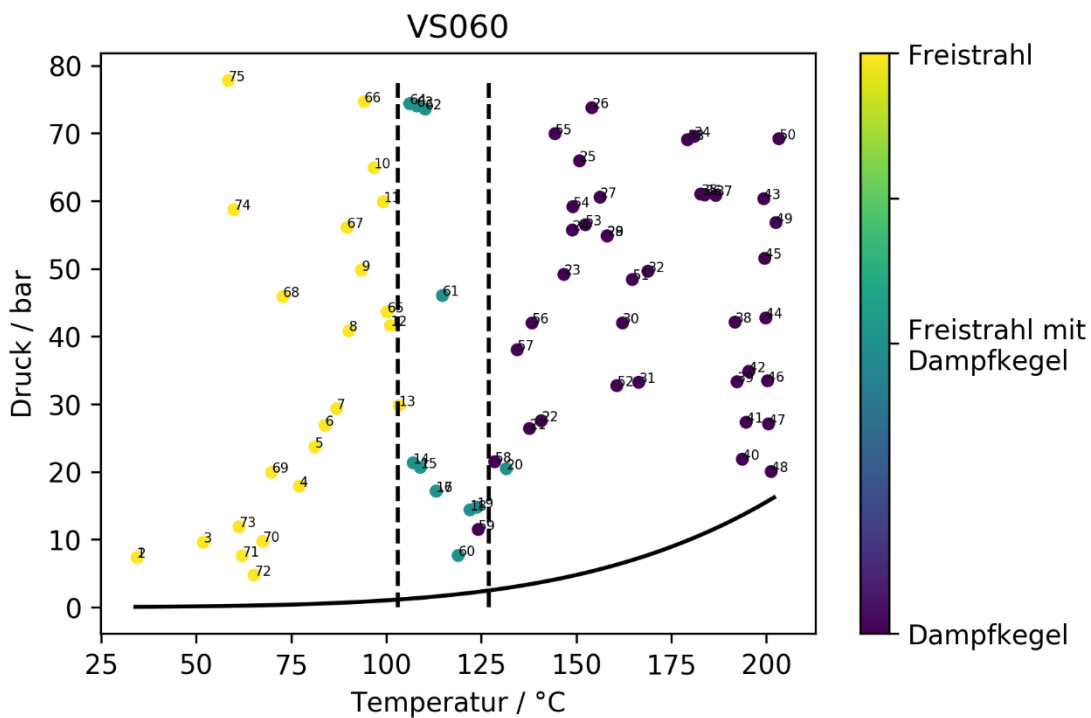


Abbildung 3.21: Kategorisierung des Ausströmvorgangs abhängig von der Ausbildung eines
 Freistrahls oder einer Nasdampfkegels bei der optischen Untersuchung
 mit High-Speed-Kamera, Erläuterung siehe Abbildung 3.20

3.6 Versuchskörper R4

Der Versuchskörper R4 (Ermüdungsriß) ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.6 angegeben. Die ermittelten Leckraten sind in Abbildung 3.23 visualisiert. Es wurden mehr als 160 Einzelmessungen durchgeführt. Hierbei konnten bereits durchgeführte Messungen teilweise nicht durch Wiederholungsmessungen bestätigt werden. Die Ergebnisse nach Reinigung des Versuchskörpers sind in Abbildung 3.24 dargestellt. Ursache hierfür wird in Partikeln vermutet, die sich im Wasser des FSI-Kreislaufs befinden und im Laufe der Versuchsdauer im Spalt eingelagert werden und damit die wirksame Rissöffnungsfläche reduzieren. Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26 zeigen das rissartige Leck von der Eintritts- und Austrittsseite. Abbildung 3.27 und Abbildung 3.28 zeigen typische Ausschnitte vor und nach Versuchsdurchführung. Hier zeigen sich, abgesehen von den bereits beschriebenen Partikeln, keine relevanten Veränderungen am Riss durch die einwirkende Strömung. Leckratenmessungen wurden im Temperaturbereich von 20 °C bis 270 °C für Drücke zwischen 10 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht.



Abbildung 3.22: Aufnahme der Eintritts- (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper R4

Tabelle 3.6: Geometrische Eckdaten von R4

Wanddicke	t	1,3 mm
Rauigkeit	R_z	40 μm
Risslänge _{Austrittseitig}	$2C_{\text{ex}}$	44,250 mm
Risslänge _{Eintrittseitig}	$2C_{\text{in}}$	42,120 mm
Rissöffnung _{Austrittseitig}	COD_{ex}	0,078 mm
Rissöffnung _{Eintrittseitig}	COD_{in}	0,05 mm
Austrittsdurchmesser	$d_{h,\text{ex}}$	0,16 mm
Eintrittsdurchmesser	$d_{h,\text{in}}$	0,1 mm

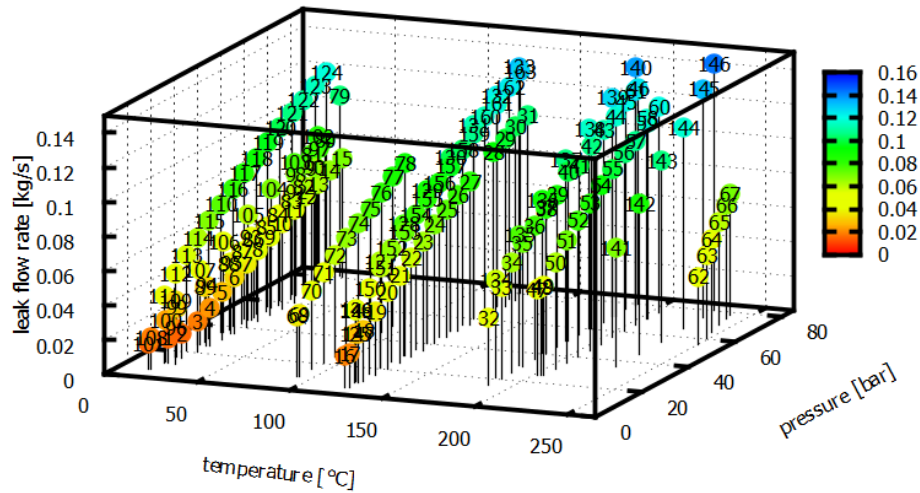


Abbildung 3.23: Darstellung der gemessenen Leckrate an R4 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Luft (etwa 160 Messpunkte)

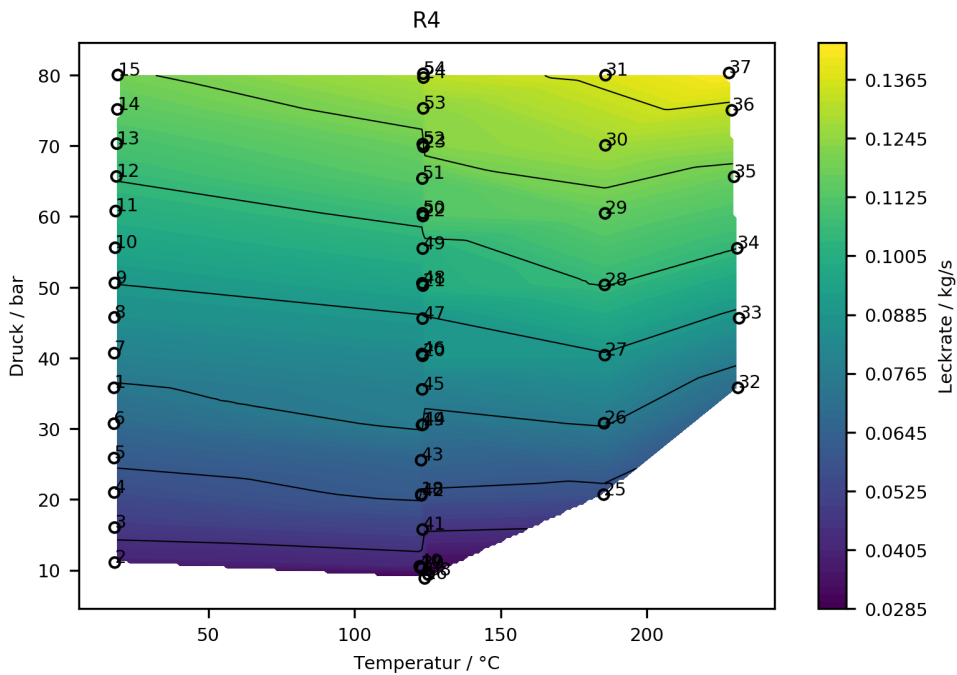


Abbildung 3.24: Darstellung der gemessenen Leckrate der Wiederholungsmessung an R4 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Luft nach Reinigung des Risses



Abbildung 3.25: Montage von lichtmikroskopischen Aufnahmen des gesamten Risses in R4 auf der Eintrittsseite



Abbildung 3.26: Montage von lichtmikroskopischen Aufnahmen des gesamten Risses in R4 auf der Austrittsseite

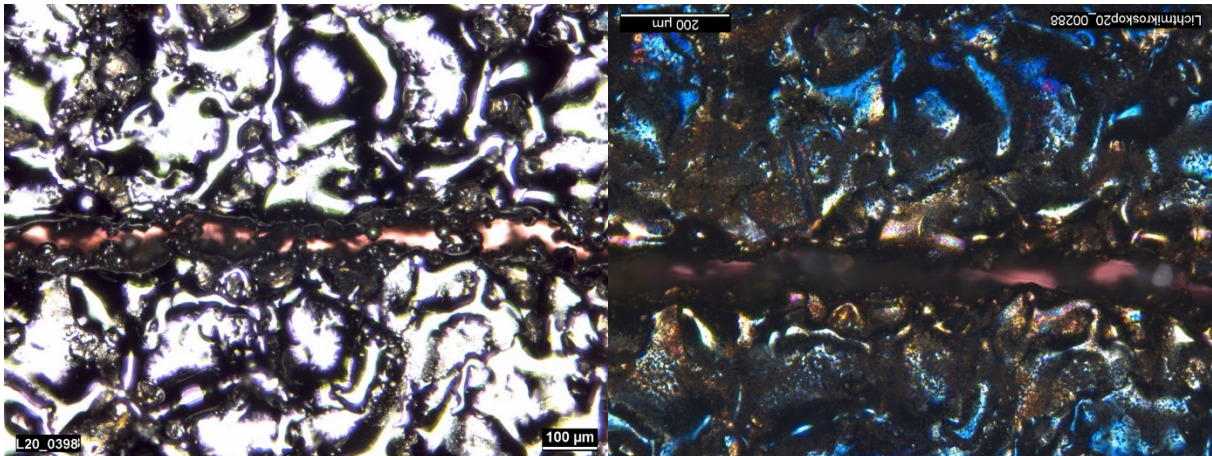


Abbildung 3.27: Lichtmikroskopische Aufnahme des Risseintrittes in R4 vor und nach den experimentellen Untersuchungen

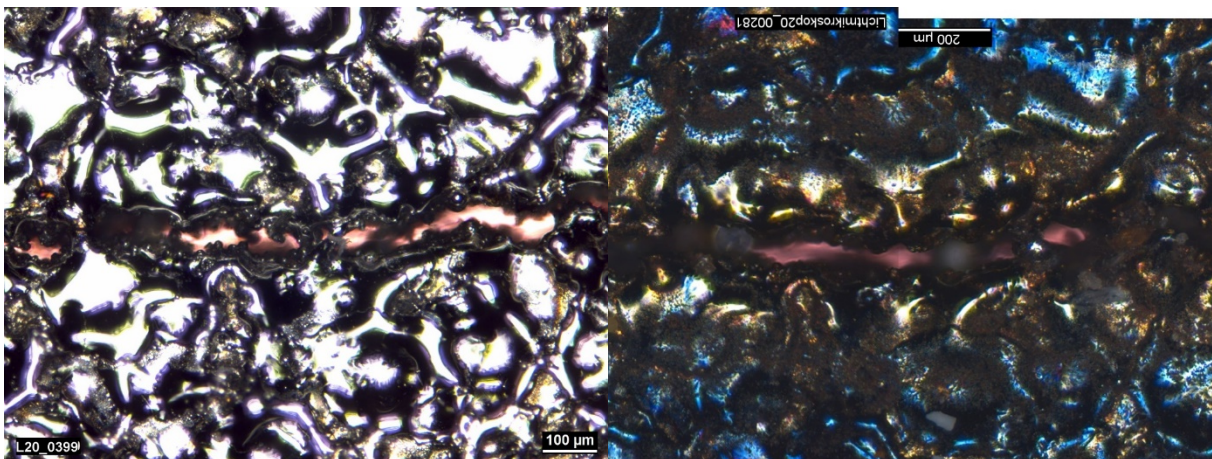


Abbildung 3.28: Lichtmikroskopische Aufnahme des Rissaustrittes in R4 vor und nach den experimentellen Untersuchungen

3.7 Versuchskörper 010T001M

Der hier beschriebene Versuchskörper 010T001M (rechteckförmige Leckfläche) ist in Abbildung 3.29 dargestellt. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.7 angegeben. Die ermittelten Leckraten sind in Abbildung 3.32 visualisiert. Abbildung 3.30 zeigt die Form der rechteckigen Leckfläche auf der Eintrittsseite an drei Positionen. Leckratenmessungen wurden im Temperaturbereich von 20 °C bis 260 °C für Drücke zwischen 10 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht. Vorgesehen war die Erfassung des Drucks im Eintrittsbereich an 3 Stellen mit 0,6 mm, 1 mm und 2 mm Entfernung von der Eintrittskante. Auf-

grund der großen Leckrate musste die Spalllänge mittels aufgeschweißter Blechstreifen verkürzt werden sodass die Bohrung mit 0,6 mm Abstand zur Eintrittskante nicht zur Erfassung des Drucks genutzt werden konnte, siehe Abbildung 3.31. Die im Eintrittsbereich erfassten Drücke entsprechen dem Stagnationsdruck im FSI-Kreislauf.

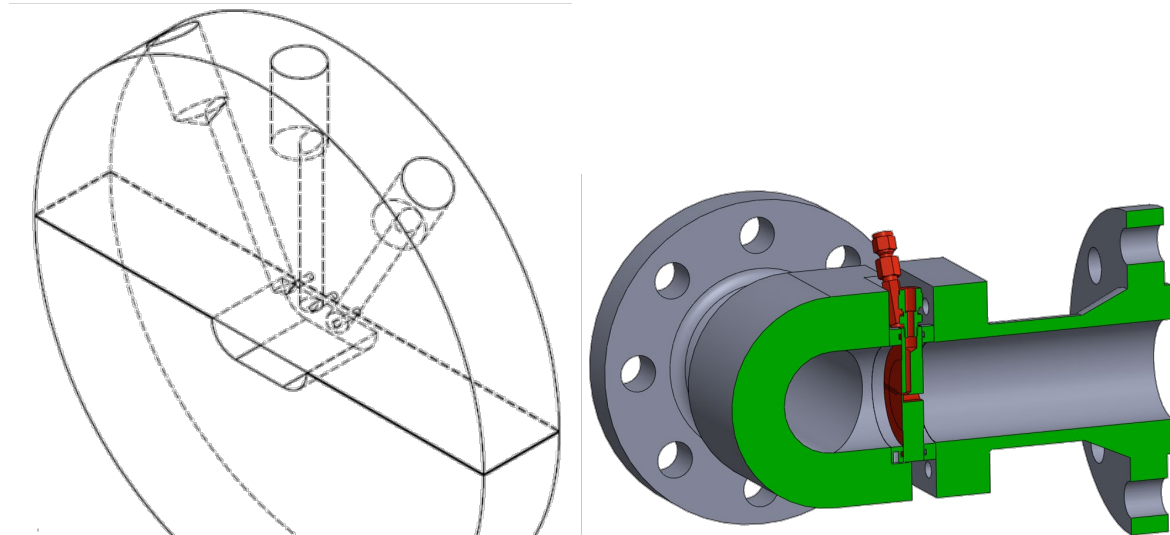


Abbildung 3.29: Isometrische Darstellung des Versuchskörpers 010T001M und Einbausituation im Leckmodul

Tabelle 3.7: Geometrische Eckdaten von 010T001M

Wanddicke	t	1,89 mm
Rauigkeit	R_z	40 μm
Spalllänge _{Austrittseitig}	$2C_{\text{ex}}$	20,5 mm
Spalllänge _{Eintrittseitig}	$2C_{\text{in}}$	10,23 mm
Spaltöffnung _{Austrittseitig}	COD_{ex}	0,27 mm
Spaltöffnung _{Eintrittseitig}	$COD_{\text{L,in}}$	0,24 mm
	$COD_{\text{M,in}}$	0,27 mm
	$COD_{\text{R,n}}$	0,25 mm
Austrittsdurchmesser	$d_{\text{h,ex}}$	0,504 mm
Eintrittsdurchmesser	$d_{\text{h,in}}$	0,503 mm

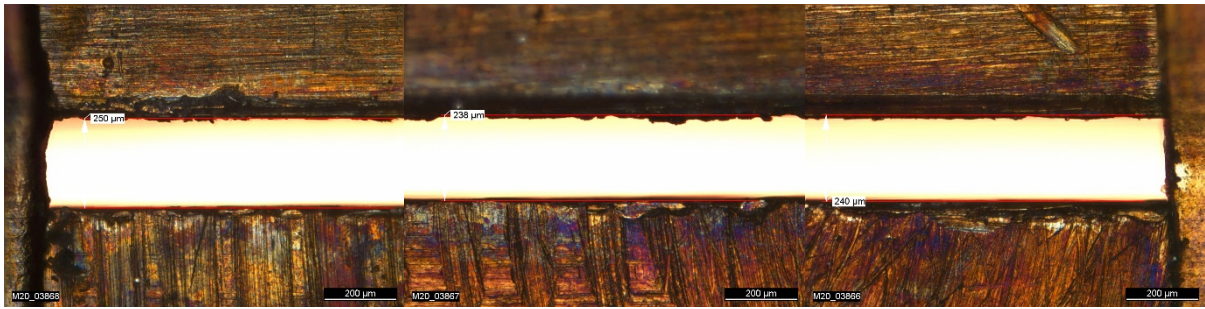


Abbildung 3.30: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintrittsöffnung von Versuchskörper 010T001M (rechts, mitte, links)

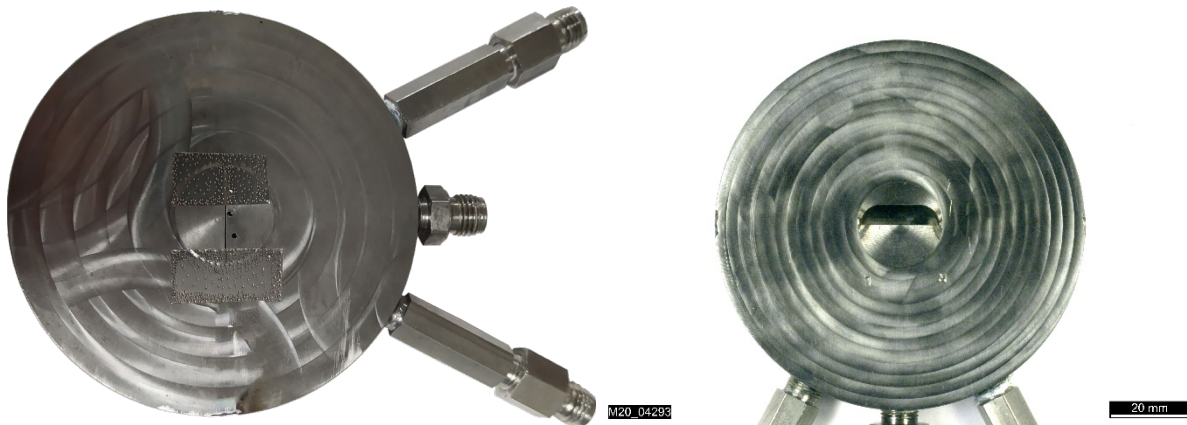


Abbildung 3.31: Aufnahme der Eintrittsöffnung von Versuchskörper 010T001M

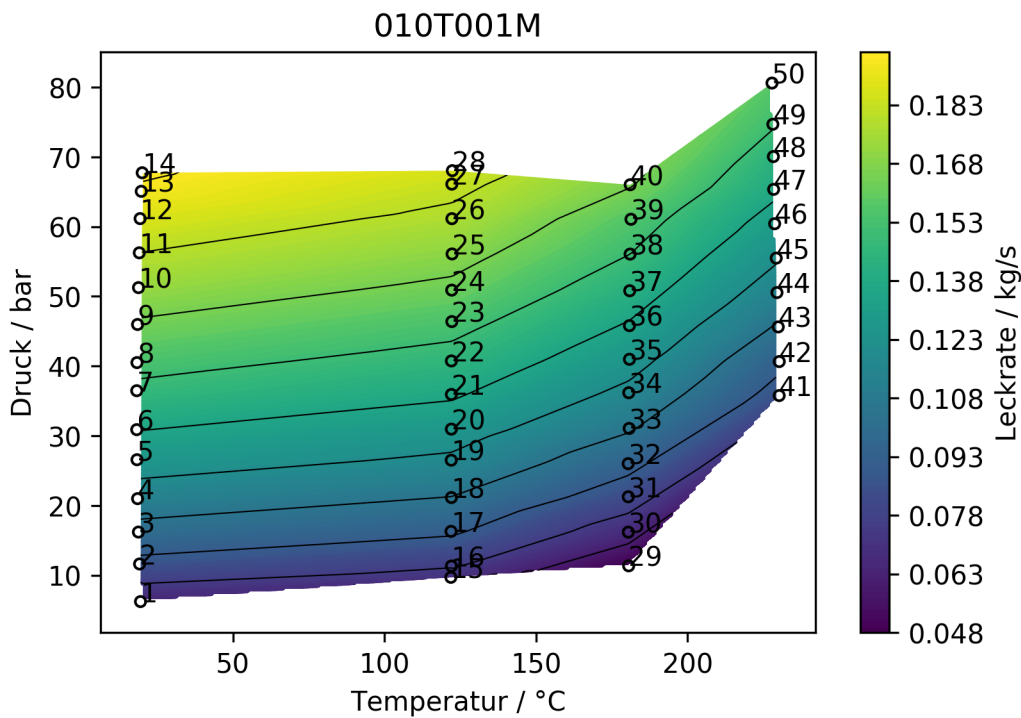


Abbildung 3.32: Darstellung der Leckrate an 010T001M in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Luft.

3.8 Versuchskörper 010T001

Der hier beschriebene Versuchskörper 010T001 (rechteckförmige Leckfläche) ist in Abbildung 3.33 sowohl von der Eintrittseite als auch der Austrittseite dargestellt. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.8 angegeben. Die Spaltwände sind gelaserte Kanten. Die Ermittlung der Rauigkeit im Spalt erfolgte quer zur Strömungsrichtung. Die ermittelten Leckraten sind in Abbildung 3.36 visualisiert. Abbildung 3.34 und Abbildung 3.35 zeigen Detailaufnahmen der rechteckigen Leckfläche auf der Eintrittsseite sowie der Austrittsseite an jeweils drei Positionen. Leckratenmessungen wurden im Temperaturbereich von 20 °C bis 250 °C für Drücke zwischen 5 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht.



Abbildung 3.33: Übersichtsdarstellung der Eintrittsöffnung (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper 010T001

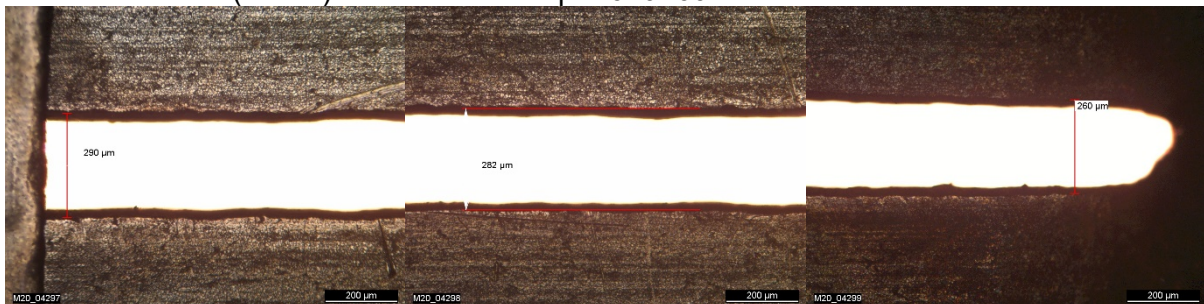


Abbildung 3.34: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintrittsöffnung von Versuchskörper 010T001 (links, mitte, rechts)

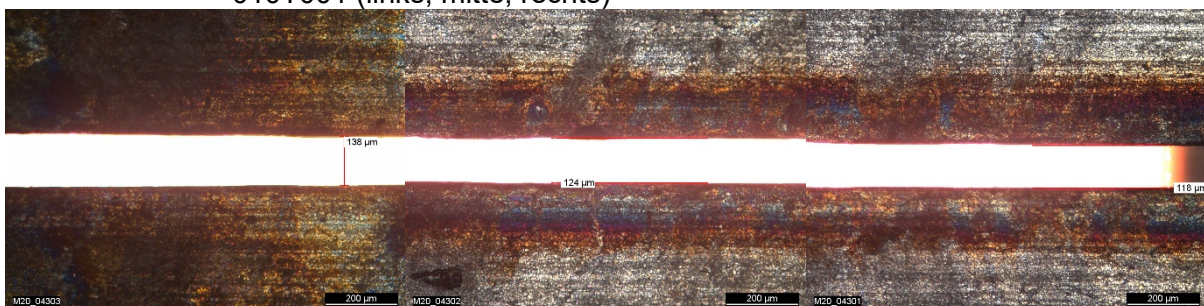


Abbildung 3.35: Lichtmikroskopische Aufnahme der Austrittsöffnung von Versuchskörper 010T001 (rechts, mitte, links)

Tabelle 3.8: Geometrische Eckdaten von 010T001

Wanddicke	t	1,25 mm
Rauigkeit	R _z	6 µm
Spalllänge _{Austrittseitig}	2c _{ex}	10 mm
Spalllänge _{Eintrittseitig}	2c _{in}	8,815 mm
Spaltöffnung _{Austrittseitig}	COD _{L,ex}	118 µm
	COD _{M,ex}	124 µm
	COD _{R,ex}	138 µm
Spaltöffnung _{Eintrittseitig}	COD _{L,in}	290 µm
	COD _{M,in}	282 µm
	COD _{R,n}	260 µm
Austrittsdurchmesser	d _{h,ex}	0,249 mm
Eintrittsdurchmesser	d _{h,in}	0,54 mm

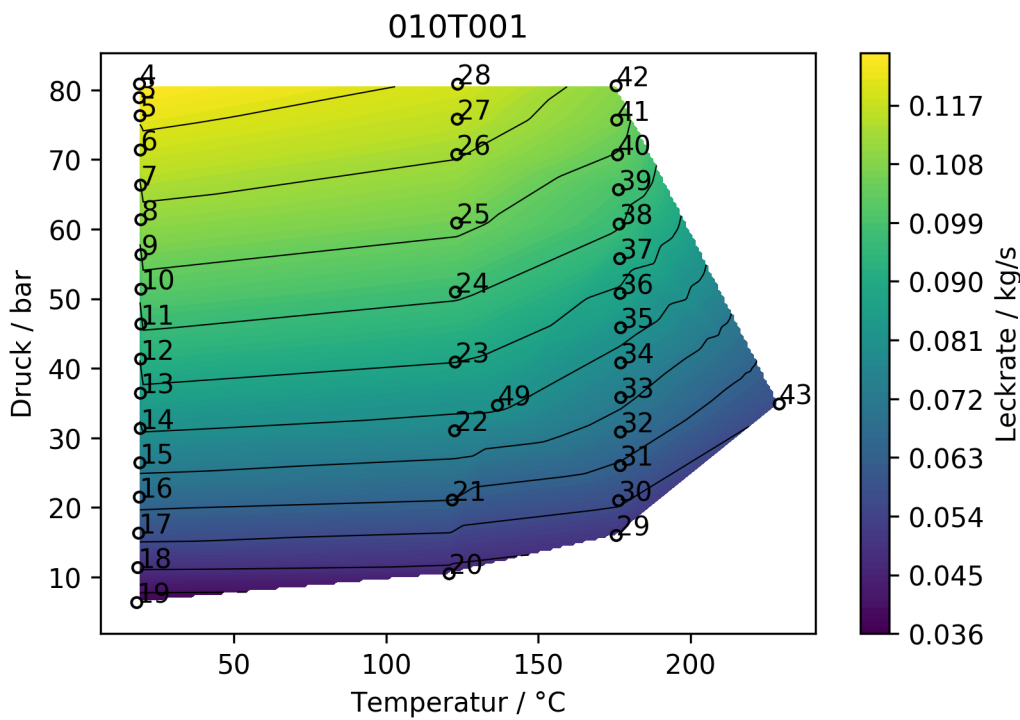


Abbildung 3.36: Darstellung der Leckrate an 010T001 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Luft.

3.9 Versuchskörper 020T001

Der hier beschriebene Versuchskörper 020T001 (rechteckförmige Leckfläche) ist in Abbildung 3.37 dargestellt. Die geometrischen Kenngrößen des Versuchskörpers sind in Tabelle 3.9 angegeben. Die Ermittlung der Rauigkeit erfolgte senkrecht zur Strömungsrichtung entlang der ausgelasteten Blechkanten. Die ermittelten Leckraten sind in Abbildung 3.40 visualisiert. Abbildung 3.38 und Abbildung 3.39 zeigt Detailaufnahmen der rechteckigen Leckfläche auf der Eintrittsseite und der Austrittsseite an jeweils drei Positionen. Leckratenmessungen wurden im Temperaturbereich von 20 °C bis 250 °C für Drücke zwischen 5 und 80 bar durchgeführt. Hierbei wurde frei in den Kondensator eingeströmt, was annähernd der freien Ausströmung in Luft entspricht.



Abbildung 3.37: Übersichtsdarstellung der Eintrittsöffnung (links) und Austrittsöffnung (rechts) von Versuchskörper 020T001

Tabelle 3.9: Geometrische Eckdaten von 020T001

Wanddicke	t	1,25 mm
Rauigkeit	R_z	6 μm
Spalllänge _{Austrittseitig}	$2c_{\text{ex}}$	10 mm
Spalllänge _{Eintrittseitig}	$2c_{\text{in}}$	6,55 mm
Spaltöffnung _{Austrittseitig}	$\text{COD}_{\text{L,ex}}$	247 μm
	$\text{COD}_{\text{M,ex}}$	248 μm
	$\text{COD}_{\text{R,ex}}$	214 μm
Spaltöffnung _{Eintrittseitig}	$\text{COD}_{\text{L,in}}$	387 μm
	$\text{COD}_{\text{M,in}}$	388 μm
	$\text{COD}_{\text{R,n}}$	357 μm
Austrittsdurchmesser	$d_{\text{h,ex}}$	0,468 mm
Eintrittsdurchmesser	$d_{\text{h,in}}$	0,719 mm

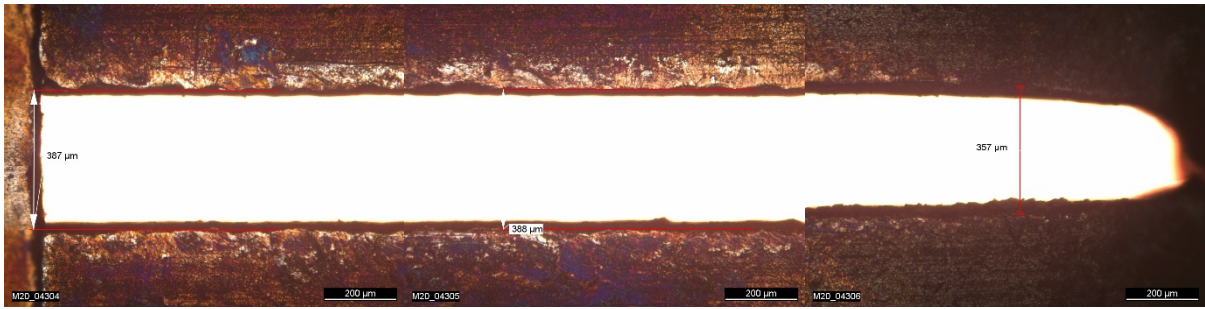


Abbildung 3.38: Lichtmikroskopische Aufnahme der Eintrittsöffnung von Versuchskörper 020T001 (links, mitte, rechts)

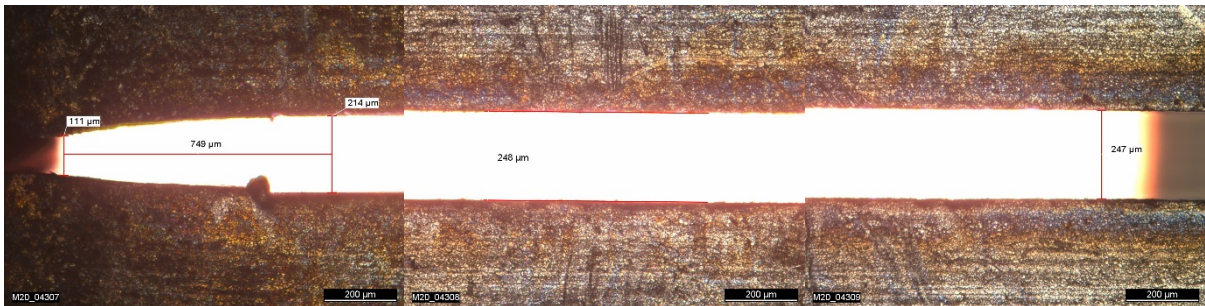


Abbildung 3.39: Lichtmikroskopische Aufnahme der Austrittsöffnung von Versuchskörper 020T001 (rechts, mitte, links)

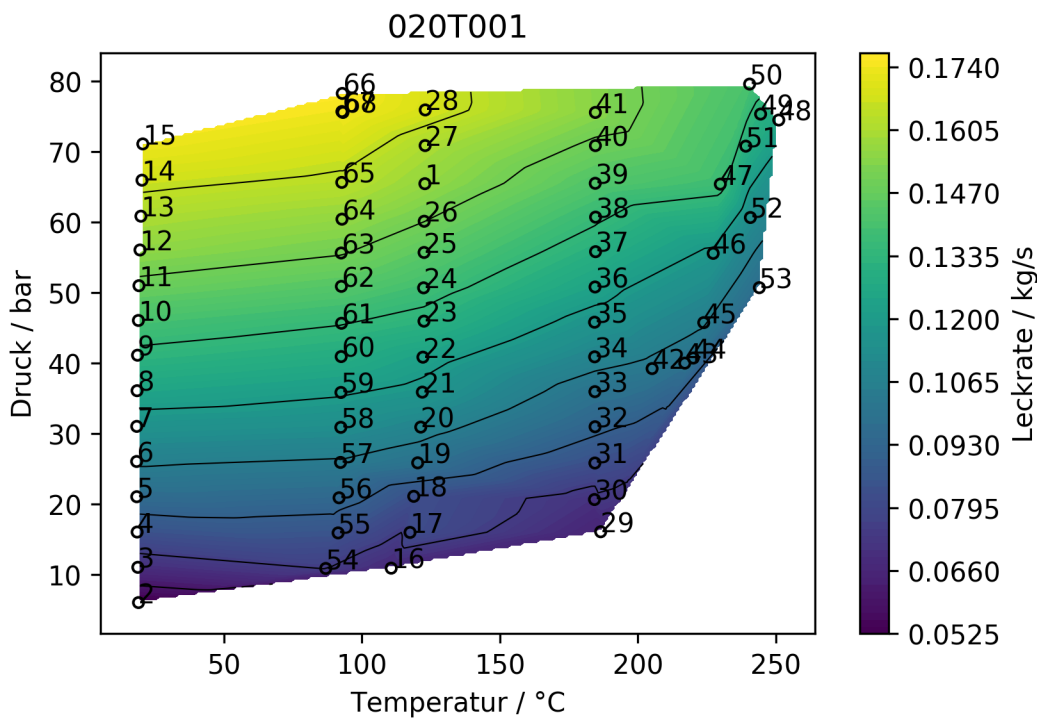


Abbildung 3.40: Darstellung der Leckrate an 020T001 in Abhängigkeit von Druck und Temperatur bei Ausströmung in Luft.

3.10 Optische Untersuchung der Ausströmung

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der optischen Untersuchung mittels Highspeedkamera liefert Abbildung 3.41. Die Darstellung enthält Informationen aus Abbildung 3.9, Abbildung 3.13, Abbildung 3.17 und Abbildung 3.21. Die schwarzen Kreuze in Abbildung 3.41 kennzeichnen die Übergangspunkte zwischen einphasigem oder metastabilem einphasigem Ausströmvorgang hin zur Überlagerung eines Nassdampfkegels mit zentralem einphasigem Freistrah und den Übergang zum reinen Nassdampfkegel. Unterhalb der strichpunktierten Linie findet damit kein Phasenumschwung im Leckkanal statt. Die Abschätzung der Leckrate mittels einphasigem Modell sollte damit die besten Ergebnisse liefern. Oberhalb der strichpunktierten Linie erfolgt das Verdampfen teilweise im Leckkanal. Oberhalb der gestrichelten Linie ist beim Austritt aus dem Leckkanal ein reiner Nassdampfkegel zu beobachten. Der Phasenumschwung erfolgt hier vollständig im Leckkanal. Die beiden Linien sind aus den Versuchsdaten abgeleitet und durch die Gleichungen (3-1) und (3-2) gegeben. Der einphasige und metastabile einphasige Bereich ist dabei mit Gleichung (3-2) nach oben hin begrenzt.

$$f\left(\frac{l}{d_h}\right) = -53160 + 53299x^{-0.00046} \quad (3-1)$$

$$f\left(\frac{l}{d_h}\right) = \max\left(497 - 303x^{-0.079}\right) \quad (3-2)$$

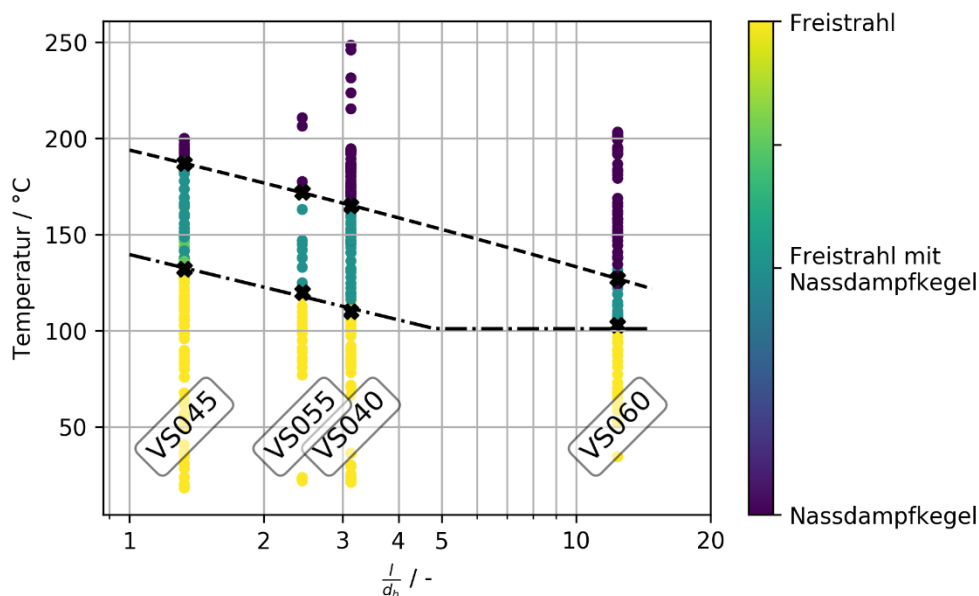


Abbildung 3.41: Kategorisierung der Ausprägung des Ausströmvorganges in Abhängigkeit der relativen Leckkanallänge

3.11 Strömungswiderstand und Widerstandsbeiwert nach KTA 3206

Die Ermittlung des Strömungswiderstandes ζ erfolgt mit einer numerischen Optimierungsroutine, die in einer Bibliothek der Programmiersprache python enthalten ist. Damit ergeben sich mit Gleichung (3-3) und den bei Raumtemperatur aufgezeichneten Messdaten die in Abbildung 3.42 dargestellten Kurven für die Leckrate in Abhängigkeit von der Druckdifferenz für die angegebenen Durchflussbeiwerte c_v . Die Definition des Durchflussbeiwerts c_v ist mit Gleichung (3-4) in Abhängigkeit vom Strömungswiderstandes ζ angegeben. Darüber hinaus wurden die Widerstandsbeiwerte λ gemäß KTA 3206 [4] bestimmt.

$$\dot{m} = A \sqrt{2 \frac{\rho(\vartheta) \Delta p}{1 + \zeta}} \quad (3-3)$$

$$c_v = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta}} \quad (3-4)$$

3.11.1 Bohrung

Die Abbildung 3.42 zeigt die Leckraten der durchgeführten Experimente an Versuchskörpern mit Bohrung in Abhängigkeit von der Druckdifferenz. Für jede Blende wurde ein spezifischer Strömungswiderstand ζ bzw. Durchflussbeiwert c_v berechnet. Bei der Berechnung wurde für die Leckfläche der Eintrittsquerschnitt angesetzt. Die gestrichelten Linien in Abbildung 3.43 deuten die Linien konstanter Wanddicken an. Mit Ausnahme von VS045 und VS055 befinden sich alle ermittelten Widerstandsbeiwerte λ unterhalb der abdeckenden Kurve des Widerstandsbeiwertes λ gemäß KTA 3206.

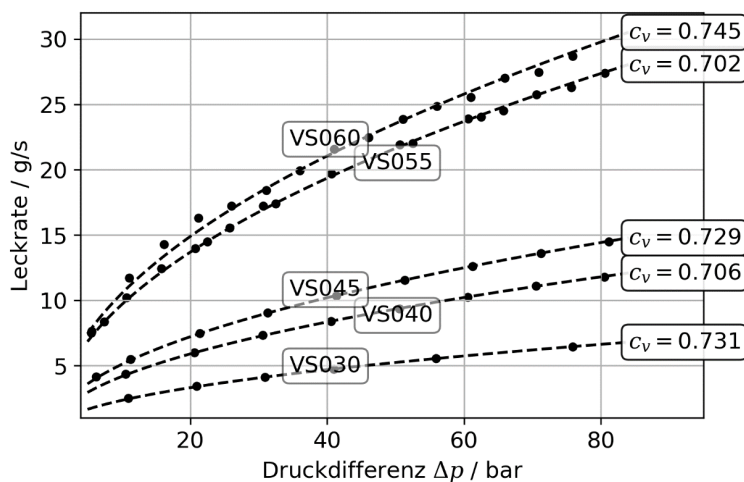


Abbildung 3.42: Leckraten als Funktion der Druckdifferenz für verschiedene Durchflussbeiwerte c_v der untersuchten Blenden mit Bohrung bei Raumtemperatur

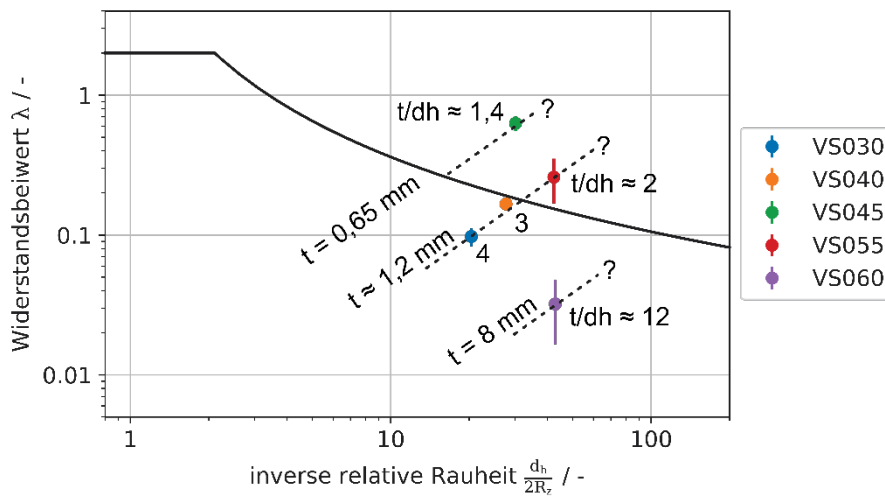


Abbildung 3.43: Widerstandsbeiwerte λ für die untersuchten Blenden mit Bohrung bei Raumtemperatur mit abdeckender Kurve des Widerstandsbeiwertes nach KTA 3206

3.11.2 Ermüdungsriß

Abbildung 3.44 zeigt die Leckraten für die durchgeführten Untersuchungen am Versuchskörper mit Ermüdungsriß. Die dargestellte Kurve ergibt sich aus einer Erweiterung von Gleichung (3-3) um einen linearen druckabhängigen Anteil bei der Berechnung der Rissöffnungsfläche, siehe Gleichung (3-5). Der konstante Faktor sowie der Wert für den Strömungswiderstand ζ von etwa 16,5 wurden mit einer Optimierungsbibliothek in Python ermittelt.

$$\dot{m} = \left(\text{COA} + 0.006 \frac{\text{mm}^2}{\text{bar}} \Delta p \right) \sqrt{2 \frac{\rho(\vartheta) \Delta p}{1 + \zeta}} \quad (3-5)$$

Der ermittelte Widerstandsbeiwert λ befindet sich unterhalb der abdeckenden Kurve des Widerstandsbeiwertes gemäß KTA 3206, siehe Abbildung 3.45.

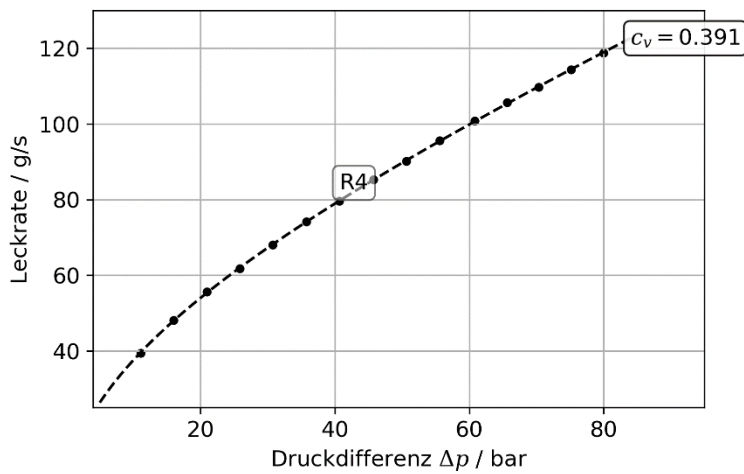


Abbildung 3.44: Leckraten als Funktion der Druckdifferenz für die untersuchte Blende mit Ermüdungsriss bei Raumtemperatur.

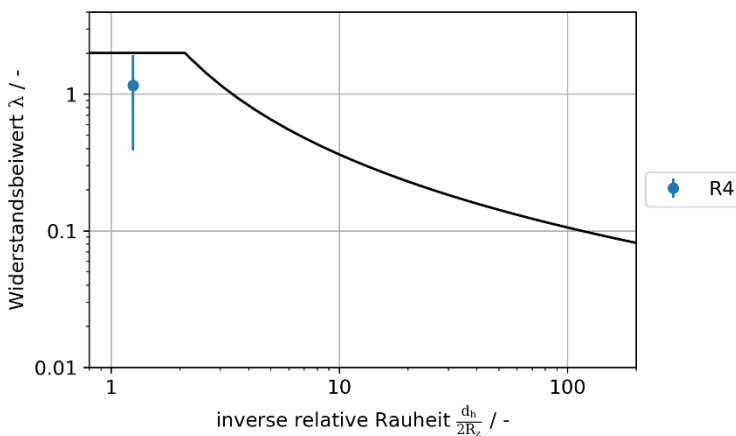


Abbildung 3.45: Widerstandsbeiwert λ für die untersuchte Blende mit Ermüdungsriss bei Raumtemperatur mit abdeckender Kurve des Widerstandsbeiwertes nach KTA 3206

3.11.3 Definierter Spalt

Abbildung 3.46 zeigt die Leckraten für die durchgeführten Untersuchungen an Versuchskörpern mit definiertem Spalt. Abbildung 3.47 zeigt die Einordnung der ermittelten Werte des Widerstandsbeiwertes in das Diagramm mit abdeckender Kurve für den Widerstandsbeiwert gemäß KTA3206.

Die gestrichelten Linien in Abbildung 3.47 deuten die Linien konstanter Wanddicken an. Mit Ausnahme von 010T001 und 020T001 befinden sich alle ermittelten Widerstandsbeiwerte λ unterhalb der abdeckenden Kurve des Widerstandsbeiwertes λ gemäß KTA 3206.

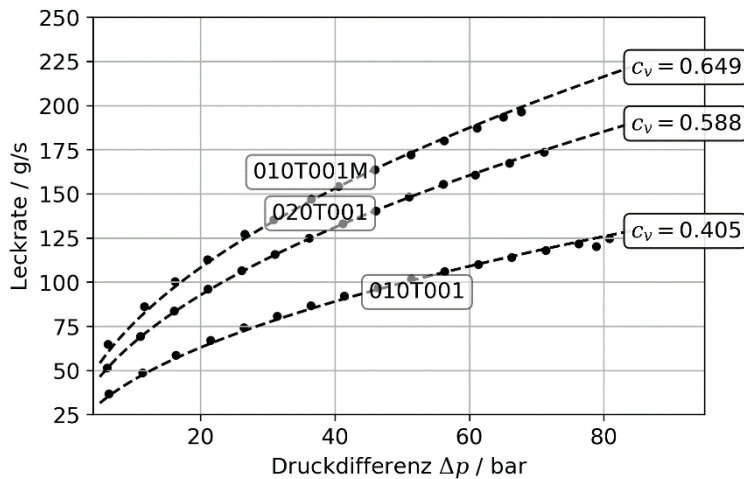


Abbildung 3.46: Leckraten als Funktion der Druckdifferenz für verschiedene Durchflussbeiwerte der untersuchten Blenden mit definiertem Spalt bei Raumtemperatur.

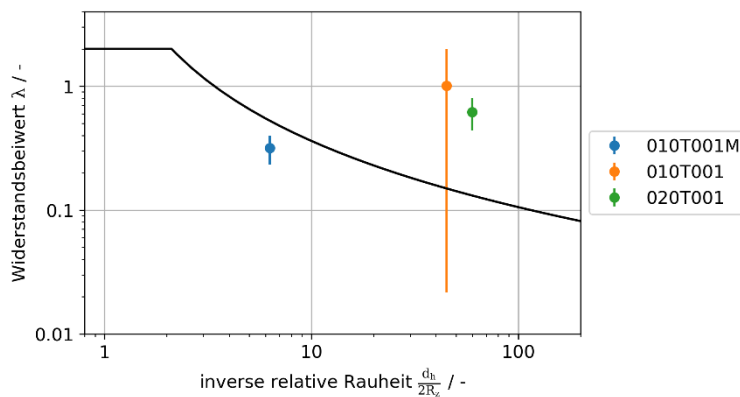


Abbildung 3.47: Widerstandsbeiwerte λ für die untersuchten Blenden mit definierten Spalten bei Raumtemperatur mit abdeckender Kurve des Widerstandsbeiwertes nach KTA 3206

3.12 Untersuchung der Ausströmung in Wasser

Die Ausströmversuche in Wasser wurden unter Verwendung der Blende VS055 durchgeführt. Bei Raumtemperatur zeigen sich für die Ausströmung in Luft und Wasser keine gravierenden Unterschiede, siehe Abbildung 3.48. Für die Ausströmung bei 120 °C ergibt sich bei Ausströmung in Wasser eine Tendenz hin zu kleineren gemessenen Leckraten im Vergleich zu den Leckraten bei Ausströmung in Luft. Grund hierfür könnte einerseits Verlust von Wasserdampf aus dem offenen Wasserbehälter aufgrund unvollständig kondensierten Dampfs sein. Dieser ist in Abbildung 3.49 an den aufsteigenden Dampfblasen erkennbar. Andererseits erwärmt

sich das Wasser im Wasserbehälter während der Versuchsreihe relativ rasch, so dass ein zusätzlicher Verlust von Wasser durch Verdampfen über die gesamte Wasseroberfläche des offenen Behälters stattfindet. Die Verlustmasse durch Dampfblasen bzw. Verdampfen über die Wasseroberfläche kann messtechnisch nicht erfasst werden.

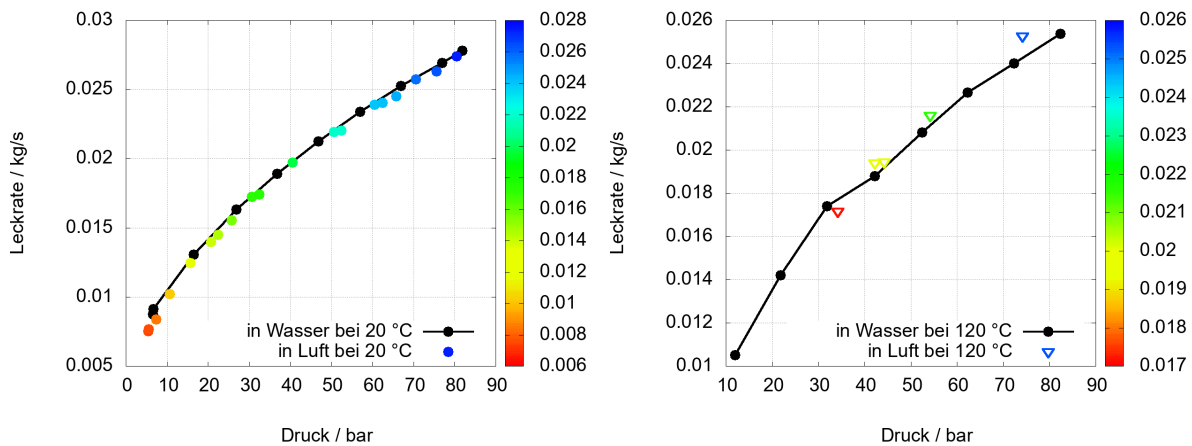


Abbildung 3.48: Vergleich der Leckraten bei Ausströmen in Luft und in Wasser bei 20 °C und 120 °C



Abbildung 3.49: Blick auf die Wasseroberfläche des Behälters zu drei ausgewählten Zeitpunkten mit aufsteigenden Dampfblasen, die auf unvollständige Kondensation im Wasserbehälter hinweisen

3.13 FE-Berechnung des Leckmoduls mit Versuchskörper R4

Zur Untersuchung der Rissöffnung an R4 im Leckmodul während der Experimentellen Untersuchungen wurde ein FE-Modell mit etwa 2,5 Millionen Elementen aufgebaut. Der Versuchskörper R4 wird hierbei mit seinen gemessenen COD-Werten sowie der vollen Risslänge $2c$ auf der Ein- und Austrittsseite berücksichtigt. Der Wanddurchdringende Riss wird auf der Ein- und Austrittsseite als Rautenförmige Querschnittsfläche modelliert. Das Netz ist in Abbildung 3.50 dargestellt. Die Belastungen wurden in vier Zeitschritten aufgebracht. Im ersten Schritt werden

die zwölf Schraubenbolzen vorgespannt. Die Mises-Vergleichsspannung für diesen Belastungsfall ist in Abbildung 3.51 dargestellt. Im Anschluss wird der Innendruck von 80 bar aufgebracht, siehe Abbildung 3.52. Im letzten Zeitschritt wird die maximale Innentemperatur von 280 °C im Hauptstrang aufgebracht, siehe Abbildung 3.53. Die Auswertung der Knotenverschiebungen am Versuchskörper R4 liefert die Lastabhängige Rissöffnungsfläche in Abbildung 3.55. Der Berechnung der Rissöffnungsfläche COA liegt eine rechteckige Grundfläche zugrunde. Die FE-Untersuchungen am Leckmodul zeigen, dass das Vorspannen der Schraubenbolzen zunächst rissschließend wirken. Der zunehmende Innendruck vergrößert die Lecköffnungsfläche auf der Eintritts- und Austrittsseite.

Mit den durchgeführten FE-Berechnungen lässt sich nicht die vollständige Abweichung der Messdaten von der idealen Ausströmung mit dem Bernoulli-Modell erklären, siehe Abbildung 3.56. Hierbei ist die Querschnittsfläche auf die lastfrei ermittelte Rissöffnungsfläche, von der aus sich die Fläche mit dem Innendruck linear vergrößert, bezogen. Das Diagramm zeigt eine Gegenüberstellung von gemessenen Leckraten und berechneten Leckraten. Die gestrichelte Linie zeigt die Aproximation an die messtechnisch erfassten Leckraten, siehe Abbildung 3.44. Die durchgezogene grüne Linie stellt die die Leckrate für die Ausströmung nach dem Bernoulli-Modell dar. Die schwarze Linie mit Stützpunkten stellt die Korrektur der Bernoulli-Kurve mit den aus dem FE-Modell ermittelten Lecköffnungsflächen dar.

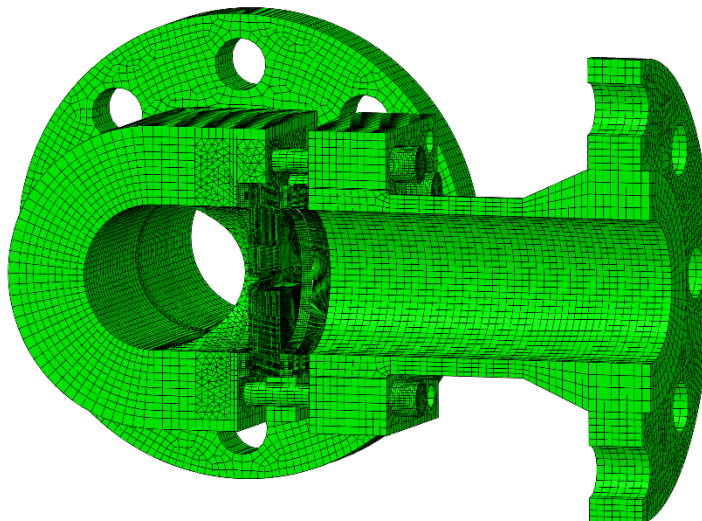


Abbildung 3.50: Vernetzung des FE-Modells zur Untersuchung der Rissöffnungsfläche beim Einbau des Versuchskörpers R4 und beim Durchführen der Messungen

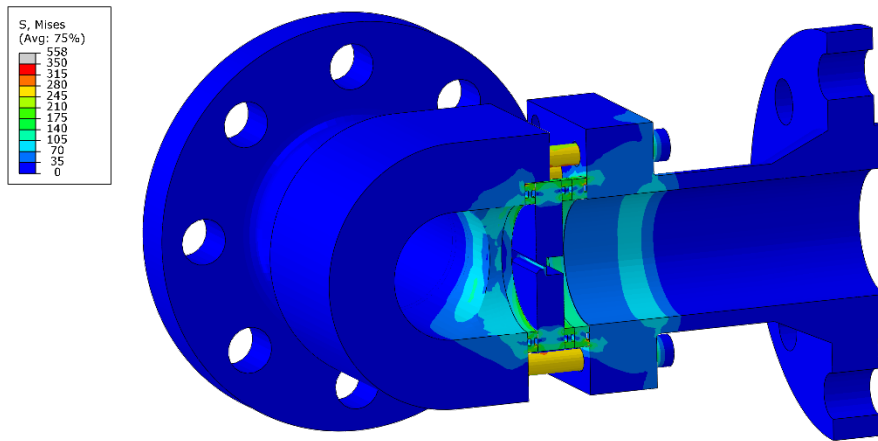


Abbildung 3.51: Darstellung der Mises-Vergleichsspannung nach Einbau des Versuchskörpers R4 und Vorspannen der zwölf Schraubenbolzen

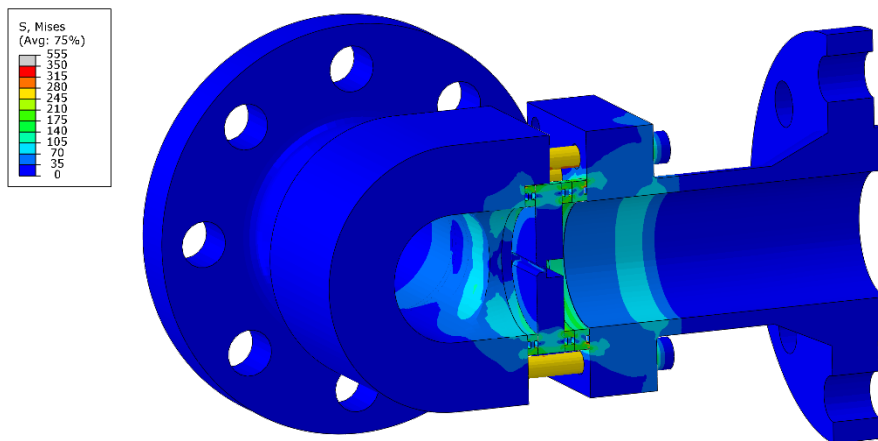


Abbildung 3.52: Darstellung der Mises-Vergleichsspannung nach Einbau des Versuchskörpers R4, Vorspannen der zwölf Schraubenbolzen mit wirkendem Innendruck von 80 bar

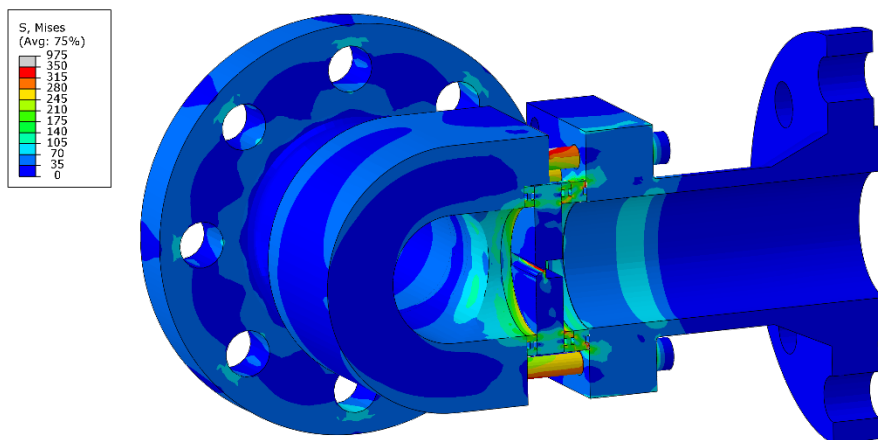


Abbildung 3.53: Darstellung der Mises-Vergleichsspannung nach dem Vorspannen der zwölf Schraubenbolzen mit wirkendem Innendruck von 80 bar und Medientemperatur von 280 °C

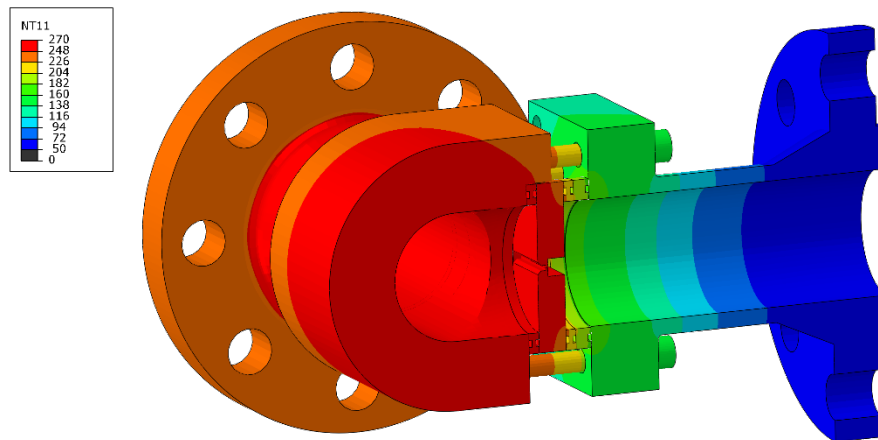


Abbildung 3.54: Berechnete Temperaturverteilung am Leckmodul bei einer Mediumtemperatur im Heißstrang von 280 °C

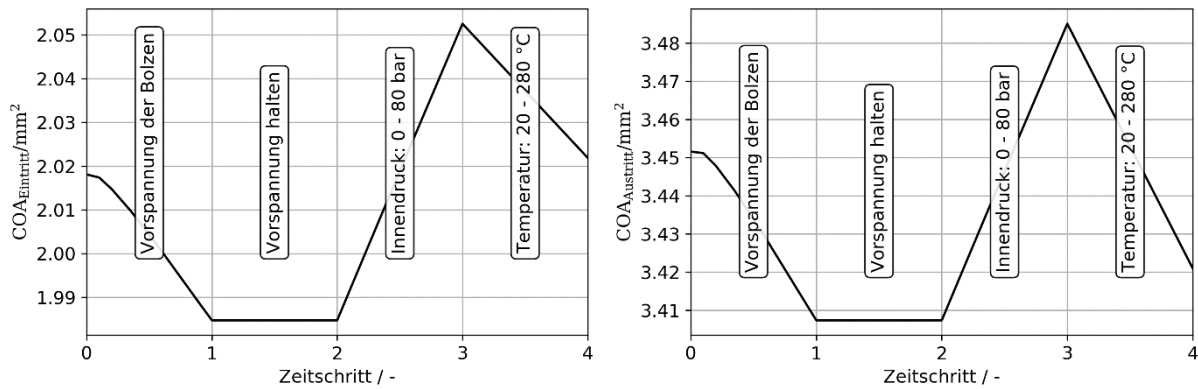


Abbildung 3.55: Rissöffnungsfläche von R4 in Abhängigkeit von Schraubenvorspannung, Innendruck- und Temperaturbelastung

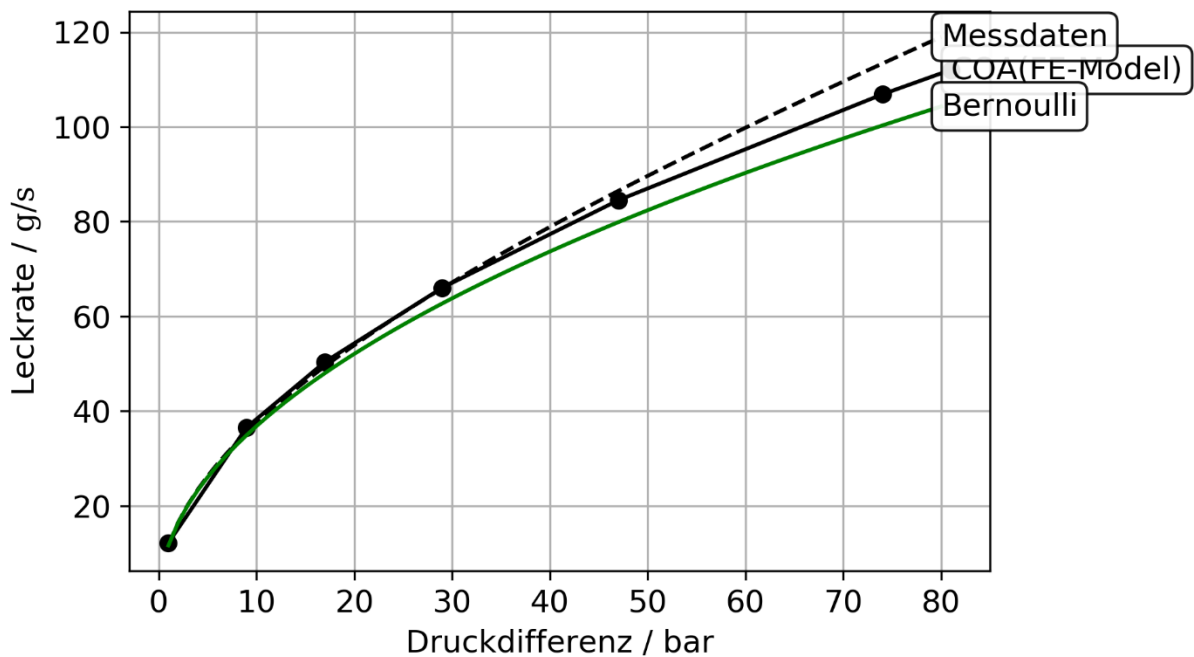


Abbildung 3.56: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Leckraten

4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurden Untersuchungen am FSI-Kreislauf der MPA Universität Stuttgart durchgeführt. Für die Leckratenmessungen wurden drei verschiedene Arten von Leckageblenden gefertigt. An diesen Basisgeometrien, repräsentiert durch Spalte, Ermüdungsrisse und Bohrungen, wurden umfangreiche Leckratenmessungen durchgeführt, siehe Tabelle 4.1. Die optischen Untersuchungen mittels Highspeedkamera liefern einen maßgeblichen Beitrag bei der Beurteilung des metastabilen einphasigen Ausströmvorgangs und damit einen Beitrag zur Modellentwicklung zur Leckratenabschätzung. Ein Einfluss des Umgebungsmediums auf den Ausströmvorgang und damit auf die zu erwartende Leckrate konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht gefunden werden, sodass Leckratenexperimente bei freier Ausströmung in Luft repräsentative Ergebnisse für die Validierung von Leckratenmodellen auch bei Ausströmung in Wasserumgebung liefern.

Tabelle 4.1: Auflistung aller untersuchten Versuchskörper mit geometrischen Kenngrößen

Versuchskörper	Länge Leckkanal /mm	Rauigkeit $R_z/\mu\text{m}$	Durchmesser /mm		Relative Länge /mm	
			Austritt $d_{h,ex}$	Eintritt $d_{h,in}$	Austritt l/d_h	Eintritt l/d_h
VS030	1,24	7,4	0,304	0,302	4,08	4,11
VS040	1,24	7,4	0,396	0,41	3,13	3,02
VS045	0,65	7,4	0,476	0,446	1,37	1,46
VS055	1,2	7,4	0,592	0,626	2,03	1,92
VS060	8	7,4	0,646	0,634	12,38	12,62
R4	1,3	40	0,1557	0,1	8,35	13,00
010T001M	1,89	7,4	0,525	0,525	3,60	3,60
010T001	1,25	6	0,25	0,54	5,02	2,31
020T001	1,25	6	0,47	0,72	2,67	1,74

5 Literaturverzeichnis

- [1] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Zusammenfassender Bericht des Umweltministeriums zum Meldepflichtigen Ereignis GKN II ME 04/2018 „Lineare Anzeigen bei Wirbelstromprüfung von Dampferzeugerheizrohren“ (Stand: November 2018)
- [2] BMBF-Forschungsvorhaben „Experimentelle Untersuchung und theoretische Beschreibung des Beanspruchungsverhalten von Mischschweißnähten und des Ausströmungsverhaltens aus rissartigen Lecks bei turbulenter Durchströmung metallischer Rohrleitungen FKZ 02NUK040A, MPA Universität Stuttgart, 2019
- [3] BMBF-Forschungsvorhaben „Thermische Wechselbeanspruchung; Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren: Teilprojekt strukturmechanische Modellierung für gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen“, FKZ 02NUK009A, MPA Universität Stuttgart, 2013
- [4] Kerntechnischer Ausschuss (KTA), November 2015. "Nachweise zum Bruchabschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken", KTA 3206, Sicherheitstechnische Regel des KTA.

