

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung

Forschungsbericht

Systematische Analyse von Druck- luftleckagen

Manuel
Unger

Systematische Analyse von Druckluftleckagen

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Manuel Lukas Unger
aus Kitzingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Tag der Einreichung: 17. Februar 2021
Tag der mündlichen Prüfung: 03. August 2021

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart

2021

ISSN 0938-1228

D93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Effiziente Energienutzung am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart.

Wie das mit wohl jeder Arbeit im wissenschaftlichen Bereich so ist, sind an einer solchen Arbeit auch viele weitere Menschen beteiligt, die auch ich hier nicht unerwähnt lassen möchte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen für die Betreuung meiner Dissertation, sowie für die konstruktiven Anregungen und spannenden Diskussionen rund um das Forschungsthema.

Ein weiteres Dankeschön geht auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach von der Universität Kassel, für die Übernahme des Mitberichts.

Zusammen mit tollen Kolleginnen und Kollegen arbeitet es sich gleich viel leichter und glücklicherweise hatte ich davon in den letzten Jahren so Einige. Für die vielen schönen und lustigen Momente während der Zeit im Büro, die tolle Atmosphäre, sowie für die vielen wertvollen Anregungen zu meiner Arbeit, möchte ich mich hiermit stellvertretend vor allem bei meinen KollegInnen Ulf Lindner, Dirk Turek, Hélène Godin und Nils Seckinger bedanken.

Für die Erstellung einer experimentellen Arbeit ist ein echter Praktiker wie Ralph Schelle absolut Gold wert. Auch an ihn geht ein großes Dankeschön für die vielen gemeinsamen Stunden in der Werkstatt und am Prüfstand, sowie für die große Hilfe beim Erstellen neuer Bauteile genau nach meinen Wünschen und Vorstellungen.

Zusätzlich gilt mein Dank allen Studentinnen und Studenten, die im Rahmen Ihrer Abschlussarbeiten oder HiWi-Tätigkeiten bei meiner Arbeit mitgewirkt haben. Im Einzelnen sind dies: David Steiner, Salma Gewilli, Stefan Sieger, Ekrem Sahin und Robert Riegraf.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Frau, die nicht nur die typischen Höhen und Tiefen, die im Verlauf einer Dissertation auftreten, miterlebt hat, sondern auch stets ein offenes Ohr für meine Überlegungen zum Thema hatte.

Ebenso möchte ich mich bei meiner gesamten Familie für ihren Zuspruch und ihre Unterstützung über die letzten Jahre bedanken.

Für die wertvolle Unterstützung all dieser Personen, sowie sicherlich noch vieler anderer, hier nicht genannter mehr, möchte ich mich hiermit nochmals bedanken!

Stuttgart im Oktober 2021

Manuel Unger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
Formelzeichenverzeichnis.....	XIV
Kurzfassung.....	XV
Abstract.....	XVI
1. Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	2
1.2 Aufbau der Arbeit.....	4
2. Definitionen und Stand der Forschung.....	6
2.1 Definitionen.....	6
2.2 Messverfahren zur Quantifizierung von Leckagen in Druckluftsystemen.....	7
2.3 Druckluftleckagen in der wissenschaftlichen Literatur.....	9
2.3.1 Verfahren zur Detektion und Bewertung von Gasleckagen.....	10
2.3.2 Leckageströme von kreisrunden Leckagegeometrien.....	13
2.3.3 Experimentelle Arbeiten.....	14
2.3.4 Limitierung der bisherigen Arbeiten.....	23
3. Theoretische Grundlagen.....	27
3.1 Druckluftleckagen.....	27
3.1.1 Berechnungsgrundlagen.....	27
3.1.2 Sensitivitätsanalyse.....	33
3.1.3 Discharge Coefficient.....	36
3.1.4 Berechnungsmodell Druckluftleckagen.....	39
3.2 Ultraschallakustik.....	42
4. Versuchsaufbau und Messtechnik.....	45
4.1 Konzeption und Entwicklung des Prüfstands.....	45
4.2 Konstruktion und Funktionsweise des Prüfstands.....	46
4.3 Messtechnik.....	48
4.4 Automatisierung.....	51

5.	Methodisches Vorgehen	56
5.1	Vorgehensweise zur experimentellen Bestimmung von Leckageströmen idealer Leckagen.....	56
5.1.1	Herstellung der Prüfkörper und Qualitätskontrolle.....	56
5.1.2	Versuchsdurchführung	60
5.1.3	Versuchsauswertung	62
5.2	Vorgehensweise zur experimentellen Bestimmung von Leckageströmen realer Leckagen.....	67
5.2.1	Auswahl realer Leckagegeometrien und Herstellung der Prüfkörper.....	68
5.2.2	Versuchsdurchführung	72
5.2.3	Versuchsauswertung	73
5.3	Vorgehensweise zur indirekten Leckagequantifizierung mittels Ultraschall	73
5.3.1	Versuchsdurchführung	73
5.3.2	Versuchsauswertung	75
6.	Experimentelle Untersuchung von Druckluftleckagen.....	77
6.1	Druckluftleckagen mit idealisierter Geometrie.....	77
6.1.1	Experimentelle Analyse von Einflussfaktoren.....	77
6.1.2	Darstellung und Diskussion der Messergebnisse für Leckagen kreisrunder Geometrie.....	92
6.1.3	Darstellung und Diskussion der Messergebnisse für Leckagen mit Langlochgeometrie.....	97
6.2	Druckluftleckagen mit realer Leckagegeometrie.....	101
6.2.1	Verschraubungen	101
6.2.2	Schlauchverbindungen	108
7.	Indirekte Leckagequantifizierung mittels Ultraschalltechnik.....	119
7.1	Schallemissionen von Druckluftleckagen.....	119
7.2	Eignung des Schalldruckpegels zur Leckagequantifizierung	123
7.2.1	Gesamtschalldruckpegel	123
7.2.2	Schalldruckpegel bei 40 kHz	129
7.3	Weiterentwicklung des Schalldruckpegelansatzes	132
7.3.1	Berücksichtigung des Messabstands.....	133

7.3.2	Berücksichtigung der Leckagegeometrie	136
7.3.3	Validierung der Leckagequantifizierung	138
7.3.4	Literaturvergleich und Fazit	142
8.	Abschließende Betrachtungen	144
8.1	Berechnung und experimentelle Untersuchung von Leckageströmen	144
8.2	Leckagequantifizierung mittels Ultraschall.....	147
8.3	Zukünftige Weiterentwicklungsansätze zur indirekten Leckagequantifizierung	150
8.4	Schlusswort	151
9.	Literaturverzeichnis	152
Anhang A	Zusatz: Theoretische Grundlagen	160
A-1	Herleitung der Strömungsgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt der Leckage	160
A-2	Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt der Leckage bei kritischen Druckverhältnissen	162
Anhang B	Ergänzung zu Versuchstand und Messtechnik	164
B-1	Datenblätter der verwendeten Messgeräte	164
B-2	Kalibrierzertifikat des Volumenstrommessgeräts	169
B-3	Benutzeroberfläche der Prüfstandssteuerung	171
Anhang C	Zusatz: Optische Flächenvermessung.....	172
Anhang D	Detailanalyse: Leckageströme aller untersuchten idealen Leckagegeometrien	173
D-1	Kreisrunde ideale Leckagen	173
D-2	Ideale Leckagen mit Langlochgeometrie	176
Anhang E	Detailanalyse: Leckageströme aller untersuchten realen Leckagegeometrien	179
E-1	Verschraubungen ohne Dichtmittel.....	179
E-2	Verschraubungen mit defektem Kupferring.....	180
E-3	Verschraubungen mit unzureichender Menge Dichtband.....	181
E-4	Schlauchrisse	182
E-5	Punktierte Schläuche	182
E-6	Undichte Schlauchschellen.....	183

Anhang F	Leckagestrom und Schallgeschwindigkeit	184
Anhang G	Zusatz: Ultraschallmessungen von Druckluftleckagen	185
G-1	Schallmessung ohne Leckage („Nullmessung“).....	185
G-2	Schallsignal einer Leckage ohne ausgeprägte Luftstrahlbildung	186

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Übergeordnetes Ziel und Forschungsschwerpunkte der Arbeit.....	3
Abb. 1-2: Struktur der Arbeit	4
Abb. 2-1: Zusammenstellung von veröffentlichten Leakageströme mit kreisrunder Leckagegeometrie bei einem Leckagedruck von 7 bar _ü	13
Abb. 2-2: Versuchsaufbau von Eret & Meskell zur Identifikation von Druckluftleckagen mittels Mikrofonarrays Quelle: (Eret et al. 2012b)	15
Abb. 2-3: Über Beamforming ermittelte Schallkarte von Druckluftleckagen Quelle: (Eret et al. 2012b).....	16
Abb. 2-4: Leakageströme von kreisrunden Leckagen. Eigene Darstellung, basierend auf (Wolstencroft 2008)	20
Abb. 2-5: Leakageströme von rechteckigen Leckagen. Eigene Darstellung, basierend auf (Wolstencroft 2008)	22
Abb. 2-6: Richtungsabhängigkeit des Schalldruckpegels bei einem Abstand von 30 cm. Quelle: (Wolstencroft 2008) Prüfkörper: offener Schlauch der Länge 2,5 m und einem Innendurchmesser von 4 mm.....	23
Abb. 3-1: Realgasfaktor von trockener Luft in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (Geller 2015), S. 58	31
Abb. 3-2: Leakagestrom in Abhängigkeit der spezifischen Gaskonstante	34
Abb. 3-3: Leakagestrom in Abhängigkeit des Isentropenexponent	35
Abb. 3-4: Geschwindigkeitsverteilung einer kreisrunden Leakage mit 1 mm Durchmesser bei 7 bar _ü Leckagedruck. (links) Beginn der Leakage (rechts) Mitte der Leakage. Quelle: (Laur 2019)	37
Abb. 3-5: Schematische Darstellung der Auswertungsebenen der simulierten kreisrunden Leckage mit 1 mm Durchmesser. Quelle: (Laur 2019).....	37
Abb. 3-6: Discharge Coefficient (hier mit μ bezeichnet) für kreisrunde und rechteckige Auslassgeometrien Quelle: (Truckenbrodt 2008), S. 260	38
Abb. 3-7: Graphische Oberfläche des Berechnungsmodells für Druckluftleckagen	40
Abb. 3-8: Darstellung eines 50 Hz Sinustons in der Zeitebene (oben) und der Frequenzebene (unten)	43
Abb. 3-9: Schematische Darstellung der Umlenkung der Schallwellenfront in einem Fluidstrahl (Darstellung übersetzt aus (Tam et al. 1998)).....	44
Abb. 4-1: Auslegungsfaktoren des Prüfstands	45
Abb. 4-2: 3D Modell des Druckluftleckage-Prüfstands.....	47
Abb. 4-3: Programmablaufplan der Prüfstandssteuerung zur Leakagestromermittlung.....	52
Abb. 4-4: Programmablaufplan des Moduls: Prüfstandsregelung	53
Abb. 4-5: Programmablaufplan des Moduls Skriptsteuerung.....	54
Abb. 4-6: Programmablaufplan zur Bestimmung der Ultraschallemission von Leckagen ...	55

Abb. 5-1: Technische Zeichnung der Rohlinge für die idealen Leckagen (Maße in mm). Quelle: (Gewilli 2019)	57
Abb. 5-2: Ideale Leckage 08-0895-01 vor (links) und nach (rechts) der Nachbearbeitung	58
Abb. 5-3: Seriennummer idealer Leckagen mit kreisrunder Geometrie	59
Abb. 5-4: Seriennummer idealer Leckagen mit Langlochgeometrie	59
Abb. 5-5: Montierter Prüfkörper, inkl. Dichtmatte und Lochblende.....	60
Abb. 5-6: Ablauf des Prüfprotokolls zur Vermessung von idealen Leckagen	61
Abb. 5-7: Schematische Darstellung der Versuchsauswertung von idealen Leckagen.....	62
Abb. 5-8: Leckageströme der Einzelergebnisse, sowie des Endergebnisses einer kreisrunden Leckage mit 3 mm Durchmesser	64
Abb. 5-9: Beispiel einer automatisierten Kontrollgrafik bei der Datenauswertung	65
Abb. 5-10: Leckagestrom und Leckagedruck einer Solldruckstufe über 15 min	66
Abb. 5-11: Leckagestrom bei 25 Läufen des Prüfkörpers D-015-01 bei unterschiedlichen Leckagedrücken	67
Abb. 5-12: Übersicht der hergestellten Prüfkörperkategorien mit realitätsnaher Leckagegeometrie	68
Abb. 5-13: Aufbau der Prüfkörper in der Kategorie Verschraubungen (Explosionsdarstellung), nach (Sieger 2019).....	69
Abb. 5-14: Aufbau der Prüfkörper in der Kategorie Schlauchverbindungen (Explosionsdarstellung), nach (Sieger 2019).....	70
Abb. 5-15: Seriennummer realer Leckagen des Typs Verschraubung, nach (Sieger 2019) ...	71
Abb. 5-16: Seriennummer realer Leckagen des Typs Schlauchverbindung, nach (Sieger 2019)	72
Abb. 5-17: Automatisierte Kontrollgrafik des Prüfobjekts S-10-R-7-3	73
Abb. 5-18: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung zur Ultraschallmessung...	74
Abb. 5-19: Schematische Darstellung der Versuchsauswertung zur Analyse der Ultraschallsignale von Druckluftleckagen.....	75
Abb. 5-20: Ergebnis der Auswertung des Schallsignals eines einzelnen Prüfkörpers (Prüfkörper: S-6-L-1,8-3, Leckagedruck: 4 bar _ü , Messabstand: 20 cm)	76
Abb. 6-1: Leckagestrom des Prüfkörpers D-020-01 in Abhängigkeit des Leckagedrucks	79
Abb. 6-2: Leckageströme aller kreisrunden idealen Leckagen in Abhängigkeit der zugehörigen Leckagefläche bei verschiedenen Leckagedrücken	81
Abb. 6-3: Vergleich von idealen Leckagen mit kreisrunder und Langlochgeometrie bei einem Leckagedruck von 6 bar _ü	83
Abb. 6-4: Vergleich des Leckagestroms eines stark angesenkten Prüfkörpers (D-010-01) mit dem Mittelwert aus drei Prüfkörpern mit minimaler Nachbearbeitung (D-010-04 bis D-010-06).....	84
Abb. 6-5: Leckageströme der Prüfkörper D-019-03, D-017-02 und D-015-02 auf zwei Temperaturniveaus der Druckluft in Abhängigkeit des Leckagedrucks	87

Abb. 6-6: Abhängigkeit des Leckagestroms von der Drucklufttemperatur bei einem Leckagedruck von 6 bar _ü (Prüfkörper: D-015-02)	88
Abb. 6-7: Messergebnisse der Leckageströme von Druckluft mit unterschiedlichem Wassergehalt (Prüfkörper: D-020-03).....	90
Abb. 6-8: Bewertungsübersicht der untersuchten Einflussfaktoren auf Druckluftleckagen ...	91
Abb. 6-9: Vergleich der Messergebnisse der Leckagen D-010, D-015 und D-020 zu Werten von (Dudić et al. 2012a)	95
Abb. 6-10: Messergebnisse der Leckagen D-016 und D-030 im Vergleich zu Werten von Wolstencroft für kreisrunde Leckagen mit 1,6 mm und 3,2 mm Durchmesser(normiert auf 3,0 mm). Quelle: (Wolstencroft 2008).....	96
Abb. 6-11: Leckageströme der Prüfkörper 08-0895-03 bis 08-0895-05 als tatsächliche Messdaten (links) und normalisierte Darstellung auf Basis der Leckagefläche von 08-0895-04 (rechts)	98
Abb. 6-12: V-B-1/2-Z-1 bis 3; Anzugsmoment: (Kreise) 10 Nm (Dreiecke) 40 Nm.....	103
Abb. 6-13: Boxplots aller Messwerte der Prüfkörper „Verschraubungen ohne Dichtmittel“; (oben) über den Leckagedruck (unten) über das Anzugsmoment.....	105
Abb. 6-14: Leckagestrom der Leckagegeometrie V-B-1/2-K in Abhängigkeit des Anzugsmoments	106
Abb. 6-15: Leckageströme der Bauteile V-B-1/2-D_1,5-1 und V-B-1/2-D_1,5-2.....	107
Abb. 6-16: Gemittelter Leckagestrom des Prüfkörpers S-10-R-7-1, sowie die drei Durchläufe	109
Abb. 6-17: Leckageströme von Schlauchverbindungen mit Risslänge 5 mm	110
Abb. 6-18: Leckageströme von Schlauchverbindungen mit Risslänge 7 mm	110
Abb. 6-19: Leckageströme aller vermessenen Schlauchrisse mit Risslänge 5 mm (Boxplot)	112
Abb. 6-20: Leckageströme aller vermessenen Schlauchrisse mit Risslänge 7 mm (Boxplot)	112
Abb. 6-21: Gemittelter Leckagestrom des Prüfkörpers S-6-L-1,8-3, sowie drei Messdurchläufe	113
Abb. 6-22: Gemittelter Leckagestrom des Prüfkörpers S-6-L-1,2-2	114
Abb. 6-23: Boxplot der Leckageströme aller Prüfkörper des Typs Schlauchperforationen .	116
Abb. 6-24: Ovale Verformung einer verwendeten Schlauchschelle, Quelle : (Sieger 2019)	117
Abb. 6-25: Leckageströme der drei untersuchten Prüfkörper mit undichten Schlauchschellen	117
Abb. 7-1: Frequenzanalyse des Prüfkörpers S-6-L-2,0-1 bei 8 bar _ü und 20 cm Abstand.....	120
Abb. 7-2: Frequenzanalyse des Prüfkörpers S-10-R-7-1 bei 4 bar _ü und 20 cm Abstand.....	122
Abb. 7-3: Leckagestrom über den mittleren (oben) bzw. maximalen (unten) Gesamtschalldruckpegel aller untersuchten Prüfkörper bei verschiedenen Messabständen und Leckagedrücken von 4 bis 8 bar _ü	126

Abb. 7-4: Leakageströme aller untersuchter Prüfkörper über dem mittleren Gesamtschalldruckpegel inkl. exponentieller Trendfunktion	127
Abb. 7-5: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels Gesamtschalldruck, bestimmten Leakageströmen.....	128
Abb. 7-6: Leakageströme aller untersuchten Prüfkörper über den maximalen 40 kHz Pegel (Messabstand 20 cm) inkl. exponentieller Trendfunktion	130
Abb. 7-7: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels 40 kHz Pegel bestimmten Leakageströmen.....	131
Abb. 7-8: Abweichung der aufgestellten Korrelation von 28 Prüfkörpern bei Leakedrücken von 4, 6 und 8 bar _i	132
Abb. 7-9: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels 40 kHz Pegel bestimmten Leakageströmen für Messabstände von 20 bis 60 cm	135
Abb. 7-10: Häufigkeitsverteilung der Abweichung bezogen auf die Leakagegeometrie.....	135
Abb. 7-11: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels 40 kHz Pegel bestimmten Leakageströmen unter Berücksichtigung der Leakagegeometrie	138
Abb. 7-12: Absolute Abweichungen des Verfahrens zur Leakagequantifizierung mittels Ultraschall in Abhängigkeit des Leakagestroms	140
Abb. 7-13: Relative Abweichungen des Verfahrens zur Leakagequantifizierung mittels Ultraschall in Abhängigkeit des Leakagestroms	140
Abb. 8-1: Vorschlag für ein Klassifizierungssystem von Druckluftleckagen	149
Abb. B - 1: Datenblatt Drucksensor CS10 (Ausschnitt) (CS INSTRUMENTS GmbH & Co. KG 2016a).....	164
Abb. B - 2: Datenblatt Wetterstation WS-300-UMB (Ausschnitt) (Lufft 2021).....	165
Abb. B - 3: Datenblatt Volumenstromsensor VA520 (CS INSTRUMENTS GmbH & Co. KG 2016b)	166
Abb. B - 4: Datenblatt Feuchtesensor Metpoint DPM (Ausschnitt) (Beko 2017)	167
Abb. B - 5: Datenblatt Ultraschallmikrofon BS10 (Ausschnitt) (Sonotec 2020).....	167
Abb. B - 6: Datenblatt Temperatursensor TCT-1AAGE1006MZ (Ausschnitt) (Sick 2020)	168
Abb. B - 7: Kalibrierdaten der 0,5 Zoll Messdüse	169
Abb. B - 8: Kalibrierdaten der 2,4 mm Messdüse	169
Abb. B - 9: Kalibrierdaten der 1 mm Messdüse	170
Abb. B - 10: Kalibrierdaten der 0,5 mm Messdüse	170
Abb. B - 11: LabView Benutzeroberfläche	171
Abb. C - 1: Messfehler durch die optische Flächenbestimmung bei 4 mm Bohrungen, Quelle: (Sahin 2019).....	172

Abb. C - 2: Messfehler durch die optische Flächenbestimmung bei 2 mm Bohrungen, Quelle: (Sahin 2019)	172
Abb. F - 1: Leckagestrom des Prüfkörpers D-020-01 bei niedrigen Leckagedrücken	184
Abb. G - 1: Messergebnisse des Schallsignals am Prüfstand ohne eine zu vermessende Leckage bei angeschalteter LED Beleuchtung	185
Abb. G - 2: Messergebnisse des Prüfkörpers V-B-0,5-Z-40-1 (Leckagedruck: 4 bar _ü , Messabstand: 20 cm)	186

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Leckagestrom in Abhängigkeit des Leckagedrucks und des Leckagedurchmessers der Schlauch-Prüfkörper Quelle: (Dudić et al. 2012b)...	18
Tabelle 2-2: Schalldruck in Abhängigkeit des Leckagedrucks und des Leckagedurchmessers der PUN Prüfkörper. Quelle: (Dudić et al. 2012b).....	19
Tabelle 2-3: Messwerte von Leckageströmen kreisrunder Leckagen von (Wolstencroft 2008), inkl. Umrechnung der Betriebsvolumenströme in einen Normvolumenstrom nach DIN 2533.....	21
Tabelle 2-4: Betrachtungshorizont relevanter Publikationen im Bereich Druckluftleckagen.	24
Tabelle 3-1: Referenzwerte für die Sensitivitätsanalyse	33
Tabelle 3-2: Discharge Coefficients für diverse Geometrien nach ((Sigloch 2017), Seite 171)	38
Tabelle 5-1: Leckageströme aller Durchläufe, sowie arithmetischer Mittelwert von D-030-03	63
Tabelle 5-2: Schwankungen der Versuchsbedingungen.....	63
Tabelle 6-1: Messwerte des Prüfkörpers D-020-01, sowie berechnete Proportionalitätskonstante	80
Tabelle 6-2: Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit des Leckagedrucks	82
Tabelle 6-3: Relativer Leckagestrom in Abhängigkeit des Leckagedrucks der idealen Leckagen mit 1, 1,7, 2,5 und 3 mm Leckagedurchmesser bezogen auf den Leckagestrom bei 1 mm.....	82
Tabelle 6-4: Leckageströme von Prüfkörpern mit Langlochgeometrie und unterschiedlichen Längen zu Breite Verhältnissen bei 6 bar _ü	85
Tabelle 6-5: Auswertung des Einflusses der Drucklufttemperatur auf den Leckagestrom	87
Tabelle 6-6: Ergebnisse einer kreisrunden Leckage mit einem Durchmesser von 2 mm	92
Tabelle 6-7: Leckageströme bei 6 bar _ü aller kreisrunden idealen Leckagen	93
Tabelle 6-8: Ergebnisse der Langloch-Leckage 08-0400 (Leckagefläche: 3,775 mm ²)	98
Tabelle 6-9: Leckageströme bei 6 bar _ü aller idealen Leckagen mit Langlochgeometrie	99
Tabelle 6-10: Daten der Prüfkörper von Wolstencroft. Quelle: (Wolstencroft 2008).....	100
Tabelle 6-11: Leckagestrom einer ½ Zoll-Verschraubung ohne Dichtmittel mit einem Anzugmoment von 40 Nm.....	102
Tabelle 6-12: Leckageströme der Prüfkörper V-B-1/2-Z-1 bis 3 bei unterschiedlichen Anzugmomenten und einem Leckagedruck von 6 bar _ü	104
Tabelle 6-13: Leckageströme aller Prüfkörper des Typs perforierte Schlauchverbindung bei einem Leckagedruck von 6 bar _ü	115
Tabelle 7-1: Messergebnisse des Gesamtschalldruckpegels bei verschiedenen Messabständen (Prüfkörper: S-L-2,0-1 Leckagedruck: 8 bar _ü)	123

Tabelle 7-2: Maximaler und gemittelter Gesamtschalldruckpegel und Leckagestrom ausgewählter Prüfkörper bei einem Messabstand von 20 cm (Leckagedruck: 6 bar _i)	124
Tabelle 7-3: Durchschnittliche Abweichung der Korrelation nach Leckagegeometrien	136
Tabelle 7-4: Leckagegeometriefaktoren der untersuchten Leckagegeometrien	137
Tabelle 7-5: Übersicht der neu hergestellten Prüfkörper für die Validierung.....	139
Tabelle D - 1: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-010 (1.0 mm Durchmesser)	173
Tabelle D - 2: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-015 (1.5 mm Durchmesser)	173
Tabelle D - 3: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-016 (1.6 mm Durchmesser)	174
Tabelle D - 4: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-017 (1.7 mm Durchmesser)	174
Tabelle D - 5: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-018 (1.8 mm Durchmesser)	174
Tabelle D - 6: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-019 (1.9 mm Durchmesser)	175
Tabelle D - 7: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-020 (2.0 mm Durchmesser)	175
Tabelle D - 8: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-025 (2.5 mm Durchmesser)	175
Tabelle D - 9: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-030 (3.0 mm Durchmesser)	176
Tabelle D - 10: Ergebnisse der Leckagegeometrie 10-0228	176
Tabelle D - 11: Ergebnisse der Leckagegeometrie 08-0300	176
Tabelle D - 12: Ergebnisse der Leckagegeometrie 08-0400	177
Tabelle D - 13: Ergebnisse der Leckagegeometrie 04-0734	177
Tabelle D - 14: Ergebnisse der Leckagegeometrie 20-0300	177
Tabelle D - 15: Ergebnisse der Leckagegeometrie 08-0895	177
Tabelle D - 16: Ergebnisse der Leckagegeometrie 10-0725	178
Tabelle E - 1: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-10	179
Tabelle E - 2: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-15	179
Tabelle E - 3: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-20	179
Tabelle E - 4: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-25	179
Tabelle E - 5: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-30	180
Tabelle E - 6: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-40	180
Tabelle E - 7: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-10	180
Tabelle E - 8: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-15	180
Tabelle E - 9: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-20	181
Tabelle E - 10: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-25	181
Tabelle E - 11: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-30	181
Tabelle E - 12: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-40	181
Tabelle E - 13: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-D_1,5-10	181
Tabelle E - 14: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-10-R-7	182
Tabelle E - 15: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-10-R-5	182

Tabelle E - 16: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-0,7	182
Tabelle E - 17: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-1,2	182
Tabelle E - 18: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-1,8	183
Tabelle E - 19: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-2,0	183
Tabelle E - 20: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-2,5	183
Tabelle E - 21: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-S-8_16.....	183

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSV	Comma-separated values (Dateiformat)
FFT	Fast-Fourier-Transformation
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
PUN	Polyurethan (Kunststoff)
PVC	Polyvinylchlorid (Kunststoff)

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Zeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A_{Lck}	m ²	Leckagefläche
c	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
C_D	-	Discharge Coefficient
c_p	kJ/(kgK)	Spezifische isobare Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
g	N/kg	Ortsfaktor
h	kJ/kg	Spezifische Enthalpie
L	dB	Gesamtschalldruckpegel
L_{40}	dB	Schalldruckpegel bei einer Frequenz von 40 kHz
\dot{m}_{Lck}	kg/s	(Leckage-) Massenstrom
p_{Aus}	bar	(Austritts-) Druck
$p_{krit.}$	bar	(Kritischer) Druck
p_{Lck}	bar	(Leckage-) Druck
p_U	bar	(Umgebungs-) Druck
R_{Luft}	kJ/(kgK)	Spezifische Gaskonstante der Luft
s	kJ/kg	Spezifische Entropie
T	K	Temperatur
T_{Aus}	K	(Austritts-) Temperatur
T_{Lck}	K	(Leckage-) Temperatur
v	m ³ /kg	Spezifisches Volumen
\dot{V}_{Lck}	l/min	Leckagestrom
z	m	Geodätische Höhe
Z	-	Realgasfaktor

Griechische Zeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
κ	-	Isentropenexponent
ρ_{Aus}	kg/m ³	(Austritts-) Dichte
ρ_{Norm}	kg/m ³	(Norm-) Dichte
τ_{Geo}	-	Leckagegeometriefaktor

Druckeinheiten

Einheit	Bezeichnung
bar _ü	Überdruck
bar _a	Absolutdruck

Kurzfassung

Die Steigerung der Energieeffizienz ist das zentrale Element der Strategie der Bundesregierung, um das Gelingen der Energiewende zu ermöglichen. Bis zum Jahr 2050 soll der Primärenergieverbrauch um 50 % gesenkt werden. Der Strombedarf industrieller Druckluftsysteme in Deutschland beträgt circa 16 TWh/a, was einem Anteil von 7 % des Gesamtstrombedarfs der Industrie entspricht. Gleichzeitig existieren große, wirtschaftliche Einsparpotentiale im Bereich der Druckluftsysteme. Das größte Einsparpotential, mit einer Einsparung von bis zu 2,5 TWh/a, liegt in der Identifikation von Druckluftleckagen und deren Beseitigung. Trotz des großen Potentials sind Druckluftleckagen wenig wissenschaftlich untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist es, Druckluftleckagen systematisch zu untersuchen. Hierzu fokussiert sich die Arbeit auf drei Forschungsschwerpunkte: Leckageberechnungen, Leckageströme und Leckagequantifizierung. Zunächst werden die physikalischen Grundlagen von Druckluftleckagen hergeleitet, auf deren Basis ein Berechnungsmodell für den Leckagestrom entwickelt wird. Die beiden weiteren Kernthemen werden experimentell untersucht, hierfür wird ein Versuchsstand konzipiert und aufgebaut. Im zweiten Forschungsschwerpunkt werden die Leckageströme einer großen Anzahl an Prüfkörpern mit idealisierter und realitätsnaher Leckagegeometrie ermittelt. Ebenso werden mögliche Einflussfaktoren auf den Leckagestrom von Leckagestellen untersucht. In einem letzten Schritt wird überprüft, inwiefern sich die Schallsignale einer Druckluftleckage eignen, um den Leckagestrom anhand des Signals indirekt zu quantifizieren.

Die Ergebnisse der Arbeit teilen sich auf die betrachteten Forschungsschwerpunkte auf. In Bezug auf das Themenfeld Leckageberechnungen werden analytische Gleichungen aufgestellt, die eine idealisierte Bestimmung des Leckagestroms ermöglichen. Das entwickelte Berechnungsmodell ermöglicht die Durchführung von Sensitivitätsanalysen relevanter Eingangsparameter.

Bei der experimentellen Untersuchung von Leckagen können die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Leckagestrom bestimmt werden, diese sind: Der Leckagedruck, die Leckagefläche, sowie die Leckagegeometrie. Die Temperatur hat nur einen geringen, der Wassergehalt der Druckluft keinen, messbaren Einfluss. Ideale Leckagen weisen gegenüber den meisten realen Leckagen einen deutlich höheren Leckagestrom auf. Reale Leckagen, mit Ausnahme von Schlauchrissen, liegen für Drücke von 5 bis 7 bar_i in den meisten Fällen unter 100 l_N/min, in vielen Fällen sogar unter 20 l_N/min. In der Arbeit kann zudem gezeigt werden, dass eine indirekte Leckagebewertung durch die Analyse des Schallsignals möglich ist. Zur Betrachtung wird der Leckagestrom in Bezug zum Schalldruckpegel bei 40 kHz gesetzt. Die Genauigkeit des Verfahrens kann durch die Berücksichtigung des, in dieser Arbeit eingeführten, Leckagegeometriefaktors deutlich gesteigert werden. In einer abschließenden Validierung konnte gezeigt werden, dass 71 % der indirekt bestimmten Leckageströme eine Abweichung von kleiner ± 40 % besitzen. Werden Prüfkörper des Typs Verschraubungen von der Auswertung ausgeschlossen steigt der Anteil der Messwerte in diesem Intervall auf 89 %.

Abstract

Increasing energy efficiency is the central element of the federal government's strategy to enable the German "Energiewende" to succeed. By the year 2050, primary energy consumption is to be reduced by 50 %. The electricity requirement of industrial compressed air systems in Germany is approximately 16 TWh/a, which corresponds to 7 % of the total electricity requirement of industry. At the same time, there is great potential for economic energy savings in the field of compressed air systems. The greatest savings potential, with savings of up to 2,5 TWh/a, lies in the identification of compressed air leaks and their elimination. Despite the great potential, compressed air leakages have been little researched.

The aim of this work is to systematically investigate compressed air leakages. For this purpose, the work focuses on three main research areas: Leakage calculations, leakage flows and leakage quantification. First, the physical fundamentals of compressed air leakage are derived, on the basis of which a calculation model for the leakage flow is developed. The two other core topics will be investigated experimentally, for which a test rig will be designed and built. In the second research focus, the leakage flows of a large number of test specimens with idealized and realistic leakage geometry will be determined. Likewise, possible factors influencing the leakage flow of leakage points will be investigated. In a final step, it is examined to what extent the sound signals of a compressed air leakage are suitable to indirectly quantify the leakage flow on the basis of the signal.

The results of the work are divided among the main research areas considered. With regard to the subject area of leakage calculations, analytical equations are established which allow an idealized determination of the leakage flow. The developed calculation model enables the performance of sensitivity analyses of relevant input parameters.

During the experimental investigation of leakages, the most important factors influencing the leakage flow can be determined: The leakage pressure, the leakage area, and the leakage geometry. The temperature has only a minor influence, the water content of the compressed air no measurable influence. Ideal leakages have a significantly higher leakage flow compared to most real leakages. Real leakages, with the exception of hose cracks, are in most cases below 100 l_N/min for pressures of 5 to 7 bar_g, in many cases even below 20 l_N/min.

In this thesis it can also be shown that an indirect leakage evaluation is possible by analyzing the sound signal. For this purpose, the leakage flow is set in relation to the sound pressure level at 40 kHz. The accuracy of the method can be significantly increased by considering the leakage geometry factor, introduced in this work. The validation shows, 71 % of the indirectly determined leakage flows were found to have a deviation of less than ± 40 %. If test specimens of the bolted joint type are excluded from the evaluation, the proportion of measured values in this interval increases to 89 %.

1. Einleitung

Eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland ist eng mit der Steigerung der Energieeffizienz verbunden. Im Jahr 2016 wurde im Grünbuch Energieeffizienz (BMWi 2016a) und im Impulspapier Strom 2030 (BMWi 2016b) der sogenannte „Dreiklang der Energiewende“ vorgestellt. Grundton und damit wichtigstes Element, stellt die Energieeffizienz dar. Der Energiebedarf soll dauerhaft gesenkt werden. Das Prinzip wird als „Efficiency first“ bezeichnet. Als zweites Element, sollen erneuerbare Energien direkt in den Sektoren erzeugt und genutzt werden. Als letztes Element soll der verbleibende Strombedarf durch Strom aus erneuerbaren Energien anderer Sektoren (Sektorkopplung) gedeckt werden.

Der Energieeffizienz wird somit eine zentrale Rolle in der Strategie der Bundesregierung zur Erreichung der Klimaziele zugewiesen, dies zeigt sich auch in der im Jahr 2019 veröffentlichten Energieeffizienzstrategie 2050 (BMWi 2019). Deutschland hat sich bis zum Jahr 2030 das Ziel gesetzt, 30 % des Primärenergieverbrauchs gegenüber dem Basisjahr 2008 einzusparen. Bis zum Jahr 2050 soll der Primärenergieverbrauch um 50 % reduziert werden. Durch die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Auswirkungen des SARS-CoV-2 Erregers, ist der Primärenergieverbrauch im Jahr 2020 nach vorläufigen Zahlen vom 17. Dezember 2020 auf 11.691 PJ gefallen, dies entspricht einer Verbrauchsminderung gegenüber dem Vorjahr von 8,7 % (AGEB 2020). Hierdurch konnte das ausgegebene Ziel der Verbrauchsminderung von 20 % bis zum Jahr 2020, gegenüber dem Basisjahr 2008 nahezu erreicht werden (Zielwert für 2020: 11.504 PJ).

Um die Ziele der Reduktion des Primärenergieverbrauchs trotz Erhaltung der Wirtschaftsleistung zu erreichen, muss die Energieeffizienz in allen Sektoren gesteigert werden. Im Industriesektor sind sowohl Einsparpotentiale bei Prozess-, als auch bei Querschnittstechnologien vorhanden. Querschnittstechnologien, wie z.B. Druckluftsysteme, sind in der Industrie und dem verarbeitenden Gewerbe weit verbreitet. Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) weist den jährlichen Stromverbrauch der Druckluft in Deutschland aus. Der typische jährliche Energiebedarf liegt nach (AGEB 2019) bei circa 16 TWh, was einem Anteil von circa 7 % des Gesamtstrombedarfs der Industrie entspricht. Die publizierten Zahlen der AGEB basieren jedoch auf einer Studie von Radgen & Blaustein aus dem Jahr 2001 (Radgen et al. 2001), welche den Strombedarf der Drucklufterzeugung in der Europäischen Union mit damals 16 Mitgliedern ermittelt hat. Die Studie stützt sich dabei auf die Analyse von 19 Unternehmen sowie Experteninterviews und extrapoliert auf dieser Datenbasis den Strombedarf der Druckluftbereitstellung. Die von AGEB publizierten Strombedarfswerte für die Druckluftbereitstellung sind deshalb als „Richtwerte mit einer gewissen Toleranz“ zu sehen¹.

¹ Für die Bundesrepublik Deutschland existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine genaueren Angaben zum Strombedarf der Druckluftbereitstellung.

Druckluftsysteme werden häufig nicht optimal ausgelegt, gewartet und betrieben, was zu großen energetischen und wirtschaftlichen Einsparpotentialen in der Praxis führt. Eine fundierte Auswertung, der in der Industrie existierenden Einsparpotentiale der betriebenen Druckluftsysteme, wurde im Rahmen der Kampagne „Druckluft effizient“ durchgeführt (Agricola et al. 2005). Zur Analyse der Einsparpotentiale in der Industrie wurden Messungen in 65 Unternehmen durchgeführt. Im Mittel ergaben sich Einsparpotentiale von 32,4 %, wobei die konkreten Einsparpotentiale vom Einzelfall abhängig sind. In der Kampagne wurden zudem die Druckluftleckageanteile in 53 Unternehmen bestimmt, welche eine sehr große Bandbreite aufwiesen. So wurden Leckageanteile zwischen 9 % und 80 % festgestellt, im Mittel betrug der Leckageanteil 33 %. Die Kampagne fand von 2001 bis 2004 statt und unterstreicht die Bedeutung der Leckageverluste für die Energieeffizienz des Gesamtsystems.

In den letzten 20 Jahren wurden sowohl in Deutschland, als auch weltweit, Untersuchungen, zur Energieeffizienz in Druckluftsystemen durchgeführt. Die Beseitigung von Druckluftleckagen wird in all diesen Studien als eine der Wichtigsten, bzw. als die wichtigste Maßnahme zur Senkung des Strombedarfs von Druckluftsystemen angesehen. Die ausgewiesenen wirtschaftlichen Einsparpotentiale liegen im Bereich 9 % bis 16 % des Gesamtstrombedarfs der Druckluftbereitstellung (Radgen et al. 2001; EnEffAH 2012; McKane et al. 2010).²

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Ein effizientes Druckluftsystem, bestehend aus Druckluftherzeugung, -aufbereitung, -speicherung, -verteilung und -anwendung, ist nur mit geringem Leckageanteil möglich. Druckluftleckagen entstehen unter anderem durch Verschleiß, Ermüdung und Alterung von Bauteilen und müssen folglich im Rahmen von regelmäßigen Wartungsintervallen erkannt und beseitigt werden. Die hohen Leckageanteile in der Praxis zeigen jedoch, dass die Minimierung von Druckluftleckagen in der Praxis vernachlässigt wird. Einer der Gründe für die geringe Priorität der Beseitigung von Druckluftleckagen ist deren Unbedenklichkeit in Bezug auf Arbeitsschutz, Produktions- und Qualitätssicherung, da das ausströmende Medium (Luft) unschädlich ist. Der energetische Aspekt wird oftmals vernachlässigt, da Messungen der Gesamtleckage eines Druckluftsystems zu selten durchgeführt werden. Zudem kann aus der Messung der Gesamtleckage nicht auf die Position der Leckagestellen geschlossen werden. Einzelleckagen müssen bei einer Begutachtung des gesamten Druckluftsystems identifiziert werden. Wird eine Leckage gefunden, existiert zum aktuellen Zeitpunkt keine fundierte Messmethode bzw. Abschätzung zu Energieverbrauch und Kosten der Leckagestelle. Es gibt trotz der hohen energetischen Relevanz, nur eine sehr geringe Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen, welche das Thema Druckluftleckagen im Detail untersuchen.

² Das Einsparpotentials für die Beseitigung von Druckluftleckagen wird von (Radgen et al. 2001) (S. 2) mit 16 %, von (EnEffAH 2012) (S. 38) mit 14 % und von (McKane et al. 2010) (S. 56) mit 9 % angegeben.

Das Ziel dieser Arbeit ist deshalb die systematische Analyse von Druckluftleckagen. Wie in Abb. 1-1 dargestellt, wird sich auf drei Forschungsschwerpunkte fokussiert, die inhaltlich aufeinander aufbauen.

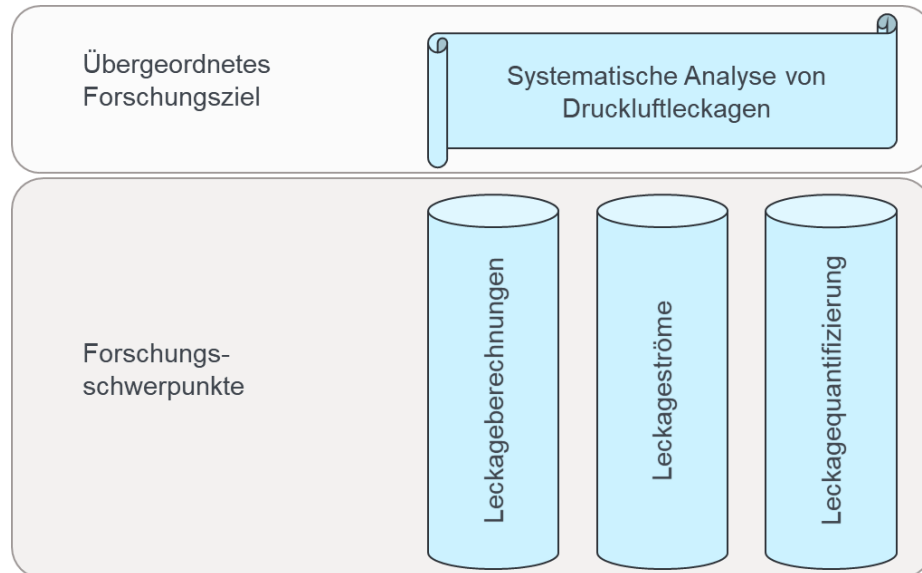


Abb. 1-1: Übergeordnetes Ziel und Forschungsschwerpunkte der Arbeit

Im Rahmen der Arbeit sollen für den ersten Forschungsschwerpunkt „Leckageberechnungen“ folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie können Druckluftleckagen durch physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden?
- Welche Einflussfaktoren auf die Höhe des Leckagestroms existieren und wie groß ist deren jeweiliger Einfluss?

Im zweiten Forschungsschwerpunkt „Leckageströme“ werden Druckluftleckagen experimentell untersucht, um folgende Forschungsfragen zu adressieren:

- Können die in der Theorie ermittelten Einflussfaktoren im Experiment nachgewiesen und somit validiert werden?
- Wie groß sind Leckageströme von definierten Leckagegeometrien?
- Wie groß sind Leckageströme von realitätsnahen Leckagegeometrien?

Im letzten Forschungsschwerpunkt „Leckagequantifizierung“ wird untersucht, inwiefern sich die Messung und Auswertung eines (Ultra-) Schallsignals einer Leckage eignet, um den tatsächlichen Leckagestrom zu bestimmen. Hierbei sollen die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- Ist die Quantifizierung einer Druckluftleckage durch Analyse des (Ultra-) Schallsignals möglich?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Schallsignal und dem Leckagestrom und welche Genauigkeiten können bei der Quantifizierung erreicht werden?

1.2 Aufbau der Arbeit

Die zuvor beschriebene Problemstellung und die daraus abgeleitete zentrale Zielsetzung, sowie die resultierenden Forschungsschwerpunkte sind in der Struktur dieser Arbeit abgebildet (vgl. Abb. 1-2). Nachfolgend werden die Inhalte der einzelnen Kapitel kurz vorgestellt.

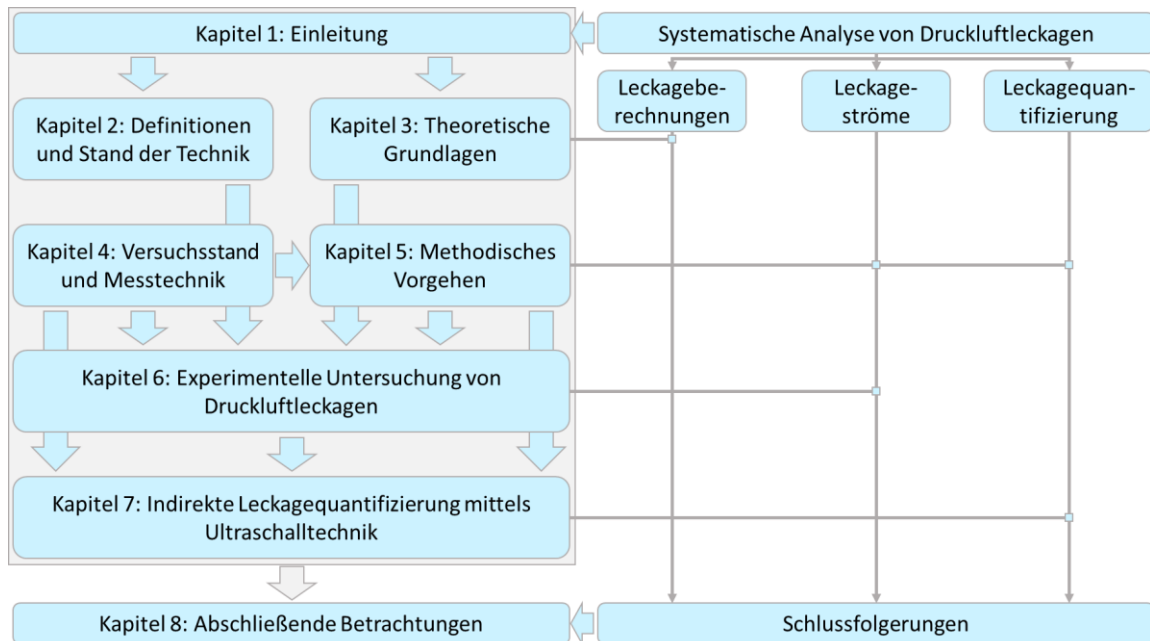


Abb. 1-2: Struktur der Arbeit

In der Einleitung wird die Bedeutung von Druckluftleckagen für die Energieeffizienz von Druckluftsystemen, der Forschungsbedarf und die daraus resultierende Themenstellung vorgestellt.

In Kapitel 2 werden wichtige Definitionen dieser Arbeit aufgeführt, die für ein eindeutiges Verständnis der Arbeit sorgen. Zusätzlich dazu wird der Stand der wissenschaftlichen Literatur im Bereich der Druckluftleckagen, in Bezug auf die Forschungsschwerpunkte, vorgestellt.

Die Theoretischen Grundlagen und Berechnungsverfahren von Druckluftleckagen werden in Kapitel 3 vorgestellt. Auf den Berechnungsverfahren basierend, wird ein Berechnungsmodell entwickelt. Zudem werden die wesentlichen Grundlagen der Ultraschallakustik erläutert.

Kapitel 4 markiert den Start des experimentellen Teils dieser Arbeit, welcher den Hauptteil der Arbeit einnimmt, indem die Entwicklung, der Aufbau und die Automatisierung des benötigten Prüfstands erläutert werden.

Auf die experimentelle Vorgehensweise wird in Kapitel 5 eingegangen. Hier werden unter anderem die Fertigung der später verwendeten Prüfkörper, sowie die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung der Experimente erläutert.

Kapitel 6 stellt das Erste der beiden (experimentellen) Ergebniskapitel dar. In diesem Kapitel werden alle zentralen Ergebnisse aus den Untersuchungen aller betrachteter Prüfkörper

vorge stellt und diskutiert. Das Kapitel beinhaltet eine Bewertung der untersuchten Einflussfaktoren auf Druckluftleckagen, fundierte Aussagen zu Leckageströmen von Leckagen mit unterschiedlicher Geometrie, sowie dem Vergleich der gewonnenen Erkenntnisse mit der wissenschaftlichen Literatur.

Kapitel 7 ist das zweite (experimentelle) Ergebniskapitel und beinhaltet die Entwicklung eines Verfahrens zur indirekten Leckagequantifizierung mittels eines Schallsignals. In diesem Kapitel werden zuerst Messergebnisse des Schallsignals von Druckluftleckagen vorgestellt und physikalische Abhängigkeiten diskutiert. Im weiteren Verlauf wird eine Korrelation zwischen dem Schalldruckpegels bei einer Frequenz von 40 kHz und dem Leckagestrom entwickelt und auf Eignung und Genauigkeit überprüft. Dieser Ansatz wird im Verlauf des Kapitels erweitert.

Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einem Rückblick auf die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit und einem Abgleich zu dem definierten Forschungsziel und den Forschungsschwerpunkten. Zusätzlich wird der zukünftige Forschungsbedarf zur Quantifizierung von Druckluftleckagen identifiziert.

2. Definitionen und Stand der Forschung

Im vorliegenden Kapitel werden die für diese Arbeit zentralen Begriffe und Rahmenbedingungen definiert (Kapitel 2.1), um ein einheitliches Verständnis zu erhalten und die Ergebnisse korrekt einzuordnen. Es wird zudem der Stand der Forschung vorgelegt, welcher in einen praxisnahen Abschnitt zu den aktuellen Messverfahren von Leckageverlusten (Kapitel 2.2) und einen Abschnitt zur wissenschaftlichen Literatur (Kapitel 2.3) eingeteilt ist.

2.1 Definitionen

Die vorliegende Arbeit führt einige neue Begriffe ein, welche dem besseren Verständnis der Arbeit und der einfacheren Lesbarkeit dienen. Zusätzlich werden allgemeine, für diese Arbeit geltende, Rahmenbedingungen in diesem Kapitel erläutert.

Normvolumenstrom

Druckluft ist ein kompressibles Medium, folglich ist die Angabe eines Volumenstroms nur dann eindeutig definiert, wenn der dazugehörige Druck und die Temperatur bekannt sind. Zudem handelt es sich bei Druckluft um ein Gasgemisch der Hauptkomponenten Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlenstoffdioxid. Bei feuchter Luft ist zusätzlich Wasserdampf enthalten.

Um eine Vergleichbarkeit der Volumenströme zu ermöglichen, existieren unterschiedliche Normen mit festen Bezugspunkten und Rahmenbedingungen, die eine Umrechnung in einen Normvolumenstrom ermöglichen. Ein Normvolumenstrom ist somit äquivalent zu einer Massenstromangabe.

Alle Angaben in dieser Arbeit beziehen sich auf die DIN ISO 2533 „Normatmosphäre“. Die Norm definiert hierbei die Zusammensetzung der Luft als trockene Luft ohne Wasseranteil, die Luftbestandteile sind exakt definiert und enthalten neben den Hauptbestandteilen auch Spurengase wie Schwefeldioxid oder Iod. Die Normdichte nach DIN ISO 2533 entspricht, bei einer Höhe von 0 m_{NN}, einer Temperatur von 288,15 K (± 15 °C) und einem Druck von 1013,25 mbar, dem Wert $1,2250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (DIN 2533).

Im Druckluftbereich sind noch weitere Normen³ für die Angabe eines Normvolumenstroms gängig, diese haben leicht geänderte Rahmenbedingungen bei Normtemperatur und Druck, wodurch es zu kleinen Differenzen der Normvolumenströme untereinander kommt.

³ Im Druckluftbereich werden zur Angabe von Normvolumenströmen häufig die ISO 8778 (Referenzbedingungen: 20 °C, 1000 mbar, 65 % rel. Luftfeuchtigkeit) (ISO 8778) oder die DIN 1945-1 (Referenzbedingungen: 20 °C, 1000 mbar, trockene Luft) (DIN 1945-1) verwendet. Weitere gängige Norm für Normvolumenströme ist beispielsweise die DIN 1343 (Referenzbedingungen: 0 °C, 1013,25 mbar, trockene Luft) (DIN 1343)

Leckagedruck

In dieser Arbeit wird mit dem Leckagedruck derjenige Druck bezeichnet, welcher innerhalb eines Druckluftsystems kurz vor der Leckage ansteht. Näherungsweise ist dieser Druck gleich dem Systemdruck, er wird jedoch auf Grund der eindeutigen Beschreibung, als Leckagedruck bezeichnet. Der Leckagedruck ist nicht der Druck im Austrittsquerschnitt der Leckage, dieser wird als Austrittsdruck bezeichnet.

Leckagetemperatur

Analog zum Leckagedruck, wird als Leckagetemperatur die Drucklufttemperatur kurz vor der Leckage bezeichnet. Sie entspricht näherungsweise der Drucklufttemperatur im betrachteten Druckluftsystem.

Ideale Leckage

In der vorliegenden Arbeit werden Prüfkörper, welche eine präzise gefertigte Leckagegeometrie besitzen, als ideale Leckagen bezeichnet. Hierbei handelt es sich um Leckagen mit kreisrunder Geometrie bzw. Langlochgeometrie, welche durch spanende Fertigungsschritte hergestellt werden.

Reale Leckage

Im Gegensatz zu den idealen Leckagen, handelt es sich bei realen Leckagen, um Leckagegeometrien, die in gleicher oder ähnlicher Form in der Praxis vorkommen. In der Arbeit werden sechs unterschiedliche reale Leckagen definiert (vgl. Kapitel 5.2.1).

2.2 Messverfahren zur Quantifizierung von Leckagen in Druckluftsystemen

Wie in der Einleitung dieser Arbeit beschrieben, stellen Leckageverluste einen entscheidenden Faktor für die Energieeffizienz eines Druckluftsystems dar. Um ein Druckluftsystem dauerhaft effizient zu betreiben, empfiehlt es sich, in regelmäßigen Abständen, die Leckagemenge im Druckluftsystem zu überprüfen. Es existieren verschiedene praxisnahe Methoden, die Leckagemenge zu bestimmen, welche nachfolgend vorgestellt werden. Grundlegend für alle Verfahren ist, dass Sie nicht während des Normalbetriebs durchgeführt werden können, da nicht zwischen Leckagestrom und tatsächlich benötigtem Luftstrom unterschieden werden kann. Die Messungen erfolgen zu Zeiten ohne Druckluftbedarf z.B. nachts, am Wochenende oder während eines Betriebsstillstandes.

Behältermethode

Bei der Behältermethode handelt es sich um eine sehr einfache Methode, die Leckagemenge in einem Druckluftsystem zu ermitteln. Für die Durchführung der Messung werden lediglich ein Drucksensor (im einfachsten Fall ein Manometer) und eine Uhr benötigt. Der Drucksensor muss sich für die Messung innerhalb des betrachteten Leitungssystems befinden. Bei abgeschalteten Verbrauchern wird nun die Zeit für einen definierten Druckabfall, z.B. 1 bar gemessen. Der Leckagestrom kann vereinfacht über das Behältervolumen, die Druckdifferenz und die ermittelte Zeit berechnet werden. Da das Druckluftnetz ebenfalls ein Volumen aufweist, steigt die Genauigkeit der Rechnung, je größer das Speichervolumen im Vergleich zum Netzvolumen ist. Bei einem Leitungsvolumenanteil von kleiner 5 % des Behältervolumens, kann Berücksichtigung des Leitungsvolumens in der Berechnung entfallen (Energie Schweiz 2006).

Methode der Nachspeisemenge

Bei der Methode der Nachspeisemenge ist keine Kenntnis über das Netzvolumen nötig. Die Leckagemenge wird anhand der Lastzeit eines Kompressors bei bekannter Liefermenge ermittelt. Hierfür wird ein Druckband festgelegt und alle Verbraucher im Druckluftnetz abgeschaltet. Durch Leckagen im System, sinkt der Druck und der Kompressor schaltet sich zu, bis der Ausschaltedruck erreicht ist. Dieser Zyklus wird mehrfach durchlaufen. Es wird der Anteil der Laststunden des Kompressors im Messzeitraum ermittelt und mit der Liefermenge multipliziert (Energie Schweiz 2006). Je länger der Messzeitraum gewählt ist, desto höher ist die Genauigkeit einer auf diese Weise bestimmten Leckagestroms. Potentielle Fehlerquellen dieses Verfahrens sind z.B. ungenaue oder fehlerhafte Angaben zur Liefermenge des Kompressors, oder kaltregenerierende Adsorptionstrockner, die einen prozessbedingten Druckluftverbrauch aufweisen, welcher zu berücksichtigen ist.

Volumenstromsensoren und übergeordnete Kompressorsteuerungen

Sind im Druckluftsystem Volumenstromsensoren verbaut, oder ist eine übergeordnete Steuerung der Kompressoren vorhanden, so lassen sich diese nutzen, um den Leckagestrom zu ermitteln. In beiden Fällen erfolgt die Auswertung des Leckagestroms über die Auswertung des Druckluftverbrauchsprofils. Hierbei muss jedoch sichergestellt werden, dass sich zu den betrachteten Zeiträumen der Leckageermittlung, keine Dauerverbraucher⁴ im Netz befinden,

⁴ Als Dauerverbraucher sind Druckluftverbraucher zu sehen, die einen nahezu konstanten Druckluftbedarf aufweisen. Beispiele hierfür sind unregelmäßige Vakuumejektoren, Blasdüsen oder Sperrluftanwendungen.

da sich diese nicht im Profil erkennen lassen und als Leckagen gewertet würden. Generell sollten bei der Messung auch keinerlei andere Verbraucher zugeschaltet werden, da diese das Messergebnis verfälschen. Im Gegensatz zu Dauerverbrauchern lassen sich diskontinuierliche Verbraucher in vielen Fällen im Druckluftverbrauchsprofil erkennen. Die Messungen sollten in solchen Fällen wiederholt werden.

Automatisierte Lösungen zur Leckageüberwachung von Maschinen

Einige Hersteller bieten Produktlösungen zur automatisierten Leckageüberwachung von einzelnen Druckluftteilsträngen oder Maschinen an. Es haben sich zwei unterschiedliche Funktionsprinzipien etabliert: Die Messung des Druckabfalls bei abgesperrter Leitung und der Vergleich des Betriebszyklus einer Maschine, mit dessen vorab parametrisierten Referenzarbeitszyklus. In beiden Fällen wird bei der Überschreitung vordefinierter Grenzwerte eine Warnung am Gerät ausgegeben, dass Leckagen auftreten.

Fazit

Es existieren viele unterschiedliche Verfahren zur Quantifizierung von Leckageverlusten in Druckluftsystemen. Fast alle Verfahren haben gemeinsam, dass für eine Überprüfung die Verbraucher abgeschaltet oder herausgerechnet werden müssen. Einzige Ausnahme bilden neue Produktlösungen auf Basis eines Referenzarbeitszyklus, welche jedoch nur auf Maschinenebene eingesetzt werden können. Die dargestellten Verfahren zur Leckagequantifizierung haben zudem alle eine gemeinsame Schwachstelle: Die Leckage kann nicht geortet werden. Weshalb in der Praxis eine Netzbegehung mit Ultraschallhandgeräten⁵ erfolgt, um die Leckagestellen anhand ihres Schallsignals zu lokalisieren.

2.3 Druckluftleckagen in der wissenschaftlichen Literatur

In jeglichem System zum Transport von Gasen, kommt es zu unterschiedlich hoch ausgeprägten Verlusten durch Leckagen. Handelt es sich beim Medium um Druckluft, so sind hauptsächlich erhöhte Energiekosten die Folge. Handelt es sich um andere technische Gase (z.B. Methan), so birgt dies zusätzlich Risiken für Gesundheit, Umwelt und Betriebssicherheit. Besonders bei Gasen, auf die die letzten Punkte zutreffen, wurden zunehmend Anstrengungen unternommen, Leckagedetektionsverfahren zu entwickeln und zu verbessern. Dies spiegelt sich in der Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen zu diesen Themen wieder. Die Anzahl an wissenschaftliche Veröffentlichungen mit einem Fokus auf der experimentellen Analyse

⁵ Druckluftleckagen emittieren auch Schall im hörbaren Frequenzspektrum. Auf Grund von Umgebungsgeräuschen ist die Ortung mittels Ultraschall jedoch weniger fehleranfällig und deshalb Stand der Technik.

von Druckluftleckagen ist stark begrenzt (Anzahl: 6). Diese werden im Rahmen dieses Kapitels vorgestellt und eingeordnet.

In Kapitel (2.3.1) werden Leckagedetektionsverfahren bei Erdgaspipelines vorgestellt und Ihre grundsätzliche Eignung für den Einsatz in Druckluftsystemen überprüft. Kapitel (2.3.2) beinhaltet eine Zusammenstellung von publizierten Druckluftleckageströmen für kreisrunde Leckagegeometrien. Im Anschluss werden relevante experimentelle Arbeiten im Bereich der Druckluftleckagen vorgestellt (Kapitel 2.3.3). Zuletzt werden die Arbeiten in Bezug zu dieser Arbeit eingeordnet und die Limitierungen herausgearbeitet (Kapitel 2.3.4).

2.3.1 Verfahren zur Detektion und Bewertung von Gasleckagen

Die Nutzung von Pipelines zum Transport von technischen Gasen, besonders Methan, ist weltweit stark verbreitet. Pipelines werden zum Überbrücken von großen Distanzen verwendet und erreichen häufig Längen von mehr als 1000 km, wobei die Verlegung unterirdisch, oberirdisch oder auch unter Wasser erfolgt. Die Gesamtlänge aller Erdgaspipelines in Europa betragen im Jahr 2016 laut (EGIG 2018) circa 140.000 km. Ungewollt ausströmendes Gas durch Leckagen in einer Pipeline ist ein schwerwiegendes Problem für die jeweiligen Betreiber. Die häufigsten Gründe für Leckagen in Erdgaspipelines sind laut (EGIG 2018): Fremdeinwirkung, Korrosion, Materialfehler und Bodenbewegungen.

Es finden sich zahlreiche wissenschaftliche Publikationen⁶, welche Leckagedetektionsverfahren für Erdgaspipelines thematisieren. Im Jahr 2012 veröffentlichten Murvay & Silea (Murvay et al. 2012) eine umfassende Zusammenfassung bekannter Verfahren, auf der die nachfolgende Zusammenfassung beruht. Die Autoren teilen die Verfahren in drei Kategorien auf: Nichttechnisch, Hardware und Software.

Nichttechnisch

Die nicht-technischen Verfahren sind für die Praxis von geringerer Relevanz. Die Autoren führen die Nutzung von trainierten Hunden auf, welche austretendes Erdgas anhand der beigemischten Geruchsstoffe erkennen. Ein Übertragen auf Druckluftsysteme ist aus vielen Gründen nicht zielführend. Druckluftsysteme befinden sich, im Gegensatz zu Erdgaspipelines, oftmals in geschlossenen Räumen und sind deutlich verzweigter, was eine exakte Lokalisierung erschwert und zusätzlich zu einer Geruchsbelästigung am Arbeitsplatz führt.

Zusätzlich wird das Verfahren der Blasenbildung durch das Auftragen von Seifenlauge auf vermutete Leckagestelle beschrieben. Dies kann auch im Druckluftbereich angewendet werden, ist jedoch sehr zeitaufwendig und deshalb nicht praktikabel.

⁶ Weitere Publikationen zur Leckagedetektion in Erdgaspipelines: (Batziar et al. 2011; Mandal 2014; Zhang 1997).

Für die nicht-technischen Verfahren gilt zudem zu beachten, dass für einige Druckluftsysteme besondere Anforderungen gelten. So ist die Unbedenklichkeit der Druckluft besonders in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie von besonderer Bedeutung. In diesen Bereichen muss die Druckluft in vielen Fällen frei von Fremdstoffen/Belastungen sein.

Hardware

Es existiert eine große Anzahl an verschiedenen Hardware Lösungen zur Leckagelokalisation in Erdgaspipelines. Die Autoren fassen die verwendeten Technologien nach den zugrundeliegenden Messprinzipien in weitere Untergruppen zusammen. Die Messprinzipien basieren dabei auf physikalisch messbaren Vorgängen, wobei einige Prinzipien spezielle Charakteristika des austretenden Erdgases nutzen und somit nicht auf Druckluftsysteme übertragbar sind. Zu diesen Verfahren zählen:

- Aktive optische Verfahren, wie z.B. LIDAR Messungen (Funktionsprinzip: Austretendes Erdgas führt zu Änderung des Absorptionsspektrums)
- Einzelne passive optische Verfahren, wie z.B. Gasfilter Vergleichs-Radiometrie (Funktionsprinzip: Strahlung wird durch ein Testgas (z.B. Erdgas) geleitet, welches als Spektralfilter genutzt wird und mit Luft verglichen)
- Elektrische Kabelsensoren (Funktionsprinzip: Erdgas reagiert mit Sensormaterial, was zu einer Veränderung des Widerstandes führt)
- Dampfproben (Funktionsprinzip: Detektion von Kohlenwasserstoffen in der Probe)

Neben den aufgeführten, für Druckluft ungeeigneten Messprinzipien, existieren potentiell auf Druckluft übertragbare Lösungen, welche auf akustischen oder (passiv) optischen Messverfahren basieren.

Akustische Messverfahren nutzen den durch das aus einer Leckage austretende Gas entstehenden Geräuschpegel, um eine Leckage zu lokalisieren. Die technischen Geräte sind hierfür in zwei unterschiedlichen Varianten erhältlich. Es existieren Handgeräte, welche für die manuelle Leckagelokalisation durch geschultes Personal gedacht sind. Akustische Handgeräte auf Ultraschallbasis sind bereits kommerziell für die Lokalisierung von Druckluftleckagen erhältlich. Zusätzlich besteht bei Erdgaspipelines die Möglichkeit, akustische Sensoren in definierten Abständen fest entlang der Pipeline einzubauen, um hierdurch eine kontinuierliche Überwachung der Pipeline sicherzustellen. Als Störgrößen werden hierbei Hintergrundgeräusche von Ventilen und Pumpen aufgeführt (Loth et al. 2003).

Eine Übertragung dieses Prinzips auf industrielle Druckluftsysteme könnte möglich sein, wobei die Auswirkungen der vermehrten Störquellen innerhalb eines Betriebs genauer untersucht werden müssten. Zusätzlich ist zu bedenken, dass ein Druckluftnetz deutlich verzweigter aufgebaut ist, was in einer Umsetzung bedacht werden muss.

Passive optische Messverfahren benötigen im Gegensatz zu aktiven optischen Verfahren keine eigene Strahlungsquelle, da die Strahlung des austretenden Gases direkt gemessen wird.

Im Bereich der Leckageüberwachung von Pipelines werden Thermographie, Multi-Wellenlängen Bildgebung und Gasfilter Vergleichs-Radiometrie eingesetzt. Die beiden letztgenannten Verfahren sind für Druckluft nicht umsetzbar, da Sie auf den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des austretenden Gases im Vergleich zur Umgebung beruhen. Thermographie hingegen weist eine prinzipielle Eignung für die Lokalisierung von Druckluftleckagen auf, da hierbei die durch die Entspannung des Gases auftretende Temperaturänderung erfasst wird. Es existieren hierzu erste experimentelle Untersuchungen zur Eignung der Thermographie zur Druckluftleckagedetektion, auf welche in Kapitel 2.3.3 eingegangen wird.

Software

Für den Pipelinebereich existiert zusätzlich eine Reihe von Softwaremaßnahmen zur Leckagedetektion und Quantifizierung. Hier profitieren Pipelines von ihrem, im Vergleich zu einem Druckluftsystem, einfachen Aufbau und eindeutiger Flussrichtung. So können beispielsweise Volumenstrommessgeräte an verschiedenen Punkten der Pipeline eingesetzt werden und damit ein einfacher Abgleich der Massenstrombilanz vorgenommen werden. Zudem existieren aufwendigere Verfahren auf Basis von Simulationen. Die Verfahren haben gemeinsam, dass sie sich nicht einfach auf Druckluftsysteme übertragen lassen, da hier eine viel größere Anzahl an Störfaktoren und eine deutlich komplexere Netzstruktur existiert.

Fazit

Im Bereich der Detektion und Quantifizierung von Gasleckagen in z.B. Erdgaspipelines existiert eine große Anzahl an technischen Lösungen. Die Detektion und Lokalisierung von Leckagen ist bei Erdgaspipelines, im Vergleich zu Druckluftleckagen, aufgrund der zusätzlichen negativen Auswirkungen durch das Austrittsmedium bedeutender. Eine präzise Quantifizierung der Leckagemenge spielt bei Erdgaspipelines deshalb nur eine untergeordnete Rolle. Entscheidender ist hier, die Entdeckungsgeschwindigkeit einer Leckagestelle und die Sensitivität des Verfahrens.

Viele der gezeigten Verfahren, beruhen auf den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Methan im Vergleich zur Umgebung (Luft) und sind folglich nicht auf Druckluftleckagen übertragbar. Als potentiell übertragbare Verfahren eignen sich vor allem akustische und passiv optische Verfahren. In Kapitel 2.3.3 werden Publikationen mit diesem Schwerpunkt vorgestellt.

2.3.2 Leckageströme von kreisrunden Leckagegeometrien

Publikationen zur Drucklufttechnik und insbesondere zur Energieeffizienz in der Drucklufttechnik sind häufig praxisorientiert geschrieben. Hintergrund ist eine bessere Verständlichkeit und eine damit verbundene, höhere Wahrscheinlichkeit für die Umsetzung von Maßnahmen, bzw. die Sensibilisierung relevanter Personengruppen.

Bezogen auf Druckluftleckagen führt dies dazu, dass Leckageströme zur Verdeutlichung des Luftbedarfs und des daraus resultierenden Energiebedarfs häufig anhand von idealen Leckagegeometrien angegeben werden. In den meisten Fällen sind dies kreisrunde Löcher (bzw. Bohrungen) mit verschiedenen Durchmessern. Durch diese Veranschaulichung wird deutlich, dass selbst kleine Undichtigkeiten einen großen Einfluss auf die Energieeffizienz eines Druckluftsystems besitzen.

Abb. 2-1 beinhaltet eine Zusammenstellung publizierter Leckageströme von Leckagen mit kreisrunder Geometrie bei einem Leckagedruck von 7 bar_ü. Bei zwei der Publikationen handelt es sich um wissenschaftliche Publikationen (Dudić et al. 2012a; Dudić et al. 2012b), welche im nachfolgenden Kapitel detaillierter untersucht werden. Bei den verbleibenden drei Publikationen (Festo 2014; Eco Fair 2016; Norgren 2011), handelt es sich um Veröffentlichungen von Herstellern oder Leitfäden zur Energieeffizienz von Beratungsfirmen.

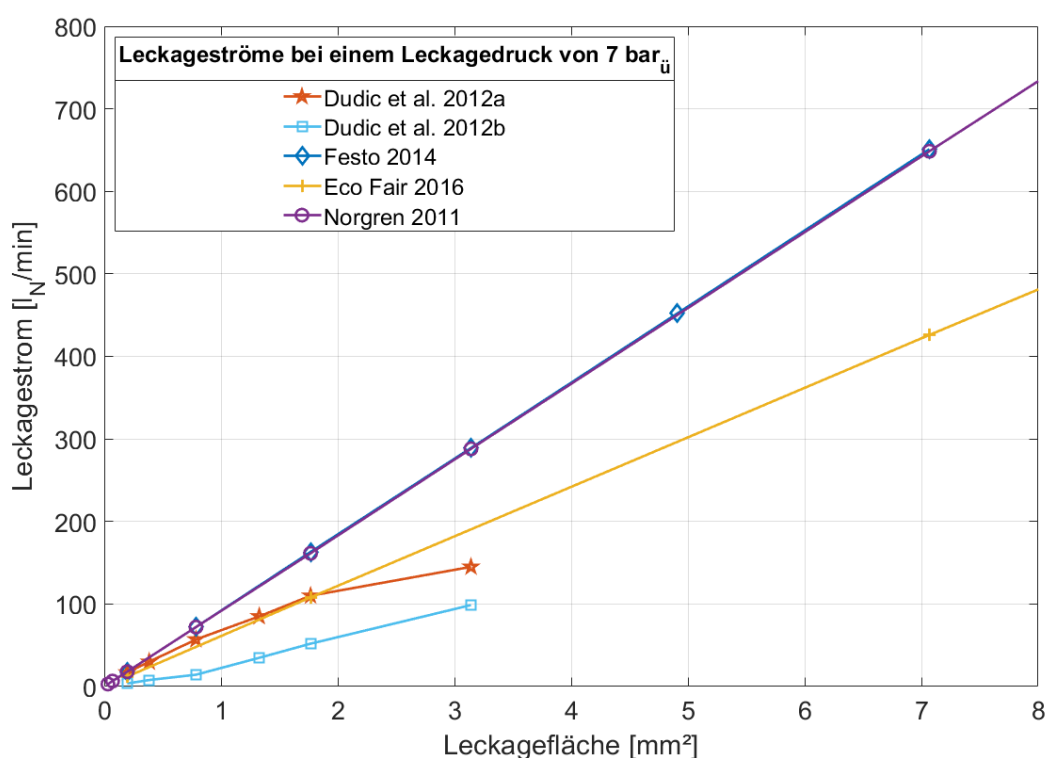


Abb. 2-1: Zusammenstellung von veröffentlichten Leckageströme mit kreisrunder Leckagegeometrie bei einem Leckagedruck von 7 bar_ü

Die graphische Auswertung der publizierten Leckageströme zeigt, dass große Abweichungen in den Werten existieren. Im maximalen Fall weichen die Leckageströme um den Faktor

3,5 voneinander ab. Bei den Messwerten von (Dudić et al. 2012b) handelt es sich um Leckagen an Kunststoffschläuchen, welche durch Bohrungen hergestellt wurden. Werden diese Messwerte ausgeschlossen, so sinkt die maximale Abweichung auf den Faktor 1,5. Selbst in dieser Darstellung ist die Abweichung der angegebenen Leckageströme groß; Zusätzlich fällt auf, dass einige angegebenen Leckageströme nahezu identisch mit denen aus anderer Quelle sind.

Die nichtwissenschaftlichen Publikationen führen oftmals keine Erklärung zur Methodik der Bestimmung des Leckagestroms auf. Somit ist nicht ersichtlich, ob es sich um reale Messwerte oder um Berechnungen handelt. Auf Grund von fehlenden Schwankungen in den Messwerten kann vermutet werden, dass es sich um berechnete Werte handelt. Bei den wissenschaftlichen Publikationen handelt es sich um experimentell ermittelte Messwerte. Hier lassen sich jedoch große Abweichungen in den publizierten Leckageströmen erkennen, was die Notwendigkeit einer grundlegenden Aufarbeitung des Themas unterstreicht.

2.3.3 Experimentelle Arbeiten

Die Erforschung von Druckluftleckagen ist ein Nischenthema. Es existieren nur wenige wissenschaftliche Publikationen, welche sich mit diesem Thema beschäftigen. Häufiger ist die kurze Abhandlung von Druckluftleckagen in Publikationen zur Energieeffizienz von Druckluftsystemen.⁷ In diesem Kapitel werden relevante, experimentelle Arbeiten vorgestellt, welche sich in zwei Kategorien aufteilen lassen: Publikationen mit dem Schwerpunkt der Leckagelokalisation und Publikationen mit dem Schwerpunkt der Leckagequantifizierung.

Leckagelokalisation

Die Lokalisation von Leckagen ist nicht nur im Druckluftbereich, sondern, wie bereits in Kapitel 2.3.1 gezeigt auch für technische Gase von besonderem Interesse. Es existieren Veröffentlichungen zur experimentellen Betrachtung von Leckagen technischer Gase (z.B. Erdgas, Wasserstoff, ...), bei denen Experimente aus Sicherheitsgründen mit Druckluft durchgeführt wurden. In den Jahren 2009 bis 2013 wurde das Forschungsprojekt RoboGas^{Inspector} (Bonow et al. 2013; Baetz et al. 2010; Baetz et al. 2009) an der Universität Kassel durchgeführt. Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung eines innovativen Mensch-Maschine-Systems, das in der Lage ist, mittels Gasfernmesstechnik (z.B. Ultraschall oder Thermographie) Leckagestellen zu lokalisieren. Die Ortung soll hierbei durch weitgehend autonome Roboter erfolgen.

Fokus der Publikationen aus dem Projekt ist die Leckagelokalisation und deren Umsetzung auf autonome Robotersysteme. Auf die untersuchten Druckluftleckagen und deren Leckageströme wurde nicht explizit eingegangen, da dies nicht Teil der Zielstellung des Projekts war.

⁷ Beispiele für Publikationen, in denen die Beseitigung von Druckluftleckagen als Energieeffizienzmaßnahme vorgestellt wird, sind: (Seslija et al. 2011; Qin et al. 2007; McKane et al. 2010; EnEffAH 2012).

Versuche zur Quantifizierung der Leckagen erfolgten aus demselben Grund nicht. Die Publikationen beschäftigen sich vorwiegend mit der Entwicklung der Algorithmen für die automatisierte Erfassung, es konnte jedoch gezeigt werden, dass sich sowohl Thermographie als auch Ultraschall als Verfahren eignen, Leckagestellen in freiliegenden Rohrleitungen zu lokalisieren (Bonow et al. 2013).

In den letzten Jahren schreitet die Entwicklung von Schallkamas voran. Bei Schallkamas handelt es sich um akustische Messsysteme, bestehend aus einer Vielzahl von Mikrofonen. Über spezielle Algorithmen kann ein Messbild erzeugt werden, das dem einer Thermographieaufnahme ähnelt, jedoch die Schallintensitäten darstellt. Es gibt Versuche, diese Technologie für den Bereich der Lokalisation von Druckluftleckagen zu nutzen. Der Großteil der Forschung und Anpassung für diese besondere Anwendung findet in Unternehmen statt, weshalb, abgesehen von Weiterentwicklungen in den Algorithmen, nur wenig Publikationen existieren. Dies gilt insbesondere für die Anwendung dieser Technologie im Bereich der Druckluftleckagen.

Eine Ausnahme bildet die Veröffentlichung von Eret & Meskell aus dem Jahr 2012 (Eret et al. 2012b), welche die Lokalisation von Druckluftleckagen im industriellen Umfeld unter der Verwendung eines Mikrofonarrays untersucht. Die verwendete Messapparatur besteht dabei aus 25 Mikrofonen (20 Hz – 20 kHz), welche ringförmig in einer Ebene angeordnet sind. Die Leckagen werden über zwei offene Schlauchleitungen mit definiertem Durchmesser (4 mm) simuliert. Die Messung erfolgt in einem Abstand von 1 m. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2-2 dargestellt. Die Versuche finden in für die Industrie typischer Geräuschkulisse statt.

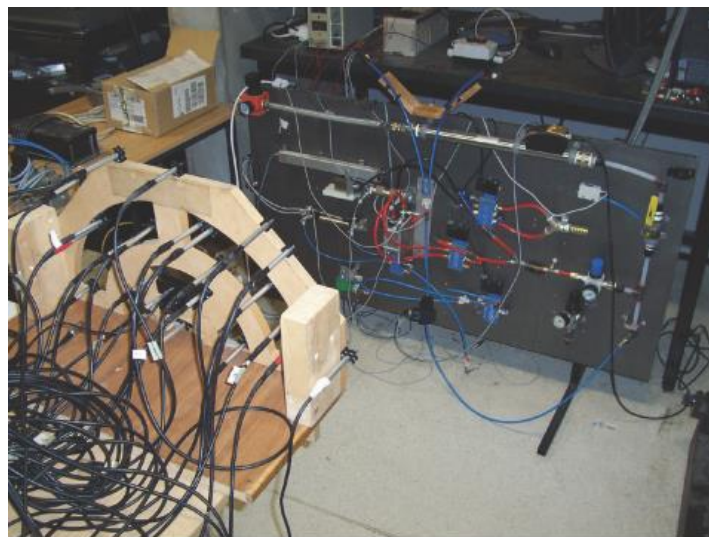


Abb. 2-2: Versuchsaufbau von Eret & Meskell zur Identifikation von Druckluftleckagen mittels Mikrofonarrays Quelle: (Eret et al. 2012b)

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe der Beamforming Methode⁸. Um die industrielle Geräuschkulisse herauszufiltern, wird ein Geräuschkulissenprofil der Umgebung ohne Leckagen erstellt und mit der tatsächlichen Messung verrechnet. (Eret et al. 2012b)

Das Ergebnis ist eine Schallkarte, wie sie in Abb. 2-3 dargestellt ist. Der maximale Schalldruck, welcher für die Darstellung als Basis (= 0 dB) herangezogen wird, wird durch rote Bereich gekennzeichnet. Die beiden Leckagestellen sind in der Abbildung durch weiße Kreise markiert. Der Bereich der Druckluftleckagen ist anhand der Färbung deutlich zu erkennen. Der Schalldruck nimmt mit zunehmendem Abstand von der Leckagestelle ab, was durch die atmosphärische Absorption des Schalls begründet ist.

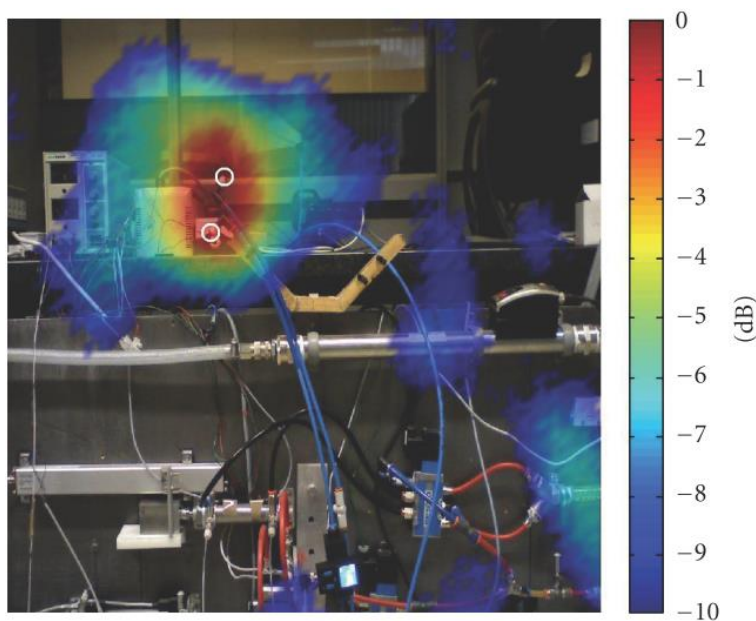


Abb. 2-3: Über Beamforming ermittelte Schallkarte von Druckluftleckagen Quelle: (Eret et al. 2012b)

Eret & Meskell können durch ihre Experimente zeigen, dass das verwendete Verfahren grundsätzlich dazu geeignet ist, Leckagen in Druckluftsystemen in industrieller Geräuschkulisse zu identifizieren. Die Autoren kommen jedoch zu dem Schluss, dass eine Quantifizierung der Leckagen nicht möglich ist, da die Geräuschbildung neben dem Durchfluss von vielen weiteren Faktoren abhängt. Als Faktoren werden Strömungsrichtung, Geometrie der Leckage und Umgebungseinflüsse wie z.B. Lage der Leckage aufgeführt. (Eret et al. 2012b)

⁸ Bei Beamforming handelt es sich um ein Messprinzip aus der Akustik zur Positionsbestimmung von Schallquellen. Hierzu werden die Mikrofone eines Mikrofonarrays mit leichtem zeitlichem Versatz ausgewertet und können über die Laufzeit des Schalls und die Schallgeschwindigkeit den jeweiligen Abstand ermitteln. (Möser 2010).

Leckagequantifizierung

Das Themenfeld der Leckagequantifizierung befasst sich mit der Erforschung der indirekten Quantifizierung von Druckluftleckagen. In diesem Teilgebiet existieren nur wenige Veröffentlichungen, welche nachfolgend bezüglich des Versuchsaufbaus, der Versuchsdurchführung, sowie den jeweiligen Ergebnissen vorgestellt werden. Die veröffentlichten Ergebnisse dieser Arbeiten dienen dem späteren Vergleich zu in dieser Arbeit erzeugten Messergebnissen und Erkenntnissen.

Eine Forschungsgruppe um Dudic von der Universität Novi Sad (Serbien) hat im Jahr 2012 zwei Paper veröffentlicht, die sich mit der indirekten Leckagequantifizierung befassen. Es handelt sich hierbei um experimentelle Arbeiten mit dem Ziel, die Eignung von Ultraschall (Dudić et al. 2012b) und Thermographie (Dudić et al. 2012a) für die Lokalisierung und Quantifizierung von Druckluftleckagen zu untersuchen.

Für die Arbeiten wurde ein experimenteller Versuchsaufbau verwendet, der nicht im Detail erläutert wird. Der Versuchsaufbau beinhaltet eine Messstation (Festo Air Box portable device), die laut den Autoren Druck, Temperatur und Durchfluss (thermisches Messprinzip) der Druckluft misst. Die Messgenauigkeit des Durchflussmessgeräts wird mit $\pm 3\%$ im Bereich von 10 – 200 l_N/min angegeben, wobei nicht ersichtlich ist, ob sich dieser Wert auf den Messwert oder den Endwert bezieht. Für die Versuche werden zwei unterschiedliche Prüfkörpertypen verwendet. Dies sind Bohrungen in Verschlusskappen von Rohrleitungen und Bohrungen in Polyurethan Schläuchen. Für beide Prüfkörpertypen werden sechs verschiedene Leckagedurchmesser von 0,5 bis 2 mm gefertigt. Neben dem Durchfluss wird mittels Thermographiekamera das Temperaturfeld und mittels Ultraschallmessgerät der Schalldruck (Frequenzbereich 36 – 44 kHz) im Bereich der Leckagestelle gemessen.

In Tabelle 2-1 sind die Messergebnisse des Leckagestroms in Abhängigkeit des Leckagedrucks und des Leckagedurchmessers bei den Schlauch-Prüfkörpern aufgeführt. Die Messreihe der Leckageströme bei einem Leckagedurchmesser von 1,5 mm ist potentiell fehlerhaft, da hier der Leckagestrom bei einer Druckerhöhung von 4 auf 5 bar_ü absinkt. Anhand der Messdaten kann auf eine Abhängigkeit des Leckagestroms vom Leckagedruck und des Leckagedurchmessers geschlossen werden. Die gemessenen Werte weichen, wie bereits in Kapitel 2.3.2 gezeigt (vgl. Abb. 2-1, Seite 13), deutlich von anderen in der Literatur zu findenden Werten ab. Hierfür gibt es diverse mögliche Gründe, am wahrscheinlichsten ist eine fehlende Qualitätskontrolle der gefertigten Prüfkörper. Bei der Fertigung der Leckagestellen durch Bohrung, kann sich zum einen durch ein anschließendes Zusammenziehen des Kunststoffes, zum anderen durch nur teilweisen Materialabtrag, der Leckagedurchmesser verkleinern. Die deutlich höheren Leckagedurchflüsse die Dudic bei Auswertung der Prüfkörper mit Bohrungen durch metallische Verschlusskappen feststellt, unterstützen diese These.

Eine Bewertung von Einflussfaktoren auf den Leckagestrom ist nicht Teil der Publikationen. Ebenso fehlen Angaben zur Systemtemperatur, Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur, sowie Feuchtegehalt der Druckluft. Zudem fehlt eine Angabe zur verwendeten Normdichte des Volumenstroms.

Tabelle 2-1: Leckagestrom in Abhängigkeit des Leckagedrucks und des Leckagedurchmessers der Schlauch-Prüfkörper Quelle: (Dudić et al. 2012b)

Leckage- druck [bar _ü]	Leckagedurchmesser [mm]					
	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	2,0
	Leckagedurchfluss [l_N/min]					
4	2,1	4,3	8,4	18,7	39,9	58,6
5	2,6	5,3	10,7	23,3	37,0	71,0
6	3,2	6,5	12,3	29,0	45,1	84,0
7	3,7	7,9	14,3	34,8	51,9	98,7
8	4,2	8,8	15,6	40,0	56,2	101,0

Bezüglich der indirekten Leckagemessverfahren kommen Dudić et al. in beiden Publikationen zum Schluss, dass beide Verfahren (Ultraschall und Thermographie) zur Lokalisierung von Druckluftleckagen geeignet sind. (Dudić et al. 2012a; Dudić et al. 2012b)

Um die Möglichkeit einer Quantifizierung von Druckluftleckagen mittels Ultraschall zu überprüfen, wird der Schalldruckpegel bei einem Winkel von 30 ° zur Leckage gemessen. Der Messabstand von Leckagestelle zum Mikrofon wird in der Veröffentlichung nicht aufgeführt. Als Messgerät dient das Gerät Ultraprobe 100, welches einen Frequenzbereich von 36 bis 44 kHz abdeckt. Die Auswertung der Ultraschallmessung zeigt, dass das Verfahren nur bedingt zur Quantifizierung geeignet ist. Ab einem Leckagedurchmesser von circa 1,3 mm wird die Korrelation aus Schalldruck und Leckagemenge schwächer und verschwindet ab einem Leckagedurchmesser von 2,0 mm gänzlich (vgl. Tabelle 2-2). Bei kleinen Leckagedurchmessern, wie z.B. 0,5 mm, kann jedoch ein deutlicher Trend des Schalldrucks in Abhängigkeit des Leckagedrucks und damit auch des Durchflusses festgestellt werden (vgl. Tabelle 2-2).

Ein Vergleich von Tabelle 2-1 mit Tabelle 2-2 zeigt, dass bei vergleichbaren Durchflussmengen teilweise unterschiedliche Schalldrücke erreicht werden können. Besonders deutlich ist dies bei einem Leckagedurchmesser von 0,5 mm und einem Systemdruck von 8 bar_ü zu sehen. Der gemessene Schalldruck liegt bei 72 dB, der gemessene Leckagestrom beträgt 4,2 l_N/min. Ein vergleichbarer Leckagestrom von 4,3 l_N/min wird bei einem Leckagedurchmesser von 0,7 mm und einem Systemdruck von 4 bar_ü gemessen. Der hierzu gemessene Schalldruck liegt bei 66 dB.

Tabelle 2-2: Schalldruck in Abhängigkeit des Leckagedrucks und des Leckagedurchmessers der PUN Prüfkörper. Quelle: (Dudić et al. 2012b)

Leckage- druck [bar _ü]	Leckagedurchmesser [mm]					
	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	2,0
Schalldruck [dB]						
4	60	66	71	73	74	75
5	63	68	72	73	74	75
6	66	69	72	73	74	75
7	69	71	73	74	74	75
8	72	73	74	74	75	75

Die Autoren schlussfolgern aus den Ergebnissen, dass die Ultraschallmessung sich nur bei kleinen Leckagedurchmessern zur Quantifizierung von Druckluftleckagen eignet. Die Autoren machen keine Angaben zum Messbereich des Ultraschallmikrofons, die Schwelle bei 75 dB könnte auch hierin begründet sein.

Eine kurze Abhandlung zur Quantifizierung von Druckluftleckagen wurde von Holstein et al. 2016 veröffentlicht. Hierbei handelt es sich um eine Publikation eines Herstellers von Ultraschallmikrofonen zur Leckagedetektion (Holstein et al. 2016). In der Publikation wird darauf eingegangen, dass Druckluftleckagen Ultraschallsignale in einem breiten Frequenzband senden und vorgeschlagen, bei der Bewertung von Ultraschallsignalen das gesamte Frequenzspektrum einzubeziehen. Ein Algorithmus hierzu wird jedoch nur oberflächlich angerissen, so dass keine neuen Erkenntnisse daraus gezogen werden können. Die Veröffentlichung zeigt zudem typische Spektren von Druckluftleckagen und die Winkelabhängigkeit des Ultraschallsignals.

Im Jahr 2008 veröffentlichte Wolstencroft eine Masterthesis über die indirekte Leckagebewertung mittels Ultraschall (Wolstencroft 2008). Im Rahmen der Arbeit wurde ein Prüfstand aufgebaut, Leckageprüfkörper hergestellt und vermessen. Die Untersuchungen sind deutlich detaillierter, als die von Dudić et al. und umfassen sowohl kreisrunde, als auch rechteckige Leckagegeometrien.

Der Prüfstands Aufbau ist sehr einfach gehalten und besteht aus einem Druckluftspeicher mit 100 l Volumen, welcher an ein Druckluftversorgungsnetz angeschlossen ist. Von diesem Speicher fließt die Druckluft über ein manuelles Regelventil zur Einstellung des Leckagedrucks. Im Anschluss folgt die Volumenstrommessung mit einem Wirkdruckmessgerät (Messgenauigkeit: $\pm 2.5\%$ v.M.) bzw. manuell abzulesenden Schwebekörpermessgeräten für kleine

Volumenströme. Die Druckmessung des Leckagedrucks erfolgt nahe der Leckagestelle. Die Messung des Ultraschalls erfolgt mit einem Ultraschallmikrofon des Herstellers UE Systems (Typ: Ultraprobe 9000), welches auf eine Frequenz von 40 kHz eingestellt ist. Der Schalldruck wird manuell am Gerät abgelesen, für die Messung wird das Gerät manuell in Winkel und Abstand ausgerichtet.

Als „Nebenprodukt“ der Untersuchungen zur Quantifizierung sind Leckageströme für einige kreisrunde bzw. rechteckige Leckagen veröffentlicht. Abb. 2-4 zeigt die veröffentlichten Messwerte der betrachteten kreisrunden Leckagen, der variierende Leckagedruck liegt in der manuellen Regelung des Prüfstands begründet. Abb. 2-5 zeigt die veröffentlichten Messwerte der betrachteten rechteckigen Leckagen. Der Autor gibt die Leckageströme in Betriebsvolumenströmen an. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, sind die dargestellten Werte auf Basis der DIN ISO 2533 in Normvolumenströme umgerechnet (DIN 2533). Exemplarisch sind die von Wolstencroft angegebenen Betriebsvolumenströme in Tabelle 2-3, sowie die umgerechneten Normvolumenströme für die betrachteten kreisrunden Leckagen aufgeführt.

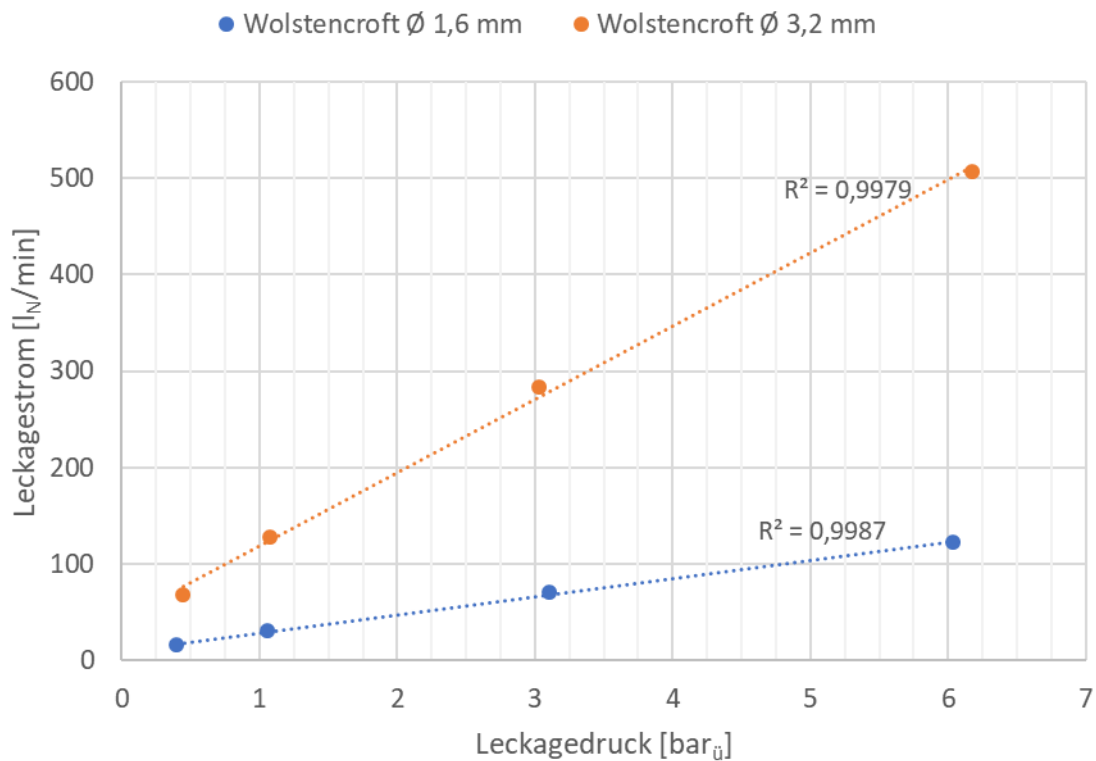


Abb. 2-4: Leckageströme von kreisrunden Leckagen. Eigene Darstellung, basierend auf (Wolstencroft 2008)

Tabelle 2-3: Messwerte von Leckageströmen kreisrunder Leckagen von (Wolstencroft 2008), inkl. Umrechnung der Betriebsvolumenströme in einen Normvolumenstrom nach DIN 2533

	Leckagedurchmesser [mm]			
	1,6		3,2	
	Betriebsvolumenstrom [l/min]		Leckagestrom (normiert) [l_N/min]	
0,40	11,81		16,04	
0,45		48,21		67,60
1,06	15,23		30,38	
1,08		63,78		128,56
3,02		72,60		283,53
3,10	17,75		70,66	
6,03	17,93		122,39	
6,17		72,75		506,41

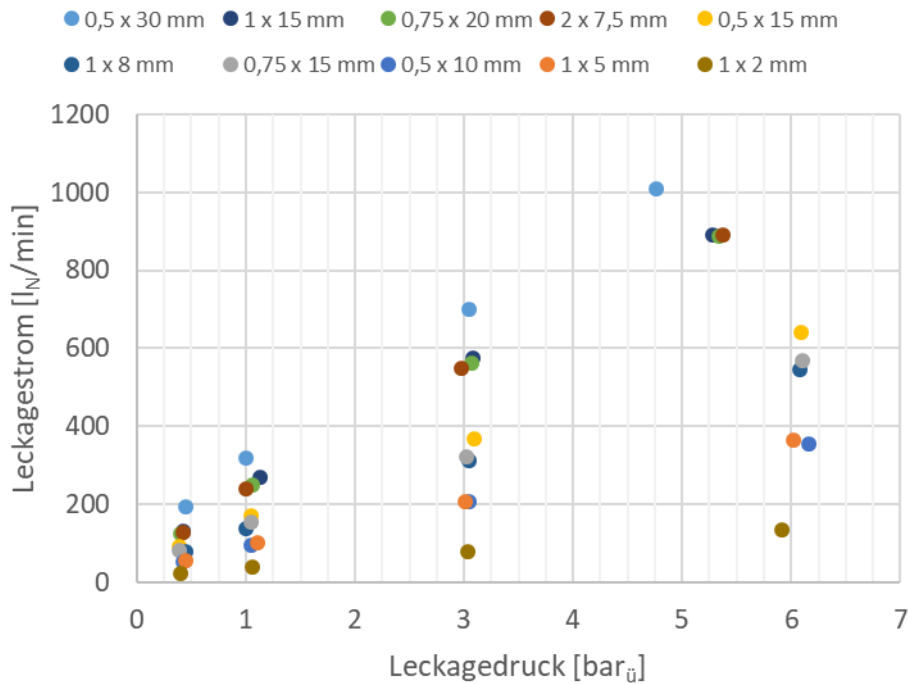


Abb. 2-5: Leckageströme von rechteckigen Leckagen. Eigene Darstellung, basierend auf (Wolstencroft 2008)

Der Fokus der Masterthesis von Wolstencroft liegt auf der Messung von Ultraschallsignalen verschiedener idealer Leckagen (Wolstencroft 2008). So wurde beispielsweise die Richtungsabhängigkeit des Schalldruckpegels von Leckagen untersucht, die Ergebnisse sind in Abb. 2-6 dargestellt. Es ist ein lokales Minimum des Schalldruckpegels bei 0° , sowie jeweils ein Maximum bei $\pm 30^\circ$ sichtbar. Zudem lässt sich erkennen, dass der Schallpegel mit steigendem Leckagedruck und damit verbundenem steigenden Leckagestrom ebenfalls ansteigt. Im gezeigten Beispiel verliert dieser Zusammenhang ab einem Leckagedruck von 2,5 bar_ü an Gewicht.

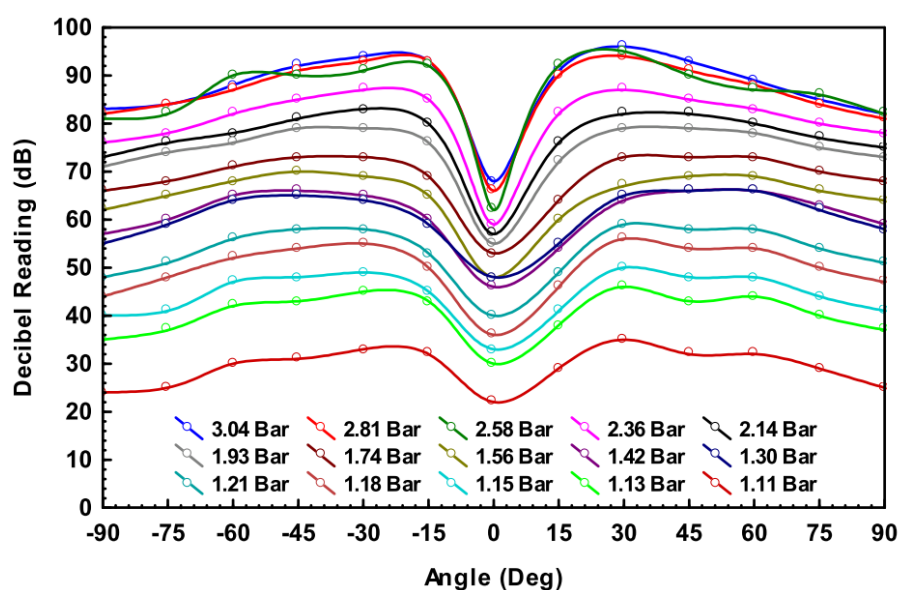


Abb. 2-6: Richtungsabhängigkeit des Schalldruckpegels bei einem Abstand von 30 cm.

Quelle: (Wolstencroft 2008) Prüfkörper: offener Schlauch der Länge 2,5 m und einem Innendurchmesser von 4 mm

Neben der Richtungsabhängigkeit wird auch die Abhängigkeit des Schalldrucks vom Messabstand ermittelt und eine Abnahme des Schalldruckpegels mit steigendem Abstand festgestellt. Zusätzlich untersucht der Autor die Abhängigkeit des Schallpegels von der Leckagegeometrie, indem die Schalldruckpegel von kreisrunden und rechteckigen Leckagen verschiedener Größen miteinander verglichen werden. Der Autor kommt zum Schluss, dass die Leckagegeometrie keinen nennenswerten Einfluss auf den Schallpegel hat, sondern die Fläche den entscheidenden Faktor darstellt. In der Arbeit wird eine Korrelation von Schalldruck und Leckagestrom angenommen, jedoch nicht im Detail untersucht. Fokus der Arbeit ist die Beschreibung der Einflussfaktoren auf den Schalldruck. Eine Grenze des Verfahrens, wie von Dudic et al. (Dudić et al. 2012b) gezeigt, wird nicht festgestellt. Die meisten der untersuchten Prüfkörper haben größere Leckageflächen, als bei Dudic et al. und weisen somit größere Leckageströme auf.

2.3.4 Limitierung der bisherigen Arbeiten

Im vorherigen Kapitel sind die relevantesten, experimentellen Publikationen im Bereich Druckluftleckagen im Detail vorgestellt. Tabelle 2-4 fasst den Betrachtungshorizont der jeweiligen Arbeiten zusammen, zeigt die daraus resultierenden Limitierungen und Lücken auf und deutet an, wie diese durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden. Das Ergebnis der Literaturrecherche fließt somit in die Entwicklung des Prüfstands, sowie in die Planung der durchzuführenden Messungen ein.

Die Analyse der Literatur erfolgt in den folgenden drei Kategorien:

- Umfang der Leckagebetrachtung
- Einflussfaktoren
- Indirekte Leckagebestimmung

Tabelle 2-4: Betrachtungshorizont relevanter Publikationen im Bereich Druckluftleckagen

Kriterien		(Wolstencroft 2008)	(Bonow et al. 2013)	(Dudić et al. 2012a; Dudić et al. 2012b)	(Eret et al. 2012b)	(Holstein et al. 2016)	Diese Arbeit
Umfang Leckagebetrachtung	Berechnungsgrundlagen	G	N	N	N	G	U
	Leckageströme ermittelt	V	N	V	N	G	U
	Ideale Leckagen	V	G	V	V	V	U
	Reale Leckagen	N	G	N	N	N	U
	Automatisierte Messabläufe	N	V	N	N	N	U
Einflussfaktoren	Druck	V	N	V	V	V	U
	Fläche	U	N	V	N	N	U
	Temperatur	N	N	N	N	N	V
	Geometrie	V	N	N	N	N	V
	Druckluftqualität	N	N	N	N	N	V
Indirekte Leckagebestimmung	Lokalisation mittels Ultraschall	V	V	G	U	V	V
	Quantifizierung mittels Ultraschall	V	N	V	N	V	U
Legende	N: Nicht betrachtet						
	G: Nur in geringem Maße betrachtet						
	V: Betrachtung vorhanden						
	U: Umfangreiche Betrachtung vorhanden						

Limitierungen in der Kategorie „Umfang Leckagebetrachtung“

Die vorgestellten Arbeiten unterscheiden sich stark, sowohl im Umfang, als auch in der Qualität der Umsetzung der Leckagebetrachtung. Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung des theoretischen Leckagestroms werden nur von (Wolstencroft 2008) und (Holstein et al. 2016) angerissen. Die Publikationen von (Bonow et al. 2013) und (Eret et al. 2012b) weisen auf Grund des Fokus auf die Ultraschalldetektion keine Leckageströme für die Prüfobjekte aus. Die meisten Publikationen beschäftigen sich mit idealen Leckagen als Prüfkörper, zu realen Leckagen sind praktisch keine Ergebnisse veröffentlicht. Nur die Forschung von (Bonow et al. 2013) verwendet automatisierte Messabläufe, welche sich jedoch in diesem konkreten Fall auf die Ultraschallmessung beziehen.

Alle hier genannten Veröffentlichungen haben gemeinsam, dass keine Angaben zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse des Leckagestroms gelistet sind. Ebenso fehlt eine Erläuterung der Zusammensetzung der Ergebnisse. Hier ist nicht eindeutig, ob es sich um Einzelmessungen oder Mittlungen über einen gewissen Zeitraum handelt. Besonders die Ergebnisse von (Dudić et al. 2012b; Dudić et al. 2012a) sprechen für Fehler in der Durchführung. Die Messgenauigkeit der eingesetzten Volumenstrommessgeräte ist nur bei Dudic und Wolstencroft bekannt und fällt eher gering aus. Die Abweichungen der publizierten Werte der betrachteten Publikationen sind um ein Vielfaches größer, als die zulässige Toleranz der eingesetzten Messgeräte. Anhand der Literatur lässt sich ein eindeutiger Mangel an reproduzierbaren Messungen an Druckluftleckagen feststellen. Der Betrachtungshorizont ist durch die Fokussierung der Literatur auf ideale Leckagen eingeschränkt und sollte erweitert werden.

Limitierungen in der Kategorie „Einflussfaktoren“

Im Bereich der Wirkung von Einflussfaktoren auf Druckluftleckagen ist die Limitierung der bestehenden Literatur besonders deutlich. Während der Einflussfaktor Leckagedruck noch von nahezu allen Publikationen betrachtet wird, werden Leckagefläche und Leckagegeometrie nur noch von zwei bzw. einer Publikation analysiert. Der Einfluss von Leckagetemperatur und Druckluftqualität auf den Leckagestrom ist unerforscht.

Limitierungen in der Kategorie „Indirekte Leckagebestimmung“

Die Lokalisierung von Druckluftleckagen mittels Ultraschall ist seit vielen Jahren in der Praxis im Einsatz. Die Forschung geht hier vor allem in die Richtung der detaillierteren Lokalisierung durch Mikrofonarrays und automatisierten Systemen. Hieraus ergeben sich keine für diese Arbeit relevanten Limitierungen.

In der Quantifizierung von Druckluftleckagen mittels Ultraschall hingegen, sind einige Limitierungen vorhanden. Die Publikationen von Dudic et al. und Wolstencroft haben prinzipiell gegensätzliche Aussagen zur Anwendbarkeit dieser Technologie. Beide Publikationen schränkt ein, dass ausschließlich der Schalldruck im maximalen Punkt für die Bewertung herangezogen wird. Holstein et al. schlägt vor, das Frequenzspektrum von 20 – 100 kHz in die Bewertung mit einfließen zu lassen, gibt jedoch keine konkreten Vorschläge zur Umsetzung. Da es sich um ein neuartiges Verfahren handelt, mangelt es zu diesem Thema vor allem an einer großen Anzahl an reproduzierbaren Messergebnissen an unterschiedlichsten Prüfkörpern. Anhand dieser Messergebnisse können im Nachgang verschiedene Bewertungsmethoden entwickelt und überprüft werden.

3. Theoretische Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit dargelegt. In Anlehnung an die thematische Ausrichtung der Arbeit sind die theoretischen Grundlagen in ein Kapitel zu Druckluftleckagen und eines zur Ultraschallakustik aufgeteilt.

3.1 Druckluftleckagen

Dieses Kapitel erläutert die theoretischen Grundlagen von Druckluftleckagen, welche in direktem Bezug zu dieser Arbeit stehen. Hierfür werden in Kapitel 3.1.1 die Berechnungsgrundlagen der Ausströmung von Druckluft aus einer Leckagestelle behandelt. Es folgen Sensitivitätsanalysen der Gleichungen in Kapitel 3.1.2, sowie eine Einführung in den Discharge Coefficient in Kapitel 3.1.3. Kapitel 3.1.4 erläutert die Umsetzung der Gleichungen in ein Berechnungsmodell in Matlab, sowie die Erweiterung der Berechnungen um einen flexiblen Wassergehalt der Druckluft.

3.1.1 Berechnungsgrundlagen⁹

Anhand thermodynamischer und strömungsmechanischer Beziehungen, lässt sich der Leckagestrom einer Leckagestelle näherungsweise berechnen. Die allgemeinen, hierzu benötigten Gleichungen, sind in Lehrbüchern zur Strömungsmechanik aufgeführt. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf das Lehrbuch „Technische Fluidmechanik“ (Sigloch 2017), S. 379ff. Für die Berechnungen wird Druckluft als ideales Gas angenommen, eine Bewertung und Einschätzung hierzu erfolgt am Ende dieses Kapitels.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wird der Leckagestrom (\dot{V}_{Lck}) als Normvolumenstrom angegeben. Hierzu muss der Massenstrom (\dot{m}_{Lck}), der durch die Leckagestelle austretenden Luft, auf eine Normdichte (ρ_{norm}) bezogen werden (vgl. Gl. 3-1). In dieser Arbeit wird die Normdichte nach ISO 2533 verwendet. Diese hat den Wert 1,225 kg/m³ bei einer geometrischen Höhe von 0 m, einem Umgebungsdruck von 1013 mbar und einer Umgebungstemperatur von 15 °C (DIN 2533).

$$\dot{V}_{Lck} = \frac{\dot{m}_{Lck}}{\rho_{norm}} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Die Berechnung des Leckagemassenstroms erfolgt über das Produkt aus der Austrittsfläche der Leckage (A_{Lck}), der Dichte der Druckluft (ρ_{Aus}) im Austrittsquerschnitt und der Strömungsgeschwindigkeit (c) im Austrittsquerschnitt (vgl. Gl. 3-2).

⁹ Auszüge aus den Berechnungsgrundlagen wurden bereits in (Unger et al. 2021) veröffentlicht.

$$\dot{m}_{Lck} = \rho_{Aus} A_{Lck} c \quad \text{Gl. 3-2}$$

Wie in vorangegangenen Kapiteln gezeigt, bezieht sich ein Großteil der Literatur auf Leckagen mit kreisrundem Querschnitt. Für das Beispiel einer Leckage mit kreisrunder Geometrie, ist die resultierende Austrittsfläche gleich der Kreisfläche der Leckage (vgl. Gl. 3-3).

$$A_{Lck} = \frac{d^2 \pi}{4} \quad \text{Gl. 3-3}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit im Leckagequerschnitt kann mit Hilfe von Gl. 3-4 ermittelt werden. Sie ist abhängig von der spezifischen idealen Gaskonstante der Druckluft (R_{Luft}), dem Isentropenexponent (κ), dem Druckverhältnis aus Druck im Austrittsquerschnitt der Leckage (p_{Aus}) und dem Druck der an der Eintrittsseite der Leckage ansteht (p_{Lck}), sowie der Temperatur der Druckluft an der Eintrittsseite der Leckage (T_{Lck}). Eine ausführliche Herleitung dieser Gleichung ist im Anhang A-1 aufgeführt.

$$c = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} R_{Luft} T_{Lck} \left(1 - \left(\frac{p_{Aus}}{p_{Lck}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)} \quad \text{Gl. 3-4}$$

Das in Gl. 3-4 aufgeführte Produkt aus T_{Lck} und dem nachfolgenden geklammerten Term, entspricht der Temperaturdifferenz aus T_{Lck} und der Temperatur der Druckluft im Austrittsquerschnitt (T_{Aus}). Dies wird anhand von Gl. 3-5 deutlich, welche die Berechnung von T_{Aus} beschreibt. Die Austrittstemperatur der Luft steht im direkten Zusammenhang mit dem Druckverhältnis von p_{Aus} zu p_{Lck} und der Drucklufttemperatur im System.

$$T_{Aus} = T_{Lck} \left(\frac{p_{Aus}}{p_{Lck}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \text{Gl. 3-5}$$

Für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit und der Drucklufttemperatur im Austrittsquerschnitt wird der an dieser Stelle zugehörige Druck (p_{Aus}) benötigt. Der Druck ist gleich dem sogenannten kritischen Druck ($p_{krit.}$). Der kritische Druck stellt den minimalen physikalischen Druck dar, auf den die aus einer Leckagestelle austretende Druckluft entspannt werden kann. Wie in Gl. 3-6 ersichtlich, ist der kritische Druck lediglich vom Isentropenexponenten, sowie dem Leckagedruck abhängig (Sigloch 2017) S.383.

$$p_{Aus} = p_{krit.} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} p_{Lck} \quad , \text{ aber: } p_{Aus} \geq p_U \quad \text{Gl. 3-6}$$

Die Begrenzung des Austrittsdrucks auf den kritischen Druck, ist zentral für das Verständnis der Theorie von Druckluftleckagen. Der kritische Druck stellt sich als Folge des Erreichens der Schallgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt ein. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und ein damit verbundener geringerer Austrittsdruck, kann nur mit Hilfe einer Lavaldüsengeometrie erreicht werden. Bei kleinen Leckagedrücken ist der nach Gl. 3-6 berechnete kritische Druck kleiner dem Umgebungsdruck. In diesem Fall entspricht der Austrittsdruck dem Umgebungsdruck (p_U), da die Ausbildung eines Vakuums unphysikalisch ist. Die resultierende Austrittsgeschwindigkeit ist folglich kleiner als die Schallgeschwindigkeit.

Das Verhältnis von kritischem Druck zu Leckagedruck, wird kritisches Druckverhältnis genannt und ist, wenn man die Definition des kritischen Drucks betrachtet (vgl. Gl. 3-6), konstant bei 0,5283.¹⁰ Dieser Zusammenhang ist gültig, sofern der kritische Druck größer oder gleich dem Umgebungsdruck (p_U) ist. Bei einem Umgebungsdruck von 1 bar_a ist dies bereits ab einem Leckagedruck von circa 0,9 bar_i der Fall und trifft somit bei industriellen Druckluftsystemen stets zu.

Durch die Einführung des kritischen Druckverhältnisses wird deutlich, dass sowohl die Strömungsgeschwindigkeit, als auch die Austrittstemperatur der Druckluft konstant und unabhängig vom Leckagedruck sind. Sofern der Austrittsdruck dem kritischen Druck entspricht, kann die Berechnung der Austrittsgeschwindigkeit auch über die Berechnung der Schallgeschwindigkeit nach Gl. 3-7 erfolgen. Die Herleitung hierzu ist im Anhang A-2 aufgeführt.

$$c = \sqrt{\kappa R_{Luft} T_{Aus}} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Für die Berechnung des Leckagemassenstroms (vgl. Gl. 3-2) wird die Dichte der Druckluft im Austrittsquerschnitt benötigt. Diese lässt sich mit Hilfe der idealen Gasgleichung bestimmen (vgl. Gl. 3-8). Hierzu werden die bereits ermittelten Parameter Austrittstemperatur, Austrittsdruck und die spezifische ideale Gaskonstante der Luft benötigt.

$$\rho_{Aus} = \frac{p_{Aus}}{T_{Aus} R_{Luft}} \quad \text{Gl. 3-8}$$

Schlussfolgerungen anhand der Berechnungen

Anhand der hier dargestellten Gleichungen, lassen sich direkte Einflussfaktoren auf den Leckagestrom identifizieren und deren Einfluss quantifizieren. Die Einflussfaktoren sind: Die Leckagefläche (A_{Lck}), der Leckagedruck (p_{Lck}) und die Temperatur der Druckluft vor dem

¹⁰ Das Verhältnis ist vom Isentropenexponent abhängig, der hier gezeigte Wert entspricht einem Isentropenexponenten von 1,4 (trockene Luft, 20°C)

Eintritt in die Leckage (T_{Lck}). Die Leckagefläche wirkt sich linear auf den Leckagestrom aus, je größer die Leckagefläche, desto höher der resultierende Leckagestrom.

Unter Annahme eines konstanten Umgebungsdrucks ist die Höhe des Leckagestroms, auf Grund der erläuterten physikalischen Zusammenhänge nicht vom Druckverhältnis, sondern von der Höhe des Leckagedrucks abhängig. Der Einfluss ist ebenfalls linear, gilt jedoch nur für Leckagedrücke, bei denen der kritische Druck den Umgebungsdruck überschreitet. Der Anstieg des Leckagestroms mit steigenden Drücken beruht nicht auf einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, sondern allein auf der Erhöhung der Dichte der Druckluft im Austrittsquerschnitt.

Die Drucklufttemperatur wirkt sich ebenfalls auf den Leckagestrom aus, jedoch anders als die beiden anderen vorgestellten Einflussfaktoren, an zwei verschiedenen Stellen in der Berechnung. Zum einen führt eine höhere Drucklufttemperatur zu höheren Temperaturen im Austrittsquerschnitt, was die erreichbare Strömungsgeschwindigkeit und somit der Leckagestrom erhöht (vgl. Gl. 3-5 & Gl. 3-7). Gleichzeitig führt die Temperaturerhöhung jedoch zu einer Absenkung der Dichte der Druckluft im Austrittsquerschnitt, was den Leckagestrom erniedrigt (vgl. Gl. 3-8). Der Effekt der Dichteänderung ist linear, weshalb er stärker als die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit mit der Potenz $\frac{1}{2}$ wirkt. Folglich sinkt der Leckagestrom bei steigender Drucklufttemperatur. Der Einfluss ist jedoch deutlich schwächer ausgeprägt, als die der beiden anderen Einflussfaktoren.

Die (kinematische) Viskosität spielt für die Betrachtung nur eine untergeordnete Rolle, da die Viskosität von Gasen im hier relevanten Druckbereich von 0 bis 10 bar_i näherungsweise konstant ist. Erst bei hohen Drücken kommt es durch die Verringerung der freien Weglänge der Gasmoleküle zu einer Änderung der Viskosität.

Betrachtung der Druckluft als ideales Gas

Für die oben gezeigten Berechnungen wird die Druckluft als ideales Gas angenommen. Für ein ideales Gas gelten folgende Rahmenbedingungen (Baehr et al. 2012), S. 41:

- Alle Gasmoleküle werden als Massepunkte angenommen
- Die Gasmoleküle besitzen kein Volumen
- Es findet keine Wechselwirkung der Gasmoleküle untereinander statt
- Es treten ausschließlich elastische Stöße auf

In der Realität existiert kein ideales Gas, da es beispielsweise stets zu Wechselwirkungen der Gasmoleküle untereinander kommt, z.B. in Form von Van-der-Waals oder Dipol-Dipol Wechselwirkungen. Dennoch verhalten sich Gase, bei im Vergleich zu Ihrem Siedepunkt, hohen Temperaturen, sowie geringen Drücken, annähernd wie ideale Gase. Ein niedriger Druck verringert die spezifische Teilchendichte und damit auch die Wahrscheinlichkeit von auftretenden Wechselwirkungen.

Trockene Luft besteht zu 99 % aus den beiden Hauptkomponenten Stickstoff und Sauerstoff, Argon macht mit etwas weniger als 1 % die drittgrößte Komponente aus. Argon ist ein Edelgas und besitzt auf Grund der Tatsache, dass es einatomig vorliegt, keinerlei Partialladungen. Stickstoff und Sauerstoff liegen jeweils zweiatomig vor, besitzen jedoch ebenfalls keine Partialladungen. Das Fehlen von Partialladungen bewirkt eine Abschwächung von Wechselwirkungen der Moleküle untereinander, trockene Luft kann deshalb als ideales Gas angenommen werden.

Thermodynamisch lässt sich die Abweichung eines Realgases vom idealen Verhalten über den Realgasfaktor (Z) beschreiben; dieser ist in Gl. 3-9 mathematisch beschrieben. Bei einem Realgasfaktor von 1 handelt es sich um ein ideales Gas. Abb. 3-1 dient zur Einschätzung der Realgasfaktoren von trockener Luft bei variierenden Drücken und Temperaturen und ist aus (Geller 2015) entnommen. Es wird deutlich, dass für den in der Drucklufttechnik relevanten Temperatur- und Druckbereich der Realgasfaktor bei nahezu 1 liegt und die oben gezeigten Berechnungen gültig sind.

$$Z = \frac{p v}{R_{Luft} T} \quad \text{Gl. 3-9}$$

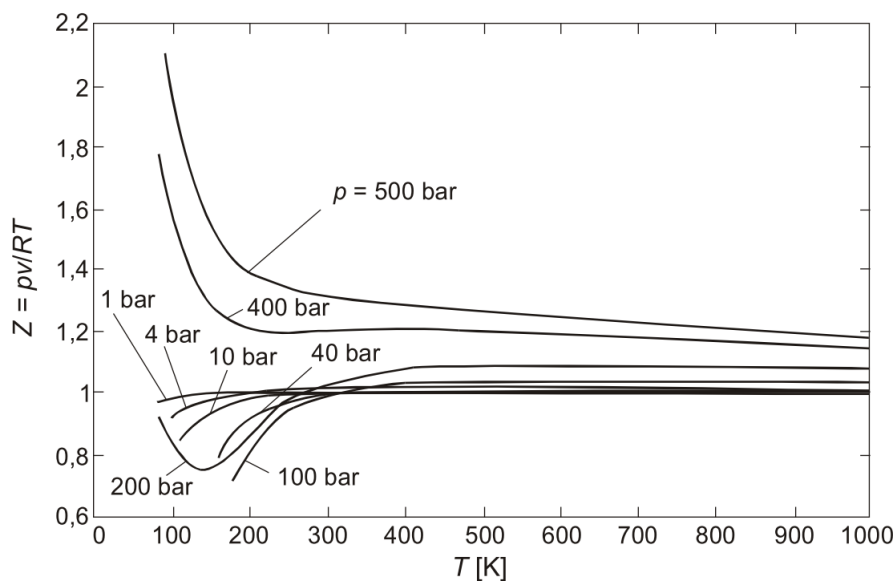


Abb. 3-1: Realgasfaktor von trockener Luft in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (Geller 2015), S. 58

Druckluft enthält in vielen Fällen noch einen gewissen Wasseranteil und entspricht somit nicht dem Fall „trockene Luft“. Wasser besitzt auf Grund seines molekularen Aufbaus Partialladungen, welche Wechselwirkungen der Moleküle untereinander ermöglichen. Zudem ist der Siedepunkt von Wasser im Vergleich zu den anderen Druckluftbestandteilen stark erhöht. Der Realgasfaktor von reinem Wasserdampf weicht folglich von 1 ab. Auf Grund des geringen

Anteils von Wasser in der Druckluft, kommt es näherungsweise jedoch zu keiner Änderung des Realgasfaktors bei feuchter Luft.

Limitierungen des Berechnungsansatzes

Der in diesem Kapitel gezeigte Berechnungsansatz besitzt, neben der Betrachtung von Druckluft als ideales Gas, weitere Limitierungen. Diese sind:

- Keine Berücksichtigung der Leckagegeometrie
- Vernachlässigung des Wasseranteils in der Druckluft
- Vernachlässigung von Öl und Partikeln in der Druckluft

In die theoretische Berechnung des Leckagestroms fließt lediglich die Fläche der Leckage, aber nicht deren Geometrie mit ein (vgl. Gl. 3-2). Der tatsächliche Leckagestrom steht jedoch in direktem Zusammenhang mit der Ausflussgeometrie (Sigloch 2017), S.171. Durch Erweiterung der Gleichung um einen linearen Anpassungsfaktor für die Leckagegeometrie, dem sogenannten Discharge Coefficient¹¹ (C_D), wird der Geometrieinfluss berücksichtigt (vgl. Gl. 3-10). Auf die physikalischen Zusammenhänge des Discharge Coefficients wird in Kapitel 3.1.3 detailliert eingegangen.

$$\dot{m} = C_D \rho_{Aus} A_{Lck} c \quad \text{Gl. 3-10}$$

In den gezeigten Berechnungen wird die Druckluft zur Vereinfachung als ideales Gemisch der Gase Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlenstoffdioxid angenommen. In der Realität kommen in der Druckluft je nach Aufbereitung, Umgebungsbedingungen und Verdichtungsprinzip, auch gewisse Anteile an Wasser, Öl und Partikeln vor. In der Theorie wirkt sich die Existenz der Fremdstoffe sowohl auf das Realgasverhalten des Gasgemisches, als auch auf die Höhe der speziellen Gaskonstante und des Isentropenexponent aus. Wie bereits im voranstehenden Abschnitt erläutert, ist die Abweichung des Realgasfaktors auf Grund der geringen Menge an Fremdstoffen vernachlässigbar gering. Um den Einfluss von feuchter Luft auf die Stoffdaten der Druckluft zu berücksichtigen, können diese über Stoffdatenbanken ermittelt und für die Berechnung herangezogen werden. Kapitel 3.1.4 beschreibt ein Berechnungsmodell für Druckluftleckagen, welches eine Abfrage von Stoffdaten aus der Datenbank Refprop¹² beinhaltet.

¹¹ Der Discharge Coefficient wird als Begriff in der wissenschaftlichen Literatur verwendet (z.B. (Eret et al. 2012a)). Im deutschen ist der Begriff „Ausflussbeiwert“ geläufig, dieser wird jedoch vorrangig bei inkompressiblen Fluiden verwendet, weshalb in dieser Arbeit der Englische Begriff verwendet wird.

¹² Das Akronym Refprop steht für “Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties”. Es handelt sich dabei um eine Stoffdatenbank, die von der Bundesbehörde NIST „National Institute of Standards and Technology“ der Vereinigten Staaten von Amerika herausgegeben wird.

3.1.2 Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalysen werden verwendet, um die Abhängigkeiten eines Ergebnisses von den Inputfaktoren darzustellen und dadurch Aussagen über die Robustheit der Berechnung treffen zu können. Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits angedeutet, dass bezüglich der Stoffdaten von trockener Druckluft ausgegangen wird. Sind jedoch Fremdstoffe in der Druckluft enthalten, so kommt es zu Änderungen der spezifischen Gaskonstante und des Isentropenexponenten. Um den Einfluss dieser beiden Parameter zu untersuchen, werden im Folgenden die Ergebnisse der jeweiligen Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Für die Analysen wird ein Referenzpunkt benötigt, dieser ist anhand der in Tabelle 3-1 aufgeführten Parameter charakterisiert.

Tabelle 3-1: Referenzwerte für die Sensitivitätsanalyse

Parameter	Referenzwert
Leckagedurchmesser	1 mm
Leckagedruck	7 bar _ü
Leckagetemperatur	20 °C
Spez. Gaskonstante	287 J/(kgK)
Isentropenexponent	1,4

Variation der spezifischen Gaskonstante

Die allgemeine Gaskonstante von Gasen beträgt $8,314471 \frac{J}{mol K}$ (Baehr et al. 2012), S. 38. Die spezifische Gaskonstante eines Stoffes errechnet sich durch Division mit der molaren Masse des betrachteten Gases. Die spezifische Gaskonstante von trockener Luft beträgt, je nach Zusammensetzung der Luft, etwa $287 \frac{J}{kg K}$. Reiner Wasserdampf besitzt im Vergleich hierzu eine deutlich höhere spezifische Gaskonstante von circa $461,4 \frac{J}{kg K}$. Für die Sensitivitätsanalyse wird die spezifische Gaskonstante der trockenen Luft um $\pm 2,5\%$ variiert, die Ergebnisse sind in Abb. 3-2 dargestellt.

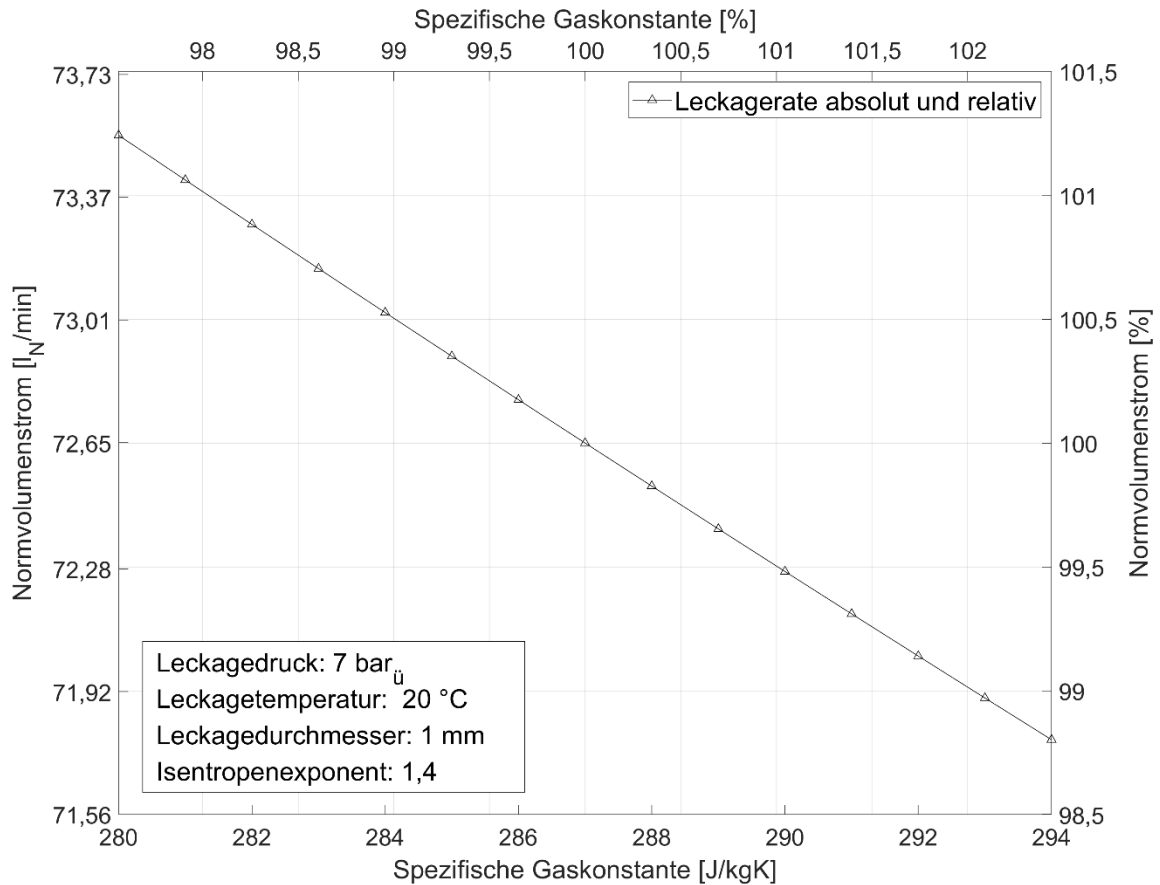


Abb. 3-2: Leckagestrom in Abhängigkeit der spezifischen Gaskonstante

Die Ergebnisse der Berechnung zeigen eine Abnahme des Leckagestroms bei steigender spezifischer Gaskonstante. Der Verlauf der Leckagemenge ist im betrachteten Bereich nahezu linear. Die spezifische Gaskonstante fließt an zwei Stellen in die Berechnung des Leckagestroms ein. Zum einen bei der Berechnung der Dichte im Austritt, zum anderen bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 3.1.1). Eine Erhöhung der spezifischen Gaskonstante führt zur Absenkung der Dichte der Druckluft, was die entgegenwirkende Erhöhung der Schallgeschwindigkeit überkompensiert, was schlussendlich in einem verminderten Leckagestrom resultiert. Eine Änderung der spezifischen Gaskonstante um einen Prozentpunkt resultiert näherungsweise in einer Änderung des Leckagestroms um einen halben Prozentpunkt. Auf Grund dieses Ergebnisses werden weitere Untersuchungen des Einflusses von feuchter Druckluft in der Arbeit sowohl theoretisch (vgl. Kapitel 3.1.4), als auch experimentell (vgl. Kapitel 6.1.1) durchgeführt.

Variation des Isentropenexponenten

Der Isentropenexponent beschreibt das Verhältnis von isobarer und isochorer Wärmekapazität. Die Höhe des Isentropenexponenten ist von der Molekülstruktur und der damit verbundenen Anzahl der Freiheitsgrade des Gasmoleküls abhängig. Luft besteht zum größten Teil aus

zweiatomigen Gasen, wie z.B. Stickstoff und Sauerstoff (N_2 , O_2). Zweiatomige Gase besitzen unter Normalbedingungen (0 °C ; $1,01325\text{ bar}_a$) drei Translationsfreiheitsgrade und zwei Rotationsfreiheitsgrade, was einen theoretischen Isentropenexponenten von 1,4 ergibt. Eine Steigerung der Freiheitsgrade, z.B. durch zusätzliche Atome im Molekül, führt zu einem Absinken des Isentropenexponenten. Der Isentropenexponent von Wasserdampf (dreiatomig) liegt deshalb bei $1,3$. Der Isentropenexponent von Druckluft ist also, je nach Wasseranteil, unterschiedlich hoch.

Neben der Abhängigkeit des Isentropenexponenten vom eigentlichen Molekülaufbau und der Gasgemisch-Zusammensetzung, ist dieser zusätzlich von Druck und Temperatur abhängig. Auf atomarer Ebene entspricht eine Temperaturerhöhung einer schnelleren mittleren Geschwindigkeit der Atome, wodurch die Ionisation und Dissoziation der Moleküle begünstigt wird. Hierdurch steigen die Freiheitsgrade, was wiederum zu einem Absinken des Isentropenexponenten führt. Gegenläufig verhalten sich die Anzahl der Freiheitsgrade bei steigendem Druck. Durch die Druckerhöhung sinken die Freiheitsgrade der Moleküle, was schlussendlich zu einer Erhöhung des Isentropenexponenten führt. Für die Sensitivitätsanalyse wird der Isentropenexponent um $\pm 10\%$ variiert, die Ergebnisse sind in Abb. 3-3 dargestellt.

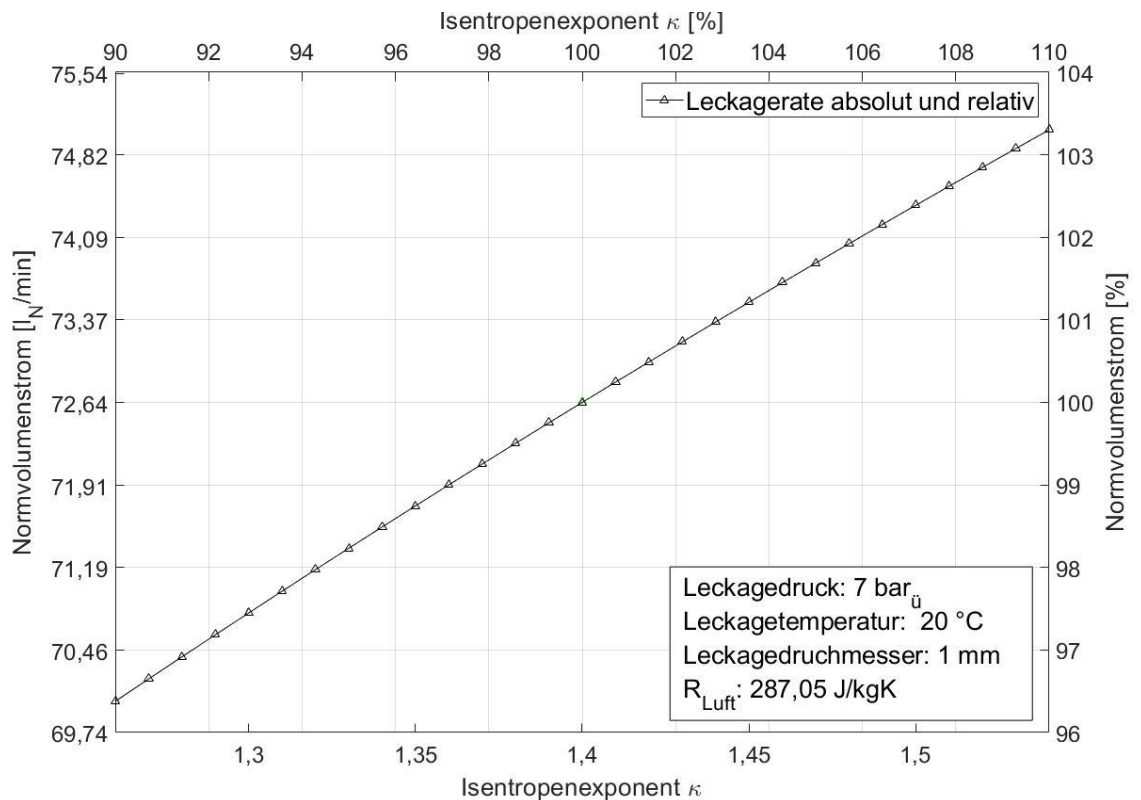


Abb. 3-3: Leckagestrom in Abhängigkeit des Isentropenexponent

Die Sensitivitätsanalyse zeigt einen monoton steigenden Verlauf des Leckagestroms in Abhängigkeit des Isentropenexponenten, wobei der Verlauf im betrachteten Bereich nahezu linear ist. Der Isentropenexponent fließt, wie bereits in Kapitel 3.1.1 gezeigt, an verschiedenen Stellen in die Berechnung mit ein. So stehen der kritische Druck, die Austrittstemperatur und damit verbunden auch die Strömungsgeschwindigkeit und die Austrittsdichte in direktem Zusammenhang zum Isentropenexponenten. Eine Erhöhung des Isentropenexponenten resultiert in einer Erhöhung des Leckagestroms, die Steigung der Geraden fällt jedoch im Vergleich zur spezifischen Gaskonstante etwas geringer aus.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Abweichungen der spezifischen Gaskonstante, sowie des Isentropenexponenten den Leckagestrom beeinflussen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Abweichungen der Höhe des Leckagestroms selbst bei starker Variation der Stoffwerte gering ausfallen. In Kapitel 3.1.4 wird zur weiteren Untersuchung exemplarisch der Einfluss von Wasser auf die Berechnungsergebnisse untersucht.

3.1.3 Discharge Coefficient

Der Discharge Coefficient, auch Ausflussbeiwert genannt, beschreibt das Verhältnis des tatsächlichen Ausflusses eines Fluids, zu dem theoretisch möglichen Ausfluss. Für die Verringerung des Volumenstroms sind zwei Effekte maßgeblich. Zum einen kommt es durch die Umlenkung der Strömung zu einer Strahleinschnürung, zum anderen treten im Bereich der Einschnürung verstärkt Reibungseffekte auf, welche die Austrittsgeschwindigkeit und damit den verbundenen Volumenstrom verringern. Diese beiden Effekte sind stark von der Geometrie der Leckagestelle abhängig und sind im Regelfall experimentell zu bestimmen, wobei hierbei stets das gemeinsame Wirken der Effekte erfasst wird (Sigloch 2017), S.171.

Abb. 3-4 beinhaltet die Ergebnisse der Geschwindigkeitsverteilung einer vereinfachten Computational Fluid Dynamics (CFD) Analyse einer kreisrunden Leckage mit 1 mm Durchmesser. Die Simulationen sind im Rahmen der HiWi-Tätigkeiten von Herrn Johannes Laur am IER entstanden (Laur 2019). Die Leckage ist als Loch in einem zylindrischen Rohr (DN50) modelliert und hat eine Tiefe (Wandstärke des Materials) von 0,5 mm, die Kanten sind scharf. Die linke Grafik zeigt die Geschwindigkeitsverteilung am Eintrittsbereich der Leckage, die rechte Grafik in der räumlichen Mitte der Leckage, was einer Entfernung von 0,25 mm von dem Leckageeintritt entspricht. Eine Übersicht der Auswertungsebenen ist in Abb. 3-5 schematisch dargestellt.

Es ist deutlich erkennbar, dass sich zu Beginn der Leckage keine einheitliche Strömung ausgebildet hat, was auf Wirbelbildungen und dadurch induzierte Reibungseffekte am Einlass zurückzuführen ist. Der Effekt der Einschnürung der Strömung ist im rechten Teil der Grafik deutlich zu erkennen. In der Mitte der Leckage ist die Strömungsgeschwindigkeit deutlich erhöht und erreicht Schallgeschwindigkeit. Auf Grund der kurzen Wegstrecke von lediglich 0,25 mm, ist das turbulente Strömungsprofil noch nicht voll ausgebildet. Mit steigender Ent-

fernung zur Mitte, sinkt die Strömungsgeschwindigkeit deutlich ab. Der grüne Ring repräsentiert eine Strömungsgeschwindigkeit von circa 270 m/s und ist damit noch deutlich unterhalb der Schallgeschwindigkeit.

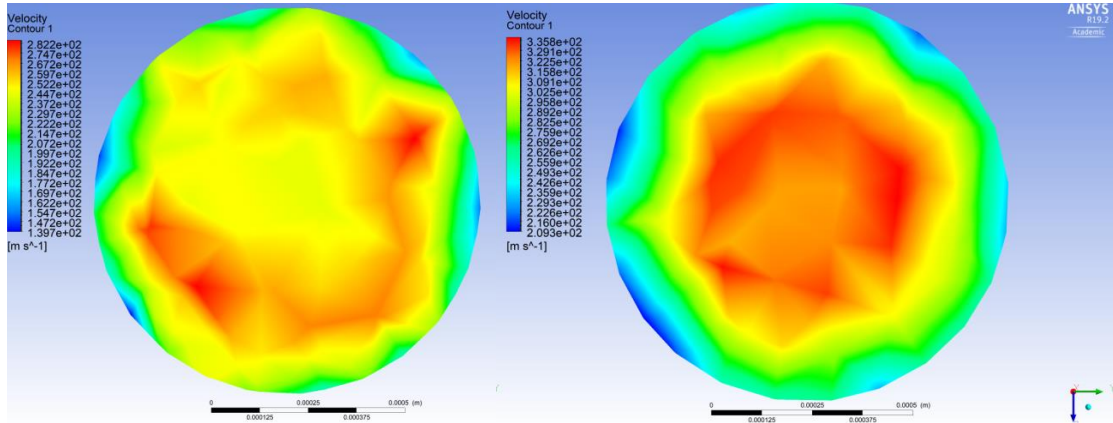


Abb. 3-4: Geschwindigkeitsverteilung einer kreisrunden Leckage mit 1 mm Durchmesser bei 7 bar_i Leckgedruck. (links) Beginn der Leckage (rechts) Mitte der Leckage. Quelle: (Laur 2019)

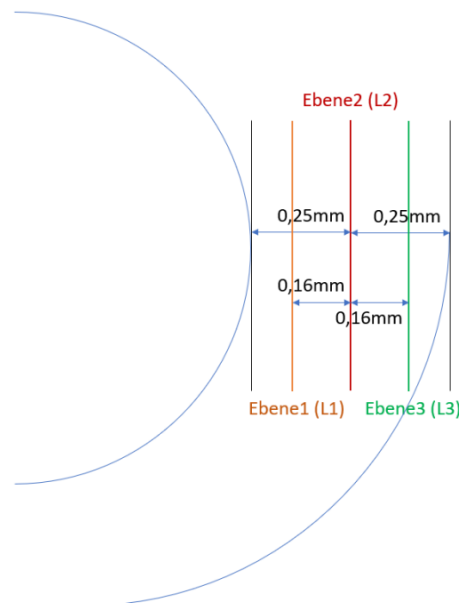


Abb. 3-5: Schematische Darstellung der Auswertungsebenen der simulierten kreisrunden Leckage mit 1 mm Durchmesser. Quelle: (Laur 2019)

Bei den in Kapitel 3.1.1 gezeigten theoretischen Berechnungen, wird vom Erreichen der Schallgeschwindigkeit ausgegangen, welche im gesamten Querschnitt vorliegt. Die rechte Grafik in Abb. 3-4 zeigt deutlich, dass dies für eine scharfkantige, kreisrunde Geometrie nicht der Fall ist. Diese Graphik ist somit eine visuelle Darstellung des Discharge Coefficients.

Wie bereits angesprochen, sind Discharge Coefficients stark geometrieabhängig und müssen im Regelfall experimentell bestimmt werden. In der Fachliteratur finden sich überschlägige Ausflussbeiwerte für standardisierte Geometrien, hauptsächlich für inkompressible Medien. In Tabelle 3-2 sind typische Discharge Coefficients für unterschiedliche Geometrien gelistet. Da diese Koeffizienten maßgeblich von der Geometrie abhängen, liegt die Vermutung nahe, dass diese auch für Druckluftleckagen gelten, dies wird in dieser Arbeit überprüft (vgl. Kapitel 6.1.1).

Tabelle 3-2: Discharge Coefficients für diverse Geometrien nach ((Sigloch 2017), Seite 171)

Öffnungsform	Discharge Coefficient (C_D) [-]
Scharfkantige Mündung	0,53 bis 0,56
Gut gerundete Mündung	0,97 bis 0,99
Zylindrisches Ansatzrohr	0,82
Konisches Ansatzrohr	0,74 bis 0,95 (winkelabhängig)
Düse	0,79 bis 0,97 (abhängig von der Düsengeometrie)

Im Lehrbuch Fluidmechanik Band 1 (Truckenbrodt 2008) wird der Discharge Coefficient der Ausflussformen kreisrund und rechteckig für inkompressible Medien angegeben. Die Zusammenhänge sind in Abb. 3-6 dargestellt und zeigen niedrigere Discharge coefficients für rechteckige Geometrien. Eine Erklärung ist nicht aufgeführt. Das Verhalten lässt sich jedoch mit den beiden bereits erklärten Haupteffekten erläutern. Die rechteckige Geometrie hat bei gleicher Ausflussfläche eine anteilig größere Umfangsfläche, weshalb es zu größeren Einschnür- und Reibungseffekten kommt, folglich sinkt der Discharge Coefficient ab.

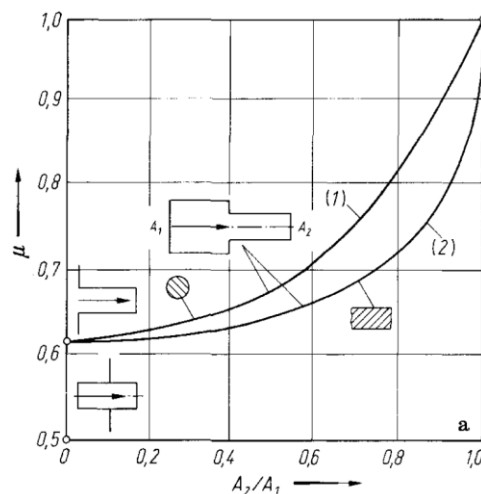


Abb. 3-6: Discharge Coefficient (hier mit μ bezeichnet) für kreisrunde und rechteckige Auslassgeometrien Quelle: (Truckenbrodt 2008), S. 260

3.1.4 Berechnungsmodell Druckluftleckagen

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Berechnungsmodell (Leakagetool 2020) auf Basis der vorgestellten Gleichungen (vgl. Kapitel 3.1.1) entwickelt. Das Berechnungsmodell ist in Matlab (Matlab R2018a) programmiert und besitzt eine graphische Oberfläche in Simulink zur benutzerfreundlichen Eingabe der Rahmenparameter.

Die Oberfläche ist in Abb. 3-7 dargestellt, sie ist in einen Eingabebereich (oben) und einen Ausgabebereich (unten) aufgeteilt. Im Ausgabebereich wird sowohl der Leckagestrom des aktuellen Durchlaufs, als auch der des Vorherigen angezeigt. Der Eingabebereich besteht aus drei Teilen: Im Eingabebereich für die Berechnungsparameter werden die Rahmendaten für die Berechnung eingestellt. Im Eingabebereich für die Sensitivitätsanalyse, wird die alternierende Variable ausgewählt und der Endwert für diese Variable eingestellt. Der Anfangswert wird aus den Rahmendaten übernommen, die Schrittweite zur Auflösung der Parametervariation kann ebenfalls eingestellt werden. Auf der rechten Seite wird unter Berechnungseinstellungen das Vorgehen bei der Leckageberechnung eingestellt. Es kann zwischen trockener und feuchter Luft, sowie zwischen idealisierten und realen Stoffwerten unterschieden werden. Bei idealisierten Stoffwerten wird die spezifische Gaskonstante der Luft mit $287 \frac{J}{kg K}$ und der Isentrophenexponent mit 1,4 angenommen, bei der Variante reale Stoffwerte werden die Stoffdaten mit Hilfe der Datenbank Refprop für die exakte Luftzusammensetzung in jedem Punkt ermittelt. Wird die Schaltfläche feuchte Luft ausgewählt, so wird der Wassergehalt der Druckluft in die Berechnung miteinbezogen. Ebenso können Faktoren für den Discharge Coefficient berücksichtigt werden.

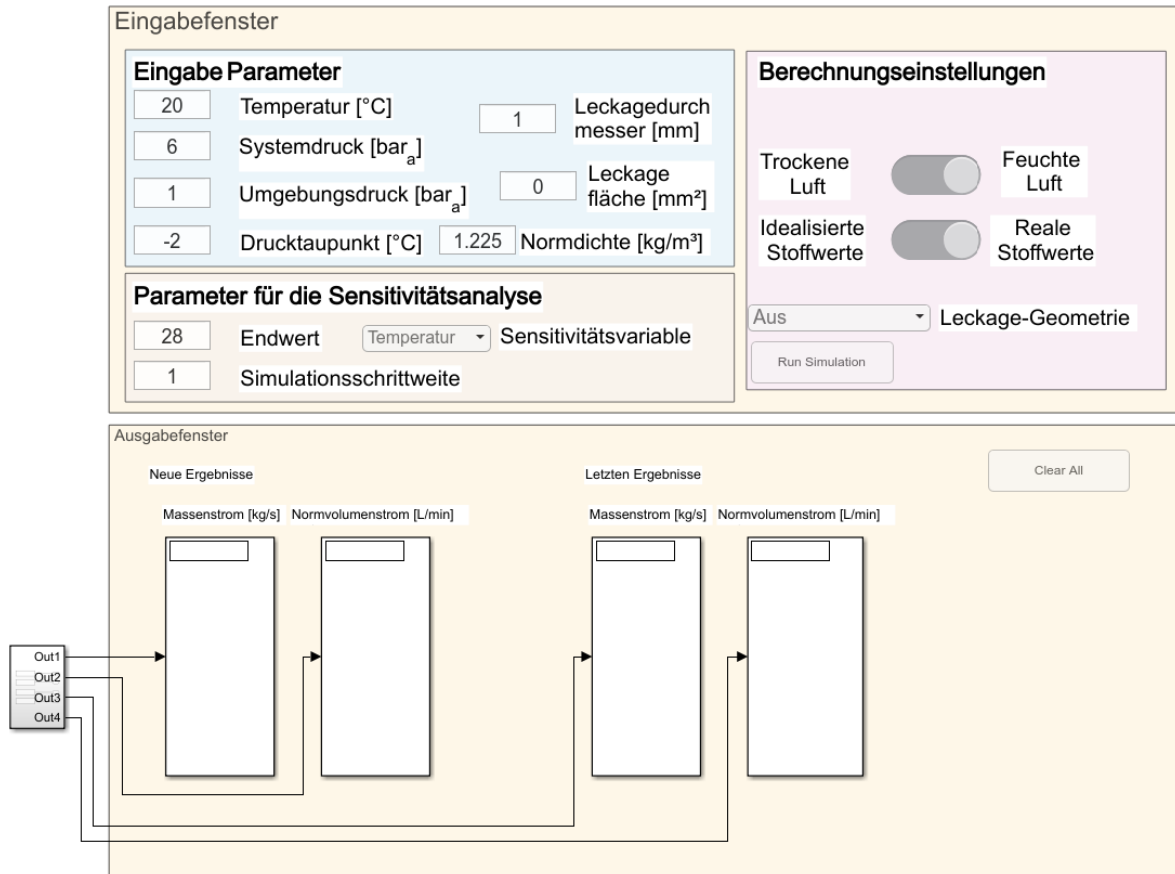


Abb. 3-7: Graphische Oberfläche des Berechnungsmodells für Druckluftleckagen

Als Ergebnis wird der Leckagestrom, bzw. bei aktivierter Sensitivitätsanalyse die Leckageströme im Ausgabefenster, angezeigt. Zudem wird automatisiert ein Graph und ein ausführliches Logfile mit allen Berechnungsergebnissen erzeugt.

Erweiterungen des Berechnungsmodells

Im Vergleich zu den in Kapitel 3.1.1 gezeigten Berechnungen, ist das Berechnungsmodell um drei Punkte erweitert:

- Einbindung des Discharge Coefficients
- Kopplung des Modells mit der Stoffdatenbank Refprop
- Berücksichtigung des Wassergehalts in der Druckluft

Die Theorie des Discharge Coefficient wurde bereits im voranstehenden Kapitel erläutert. Im Berechnungsmodell kann der Discharge Coefficient über ein Drop-Down Menü ausgewählt werden. Als Auswahloptionen sind die Ergebnisse dieser Arbeit, Werte aus der Veröffentlichung von Wolstencroft (Wolstencroft 2008), sowie Standardwerte hinterlegt.

Um eine bessere Detailschärfe im Modell zu erhalten, ist das Berechnungsmodell mit der Stoffdatenbank Refprop gekoppelt. Die Kopplung erlaubt die Abfrage von Stoffdaten der

Druckluft unter den in der Berechnung herrschenden Rahmenbedingungen. Für die Datenabfrage wird die Luft als Mischung von Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlenstoffdioxid und Wasser vorgegeben. Die Berechnung der Stoffdaten erfolgt durch Refprop und wird über eine Schnittstelle mittels Matlabcode abgefragt. Die Berechnung der Stoffdaten in Refprop erfolgt über das Mischungsmodell von Gernert (Gernert et al. 2016) für feuchte Gase. Das Mischungsmodell basiert auf einem Multi-Fluidansatz und wurde anhand experimenteller Daten von binären Mischungen kalibriert. Für Drücke bis 20 bar_a weist das Modell eine Abweichung von kleiner 0,5 % aus (Gernert et al. 2016).

Die Schnittstelle zur Refprop Datenbank (Refprop 2018) wird zur Erweiterung des Modells zur Berücksichtigung von feuchter Druckluft verwendet. Der Feuchtegehalt wird, wie im Druckluftbereich üblich, im Modell als Drucktaupunkt vorgegeben. Der Drucktaupunkt bezeichnet diejenige Temperatur, ab der flüssiges Wasser in der Druckluft auskondensiert. Der Drucktaupunkt wird in °C_{DP} angegeben und ist nur mit Angabe des Totaldrucks einem eindeutigen Wassergehalt zugeordnet. Die Berücksichtigung des Wassergehalts der Druckluft erfolgt durch die Berechnung der Gaszusammensetzung der feuchten Druckluft und der anschließenden Bestimmung der Stoffdaten dieser Gasmischung mittels Refprop.

Ergebnisse des Modells

Das Berechnungsmodell ermöglicht eine einfache und schnelle Analyse von Druckluftleckagen. Die Berechnungsergebnisse sind, sofern dieselbe Normdichte in den Berechnungen verwendet wird, keine Berücksichtigung der Leckagegeometrie und des Wassergehalts erfolgt, identisch mit den Ergebnissen des 2006 veröffentlichten Exceltools (Toolbox Leckagen).

Durch die Funktionalität der Sensitivitätsanalyse können Parametervariationen im neuentwickelten Berechnungsmodell ohne Zusatzaufwand durchgeführt werden. Durch die Erweiterungen des Berechnungsmodells können auch der Wassergehalt der Druckluft, sowie die Leckagegeometrie rechnerisch berücksichtigt werden. Wobei lediglich die Leckagegeometrie einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat.

Eine Berücksichtigung des Wassergehalts der Druckluft, ändert den Leckagestrom nicht merklich. Die Änderung des Leckagestroms von Druckluft bei einem Systemdruck von 7 bar_i und Drucktaupunkten von -80°C_{DP} und +20 °C_{DP} liegt bei kleiner 0,1 % und ist somit nicht relevant. Dies ist vor allem durch die geringe Menge an Wassermolekülen in feuchter Druckluft begründet. Die Implementierung von weiteren Fremdstoffen in der Druckluft wie Öl oder Partikel in das Berechnungsmodell wird nicht verfolgt, da sie bezüglich der Menge typischerweise weit unterhalb des Wassergehalts liegen.

Auch die Abweichung des Leckagestroms mit idealisierten Stoffwerten im Vergleich zu der Abfrage der realen Stoffdaten aus der Datenbank, fällt mit 0,2 % sehr gering aus. Werte für die ideale Gaskonstante und den Isentropenexponenten weichen bei Druckluft in diesem Bereich kaum von den Standardwerten ab.

3.2 Ultraschallakustik

Die Grundlagen der Akustik sind in diesem Kapitel bewusst auf das wesentliche reduziert, vertiefende Informationen zur Akustik sind in zahlreichen Fachbüchern zu finden (Beispiele für Fachbücher zur Akustik: (Möser 2010; Meschede 2015)).

Schall ist eine mechanische Welle, im Fall des Luftschalls sind die Schallwellen auf kleine Druckschwankungen in der Luft zurückzuführen, wodurch diese in Schwingung versetzt wird. Liegt die Frequenz der Schwingung (Schallfrequenz) oberhalb von 20 kHz, so ist diese außerhalb des hörbaren Bereichs für Menschen und wird als Ultraschall bezeichnet. Die Erfassung von Schallsignalen erfolgt mit Hilfe von Mikrofonen, welche die Schwingungen der Luft detektieren und in ein (meist) elektrisches Signal umwandeln. Eine Übersicht der möglichen Wandlerprinzipien ist in (Möser 2010), S. 19 zu finden.

Schalldruckpegel

Der Schalldruckpegel repräsentiert die aus der Schallwelle resultierende Kraftwirkung auf eine definierte Fläche. Für eine bessere Stabilität und Aussagekraft der Messwerte werden hier im Regelfall keine Spitzenwerte, sondern ein Effektivwert über eine bestimmte Zeitdauer ermittelt. Hierdurch wird vermieden, dass eventuell kurz auftretende Spitzenwerte das Messergebnis stark beeinflussen. Der Effektivwert stellt die Wurzel aus der Fläche der quadrierten Schwingung dar (Möser 2010), S. 56. Die Spanne des hörbaren Schalldrucks umfasst etwa sechs Größenordnungen, weshalb der Schalldruck logarithmisch in Form von dB-Werten dargestellt wird. Zur Umrechnung wird die Hörschwelle des menschlichen Gehörs von 20 μPa gleich 0 dB gesetzt. Der Schalldruckpegel (L) lässt sich über das Verhältnis des gemessenen Schalldrucks (p_s) und dem Referenzschalldruck (p_{ref}) nach Gl. 3-11 bestimmen.

$$L = 20 \log \left(\frac{p_s}{p_{ref}} \right) \quad \text{Gl. 3-11}$$

Ein Schalldruck (p_s) von 1 Pa kann folglich auch als 94 dB geschrieben werden. Dieser Schalldruck wird für die meisten Mikrofone zur Kalibrierung verwendet.

Bei punktförmigen Schallquellen ist die Höhe des Schalldruckpegels auf Grund der Definition von Kraft pro Fläche nicht unabhängig vom Abstand. Durch die gleichmäßige Abstrahlung der Schallwellen in alle Raumrichtungen, wirkt die Kraft auf eine immer größer werdende Fläche, weshalb der Schalldruckpegel mit steigendem Abstand abnimmt. Diese Gesetzmäßigkeit wird Abstandsgesetz genannt, für Effektivwerte von Energiegrößen gilt hier ein indirekt proportionaler Zusammenhang mit dem Abstand. Eine Verdopplung des Abstands führt somit zu einer Halbierung des Schalldruckpegels, was einer Änderung von -6 dB entspricht.

Zeit- und Frequenzebene von Schallsignalen

Geräusche bestehen, im Gegensatz zu Sinustönen, aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Frequenzen. Das Messsignal eines Mikrofons spiegelt den zeitlichen Verlauf des Signals wieder, gibt jedoch keinen Aufschluss über die Verteilung der Frequenzanteile. Diese lassen sich jedoch mit einer mathematischen Transformation, der sogenannten Fourier-Transformation, des Signals in die Frequenzebene ermitteln. Da diese diskrete Form der Fourier-Transformation sehr aufwendig ist, wird üblicherweise die sogenannte Fast Fourier Transformation (FFT) verwendet. Hierbei handelt es sich um einen effizienten Algorithmus zur schnellen Berechnung des Frequenzsignals. In der Frequenzebene existiert keine zeitliche Komponente, sie ist das Ergebnis über den gesamten transformierten Betrachtungszeitraum. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 3-8 ein Sinuston mit einer Frequenz von 50 Hz sowohl in der Zeitebene, als auch in der Frequenzebene dargestellt. Da es sich um einen reinen Sinuston handelt, ist der Frequenzausschlag ausschließlich bei einer Frequenz zu sehen, bei normalen Geräuschen besitzen beide Darstellungen zusätzliche Komplexität.

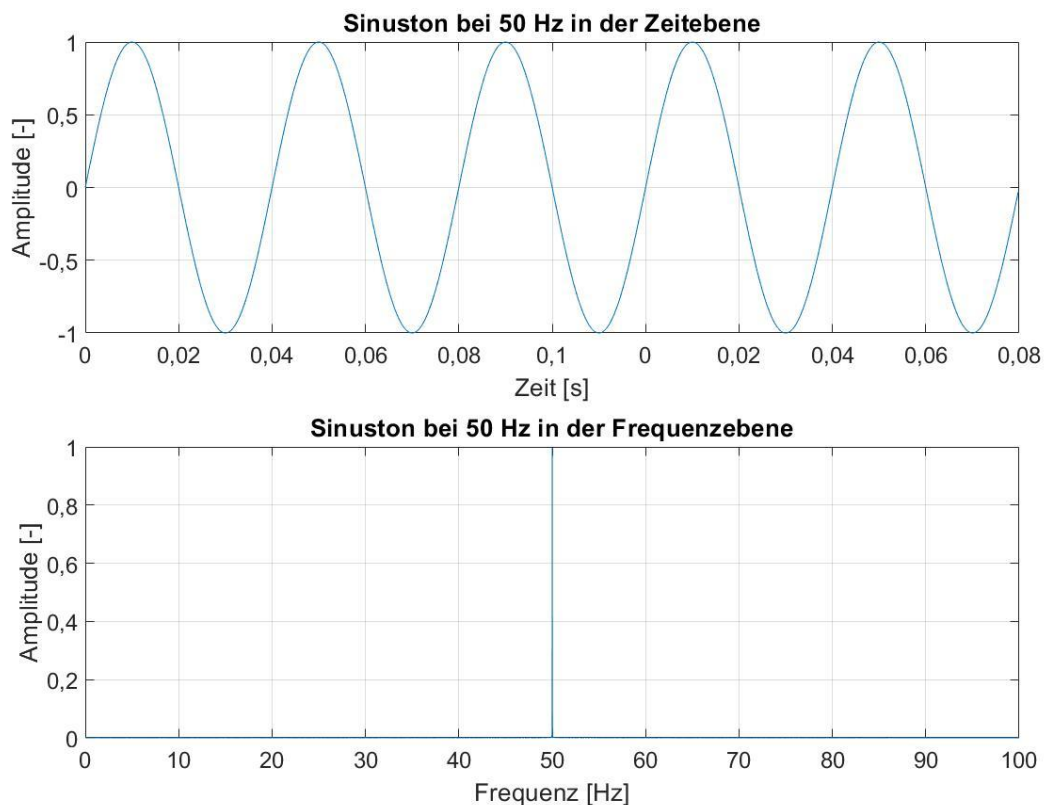


Abb. 3-8: Darstellung eines 50 Hz Sinustons in der Zeitebene (oben) und der Frequenzebene (unten)

Ultraschallemission von Druckluftleckagen

Druckluft verursacht bei der Ausströmung durch eine Leckagestelle Schallemissionen über ein weites Frequenzspektrum (hörbare Frequenzen bis zu Ultraschallfrequenzen von mindestens 100 kHz), die in Folge von starken Turbulenzen am Austritt der Leckagestelle entstehen. Das Modell des turbulenten Strahls erklärt die Entstehung dieser Turbulenzen (Cushman-Roisin 2019), S. 155. Tritt ein Luftstrom aus einer Öffnung mit hoher Strömungsgeschwindigkeit in die Umgebung aus, so trifft er auf die Moleküle der Umgebungsluft und wird durch diese beeinflusst. Der Strahl weitet sich mit fortschreitendem Abstand von der Austrittsstelle auf, was durch das Mitreisen von Molekülen der Umgebungsluft begünstigt wird. Hierdurch entsteht ein Unterdruck im Randbereich, was zu Rückströmungen und Wirbeln in der Umgebungsluft führt. Dieser Effekt ist direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Strahls, die durch die Ausweitung und den Mitreiseeffekt sowie weitere Verluste mit wachsendem Abstand sinkt.

Der Schalldruck einer Druckluftleckage ist winkelsensitiv, was sich anhand Abb. 3-9 nachvollziehen lässt. Die Schallemissionen entstehen durch Verwirbelungen der Luft im Austrittsstrahl. Die Vielzahl an entstehenden Schallquellen strahlen näherungsweise in alle Raumrichtungen mit gleicher Intensität. Die Schallwellenfront wird jedoch durch die Strömungsgeschwindigkeit in der Richtung beeinflusst. In der Grafik ist exemplarisch eine Schallquelle dargestellt, die Schallwellenfront verläuft zuerst gleichmäßig. Das Geschwindigkeitsprofil des austretenden Leckagestroms besitzt sein Maximum in der Strahlmitte und flacht nach außen ab. Folglich wird die, der Strahlmitte zugeneigte Seite der Schallwellenfront, stärker beschleunigt, als die äußere Seite und es kommt zu einer Ablenkung des Schalls, weg von der Strahlmitte. In der Strahlmitte ist es folglich deutlich leiser, als in leicht angewinkelten Positionen. Dieser Effekt wird deshalb als „Cone of Silence“ bezeichnet (Tam et al. 1998).

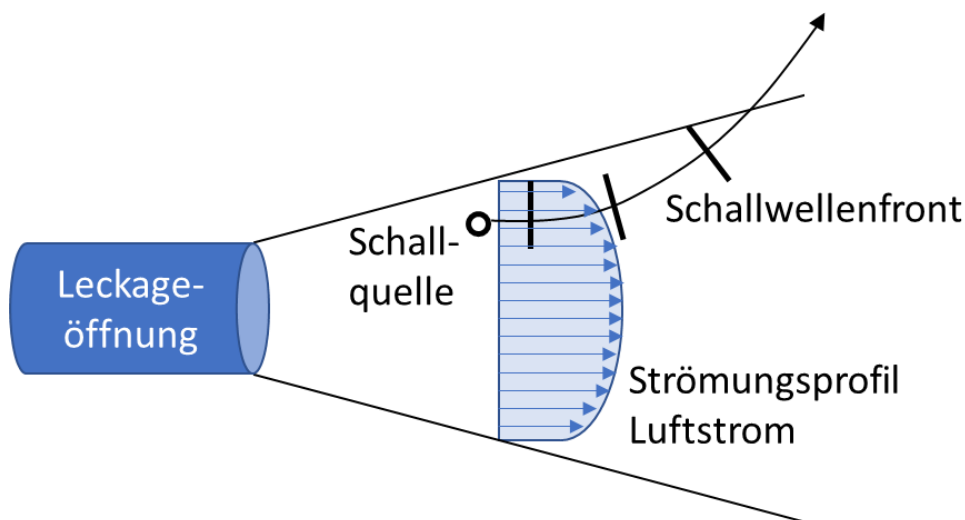


Abb. 3-9: Schematische Darstellung der Umlenkung der Schallwellenfront in einem Fluidstrahl (Darstellung übersetzt aus (Tam et al. 1998))

4. Versuchsaufbau und Messtechnik

Zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1.1) wird eine große Anzahl an experimentellen Untersuchungen von Druckluftleckagen benötigt. Im Rahmen der Arbeit wurde deshalb ein Konzept für einen multifunktionalen Druckluftleckagen-Prüfstand entwickelt, der die Bearbeitung der Themenstellung ermöglicht. Dieses wurde im Anschluss umgesetzt und der Prüfstand in Betrieb genommen.

Die Anforderungen an den Prüfstand, welche sich aus den Forschungsfragen ableiten lassen, sowie deren konkrete Umsetzung am Prüfstand sind in Kapitel 4.1 dargestellt. Der Gesamtaufbau wird in Kapitel 4.2 abgehandelt. Das nachfolgende Kapitel 4.3 stellt die verwendete Messtechnik vor. Zuletzt wird in Kapitel 4.4 die Automatisierung des Prüfstands erläutert.

4.1 Konzeption und Entwicklung des Prüfstands

Um das Forschungsziel der systematischen Analyse von Druckluftleckagen zu erreichen, werden experimentelle Untersuchungen von einer großen Stückzahl von sowohl idealisierten, als auch real vorkommenden Leckagegeometrien benötigt. Zusätzlich werden die Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit von Ultraschallmikrofonen zur indirekten Leckagequantifizierung untersucht. Ziel der Auslegung ist, einen Präzisionsprüfstand für Druckluftleckagen aufzubauen, welcher eine möglichst hohe Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen aufweist, sowie Flexibilität in Bezug auf die verwendbaren Prüfkörper besitzt. Hierdurch ergeben sich konkrete Anforderungen an das Design und die Auslegung des Prüfstands, welche in Abb. 4-1 dargestellt sind. Die Größe der Kreise spiegelt dabei die Bedeutung für die Auslegung wieder.



Abb. 4-1: Auslegungsfaktoren des Prüfstands

Die Volumenstrommesstechnik bildet auf Grund der Messung des tatsächlichen Leckagestroms, das Herzstück des Prüfstands. Bei der Auslegung ist zu beachten, dass der Volumenstrom präzise über einen großen Messbereich ermittelt werden kann. Der hierfür vorgesehene Messbereich erstreckt sich von 0,1 l_N/min bis 1.000 l_N/min und weist somit eine Dynamik von

1 zu 10.000 auf. Neben einer möglichst hohen Messgenauigkeit muss die Volumenstrommess-technik weitere Eigenschaften besitzen, wie beispielsweise geringe Investitionskosten, möglichst geringen Druckverlust oder Störfestigkeit gegenüber Wassertröpfchen in der Druckluft.

Die Auslegung und Diskussion der gesamten Messtechnik ist im nachfolgenden Kapitel 4.3 ausführlich betrachtet. Bei der Auslegung gilt es eine möglichst hohe Messgenauigkeit des gesamten Prüfstands sicherzustellen, unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Mittel und der für die Anwendung identifizierten Kernaspekte.

Großer Wert bei der Auslegung wurde auf die Flexibilität und damit verbundenes Anwendungsspektrum des Prüfstands gelegt. Der errichtete Prüfstand soll Experimente an einer großen Anzahl und Variantenvielfalt von Prüfkörpern ermöglichen. Die jeweiligen Prüfkörper sollen mit geringem Aufwand in den Prüfaufbau eingebracht werden können.

Druckverluste sind im Prüfstandsaufbau gering zu halten. Sie sind jedoch, bei ausreichendem Versorgungsdruck, kein ausschlaggebendes Kriterium für das Design des Prüfstands. Zusätzlich sind auch die Standortfaktoren zu berücksichtigen, so musste auf Grund der Anforderungen der Arbeit, eine Druckluftversorgung am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) aufgebaut werden.

4.2 Konstruktion und Funktionsweise des Prüfstands

Die finale Konstruktion des Druckluftleckage-Prüfstands ist in Abb. 4-2 als 3D Modell dargestellt. Der Prüfstand wird über eine verlustarme Kupplung (1) an die Druckluftversorgung angeschlossen. Im Anschluss werden die Eingangsparameter Überdruck und Drucktaupunkt (2) der Versorgung messtechnisch erfasst. Das eingebaute Proportionalventil (3) ist für die Regelung des Leckagedrucks verantwortlich.¹³ Über Kugelhähne kann entweder ein Bypass oder eine von zwei Messstrecken mit thermischen Volumenstrommessgeräten (4) ausgewählt werden. Die thermischen Volumenstrommessgeräte dienen nur einer allgemeinen Funktionsüberprüfung des Prüfstands und werden nicht für die Auswertung verwendet. Nach den thermischen Volumenstrommessgeräten ist ein 10 l Druckspeicher mit einer Stichleitung an dem Prüfstand angeschlossen. Der Speicher unterstützt die Stabilität des Leckagedrucks im Zusammenspiel mit der Regelung. Er dient zudem als Sicherheitselement zur Vermeidung von Druckstößen beim Anfahren des Prüfstands, welche das nachfolgende Messgerät beschädigen können.

¹³ Vor dem Proportionalventil wurde eine zusätzliche Strömungsumlenkung am Prüfstand eingebaut. Diese Umlenkung hat die Funktion, dass flüssige Bestandteile der Druckluft (bei Versuchen mit feuchter Druckluft) an die Rohrwand geschleudert werden und in die nach unten abgehende Rohrleitung (Endstück) abfließen. Am Endstück befindet sich ein manueller Kondensatablass zur Entfernung des überschüssigen Kondensats aus dem System.

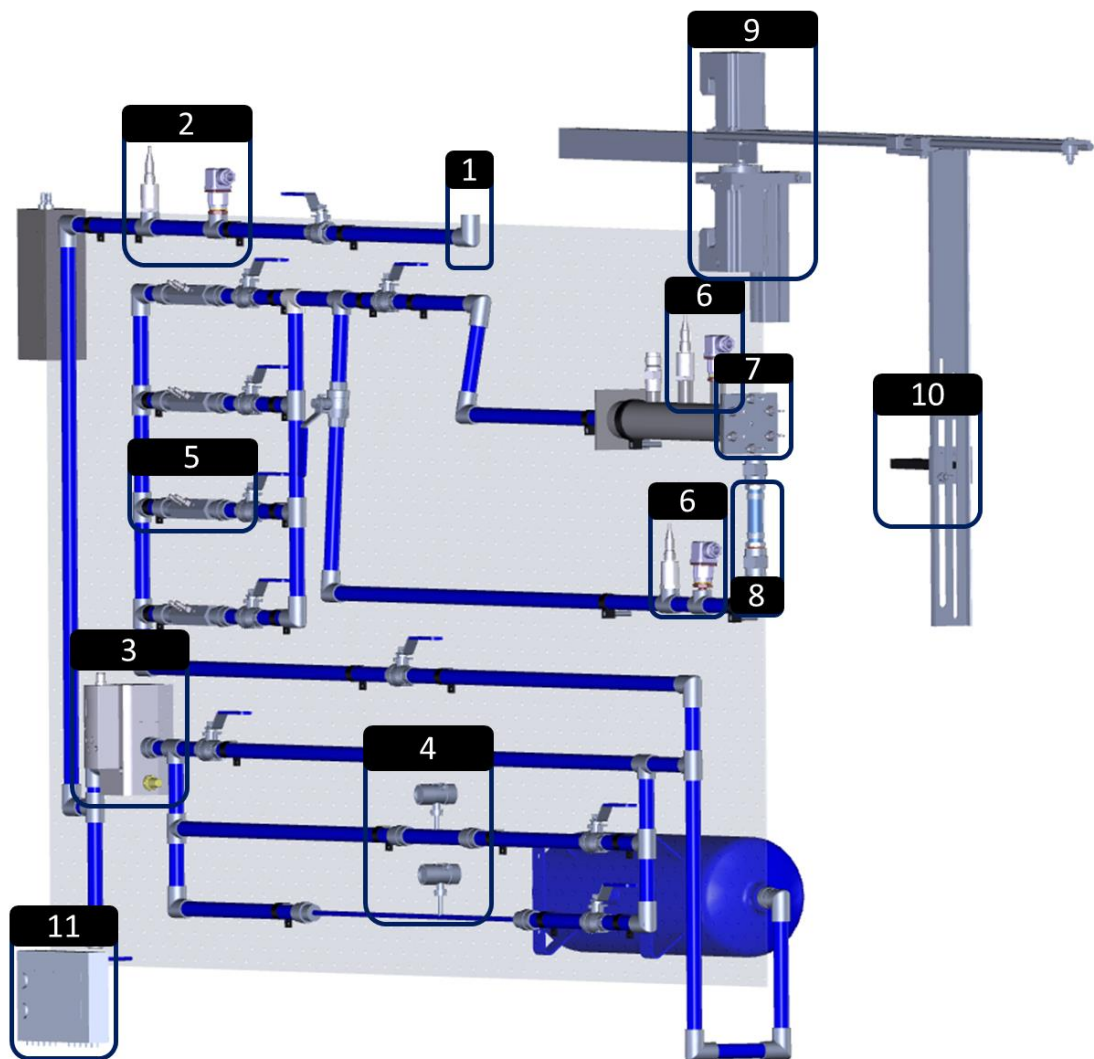


Abb. 4-2: 3D Modell des Druckluftleckage-Prüfstands

Im Anschluss wird die Druckluft durch eine von vier Präzisionsvolumenstrommessstrecken (5) geleitet. Hierbei handelt es sich um Volumenstrommessgeräte, die nach dem Wirkdruckprinzip arbeiten. Die Wahl der Messstrecke wird in Abhängigkeit des Volumenstroms getroffen. Im Anschluss kann durch Öffnung von Kugelhähnen entweder die Messstrecke für ideale Leckagen (7) oder für reale Leckagen (8) betrieben werden. In beiden Fällen werden kurz vor dem Prüfkörper jeweils Temperatur und Überdruck sensorisch erfasst (6). Der Wert des Überdrucksensors dient hierbei als Regelgröße für die Regelung des Prüfstands und entspricht dem Leckagedruck. Der Temperatursensor erfasst analog die Leckagetemperatur.

Für die Ultraschallmessungen ist am Prüfstand eine elektrische, zweiachsig nachführbare Mikrofonverstellung (9) montiert. Diese ermöglicht eine präzise und reproduzierbare Positionierung des Mikrofons (10) auf gleichmäßigen Kreisbahnen um die Leckagestellen. Die Vorrichtung ist selbst auf einem zweiachsigen Positionsschlitten angebracht, um eine Feinjustierung auf die jeweilige Leckagestelle zu ermöglichen.

Die Sensoren sind, mit Ausnahme des Ultraschallmikrofons und des Wirkdruck-Volumenstrommessgeräts, welche direkt mit dem Prüfstandsrechner verbunden sind, an einen Datenlogger (11) angeschlossen. Die elektrische Ansteuerung des Proportionalventils erfolgt mittels eines Raspberry Pis mit entsprechender elektrischer Schaltung.

Der Prüfstand wird regelmäßig auf dessen eigene Dichtheit überprüft¹⁴. Die Undichtigkeit ist mit einer Rate von kleiner 0,04 ml_N/min so gering, dass sie nur bei Langzeitmessungen über mehrere Tage messtechnisch erfasst werden kann. Der Messbereich der Volumenstrommessung beginnt bei 0,1 l_N/min und liegt damit um mehrere Größenordnungen über der Undichtigkeitsrate.

Der mechanische Aufbau und die Inbetriebnahme einer ersten „Betaversion“ des Prüfstands erfolgte im Rahmen einer Forschungsarbeit von Herrn Riegraf (Riegraf 2018). Die Konstruktion des Mikrofonarms erfolgte im Rahmen einer Forschungsarbeit von Herrn Peper (Peper 2019).

4.3 Messtechnik

Am Prüfstand sind diverse Sensoren verbaut, die einen reibungslosen Ablauf der Versuche, sowie die messtechnische Erfassung ermöglichen. Es werden die folgenden Größen sensorisch erfasst, welche im Anschluss ausführlicher erläutert werden:

- Druck
- Volumenstrom
- Temperatur
- Feuchte
- Ultraschall

Die Datenblätter aller verwendeten Messgeräte sind im Anhang B-1 aufgeführt.

Druckmessung

Die Erfassung des Drucks erfolgt am Prüfstand mittels zwei Überdrucksensoren des Herstellers CS Instruments (Modellbezeichnung: CS10). Die Überdrucksensoren basieren auf dem piezoelektrischen Messprinzip und haben einen Messbereich von 0 – 10 bar_ü, sowie eine Genauigkeit von ± 0,5 % v.E. ($\cong \pm 50$ mbar). Einer der Überdrucksensoren wird zur Überwachung des Versorgungsdrucks verwendet, der andere Sensor erfasst den Leckagedruck.

¹⁴ Für die Dichtheitsprüfung wird der Leckageprüfkörper entfernt und der Anschluss abgedichtet. Nachfolgend wird der Prüfstand unter Druck gesetzt und der Kugelhahn zur Druckluftversorgung geschlossen. Die Messung der internen Leckage erfolgt über den gemessenen, temperaturbereinigten Druckabfall. Die interne Leckage liegt im Regelfall bei kleiner 2 ml_N/h und hat folglich keine Auswirkungen auf die Messungen.

Zur Erfassung des Umgebungsdrucks wird die Wetterstation WS-300-UMB des Herstellers Lufft verwendet. In dieser ist ein Absolutdrucksensor mit kapazitivem Messprinzip verbaut. Der Messbereich beträgt 0,3 – 1,2 bar_a, bei einer Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ mbar.

Volumenstrommessung

Der Prüfstand ermöglicht die Vermessung von sehr kleinen Leckagen mit einem Leckagestrom von 0,1 l_N/min bis zu sehr großen Leckagen mit Leckageströmen von bis zu 2.500 l_N/min, die Dynamik des Messbereichs beträgt folglich 1:25.000. Um die große Dynamik der Volumenstrommessung zu ermöglichen, wird ein mehrstufiger Ansatz am Prüfstand verfolgt. Zudem finden zwei unterschiedliche physikalische Messverfahren am Prüfstand Verwendung.

Der Volumenstrom wird zweistufig, mittels Volumenstromsensoren des Herstellers CS Instruments (Modellbezeichnung: VA520) gemessen. Diese Sensoren basieren auf dem kalorimetrischen Messprinzip und haben einen Messbereich von 0 bis 105 l_N/min bzw. 0 bis 1.500 l_N/min, wobei die Sensoren eine Mindestanströmgeschwindigkeit benötigen, weshalb Werte nahe 0 l_N/min nicht erreicht werden. Die Messgenauigkeit ist sowohl vom Messwert, als auch vom Endwert abhängig und beträgt in beiden Fällen ± 1 % v.E. $\pm 0,3$ % v.M. Messungen im unteren Bereich des Messbereichs sind folglich anteilig mit größeren Fehlern behaftet. Die kalorimetrischen Volumenstrommessgeräte werden nur zur Funktionsüberprüfung des Prüfstands verwendet und nicht für die Ergebnisauswertung herangezogen.

Zur präzisen Messung des Volumenstroms, wird ein Volumenstrommessgerät des Herstellers Optiserve Messtechnik (Modellbezeichnung: VSM02) verwendet. Das zugrundeliegende Messprinzip ist das Wirkdruckmessverfahren. Der Wirkdruck entsteht bei der Durchströmung von speziell geformten Düsen und wird messtechnisch erfasst. Für die Abdeckung des gesamten Messbereichs werden vier unterschiedlich große Düsen benötigt. Jede einzelne Düse hat eine Messbereichsdynamik von circa 1:10. Die Messgenauigkeit wird seitens des Herstellers mit $\pm 2,5$ % v.M. angegeben, die einzelnen Düsen wurden jedoch in einem Kalibrierlabor kalibriert und weichen im Regelfall in den einzelnen Betriebspunkten weniger als ± 1 % v.M. von einer geeichten Referenz ab. Die Kalibrierzertifikate sind im Anhang B-2 zusammengestellt.

Temperaturmessung

Die Drucklufttemperatur wird mit einem Temperatursensor des Herstellers Sick (Modellbezeichnung: i TCT-1AAGE1006MZ) gemessen. Der Sensor basiert auf der Widerstandstemperaturmessung (Pt-100) und besitzt einen Arbeitsbereich von -50 bis 150 °C. Die Messgenauigkeit ist nach IEC 60751 für ein Messelement der Klasse A beschrieben und entspricht $\pm (0,15^\circ\text{C} + 0,002 T [^\circ\text{C}])$. Die Umwandlung im Messumformer ist mit kleiner 1 % v.E. angegeben.

Zur Erfassung der Umgebungstemperatur wird die Wetterstation WS-300-UMB des Herstellers Luft verwendet. In dieser ist ein Temperatursensor mit Widerstandstemperaturmessung (NTC¹⁵) verbaut, dieser hat einen Messbereich von -50 bis 60 °C und eine Messgenauigkeit von $\pm 0,2$ °C im, für die durchgeführten Versuche relevanten Bereich von -20 bis 50 °C.

Feuchtemessung

Die Feuchtemessung der Druckluft erfolgt mit einem Feuchtesensor des Herstellers Beko Technologies (Modellbezeichnung: METPOINT DPM). Es handelt sich um eine kapazitive Feuchtemessung mit einem Messbereich von -60 bis 30 °C_{DTP} und einer Messgenauigkeit von ± 1 K im Bereich von -10 bis 30 °C_{DTP}.

Ultraschallmessung

Die Messung des Ultraschalls, der durch die aus der Leckage austretende Druckluft erzeugt wird, erfolgt mit einem Luftschallsensor für den Ultraschallbereich des Herstellers Sonotec (Modellbezeichnung: Sonaphone). Der Ultraschallsensor arbeitet im Frequenzbereich von 20 bis 120 kHz und besitzt eine Auflösung von 1 dB.

Datenlogger

Zur Datensammlung wird ein Datenlogger des Herstellers CS Instruments verwendet. Hier werden alle Messsignale (analog/digital) erfasst, gebündelt und digital an den Prüfstandsrechner weitergeleitet. Lediglich das Ultraschallmikrofon, sowie das Volumenstrommessgerät VSM02 werden direkt an den Prüfstandsrechner angeschlossen, da diese inkompatibel mit den digitalen Protokollen des Datenloggers sind.

Die verwendeten Druck-, Temperatur- und Feuchtesensoren senden ein analoges Signal von 4 bis 20 mA zur Übermittlung der Messdaten. Diese Spanne der Stromstärke repräsentiert die jeweilige Spanne des Messbereichs der Sensoren, der Verlauf der Kurve ist linear. Die analogen Messsignale, werden im Datenlogger in ein digitales Ausgangssignal umgewandelt, hierbei ist eine zusätzliche Fehlertoleranz des Wandlungsschritts zu beachten, dieser beträgt $\pm 0,03$ mA $\pm 0,05$ % v.M.

Der Messfehler steigt hierdurch für alle analogen Sensoren. Für die verwendeten Drucksensoren bedeutet dies einen zusätzlichen Fehleraufschlag von $\pm 0,0198$ bar bis $\pm 0,0248$ bar, je nach Höhe des Messwerts. Die gesamte Messgenauigkeit für die Druckmessung, bestehend aus der Messgenauigkeit des Sensors und der des Datenloggers, liegt somit bei kleiner

¹⁵ NTC steht für Negative Temperature Coefficient. Es handelt sich um Materialien, deren Widerstand bei Temperaturerhöhung absinkt. Die Widerstandsänderung verhält sich proportional zur Temperaturdifferenz.

$\pm 0,075$ bar. Gleichermaßen verhalten sich auch die Messfehler für Temperatur und Luftfeuchte. Auf Grund der geringeren Bedeutung für die Messergebnisse sind diese hier nicht im Detail aufgeführt.

4.4 Automatisierung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine große Anzahl an Versuchen durchgeführt. Zudem sind hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Messungen gestellt, um eine Vergleichbarkeit und hohe Aussagekraft der Messwerte zu gewährleisten. Zudem sollen menschliche Einflussfaktoren bei der Versuchsdurchführung vermieden und eine möglichst große Anzahl von Messungen pro Tag erreicht werden.

Aus diesen aufgeführten Gründen wird eine Automatisierung des Prüfstands umgesetzt, welche durch die Digitalisierung des Prüfstands ermöglicht wird. Alle Sensorsignale werden, sofern nötig, in digitale Signale umgewandelt und digital ausgelesen. Eine eigens programmierte Lösung in LabView¹⁶ (LabVIEW 2016) ermöglicht die Zusammenführung aller Messdaten, sowie die Ansteuerung und Regelung des Prüfstands. Sie ist damit die Schnittstelle zur Automatisierung. Für die Arbeit existieren zwei Messaufgaben, die jeweils in eigenständigen Routinen programmiert sind. Hierbei handelt es sich um den Messablauf zur Ermittlung von Leckageströmen unterschiedlicher Prüfkörper, sowie den Messablauf zur Vermessung der Ultraschallsignale unterschiedlicher Prüfkörper.

Automatisierter Messablauf zur Ermittlung von Leckageströmen

Die gesamte Prüfstandssteuerung, Messwernerfassung und -Verarbeitung wird über eine eigens programmierte graphische Benutzeroberfläche realisiert, eine Darstellung der Benutzeroberfläche ist im Anhang B-3 zu finden. Für das Verständnis der Programmierung ist in Abb. 4-3 der Programmablaufplan¹⁷ der Prüfstandssteuerung zur Leckagestromermittlung dargestellt. Nach Start des Programms werden die Benutzerparameter eingegeben und eingelesen, sowie die Messwertaufzeichnung gestartet. Alle Sensoren werden hierzu sekundlich ausgelesen und die Messwerte in einen zusammenhängenden csv-File geschrieben. Bei der Benutzereingabe kann einer von zwei Modi ausgewählt werden:

Die Regelung des Prüfstands auf einen bestimmten Leckagedruck oder den Ablauf eines Messskripts, welches aus der Aneinanderreihung von beliebig vielen Leckagedrücken besteht. Beide Module werden im Anschluss detailliert vorgestellt. Nach Beenden des jeweiligen Moduls, durchläuft der Prüfstand eine automatisierte Abschaltsequenz, die diesen kontrolliert abschaltet.

¹⁶ LabView ist eine kommerzielle Softwarelösung zur graphischen Programmierung von (Mess-)Datenerfassungs- und Datenaufbereitungssystemen.

¹⁷ Der Programmablaufplan ist ein Fließbild zur Darstellung eines Algorithmus. Die Darstellung der Symbole erfolgt nach DIN 66001 (DIN 66001).

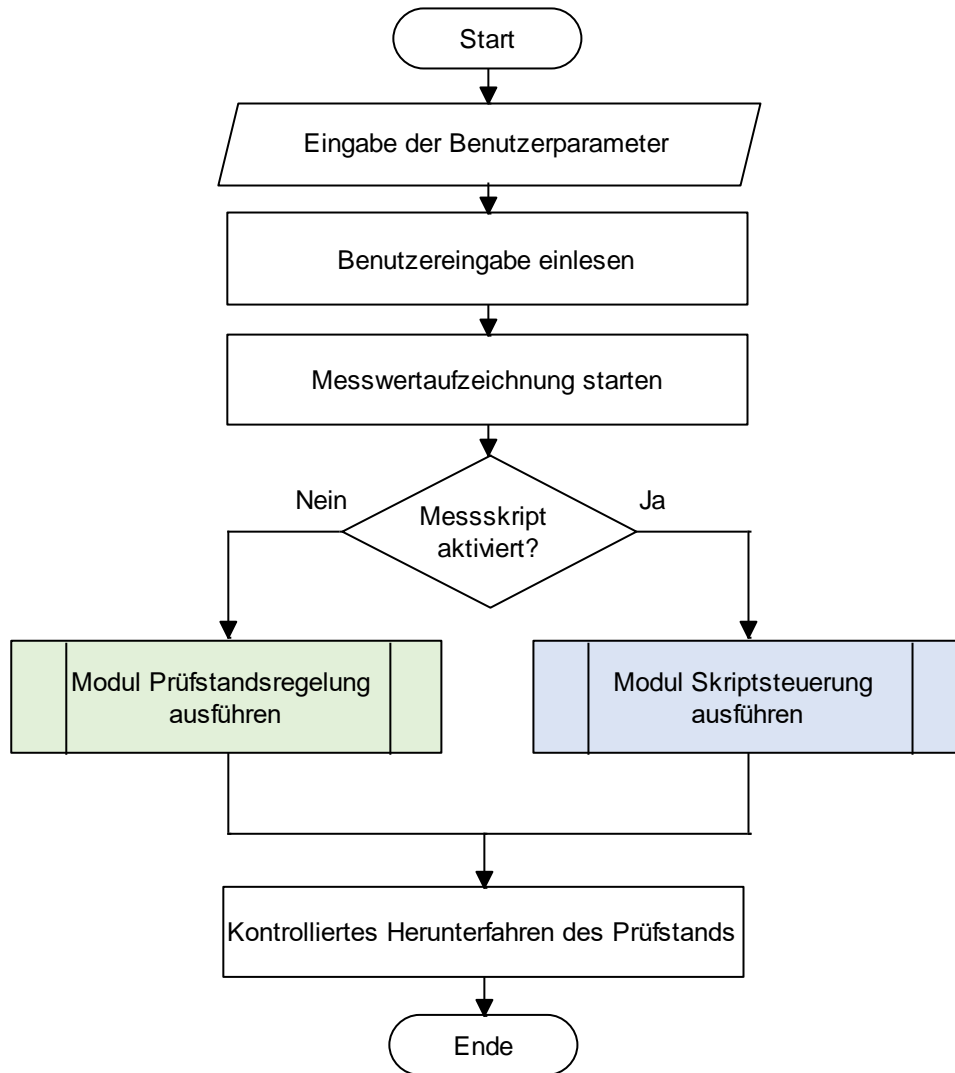


Abb. 4-3: Programmablaufplan der Prüfstandssteuerung zur Leckagestromermittlung

Das Modul „Prüfstandsregelung“ bildet das zentrale Element der Prüfstandssteuerung, es ist für die exakte und gleichmäßige Bereitstellung eines gewünschten Leckagedrucks verantwortlich. Der in Abb. 4-4 dargestellte Programmablaufplan skizziert die zugrundeliegende Logik. Das Modul selbst besteht aus einer Endlosschleife, welche nur durch einen Stoppbefehl des Benutzers beendet werden kann. In der Schleife wird bei aktiviertem Regler der aktuelle Leckagedruck sekundlich mit dem eingestellten Sollwert verglichen. Ist eine Abweichung vorhanden, so wird die Stellung des Proportionalventils angepasst. Der Leckagedruck wird somit dauerhaft nachgestellt, wodurch Druckschwankungen in der Druckluftversorgung des Prüfstands ausgeglichen werden.

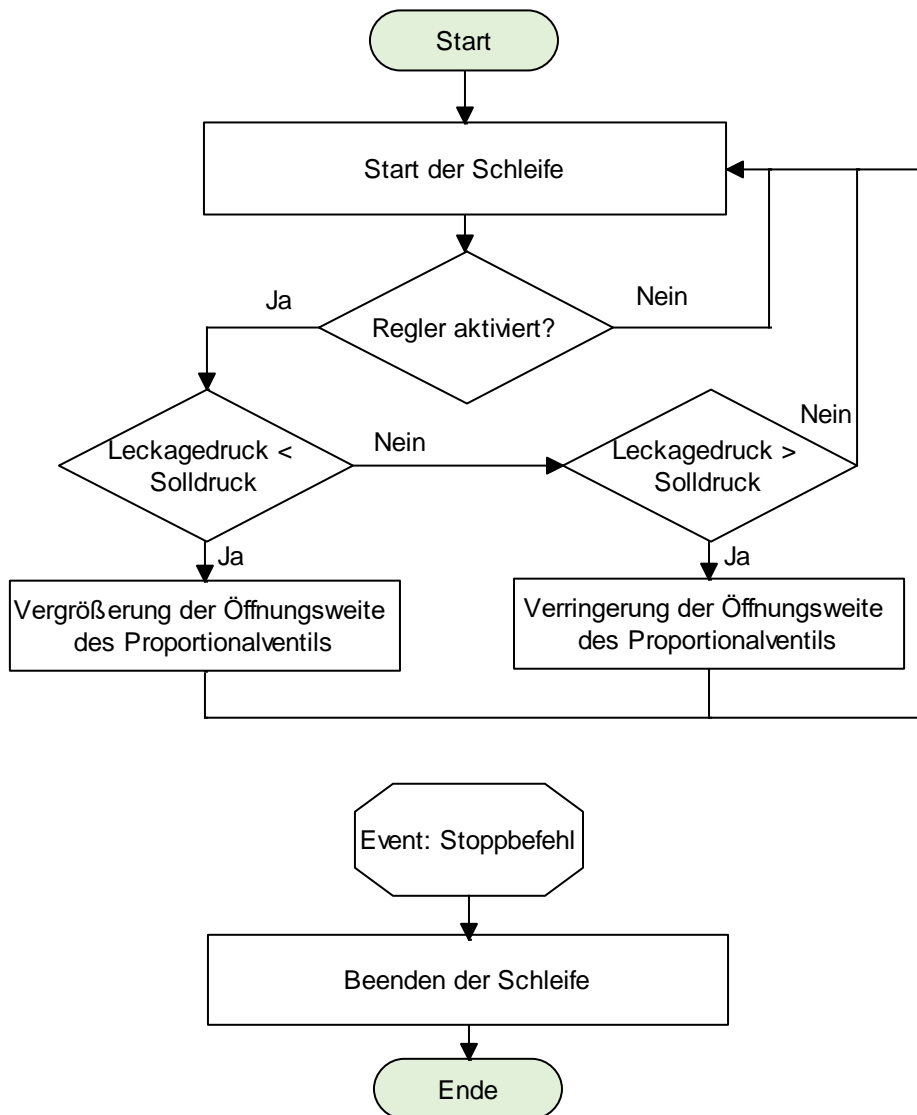


Abb. 4-4: Programmablaufplan des Moduls: Prüfstandsregelung

Das Modul „Skriptsteuerung“ ist das zentrale Element für die Automatisierung der Experimente. Es ermöglicht eine große Anzahl an reproduzierbaren Messungen mit vertretbarem Aufwand zu realisieren. Der Programmablaufplan des Moduls ist in Abb. 4-5 dargestellt und zeigt, dass das Messskript auf einer vielfachen Ausführung des Moduls „Prüfstandsregelung“ basiert. Zu Beginn des Moduls wird das Messskript eingelesen, dieses besteht aus einer beliebigen Anzahl an Druckstufen (p_n) von Leckagedrücken (Einheit: bar_ü) mit den jeweilig dazugehörigen Messintervallen (t_i) in Sekunden. Der Algorithmus ermittelt die Anzahl der eingestellten Druckstufen, diese repräsentieren die Häufigkeit der nachfolgenden Schleife. Die Schleife selbst ist einfach aufgebaut, zuerst wird die aktuelle Druckstufe (p_i) und die dazugehörige Dauer des Messintervalls (t_i) ermittelt. Im Anschluss wird das Zeitintervall gestartet und der Leckagedruck an das Modul „Prüfstandsregelung“ als Solldruck übermittelt. Ist das Ende des Messintervalls erreicht, wird die nachfolgende Druckstufe ermittelt und die Schleife startet erneut. Sind alle Druckstufen vermessen endet das Modul.

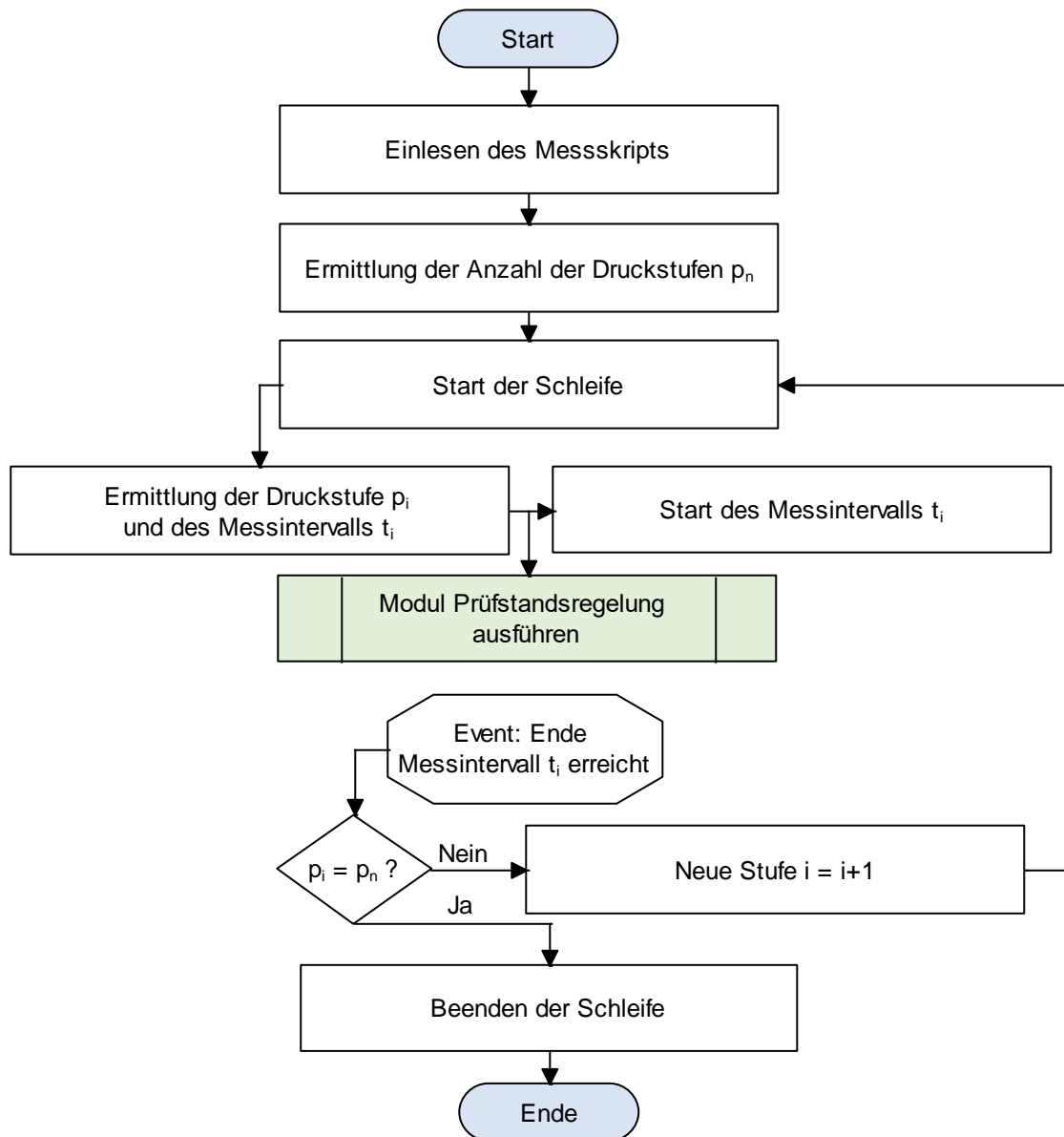


Abb. 4-5: Programmablaufplan des Moduls Skriptsteuerung

Automatisierter Messablauf zur Bestimmung der Ultraschallsignale von Leckagen

Die Messung von Ultraschallsignalen von Druckluftleckagen ist ebenfalls mit eigens geschriebenen Routinen über das Programm LabView automatisiert. Eine schematische Darstellung des Algorithmus ist in Abb. 4-6 als Programmablaufplan dargestellt. Nach Start des Programms werden die Benutzerparameter eingegeben und eingelesen. Der Algorithmus ermittelt die Anzahl der Messwinkel (w_n) und den Messabstand, welcher als direkter Befehl an den betreffenden Elektromotor¹⁸ gesendet und ausgeführt wird. Im Anschluss startet eine Schleife zur automatisierten Messwertermittlung. Zu Beginn der Schleife wird der aktuelle Messwinkel

¹⁸ Bei den verwendeten Elektromotoren handelt es sich um Schrittmotoren mit integriertem Encoder des Herstellers Nanotec (Typ: PD4E). Die Schrittwinkelgenauigkeit beträgt $\pm 0,09^\circ$.

(w_i) ermittelt und als Befehl an den betreffenden Elektromotor gesendet und ausgeführt. Zeitgleich wird der Leakagestrom gemessen. Nach Ankunft des Mikrofons am Sollwinkel wird 2 s gewartet, um etwaige Schwingungen des Mikrofons auszuschließen. Im Anschluss werden drei gleiche Messungen des Schalls mit einer Dauer von jeweils 0,5 s durchgeführt, diese werden intern gemittelt. Aus den, auf diese Weise gewonnenen Messdaten, wird der Effektivwert des Schalldrucks der Messung bestimmt und das Signal mittels FFT in den Frequenzbereich transformiert. Zur Abspeicherung der Messdaten werden die Ergebnisse der Transformation zu Frequenzblöcken von je 1 kHz aggregiert. Zusätzlich werden der Schalldruck, der Messwinkel, der Messabstand, sowie der Leakagestrom abgespeichert. Die Schleife und damit auch das Programm enden nach Abschluss der Messung des letzten Winkels.

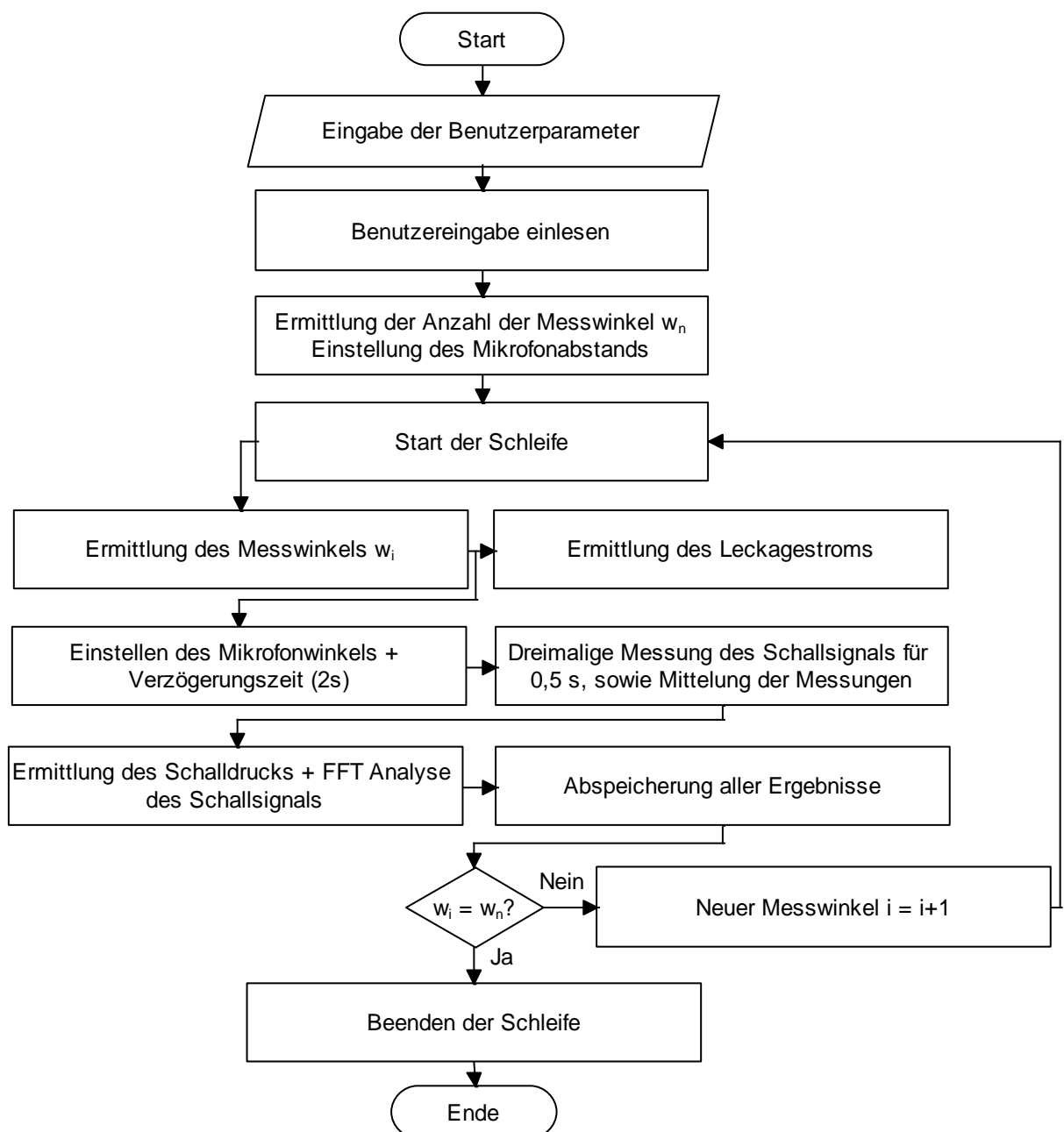


Abb. 4-6: Programmablaufplan zur Bestimmung der Ultraschallemission von Leckagen

5. Methodisches Vorgehen

In Anlehnung an das zentrale Forschungsziel (vgl. Kapitel 1.1) erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die systematische Analyse von Druckluftleckagen. Neben der bereits in Kapitel 3 dargelegten, theoretischen Betrachtung von Druckluftleckagen, werden diverse Druckluftleckagegeometrien auf dem Prüfstand vermessen und analysiert. Zudem wird die Eignung von Ultraschallmikrofonen zur indirekten Leckagequantifizierung überprüft.

Das methodische Vorgehen der vorliegenden Arbeit besteht aus den experimentellen Vorgehensweisen zur Bestimmung von Leckageströme realer und idealer Leckagen (Kapitel 5.1 & 5.2), sowie der Vorgehensweise zur indirekten Leckagequantifizierung mittels Ultraschall (Kapitel 5.3).

5.1 Vorgehensweise zur experimentellen Bestimmung von Leckageströmen idealer Leckagen

Die wissenschaftliche und nicht-wissenschaftliche Literatur gibt Leckagedurchflüsse anhand von definierten Geometrien an. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um kreisrunde Löcher mit definiertem Durchmesser. In Abb. 2-1 (Kapitel 2.3.2, Seite 13) wird bereits auf die großen Abweichungen der einzelnen Quellen untereinander hingewiesen.

Um die Messwerte dieser Arbeit einzuordnen und zu vergleichen, werden ideale Leckagegeometrien präzise gefertigt, die Qualität der Fertigung überprüft und die Leckageströme bestimmt. Diese gefertigten Leckagen werden als ideale Leckagen bezeichnet, da sie im Vergleich zu Leckagen in der Realität, eindeutig definierte Geometrien aufweisen.

Die Vermessung der idealen Leckagen hat neben der Vergleichbarkeit mit der Literatur weitere Vorteile, so kann anhand der definierten Geometrie die Funktionsfähigkeit des Prüfstands, sowie die Reproduzierbarkeit der Messwerte überprüft werden. Die idealen Leckagen erleichtern zudem die Evaluation von Einflussfaktoren (z.B. Druck, Temperatur, ...) auf den Leckagestrom, da eine Geometrieänderung durch die Änderung der Rahmenbedingungen ausgeschlossen werden kann.

5.1.1 Herstellung der Prüfkörper und Qualitätskontrolle¹⁹

Die Herstellung der idealen Leckagen ist von zentraler Bedeutung für die späteren Arbeitsschritte, da die hier hergestellten Prüfkörper die Untersuchungsobjekte für alle weiteren Schritte darstellen. Als Prüfkörper werden die jeweiligen gefertigten, zu prüfenden Leckagegeometrien inklusive der eventuell benötigten Anschlüsse an den Prüfstand bezeichnet. Die

¹⁹ Ausschnitte wurden bereits in (Unger et al. 2021) veröffentlicht

Prüfkörper sollen deshalb folgende Eigenschaften aufweisen: Hohe Fertigungsgenauigkeit; unkomplizierte Montage am Prüfstand; leichte Bearbeitung des Werkstoffs; sowie eine hohe Reproduzierbarkeit des Leckagestroms ($\hat{=}$ hohe Reproduzierbarkeit der Fertigung).

Im Fall der idealen Leckagen werden hierzu quadratische Aluminiumlochplatten mit den Maßen (Länge x Breite x Dicke) 98.8 mm x 98.8 mm x 2 mm als Rohlinge, für die zu untersuchenden Leckagegeometrien, verwendet. Zur Befestigung am Prüfstand mittels Flanschverbindung, besitzen die Rohlinge (vgl. Abb. 5-1) sechs konzentrisch angebrachte Löcher. Die tatsächliche Leckagestelle wird in der Mitte der Platte eingebracht. Bei den geometrischen Formen handelt es sich um kreisrunde Löcher, sowie um Langlöcher.

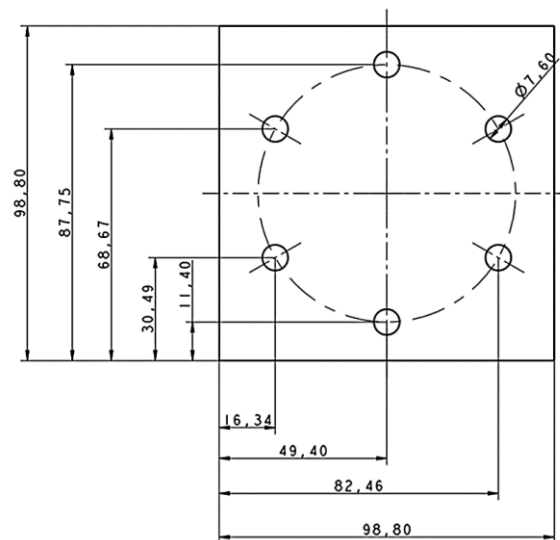


Abb. 5-1: Technische Zeichnung der Rohlinge für die idealen Leckagen (Maße in mm).
Quelle: (Gewilli 2019)

Die Fertigung der kreisrunden Löcher erfolgt mittels Reibahlen. Das Reiben ist ein hochgenaues Fertigungsverfahren zur Herstellung von kreisrunden Löchern. Hierzu wird zuerst eine Vorbohrung, welche 0.1 mm kleiner als das gewünschte Maß ist, gefertigt. In einem zweiten Schritt wird diese Bohrung, mit Hilfe der Reibahle nachbearbeitet (gerieben) und dadurch das gewünschte Nennmaß hergestellt. Für Bohrungen wurde ein Standbohrmaschine mit Präzisionsbohrfutter verwendet. Der Rundlauf des Bohrfutters wurde vor der Fertigung messtechnisch überprüft. Die Fertigung von Bohrungen mittels Reibahle hat sehr geringe Toleranzen. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Reibahlen entsprechen der ISO-Toleranzklasse H7. Dies entspricht einer maximalen Abweichung des Bohrungsdurchmessers von + 0.01 mm des Nennmaßes.

Nach diesem Herstellungsverfahren werden kreisrunde Leckagegeometrien folgender Nennmaße gefertigt: 1,0 mm, 1,5 mm, 1,6 mm, 1,7 mm, 1,8 mm, 1,9 mm, 2,0 mm, 2,5 mm und 3,0 mm.

Langlochgeometrien können nicht mit dem gleichen Fertigungsverfahren hergestellt werden, sie werden gefräst. Das Fräsen besitzt größere Toleranzen als das Reiben und macht zusätzliche Nachbearbeitungsschritte, wie z.B. das Entfernen von Graten und Spänen nötig (Verwendung von Präzisionsfeilen und Schleifpapier). In Abb. 5-2 ist ein stark vergrößertes, belichtetes Bild einer Langlochleckage vor und nach der Nachbearbeitung abgebildet. Der Vergleich zeigt deutlich die Ungenauigkeiten des Fräsens und den Eingriff in die geometrischen Verhältnisse durch die Nachbearbeitung. Aus diesem Grund ist die Berechnung der Leckagefläche einer gefrästen Langlochgeometrie auf Basis der Fertigungsparameter zu ungenau.

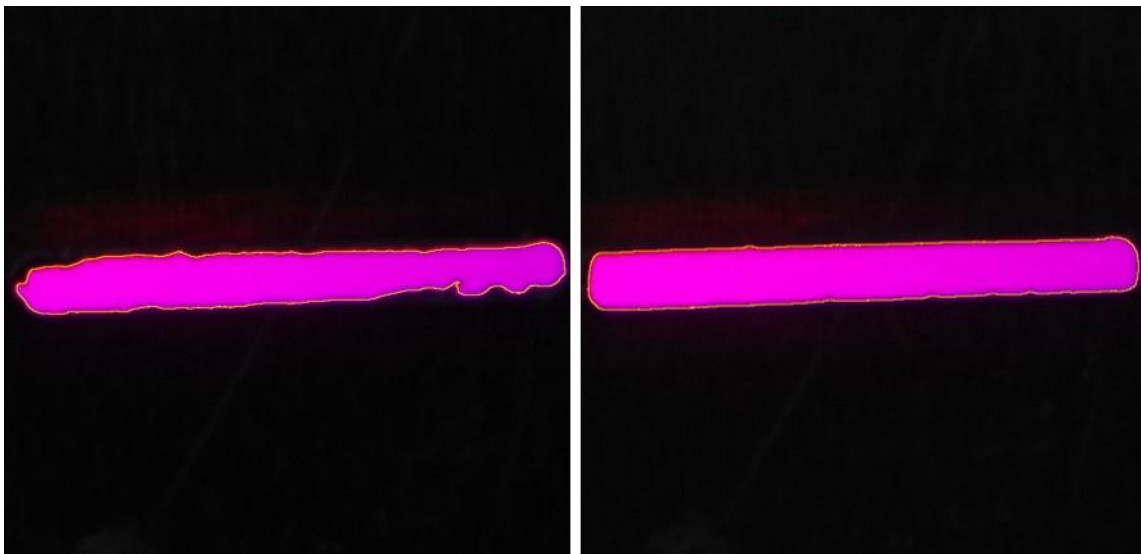


Abb. 5-2: Ideale Leckage 08-0895-01 vor (links) und nach (rechts) der Nachbearbeitung

In dieser Arbeit wurde aus diesem Grund ein neues Verfahren der Flächenbestimmung entwickelt und angewendet. Das Verfahren beruht auf der Auswertung digitaler Fotografien der Prüfkörper. Hierzu wird ein Leckageprüfkörper rückseitig belichtet und unterhalb eines plan ausgerichteten Kameraobjektives zentriert. Die Belichtungszeit der Kamera wird so kurz eingestellt, dass ausschließlich die Leckage auf Grund der starken Lichtquelle auf dem entstehenden Bild sichtbar ist. Das auf diese Weise erzeugte Bild, wird mit Hilfe der Software ImageJ (ImageJ 2019) ausgewertet.

Im Rahmen der Auswertung wird ein Helligkeitsabgleich der existierenden Pixel des Bilds durchgeführt und die Pixel ab einem einstellbaren Schwellenwert²⁰ gezählt. Auf diese Weise wird die Größe der Leckagefläche in Pixeln bestimmt. Die Umrechnung der Pixelanzahl in eine tatsächliche Fläche erfolgt mit Hilfe der Vermessung einer bekannten Fläche nach dem selbi-

²⁰ Auf Grund der rückseitigen Beleuchtung des Prüfkörpers, ist der Helligkeitsunterschied der Bildpunkte innerhalb und außerhalb der Leckagefläche sehr groß. Über eine Zusatzfunktion des Programms kann angezeigt werden, welche Pixel den Schwellenwert erreichen. Der Schwellenwert wurde so eingestellt, dass alle farbigen Pixel der Leckagefläche gezählt werden.

gen Verfahren. In dieser Arbeit werden hierfür geriebene Bohrungen der Größe 4 mm verwendet. Die Genauigkeit des dargestellten Verfahrens ist von folgenden Faktoren abhängig: Der Gesamtanzahl der Pixel der Kamera, der Positionierung des Prüfobjekts, sowie der Größe der zu messenden Fläche und die damit vorhandene Anzahl an auswertbaren Pixeln. Ausführliche Versuchsreihen haben gezeigt, dass mit Genauigkeiten von circa 2 % im Fall von kleinen Flächen, bzw. kleiner 1 % im Fall von größeren Flächen gerechnet werden kann. Eine detailliertere Aufstellung der Versuchsreihen ist im Anhang C zu finden.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden Prüfkörper mit sieben unterschiedlichen Langlochgeometrien hergestellt. Das Verfahren zur Flächenmessung wurde eigenständig entwickelt, die Durchführung der Flächenmessungen erfolgten im Rahmen der Bachelorarbeit von Herrn Sahin (Sahin 2019).

Seriennummern der idealen Prüfkörper

Um die Ergebnisse den Prüfkörpern eindeutig zuweisen zu können, erhält jeder Prüfkörper im Rahmen der Fertigung eine individuelle Seriennummer. Die Seriennummer wird in die Vorderseite der Leckageplatten geprägt. Die Seriennummern beinhalten Informationen zur Leckagegeometrie des Prüfkörpers (vgl. Abb. 5-3 & Abb. 5-4).

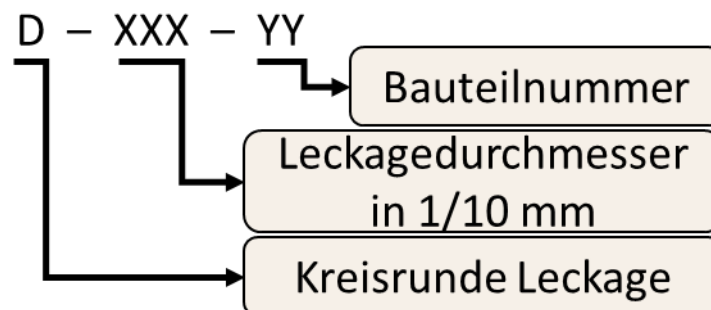


Abb. 5-3: Seriennummer idealer Leckagen mit kreisrunder Geometrie

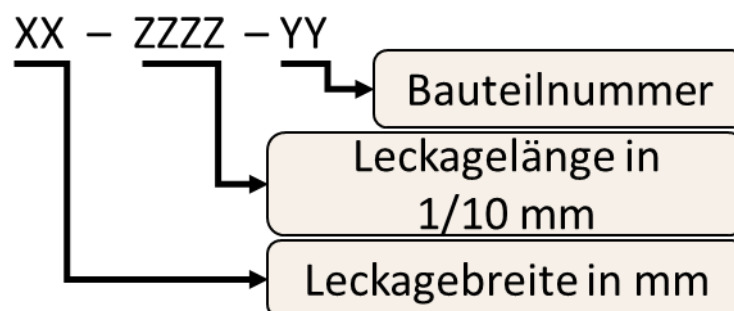


Abb. 5-4: Seriennummer idealer Leckagen mit Langlochgeometrie

5.1.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der Experimente von idealen Leckagen läuft weitgehend automatisiert ab. Die Grundlagen der Automatisierung des Prüfstands sind in Kapitel 4.3 erläutert. Zuerst wird der zu untersuchende Prüfkörper an den Prüfstand montiert, hierbei wird die Seite mit der eingepprägten Seriennummer entgegengesetzt zur Flussrichtung ausgerichtet. Auf die Rückseite des Prüfkörpers wird eine Lochblende aus 5 mm starkem Aluminium angebracht (vgl. Abb. 5-5). Dies dient der flächigen Anpressung des Prüfkörpers auf die Dichtmatte und sorgt für eine vollständige Abdichtung des Prüfkörpers (Flanschverbindung am Prüfstand).

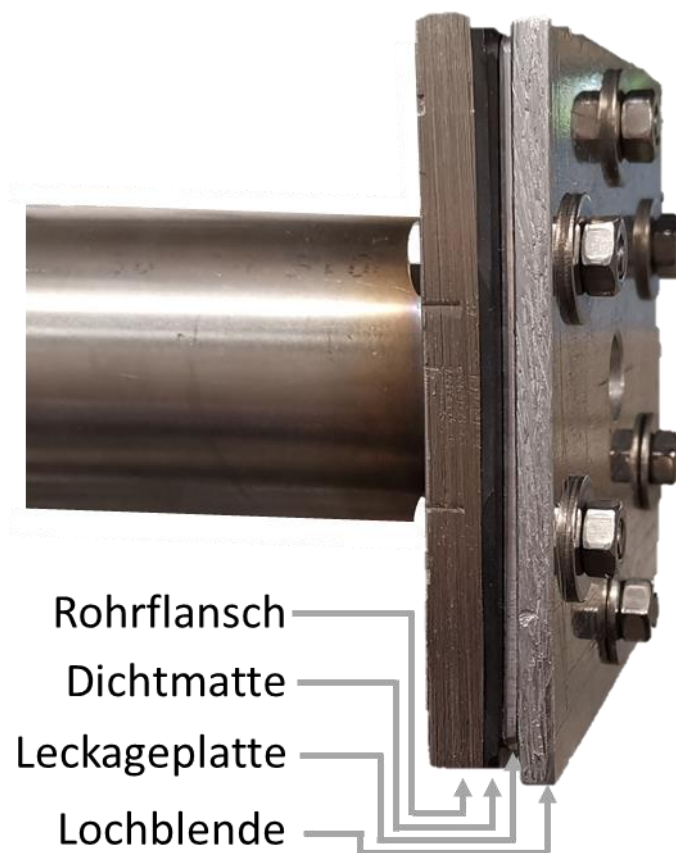


Abb. 5-5: Montierter Prüfkörper, inkl. Dichtmatte und Lochblende

Im Anschluss wird das digitale Prüfprotokoll gestartet. Das Prüfprotokoll ist für alle Prüfkörper und Versuchsdurchläufe gleich, es beinhaltet Messungen bei stabilen Betriebsbedingungen und ist in Abb. 5-6 dargestellt. Als Maß für den erreichten, stabilen Zustand dient die Fluktuation des Leckagedrucks. Im stabilen Zustand ist die mittlere Abweichung des eingestellten Drucks kleiner als $\pm 0,005$ bar, die Standardabweichung ist typischerweise kleiner $\pm 0,01$ bar. Da die Messwerte näherungsweise normalverteilt vorliegen, sind 99 % der Messwerte (entspricht $2,574 \sigma$) im Bereich $\pm 0,02574$ bar um das arithmetische Mittel (= Solldruck) verteilt.

Der Leckagedruck wird bei der Versuchsdurchführung schrittweise von 4 bar_i bis 8 bar_i in 0,5 bar Schritten erhöht. Das Einstellen des Leckagedrucks inklusive der Wartezeit, bis stabile Betriebsbedingungen erreicht sind, dauert 30 s, anschließend startet die Aufzeichnung der Messwerte für 150 s. Im Anschluss wird der nächste Leckagedruck eingestellt. Ein Gesamtdurchlauf des Prüfprotokolls dauert somit 27 min. In einigen Fällen wird ein verkürztes Protokoll verwendet, dieses ist äquivalent aufgebaut, vermisst jedoch nur die Druckstufen 5 bis 7 bar_i und verkürzt damit die Prüfdauer auf 15 min. Um fluktuierende Randbedingungen abzudecken und etwaige Ungenauigkeiten in der Messung zu identifizieren, wird jeder Prüfkörper dreimal hintereinander vermessen. Sofern Fehler auftreten, z.B. durch eine Sicherheitsabschaltung des Volumenstrommessgeräts, wird der Durchgang wiederholt, sodass für die Auswertung stets drei Durchläufe zur Verfügung stehen.

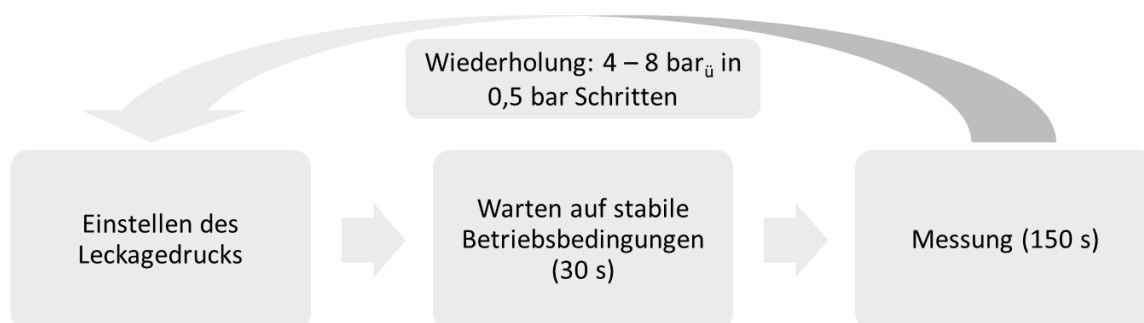


Abb. 5-6: Ablauf des Prüfprotokolls zur Vermessung von idealen Leckagen

Die Versuche zur Untersuchung des Einflusses von Temperatur, sowie Wassergehalt der Druckluft (vgl. Kapitel 6.1.1), erfordern zusätzliche Schritte im Versuchsablauf.

Für die Versuche zum Temperatureinfluss der Druckluft auf den Leckagestrom, wird die Druckluft durch externe Wärmezufuhr, mit Hilfe eines Heißluftgebläses, auf eine konstante Temperatur²¹ von circa 40 °C erwärmt. Das Gebläse erwärmt dabei ein Stück der Rohrleitung, welches sich circa 80 cm vor dem Prüfkörper befindet. Der Versuchsablauf ist ansonsten identisch.

Der Prüfstand wird mit getrockneter Druckluft versorgt. Die Trocknung erfolgt in der Druckluftstation mittels Kältetrockner und bereitet Druckluft auf einen Drucktaupunkt von circa 7 °C_{DP} auf. Hierdurch kann eine Kondensation von Wasser im Prüfstand ausgeschlossen werden, was vor allem dem Schutz bzw. der Beeinflussung der Messgenauigkeit einiger Mess-

²¹ Die Regelung der Drucklufttemperatur erfolgt manuell über die Einstellung der Heizleistung des Heißluftgebläses in Abhängigkeit der sekundlich erfassten Leckagetemperatur (Schwankung der Leckagetemperatur während der Messung: $\pm 0,4$ °C).

geräte dient. Für die Versuche zum Einfluss des Wassergehalts der Druckluft auf die Leckagemenge, wird der Kältetrockner überbrückt, wodurch ungetrocknete Druckluft am Prüfstand bereitsteht. Der Versuchsablauf ist ansonsten identisch.

5.1.3 Versuchsauswertung

Die Auswertung der im Rahmen der Versuchsdurchführung erzeugten Messdaten ist einheitlich strukturiert, da die Nachvollziehbarkeit der Messung und Versuchsauswertung von besonderem Interesse ist. Durch die nachfolgend erläuterte Auswerteroutine wird die größtmögliche Genauigkeit und Transparenz der Messergebnisse sichergestellt.

Die Versuchsauswertung (vgl. Abb. 5-7) ist in zwei Arbeitsvorgänge aufgeteilt: der „Auswertung eines (einzelnen) Prüfkörpers“ und der anschließenden „Auswertung einer Leckagegeometrie“.

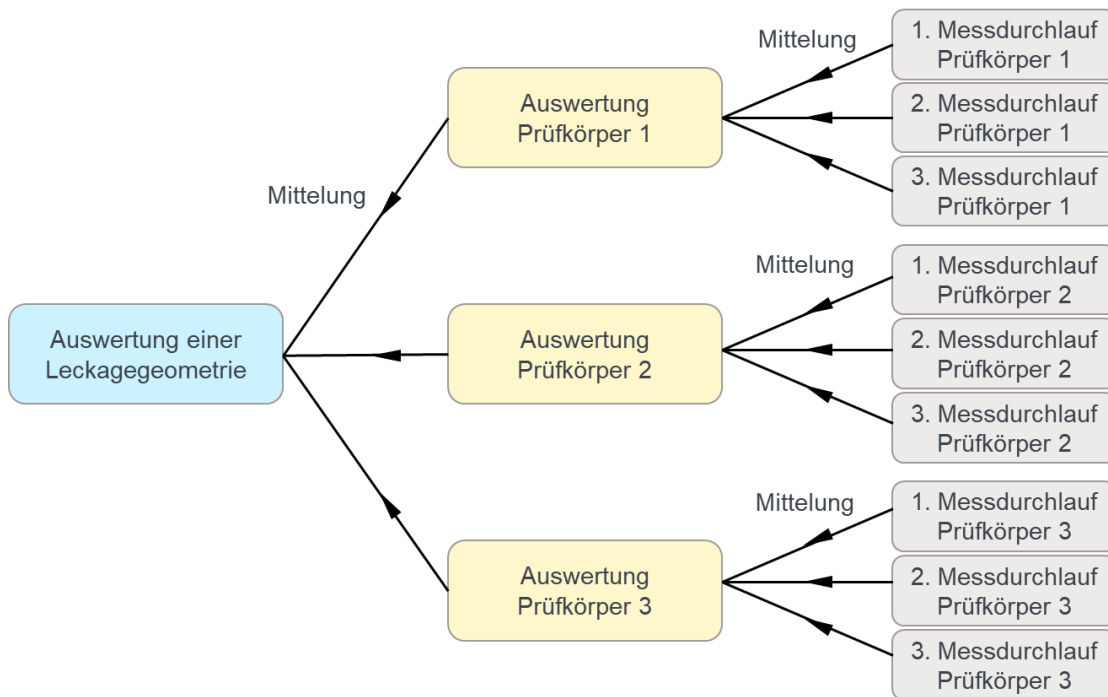


Abb. 5-7: Schematische Darstellung der Versuchsauswertung von idealen Leckagen

Die Einzelauswertung eines Prüfkörpers besteht aus der Berechnung des arithmetischen Mittelwerts, sowie der Standardabweichung von Leckagestrom, Leckagedruck, sowie den weiteren Sensordaten (wie z.B. Leckagetemperatur, Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, ...), für jede gemessene Solldruckstufe. Durch die sekundliche Messwertaufzeichnung basieren die Mittelwerte und Standardabweichungen auf 150 Messwerten pro Sensor.

Das Ergebnis eines Prüfkörpers mit definierter Seriennummer wird durch die Bildung des arithmetischen Mittelwerts von drei Einzelauswertungen bestimmt. Durch die Mittelung der drei Durchläufe können kleinere Abweichungen bei der Versuchsdurchführung, wie z.B. leicht schwankende Umgebungsbedingungen, ausgeglichen werden.

Um das Vorgehen zu verdeutlichen, sind in Tabelle 5-1 die drei Durchläufe, das arithmetische Mittel, sowie die maximale absolute Abweichung eines Durchgangs vom Mittelwert der Leckageplatte D-030-03 gelistet. Die größte Abweichung beträgt 0,14 %, was eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuche nachweist und das Vorgehen der Auswertung zum Ausgleich kleiner, umgebungsbedingter Schwankungen bestätigt. Bei dem angegebenen Leckagedruck handelt es sich um Messwerte, die die gute Regelung des Prüfstands bestätigen. Abweichungen im Leckagedruck treten erst in der dritten Nachkommastelle auf.

Tabelle 5-1: Leckageströme aller Durchläufe, sowie arithmetischer Mittelwert von D-030-03

Leckage- druck [bar _a]	Leckagestrom [l _N /min]				Max. Abwei- chung [%]
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwert	
4,00	364,12	364,24	363,66	364,01	0,10
4,50	401,31	401,28	400,72	401,10	0,10
5,00	437,84	438,59	437,47	437,97	0,14
5,50	474,45	474,46	474,54	474,49	0,01
6,00	512,36	511,67	511,41	511,81	0,11
6,50	548,16	548,29	547,49	547,98	0,09
7,00	584,80	584,65	584,87	584,78	0,02
7,50	621,95	622,19	621,32	621,82	0,08
8,00	657,80	657,61	658,08	657,83	0,04

Schwankungen der Umgebungsbedingungen sind unvermeidbar. In Tabelle 5-2 sind sowohl die Spannweiten der Absolutwerte der Versuchsbedingungen, sowie die Schwankungen während einer Versuchsreihe gelistet. Die Schwankungen während einer Versuchsreihe sind sehr gering und können vernachlässigt werden, auch die längerfristigen Schwankungen sind gering. Auf eine Auflistung der jeweiligen Umgebungsbedingungen zu jeder durchgeführten Messung deshalb verzichtet.

Tabelle 5-2: Schwankungen der Versuchsbedingungen

Parameter	Spannweite der Absolut- werte aller Versuche	Schwankung während einer Versuchsreihe
Umgebungstemperatur	21 – 23 °C	± 0,1 °C
Drucklufttemperatur	22 – 24 °C	± 0,5 °C
Umgebungsdruck	950 – 980 mbar	± 1 mbar
Drucktaupunkt	5 – 8 °C _{DP} (≅ 6 – 8 g/m _N ³)	± 2 °C _{DP}

Zur Auswertung einer Leckagegeometrie (vgl. Abb. 5-7, S. 62) werden die Ergebnisse von drei Leckageplatten mit gleichem Fertigungsziel, z.B. kreisrundes Loch mit 3 mm Durchmesser, verwendet. Analog zur Einzelauswertung besteht die Auswertung einer Leckagegeometrie ebenfalls aus der Berechnung des arithmetischen Mittelwerts, sowie der Standardabweichung aller Messwerte. Der auf diese Weise ermittelte Leckagestrom bildet das Endergebnis für eine Leckage mit idealisierter Geometrie. Das Endergebnis besteht folglich aus insgesamt neun Versuchsdurchläufen an drei baugleichen Prüfkörpern mit unterschiedlicher Seriennummer.

In Abb. 5-8 sind exemplarisch die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper, sowie das Endergebnis für ideale Leckagen mit 3 mm kreisrundem Loch dargestellt. Die Abweichungen der Einzelergebnisse untereinander, sind auf Fertigungstoleranzen zurückzuführen, fallen jedoch mit einer Höhe von kleiner als 0,8 % sehr gering aus.

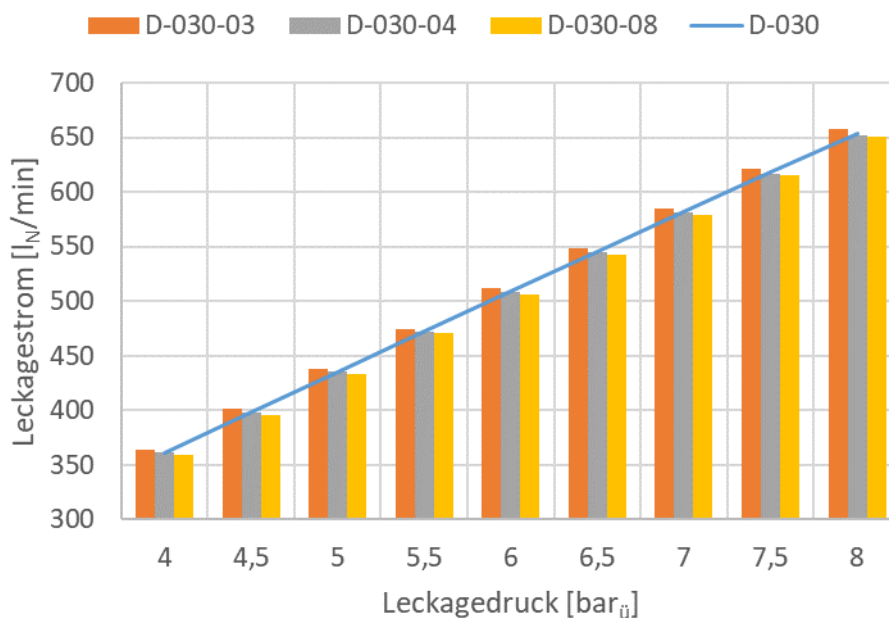


Abb. 5-8: Leckageströme der Einzelergebnisse, sowie des Endergebnisses einer kreisrunden Leckage mit 3 mm Durchmesser

Auf Grund der großen Zahl an auszuwertenden Messdaten ist die Auswertung, unter Verwendung des Programms Matlab (Matlab R2018a), automatisiert. Dies ermöglicht eine schnelle und präzise Auswertung der Messdaten. Um die automatisierte Auswertung von fehlerhaften Messdaten auszuschließen, wird bei jeder Datenauswertung eine Kontrollgrafik angezeigt und abgespeichert. Abb. 5-9 zeigt eine solche Kontrollgraphik. Sie zeigt den Verlauf des gemessenen Leckagedrucks, sowie den Verlauf des Leckagestroms. Die senkrechten Balken zeigen den für die Auswertung betrachteten Gesamttraum an. Treten Probleme am Prüfstand, z.B. durch einen Versorgungsengpass des Prüfstands mit Druckluft oder die Sicherheitsabschaltung des Volumenstrommessgeräts auf, so kann dies anhand der Darstellung nachvollzogen und der Versuch wiederholt werden.

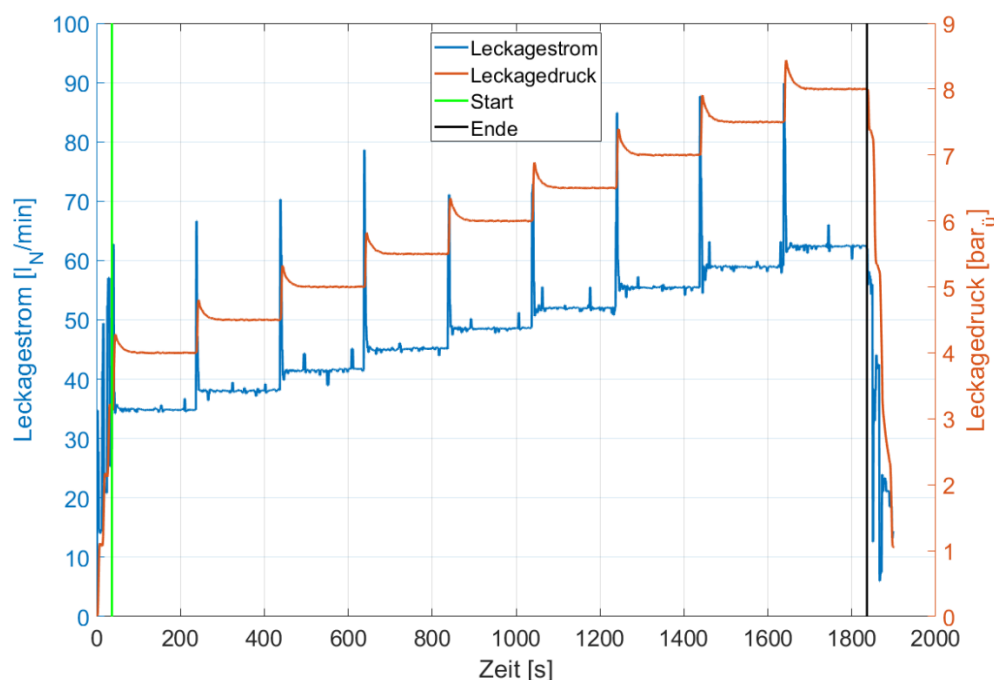


Abb. 5-9: Beispiel einer automatisierten Kontrollgrafik bei der Datenauswertung

Im Rahmen dieser Arbeit werden eine große Anzahl an unterschiedlichen Prüfkörpern experimentell untersucht. Im Hinblick auf einen effizienten zeitlichen Ablauf, wurde die oben dargestellte Methodik der Versuchsauswertung, sowie des Versuchablaufs entwickelt. Sie stellt den bestmöglichen Kompromiss aus der Genauigkeit der Messergebnisse, sowie der dafür benötigten Zeit dar. Vorab wurden dazu diverse Testläufe durchgeführt, um folgende Gegebenheiten zu überprüfen:

- Die Dauer bis ein stabiler Zustand bei den Messungen erreicht wird, um präzise Messergebnisse zu erhalten
- Die Abweichung der Messwerte bei mehreren Durchläufen, um eine sinnvolle Anzahl an Messdurchläufen für sichere Messergebnisse zu erhalten.

Der erste Punkt wurde mit Hilfe von 40-minütigen Messungen des Leckagestroms an einer einzelnen Solldruckstufe überprüft. Wie in Abb. 5-10 zu sehen ist, wird im Bereich des Anfahrens des Solldrucks kein stabiler Volumenstrom gemessen, dieser Bereich ist in der Abbildung rot hinterlegt. Im Anschluss werden stabile Messergebnisse erzielt (hier grün dargestellt), die Messpunkte weichen nur geringfügig voneinander ab und sind um den Mittelwert normalverteilt. Die feinen Schwankungen in den einzelnen Messpunkten im grünen Bereich sind zu großen Teilen auf die permanente Nachregelung des Leckagedrucks zurückzuführen. Die benötigte Zeit zum Erreichen des stabilen Zustands der Messung, ist abhängig vom Prüfkörper und den eingestellten Regelungsparametern, ist jedoch stets kleiner 30 s. Für die Auswertung wer-

den die Messwerte ab 50 s bis 200 s herangezogen, wodurch einerseits der stabile Zustand sichergestellt, andererseits ausreichend Messwerte für die Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung und somit belastbaren Messwerten vorliegen. Das Messintervall für die Auswertung ist in der Abbildung in Form von zwei senkrechten schwarzen Linien angegeben.

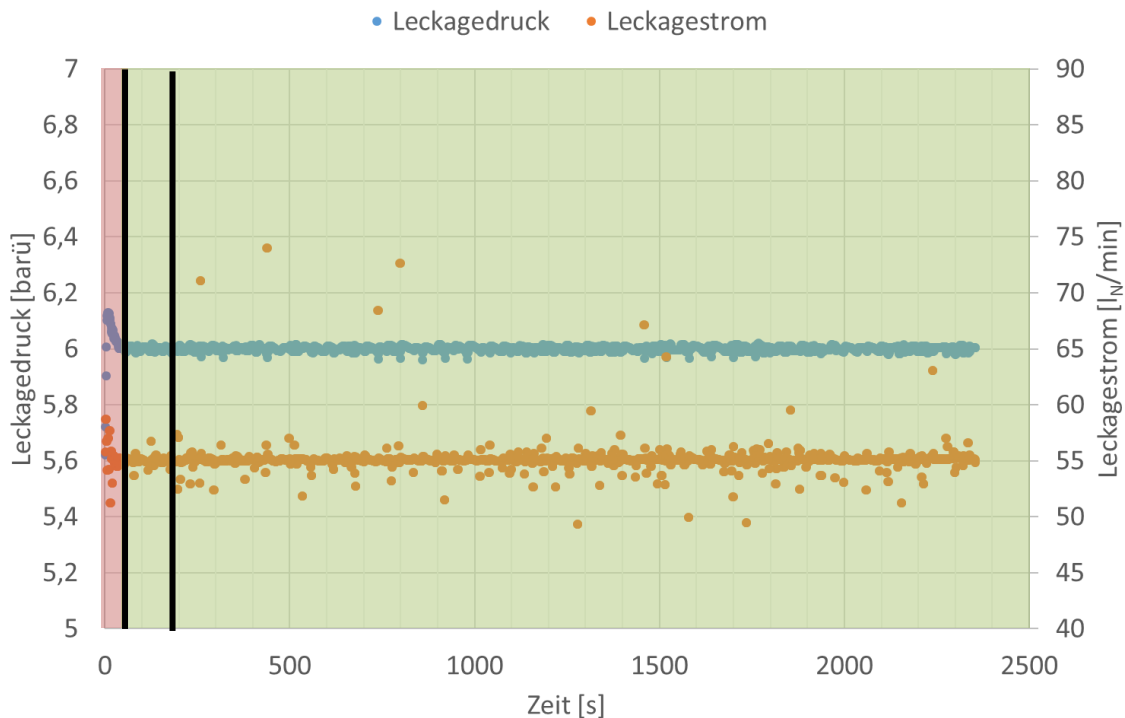


Abb. 5-10: Leckagestrom und Leckagedruck einer Solldruckstufe über 15 min

Der zweite Punkt aus der obigen Aufzählung wurde mit Hilfe von Messreihen mit 25 Versuchsdurchläufen je Prüfkörper untersucht. Abb. 5-11 zeigt exemplarisch die Ergebnisse des Prüfkörpers D-015-01 bei den Druckstufen 5, 6 und 7 bar_ü. Die leichten Schwankungen der Messergebnisse der einzelnen Versuchsdurchläufe sind hauptsächlich auf die schwankenden Umgebungsbedingungen wie z.B. Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur zurückzuführen. Da für die Durchführung des Experiments das Standard Versuchsprotokoll ausgewählt wurde, lag die Gesamtlaufzeit bei circa 12,5 h, was die fluktuierenden Umgebungsbedingungen erklärt. Die maximale Abweichung eines einzelnen Durchlaufs vom Mittelwert der 25 Durchläufe beträgt 0,5 %. Der Mittelwert der ersten drei Durchläufe weicht von diesem Mittelwert jedoch weniger als 0,2 % ab. Eine zusätzliche Erhöhung der Versuchsdurchläufe verringert die Abweichung nur marginal, weist jedoch einen hohen Zeitaufwand auf, weshalb die Auswertung von drei Versuchsdurchläufen das Optimum darstellt.

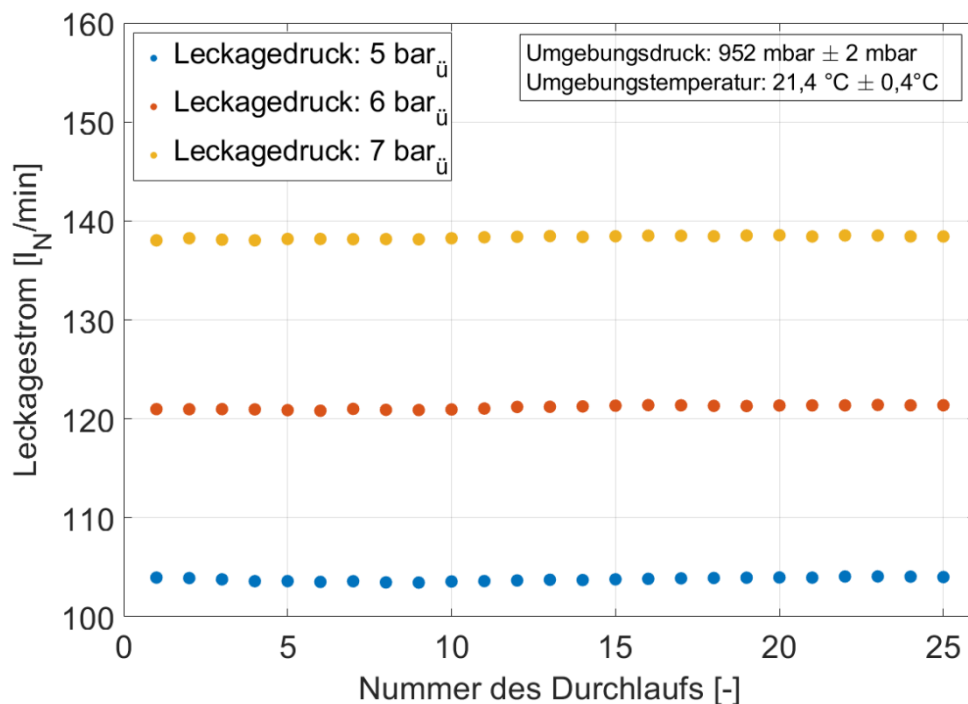


Abb. 5-11: Leckagestrom bei 25 Läufen des Prüfkörpers D-015-01 bei unterschiedlichen Leckagedrücken

5.2 Vorgehensweise zur experimentellen Bestimmung von Leckageströmen realer Leckagen

Die Geometrien von real vorkommenden Druckluftleckagen sind deutlich komplexer, als die bereits angesprochenen idealisierten Leckagen. In der Realität ist ein großer Anteil der Druckluftleckagen im „letzten Drittel“ des Druckluftnetzes zu finden, da hier die Bauteile größeren bzw. häufigeren Schwingungen und Bewegungen ausgesetzt sind und somit mehr Verschleiß aufweisen. Zudem sind in diesen Bereichen des Druckluftnetzes eine größere Anzahl an Verbindungsstellen zu finden und es werden häufiger Änderungen an den Abnahmestellen vorgenommen, wodurch neben erhöhtem Verschleiß auch fehlerhafte, dauerhafte Provisorien entstehen.

In diesem Kapitel wird die Auswahl der zu untersuchenden Prüfkörper und deren Herstellung vorgestellt. Die Versuchsdurchführung ist an die bereits gezeigte Durchführung bei idealen Leckagen angelehnt, muss jedoch für einige Prüfkörper angepasst werden. Gleiches gilt für die Versuchsauswertung. In den beiden letzten Unterpunkten wird hauptsächlich auf die existierenden Unterschiede eingegangen.

5.2.1 Auswahl realer Leckagegeometrien und Herstellung der Prüfkörper

Real auftretende Druckluftleckagen sind nicht klassifiziert. Sie treten üblicherweise an defekten oder nicht sachgemäß eingebauten Bauteilen auf. Die Varianz an realen Leckagen ist folglich sehr groß, weshalb im Rahmen dieser Arbeit nur eine Auswahl an potentiellen Leckagegeometrien untersucht werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit fällt die Auswahl der realen Leckagegeometrien auf die beiden Kategorien Verschraubungen und Schlauchverbindungen, die Gründe hierfür sind vielfältig. Druckluftleckagen treten vermehrt im Bereich der Endanwendung in Druckluftsystemen auf. Hier sind die beiden Verbindungsarten in großer Anzahl vorhanden. Verschraubungen und Schlauchverbindungen sind ebenfalls in großer Anzahl im Bereich der Automatisierung und Werkzeugmaschinen zu finden. Ein weiterer Grund ist, dass die vorliegende Arbeit das Ziel hat, das Thema Druckluftleckagen systematisch aufzuarbeiten, weshalb eine Fokussierung auf spezielle Bauteile, wie z.B. defekte Filterelemente oder Zylinder nicht dem allgemeinen Ansatz der Arbeit entsprechen. Zuletzt ist der Herstellungsprozess der realen Leckage ein weiteres Kriterium. Dieser sollte möglichst reproduzierbar sein und mit vertretbarem Aufwand die Herstellung einer ausreichenden Anzahl an Prüfkörpern zulassen. Eine Auflistung der ausgewählten Prüfkörperkategorien, inklusive den darin enthaltenen Prüfkörperarten ist in Abb. 5-12 dargestellt.

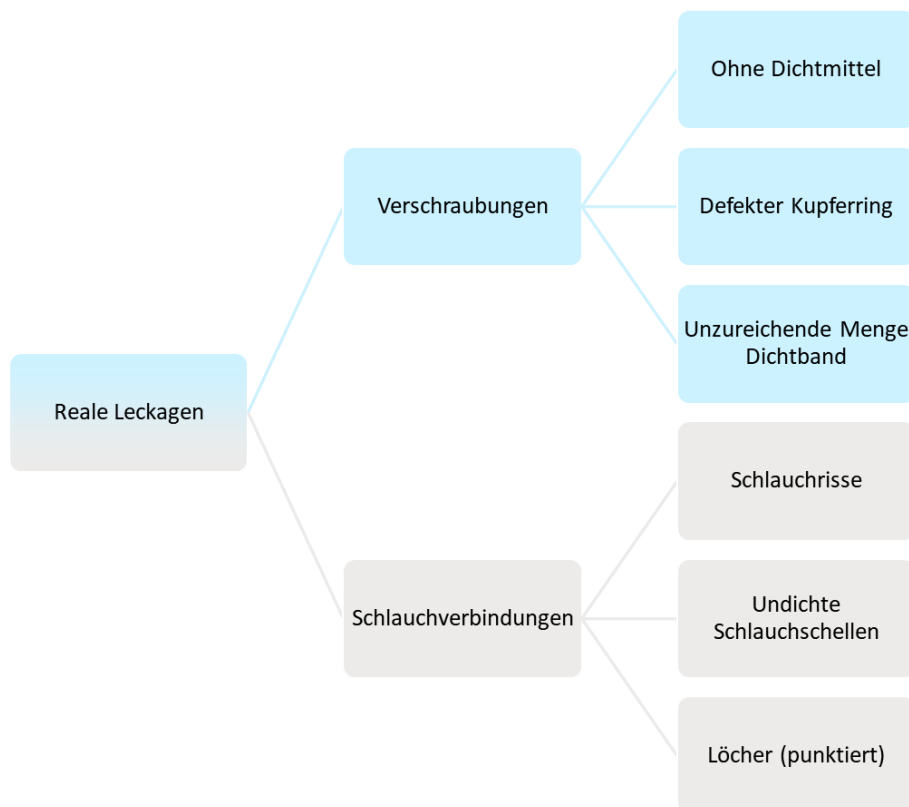


Abb. 5-12: Übersicht der hergestellten Prüfkörperkategorien mit realitätsnaher Leckagegeometrie

Verschraubungen

In der Kategorie Verschraubungen (vgl. Abb. 5-12) sind Prüfkörper ohne Dichtmittel, mit defektem Kupferring (verschlissenes Dichtmittel) und mit einer unzureichenden Menge an Dichtmittel (Teflonband) enthalten. Diese ausgewählten realen Leakagegeometrien decken die Hauptursachen für Leckagen an Verschraubungen ab.

Der allgemeine Aufbau der Prüfkörper untereinander ist identisch und in Abb. 5-13 dargestellt. Der Anschluss des Prüfkörpers an den Versuchsstand erfolgt mit Hilfe eines Anschlussstücks, direkt am Leitungsrohr des Prüfstands. Auf das Anschlussstück ist der Prüfkörper luftdicht aufgeschraubt, die Leckagestelle befindet sich auf der rechten Seite der Muffe. Je nach Art des Prüfkörpers wird entweder kein Dichtmittel, ein defekter Kupferring oder eine unzureichende Menge Teflonband zusätzlich eingebracht. Als Gegenstück der Verschraubung dient eine Verschlusschraube mit Bund und einem Außendurchmesser des Gewindes von $\frac{1}{2}$ Zoll. In Testläufen, von auf diese Weise hergestellten Prüfkörpern ohne Leckagestelle, konnte die Dichtheit der Prüfobjekte nachgewiesen werden.

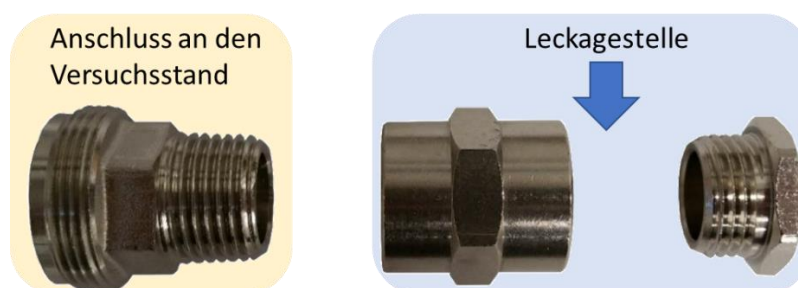


Abb. 5-13: Aufbau der Prüfkörper in der Kategorie Verschraubungen (Explosionsdarstellung), nach (Sieger 2019)

Die Prüfkörper ohne Dichtmittel werden durch Einschrauben der Verschlusschraube ohne zusätzliche Dichtmittel hergestellt, das Anzugsmoment beträgt 10 Nm. Der verwendete Drehmomentschlüssel weist eine Toleranz von $\pm 3\%$ des Skalenwerts auf (Gedore 2020).

Bei dem Dichtelement „defekter Kupferring“ handelt es sich um einen bearbeiteten Dichtungsring aus Kupfer. Der Kupferring weist einen Materialabtrag von 0,6 mm Breite bei einer Tiefe von 0,2 mm auf, was einen starken Kratzer im Kupferring simuliert. Der Materialabtrag wurde mit einem Mikrofräser realisiert. Die schadhafte Stelle wird beim Zusammenbau in Richtung der Muffe ausgerichtet, die Verschlusschraube mit 10 Nm angezogen.

Für die Herstellung der Verschraubungen mit einer unzureichenden Dichtmittelmenge wird marktübliches Teflonband mit einer Breite von 12 mm und einer Stärke von 0,1 mm zum Abdichten verwendet. Um eine mangelbehaftete Dichtheit zu erhalten, werden nur 1,5 Wicklungen des Dichtungsbands auf die Verschlusschraube aufgebracht. Die Wicklungen werden im Uhrzeigersinn aufgebracht, damit das Dichtband beim Anziehen der Verschraubung nicht abgedreht wird, das Anzugsmoment beträgt 10 Nm.

Schlauchverbindungen

In der Kategorie Schlauchverbindungen (vgl. Abb. 5-12) sind Prüfkörper mit Schlauchrisen, Löchern (durch Punktierung) und undichten Schlauchschellen enthalten. Wie bereits bei den Verschraubungen, werden durch diese Auswahl die Hauptursachen für Leckagen an diesem Verbindungstyp abgedeckt.

Der allgemeine Aufbau der Prüfkörper untereinander ist identisch und in Abb. 5-14 dargestellt. Der Anschluss des Prüfkörpers an den Versuchsstand erfolgt mit Hilfe eines Anschlussstücks direkt am Leitungsrohr des Prüfstands. Auf das Anschlussstück ist eine Muffe, sowie eine Schlauchtülle angebracht, um den eigentlichen Prüfkörper, den Druckluftschlauch, zu befestigen. Am Ende des Schlauchstücks ist eine Schlauchtülle inklusive Verschlussstopfen zur luftdichten Abdichtung angebracht. Die Schlauchstücke haben eine Länge von 10 cm. In Testläufen, von auf diese Weise hergestellten Prüfkörpern ohne Leckagestelle, konnte die Dichtheit der Prüfobjekte nachgewiesen werden.

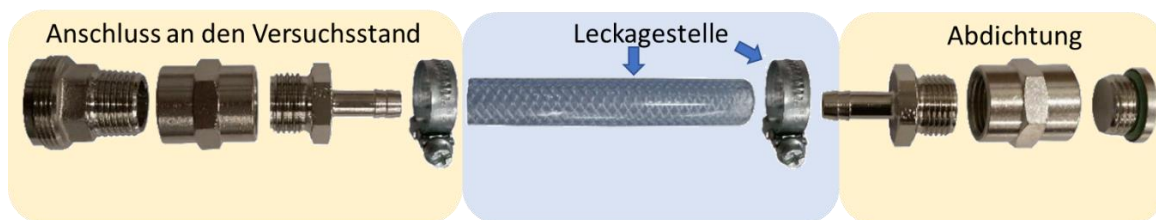


Abb. 5-14: Aufbau der Prüfkörper in der Kategorie Schlauchverbindungen (Explosionsdarstellung), nach (Sieger 2019)

In der Herstellung der Leckagestellen unterscheiden sich die Prüfkörper entscheidend. Bei den Schlauchrisen wird ein Schlauch aus Weich-PVC mit Polyesterfaserverstärkung mit einem Außendurchmesser von 16 mm, sowie einer Wandstärke von 3 mm verwendet (Herstellerangaben). Das Schlauchmaterial ist durchsichtig und besitzt durch die Faserverstärkung optische Fixpunkte, wodurch die Fertigung der Risse vereinfacht wird. Die Risse werden in den Längen 5 und 7 mm durch einen feinen Schnitt mit einem Skalpell (Klingenstärke 0,4 mm) erzeugt. Es wird auf einen sauberen Schnitt durch das Material geachtet. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass der Riss auf der Außen- und Innenseite des Schlauchstücks gleich groß ist.

Die Prüfkörper zur Untersuchung von Löchern in Schlauchverbindungen verwenden ebenfalls einen Schlauch aus Weich-PVC mit Polyesterfaserverstärkung. Das Schlauchmaterial ist nicht durchsichtig und besitzt laut Herstellerangaben einen Außendurchmesser von 11 mm und eine Wandstärke von 2,35 mm. Das Schlauchstück wird mittels Ein-Ohr-Schellen (Spannereich 10,3 bis 12,8 mm) auf den Schlauchtüllen abgedichtet. Die Leckagestelle wird durch Perforation der Schlauchstücke der jeweiligen Prüfobjekte erzeugt. Hierzu werden Nadel und Nägel der Durchmesser: 0,7 mm, 1,2 mm, 1,8 mm, 2,0 mm und 2,5 mm verwendet. Da es sich um eine Perforation des Schlauchs handelt, findet kein Materialabtrag statt.

Die Prüfkörper zur Untersuchung von Leckagen durch undichte Schlauchschellen entsprechen dem Aufbau des Prüfkörpers für die perforierten Schläuche, es wird lediglich statt der zweiten Ein-Ohr-Schelle, eine Schlauchschelle mit einem Spannungsbereich von 8 bis 16 mm gesetzt. Auf Grund der ovalen Verformung der Schelle entsteht, trotz des korrekten Spannungsbereichs, eine Leckagestelle (Anzugsmoment 3 Nm).

Seriennummern der realen Prüfkörper

Um die Ergebnisse den Prüfkörpern eindeutig zuweisen zu können, erhält jeder Prüfkörper im Rahmen der Fertigung eine individuelle Seriennummer. Anhand der Seriennummer lassen sich direkt Aussagen zur Leckagegeometrie und Größe ablesen (vgl. Abb. 5-15 & Abb. 5-16).

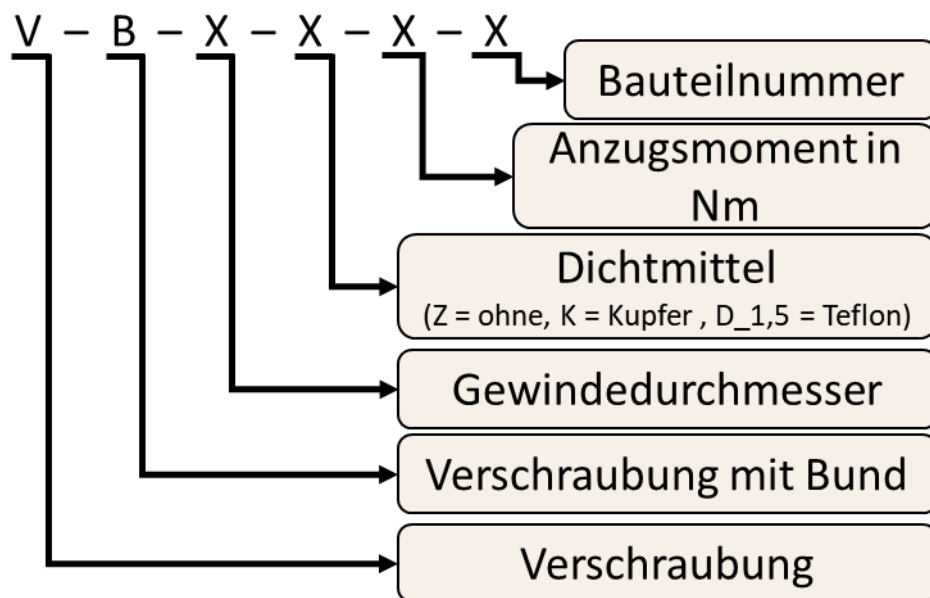


Abb. 5-15: Seriennummer realer Leckagen des Typs Verschraubung, nach (Sieger 2019)

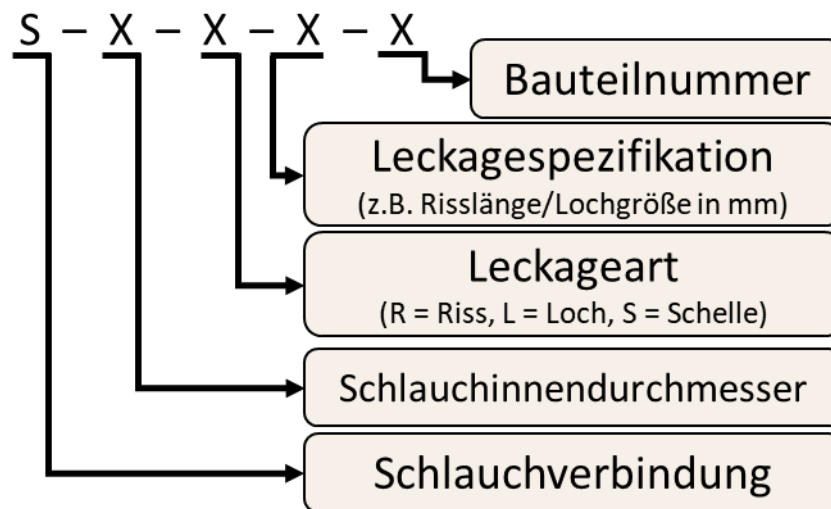


Abb. 5-16: Seriennummer realer Leckagen des Typs Schlauchverbindung, nach (Sieger 2019)

5.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung im Schwerpunkt reale Leckagen basiert auf der bereits vorgestellten Versuchsdurchführung aus dem Schwerpunkt ideale Leckagen (vgl. Kapitel 5.1.2), weshalb hier auf eine ausführliche Erläuterung verzichtet wird. Auf Grund der großen Anzahl an unterschiedlichen Prüfkörpern und wird das verkürzte Prüfprotokoll mit Messungen bei Leckagedrücken von 5 bis 7 bar_ü in 0,5 bar Schritten verwendet.

Bei den Verschraubungen ohne Dichtmittel und Verschraubungen mit beschädigtem Kupfering, werden gesondert die Auswirkung des Anzugsmoments auf den Leckagestrom untersucht, weshalb die Prüfkörper sukzessive bei 10, 15, 20, 25, 30 und 40 Nm Anzugsmoment der Verschlusschraube vermessen werden. Bei Prüfkörpern mit einer unzureichenden Menge Dichtband entfällt diese Betrachtung auf Grund der geringen Leckageströme bei einem Anzugsmoment von 10 Nm (siehe Kapitel 6.2.1).

Abb. 5-17 zeigt das Ergebnis eines Schlauchrisses mit 7 mm Länge mit dem verkürzten Standardprotokoll. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass sich auf Grund der kurzen Taktzeit kein stabiler Leckagestrom einstellt, obwohl der Leckagedruck stabil eingeregelt ist. Dies lässt sich ausschließlich mit einer Verformung der Leckagestelle erklären. Der Schlauchriss wird durch den anstehenden Leckagedruck gedehnt und die Leckage geht weiter auf. Die Versuche müssen deshalb auf einer Druckstufe so lange vermessen werden, bis sich ein stabiler Zustand einstellt. Die Versuchsdurchläufe der betroffenen Prüfkörper werden deshalb manuell durchgeführt, wobei eine Druckstufe solange gehalten wird, dass stabile Betriebsbedingungen für mindestens 150 s vorliegen.

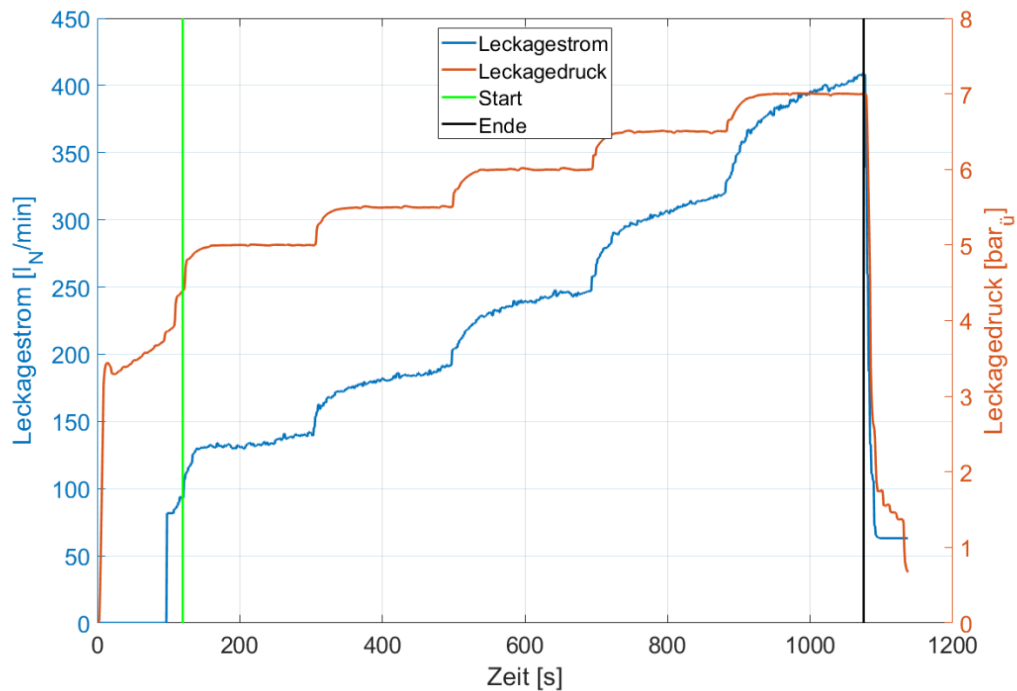


Abb. 5-17: Automatisierte Kontrollgrafik des Prüfobjekts S-10-R-7-3

5.2.3 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Versuchsreihen erfolgt in großen Teilen analog zum Schwerpunkt ideale Leckagen (vgl. Kapitel 5.1.2). Die Auswertung ist ebenfalls in zwei Arbeitsschritte: „Auswertung eines Prüfkörpers“ sowie „Auswertung einer Leckagegeometrie“ aufgeteilt (vgl. Abb. 5-7, S.62). Das mathematische Vorgehen ist identisch zu Kapitel 5.1.2. Bei der Auswertung der oben angesprochenen Schlauchrisse werden jedoch nur die jeweils letzten 150 s einer Druckstufe ausgewertet, wodurch eine größere Anzahl an Messwerten ausgeschlossen wird.

5.3 Vorgehensweise zur indirekten Leckagequantifizierung mittels Ultraschall

Die aus Druckluftleckagen ausströmende Druckluft erzeugt Schallemissionen sowohl im hörbaren-, als auch im Ultraschallbereich. Um eine etwaige Korrelation des Schallsignals mit dem Leckagestrom zu überprüfen, werden die in den vorherigen Kapiteln betrachteten Prüfkörper mit Hilfe eines Ultraschallmikrofons vermessen. In diesem Kapitel werden die Versuchsdurchführung der Einzelmessungen, sowie die Auswertung der Messergebnisse erläutert.

5.3.1 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung der Ultraschallmessung läuft weitgehend automatisiert ab, der programmierte Messablauf ist in Kapitel 4.4 erläutert (vgl. Abb. 4-6, Seite 55). Für die Versuche wird der jeweilige Prüfkörper am Prüfstand montiert und die Leckagestelle in Richtung des Mikrofons (in der Ausgangsstellung) ausgerichtet. Bei realen Leckagen ohne sichtbare Le-

ckagestelle, wird der Prüfkörper unter Druck gesetzt und anhand des fühlbaren Luftstroms ausgerichtet. Der Mikrofonarm wird mit Hilfe des Positionsschlittens so eingestellt, dass das Mikrofon in der 0°-Grundstellung die Leckagestelle mittig erfasst. Nach korrekter Einrichtung des Prüfkörpers und des Mikrofons, wird der Prüfstand hochgefahren. Am Prüfstand wird ein Leckagedruck eingestellt und gewartet, bis dieser stabil erreicht wird. Im Anschluss wird die eigentliche Messung des Versuchs gestartet, wie sie in Abb. 5-18 skizziert ist. Der Messabstand des Mikrofons ist für den gesamten Messablauf identisch und wird beim Start vorgegeben.

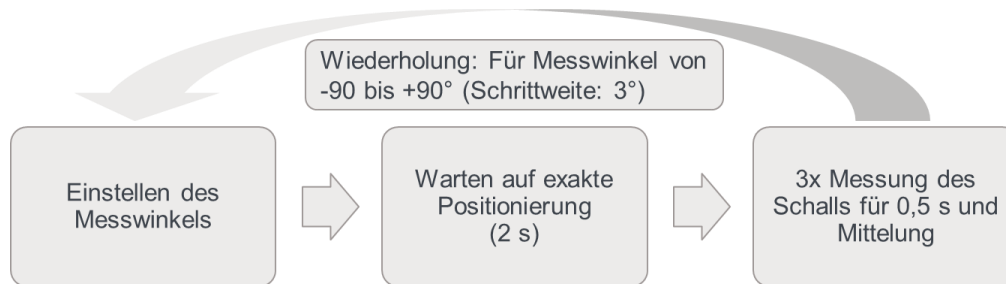


Abb. 5-18: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung zur Ultraschallmessung

Die vollständige Vermessung einer Leckage bei ausgewähltem Leckagedruck und Messabstand umfasst somit Schallmessungen in einem Halbkreis um die Leckagestelle. Diese bestehen aus 183 Einzelmessungen, welche entsprechend der angefahrenen Winkel zu 61 Messwerten, durch Bildung des arithmetischen Mittels, zusammengefasst werden. Eine Messdauer von 0,5 s ist für die weiteren Auswertungsschritte ausreichend, da es sich um eine näherungsweise konstante Schallquelle handelt. Eine zusätzliche Verlängerung der Messdauer führt zu keiner Verbesserung der Genauigkeit des Ergebnisses.

Um das Verhalten des Schallsignals bei verschiedenen Volumenströmen zu untersuchen, werden die Versuche jeweils bei Leckagedrücken von 4, 6 und 8 bar_i durchgeführt. Zusätzlich wird auch der Abstand des Mikrofons zur Schallquelle variiert, als Abstände²² werden 20, 40 und 60 cm untersucht. Diese zusätzlichen Versuchsdurchläufe werden nach dem soeben vorgestellten Versuchsablauf durchgeführt, es werden lediglich Betriebsparameter verändert.

²² Der Abstand des Mikrofons wurde mit einem Laserentfernungsmesser für die verschiedenen Positionen ausgemessen (Genauigkeit: ± 2 mm) (Bosch 2018). Die Positionierung erfolgt mittels Schrittmotoren mit integriertem Encoder des Herstellers Nanotec (Typ: PD4E). Die Schrittwinkelgenauigkeit beträgt $\pm 0,09^\circ$. In der vorherrschenden Übersetzung entspricht ein Motorschritt einer Änderung von 0,5 mm, die Positioniergenauigkeit des Schrittmotors (inkl. Übersetzung) ist somit besser, als das Messgerät zur Überprüfung.

5.3.2 Versuchsauswertung

Die Auswertung des gemessenen Schallsignals eines Prüfkörpers besteht aus vier Kernelementen. Bei der Auswertung des Schallsignals eines Prüfkörpers wird zunächst der Effektivwert des Schalldruckpegels des Gesamtsignals ermittelt. Anschließend werden die Amplituden der einzelnen Frequenzen des Signals mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) ermittelt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die einzelnen Frequenzen zu 1 kHz-Blöcken aggregiert und die Amplitude des Schalldruckpegel angegeben. Diese Auswertungsschritte werden für jeden Messwinkel durchgeführt.

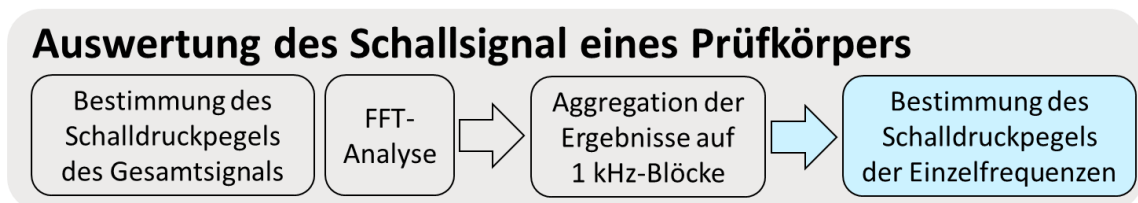


Abb. 5-19: Schematische Darstellung der Versuchsauswertung zur Analyse der Ultraschallsignale von Druckluftleckagen

Das Ergebnis ist mehrdimensional und wird anhand von Abb. 5-20 beispielhaft erläutert. Die Abbildung beinhaltet Informationen über den gemessenen Leakagestrom (über dem Graph), den Messwinkel (x-Achse), der Frequenz (linke y-Achse), dem Gesamtschalldruckpegel (weiße Linie, Ablesung erfolgt über rechte y-Achse) und dem Gesamtsignaldruck, bzw. Signaldruckpegel der Einzelfrequenzen als farbliche Darstellung. Die dargestellte Abbildung beinhaltet ein, mit schwarzen Linien gezeichnetes Gitter, welches die Auflösung der Messwerte darstellt. Die vertikale Kästchenlänge beträgt 1 kHz, die horizontale Kästchenlänge 3 °. Das Messergebnis der Auswertung eines Schallsignals einer Leckage besteht somit aus einer Vielzahl von Einzelergebnissen. Durch die graphische Darstellung können alle Informationen in einer kompakten Form präsentiert werden. Die Vorzeichenänderung des Gradienten des Gesamtschalldruckpegels im Bereich -90 ° bis -87 ° ist vermutlich auf die Messung einer Schallreflexion zurückzuführen. Der gemessene Gesamtschalldruckpegel in diesem Bereich ist jedoch nur leicht erhöht und hat deshalb keinen relevanten Einfluss auf das Gesamtergebnis.

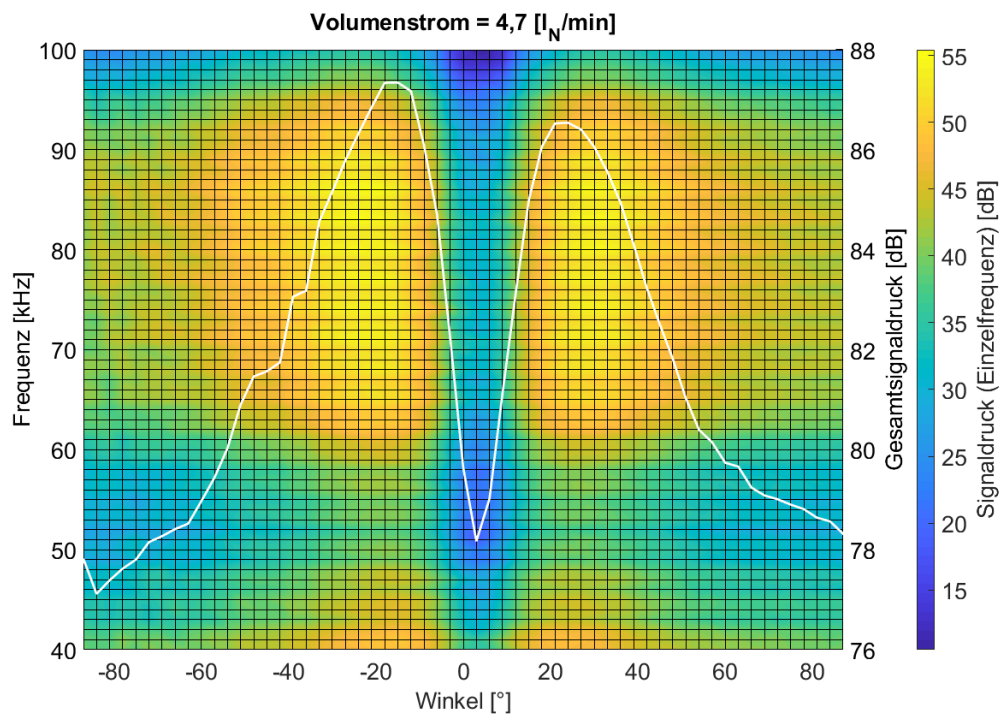


Abb. 5-20: Ergebnis der Auswertung des Schallsignals eines einzelnen Prüfkörpers (Prüfkörper: S-6-L-1,8-3, Leckagedruck: 4 bar_i, Messabstand: 20 cm)

6. Experimentelle Untersuchung von Druckluftleckagen

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung von Druckluftleckagen an unterschiedlichen Leckagegeometrien vor, um ein umfangreiches Verständnis über Druckluftleckagen und damit in Verbindung stehenden Leckageströme zu erhalten. Alle Messungen finden am im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prüfstand statt (vgl. Kapitel 4). Die Herstellung der Prüfkörper, die Versuchsdurchführung und die Versuchsauswertung erfolgt anhand der in Kapitel 5 entwickelten Methodik.

In Kapitel 6.1 werden die Messergebnisse der idealen Leckagen vorgestellt und diskutiert. Es werden sowohl Prüfkörper mit kreisrunder, als auch mit Langlochgeometrie untersucht. Zudem werden potentielle Einflussfaktoren auf den Leckagestrom untersucht. Kapitel 6.2 behandelt reale Leckagen, hierzu werden die Leckageströme verschiedener realitätsnaher Leckagegeometrien ermittelt.

Die Messungen der Leckageströme diverser Prüfkörper wurden teilweise durch Studierende im Rahmen Ihrer jeweiligen Abschlussarbeit durchgeführt. Hierzu zählen die Bachelorarbeit von Frau Gewilli (Gewilli 2019) und die Studienarbeit von Herrn Sieger (Sieger 2019).

6.1 Druckluftleckagen mit idealisierter Geometrie

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Experimenten mit Prüfkörpern idealer Leckagegeometrie vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 6.1.1 erfolgt zunächst die Analyse von Einflussfaktoren auf die Höhe des Leckagestroms einer Druckluftleckage. Nachfolgend werden in Kapitel 6.1.2 die relevanten Messergebnisse aller kreisrunden, idealen Leckagen vorgestellt, mit Literaturdaten verglichen und diskutiert. Kapitel 6.1.3 ist analog aufgebaut und betrachtet die untersuchten idealen Leckagen mit Langlochgeometrie.

6.1.1 Experimentelle Analyse von Einflussfaktoren

Im Rahmen dieses Kapitels werden die experimentellen Ergebnisse der Untersuchungen von potentiellen Einflussfaktoren auf den Druckluftleckagestrom vorgestellt und bewertet. Für alle diesbezüglichen Versuche werden ideale Leckagen als Prüfkörper verwendet, da:

- Hierdurch maximale Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sichergestellt wird.
- Die Prüfkörper zu keiner Verformung neigen.
- Die Versuche leichter durch Dritte überprüft und mit Literaturdaten verglichen werden können.

Es werden fünf unterschiedliche, potentielle Einflussfaktoren detailliert analysiert. Diese sind: Der Leckagedruck, die Leckagefläche, die Leckagegeometrie, die Drucklufttemperatur, sowie der Wassergehalt der Druckluft. Durch die Auswahl der Einflussparameter ist eine breite

Beurteilung möglicher Einflusskategorien sichergestellt. So sind durch Leckagedruck, Drucklufttemperatur und Wassergehalt die unterschiedlichen Betriebsbedingungen eines Druckluftsystems wiedergespiegelt. Im Gegensatz hierzu, betreffen die Leckagefläche und Leckagegeometrie die physische Beschaffenheit der Leckage. Bei den jeweils zugehörigen Versuchsdurchläufen wird darauf geachtet, dass nur der jeweils zu untersuchende Parameter, sowie der Leckagedruck als Regelgröße des Prüfstands variiert wird. Die restlichen Parameter werden möglichst konstant gehalten. Leichte Schwankungen der Versuchsbedingungen sind jedoch unvermeidbar. Die Schwankungen der Versuchsbedingungen wurden bereits in Kapitel 5.1.2 in Tabelle 5-2 (S. 63) diskutiert. Die Schwankungen während einer Versuchsreihe sind sehr gering und können vernachlässigt werden, auch die längerfristigen Schwankungen (bezogen auf alle durchgeführten Messungen) sind gering und können ebenfalls vernachlässigt werden.

Leckagedruck

Druckluftleckagen können an vielen unterschiedlichen Stellen im Druckluftsystem auftreten, folglich ist die Bandbreite an typischen Leckagedrücken groß. Da der Leckagedruck als Regelparameter für den Prüfstand verwendet wird, existieren zu jedem hergestellten Prüfkörper mehrere Messreihen mit der Variation des Parameters Leckagedruck. In diesem Abschnitt werden einige dieser Ergebnisse exemplarisch gezeigt und beschrieben. Als Beispiel dient die Leckageplatte der Seriennummer D-020-01, eine kreisrunde Leckage mit dem Durchmesser 2,0 mm. Abb. 6-1 zeigt die aus drei Durchläufen zusammengefassten Ergebnisse des Leckagestroms des Prüfkörpers, in Abhängigkeit des Leckagedrucks. Durch die einzelnen Messpunkte ist eine Regressionsgerade gelegt, diese weist ein Bestimmtheitsmaß von 99,99 % auf. Der bereits in der theoretischen Berechnung (vgl. 3.1.1) dargestellte lineare Zusammenhang von Leckagestrom und Leckagedruck lässt sich somit bestätigen.

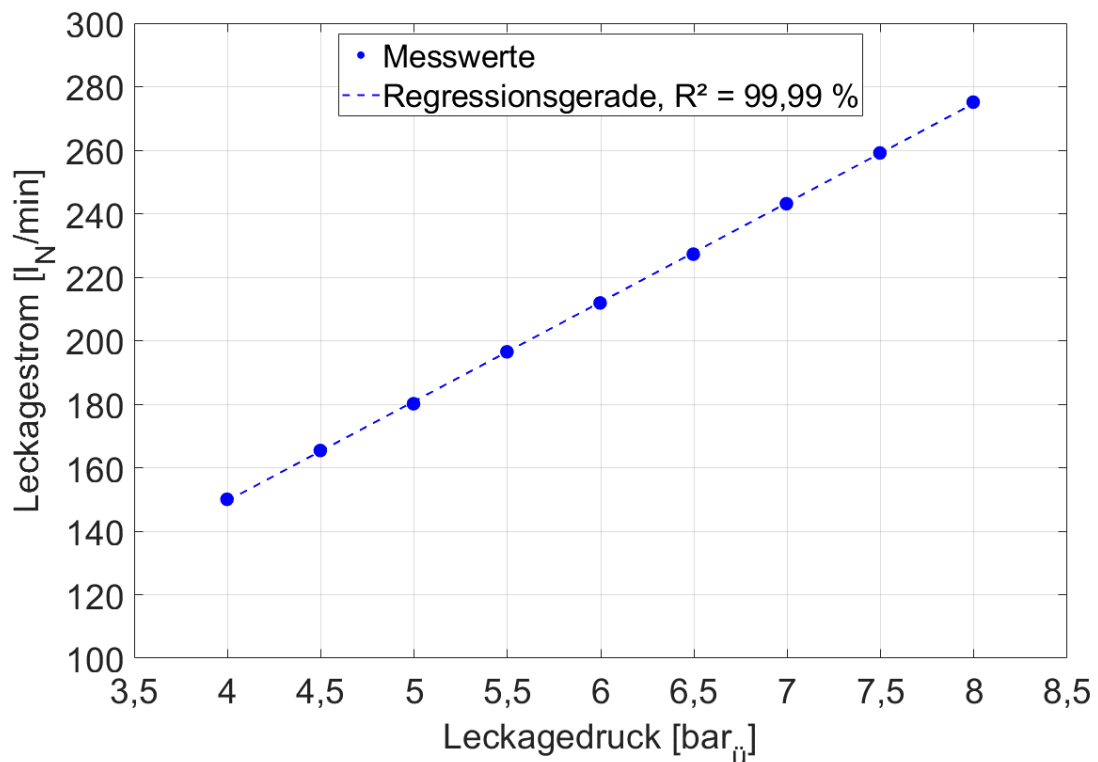


Abb. 6-1: Leckagestrom des Prüfkörpers D-020-01 in Abhängigkeit des Leckagedrucks

In Tabelle 6-1 sind die Messwerte aus Abb. 6-1 aufgeführt. Zusätzlich ist in der Tabelle der Leckagedruck als Absolutdruck aufgeführt. Zudem beinhaltet sie die Proportionalitätskonstante, welche sich aus Division des Leckagestroms durch den Leckageabsolutdruck ergibt. Die berechnete Proportionalitätskonstante der Messwerte ist näherungsweise konstant und bestätigt damit den direkt proportionalen Zusammenhang von Leckagedruck und Leckagestrom. Somit führt eine Verdopplung des Leckage(absolut)drucks zu einer Verdopplung des Leckagestroms. Das Verhalten kann beispielsweise an den Leckageströmen bei den Drücken 4,97 bar_a und 7,47 bar_a überprüft werden. Die Druckerhöhung erfolgt um den Faktor 1,50, der Leckagestrom erhöht sich dabei um den Faktor 1,51 (von 150,05 l_N/min auf 227,25 l_N/min).

Tabelle 6-1: Messwerte des Prüfkörpers D-020-01, sowie berechnete Proportionalitätskonstante

Leckagedruck [bar _i]	Leckagedruck [bar _a]	Leckagestrom [l _N /min]	Proportionalitätskonstante [(l _N /min)/bar _a]
4,00	4,97	150,05	30,21
4,50	5,47	165,40	30,26
5,00	5,97	180,14	30,20
5,50	6,47	196,49	30,39
6,00	6,97	211,89	30,42
6,50	7,47	227,25	30,44
7,00	7,96	243,14	30,53
7,50	8,46	259,13	30,61
8,00	8,96	275,13	30,69

Die aufgeführten Zusammenhänge bestätigen mehrere, in der Theorie (vgl. Kapitel 3.1.1, Seite 27) vorgestellte Zusammenhänge. So wird für (absolut) Druckverhältnisse kleiner 0,5283 eine Endgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit) im Strömungsquerschnitt der Leckage erreicht. Der zusätzliche Anstieg des Normvolumenstroms bei steigendem Druck ist ausschließlich auf die Dichteerhöhung der Druckluft zurückzuführen. Das tatsächliche Druckverhältnis, sofern es die Grenze von 0,5283 überschreitet, ist für den Leckagestrom nicht entscheidend. Der Leckagestrom wird durch den absoluten Leckagedruck bestimmt. Abb. F - 1 im Anhang F zeigt einen Versuchsdurchlauf des gleichen Prüfkörpers bei niedrigeren Leckagedrücken, dadurch wird die angesprochene Grenze des Druckverhältnisses und der damit verbundene Verlauf der Leckagemenge ersichtlich. In der Praxis sind solch geringe Druckverhältnisse nicht relevant, weshalb von einem stets linearen Zusammenhang gesprochen werden kann.

Leckagefläche

Für die Evaluation des Einflussfaktors der Leckagefläche auf den Leckagestrom werden Prüfkörper mit kreisrunden Leckagen verschiedener Durchmesser untersucht. Die Auswertung fokussiert sich auf ideale Leckagen mit kreisrunder Geometrie, da diese mit den zur Verfügung stehenden Mitteln am genauesten gefertigt werden können. Dadurch kann der Aspekt des Flächeneinflusses besser zugeordnet und analysiert werden. Insgesamt werden neun unterschiedliche Leckagedurchmesser in der Auswertung berücksichtigt: 1,0 mm, 1,5 mm, 1,6 mm, 1,7 mm, 1,8 mm, 1,9 mm, 2,0 mm, 2,5 mm und 3,0 mm.

In Abb. 6-2 sind die Leckageströme aller oben aufgeführten kreisrunden, idealen Leckagen über der dazugehörigen Fläche, bei Leckagedrücken von 4, 6 und 8 bar_i aufgetragen. Zusätzlich ist je Leckagedruck eine Regressionsgerade dargestellt, deren Bestimmtheitsmaß bei jeweils über 99,5 % liegt. Anhand der Messergebnisse lässt sich eindeutig ein linearer Zusammenhang zwischen Leckagefläche und Leckagestrom feststellen, wobei der Leckagestrom mit zunehmender Fläche ebenfalls zunimmt.

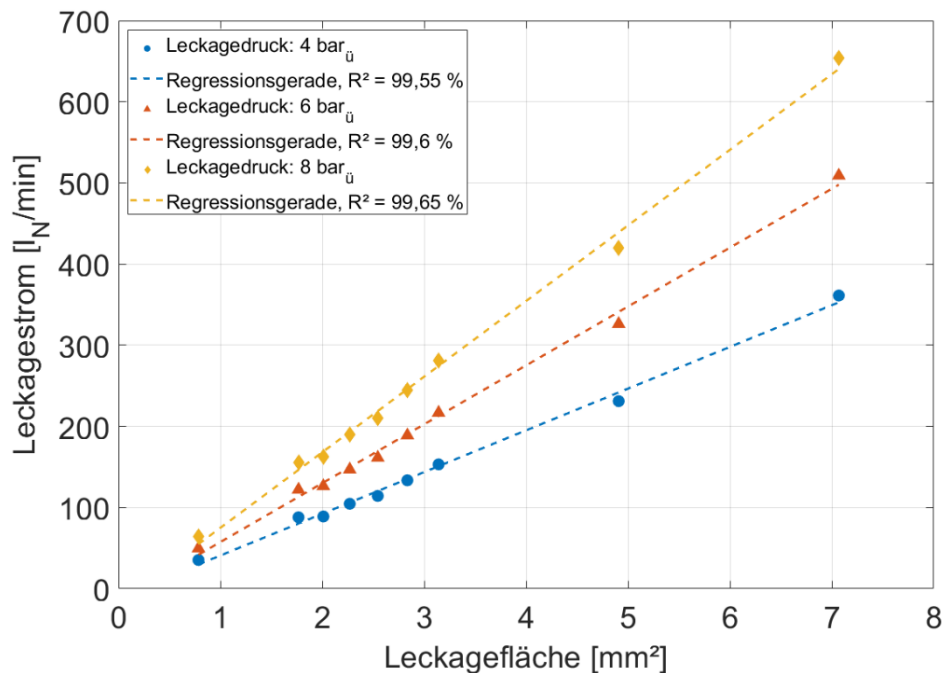


Abb. 6-2: Leckageströme aller kreisrunden idealen Leckagen in Abhängigkeit der zugehörigen Leckagefläche bei verschiedenen Leckagedrücken

Dennoch ist eine geringe Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade vorhanden. Die Streuung ist, im Vergleich zu den Auswertungen der Leckagedruckabhängigkeit, stärker ausgeprägt. Die Streuung lässt sich zum Teil mit Ungenauigkeiten im Fertigungsprozess der Leckagen erklären. Alle kreisrunden Leckagen werden mittels Reibahlen hergestellt, was eine hohe Fertigungsqualität sicherstellt. Dennoch besitzt das Verfahren des Reibens, wie jedes Fertigungsverfahren, gewisse Toleranzen welche im vorliegenden Fall bei bis zu + 0,01 mm (ISO Toleranzklasse H7) liegen. Bezogen auf die Leckageflächen bedeutet dies eine Abweichung von bis zu + 2 % für die Leckagen mit 1 mm Durchmesser und bis zu + 0,7 % bei Leckagen von 3 mm Durchmesser. Die Abweichungen von der Regressionsgerade sind jedoch teilweise größer. Dies ist auf kleine, geometrische Veränderungen in der Leckagegeometrie zurückzuführen, welche durch den Nachbearbeitungsprozess in der Herstellung verursacht werden und wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Da die angesprochenen Abweichungen nur geringfügiger Natur sind, bleibt die Aussagekraft der Messwerte erhalten. Tabelle 6-2 weißt den Proportionalitätsfaktor, der durch Division des Leckagestroms mit der Leckagefläche gebildet wird, aus. Der Proportionalitätsfaktor ist bei konstantem Leckagedruck ebenfalls näherungsweise konstant. Die leichten Schwankungen des Faktors sind auf die oben genannten Gründe zurückzuführen. Es kann daher der, in der Theorie aufgestellte, lineare Zusammenhang von Leckagestrom zu Leckagefläche, bestätigt werden.

Tabelle 6-2: Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit des Leckagedrucks

Leckagedruck [bar _i]	Leckagefläche [mm ²]				Mittelwert
	0,785	2,270	3,142	4.909	
	Proportionalitätsfaktor [(l _N /min)/mm ²]				
4,00	45,04	46,09	48,76	47,07	46,74
6,00	63,24	64,68	68,99	66,46	65,84
8,00	81,53	83,83	89,37	85,59	85,08

Der Proportionalitätsfaktor ist druckabhängig und steigt mit steigendem Druck. Betrachtet man die absolute Darstellung der Leckageströme aus Abb. 6-2, so wirkt der Einfluss der Leckagefläche bei höheren Drücken stärker ausgeprägt. Dies ist jedoch der absoluten Darstellung der Messergebnisse geschuldet. Die relative Abweichung der einzelnen Messungen ist konstant. Tabelle 6-3 verdeutlicht diesen Punkt. Hier sind die Leckageströme der einzelnen idealen Leckagen relativ in Bezug zur kleinsten Leckage (kreisrund 1 mm) bei unterschiedlichen Leckagedrücken angegeben. Im Vergleich zur absoluten Darstellung in Abb. 6-2, weißt der relative Leckagestrom auf einen gleichmäßigen Anstieg des Leckagestroms über alle Leckagedrücke hin. Die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsgeraden sind somit ausschließlich auf die absolute Darstellung der Messwerte zurückzuführen und für die Bewertung des Einflussfaktors der Leckagefläche unerheblich.

Tabelle 6-3: Relativer Leckagestrom in Abhängigkeit des Leckagedrucks der idealen Leckagen mit 1, 1,7, 2,5 und 3 mm Leckagedurchmesser bezogen auf den Leckagestrom bei 1 mm

Leckagedruck [bar _i]	Leckagefläche [mm ²]			
	0,785	2,270	4,909	7,069
	Relativer Leckagestrom [-]			
4,00	100 %	296 %	653%	1021%
6,00	100 %	296 %	657%	1025%
8,00	100 %	297 %	656%	1021%

Leckagegeometrie

Die Geometrien real vorkommender Druckluftleckagen sind vielfältig und komplex. Um den Einfluss der Leckagegeometrie auf den Leckagestrom zu untersuchen, werden die kreisrunden idealen Leckagen mit Langlochleckagen äquivalenter Fläche verglichen. Die Maße der Langlochleckagen sind so gewählt, dass die resultierende Leckagefläche einer der kreisrunden Leckagen mit dem Durchmesser 1,9 mm, 2,0 mm oder 3,0 mm entspricht. Die feinen, fertigungsbedingten Abweichungen in der Leckagefläche der Langlochleckagen werden ermittelt (vgl. Kapitel 5.1.1) und durch Normierung des Leckagestroms auf die Fläche der kreisrunden

Leckage berücksichtigt. Durch den im vorherigen Abschnitt gezeigten linearen Zusammenhang von Leckagestrom zur Leckagefläche, kann die Umrechnung ohne Qualitätsverlust der Messergebnisse erfolgen.

Abb. 6-3 zeigt Messergebnisse von kreisrunden Leckagen und auch Leckagen mit Langlochgeometrie. Die kreisrunden Leckagen sind durch blaue Kreise, die Langlochleckagen durch orange Quadrate gekennzeichnet, zusätzlich sind die jeweiligen Regressionsgeraden dargestellt. Alle Messergebnisse der Leckageströme der Prüfkörper mit Langlochgeometrie liegen unterhalb der mit kreisrunder Geometrie. Die gezeigten Messungen basieren auf einem Leckagedruck von 6 bar_i , die Drucklufttemperaturen unterscheiden sich nur geringfügig ($\pm 1 \text{ K}$) voneinander und die hergestellten Prüfkörper wurden alle bezüglich der gefertigten Leckagefläche vermessen. Womit diese Punkte als Einflussfaktoren ausgeschlossen werden. Der deutliche Unterschied in dem Leckagestrom von circa 15 % kann nur mit der Geometrieabhängigkeit des Leckagestroms erklärt werden.

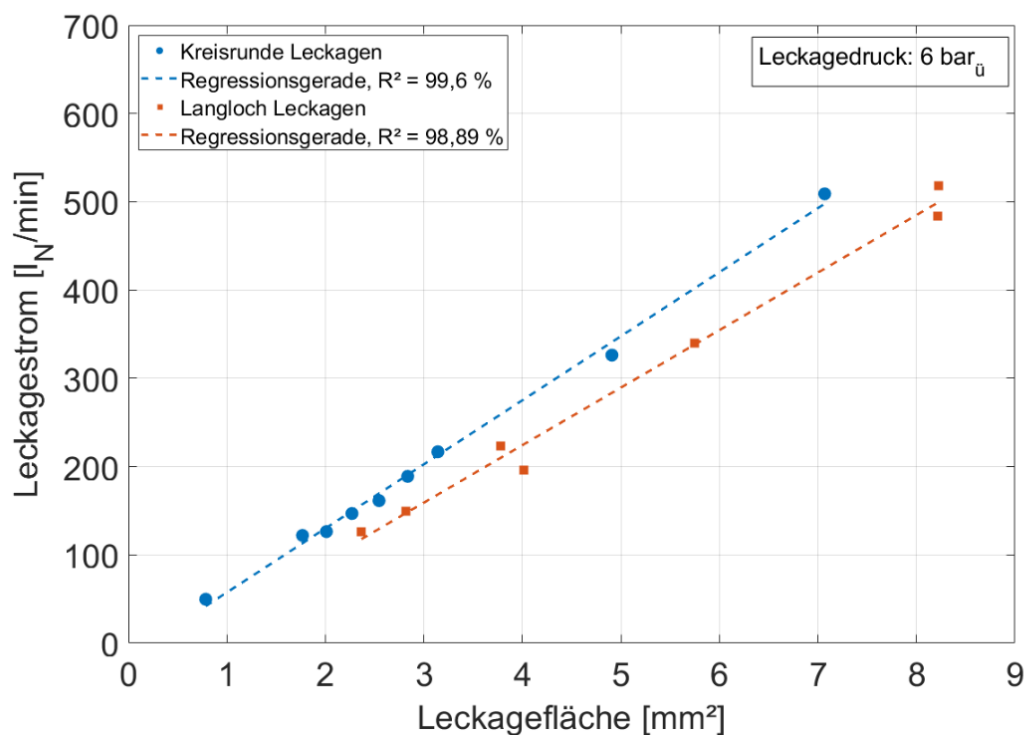


Abb. 6-3: Vergleich von idealen Leckagen mit kreisrunder und Langlochgeometrie bei einem Leckagedruck von 6 bar_i

Sowohl die Messergebnisse der Prüfkörper mit Langlochgeometrie, als auch die mit kreisrunder Leckagegeometrie streuen in geringem Maße um die jeweilige Regressionsgerade. Beide Aspekte werden nachfolgend adressiert.

Im Fall der kreisrunden Leckagen kann das Verhalten auf kleine Veränderungen der Geometrie durch den Nachbearbeitungsschritt der Platten zurückgeführt werden. Um Metallspäne,

die bei der Plattenfertigung auf der Austrittsseite des Bohrlochs zwangsläufig entstehen zu entfernen, werden die Platten mit einem Kegelsenker minimal angesenkt. Diese Senkungstiefe beträgt weniger als 0,2 mm und ist folglich kaum erkennbar, führt jedoch zu einer kleinen Veränderung in den Messergebnissen. Um den Einfluss zu verdeutlichen, ist in Abb. 6-4 ein stark angesenkter Prüfkörper im Vergleich zum Mittelwert aus drei normal gefertigten Prüfkörpern aufgetragen. Durch die starke Senkung auf der Austrittsseite des Prüfkörpers wird der Austrittsquerschnitt erweitert und im Winkel des Kegelsenkers (60°) gefast. Hierdurch kommt es zu einer Anhebung des Volumenstroms. Bei nur kleinen Fertigungsunterschieden kommt es zu den leichten Schwankungen in den Messwerten.

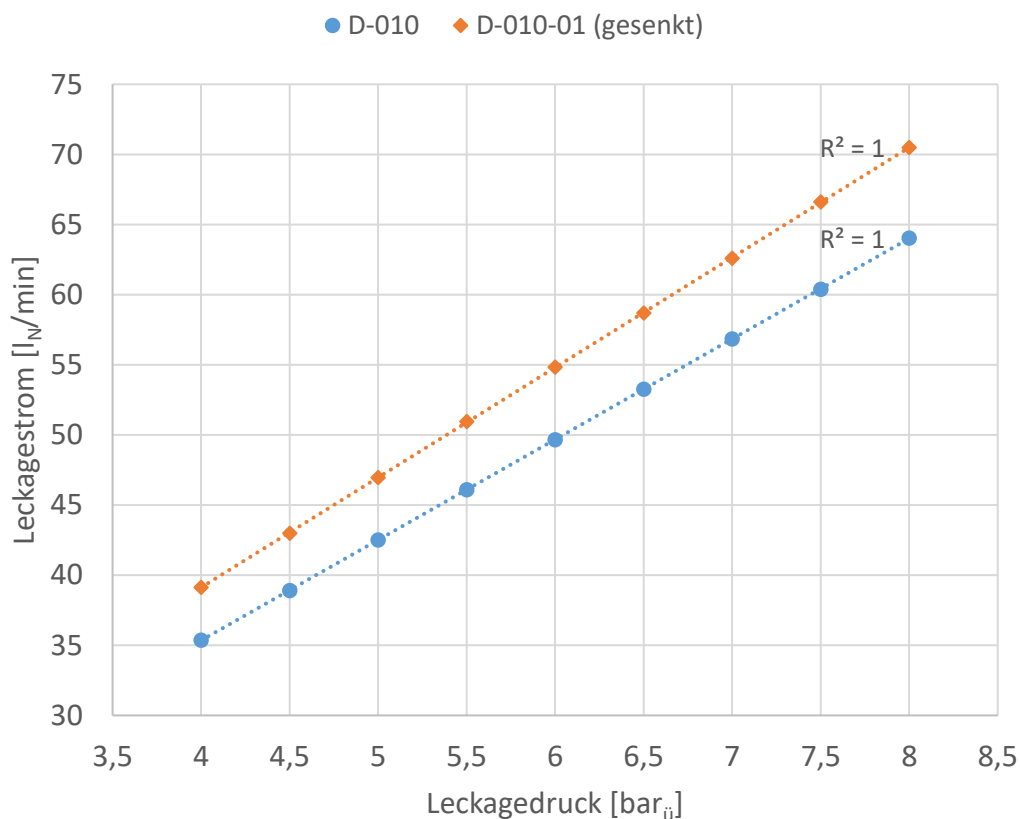


Abb. 6-4: Vergleich des Leckagestroms eines stark angesenkten Prüfkörpers (D-010-01) mit dem Mittelwert aus drei Prüfkörpern mit minimaler Nachbearbeitung (D-010-04 bis D-010-06)

Die aufgetragenen Langlochleckagen in Abb. 6-3 (S.83) schwanken ebenfalls in gewissem Maß um die Regressionsgerade. Hierbei ist jedoch auffällig, dass Leckagen mit höheren Länge zu Breite Verhältnissen tendenziell niedrigere Leckageströme, als die Leckagen mit geringen Verhältnissen aufweisen. In der Abbildung sind die beiden Ergebnisse, welche sich deutlich unterhalb der Regressionsgeraden befinden Langlochgeometrien mit hohem Länge zu Breite Verhältnis. Zur Abklärung der Vermutung werden zwei Langlochgeometrien mit jeweils sehr großen Länge zu Breite Verhältnissen (Seriennummern: 04-0734 & 08-0895) hergestellt und

vermessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-4 dargestellt und zeigen, dass der Leckagestrom mit zunehmendem Länge zu Breite Verhältnis sinkt. Als Vergleichspunkt dient eine Langlochleckage mit jeweils kleinerem Länge zu Breite Verhältnis. Beide Leakagegeometrien werden auf die gleiche Fläche normiert um einen Vergleich zu ermöglichen. Die Abweichung von dieser Referenz steigt gleichermaßen mit dem Länge zu Breite Verhältnis an.

Tabelle 6-4: Leckageströme von Prüfkörpern mit Langlochgeometrie und unterschiedlichen Längen zu Breite Verhältnissen bei 6 bar_ü

	Seriennummer			
	08-040	04-0734	10-0725	08-0895
Fläche (gemessen) [mm ²]	3,77	4,01	8,22	8,21
Fläche (normiert) [mm ²]	3,77	3,77	8,22	8,22
Länge/Breite	5	18,35	7,25	11,19
Leckagestrom (gemessen) [l _N /min]	223,26	196,08	518,32	483,67
Leckagestrom (normiert) [l _N /min]	223,26	184,42	518,32	484,23
Abweichung von der Referenz [-]	Referenz	- 17,4 %	Referenz	- 6,6 %

Die Verringerung des Leckagestroms bei gleicher Leckagefläche, jedoch geänderter Geometrie, kann anhand von strömungstechnischen Vorgängen erläutert werden. In den theoretischen Berechnungen (vgl. Kapitel 3.1.1) wird angenommen, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt der Leckage konstant und gleich der Schallgeschwindigkeit ist. In der Realität treten jedoch Effekte wie Randwirbel an der Leckageöffnung, sowie Reibungseffekte auf, weshalb die Strömungsgeschwindigkeit in Wandnähe deutlich verringert ist. Hierdurch sinkt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, was in einem verminderten Leckagestrom resultiert.

Die geometrische Form des Kreises ermöglicht das bestmögliche Verhältnis von Umfang zu Fläche. Der Wechsel der Geometrie zu nachbearbeiteten, nahezu rechteckigen Langlöchern vergrößert den Anteil an Randflächen, weshalb der Leckagestrom sinkt. Je größer das Länge zu Breite Verhältnis wird, desto stärker weicht die Geometrie von der optimalen Kreisform ab, was zu einer Senkung des Leckagestroms durch den Einfluss der Randeffekte führt. Die Leckage mit dem größten Längen zu Breiten Verhältnis (04-0734) weist einen, im Vergleich zu einer kreisrunden Leckage der Größe 2,0 mm, um circa 29 % verringerten Leckagestrom auf.

Die experimentelle Betrachtung des geometrischen Einflusses zeigt, dass dieser nicht vernachlässigt werden sollte, was jedoch in der vereinfachten theoretischen Berechnung der Fall ist. Durch die Einführung eines linearen Anpassungsfaktors, den sogenannten „Discharge Coefficient“, kann das Problem behoben werden. Der Discharge Coefficient ist das Verhältnis aus theoretisch bestimmten Leckagestrom zu tatsächlich experimentell ermitteltem Leckagestrom und somit folglich kleiner 1. In den nachfolgenden Kapitel (6.1.2 & 6.1.3) werden die in dieser Arbeit ermittelten Discharge Coefficients vorgestellt und diskutiert.

Drucklufttemperatur

Für die Untersuchung des Einflusses der Drucklufttemperatur, werden die Versuchsdurchläufe mit externer Wärmezufuhr zur Erhöhung der Drucklufttemperatur ausgewertet. Um den direkten Einfluss einer Temperaturerhöhung klarer herauszuarbeiten, wird je Leckagetyp lediglich ein Prüfkörper vermessen.

Um jegliche potentiellen Schwankungen²³ durch veränderliche Umgebungsbedingungen, wie z.B. Umgebungsdruck oder Umgebungstemperatur auf ein Minimum zu reduzieren, werden die Versuchsdurchläufe am selben Tag durchgeführt. Auch die Vergleichsmessreihen mit ungeheizter Druckluft werden am gleichen Tag aufgezeichnet.

Abb. 6-5 zeigt die Ergebnisse der Messreihen für drei ideale Leckagen mit den Leckagedurchmessern 1,5, 1,7 und 1,9 mm. Die Temperaturdifferenz der jeweiligen Durchläufe beträgt 19 bzw. 24 K. Die Schwankung der Temperatur während einer Versuchsreihe beträgt $\pm 0,4$ K und ist auf die manuelle Erhitzung der Druckluft zurückzuführen. In allen drei Fällen zeigt sich eine Verminderung des Leckagestroms im Vergleich zur Normaltemperatur. Wie bereits in der Theorie (vgl. Kapitel 3.1.1) gezeigt, überwiegt der negative Effekt der Absenkung der Dichte der Druckluft, den positiven Effekt durch die Steigerung der Schallgeschwindigkeit. Es kommt folglich zum Absinken des Leckagestroms bei Temperaturzunahme.

²³ Wie bereits in Kapitel 5.1.3 (vgl. Tabelle 5-2, S. 63) gezeigt, existieren nur geringe Schwankungen in den Umgebungsbedingungen. Die Schwankungen sind vernachlässigbar, dennoch wurde bei den Messungen zur Bewertung des Einflussfaktors Temperatur (sowie des Einflussfaktors Wassergehalt), besondere Sorgfalt an die Vergleichbarkeit der Umgebungsbedingungen zwischen den Messreihen gelegt.

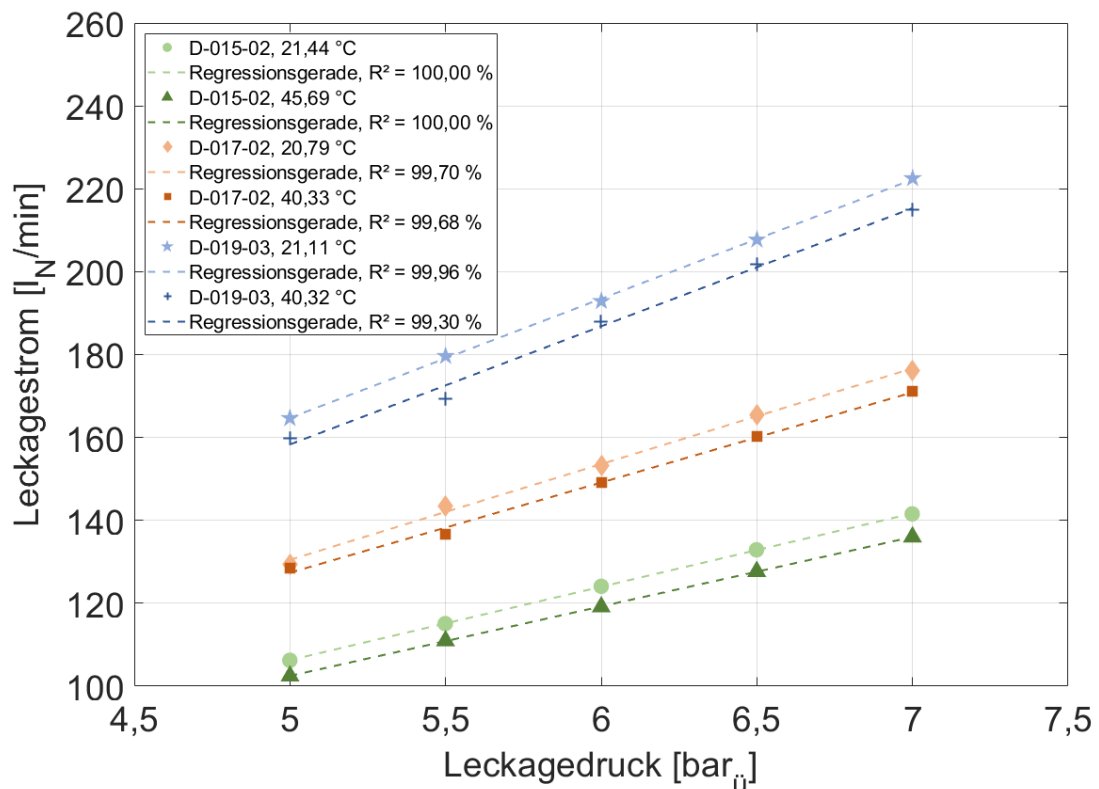


Abb. 6-5: Leckageströme der Prüfkörper D-019-03, D-017-02 und D-015-02 auf zwei Temperaturniveaus der Druckluft in Abhängigkeit des Leckagedrucks

In Tabelle 6-5 ist die mittlere Temperaturerhöhung und die dadurch resultierende mittlere relative Volumenstromänderung aufgeführt. Die relative Volumenstromänderung ist über die betrachteten Leckagedrücke nahezu konstant (vgl. Abb. 6-5), weshalb ausschließlich das Mittel angegeben ist. Die prozentuale Änderung des Volumenstroms ist, bei den betrachteten Prüfkörpern, in einem ähnlichen Bereich. Es existieren nur geringe Abweichungen. Wird die Volumenstromänderung auf die Temperaturerhöhung bezogen, verschwinden die Abweichungen nahezu vollständig und liegen bei circa -0,17 %-Pkt. je Grad Kelvin. Dies entspricht exakt dem Wert, welcher sich bei der theoretischen Berechnung der Druckluftleckagen mit Hilfe des in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungsmodells (vgl. Kapitel 3.1.4) ergibt.

Tabelle 6-5: Auswertung des Einflusses der Drucklufttemperatur auf den Leckagestrom

	Seriennummer		
	D-015-02	D-017-02	D-019-03
Temperaturerhöhung [K]	24,25	19,64	19,24
Volumenstromänderung [%]	-3,80	-3,39	-3,29
Spezifische Volumenstromänderung [%/K]	-0,16	-0,17	-0,17

Abb. 6-6 zeigt den Leckagestrom des Prüfkörpers D-015-02 bei Drucklufttemperaturen von 25 °C bis 55 °C. Der Leckagestrom zeigt eindeutig lineares Verhalten mit negativer Steigung. Die dargestellte Regressionsgerade weist ein Bestimmtheitsmaß von über 97 % auf. Auf Grund des geringen Einflusses der Temperatur auf den Leckagestrom und der Tatsache, dass diese in den meisten Fällen zwischen 20 und 30 °C liegt, ist der Einflussfaktor Drucklufttemperatur in den meisten Fällen vernachlässigbar.

Die Auswertungen der durchgeführten Versuche zeigen, dass der Einfluss der Leckage-temperatur auf den Leckagestrom den theoretischen Berechnungen entspricht. Es wird deshalb auf zusätzliche Versuche an weiteren Leckagegeometrien (z.B. rechteckige Leckagen) verzichtet, da gleichwertige Ergebnisse zu erwarten sind.

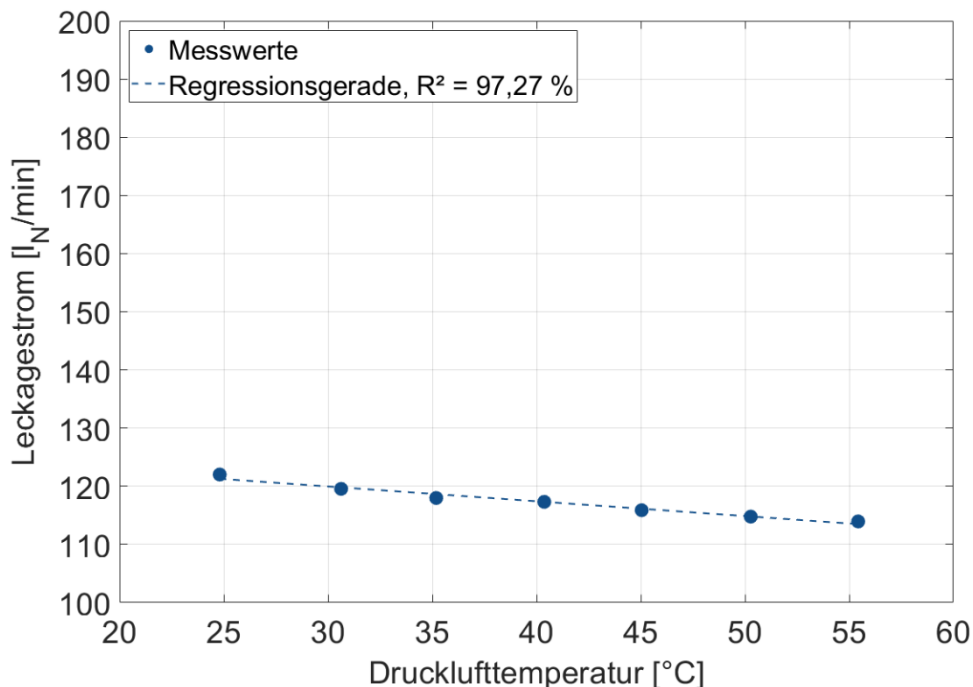


Abb. 6-6: Abhängigkeit des Leckagestroms von der Drucklufttemperatur bei einem Leckage-
druck von 6 bar_i (Prüfkörper: D-015-02)

Wassergehalt der Druckluft

Druckluft besteht neben dem Hauptbestandteil Luft auch zu gewissen Anteilen aus Wasser, Öl und sonstigen Partikeln. Die Anteile der zusätzlichen Bestandteile variieren je nach angestrebter Druckluftqualitätsklasse und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen. Wasser hat in fast allen Fällen den größten Anteil an diesen zusätzlichen Bestandteilen. Deshalb werden zur Abschätzung des Einflusses der Druckluftqualität auf den Leckagestrom zuerst die Auswirkungen eines variierenden Wassergehalts auf den Leckagestrom untersucht.

Um die Messergebnisse, wie auch bei den Messungen zum Temperatureinfluss, möglichst unabhängig von Umgebungseinflüssen zu erhalten, wird der Prüfkörper am selben Tag mit

getrockneter Druckluft, deren Drucktaupunkt $8,1 \text{ }^{\circ}\text{C}_{\text{DP}} (\cong 7,9 \text{ g/m}_N^3)$ beträgt, sowie mit ungetrockneter Druckluft²⁴ mit einem Drucktaupunkt von $21,7 \text{ }^{\circ}\text{C}_{\text{DP}} (\cong 18,9 \text{ g/m}_N^3)$ untersucht. Die Absenkung des Drucktaupunkts um $13,6 \text{ }^{\circ}\text{C}_{\text{DP}}$ entspricht, bei gleicher Raumtemperatur ($22,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$) und Betriebsdruck ($8,97 \text{ bar}_i$), einer Reduktion der Wassermenge um $62,8 \%$. Dies ist die maximale, mit der vorhandenen Anlagentechnik am Institut erreichbare Differenz des Wassergehalts. Für einen noch geringen Wassergehalt würden zusätzliche Aufbreitungskomponenten wie z.B. Membrantrockner oder Adsorptionstrockner benötigt. Auf Grund der in den theoretischen Berechnungen (vgl. Kapitel 3.1.4) erwarteten geringen Einfluss des Wassergehalts und der hohen relativen Differenz der Wassermenge durch die vorhandene Anlagentechnik, wurde diese Hypothese mit den vorherrschenden Versuchsbedingungen überprüft.

Die Ergebnisse der Messung sind in Abb. 6-7 dargestellt. Die einzelnen Messpunkte von trockener und feuchter Druckluft weichen nur geringfügig voneinander ab, die maximale Abweichung ist kleiner $0,5 \%$. Dies liegt im Bereich der Messungenauigkeit des eingesetzten Volumenstrommessgeräts, welches eine Messgenauigkeit von $\pm 1 \%$ v.M. aufweist. Hierdurch werden die in der Theorie getätigten Überlegungen und Berechnungen zur Bedeutung des Wassergehalts für den Leakagestrom gestützt (vgl. Kapitel 3.1.4). Ein Einfluss des Feuchtegehalts auf den Leakagestrom kann somit messtechnisch nicht nachgewiesen werden. Dieser untersuchte Einflussfaktor ist deshalb als nicht relevant einzustufen.

Ein Normkubikmeter Luft wiegt, je nach Rahmenbedingungen der Norm, circa $1,225 \text{ kg}$. Im Versuchsdurchlauf mit feuchter Druckluft, hat die Druckluft einen Wassergehalt von $18,55 \text{ g/m}_N^3$, was einem Masseanteil von $1,5 \%$ entspricht. Die Stoffwerte von reinem Wasserdampf²⁵ und trockener Luft unterscheiden sich. Die Stoffwerte für das Gemisch aus trockener Luft und Wasser verändern sich auf Grund des geringen Wasseranteils jedoch nur geringfügig. Es kann deshalb zu keiner nennenswerten Beeinflussung des Leakagestroms kommen.

²⁴ Die Versuchsdurchführung ist in Kapitel 5.1.2 im Detail beschrieben. Ungetrocknete Druckluft wird durch einen Bypass des Kältetrockners direkt an den Prüfstand geleitet.

²⁵ Isentropenexponent (Wasserdampf bei $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$): $1,33$. Spezifische Gaskonstante (Wasserdampf): $461,4 \text{ J/kgK}$

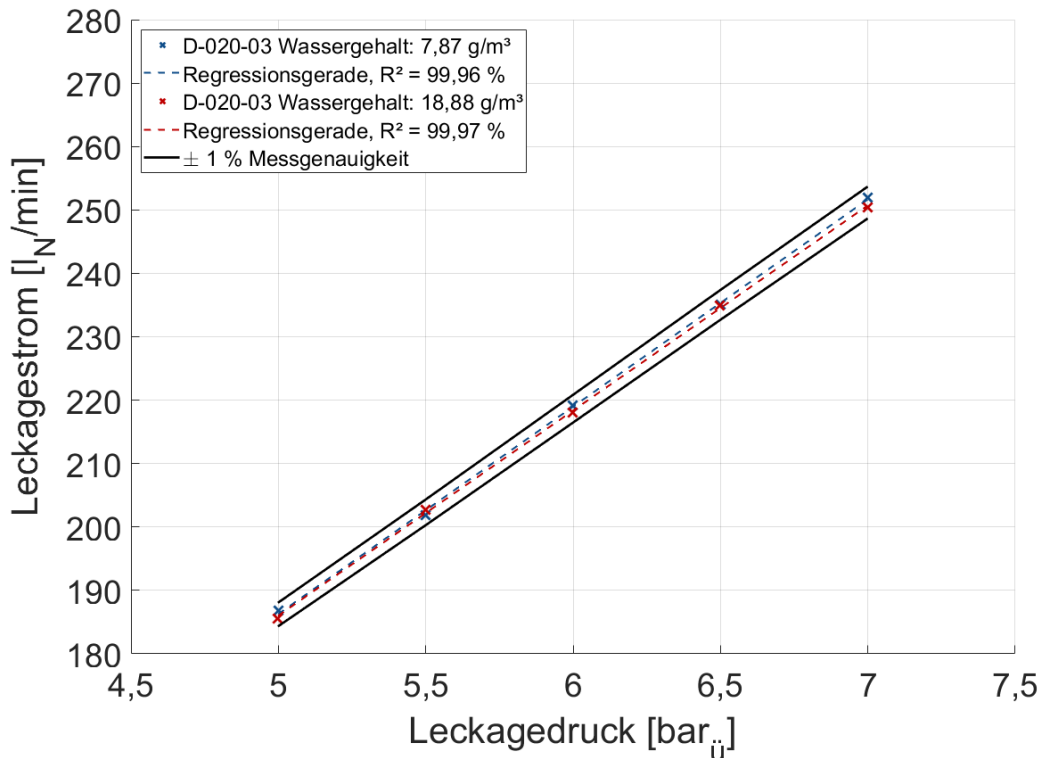


Abb. 6-7: Messergebnisse der Leckageströme von Druckluft mit unterschiedlichem Wassergehalt (Prüfkörper: D-020-03)

Bewertung der Einflussfaktoren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden fünf potentielle Einflussfaktoren auf den Leckagestrom von Druckluftleckagen untersucht. Abschließend erfolgt eine Bewertung der einzelnen Faktoren im Vergleich. Die Ergebnisübersicht ist in Abb. 6-8 dargestellt, die Faktoren sind dabei in die Kategorien: Kein messbarer, geringer oder mittlerer Einfluss, sowie Haupteinflussfaktoren eingeteilt.

Der Leckagedruck bildet einen der beiden Haupteinflussfaktoren auf die Höhe des Leckagestroms. Aufgrund der direkten Proportionalität führt eine Verdopplung des Leckagedrucks auch zu einer Verdopplung des Leckagestroms. Somit kann der Leckagestrom in Druckluftsystemen durch eine Netzdruckabsenkung verringert werden.

Der zweite Haupteinflussfaktor auf den Leckagestroms ist die Fläche der Leckage. Diese wirkt ebenfalls direkt proportional und ist somit bezüglich der Auswirkung mit dem Leckagedruck gleichzusetzen.

	Kein (messbarer) Einfluss	Geringer Einfluss	Mittlerer Einfluss	Hauptfaktor
Druck				×
Fläche				×
Geometrie			×	
Temperatur		×		
Feuchte	×			

Abb. 6-8: Bewertungsübersicht der untersuchten Einflussfaktoren auf Druckluftleckagen

Die Leckagegeometrie hat einen unmittelbaren Einfluss auf den Leckagestrom. Der Discharge Coefficient beschreibt den Einfluss der Leckagegeometrie auf den Leckagestrom. kreisrunde Leckagen haben bei gleicher Fläche einen größeren Discharge Coefficient als rechteckige Leckagen und damit auch einen höheren Leckagestrom. Bei rechteckigen Leckagen konnte festgestellt werden, dass der Discharge Coefficient mit steigendem Länge zu Breite Verhältnis abnimmt. Bei realen Leckagen ist auf Grund der unbekanntem Leckagefläche der Geometrieinfluss nicht vom Einfluss der Leckagefläche trennbar, es kann folglich kein Discharge Coefficient bestimmt werden.

Die Auswirkung der Drucklufttemperatur auf den Leckagestrom konnte experimentell nachgewiesen werden. Ein Temperaturanstieg der Druckluft führt zu einer Verringerung des Leckagestroms. Der Effekt fällt mit circa 0,17 % je Kelvin Temperaturänderung gering aus, weshalb diesem Einflussfaktor nur ein geringer Einfluss attestiert wird. Die Ergebnisse bestätigen die theoretischen Berechnungen aus dieser Arbeit. Ein Betrieb des Druckluftnetzes auf höheren Temperaturen um Druckluftleckagen zu senken, ist nicht sinnvoll.

Eine Veränderung des Wassergehalts der Druckluft führt zu keiner, mit dem verwendeten Prüfstand messtechnisch erfassbaren, Änderung des Leckagestroms. Dies ist auf Grund der geringen Menge an gelöstem Wasser in der Druckluft plausibel.

6.1.2 Darstellung und Diskussion der Messergebnisse für Leckagen kreisrunder Geometrie

Nachfolgend werden die Messergebnisse der idealen Leckagen mit kreisrunder Geometrie in einer tabellarischen Übersicht dargestellt. Zusätzlich werden die aus den Messwerten berechneten Discharge Coefficients angegeben. Die Ergebnisse werden im Anschluss mit Werten aus der Literatur verglichen und diskutiert.

Übersicht der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Kapitels sind reproduzierbare und präzise Angaben zum Leckagestrom von idealen Leckagen mit kreisrunder Geometrie. Das Auswertungsverfahren der Messwerte ist bereits in Kapitel 5.1.3 ausführlich erläutert. Nach dem erläuterten Auswertungsverfahren bestehen die im Folgenden gezeigten Leckageströme jeweils aus drei, auf die gleiche Weise gefertigten Platten, welche jeweils dreimal vermessen und gemittelt²⁶ werden. Für jede untersuchte Leckagegeometrie existiert eine detaillierte Auswertung aller betrachteter Parameter. Die Auswertung des Leckagestroms in Abhängigkeit zum Leckagedruck, sowie deren Standardabweichung und der jeweilige Discharge Coefficient sind exemplarisch für kreisrunde Leckagen mit einem Durchmesser von 2 mm in Tabelle 6-6 dargestellt. In der ersten Spalte der Tabelle ist der gemessene Leckagedruck dargestellt, dieser variiert auf Grund der exakten Regelung erst in der dritten Nachkommastelle. Im Anhang D-1 sind alle ausführlichen Auswertungen der gemessenen Prüfkörper mit kreisrunden Leckagen aufgeführt.

Tabelle 6-6: Ergebnisse einer kreisrunden Leckage mit einem Durchmesser von 2 mm

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	153,17	1,16	0,85
4,50	168,94	1,31	0,85
5,00	184,36	1,15	0,85
5,50	200,82	1,33	0,85
6,00	216,81	1,39	0,86
6,50	232,70	1,32	0,86
7,00	248,72	1,46	0,86
7,50	264,88	1,23	0,86
8,00	280,76	1,33	0,86

²⁶ Je Leckagegeometrie werden somit neun Messungen miteinander verrechnet, um das Endergebnis zu bilden.

Die in Tabelle 6-6 dargestellten Ergebnisse der Leckageströme zeigen, die in Kapitel 6.1.1 erläuterte Druckabhängigkeit. Die Standardabweichung des Leckagestroms beschreibt die Streuung der Messwerte um den in der zweiten Spalte ausgewiesenen Mittelwert des Leckagestroms. Sie ist mit kleiner 1,5 l_N/min sehr gering und bestätigt die gute Reproduzierbarkeit der Messungen, sowie der Fertigung. Der Discharge Coefficient gibt die Abweichung des Leckagestroms des Prüfkörpers von einer perfekten Leckage an. Er ist nahezu konstant und liegt bei 86 %. Die Unabhängigkeit des Discharge Coefficients vom Leckagedruck, bestätigt dessen Eignung als Maß für den Einfluss der Leckagegeometrie auf den Leckagestrom.

Tabelle 6-7 führt die Leckageströme (bei 6 bar_ü), sowie die jeweiligen Discharge Coefficients aller betrachteten kreisrunden idealen Leckagen auf. Der Discharge Coefficient für kreisrunde Leckagen variiert in einem Bereich von 10 %-Punkten. Leckagen mit größerem Durchmesser zeigen in den Auswertungen tendenziell höhere Discharge Coefficients. Die Leckagegeometrie D-015 stellt eine Ausnahme dar. Der vergleichsweise hohe Wert für den Discharge Coefficient von 0,86 ist vermutlich auf die Nachbearbeitung der Prüfkörper im Rahmen der Fertigung zurückzuführen.

Je größer der Leckagedurchmesser, desto geringer ist das Verhältnis aus Umfangslänge zur Kreisfläche. Für die Strömungsverhältnisse an der Leckage bedeutet dies, dass Randeffekte, wie z.B. Wirbelbildungen, Wandreibung, etc. in Bezug auf die Gesamtleckage an Bedeutung verlieren. Dies führt zu höheren Leckageströmen und folglich auch zu höheren Discharge Coefficients.

Im Mittel beträgt der Discharge Coefficient 0,82 für kreisrunde Leckagen, dies entspricht in etwa den in Tabelle 3-2 (Seite 38) gezeigten Werten für ein zylindrisches Ansatzrohr. Auf Grund der geringen Leckagedurchmesser und einer Plattenstärke von 2,0 mm kann die zylindrische Bohrung als Ansatzrohr gesehen werden. Der Median der ermittelten Werte der Discharge Coefficients beträgt 0,83 und wird in das entwickelte Berechnungsmodells (vgl. Kapitel 3.1.4) hinterlegt.

Tabelle 6-7: Leckageströme bei 6 bar_ü aller kreisrunden idealen Leckagen

Leckagedurchmesser [mm]	Leckagefläche [mm ²]	Leckagestrom bei 6 bar _ü [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
1,0	0,785	49,67	0,79
1,5	1,767	122,03	0,86
1,6	2,011	126,38	0,78
1,7	2,270	146,82	0,80
1,8	2,545	161,40	0,79
1,9	2,835	188,91	0,83
2,0	3,142	216,75	0,86
2,5	4,909	326,24	0,83
3,0	7,069	509,00	0,89

Ergebnisse im Literaturvergleich

Wie bereits in Kapitel 2.3 dargelegt, existieren nur wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen mit dem Fokus auf der Bestimmung von Druckluftleckageströmen. Es sind zwei Paper einer serbischen Forschergruppe bekannt, welche sich Beide mit der indirekten Quantifizierung von Druckluftleckagen beschäftigen. Die Leckageprüfkörper dieser Paper sind zum Einen Bohrungen in metallischen Verschlusskappen, sowie zum Anderen Bohrungen in Polyurethan (PUN) Schläuchen.

Im direkten Vergleich der beiden Paper ((Dudić et al. 2012a; Dudić et al. 2012b)) fällt auf, dass sich die publizierten Werte bei Prüfkörpern mit gleichem Leckagedurchmesser, jedoch unterschiedlichem Material (Metall bzw. Kunststoff) stark unterscheiden. Der Leckagestrom bei den Prüfkörpern aus Kunststoff ist um circa 40 % verringert. Diese große Abweichung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine mangelhafte Fertigung der Prüfkörper und fehlender Qualitätskontrolle der Fertigung zurückzuführen. Durch die Flexibilität des Kunststoffschlauchs ist die gesetzte Bohrung in Realität vermutlich deutlich kleiner, als vom Autor angenommen. Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, sind der genaue Messaufbau, sowie die Messpunkte und die Regelung des Prüfstands nicht erklärt. Zudem hat das verwendete Volumstrommessgerät eine geringe Messgenauigkeit.

Für den Vergleich mit den eigenen Messwerten werden aus den oben genannten Gründen nur die Messergebnisse der metallischen Prüfkörper herangezogen. Abb. 6-9 beinhaltet sowohl die Ergebnisse der Publikationen von (Dudić et al. 2012a) für kreisrunde Leckagen mit Durchmessern von 1,0, 1,5 und 2 mm, als auch die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse der idealen Leckagen D-010, D-015 und D-020. Der Vergleich der Messwerte zeigt kein einheitliches Bild. Für Leckagen mit einem Durchmesser von 1 mm werden vergleichbare Ergebnisse erzielt. Bei steigendem Leckagedurchmesser wächst die Abweichung stark an. Bei einem Leckagedurchmesser von 2,0 mm liegen die von (Dudić et al. 2012a) publizierten Leckageströme circa 39 % unter den in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnissen und weisen zusätzlich eine größere Streuung auf. Die unterschiedliche Steigung der Regressionsgeraden ist der Darstellung der Absolutwerte in der Abbildung und dem Einfluss des Leckagedrucks auf den Leckagestrom geschuldet. Dieser „Effekt“ wurde bereits auf Seite 82 ausführlich erläutert.

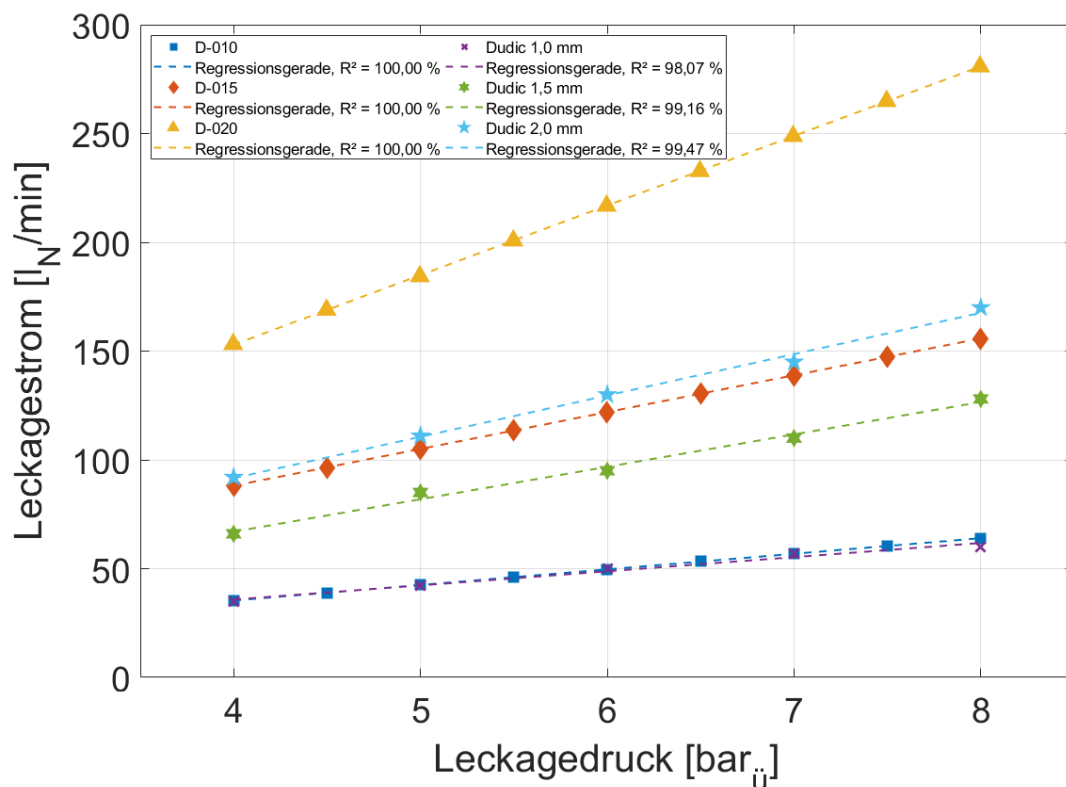


Abb. 6-9: Vergleich der Messergebnisse der Leckagen D-010, D-015 und D-020 zu Werten von (Dudić et al. 2012a)

Es liegt nahe, dass diese Publikationen in Bezug auf die Prüfkörperherstellung, sowie dem Versuchsaufbau bzw. Ablauf erhebliche Schwächen aufweisen. So ist beispielsweise die Regelung des Leckagedrucks, sowie dessen Messpunkt nicht erläutert. Hier auftretende Abweichungen können, wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt, den Leckagestrom deutlich beeinflussen. Die veröffentlichten Messergebnisse einer kreisrunden Leckage mit einem Durchmesser von 2 mm von Dudic et al. entsprechen in etwa einer präzise gefertigten und vermessenen idealen Leckage von 1,6 mm dieser Arbeit (vgl. Tabelle 6-7) und stützen die These einer mangelhaften Prüfkörperfertigung.

Neben den Publikationen von Dudic et al. gibt es noch die in Kapitel 2.3.3 vorgestellte Masterarbeit von Wolstencroft an der University of Waikato in Neuseeland (Wolstencroft 2008). Die Masterarbeit weist Leckageströme für ideale Leckagen mit kreisrunder, sowie mit Langlochgeometrie aus. In Abb. 6-10 sind Leckageströme für die von Wolstencroft vermessenen Prüfkörper mit den Durchmessern 1,6 mm und 3,2 mm im Vergleich zu den eigenen Messwerten bei 1,6 mm und 3,0 mm dargestellt. Für den Vergleich wurde die Messung von Wolstencroft einer Leckage mit 3,2 mm Durchmesser, auf 3,0 mm Durchmesser normiert.

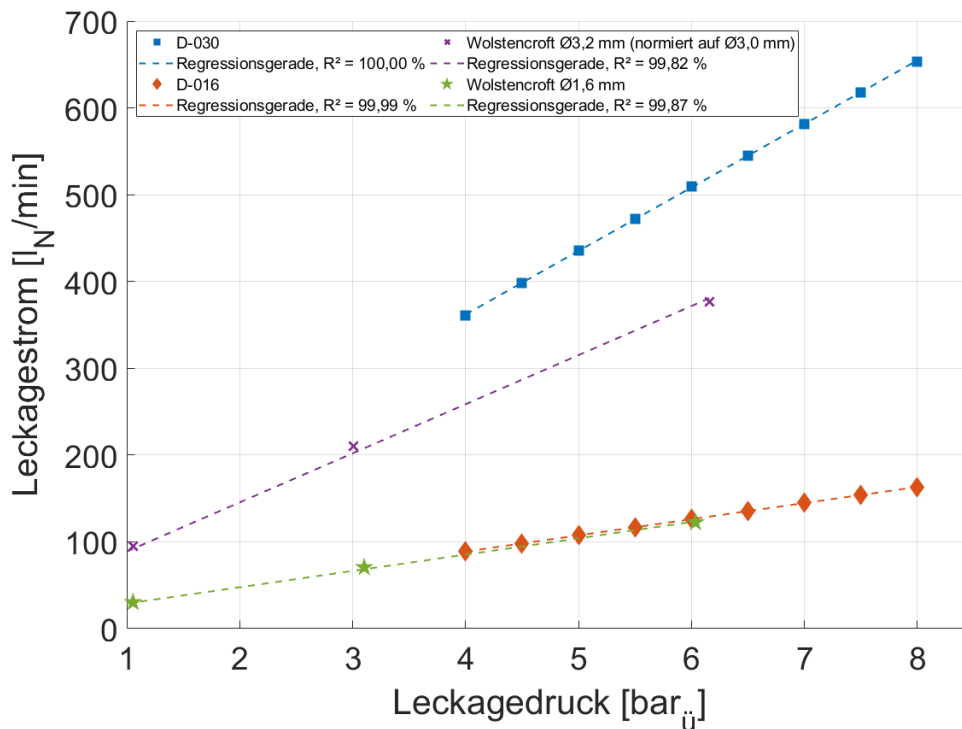


Abb. 6-10: Messergebnisse der Leckagen D-016 und D-030 im Vergleich zu Werten von Wolstencroft für kreisrunde Leckagen mit 1,6 mm und 3,2 mm Durchmesser (normiert auf 3,0 mm). Quelle: (Wolstencroft 2008)

Die jeweiligen ermittelten Leckageströme von Wolstencroft sind im Vergleich zu den in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnissen verringert. Für eine kreisrunde Leckage mit einem Leckagedurchmesser von 1,6 mm, beträgt die Abweichung jedoch nur circa 4 %. Bei größerem Leckagedurchmesser fällt die Abweichung des angegebenen Leckagestroms deutlich größer aus. Der auf 3,0 mm Leckagedurchmesser normierte Leckagestrom des Prüfkörpers von Wolstencroft ist hingegen um 26,4 % im Vergleich zu den in dieser Arbeit ermittelten Werte verringert. Dies kann mehrere Ursachen haben: Die von Wolstencroft gefertigten Prüfkörper mit kreisrunden Leckagen wurden nicht auf ihre Fertigungstoleranz überprüft. Zudem ist nicht aufgeführt, ob die Bohrungen nachträglich bearbeitet wurden. Eine ungenau gefertigte Fläche, sowie ein undefinierter Einfluss der Leckagegeometrie z.B. durch Grate und Späne, kann wie in Kapitel 6.1.1 gezeigt das Messergebnis maßgeblich beeinflussen.

Im Rahmen der Arbeit von Wolstencroft wurde nur jeweils ein einziger Prüfkörper je Leckagegeometrie vermessen. Etwaige Abweichungen in der Fertigung können somit nicht anhand der Messergebnisse erkannt werden. Zusätzlich wird der Leckagestrom nicht auf einen Normzustand ($\hat{=}$ Normvolumenstrom) bezogen, sondern ein Betriebsvolumenstrom ausgewiesen. Die Rückrechnung auf einen Normvolumenstrom wird somit von der Messgenauigkeit des gemessenen Betriebsdrucks und der Temperatur beeinflusst.

Der von Wolstencroft verwendete Messaufbau, sowie die Versuchsdurchführung weisen zudem Schwächen auf. Die Regulierung des Leckagedrucks erfolgt mittels manuell eingestelltem Regelventil. Da die Ventilstellung für einen konstanten Leckagedruck in direkter Abhängigkeit zum Leckagestrom steht, muss eine präzise Nachstellung während des Betriebs erfolgen. Inwiefern stabile Verhältnisse am Prüfkörper erreicht werden und wie stark die Schwankung des Leckagedrucks ausfällt, ist nicht aufgeführt. Bezüglich der Versuchsdurchführung ist nicht dargestellt, wie lange die Messdauer je Messpunkt ist. Auch die Auswertung der Messwerte ist nicht weiter erläutert, somit ist nicht klar definiert, ob es sich bei den Ergebnissen um arithmetische Mittelwerte oder beispielsweise den Median handelt.

6.1.3 Darstellung und Diskussion der Messergebnisse für Leckagen mit Langlochgeometrie

Nachfolgend werden die Messergebnisse der idealen Leckagen mit Langlochgeometrie in einem Überblick dargestellt. Zusätzlich werden die aus den Messwerten berechneten Discharge Coefficients mit angegeben. Die Ergebnisse werden im Anschluss mit Werten aus der Literatur verglichen und diskutiert.

Übersicht der Ergebnisse

Nachfolgend sind reproduzierbare und präzise Messergebnisse des Leckagestroms an Prüfkörpern mit Langlochgeometrie aufgeführt. Die Auswertungsschritte sind in Kapitel 5.1.3 ausführlich erläutert. Auf Grund der Ungenauigkeiten in der Fertigung und Nachbearbeitung der Prüfkörper, wird für jeden Prüfkörper die tatsächliche Leckagefläche mittels dem, in Kapitel 5.1.1 erläuterten Fotoverfahren ermittelt.

Beim Vergleich der Prüfkörper untereinander, erfolgt eine Normalisierung auf eine gemeinsame Basis. Abb. 6-11 zeigt, weshalb die Normalisierung des Leckagestroms auf eine gemeinsame Leckagefläche erforderlich ist. In der linken Grafik sind die Messwerte des Leckagestroms der Prüfkörper 08-0895-03, sowie die fortlaufenden Seriennummern 04 und 05 aufgetragen. Die Abweichungen der Prüfkörper untereinander beträgt bis zu 6 %, wobei der Prüfkörper mit der Endziffer 03 den geringsten Leckagestrom aufweist, der Prüfkörper mit der Endziffer 05 weist den größten Leckagestrom auf. Werden die ermittelten Leckageströme im Anschluss auf die gleiche Fläche normalisiert, sinkt die Abweichung stark ab. Dieser Zusammenhang ist in der rechten Graphik in Abb. 6-11 dargestellt. Die Abweichung der Prüfkörper untereinander sinkt im hier dargestellten Fall auf kleiner 0,7 % und unterstreicht die Notwendigkeit der Qualitätsüberprüfung der gefertigten Bauteile. Im Vergleich zu kreisrunden Leckagen weisen die gefertigten Prüfkörper mit Langlochgeometrie größere Abweichungen untereinander auf. Dies ist auf die variierenden Leckageflächen aufgrund der höheren Fertigungstoleranz zurückzuführen. Im Vergleich der Prüfkörper untereinander, ist somit stets eine Flächennormalisierung durchzuführen.

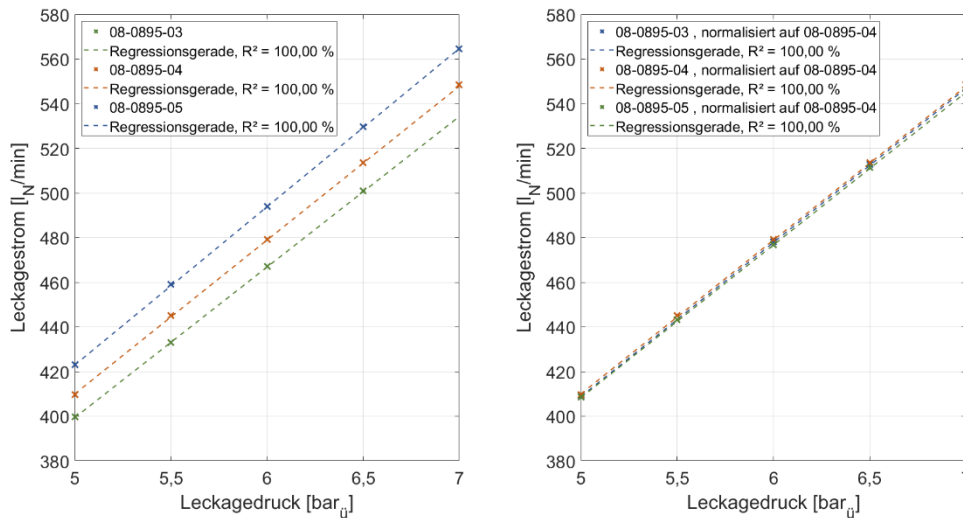


Abb. 6-11: Leckageströme der Prüfkörper 08-0895-03 bis 08-0895-05 als tatsächliche Messdaten (links) und normalisierte Darstellung auf Basis der Leckagefläche von 08-0895-04 (rechts)

Für die Darstellung der Ergebnisse des Leckagestroms einer Langloch-Leckagegeometrie bestehen aus den arithmetisch gemittelten Einzelergebnissen von drei Prüfkörpern (vgl. Kapitel 5.1.3). Die Leckageströme der Platten werden hierbei auf die mittlere Leckagefläche der Prüfkörper bezogen. Die Ergebnisse sind sonst analog zu den der kreisrunden Leckagen gehalten. Als Beispiel sind in Tabelle 6-8 die Ergebnisse für die Leckagegeometrie 08-0400 gelistet. Die Detailergebnisse aller Leckagen mit Langlochgeometrie sind in Anhang D-2 aufgeführt.

Tabelle 6-8: Ergebnisse der Langloch-Leckage 08-0400 (Leckagefläche: 3,775 mm²)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	159,79	1,30	0,74
4,50	175,40	1,20	0,73
5,00	191,06	1,13	0,73
5,50	206,94	1,29	0,73
6,00	222,26	1,27	0,73
6,50	239,49	1,24	0,74
7,00	255,70	1,36	0,74
7,50	271,62	1,40	0,74
8,00	286,93	1,48	0,73

Die Messergebnisse der exemplarischen idealen Leckage mit Langlochgeometrie in Tabelle 6-8 zeigen, wie auch die kreisrunden Leckagen, eine deutliche Abhängigkeit des Leckagestroms vom herrschenden Leckagedruck. Die Standardabweichung ist mit kleiner 1,5 l_N/min auf einem ähnlich guten Niveau, wie die der kreisrunden Leckagen, wenn auch die durchschnittliche Standardabweichung über alle Druckstufen etwas höher ausfällt. Die leichte Erhöhung ist auf die größere Fertigungstoleranz im Herstellungsprozess der Prüfkörper und den anschließenden Schritt zur Leckageflächenbestimmung zurückzuführen. Der ermittelte Discharge coefficient ist näherungsweise konstant und liegt mit circa 0,73 um 5 Prozentpunkte niedriger, als der geringste ermittelte Discharge Coefficient einer kreisrunden idealen Leckage. Dies bestätigt die qualitative Übertragbarkeit des, in Kapitel 3.1.3 gezeigten Zusammenhangs des Discharge Coefficients von runden und eckigen Ausflussformen für inkompressible Medien (vgl. Abb. 3-6, Seite 38).

Eine Übersicht der Messergebnisse aller idealen Leckagen mit Langlochgeometrie ist in Tabelle 6-9 dargestellt. Der, im Vergleich zu den kreisrunden Leckagen, verminderte Discharge Coefficient, lässt sich an allen untersuchten Langlochleckagen nachvollziehen. Der Discharge Coefficient variiert in einem Bereich von 17 %-Punkten. Diese größere Streuung des Discharge Coefficients bei Leckagen mit Langlochgeometrie ist auf die größere Variation der Leckagegeometrie zurückzuführen.

Langlochleckagen können durch Variation von Länge und Breite unterschiedliche Umfangslängen bei gleicher Leckagefläche aufweisen. In der Analyse der Einflussfaktoren (Kapitel 6.1.1, Seite 85) wurde bereits der Zusammenhang des Länge- zu Breitenverhältnisses und dessen Auswirkungen auf den Leckagestrom erläutert. Die dort gezeigten Zusammenhänge des Absinkens des Leckagestroms mit steigendem Länge/Breite Verhältnis, spiegeln sich auch direkt in den Discharge Coefficients wieder. Die Leckage 04-0734 hat beispielsweise mit 18,35 das größte Länge/Breite Verhältnis und mit 0,61 den kleinsten Discharge coefficient. Bei genauerer Betrachtung dieses Zusammenhanges lässt sich feststellen, dass dieser sich vor allem für eine qualitative Aussage zum Leckagestrom bei Leckagen mit vergleichbarer Leckagefläche eignet. Der Median der ermittelten Werte der Discharge Coefficients beträgt 0,73, das arithmetische Mittel 0,70. Beide Werte werden in das Berechnungsmodell hinterlegt.

Tabelle 6-9: Leckageströme bei 6 bar_i aller idealen Leckagen mit Langlochgeometrie

Seriennummer	Leckagefläche (gemessen) [mm ²]	Leckagestrom bei 6 bar _i [l _N /min]	Länge/Breite Verhältnis [-]	Discharge Coefficient [-]
10-0228	2,365	125,78	2,28	0,66
08-0300	2,817	149,20	3,75	0,66
08-0400	3,775	223,26	5	0,73
04-0734	4,013	196,08	18,35	0,61
20-0300	5,748	340,04	1,5	0,73
08-0895	8,404	483,67	11,19	0,73
10-0725	8,223	518,32	7,25	0,78

Ergebnisse im Literaturvergleich

Auf Grund der schlechten Datengrundlage im Bereich Druckluftleckagen, sind keine Literaturdaten zu Leckageströmen von Langlochgeometrien bekannt. Die in dieser Arbeit bereits mehrfach erwähnte Arbeit von Wolstencroft (Wolstencroft 2008), beinhaltet jedoch Untersuchungen zu Leckagen mit rechteckiger Leckagegeometrie. Auf Grund der Ähnlichkeit der Prüfkörper in Bezug auf die Leckagegeometrie, erfolgt ein Vergleich mit diesen Daten. Wolstencroft untersuchte zehn unterschiedliche Prüfkörper. Die Dimensionen der Prüfkörper, sowie die Leckagefläche, das Länge-Breite Verhältnis und der Discharge coefficient sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst. Da die Prüfkörper in der Arbeit von Wolstencroft nur bei wenigen und zusätzlich schwankenden Drücken vermessen wurden, eignet sich der Discharge Coefficient besser für den Vergleich der Prüfkörper, als der tatsächlich gemessene Volumenstrom, da dieser, wie in dieser Arbeit gezeigt, druckunabhängig ist.

Tabelle 6-10: Daten der Prüfkörper von Wolstencroft. Quelle: (Wolstencroft 2008)

Länge [mm]	Breite [mm]	Leckagefläche (gemessen) [mm ²]	Länge/Breite Verhältnis [-]	Discharge Coefficient [-]
10	0,5	6,05	20	0,63
15	0,5	9,37	30	0,62
30	0,5	18,75	60	0,67
10	0,75	7,69	13,3	0,85
20	0,75	15,75	26,7	0,64
2	1	1,76	2	0,82
5	1	5,47	5	0,70
8	1	8,54	8	0,66
15	1	15,08	15	0,68
7,5	2	14,92	3,8	0,67

Im Vergleich zu den bereits gezeigten Messwerten dieser Arbeit (vgl. Tabelle 6-9, S.99) wird deutlich, dass die Höhe der Discharge Coefficients in einem sehr ähnlichen Bereich liegen. Das arithmetische Mittel aller Discharge Coefficients der Arbeit von Wolstencroft beträgt 0,70, die Prüfkörper dieser Arbeit weisen im Mittel ebenfalls 0,70 auf und sind somit vergleichbar. Auch bei den Messwerten von Wolstencroft ist ein Trend zu geringeren Discharge Coefficients bei größeren Länge-Breite-Verhältnissen vorhanden. Eine Ausnahme stellt der Prüfkörper mit einer Länge von 10 mm und einer Breite von 0,75 mm dar, welcher den höchsten ermittelten Discharge Coefficient aller Messungen besitzt. Ggf. könnte bei diesem Prüfkörper ein Fehler bei der Flächen- oder Volumenstrommessung vorliegen.

Die Ergebnisse von Wolstencroft schwanken untereinander stärker als die Ergebnisse dieser Arbeit. Die von Wolstencroft publizierten Discharge Coefficients variieren in einem Bereich von 23 %-Punkten. Dies ist vermutlich auf die Entscheidung der Untersuchung von jeweils nur einem Prüfkörper pro untersuchter Leckagegeometrie zurückzuführen.

Auf Grund der unterschiedlichen Maße, ist ein Direktvergleich der eigenen Prüfkörper mit den von Wolstencroft gefertigten, nur eingeschränkt möglich. Die Leckagegeometrien mit den Seriennummern 08-0895 und 10-0725 können mit den Prüfkörpern 10 mm x 0,75 mm und 8 mm x 1 mm von Wolstencroft, auf Grund ähnlicher Leckagefläche und Länge-Breite Verhältnis verglichen werden. Die Discharge Coefficients beider Geometrien weichen 13 bzw. 12 % Punkte voneinander ab, wobei der Discharge Coefficient bei der Leckage 10 mm x 0,75 mm, wie bereits angesprochen, ungewöhnlich hoch scheint. Die Ausflussgeometrie der verglichenen Prüfkörper ist ähnlich, jedoch nicht identisch. Diese hat jedoch einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Leckagestrom (vgl. Kapitel 6.1.1). Die Qualität der Ergebnisse steigt folglich mit der Anzahl der Messungen und Prüfkörper, da unterschiedliche Geometrieinflüsse abgedeckt werden.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Messwerte und Erkenntnisse können durch diesen Vergleich auf Grund der nicht identischen Leckagegeometrie nur näherungsweise validiert werden. Der Vergleich zeigt jedoch, dass die Ergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit valide sind. Eine ausführlichere Analyse ist in Ermangelung von weiteren Veröffentlichungen nicht möglich.

6.2 Druckluftleckagen mit realer Leckagegeometrie

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Experimenten mit Prüfkörpern realer Leckagegeometrie vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 6.2.1 werden die Untersuchungsergebnisse der Prüfkörper des Typs Verschraubungen vorgestellt und diskutiert. Kapitel 6.2.2 behandelt die Ergebnisse der realen Leckagen des Typs Schlauchverbindungen. Auf Grund des neuartigen Untersuchungsansatzes in Bezug auf die Prüfkörper, existieren keine Literaturdaten, anhand derer die Messergebnisse beider Fälle eingeordnet werden können. Da keine technische Möglichkeit besteht, die hergestellte Leckagefläche der realen Leckagen zu vermessen, kann keine Auswertung des Discharge Coefficient erfolgen.

6.2.1 Verschraubungen

Verschraubungen stellen eine der häufigsten Verbindungsarten in Druckluftsystemen dar. Nachfolgend werden die Messergebnisse der realen Leckagen des Typs Verschraubungen gezeigt und diskutiert. Die Aufteilung des Kapitels erfolgt anhand der in Kapitel 5.2.1 ausgewählten Leckagegeometrien (vgl. Abb. 5-12, Seite 68), abschließend folgt ein Fazit zu diesem Typ von realen Leckagen.

Das Auswertungsverfahren der Messwerte ist bereits in Kapitel 5.2.3 ausführlich erläutert. Nach dem erläuterten Auswertungsverfahren bestehen die im Folgenden gezeigten Leckageströme jeweils aus drei, auf die gleiche Weise gefertigte Verschraubungen, welche jeweils dreimal vermessen und gemittelt²⁷ werden. Für jede untersuchte Leckagegeometrie existiert eine detaillierte Auswertung aller betrachteter Parameter. Die Auswertung des Leckagestroms in Abhängigkeit des Leckagedrucks, sowie deren Standardabweichung sind exemplarisch für eine Verschraubung ohne Dichtmittel mit einem Anzugsmoment von 40 Nm, in Tabelle 6-11 dargestellt. Die Standardabweichung ist im Vergleich zu den Messungen der idealen Leckagen leicht erhöht, dies ist auf die ungenauere Fertigung zurückzuführen. Die durch die Messungengenauigkeit induzierten Abweichungen spielen bei den realen Prüfkörpern eine untergeordnete Rolle. Im Anhang E-1 bis E-3 sind alle ausführlichen Auswertungen der gemessenen Prüfkörper des Typs Verschraubung aufgeführt.

Tabelle 6-11: Leckagestrom einer 1/2 Zoll-Verschraubung ohne Dichtmittel mit einem Anzugsmoment von 40 Nm

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	6,11	0,29
5,50	6,64	0,32
6,00	7,17	0,36
6,50	7,74	0,37
7,00	8,29	0,38

Verschraubungen ohne Dichtmittel

Als reale Leckagen des Typs „Verschraubungen ohne Dichtmittel“ werden drei, auf die gleiche Weise hergestellte Prüfkörper vermessen und ausgewertet. Die Auswertung der einzelnen Bauteile ist in Abb. 6-12 exemplarisch für die Anzugsmomente 10 Nm (Kreise) und 40 Nm (Dreiecke) dargestellt. Es zeigt sich, dass der lineare Zusammenhang von Leckagedruck und Leckagestrom, welcher bereits im Rahmen der Untersuchungen von idealen Leckagen ausführlich behandelt wurde, auch für die reale Leckagen des Typs „Verschraubung ohne Dichtmittel“ gilt.

²⁷ Pro realer Leckagegeometrie werden somit, analog zur Auswertung von idealen Leckagen, neun Messungen miteinander verrechnet, um das Endergebnis zu bilden.

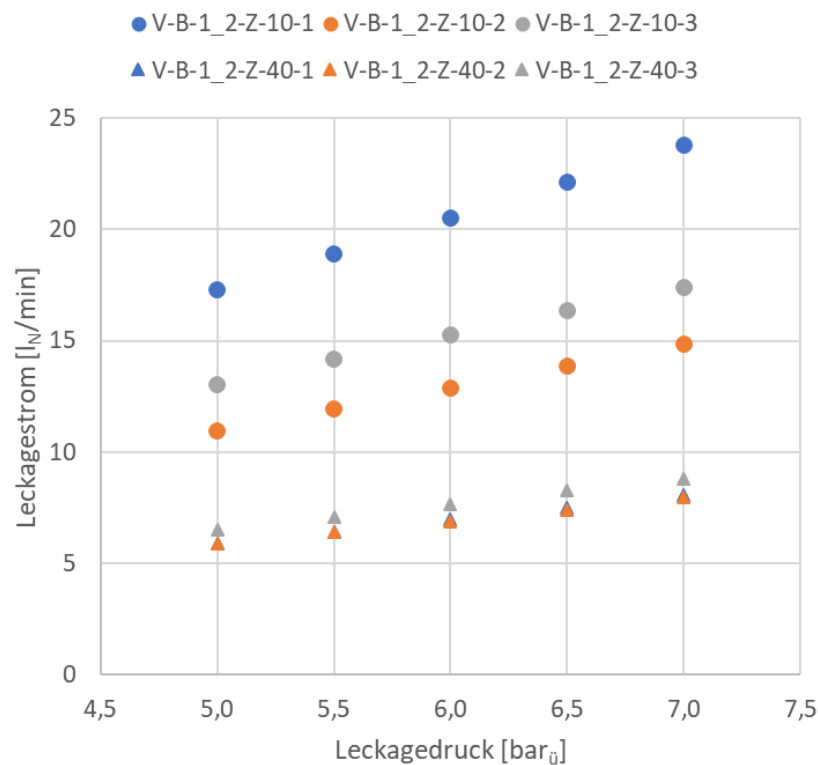


Abb. 6-12: V-B-1/2-Z-1 bis 3; Anzugsmoment: (Kreise) 10 Nm (Dreiecke) 40 Nm

Die Darstellung in Abb. 6-12 zeigt zudem, dass die Leckageströme der Bauteile bei geringem Anzugsmoment stark voneinander abweichen. Die Abweichung vom Mittelwert der Bauteile beträgt maximal $\pm 25\%$ und ist auf die Fertigungstoleranz der Bauteile zurückzuführen. Die Prüfkörper bestehen aus Standard Drehteilen mit $\frac{1}{2}$ Zoll Gewinde, welche fertigungsbedingt deutliche größere Toleranzen als Präzisionsbohrungen aufweisen. Werden die Verschraubungen mit einem größeren Anzugsmoment angezogen, so verringert sich nicht nur der Leckagestrom der Bauteile, sondern auch die Abweichung der Bauteile untereinander auf maximal $\pm 7\%$.²⁸ Die Prüfkörper mit den Serienendnummer 2 und 3 sind bei einem Anzugsmoment von 40 Nm fast deckungsgleich. Grund für die geringeren Abweichungen ist eine Verformung der Prüfkörper durch das starke Anziehen, welche eine Reduktion der Leckagefläche zur Folge hat. Die Verformung ist hierbei größer als die Fertigungstoleranzen. Werden die Verschraubungen gelöst und im Anschluss wieder verschraubt, zeigen sich bei geringen Anzugsmomenten leicht erhöhte, bei größeren Anzugsmomenten leicht verringerte Leckageströme. Dies ist wahrscheinlich auf eine plastische Verformung des Prüfkörpers zurückzuführen.

²⁸ Abb. 6-13 auf Seite 104 verdeutlicht den Zusammenhang von Anzugsmoment und Abweichung der Bauteile untereinander.

Für eine detaillierte Übersicht zur Abhängigkeit des Leakagestroms vom Anzugsmoment der Verschraubung, sind die Leakageströme der drei Prüfkörper in Abhängigkeit des Anzugsmoments in Tabelle 6-12 aufgeführt. Die beiden Prüfkörper mit den Serienendnummern 1 und 3 zeigen ein stetig fallender Leakagestrom mit steigendem Anzugsmoment, wobei die Änderung des Leakagestroms nicht konstant ist, sondern bei höheren Anzugsmomenten abflacht. Dies ist vermutlich auf eine ausgeprägte Verformung des Prüfkörpers zurückzuführen. Der Prüfkörper mit der Serienendnummer 2 hat diesen Punkt vermutlich bei 25 Nm erreicht, die zusätzliche Erhöhung führt sogar zu einer leichten Erhöhung des Leakagestroms.

Tabelle 6-12: Leakageströme der Prüfkörper V-B-1/2-Z-1 bis 3 bei unterschiedlichen Anzugsmomenten und einem Leckagedruck von 6 bar_i

Anzugsmoment [Nm]	Serienendnummer		
	1	2	3
	Leckagestrom [l _N /min]		
10	20,54	12,90	15,26
15	20,13	9,50	14,25
20	18,35	8,51	11,00
25	15,49	6,01	10,00
30	11,62	6,42	7,82
40	6,97	6,87	7,68

Der Leakagestrom von Verschraubungen ohne Dichtmittel ist von den Faktoren: Leckagedruck, Anzugsmoment und Fertigungstoleranzen der Bauteile abhängig. Eine Angabe eines einzelnen Werts für den Leakagestrom einer Verschraubung ist deshalb nicht zielführend. In Abb. 6-13 sind die Messwerte der Verschraubungen deshalb als Boxplot dargestellt. Die Größe der Box spiegelt dabei das Intervall wieder, in das 50 % der Messwerte fallen und ist deshalb als Maß zur Abschätzung des Leakagestroms einer Verschraubung geeignet. Über das betrachtete Druckintervall von 5 bis 7 bar_i ist bei Verschraubungen ohne Dichtmittel mit einem Leakagestrom von 6,5 und 17,4 l_N/min zu rechnen. Durch die Auftragung der Messwerte über das Anzugsmoment lassen sich zusätzliche Aussagen zu typischen Leakageströmen nach Anzugsmoment treffen.

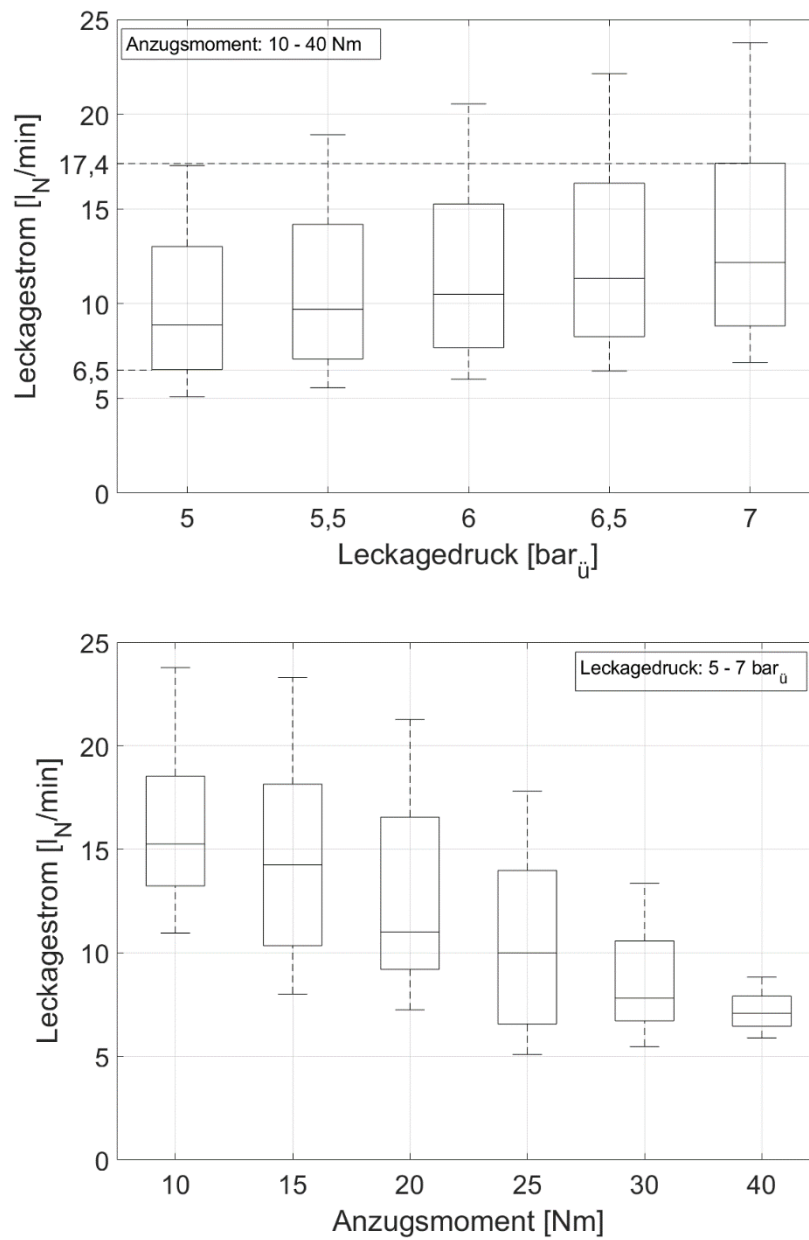


Abb. 6-13: Boxplots aller Messwerte der Prüfkörper „Verschraubungen ohne Dichtmittel“; (oben) über den Leckagedruck (unten) über das Anzugsmoment

Verschraubungen mit beschädigtem Kupferring

Als reale Leckagen des Typs „Verschraubungen mit beschädigtem Kupferring“ werden zwei, auf die gleiche Weise hergestellte Prüfkörper vermessen und ausgewertet. Analog zu den Verschraubungen ohne Dichtmittel werden die Prüfkörper mit defektem Kupferring bei verschiedenen Anzugsmomenten von 10 bis 40 Nm vermessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-14 dargestellt. Wie bei den Verschraubungen ohne Dichtmittel, kann ein linearer Zusammenhang von Leckagestrom und Leckagedruck festgestellt werden, ebenso sinkt der Leckagestrom mit steigendem Anzugsmoment. Zudem sind die Leckageströme im Vergleich zur Verschraubung ohne Dichtmittel deutlich geringer. Ein beschädigter Kupferring ist in der Abdichtung effektiver, als das Weglassen eines Dichtmittels. Die Messergebnisse der einzelnen Prüfkörper weisen eine sehr geringe Streuung auf, weshalb auf eine Darstellung als Boxplot verzichtet wird.

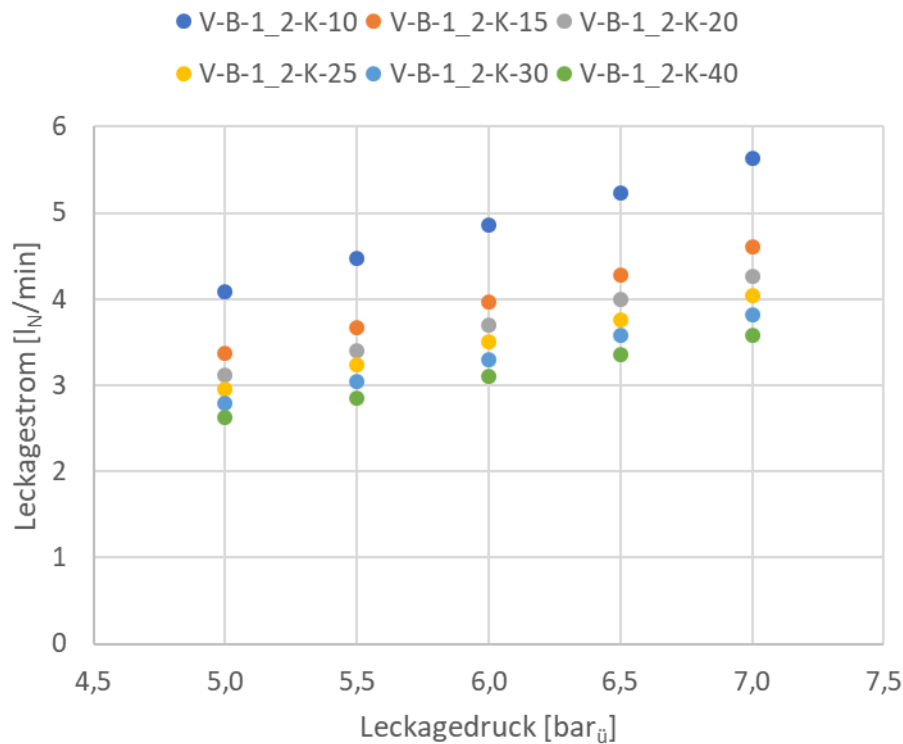


Abb. 6-14: Leckagestrom der Leakagegeometrie V-B-1/2-K in Abhängigkeit des Anzugsmoments

Verschraubungen mit unzureichender Dichtmittelmenge (Teflonband)

Bei den Verschraubungen mit unzureichender Dichtmittelmenge wurden im Rahmen dieser Arbeit vier Prüfkörper nach der in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Methodik gefertigt. Die Prüfkörper mit den Serienendnummern 3 und 4 waren trotz identischer Fertigung luftdicht, weshalb die Auswertung auf lediglich zwei Bauteilen beruht. Eine Fertigung von Prüfkörpern mit geringerer Menge an Dichtband erwies sich als nicht praktikabel, da das Dichtband beim Verschrauben auf Grund von zu geringer Haftreibung verrutscht. Zusätzlich würde die Fertigung im Widerspruch mit dem Ziel möglichst realitätsnahe Leckagefälle zu untersuchen stehen.

Die Ergebnisse der Prüfkörper mit den Serienendnummern 1 und 2 sind in Abb. 6-15 dargestellt. Wie auch schon bei den Verschraubungen ohne Dichtmittel gezeigt, ist die Fertigungstoleranz groß, sofern diese auf die relative Abweichung des Leckagestroms bezogen wird. Beide Prüfkörper weisen jedoch sehr geringe Leckageströme auf, weshalb die absolute Abweichung der Prüfkörper mit circa 1 lN/min gering ausfällt. Der Anstieg des Leckagestroms mit dem Druck ist linear, die unterschiedlichen Steigungen der Geraden sind auf die absolute Darstellung der Ergebnisse zurückzuführen. Dieser Zusammenhang wurde bereits in Kapitel 6.1.1 anhand von idealen Leckagen erläutert und gilt ebenfalls für reale Leckagen des Typs Verschraubungen.

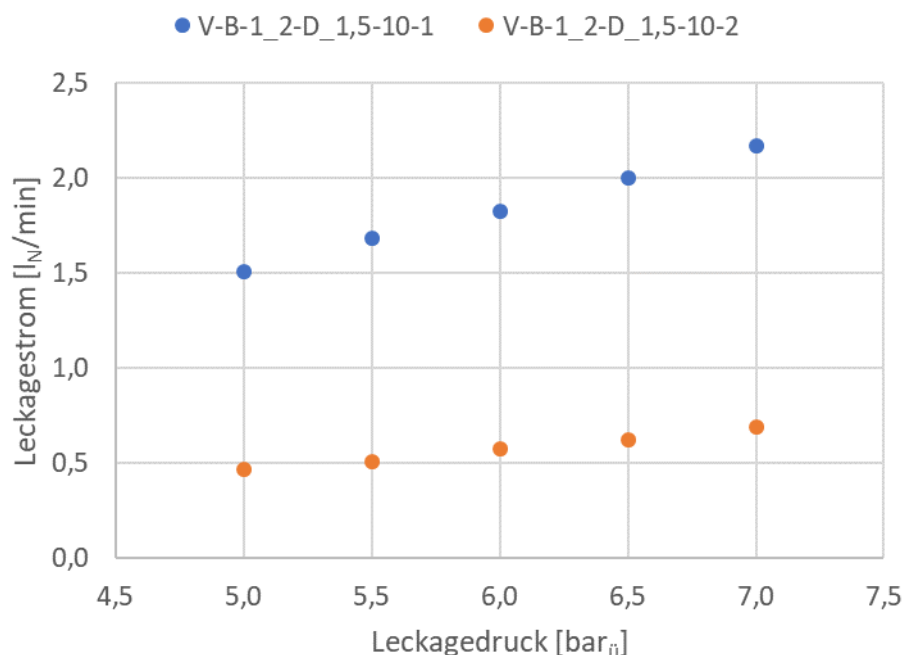


Abb. 6-15: Leckageströme der Bauteile V-B-1/2-D_1,5-1 und V-B-1/2-D_1,5-2

Im Vergleich zu Verschraubungen ohne Dichtmittel, fällt der Leckagestrom bei den Verschraubungen mit unzureichendem Dichtmittel, bei gleichem Anzugsmoment, um den Faktor 10 geringer aus. Das Dichtband verringert somit, selbst bei unzureichender Menge, die Leckagefläche maßgeblich. Je nach Toleranzen der verwendeten Komponenten ist bereits eine geringe Menge Dichtband ausreichend, um eine vollständige Abdichtung sicherzustellen.

Fazit reale Leckagen des Typs Verschraubung

Es wurden drei verschiedene Arten von Leckagegeometrien des Typs „Verschraubungen“ untersucht. Die untersuchten Prüfkörper sind im Vergleich zu den idealen Leckagen realitätsnah gewählt. Es zeigt sich, dass die Leckageströme bei allen betrachteten Prüfkörpern deutlich unter den Leckageströmen von idealen Leckagen liegen. Da lediglich Verschraubungen mit einem ½ Zoll Gewinde betrachtet wurden, lässt sich hieraus keine allgemein gültige Regel ableiten. Die Versuche haben gezeigt, dass das festere Anziehen von Schraubverbindungen den Leckagestrom senkt. Der Effekt schwächt jedoch bei höheren Anzugsmomenten ab. Abdichtungen mit beschädigtem Kupferring bzw. selbst geringen Mengen Dichtband, können den Leckagestrom stark senken.

Auf Grund der hohen Fertigungstoleranz der verwendeten Bauteile, streuen die Messergebnisse der einzelnen Prüfkörper deutlich stärker, als bei den idealen Leckagen. Dennoch lassen sich Korridore für einen zu erwartenden Leckagestrom angeben. Bei Verschraubungen ohne Dichtmittel sind 6,4 bis 14,4 l_N/min, bei Verschraubungen mit defektem Kupferring sind 3 bis 6 l_N/min und bei Verschraubungen mit unzureichender Menge Dichtband sind etwa 1 l_N/min zu erwarten.

6.2.2 Schlauchverbindungen

Schlauchverbindungen werden in Druckluftsystemen häufig auf den letzten Metern der Druckluftversorgung verwendet. Sie werden auf Grund ihrer Flexibilität häufig bewegt und neigen deshalb zu Leckagen. In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der realen Leckagen des Typs Schlauchverbindungen vorgestellt und diskutiert. Die Aufteilung des Kapitels erfolgt anhand der in Kapitel 5.2.1 ausgewählten Leckagegeometrien (vgl. Abb. 5-12, Seite 68), abschließend folgt ein Fazit zu diesem Typ von realen Leckagen.

Die Auswertung erfolgt analog zum vorherigen Kapitel und umfasst für jede untersuchte Leckagegeometrie eine detaillierte Auswertung aller betrachteten Parameter. Im Anhang E-4 bis E-6 sind alle ausführlichen Auswertungen der gemessenen Prüfkörper des Typs Schlauchverbindung aufgeführt.

Schlauchverbindungen mit Riss

Im Gegensatz zu den Verschraubungen, sind alle untersuchten Prüfkörper des Typs Schlauchverbindungen, aus einem flexiblen Kunststoff (Weich-PVC mit Faserverstärkung) gefertigt. Folglich kann sich sowohl Leckagefläche als auch Leckagegeometrie während der Versuchsreihen durch plastische bzw. elastische Verformung ändern. Dieser Effekt ist bei den Schlauchverbindungen mit Riss auf Grund der vergleichsweise großen Leckagestelle am Stärksten ausgeprägt.

Daraus ergeben sich die in Kapitel 5.2.2 erläuterten Änderungen in der Versuchsdurchführung bei diesem Leckagetyp. Abb. 6-16 beinhaltet die Messergebnisse eines Schlauchrisses mit 7 mm Länge, bei dem eine Verformung des Prüfkörpers während der Messung stattfindet. Die Messwerte des ersten Durchgangs liegen unterhalb den Durchgängen 2 und 3, zudem ist der Zusammenhang von Leckagestrom und Leckagedruck nicht mehr streng linear. Bei höheren Drücken kommt es zu Verformungen der Leckagestelle, z.B. durch Aufweitung des Schlauchs. Bei einem nachfolgenden Durchgang ist die Leckagestelle bereits vorgedehnt und weist schon bei geringeren Drücken einen erhöhten Leckagestrom auf. Jedoch treten auch in diesem vorgedehnten Zustand Verformungen an der Leckagestelle auf. Der Leckagestrom steigt durch eine Druckerhöhung etwas stärker, als bei streng linearem Verhalten an, was auf eine Verformung des Prüfkörpers während der Versuche zurückzuführen ist. Wird der Prüfkörper nach einem Messdurchgang für eine kurze Dauer nicht unter Druck gesetzt, so zieht sich das Schlauchmaterial und damit die Leckagestelle wieder zusammen. Bei einer anschließenden Messung kann ein, zum ersten Durchgang vergleichbares Ergebnis gemessen werden. Aus diesem Grund beinhaltet der arithmetischen Mittelwert des Leckagestroms aus drei Durchgängen die Variabilität der Leckagegeometrie und eignet sich als robuste Größenordnung für den zu erwartenden Leckagestrom.

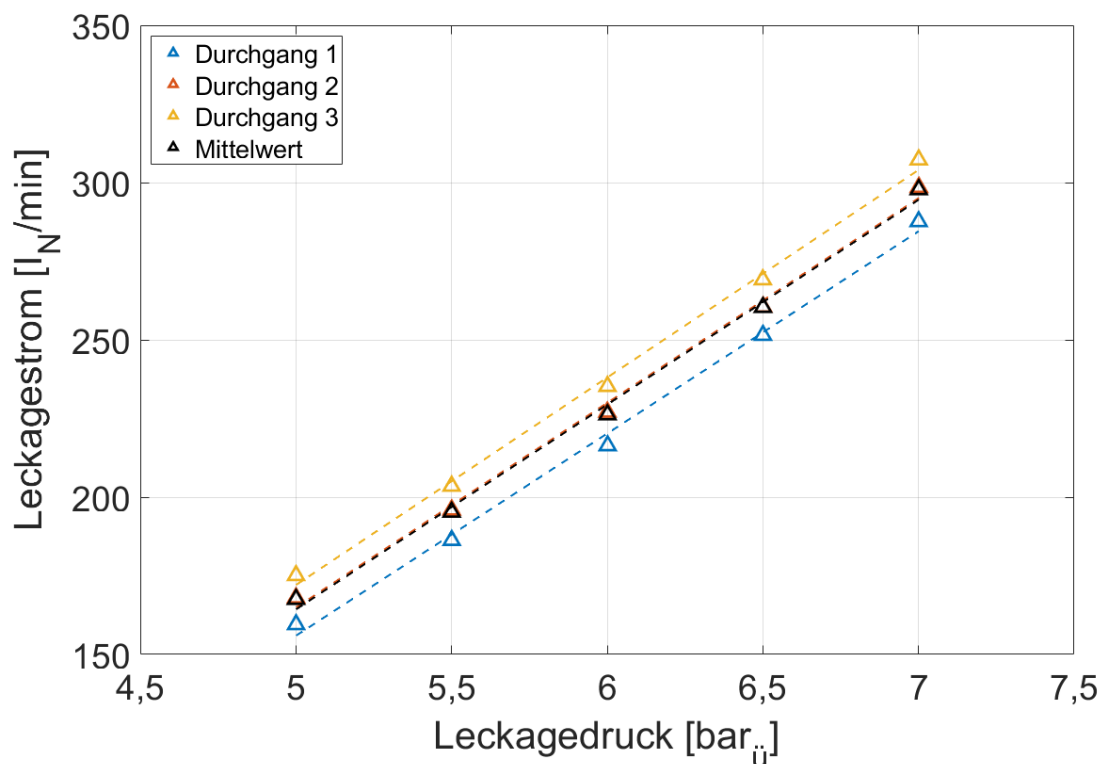


Abb. 6-16: Gemittelter Leckagestrom des Prüfkörpers S-10-R-7-1, sowie die drei Durchläufe

Bei Rissen mit einer Länge von 5 mm ist die Abweichung der Durchläufe untereinander im Vergleich vermindert. Durch die kürzere Risslänge ist nur eine geringere Verformung der Leckagegeometrie möglich.

In Abb. 6-17 und Abb. 6-18 sind die Ergebnisse aller untersuchten Prüfkörper dargestellt. Für beide untersuchten Risslängen gilt: Die Prüfkörper weichen in dem Leckagestrom teilweise deutlich voneinander ab, obwohl sie auf die gleiche Art und Weise gefertigt sind.

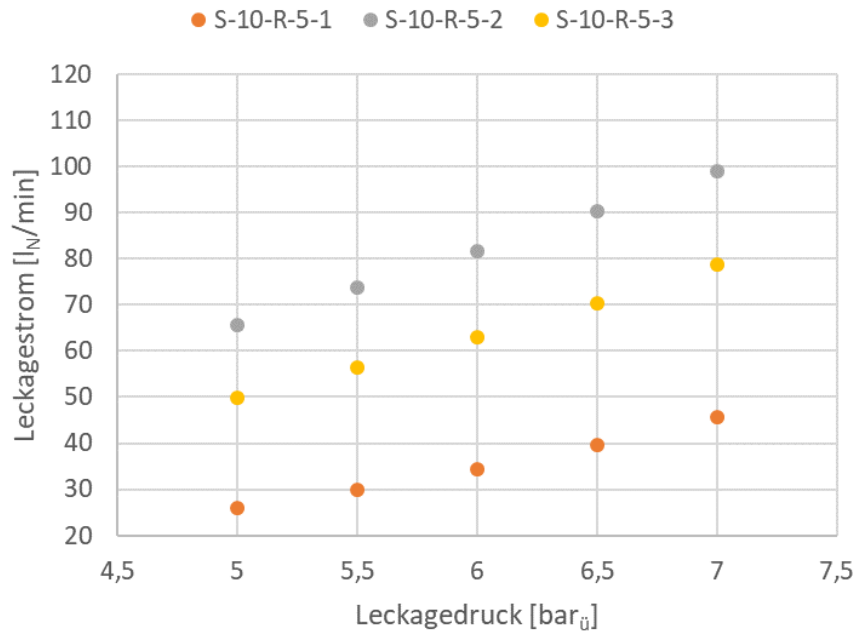


Abb. 6-17: Leckageströme von Schlauchverbindungen mit Risslänge 5 mm

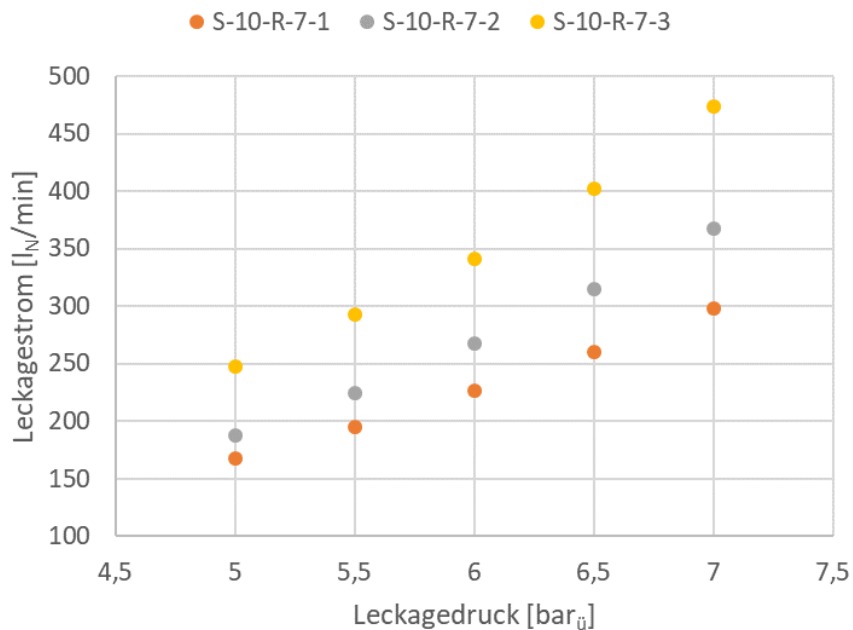


Abb. 6-18: Leckageströme von Schlauchverbindungen mit Risslänge 7 mm

Dies ist zum einen in dem Fertigungsprozess begründet, die Schlauchrisse werden durch einen möglichst präzisen Schnitt mit einem Skalpell manuell hergestellt. Kleine Abweichungen in der Risslänge haben große Auswirkungen auf den Leckagestrom, wie sich im Vergleich der arithmetischen Mittelwerte der Risslängen von 5 mm und 7 mm feststellen lässt. Die Verlängerung des Risses um 2 mm führt überschlägig zu einer Verdreifachung des Leckagestroms. Zusätzlich sei angemerkt, dass die Risslänge auf Grund der Wandstärke von 3 mm auf Außen- und Innenseite unterschiedlich²⁹ sein kann, was sich jedoch ohne Zerstörung des Prüfkörpers nicht nachprüfen lässt.

Zum anderen kommt es durch die Flexibilität des Schlauchs und des Verhaltens der Gewebeeinlage im Schlauch zu unterschiedlichen Ausdehnungen an der Leckagestelle, wodurch die Leckagegeometrie verändert wird, was den Leckagestrom direkt beeinflusst. Bei der geringeren Risslänge von 5 mm ist die Wirkung der hier aufgeführten Effekte stärker, weshalb es zu einer größeren Abweichung der Ergebnisse der Einzelprüfkörper untereinander kommt.

Auf Grund der Schwankung der Bauteile untereinander, werden die Messergebnisse als Boxplot dargestellt (vgl. Abb. 6-19 und Abb. 6-20). Die Darstellungsform ermöglicht eine Aussage über den zu erwartenden Leckagestrom bei einem Riss im Schlauch. Die Größe der Box repräsentiert den Bereich in den 50 % aller Messwerte fallen. Die Antennen zeigen die Ausreißer der Messwerte an. Für Risse mit kleinerer Risslänge sind die Antennen sehr kurz, was jedoch durch die allgemeine Größe der Box relativiert wird. Bei üblichen Betriebsdrücken von 5 bis 7 bar_ü, liegt der Leckagestrom eines Schlauchrisses mit 5 mm mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen 26 und 99 l_N/min. Bei einer Risslänge von 7 mm beträgt die Spanne 166 bis 459 l_N/min. Trotz der Fertigungstoleranzen der Bauteile untereinander, kann eine eindeutige Druckabhängigkeit des Leckagestroms festgestellt werden.

²⁹ Die Klinge des Skalpells ist spitz zulaufend, bei der Fertigung des Schlauchrisses kann es auf Grund der Form der Klinge und der Materialstärke des Schlauchs nicht ausgeschlossen werden, dass die Risslänge auf der Innenseite des Schlauchs, trotz aller Sorgfalt während der Fertigung, ein geringfügig anderes Maß besitzt, als die Risslänge auf der Außenseite.

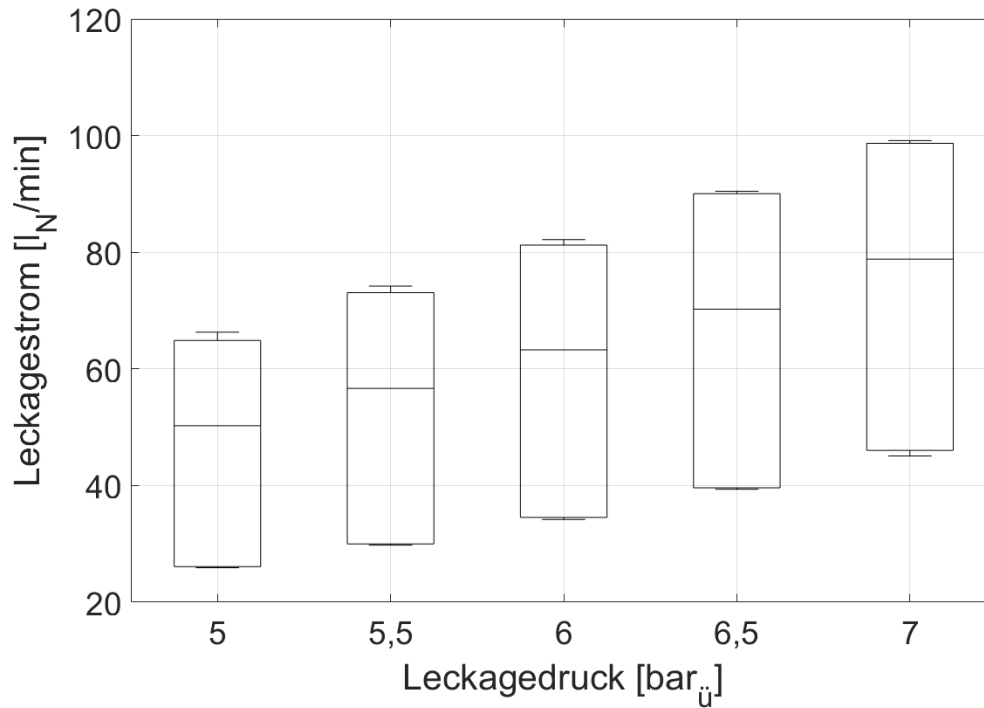


Abb. 6-19: Leckageströme aller vermessenen Schlauchrisse mit Risslänge 5 mm (Boxplot)

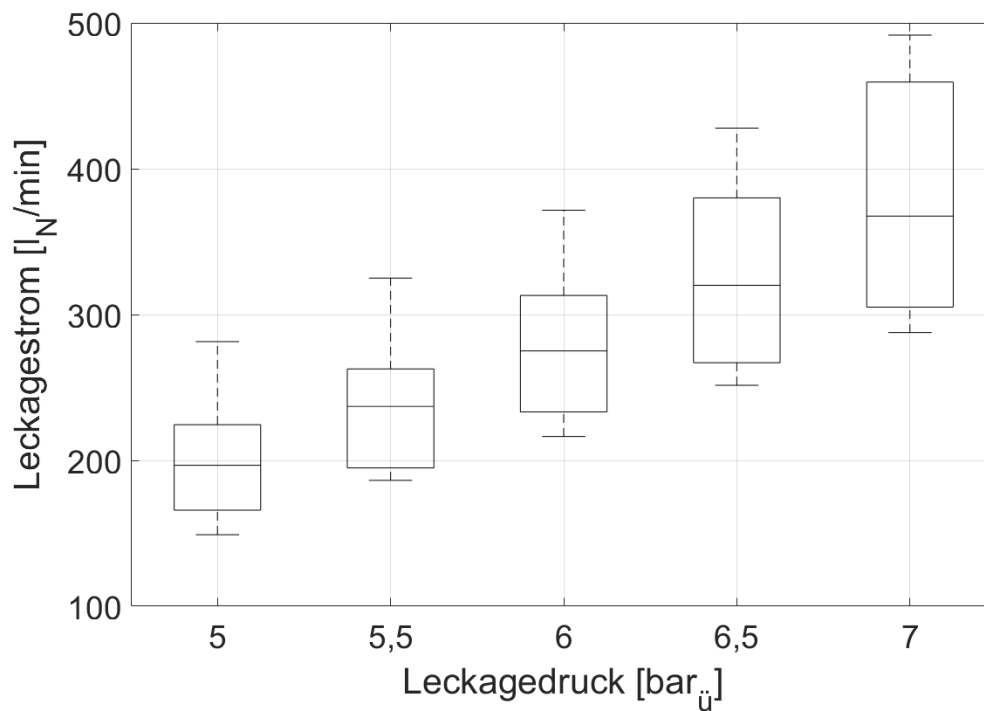


Abb. 6-20: Leckageströme aller vermessenen Schlauchrisse mit Risslänge 7 mm (Boxplot)

Perforationen in Schlauchverbindungen

Bei den Prüfkörpern des Typs perforierte Schlauchverbindungen kommt es, wie bereits bei den Schlauchrissen ausführlich erläutert, zu Änderungen der Leckagefläche und Leckagegeometrie durch das flexible Material des Prüfkörpers. Folglich kommt es ebenfalls zu Abweichungen der einzelnen Messdurchläufe desselben Prüfkörpers. Im Vergleich zu den Schlauchrissen ist die Schwankung der Durchläufe untereinander deutlich geringer. Abb. 6-21 zeigt exemplarisch der Leckagestrom von drei Messdurchläufen des Prüfkörpers S-6-L-1,8-3, sowie die Mittelung der Messwerte. Der Zusammenhang von Leckagedruck und Leckagestrom ist nicht streng linear, da sich die Leckage bei höheren Leckagedrücken weitet.

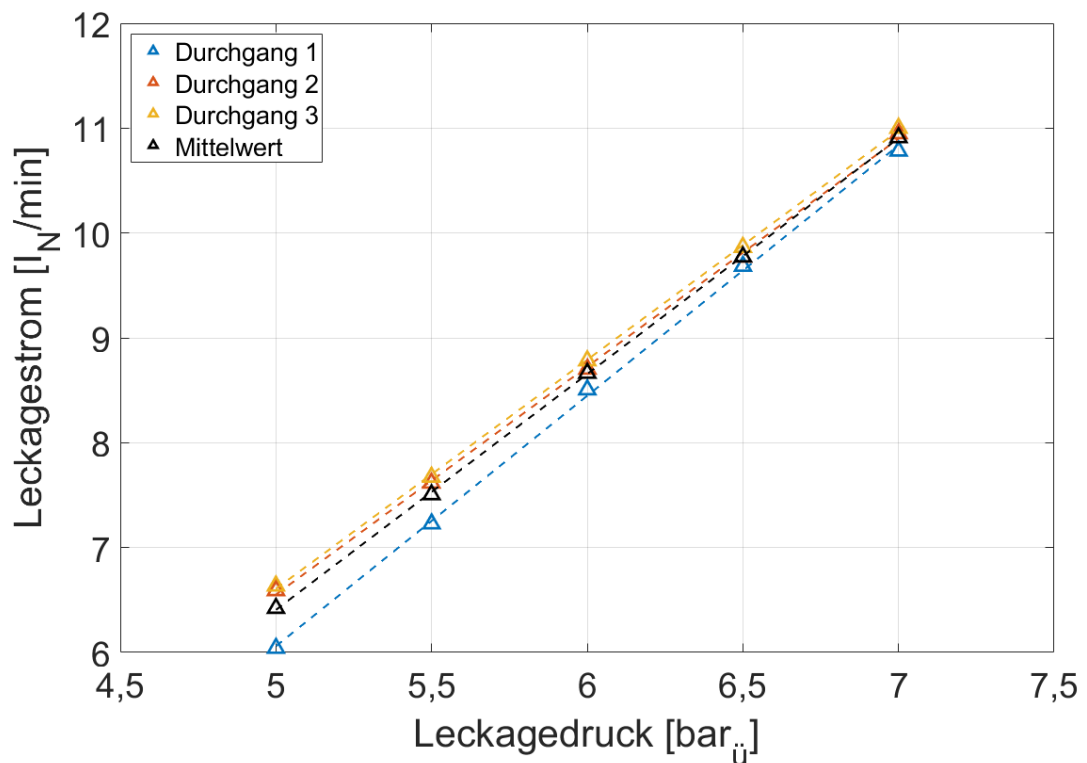


Abb. 6-21: Gemittelter Leckagestrom des Prüfkörpers S-6-L-1,8-3, sowie drei Messdurchläufe

In einem Ausnahmefall wurde ein abfallender Leckagestrom mit steigendem Leckagedruck festgestellt. Dieser Effekt wurde bei dem Prüfkörper mit der Seriennummer S-6-L-1,2-2 festgestellt, das Verhalten ist in Abb. 6-22 abgebildet. Nach einer anfänglichen, leichten Steigerung des Leckagestroms, fällt diese ab einem Leckagedruck von 6 bar_ü ab. Zu dieser Anomalie kommt es auf Grund des Aufbaus des Schlauches. Dieser besteht aus zwei Weich-PVC Schichten, welche mit einer Faserverstärkung verbunden sind. Beim betreffenden Prüfkörper hatte sich die äußere Schicht von der Inneren abgelöst und aufgebläht. Hierdurch verändern sich sowohl Leckagegeometrie, als auch Leckagefläche stark, wodurch es nahezu zu einem Verschluss der Leckagestelle kommt. Dies stellt jedoch nur einen Sonderfall dar, der auf einen

„Defekt“ des Prüfkörpers zurückzuführen ist. Für die weitere Auswertung wurde ein neuer Prüfkörper gefertigt und ersatzweise ausgewertet.

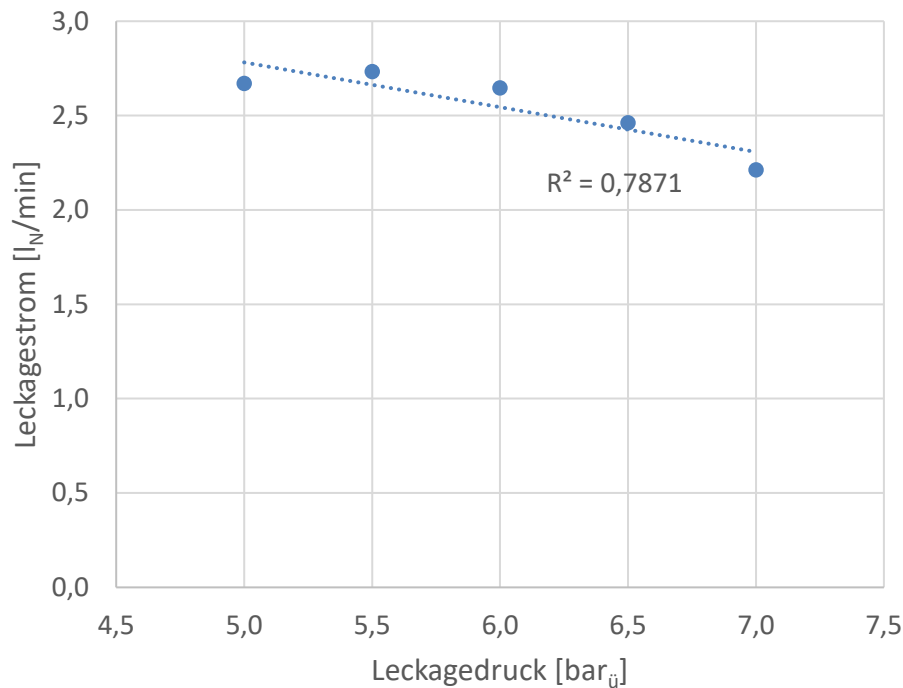


Abb. 6-22: Gemittelter Leckagestrom des Prüfkörpers S-6-L-1,2-2

Tabelle 6-13 zeigt die Leckageströme aller untersuchten Prüfkörper bei einem Leckagedruck von 6 bar_ü in Abhängigkeit der Perforationsgröße. Bei den Prüfkörpern mit gleicher Perforationsgröße, zeigen sich teilweise signifikante Abweichungen in den Leckageströmen, z.B. bei Prüfkörper Nummer 3 der Perforationsgröße 1,2 mm. Die Abweichungen sind auf das flexible Prüfkörpermaterial (Weich-PVC) in Verbindung mit dem Fertigungsverfahren zurückzuführen. Die Perforationen werden im Rahmen des Fertigungsprozesses durch das Durchstoßen des Schlauchs mit einem Nagel der angegebenen Größe hergestellt. Bei diesem Herstellungsprozess kommt es zu keinem Materialabtrag an der Leckagestelle, sondern nur zu einem Einreißen des Schlauchs. Trotz der Verwendung des gleichen Nagels, kommt es vermutlich zu unterschiedlichen Schnittkanten im Prüfkörper, welche durch die Druckbelastung zudem unterschiedlich stark zusätzlich einreißen können. Die absolute Abweichung der Bauteile untereinander ist jedoch gering.

Tabelle 6-13: Leckageströme aller Prüfkörper des Typs perforierte Schlauchverbindung bei einem Leckagedruck von 6 bar_i

Perforationsdurchmesser [mm]	Prüfkörper 1 [l _N /min]	Prüfkörper 2 [l _N /min]	Prüfkörper 3 [l _N /min]	Mittelwert [l _N /min]
0,7	0,76	0,58	1,49	0,94
1,2	2,43	2,65	0,63	1,90
1,8	11,60	5,86	8,66	8,71
2,0	7,33	7,06	6,11	6,83
2,5	4,45	4,99	10,40	6,61

Der größte mittlere Leckagestrom der untersuchten Prüfkörper wird bei einer Perforationsgröße von 1,8 mm festgestellt. Für perforierte Schläuche scheint somit der Zusammenhang von Leckagefläche und Leckagestrom nicht zu gelten. Aus den oben erläuterten Gründen zu den Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der Prüfkörper, kann jedoch nicht sichergestellt werden, dass ein größerer Nageldurchmesser auch zu einer größeren, tatsächlichen Perforation führt. So können beim Fertigungsprozess trotz eines geringeren Durchmessers, beispielsweise durch eine raue Nagelkante zusätzliche Fasern der Gewebeeinlage durchtrennt werden, was zu einer größeren Leckagefläche führt. Aus diesem Grund kann die Leckagefläche nicht aus der Perforationsgröße bestimmt werden, auf die Angabe einer „fiktiven“ Leckagefläche wurde deshalb bewusst verzichtet.

Auf Grund der gezeigten Unterschiede der einzelnen Bauteile untereinander empfiehlt sich die Darstellung aller Messergebnisse als Boxplot (vgl. Abb. 6-23). Hierdurch können Aussagen über den zu erwartenden Leckagestrom bei Schlauchperforationen von 0,7 bis 2,5 mm getroffen werden. Diese liegt bei Leckagedrücken von 5 bis 7 bar_i zwischen 1,3 und 9,3 l_N/min. Im Vergleich zu den Schlauchrissen, ist der zu erwartende Leckagestrom deutlich verringert. Im Vergleich zu Verschraubungen ohne Dichtmittel, liegt der Leckagestrom leicht darunter. Hierzu sei jedoch angemerkt, dass Schlauchleckagen in der Realität einem Alterungsprozess (Materialermüdung) unterliegen, durch diesen sie vermutlich mit der Zeit vergrößern, was jedoch von den hier ausgewerteten Prüfkörpern nicht abgedeckt wird.

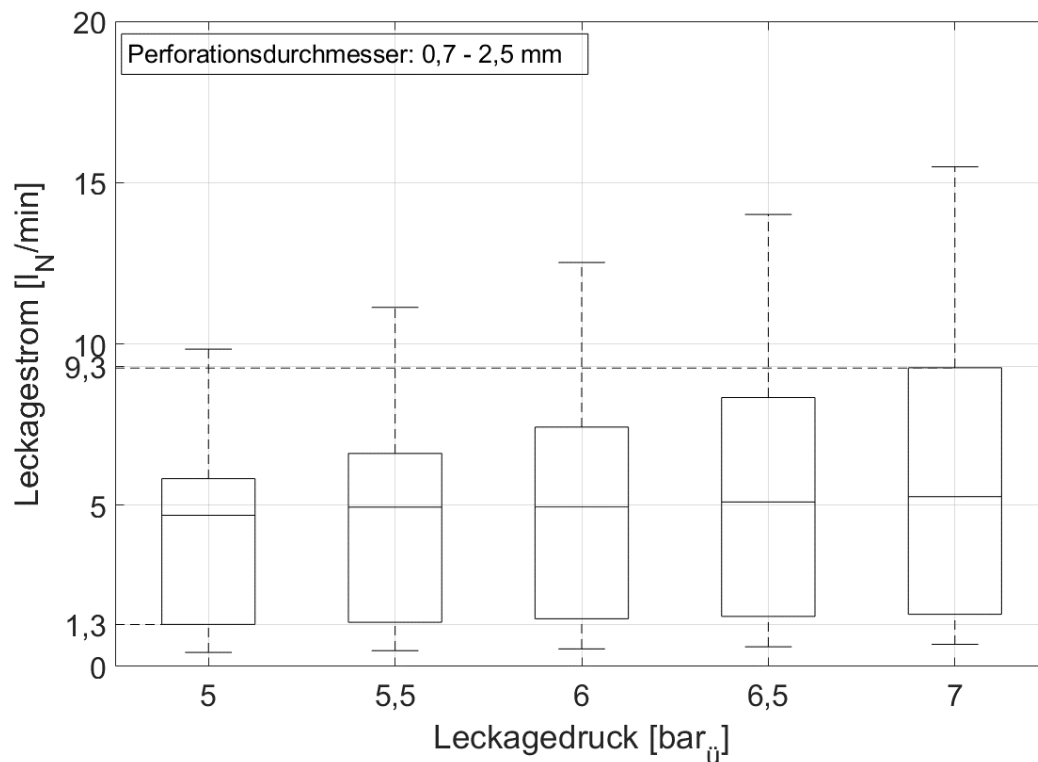


Abb. 6-23: Boxplot der Leckageströme aller Prüfkörper des Typs Schlauchperforationen

Schlauchverbindungen mit undichten Schlauchschellen

Die Leckagestelle an den gefertigten Prüfkörpern des Typs undichte Schlauchschelle entsteht durch eine ovale Verformung der Schelle beim Anziehen des Schneckengewindes. Die Verformung der Schlauchschelle ist in Abb. 6-24 gezeigt, sie entsteht durch den metallischen Schlauchschutz, welcher den Schlauch vor Einreißen schützt. Bei der Befestigung der Schlauchschelle (Anzugsmoment 3 Nm), wird die Schlauchschelle über das Schneckengewinde im Durchmesser verringert. Durch die Krafteinwirkung auf der Zugseite des Schneckengewindes, neigt der Schlauchschutz zur Verformung nach außen, was eine ovale Verformung der Schelle begünstigt. Durch das ungleichmäßige Anliegen des Schlauchs, entsteht ein kleiner Spalt zwischen Schlauchtülle und Schlauch und bildet somit die Leckagestelle. Die verwendeten Schlauchschellen sind laut Datenblatt für den verwendeten Schlauchdurchmesser zugelassen und wurden nicht zusätzlich bearbeitet.

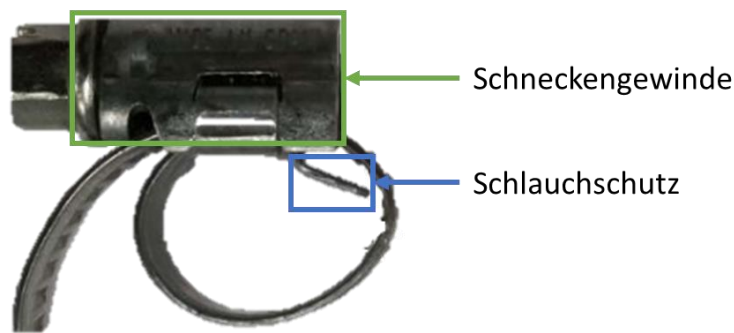


Abb. 6-24: Ovale Verformung einer verwendeten Schlauchschelle, Quelle : (Sieger 2019)

Die einzelnen Messdurchläufe der untersuchten Prüfkörper weichen nur in geringem Maße voneinander ab, obwohl es sich um das gleiche Schlauchmaterial wie bei den untersuchten Schlauchperforationen handelt. Dies ist auf die oben erläuterte Beschaffenheit der Leckagestelle zurückzuführen. Die Leckagestelle wird durch die ovale Form der Schlauchschelle erzeugt, bei einer Druckerhöhung wird der Schlauch zwar gedehnt, diese Dehnung wird jedoch an der Leckagestelle durch die Schlauchschelle begrenzt. Folglich sind Änderungen in der Leckagefläche und Leckagegeometrie nur stark eingeschränkt möglich.

Die Messergebnisse der betrachteten drei Prüfkörper für Schlauchverbindungen mit undichter Schlauchschelle, sind in Abb. 6-25 dargestellt. Die Abweichungen der Prüfkörper untereinander sind gering und auf die unterschiedliche Quetschung des Schlauchs durch die Schelle zurückzuführen. Der Leckagestrom steht in einem linearen Zusammenhang mit dem Leckagedruck. Die Höhe des Leckagestroms ist mit circa 2 bis 4 l_N/min relativ gering und liegt im Bereich kleiner Schlauchperforationen.

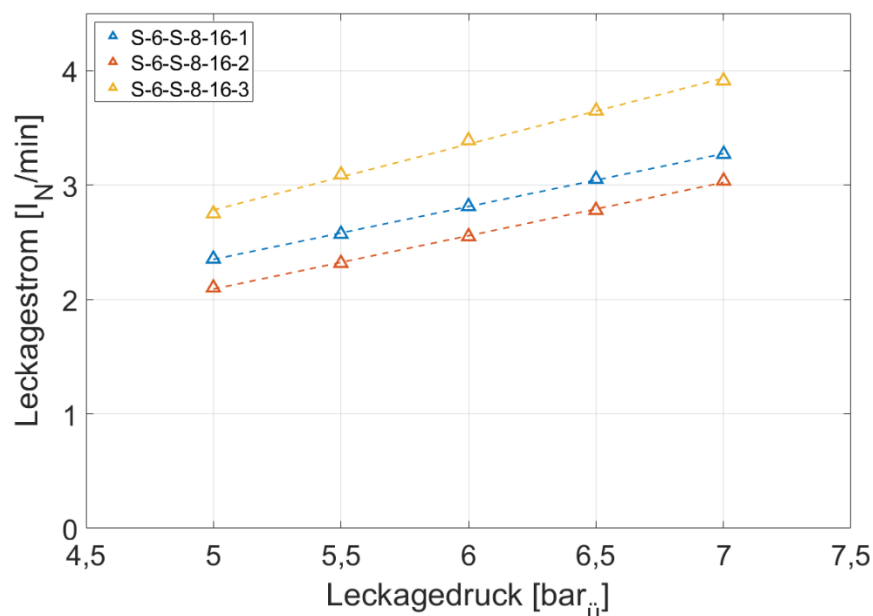


Abb. 6-25: Leckageströme der drei untersuchten Prüfkörper mit undichten Schlauchschellen

Fazit reale Leckagen des Typs Schlauchverbindungen

Es wurden drei verschiedene Arten von Leckagegeometrien von Schlauchverbindungen untersucht. Die Auswertung der einzelnen Prüfkörper hat gezeigt, dass auf Grund der Flexibilität des Prüfkörpermaterials eine präzise Herstellung von gleichartigen Leckagen erschwert ist. Zudem weisen die Prüfkörper durch die Verformung unter Druck ein teilweise abweichendes Verhalten im Vergleich zu idealen Leckagen auf. Eine ähnlich gute Reproduzierbarkeit der einzelnen Messdurchläufe, wie bei idealen Leckagen (vgl. Tabelle 5-1, S. 63), lässt sich aus diesem Grund nicht erzielen. Da in diesem Kapitel jedoch realitätsnahe Leckagen untersucht werden, ist die Reproduzierbarkeit der Fertigung bzw. die Formstabilität der Leckage ein untergeordneter Aspekt. Durch die Varianz der Bauteile kann dennoch der jeweils zur Leckagegeometrie zu erwartende Leckagestrom ermittelt werden.

Schlauchrisse weisen mit deutlichem Abstand die größten Leckageströme der hier untersuchten Prüfkörper aus. Schlauchperforationen und undichte Schlauchschellen weisen oftmals geringe Leckageströme kleiner $20 \text{ l}_N/\text{min}$ auf. Die Leckageströme der meisten Schlauchverbindungen sind somit, wie auch die der anderen untersuchten realen Leckagen, deutlich geringer als die der untersuchten idealen Leckagen. Anhand der eingeschränkten Auswahl an Prüfkörpern, können keine allgemein gültigen Aussagen für die Praxis getroffen werden. Die Untersuchungen legen dennoch nahe, dass real auftretende Leckagen in den meisten Fällen vermutlich kleiner als $100 \text{ l}_N/\text{min}$ sind und ein Großteil davon wahrscheinlich kleiner als $20 \text{ l}_N/\text{min}$ ist. Bei den typischen Leckageanteilen in industriellen Druckluftnetzen deutet dies darauf hin, dass eine große Anzahl von Leckagestellen im Druckluftnetz vorhanden sein müssten.

7. Indirekte Leckagequantifizierung mittels Ultraschalltechnik

Die durch Druckluftleckagen ausströmende Luft verursacht Schallemissionen. Unter Verwendung von Ultraschallmesstechnik wird nachfolgend untersucht, inwieweit sich diese eignen, um Leckageströme indirekt zu quantifizieren. Das Kapitel ist hierzu in drei Abschnitte gegliedert. Kapitel 7.1 stellt die Messergebnisse der untersuchten Prüfkörper vor und diskutiert die wichtigsten hieraus folgenden Erkenntnisse. Im nachfolgenden Kapitel 7.2 wird untersucht, inwiefern der Schalldruckpegel zur Leckagequantifizierung geeignet ist. Im letzten Kapitel (7.3), werden Ansätze zur Weiterentwicklung von Leckagequantifizierungsverfahren aufgezeigt und eine Validierung des entwickelten Ansatzes durchgeführt.

Alle in diesem Kapitel gezeigten Auswertungen basieren auf der Auswertung von Schallmessungen an den bereits in Kapitel 6 vorgestellten Prüfkörpern. Auf Grund der Praxisorientierung des Ansatzes, wurden alle Prüfkörper des Typs reale Leckagen und ausgewählte Prüfkörper des Typs ideale Leckagen vermessen³⁰.

Teile der in diesem Kapitel gezeigten bzw. verwendeten Messwerte wurde mit Unterstützung von studentischen Hilfskräften erzeugt. Die Unterstützung beschränkte sich ausschließlich auf das Erzeugen der Messdaten.

7.1 Schallemissionen von Druckluftleckagen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden über 400 Schallmessungen an Druckluftleckagen durchgeführt, wobei eine Schallmessung aus 183 Einzelmessungen besteht, die zusammengefasst und aufbereitet werden. Das Ergebnis einer Schallmessung ist mehrdimensional und besteht aus den jeweiligen Schalldruckpegeln der betrachteten Frequenzen und dem Gesamtschalldruckpegel je vermessenen Winkel (vgl. Kapitel 5.3). Auf Grund der Menge an Messdaten, sowie dem Ziel einer allgemein, für alle betrachteten Prüfkörper gültigen Beziehung zur Leckagequantifizierung, ist eine Detailvorstellung aller Einzelergebnisse nicht zielführend. Es werden stattdessen die für die folgende indirekte Leckagequantifizierung wichtigen Aspekte der Schallemissionen von Druckluftleckagen an ausgewählten Beispielen erläutert.

In Kapitel 3.2 wurde bereits die Theorie von (Ultra-) Schallsignalen von Druckluftleckagen behandelt. Die zwei, für die Messung und anschließende Interpretation, wichtigsten Aspekte sind: Die Abhängigkeit des Schalldruckpegels vom Messwinkel, sowie dem Abstand des Mikrofons zur Schallquelle.

Die Winkelsensitivität der Messergebnisse zeigt sich in der umfassenden Auswertung der Prüfkörper deutlich und ist exemplarisch für den Prüfkörper S-6-L-2,0-1 ($\hat{=}$ Schlauchperforation mit 2,0 mm Durchmesser) in Abb. 7-1 dargestellt. Die Abbildung beinhaltet Informationen

³⁰ Hierzu zählen die Leckagegeometrien: D-010, D-015, D-020, 04-0734, 08-0300 & 10-0228

über den gemessenen Leakagestrom (über dem Graph), den Messwinkel (x-Achse), der Frequenz (linke y-Achse), dem Gesamtschalldruckpegel³¹ (weiße Linie, Ablesung erfolgt über rechte y-Achse) und dem Signaldruckpegel der Einzelfrequenzen als farbliche Darstellung. Die dargestellte Abbildung beinhaltet ein, mit schwarzen Linien gezeichnetes Gitter, welches die Auflösung der Messwerte darstellt. Die vertikale Kästchenlänge beträgt 1 kHz, die horizontale Kästchenlänge 3 °.

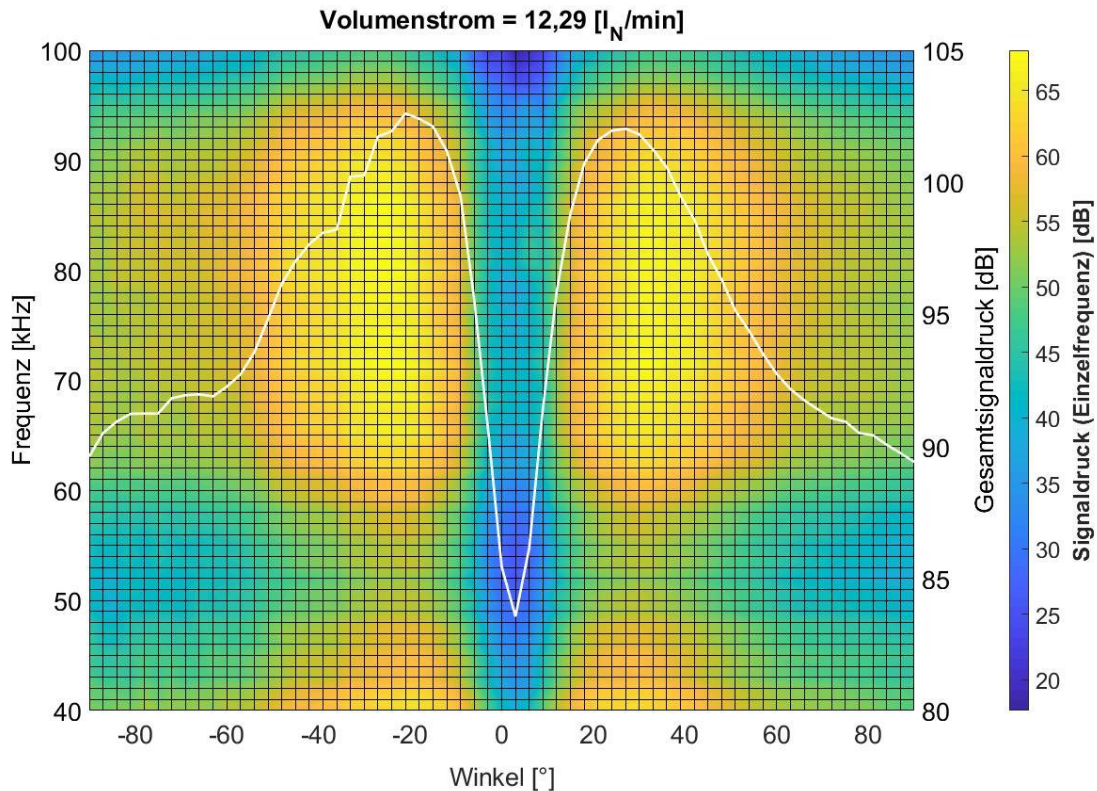


Abb. 7-1: Frequenzanalyse des Prüfkörpers S-6-L-2,0-1 bei 8 bar_ü und 20 cm Abstand

Sowohl die Betrachtung des Gesamtschalldrucks, als auch der Einzelfrequenzen zeigt deutlich, dass die Intensität des Schallsignals starke Änderungen über den Verlauf des Messwinkels erfährt. Das Minimum liegt bei einem Messwinkel von 0 ° und weist große Gradienten in beide Richtungen auf, die zu jeweils einem Maximum des Signals führen. Die hierfür zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge sind bereits in Kapitel 3.2 erläutert, der Effekt wird „Cone of Silence“ genannt. Dieser Effekt kann bei nahezu allen Prüfkörpern nachgewiesen

³¹ Der Gesamtschalldruckpegel (auch Gesamtsignaldruckpegel genannt), ergibt sich aus der Summe der Intensitäten der Einzelfrequenzen. Hierbei ist jedoch die Definition des Schalldruckpegels zu beachten. Die Aufsummierung erfolgt logarithmisch nach folgender Gleichung:

$$L_{ges} = 10 \log_{10} \left(\sum_1^i 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

Beispiel: Eine Addition von zwei Intensitäten von 50 dB ergeben einen Gesamtschalldruckpegel von 53,01 dB, addiert man drei Intensitäten zu jeweils 50 dB steigt der Gesamtschalldruckpegel auf 54,77 dB an.

werden. Ausnahmen bilden vereinzelte Schraubverbindungen, wie z.B. V-B-0,5-Z-40-1 (Anhang G-2 enthält die Frequenzanalyse des Prüfkörpers) oder ein Prüfkörper des Typs undichte Schlauchschelle (S-6-S-8-16-2). Die Ausnahmen sind auf die fehlende Strahlbildung in der Messebene zurückzuführen, die z.B. durch Strömungsumlenkungen am Austritt verursacht werden.³²

Das Maximum des Gesamtschalldruckpegels liegt im vorgestellten Fall jeweils in einem Winkel von circa 25 ° von der Leckagestelle, dies ist jedoch nicht für alle Prüfkörper identisch. Den breitesten Cone of Silence weisen Prüfkörper des Typs Schlauchrisse mit einer Risslänge von 7 mm auf, hier liegen die Maxima jeweils bei einem Winkel von circa 30 ° vom Nullpunkt versetzt (vgl. Abb. 7-2).

Ursache für die unterschiedliche Lage der Maxima, ist die Form der Leckage. Leckagen mit einer regelmäßigen Form, wie z.B. ideale Leckagen oder reale Leckagen mit näherungsweise regelmäßiger Form (z.B. perforierte Schläuche), weisen im Vergleich zu den anderen realen Leckagen, einen geringeren Abstand der Maxima auf. Die oben genannten 25 ° um den Nullpunkt, sind für diese Leckagetypen gültig. Im aufgeführten Fall des Schlauchrisses, ist die Verschiebung der Maxima vermutlich auf die größere Komplexität der Austrittsgeometrie zurückzuführen, auf Grund derer es zu einer Strahlaufweitung kommt. Die Unregelmäßigkeiten in der Austrittsgeometrie können in Abb. 7-2 anhand der leichten Asymmetrie des Schallsignals, vor allem in der Höhe der Maxima, erkannt werden.

³² Auf Grund der Fertigungstoleranzen der Prüfkörper des Typs reale Leckagen, treten diese Effekte nicht bei allen Prüfkörpern des gleichen Typs auf. Eine genaue Diagnose, wodurch der Luftstrahl bei den angesprochenen Bauteilen umgelenkt wird, ist nicht ohne erheblichen Mehraufwand möglich, weshalb darauf verzichtet wurde.

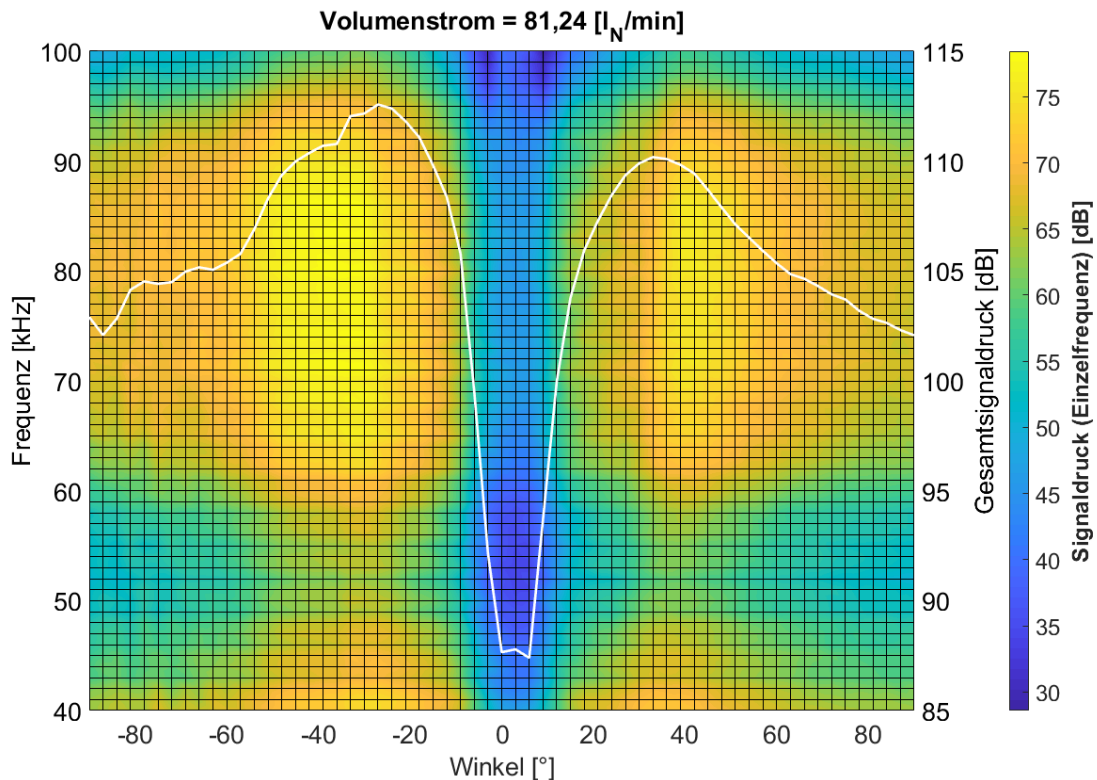


Abb. 7-2: Frequenzanalyse des Prüfkörpers S-10-R-7-1 bei 4 bar_ü und 20 cm Abstand

In Tabelle 7-1 sind die Effektivwerte des Gesamtschalldruckpegels für einen Schlauch mit einer Perforation der Größe 2 mm, bei einem Leckagedruck von 8 bar_ü aufgeführt. Die aufgeführten Schalldruckpegel sind arithmetische Mittelwerte der Schalldruckpegel auf der jeweiligen betrachteten Halbkreisbahn um die Leckagestelle und ergeben sich somit aus 61 Messpunkten je Prüfkörper.³³ In der Theorie führt eine Verdopplung des Abstands zur Schallquelle, zu einer Viertelung des Pegels, was einer Änderung von -6 dB entspricht, eine Vergrößerung des Abstands um 50 %, führt zu einer Pegelabnahme von 3,5 dB. Dieser Zusammenhang gilt für punktförmige Strahlungsquellen, welche gleichmäßig in alle Raumrichtungen abstrahlen. Anhand der in Tabelle 7-1 aufgeführten Messergebnisse, lässt sich dieser Zusammenhang auf die Validität bei Druckluftleckagen überprüfen. Bezogen auf den Gesamtschalldruckpegel, nimmt der Schalldruckpegel bei einer Verdopplung des Messabstands von 20 auf 40 cm um 5,09 dB ab, bei einer weiteren Erhöhung des Abstands um + 50 %, fällt der Pegel um weitere 3,07 dB.

³³ Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung ist in Kapitel 5.3 zu finden

Tabelle 7-1: Messergebnisse des Gesamtschalldruckpegels bei verschiedenen Messabständen (Prüfkörper: S-L-2,0-1 Leckagedruck: 8 bar_i)

Messabstand [cm]	Gesamtschalldruckpegel [dB]	Pegelabfall [dB]
20	95,04	Referenz
40	89,95	5,09
60	86,88	8,16

Näherungsweise kann somit das Abstandsgesetz bestätigt werden, der Pegelabfall ist jedoch leicht vermindert. Dieses Verhalten ist für alle untersuchten Prüfkörper in vergleichbarer Weise ausgeprägt und auf nachfolgenden Grund zurückzuführen. Durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit der Luft bei Leckageaustritt, bildet sich ein stark beschleunigter Luftstrahl, welcher zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Schallsignals in alle Raumrichtungen führt. Der Schall breitet sich deshalb nicht ungerichtet (d.h. kugelförmig), sondern konzentriert aus. Hierdurch ist die Pegelabnahme im Vergleich zum erwarteten Wert verringert. Je größer der Abstand zur Schallquelle anwächst, desto mehr kommt es zu einer Aufweitung des Schallsignals und zu einem Verhalten einer ungerichteten Schallquelle. Dies erläutert auch die verhältnismäßig größere Abnahme des Schalldruckpegels von 40 cm auf 60 cm. Zudem finden die Messungen in einem kleinen Raum ohne besondere Schallschutzmaßnahmen statt. Schallreflexionen an den Wänden können das gemessene Signal erhöhen. Der stärkere Pegelabfall bei größerem Abstand spricht jedoch gegen einen hohen Reflexionsanteil, da dieser über die betrachteten Messabstände näherungsweise konstant ist.

Am Prüfstand wurde zudem eine Schallmessung ohne Prüfkörper durchgeführt, wodurch die Abwesenheit von möglichen Störfaktoren (z.B. unbekannte Ultraschallquellen) bestätigt wurde. Die Messung ist im Anhang G-1 aufgeführt.

7.2 Eignung des Schalldruckpegels zur Leckagequantifizierung

Im vorliegenden Kapitel wird untersucht, inwiefern sich der Schalldruckpegel für eine Leckagequantifizierung eignet. Hierfür werden im Unterkapitel 7.2.1 die Gesamtschalldruckpegel der untersuchten Prüfkörper mit den gemessenen Leckageströmen ins Verhältnis gesetzt und die Korrelation der beiden Größen untersucht. In Unterkapitel 7.2.2 wird die Eignung des Pegels bei einer Frequenz von 40 kHz evaluiert.

7.2.1 Gesamtschalldruckpegel

Die Bestimmung des Gesamtschalldruckpegels ist im Vergleich zur detaillierten Frequenzanalyse nur mit geringem Aufwand verbunden. Der Gesamtschalldruckpegel ergibt sich aus dem Schalldruck aller erfassten Frequenzen von 0 bis 100 kHz und kann direkt aus dem gemessenen Schallsignal ermittelt werden. Das Schallsignal ist, wie bereits in Kapitel 7.1 gezeigt, abhängig von Messabstand und Messwinkel zur Leckage. Die Änderung des Gesamtschalldruckpegels auf Grund des Messabstands zur Leckage, verhält sich näherungsweise nach

dem Abstandsgesetz und kann hierdurch rechnerisch, bei bekanntem Abstand, berücksichtigt werden.

Die Änderung des Gesamtschalldruckpegels auf Grund des Messwinkels ist stark vom jeweiligen untersuchten Prüfkörper abhängig. Eine allgemeingültige Berücksichtigung ist deshalb nicht möglich. Auf Grund dieser Problematik, wird in diesem Kapitel sowohl der maximale Gesamtschalldruckpegel der jeweiligen Messung, als auch der mittlere Gesamtschalldruckpegel betrachtet. Der mittlere Gesamtschalldruckpegel entspricht dem arithmetischen Mittel der einzelnen Gesamtschalldruckpegel eines Messdurchlaufs und repräsentiert somit den Mittelwert über die betrachtete Halbkreisbahn.

Tabelle 7-2 beinhaltet die Messergebnisse des maximalen und mittleren Gesamtschalldruckpegels einer Auswahl der vermessenen Prüfkörper. Auf Grund der hohen Anzahl von Messungen und Prüfkörpern, sind nur ausgewählte Ergebnisse verschiedener idealer und realer Leckagen aufgeführt, die die Bandbreite der Ergebnisse widerspiegeln. Sowohl maximaler, als auch mittlerer Gesamtschalldruckpegel, steigen mit steigendem Leckagestrom, es lassen sich jedoch einige Ausnahmen feststellen. Der gemessene Gesamtschalldruckpegel des Prüfkörpers S-6-S-8-16-2 (defekte Schlauchschelle), weist mit deutlichem Abstand den niedrigsten Pegel aller aufgeführten Ergebnisse auf. Der Leckagestrom ist im vorliegenden Fall jedoch höher, als bei zwei anderen aufgeführten Prüfkörpern. Dies deutet auf eine Abhängigkeit des Schallpegels von der Leckagegeometrie hin.

Tabelle 7-2: Maximaler und gemittelter Gesamtschalldruckpegel und Leckagestrom ausgewählter Prüfkörper bei einem Messabstand von 20 cm (Leckagedruck: 6 bar_i)

Prüfkörper	Leckagestrom [l _N /min]	Maximaler Gesamt- schalldruckpegel [dB]	Mittlerer Gesamtschall- druckpegel [dB]
V-B-0,5-K-2-40	2,99	87,29	81,89
S-6-L-2,5-2	4,34	91,06	86,77
S-6-S-8-16-1	5,02	80,71	75,61
V-B-0,5-Z-4	6,32	102,85	99,17
S-10-R-5-3	65,68	116,51	109,42
D-010-06	49,90	116,66	109,46
D-015-02	121,27	121,41	114,84
D-020-01	215,60	121,68	117,08

Auch der Vergleich von Gesamtschalldruckpegeln idealer mit realen Leckagen, legt einen Zusammenhang der Austrittsgeometrie und der Pegelhöhe nah. Der in Tabelle 7-2 aufgeführte Prüfkörper eines Schlauchrisses mit 5 mm (S-10-R-5-3) liefert nahezu identische Gesamtschallpegel, wie die kreisrunde, ideale Leckage mit einem Durchmesser von 1 mm (D-010-06). Der Leckagestrom des Schlauchrisses ist jedoch circa 32 % höher, als der der betrachteten idealen Leckage mit 1,0 mm Durchmesser. Bei Betrachtung des maximalen Gesamtschalldruckpegels fällt zudem auf, dass dieser für die beiden letztgenannten Prüfkörper nahezu identisch,

bei circa 121,5 dB liegt, der mittlere Gesamtschalldruckpegel steigt jedoch an. Dieser Zusammenhang resultiert durch die Limitierung des verwendeten Mikrofons. Der maximal messbare Gesamtschalldruckpegel liegt bei circa 122 dB. Treten bei einer Messung höhere Schallpegel auf, so gibt das Mikrophon dennoch nur den Maximalpegel aus, da die zusätzliche Steigerung des Pegels nicht erfasst werden kann. Auf Grund der in Kapitel 7.1 gezeigten räumlichen Verteilung des Schallsignals, kann der mittlere Gesamtschalldruckpegel jedoch weiter steigen, da in einigen Messpositionen das Maximum noch nicht erreicht wird.

Eine Auftragung der Messergebnisse aller untersuchten Prüfkörper zeigt einen nahezu exponentiellen Zusammenhang des Leckagestroms zum Gesamtschalldruckpegel (vgl. Abb. 7-3). Durch die logarithmische Auftragung des Leckagestroms, zeigt sich der exponentielle Zusammenhang in Form einer Geraden. Dieser Zusammenhang gilt für alle betrachteten Messabstände, sowohl bei Betrachtung des mittleren, als auch des maximalen Schalldruckpegels. Das diskutierte Maximum des Mikrofons, ist in der unteren Graphik deutlich durch eine senkrechte Verteilung der Messwerte oberhalb von 120 dB zu erkennen. Eine Zunahme des Leckagestroms führt aus diesem Grund zu keiner weiteren Steigerung des Schalldruckpegels. Die Einfärbung der Messwerte nach den gewählten Abständen, unterstreicht nochmals den Einfluss dieser Variable auf die Höhe des Schalldruckpegels. Durch eine Vergrößerung des Abstands kommt es zu einer Verringerung des Schallpegels. In der dargestellten Abbildung ist dies durch eine Verschiebung der Messpunkte nach links zu sehen.

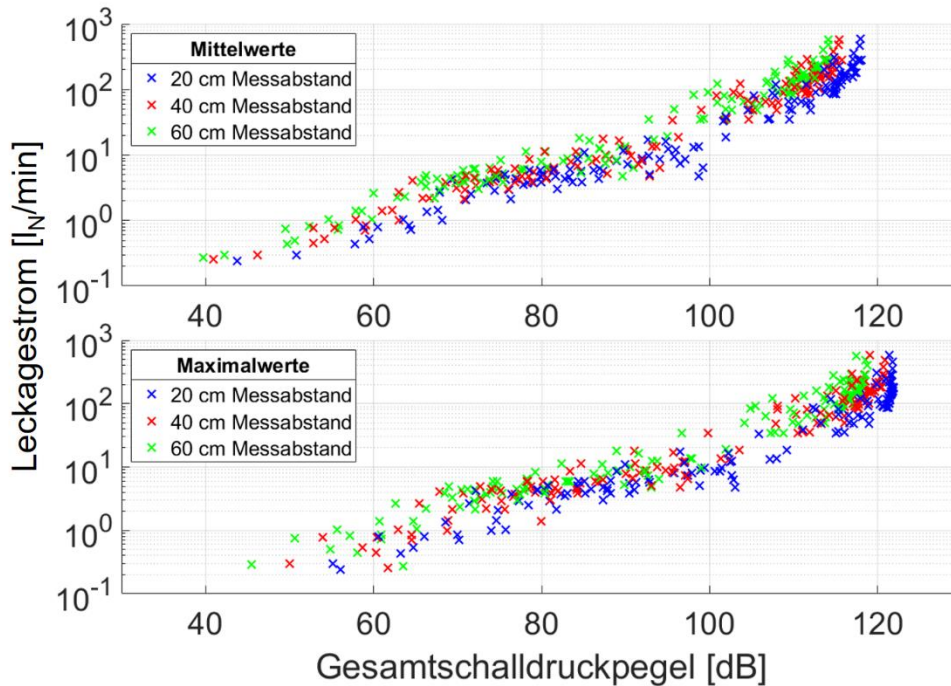


Abb. 7-3: Leckagestrom über den mittleren (oben) bzw. maximalen (unten) Gesamtschalldruckpegel aller untersuchten Prüfkörper bei verschiedenen Messabständen und Leckagedrücken von 4 bis 8 bar_ü

Für eine Detailanalyse der Korrelation von Leckagestrom und mittlerem Gesamtschalldruckpegel sind in Abb. 7-4 alle Messwerte bei einem Mikrofonabstand von 20 cm dargestellt. Zusätzlich wird eine exponentielle Trendfunktion des Typs $a e^{bx}$ mit den Parameterwerten a gleich 0,0017 und b gleich dem Wert 0,0974 mit Excel aus den gezeigten Messwerten bestimmt, die die Korrelation von Leckagestrom und Gesamtschalldruckpegel (L) beschreibt (vgl. Gl. 7-1). Es zeigt sich deutlich, dass der Gesamtschalldruckpegel mit dem Leckagestrom korreliert. Die entwickelte Trendfunktion bildet das Verhalten relativ gut ab, hat jedoch auf Grund der Streuung der Messwerte eine gewisse Unschärfe. Trotz der Verwendung des mittleren Gesamtschalldruckpegels steigt, der Gradient des Leckagestroms bei sehr hohen Schalldruckpegeln von nahezu 120 dB stark an, was die Aussagekraft der Korrelation bei hohen Gesamtschalldruckpegeln, bzw. hohen Leckageströmen einschränkt. Für Leckageströme größer 100 I_N/min steigt die Abweichung zur Trendfunktion stark an.

$$\dot{V}_{Lck} = 0,0017 e^{0,0974 L}$$

Gl. 7-1

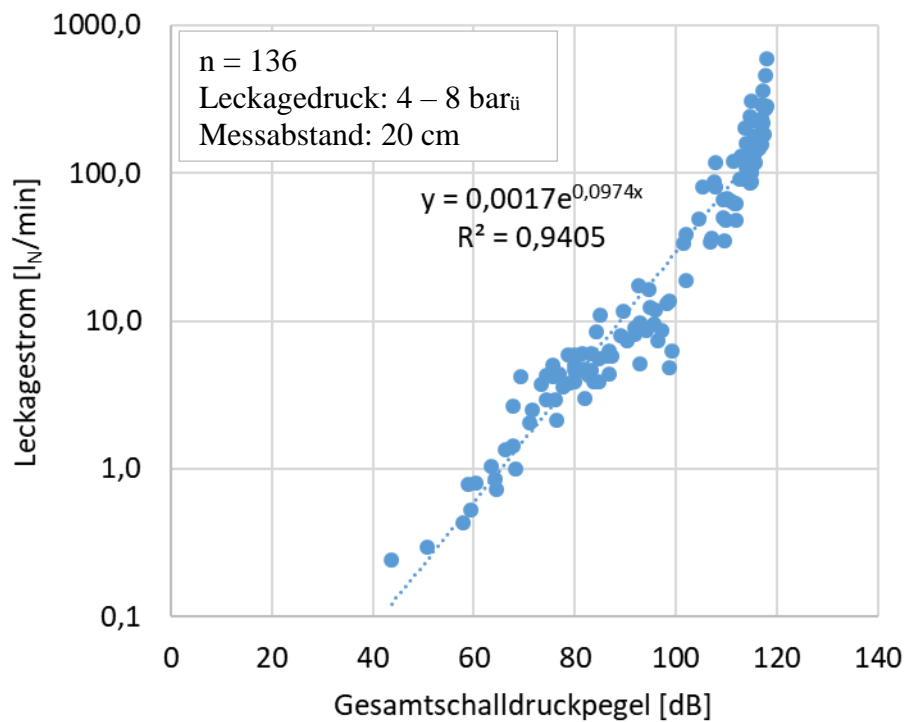


Abb. 7-4: Leckageströme aller untersuchter Prüfkörper über dem mittleren Gesamtschall-druckpegel inkl. exponentieller Trendfunktion

Zur Untersuchung der Güte der Korrelation, werden alle gemessenen Schalldruckpegel mit Hilfe der Trendfunktion (vgl. Gl. 7-1) in die jeweiligen Leckageströme umgerechnet und die relative Abweichung zum tatsächlichen Leckagestrom berechnet. Zur Veranschaulichung sind die Ergebnisse als Histogramm in Abb. 7-5 dargestellt. Diese Darstellung beinhaltet alle in Abb. 7-4 inkludierten Messwerte, da sich die entwickelte Trendlinie auf alle gezeigten Werte bezieht. Die Häufigkeitsverteilung hat im Bereich von -80 % bis 70 % relativer Abweichung der Korrelation, näherungsweise den Verlauf einer Glockenkurve. In diesen Bereich fallen 90,4 % aller indirekt, über den Gesamtschalldruckpegel bestimmten Leckageströmen, 38,2 % fallen in den Bereich ± 20 % relative Abweichung von dem tatsächlichen Leckagestrom. Die mittlere Abweichung beträgt + 11,0 %, die Standardabweichung $\pm 64,6$ %, wobei die Werte nicht normalverteilt vorliegen.

Bei 9,6 % der korrelierten Messwerte, treten jedoch Abweichungen auf, die größer als 80 % sind, die maximal bestimmte Abweichung beträgt 428 %, was eine starke „Überschätzung“ des Leckagestroms, anhand des Gesamtschallpegels bedeutet. Die fünf Prüfkörper, bzw. Messungen mit der größten Abweichung, liegen im Bereich 154 % bis 428 % und sind alle vom Typ Verschraubung ohne Dichtmittel. Dies führt zu der Hypothese, dass die Schallpegel von Leckagen nicht ausschließlich von dem Leckagestrom, sondern zusätzlich von deren Geometrie und damit dem verbundenen Leckagetyp abhängig sind. Dies wird in Kapitel 7.3.2 ausführlicher betrachtet.

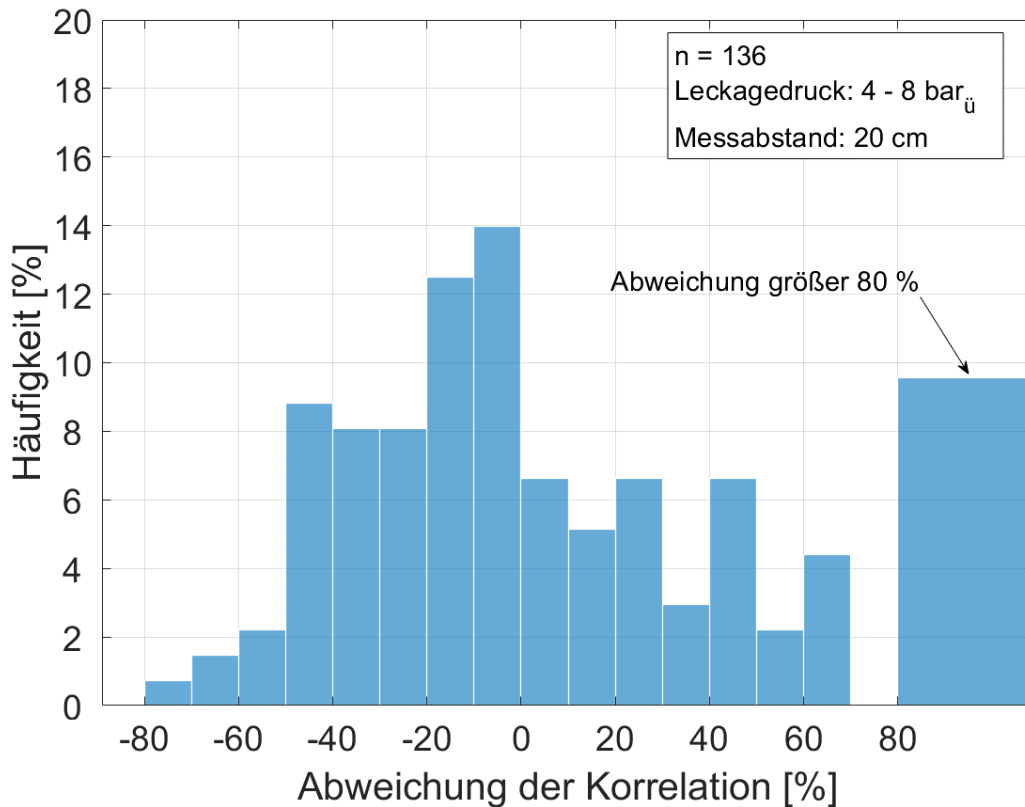


Abb. 7-5: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels Gesamtschalldruck, bestimmten Leckageströmen

Fazit

Die Analyse der Eignung des Gesamtschalldruckpegels zur Bestimmung des Leckagestroms zeigt, dass ein Zusammenhang, sowohl des maximalen, als auch des mittleren Gesamtschalldruckpegels mit dem Leckagestrom existiert. Aus Gründen der Fehleranfälligkeit eines Einzelwerts, sowie Einschränkungen durch die Mikrofonhardware, ist der mittlere Gesamtschalldruckpegel besser für die Analyse geeignet. Der Zusammenhang von Gesamtschalldruckpegel und Leckagestrom kann durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden, passende Koeffizienten wurden vorgeschlagen. Die Genauigkeit einer auf diesen Weise indirekt bestimmten Leckagestroms, liegt in 90,4 % der untersuchten Fälle zwischen, -80 % und + 70 %. Nicht betrachtet wurden Störgeräusche, bzw. zusätzlicher Lärm, welcher auf Grund der Betrachtung des Gesamtschalldruckpegels das Ergebnis verfälschen kann. Eine indirekte Bestimmung des Leckagestroms mit diesem Verfahren ist deshalb nur bei ruhiger Umgebung möglich.

7.2.2 Schalldruckpegel bei 40 kHz

Wie im vorangehenden Kapitel gezeigt, kann der Leckagestrom einer schadhafte Stelle anhand der Analyse des Gesamtschalldruckpegels grob angenähert werden. Da der Gesamtschalldruckpegel jedoch in der Praxis großen Störeinflüssen, wie z.B. Maschinenlärm unterliegt, bezieht sich dieses Kapitel auf die Auswertung des Schalldruckpegels bei einer Frequenz von 40 kHz. Auf Grund der Auswertung dieser Ultraschallfrequenz, wirken sich im hörbaren Bereich auftretende Störgeräusche, nicht auf das Ergebnis aus und die Auswertung ist zuverlässiger.

Im vorliegenden Kapitel wird die Korrelation zwischen dem maximalen Schallpegel bei 40 kHz und dem Leckagestrom untersucht. Gründe hierfür sind:

- 40 kHz liegt im Ultraschallbereich und hat somit geringere Störeinflüsse durch Störgeräusche im Hörschallbereich
- Die bereits publizierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen arbeiten ebenfalls bei einer Frequenz von 40 kHz, was eine Einordnung der Ergebnisse ermöglicht
- Bei der Entwicklung der Korrelation wurden auch andere Einzelfrequenzen betrachtet, diese zeigten jedoch in etwa vergleichbare Ergebnisse

Im Rahmen einer Schallmessung treten stets Schwankungen in den Messwerten auf. Die Messungen des Schallsignals werden auf einer Halbkreisbahn um die Leckagestelle durchgeführt. Um einen zuverlässigen Wert für den maximalen Schalldruckpegel zu erhalten, wird in dieser Arbeit nicht der höchste gemessene Einzelpegel, sondern das arithmetische Mittel des fünfthöchsten bis fünfzehnthöchsten Einzelpegels bei einer Frequenz von 40 kHz verwendet. Da ein auf diese Weise ermittelter Wert einen zuverlässigen Maximalwert der jeweiligen Messung darstellt, wird er im weiteren Verlauf der Arbeit als „maximaler Schalldruckpegel bei 40 kHz“ bezeichnet.

Für eine Detailanalyse der Korrelation zwischen dem Leckagestrom und den maximalen Schalldruckpegel bei 40 kHz, sind in Abb. 7-6 alle Messwerte bei einem Mikrofonabstand von 20 cm zur Leckagestelle dargestellt. Bei den Messungen konnten drei Ausreißer identifiziert werden, diese sind durch rote Dreiecke gekennzeichnet. Messwerte mit einem Leckagestrom von kleiner oder gleich $100 \text{ l}_N/\text{min}$ sind mit schwarzen Kreisen dargestellt, Messwerte mit einem Leckagestrom größer $100 \text{ l}_N/\text{min}$ sind blauen Quadraten dargestellt. Für die Leckageströme kleiner oder gleich $100 \text{ l}_N/\text{min}$ lässt sich ein exponentieller Zusammenhang mit dem maximalen Schalldruckpegel bei 40 kHz feststellen. Größere Leckageströme weichen deutlich von diesem Trend ab. Ein maximaler Schalldruckpegel bei 40 kHz von circa 82 dB wird auch bei hohen Volumenströmen nicht überschritten, dies ist auf die verwendete Messtechnik zu-

rückzuführen. Das verwendete Ultraschallmikrofon befindet sich am oberen Ende des Messbereichs, ein weiterer Anstieg des Schalldruckpegels kann vom Messgerät nicht mehr erfasst werden.³⁴

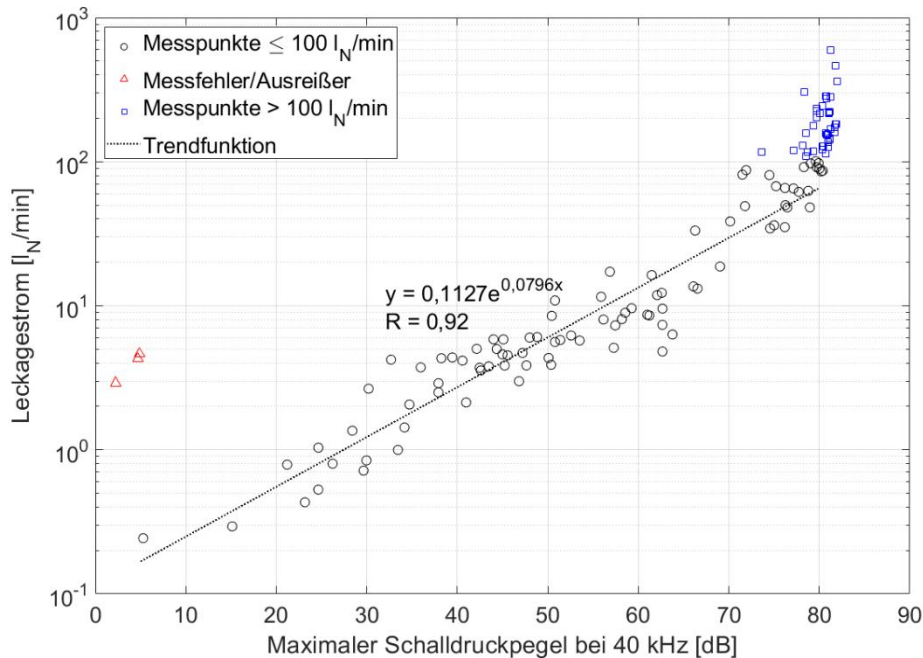


Abb. 7-6: Leckageströme aller untersuchten Prüfkörper über den maximalen 40 kHz Pegel (Messabstand 20 cm) inkl. exponentieller Trendfunktion

Für Leckageströme kleiner oder gleich $100 I_N/\text{min}$ wird eine exponentielle Trendfunktion des Typs $a e^{bx}$ mit den Parameterwerten a gleich 0,1127 und b gleich dem Wert 0,0796 mit Matlab aus den gezeigten Messwerten bestimmt, die die Korrelation zwischen dem Leckagestrom und dem maximalen Schalldruckpegel bei 40 kHz (L_{40}) beschreibt (vgl. Gl. 7-2). In der Abbildung sind drei Messwerte rot dargestellt, diese weisen trotz nennenswertem Leckagestrom nur einen kaum messbaren Schalldruckpegel bei 40 kHz auf, weshalb sie als Messfehler, bzw. Ausreißer, von der Entwicklung der Trendfunktion ausgeschlossen wurden. Für die betrachteten Messpunkte zeigt sich ein exponentieller Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegels bei 40 kHz und dem Leckagestrom, die Messwerte streuen jedoch um die entwickelte Trendfunktion.

$$\dot{V}_{Lck} = 0,1127 e^{0,0796 L_{40}}$$

Gl. 7-2

³⁴ Der Messbereich des verwendeten Ultraschallmikrofons endet bei einem Gesamtschalldruckpegel von 122 dB. Da der Gesamtschalldruckpegel die logarithmische Summe aller Einzelpegel darstellt und Druckluftleckagen breitbandig Schall emittieren, ist der maximale messbare Schallpegel einer Einzelfrequenz (z.B. 40 kHz) deutlich niedriger. Je nach Frequenzverteilung der Leckage, liegt der Maximalwert für den maximalen Messbereich des Schalldruckpegels von 40 kHz bei circa 82 dB.

Zur Untersuchung der Güte der Korrelation, werden analog zur Darstellung aus dem vorherigen Kapitel, aus allen gemessenen Schalldruckpegeln bei 40 kHz mit Hilfe der Trendfunktion (vgl. Gl. 7-2) die jeweiligen Leckageströme ermittelt und die relative Abweichung zum tatsächlichen Leckagestrom berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 7-7 dargestellt. Auffällig ist die Verkleinerung der Bandbreite der relativen Abweichung. 92,5 % aller indirekt ermittelten Leckageströme weichen zwischen -70 % und 70 % von dem tatsächlichen Leckagestrom ab. Im Vergleich zur Herangehensweise über den Gesamtschalldruckpegel, ist der Anteil der Messwerte mit einer Abweichung von größer + 80 % vermindert (4,3 % im Vergleich zu 9,6 %). Dies ist auf die Beschränkung von Gl. 7-2 auf Leckageströme von bis zu 100 l_N/min zurückzuführen, wodurch im Vergleich zum Ansatz aus Kapitel 7.2.1, kleinere Volumenströme durch die Trendfunktion besser abgebildet werden.

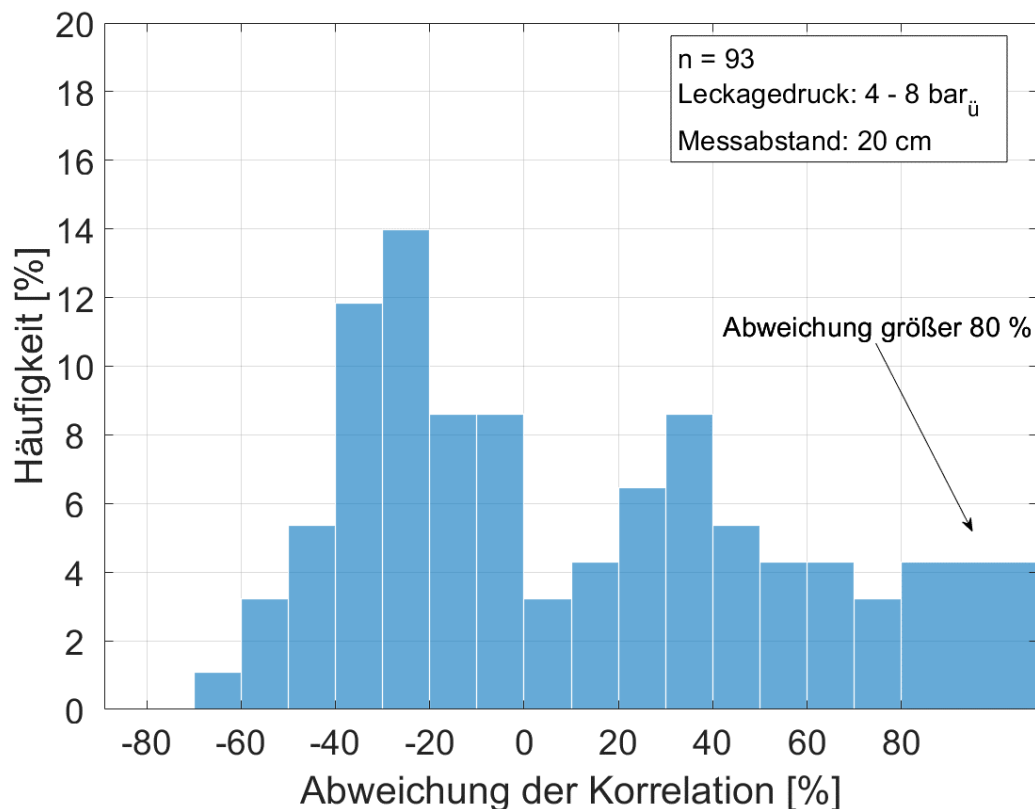


Abb. 7-7: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels 40 kHz Pegel bestimmten Leckageströmen

Auch bei der Nutzung des maximalen Schallpegels bei 40 kHz, treten Abweichungen größer 80 % auf. Die maximal bestimmte Abweichung beträgt 243 %, was im Vergleich zur Quantifizierung mittels Gesamtschalldruckpegel (428 %) stark vermindert ist. Auffällig bei der Auswertung ist, dass ausschließlich Prüfkörper des Typs Verschraubungen größere Abweichungen aufweisen. Die mittlere Abweichung der Korrelation beträgt + 4,9 %, die Standardabweichung $\pm 53,6$ %, wobei die Werte nicht normalverteilt vorliegen.

Um eine Abhängigkeit des Schallsignals vom Leckagedruck zu untersuchen sind in Abb. 7-8 die Abweichungen der Korrelation den jeweiligen Leckagedrücken der Messung zugeordnet. Die Abbildung ist nahezu mit Abb. 7-7 identisch, es wurden jedoch ausschließlich Prüfkörper ausgewertet, welche bei allen betrachteten Leckagedrücken einen Leckagestrom kleiner $100 \text{ l}_N/\text{min}$ aufweisen. Im Vergleich zur vorherstehenden Abbildung ist die Anzahl der betrachteten Messungen deshalb um 9 verringert. Wie aus Abb. 7-8 ersichtlich, existieren für alle Leckagedrücke sowohl positive als auch negative Abweichungen vom tatsächlichen Leckagestrom. Die Abweichungen sind für alle Leckageströme breit verteilt, es ist kein eindeutiges Muster erkennbar. Das Schallsignal einer Druckluftleckage bei einer Frequenz von 40 kHz ist folglich unabhängig vom Leckagedruck.

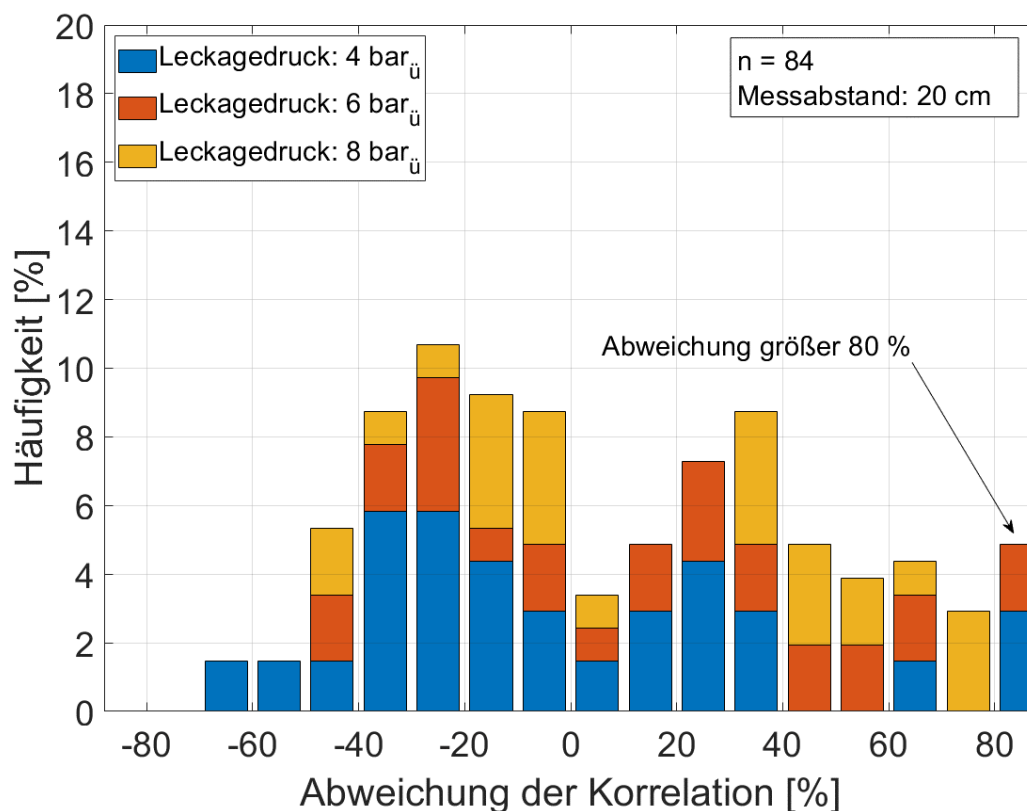


Abb. 7-8: Abweichung der aufgestellten Korrelation von 28 Prüfkörpern bei Leckagedrücken von 4, 6 und 8 bar_ü

7.3 Weiterentwicklung des Schalldruckpegelansatzes

Im vorangegangenen Kapitel wurde eine Korrelation entwickelt, mit deren Hilfe der Leckagestrom einer beliebigen Leckage anhand des maximalen Schalldruckpegels bei einer (Ultraschall-) Frequenz von 40 kHz bestimmt werden kann. Die Korrelation ist ausschließlich für einen Messabstand von 20 cm gültig. Im vorliegenden Kapitel werden Erweiterungen dieser Korrelation vorgestellt, mit deren Hilfe die indirekte Leckagequantifizierung verbessert werden kann. Im Unterkapitel 7.3.1 wird die Gleichung um einen Term für die Berücksichtigung des Messabstands erweitert, sodass der Gültigkeitsbereich erweitert wird. Abschnitt 7.3.2 führt

einen Faktor zur Berücksichtigung der Leckagegeometrie in den Berechnungen ein. In Abschnitt 7.3.3 wird die entwickelte Korrelation auf Messungen an neu hergestellten Prüfkörpern angewendet und dadurch validiert. Im letzten Abschnitt (7.3.4) wird ein Fazit zu den beiden Weiterentwicklungen gezogen und die Ergebnisse mit der wissenschaftlichen Literatur verglichen.

7.3.1 Berücksichtigung des Messabstands

Um eine möglichst präzise, indirekte Quantifizierung des Leckagestroms durchzuführen, muss der Messabstand zwischen Mikrofon und der Leckagestelle bekannt sein. Die Dämpfung des Schalldruckpegels mit steigender Entfernung wurde bereits in Kapitel 7.1 anhand eines konkreten Beispiels gezeigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Schallmessungen an allen Prüfkörper bei Messabständen von 20 cm, 40 cm und 60 cm durchgeführt und ausgewertet. Die im voranstehenden Kapitel entwickelte Korrelation zwischen dem maximalen Schalldruckpegel bei 40 kHz und dem Leckagestrom, ist ausschließlich für einen Messabstand von 20 cm gültig.

Um den Geltungsbereich dieser Gleichung (Gl. 7-2) zu erweitern, wird diese um einen Faktor zur Berücksichtigung des Messabstands erweitert. Wie bereits gezeigt, fällt die tatsächliche Abnahme des Schallpegels der Messungen verschiedener Abstände, im Vergleich zur Theorie geringer aus, was auf die Eigenschaften von gerichtetem Schall zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 7.1). Aus diesem Grund wird für die drei betrachteten Messabstände der durchschnittliche Schalldruckpegel aller Prüfkörper bei einer Frequenz von 40 kHz und die aus dem zunehmenden Abstand resultierende Pegelabnahme ermittelt. Gl. 7-3 beschreibt die Pegelabnahme bei einer Frequenz von 40 kHz (ΔL_{40}) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands (s) in cm von der Leckage. Die Dämpfung des Schallpegels wird durch einen Logarithmus beschrieben, dies entspricht der Theorie (vgl. Kapitel 3.2), jedoch ist die Dämpfung etwas schwächer ausgeprägt. Wird der Messabstand von 20 cm in die Gleichung eingesetzt, so ergibt sich eine Pegeländerung von + 0,1 dB, dies ist durch die Streuung der betrachteten Messergebnisse begründet.

$$\Delta L_{40} = -7,883 \ln(s) + 23,531 \quad \text{Gl. 7-3}$$

Durch die Erweiterung von Gl. 7-2 mit Gl. 7-3, erhält man die nun für den Bereich von mindestens 20 cm bis 60 cm gültige Gleichung (Gl. 7-4). Die für größere Abstände negative Pegeländerung (ΔL_{40}), muss vom gemessenen Schalldruckpegel bei 40 kHz subtrahiert werden, um diesen „künstlich“ auf einen Schallpegel bei 20 cm Abstand zu erhöhen. Die gezeigte Gleichung ist theoretisch auch für größere Abstände anwendbar, für eine Erweiterung des Gül-

tigkeitsbereichs sollten jedoch zusätzliche Versuche durchgeführt werden. Bei größeren Abständen werden zusätzliche Abweichungen auftreten, die die Ergebnisgüte³⁵ verschlechtern. Dies kann z.B. durch die zusätzliche Dämpfung des Schallsignals von hohen Frequenzen in der Luft bei größeren Wegstrecken erfolgen.

$$\dot{V}_{Lck} = 0,1127 e^{0,0796 (L_{40} - (-7,883 \ln(s) + 23,531))} \quad \text{Gl. 7-4}$$

Zur Überprüfung von Gl. 7-4 wird der Leckagestrom von über 267 Einzelmessungen³⁶ auf Basis des maximalen Schalldruckpegels bei 40 kHz bei Messabständen von 20 cm bis 60 cm berechnet und die Abweichung zum jeweiligen gemessenen Leckagestrom ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abb. 7-9 (S. 135) als Histogramm dargestellt. Die Ergebnisse sind für die jeweiligen betrachteten Messabstände 20, 40 und 60 cm dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Abweichungen der Korrelation zum gemessenen Leckagestrom für alle betrachteten Messabstände eine breite Streuung aufweist und sowohl positive als auch negative Abweichungen auftreten. Zudem ist die Abweichung über alle betrachteten Messabstände näherungsweise gleich. Würden die Messergebnisse des Schallsignals ohne Kompensation des Messabstands in Leckageströme umgerechnet werden, wäre in dieser Darstellung eine Verschiebung hin zu größeren negativen Abweichungen bei größeren Messabständen klar erkennbar.

Die erweiterte Gleichung weist eine vergleichbare Güte der Ergebnisse auf und stellt somit vorrangig eine Verbesserung durch Vergrößerung des Geltungsbereichs der Trendfunktion dar. Die mittlere Abweichung beträgt + 8,6 %, die Standardabweichung $\pm 48,8$ %, wobei die Werte nicht normalverteilt vorliegen.

Für eine Detailanalyse der Abweichung des mittels Ultraschall bestimmten Leckagestroms, sind die Ergebnisse aus Abb. 7-9 in Abb. 7-10 (S. 135) nach Leckagegeometrien dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die Leckageströme von Prüfkörpern des Typs Verschraubung durch die angewendete Korrelation als zu hoch, die des Typs Schlauchriss und undichte Schlauchschelle als zu niedrig angenommen werden. Je nach Leckagegeometrie ist die „Verlagerung“ der mittels Ultraschall bestimmten Leckageströme unterschiedlich stark ausgeprägt. Es wird deshalb die Hypothese aufgestellt, dass das Schallsignal einer Druckluftleckage neben der Höhe des Leckagestroms und des Messabstands auch von der Leckagegeometrie abhängig ist.

³⁵ Eine zusätzliche Dämpfung des Schalldruckpegels durch Luft-Dissipation ist in der Gleichung nicht abgedeckt. Bei größeren Abständen von z.B. mehreren Metern, wird der Schalldruckpegel vor allem von hohen Frequenzen durch die Luft-Dissipation zusätzlich gedämpft. Dieser Effekt ist nicht berücksichtigt, weshalb die vorgestellte Gleichung nur bis zu einem Abstand von 60 cm Gültigkeit besitzt.

³⁶ Dies entspricht allen in Abb. 7-3 (Seite 125) gezeigten Messpunkten, welche alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Ultraschallmessungen beinhalten, die einen Leckagestrom kleiner oder gleich 100 l_N/min aufweisen.

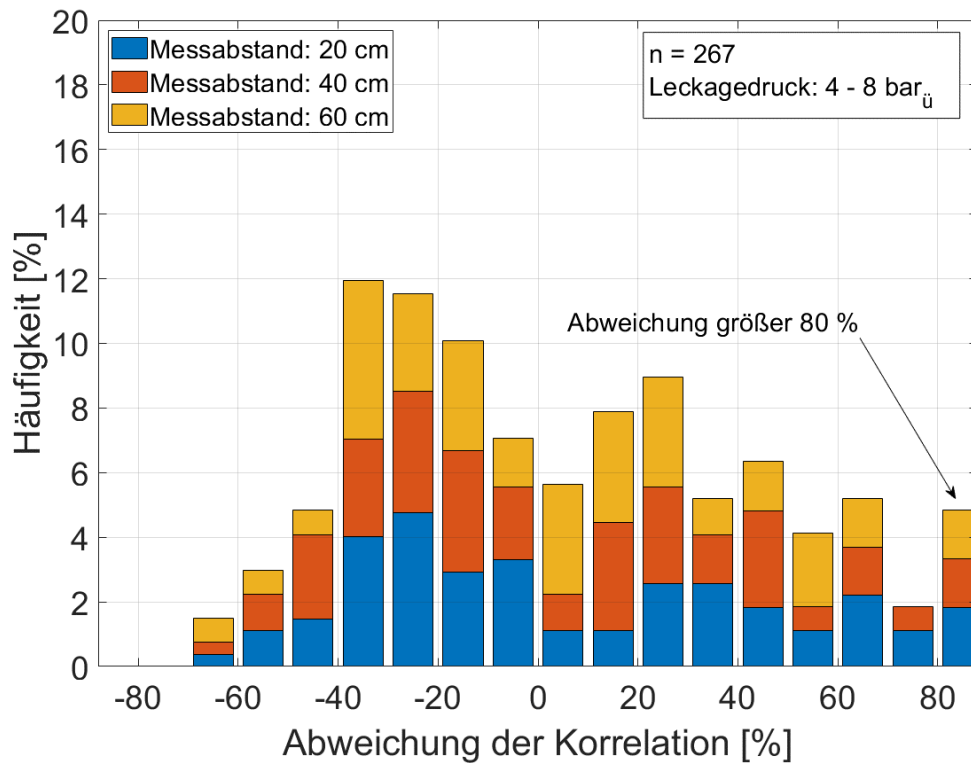


Abb. 7-9: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels 40 kHz Pegel bestimmten Leakageströmen für Messabstände von 20 bis 60 cm

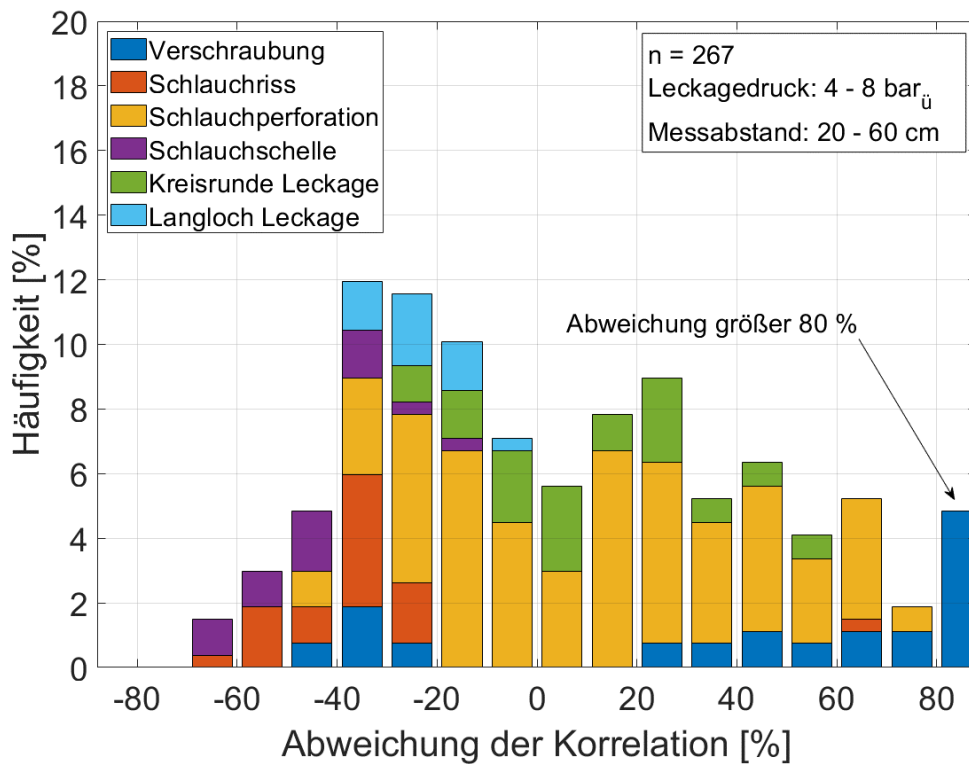


Abb. 7-10: Häufigkeitsverteilung der Abweichung bezogen auf die Leakagegeometrie

7.3.2 Berücksichtigung der Leckagegeometrie

In Kapitel 7.2 wurde auf Grund der Auswertung der Mess- und Korrelationsergebnisse die Hypothese aufgestellt, dass der Schalldruckpegel nicht ausschließlich vom Leckagestrom, sondern ebenfalls von der Leckagegeometrie abhängig ist. Zur Überprüfung dieser Hypothese werden die jeweiligen Abweichungen der indirekten Leckagequantifizierung, den untersuchten Prüfkörpern zugeordnet und in sieben Kategorien anhand der Leckagegeometrie eingeordnet. Die Kategorien entsprechen den unterschiedlichen betrachteten Prüfkörpertypen.

Tabelle 7-3 zeigt als Ergebnis die durchschnittliche Abweichung der Korrelation je untersuchter Leckagegeometrie. Es wird deutlich, dass die Korrelation (vgl. Gl. 7-4), je nach betrachteter Leckagegeometrie, den tatsächlichen Leckagestrom unterschiedlich gut approximiert. Die größte Abweichung tritt bei Verschraubungen auf und beträgt im Mittel 66,3 %. Der Leckagestrom von Leckagen mit dieser Leckagegeometrie wird folglich als zu hoch angenommen, wohin gegen Leckageströme, von z.B. idealen Langloch Leckagen als zu niedrig angenommen werden. Die große Abweichung des indirekt bestimmten Leckagestroms von Verschraubungen, welche in den vorangegangenen Kapiteln festgestellt wurde, kann somit eindeutig belegt werden und führt zur Erkenntnis, dass der maximale Schalldruckpegel einer Leckage, bei einer Frequenz von 40 kHz, in Abhängigkeit zur Leckagegeometrie steht.

Tabelle 7-3: Durchschnittliche Abweichung der Korrelation nach Leckagegeometrien

Leckagegeometrie bzw. Art des Prüfkörpers	Durchschnittliche Abweichung der Korrelation [%]
Schlauchselle	-45,6
Schlauchriss	-36,2
Ideale Langloch Leckagen	-23,7
Ideale kreisrunde Leckagen	9,5
Schlauchperforation	11,5
Verschraubung	66,3

Da eine fundamentale Analyse des physikalischen Zusammenhangs von Leckagegeometrie und Schalldruckpegel auf Grund der komplexen und unzähligen Geometrien zu zeitintensiv ist, wird ein pragmatischer Ansatz gewählt, um die Korrelation zu verbessern. Hierzu wird die bereits ermittelte Korrelation (vgl. Gl. 7-4) um einen zusätzlichen Faktor zur Berücksichtigung der Leckagegeometrie (τ_{Geo}) erweitert (vgl. Gl. 7-5). Dieser Faktor wird mit dem, um den Messabstand korrigierten, Schalldruckpegel bei 40 kHz multipliziert und beeinflusst somit direkt, den in der Berechnung berücksichtigten Schalldruckpegel. Bei einem Wert von τ_{Geo} von, z.B. 0,9, wird der gemessene und um den Messabstand korrigierte Schalldruckpegel um 10 % verringert.

$$\dot{V}_{Lck} = 0,1127 e^{0,0796 \tau_{Geo} (L_{40} - (-7,883 \ln(s) + 23,531))}$$

Gl. 7-5

Die Leakagegeometriefaktoren (τ_{Geo}) werden numerisch aus den Messwerten bestimmt. Es wird die Methode der kleinsten (Fehler-) Quadrate angewandt. Hierzu wird der jeweilige ermittelte relative Fehler einer indirekten Messung quadriert und die Summe aller Fehlerquadrate bestimmt. Mittels Solver wird derjenige Leakagegeometriefaktor bestimmt, welcher zur geringsten Summe der Fehlerquadrate und somit zum Ergebnis mit der geringsten Abweichung führt.³⁷ Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-4 aufgeführt, erwartungsgemäß weisen Verschraubungen den geringsten Leakagegeometriefaktor auf.

Tabelle 7-4: Leakagegeometriefaktoren der untersuchten Leakagegeometrien

Leakagegeometrie bzw. Art des Prüfkörpers	Leakagegeometriefaktor [τ_{Geo}]
Verschraubung	0,845
Schlauchperforation	0,951
Ideale kreisrunde Leakage	0,979
Ideale Langloch Leakage	1,039
Schlauchriss	1,081
Schlauchschele	1,159

Zur Überprüfung der erweiterten Korrelationsgleichung Gl. 7-5, wird der Leakagestrom derselben Einzelmessungen, wie im vorangegangenen Abschnitt (vgl. Abb. 7-9, S. 135) auf Basis des maximalen Schalldruckpegels bei 40 kHz und Messabständen von 20 cm bis 60 cm berechnet, sowie die Abweichung zum gemessenen Leakagestrom ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abb. 7-11 als Histogramm dargestellt. Durch die Einführung des Leakagegeometriefaktors wird die Genauigkeit der Trendfunktion signifikant verbessert. Die Messwerte weisen nun näherungsweise eine Normalverteilung auf, zudem sind die extremen Abweichungen (größer 80 %) auf 0,37 % und damit auf eine einzelne Messung³⁸ gesunken. Die Einführung des Leakagegeometriefaktors führt bei jeder einzelnen untersuchten Leakagegeometrien zu einer Verringerung der Streubreite und einer Konzentration der mittels Ultraschall bestimmten Leckageströme im Bereich von geringeren Abweichungen.

³⁷ Bei der Methodik der kleinsten Quadrate haben Messwerte mit größerer Abweichung einen größeren Effekt auf das Endergebnis, als kleine Abweichungen. Folglich kann es durch Ausreißer in den Messergebnissen zu einer Verzerrung bei der Bestimmung des Leakagegeometriefaktors kommen. Deshalb wurde ein Messergebnis bei der Leakagegeometrie „Schlauchriss“ als Ausreißer (einzige Messung der Leakagegeometrie mit positivem Korrelationsfehler [+ 60 %]) von der Bestimmung des Leakagegeometriefaktors ausgeschlossen.

³⁸ Bei der Messung handelt es sich um die in vorherigen Fußnote angesprochene Messung des Schlauchrisses.

Die Verbesserung der Korrelationsgüte zeigt sich ebenfalls in der Betrachtung selektiver Intervalle. In ein Intervall von $\pm 40\%$ treffen 87 % aller Messwerte. 90 % aller Messwerte haben eine Abweichung von kleiner $\pm 42\%$. Die mittlere Abweichung beträgt $-6,9\%$, die Standardabweichung $\pm 27,4\%$. Dies entspricht einer deutlichen Verbesserung der indirekten Leckagequantifizierung durch die Berücksichtigung der Leckagegeometrie.

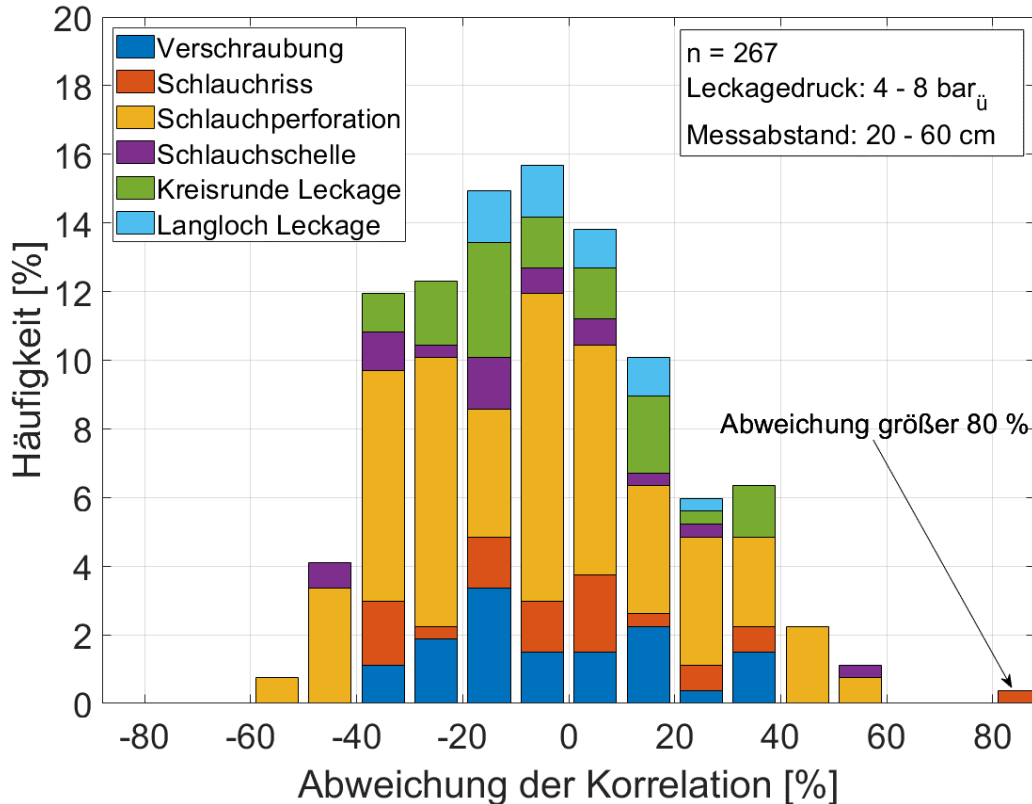


Abb. 7-11: Häufigkeitsverteilung der Abweichung zwischen den gemessenen und den mittels 40 kHz Pegel bestimmten Leckageströmen unter Berücksichtigung der Leckagegeometrie

7.3.3 Validierung der Leckagequantifizierung

Im voranstehenden Kapitel wurde mit Gl. 7-5 eine Möglichkeit der Quantifizierung von Druckluftleckagen anhand des maximalen Schalldruckpegels bei 40 kHz in Abhängigkeit des Messabstands und der Leckagegeometrie vorgestellt. Die eingeführten Leckagegeometriefaktoren wurden experimentell auf Basis von 267 Einzelmessungen bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass die Einführung der Leckagegeometriefaktoren zu einer Verbesserung der Genauigkeit der Leckagequantifizierung bei den durchgeführten Messungen führt. Da es sich jedoch um den gleichen Datensatz handelt, auf dessen Basis die Leckagegeometriefaktoren bestimmt wurden, wurde trotz der hohen Versuchsanzahl eine zusätzliche Validierung von Gl. 7-5 und der Leckagegeometriefaktoren durchgeführt.

Für die Validierung wurden insgesamt 16 neue Prüfkörper gefertigt. Es handelt sich hierbei um Schlauchperforationen, Verschraubungen mit 10, 20 bzw. 40 Nm, Schlauchrisse und kreisrunde ideale Leckagen (vgl. Tabelle 7-5). Diese wurden jeweils bei einem Leckagedruck von 4, 6 bzw. 8 bar_ü und Messabständen von 20, 40 und 60 cm vermessen und ausgewertet.³⁹

Tabelle 7-5: Übersicht der neu hergestellten Prüfkörper für die Validierung

Leckagegeometrie	Anzahl an Prüfkörpern
Verschraubung 10 Nm	2
Verschraubung 20 Nm	2
Verschraubung 40 Nm	2
Schlauchperforation (1,2 – 2,5 mm)	6
Kreisrunde ideale Leckage	2
Schlauchriss	2

Die Ergebnisse der Validierung sind in Abb. 7-12 und Abb. 7-13 sowohl durch die Darstellung der absoluten, als auch der relativen Abweichung abgebildet. Die relative Abweichung des über Gl. 7-5 bestimmten Leckagestroms, beträgt für 71 % der im Rahmen der Validierung durchgeführten Messungen, weniger als ± 40 %. Das Ergebnis der Validierung fällt somit um 16 %-Punkte schlechter, als die ursprünglichen Messungen, aus (vgl. Abb. 7-11, S. 138).

In der Detailanalyse wird deutlich, dass Prüfkörper des Typs Verschraubungen am schlechtesten durch die Korrelation und den ermittelten Leckagegeometriefaktor abgebildet werden. Die relative Abweichung bei der Quantifizierung von Leckagen an Verschraubungen zeigt einen direkten Zusammenhang mit dem tatsächlichen Leckagestrom. Leckageströme von Verschraubungen mit sehr kleinen Leckageströmen werden im Rahmen der Quantifizierung als zu groß angenommen. Bei größeren Leckageströmen wird der Leckagestrom als zu gering angenommen. Bei einigen Verschraubungen tritt auf Grund einer komplexen Austrittsgeometrie kein konzentrierter Luftstrahl aus, was direkte Auswirkungen auf das Schallsignal hat. So verschwindet in einigen Fällen der „cone of silence“ oder ist nur schwach ausgeprägt (vgl. Abb. G - 2, S. 186). Insgesamt lässt sich im Rahmen der Validierung feststellen, dass die Leckagegeometrie Verschraubungen zu inhomogen ist, um durch einen einzelnen Leckagegeometriefaktor beschrieben zu werden. Eine Quantifizierung ist mit verminderter Genauigkeit im Vergleich zu den anderen Prüfkörpern dennoch möglich.

³⁹ Bei 15 von 144 Messungen wurden Leckageströme von über 100 l_N/min gemessen, die betreffenden Messungen wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Die Gesamtzahl der Validierungsmessungen beläuft sich auf 129 Messungen.

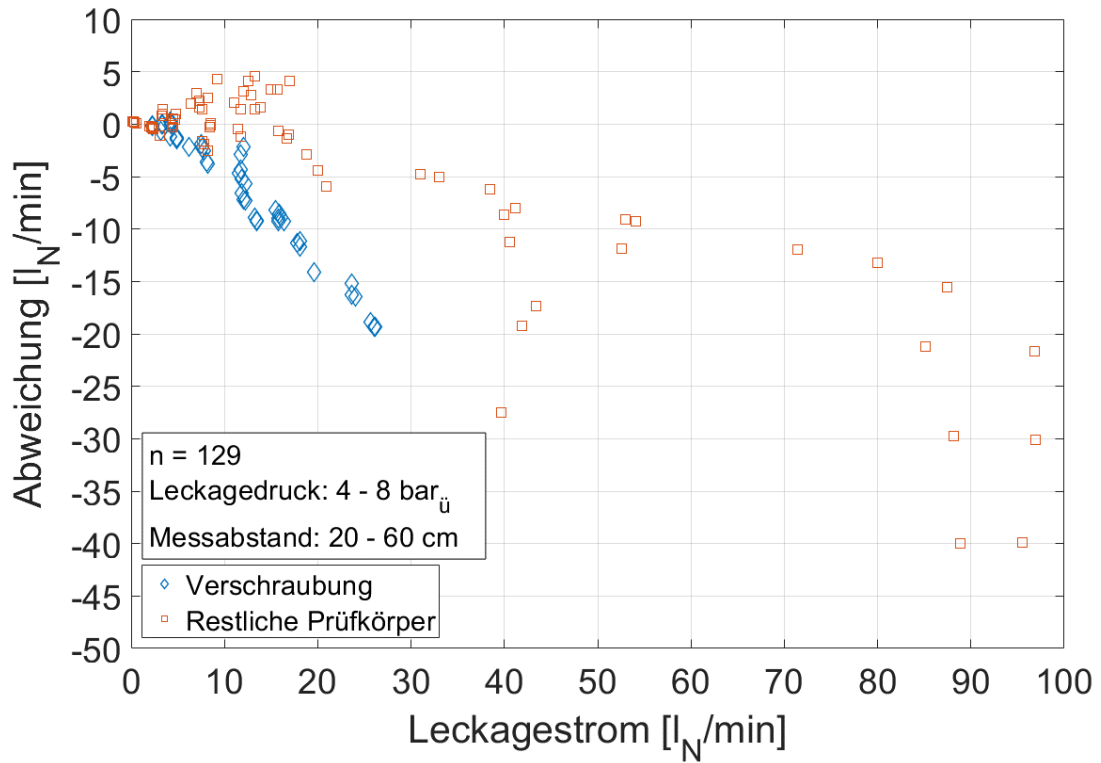


Abb. 7-12: Absolute Abweichungen des Verfahrens zur Leckagequantifizierung mittels Ultraschall in Abhängigkeit des Leckagestroms

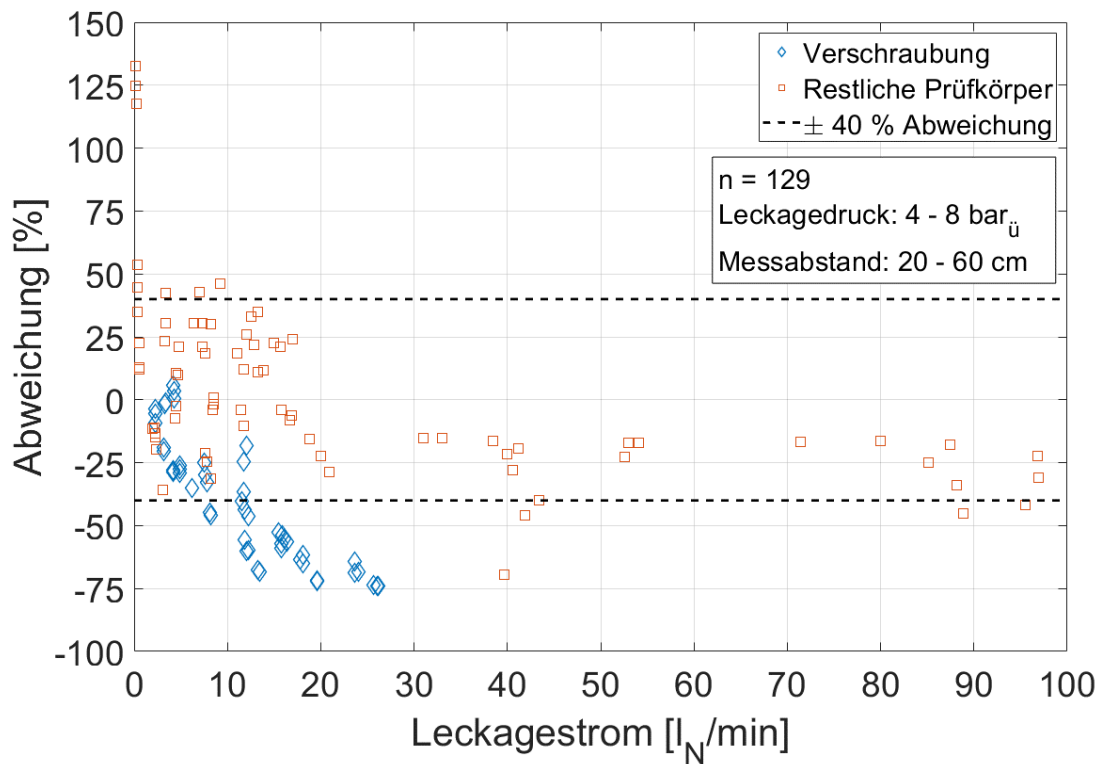


Abb. 7-13: Relative Abweichungen des Verfahrens zur Leckagequantifizierung mittels Ultraschall in Abhängigkeit des Leckagestroms

Werden Prüfkörper des Typs Verschraubungen bei der Auswertung ausgeschlossen, fallen 89 % der, auf Basis des Ultraschallsignals ermittelten Leckageströme, in den Bereich von Abweichungen kleiner $\pm 40\%$, was in etwa der ursprünglichen Genauigkeit der Korrelation entspricht. Vereinzelt treten hohe relative Abweichungen von 118 bis 133 % auf. Der tatsächliche Leckagestrom bei diesem Prüfkörper (Schlauchperforation mit 1,46 mm bei einem Leckagedruck von 4 bar_ü bei Messabständen von 20, 40 und 60 cm) ist mit circa 0,2 l_N/min sehr gering, was bedeutet, dass der absolute Fehler nur circa 0,25 l_N/min beträgt. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die relative Abweichung der Quantifizierung auch in Bezug zu den Absolutwerten zu setzen ist, um die Ergebnisgüte⁴⁰ einzuordnen.

Auffällig ist zudem, dass Leckageströme größer 20 l_N/min unterschätzt werden. Die relative Abweichung liegt für die meisten betrachteten Messungen in einem Bereich von -15 bis -50 %. Es kann kein Trend festgestellt werden, dass die relative Abweichung mit steigendem Leckagestrom ebenfalls ansteigt. Auf Grund der geringeren Anzahl an Messungen von Prüfkörpern mit Leckagen größer 20 l_N/min kann dies jedoch auch in der begrenzten Anzahl der vermessenen Prüfkörper begründet sein.

Eine selektive Auswertung der Messungen nach Leckagedruck, bzw. Messabstand, führt zu keiner signifikanten Änderung der Abweichungen, was die vorab aufgestellten Vermutung einer weitgehenden Unabhängigkeit des Schallsignals vom Leckagedruck bestätigt. Zudem kann hierdurch eine Bestätigung des implementierten Abstandskorrekturterms für den Messabstand des Mikrofons aus Gl. 7-5 erfolgen.

Durch die zusätzlichen Messungen kann die aufgestellte Korrelation aus dem maximalen Schalldruckpegel bei 40 kHz und dem Leckagestrom (vgl. Gl. 7-5) bestätigt werden. Ebenso kann die Verwendung und Höhe der Leckagegeometriefaktoren, mit Ausnahme von Leckagen an Verschraubungen, bestätigt werden. Die Validierung zeigt jedoch auch, dass eine auf diese Weise durchgeführte Leckagequantifizierung kein hochpräzises Messverfahren mit geringen Toleranzen darstellt. Dennoch ist eine zuverlässige Aussage zur Höhe eines Leckagestroms möglich.

⁴⁰ Für den Endanwender spielt die relative Abweichung der Leckagequantifizierung bei kleinen Leckageströmen eine untergeordnete Rolle. Eine wie hier gezeigte Abweichung der Quantifizierung des Leckagestroms von 0,25 l_N/min ist sowohl unter energetischen, als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht relevant.

7.3.4 Literaturvergleich und Fazit

Literaturvergleich

Die Anzahl an wissenschaftlicher Literatur zur indirekten Leckagequantifizierung ist gering und die Aussagen teilweise gegensätzlich (vgl. 2.3.3). Dudic et al. (Dudic et al. 2012b) kommen in Ihrer Auswertung zum Schluss, dass eine indirekte Leckagequantifizierung mittels Ultraschall nur für kleine Leckageströme⁴¹ möglich ist. Dudic et al. schlägt keine konkrete Korrelation vor, deutet jedoch einen exponentiellen Zusammenhang an, welcher für jeden betrachteten Leckagedruck unterschieden wird.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass auch größere Leckageströme von bis zu 100 l_N/min mit der entwickelten Korrelation auf Basis eines Ultraschallsignals mit einer ausreichenden Genauigkeit quantifiziert werden können. Durch die Verwendung eines Mikrofons mit größerem Messbereich, ist eine Vergrößerung des Geltungsbereichs der Korrelation denkbar. Alternativ wäre es möglich, die Leckagequantifizierung bei größeren Messabständen durchzuführen. Durch die Dämpfung des Schallsignals mit zunehmenden Messabstand, nimmt der Schalldruckpegel ab. Der Pegelabfall⁴² kann über den vorgestellten Korrekturterm berücksichtigt werden (vgl. Gl. 7-3, S. 133).

Der von Dudic et al. vorgeschlagene Ansatz, mehrere Exponentialfunktionen basierend auf den Leckagedrücken für die Quantifizierung zu verwenden, erscheint nicht sinnvoll. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die weitgehende Unabhängigkeit des Schallsignals vom Leckagedruck.⁴³

In der Publikation von Wolstencroft (Wolstencroft 2008) wird die Winkelabhängigkeit des Schallsignals und der Einfluss des Messabstands auf die Höhe des Schalldruckpegels untersucht. Wolstencroft untersucht zudem die Auswirkung der Leckagegeometrie auf den Schalldruckpegel anhand von kreisrunden und rechteckigen Leckagen. Er kommt zu dem Schluss, dass kein Zusammenhang erkennbar ist. Wolstencroft deutet einen Zusammenhang von Schalldruckpegel und Leckagestrom an, gibt jedoch keine konkrete Korrelation an, sondern ausschließlich dezidierte Messwerte von Leckagen.

Im Rahmen dieser Arbeit können die Ergebnisse von Wolstencroft zur Winkelabhängigkeit und dem Einfluss des Messabstands auf das Schallsignal bestätigt werden. Die von Wolstencroft postulierte Unabhängigkeit des Schallsignals von der Leckagegeometrie, wird in dieser Arbeit widerlegt. Der Einfluss ist deutlich messbar und im voranstehenden Kapitel (7.3.2) für

⁴¹ Wie groß die von Dudic et al. angesprochenen „kleinere Leckageströme“ sind, wird nicht aufgeführt. Anhand der gezeigten Messergebnisse kann von einer Grenze von circa 40 l_N/min ausgegangen werden.

⁴² Es gelten die in Fußnote 35 (S. 133) erläuterten Einschränkungen.

⁴³ Der Leckagedruck steht in einem direkten Zusammenhang mit dem Leckagestrom, dies wurde bereits in Kapitel 6.1.1 ausführlich behandelt. Das Ultraschallsignal ist jedoch nicht von dem Leckagedruck abhängig, sondern vom austretenden Luftvolumenstrom.

verschiedene Geometrien quantifiziert. Die von Wolstencroft untersuchten, kreisrunden bzw. rechteckigen Leckagegeometrien, verhalten sich jedoch relativ ähnlich (vgl. Tabelle 7-4, S. 137), sodass dieser Rückschluss von Wolstencroft in einer zu geringen Varianz der Prüfkörper begründet liegt und bei ungenaueren, nicht automatisierten Messabläufen untergeht.

Fazit

Durch die gezeigten Weiterentwicklungen des Schalldruckpegelansatzes, kann die Qualität der indirekten Leckagequantifizierung signifikant gesteigert werden. Durch die rechnerische Anpassung des Schalldruckpegels an den Abstand zwischen dem Mikrofon und der Leckage, kann eine einzige Gleichung zur Berechnung verwendet werden.

Bei der Analyse der einzelnen Prüfkörper wurde festgestellt, dass sich Prüfkörper mit vergleichbaren Leckagegeometrien ähnlich verhalten. So ist z.B. der maximale Schalldruckpegel bei einer Frequenz von 40 kHz bei Leckagen des Typs Schlauchperforationen im Vergleich zu anderen Prüfkörpern mit ähnlichem Leckagestrom erhöht. Dies führt dazu, dass Leckageströme dieser Prüfkörper als zu groß angenommen werden. Durch die Aufteilung der Prüfkörper in Leckagegeometrien und Einführung eines Leckagegeometriefaktors, wird die Genauigkeit der indirekten Leckagequantifizierung deutlich gesteigert, in 90 % der betrachteten Fälle liegt die Abweichung zum gemessenen Leckagestrom bei kleiner ± 42 %.

Zur Validierung wurden 129 zusätzliche Messungen an 16 neu gefertigten Prüfkörpern durchgeführt. Im Rahmen der Validierung konnte gezeigt werden, dass die aufgestellte Korrelation und die verwendeten Leckagegeometriefaktoren, mit Ausnahme von Prüfkörpern des Typs Verschraubungen, zu guten Ergebnissen der Leckagequantifizierung führt. Unter Berücksichtigung aller untersuchter Prüfkörper, haben 71 % der mittels Ultraschall ermittelten Leckageströme Abweichungen kleiner ± 40 % zum gemessenen Leckagestrom des jeweiligen Prüfkörpers. Werden Prüfkörper des Typs Verschraubungen bei der Auswertung nicht berücksichtigt, liegen 89 % der Messwerte in diesem Intervall.

Die Auswertungen zeigen, dass eine Leckagequantifizierung über ein gemessenes Schallsignal möglich, jedoch mit Unsicherheiten behaftet ist. Die bestimmte Korrelation ist für eine Abschätzung des Leckagestrom geeignet, weitere Möglichkeiten der Verbesserung sind im Ausblick (vgl. Kapitel 8.3) aufgeführt.

8. Abschließende Betrachtungen

Die vorliegende Dissertation hat das Ziel der „systematischen Analyse von Druckluftleckagen“ (vgl. Kapitel 1.2). Die Arbeit basiert auf der Bearbeitung der drei Forschungsschwerpunkte:

- Leckageberechnung
- Leckageströme
- Leckagequantifizierung

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und diskutiert. Abschnitt 8.1 umfasst sowohl die theoretische Berechnung, als auch die experimentelle Untersuchung von Druckluftleckageströmen. In Abschnitt 8.2 wird das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Leckagequantifizierung mittels Ultraschall zusammengefasst und die Erkenntnisse diskutiert. Abschnitt 8.3 beinhaltet einen Ausblick über den weiteren Forschungsbedarf der Leckagequantifizierung mittels Ultraschall. Das Kapitel wird in Abschnitt 8.4 mit einem Schlusswort beendet.

8.1 Berechnung und experimentelle Untersuchung von Leckageströmen

In der Literatur wird die energetische Relevanz von Druckluftleckagen häufig durch praxisnahe Vergleiche veranschaulicht. Leckageströme werden häufig anhand von standardisierten Leckagegeometrien angegeben. In den meisten Fällen sind dies kreisrunde Löcher mit verschiedenen Durchmessern. Eine Zusammenstellung von publizierten Leckageströmen an kreisrunden Löchern (vgl. Abb. 2-1, S.13) hat die großen Unterschiede in den publizierten Daten zu Leckageströmen und den Mangel einer systematischen Betrachtung des Themas aufgezeigt. Zusätzlich wurde bei der Auswertung der wissenschaftlichen Literatur zu Druckluftleckagen festgestellt, dass nur wenige potentielle Einflussfaktoren auf den Leckagestrom einer Druckluftleckage umfassend untersucht wurden (vgl. Kapitel 2.3.4).

Die Arbeit setzt an diesem Problem an und führt eine umfangreiche und reproduzierbare Analyse von Druckluftleckagen durch. Leckageströme von Druckluftleckagen wurden sowohl durch theoretische Berechnungen, als auch durch experimentelle Untersuchungen ermittelt.

Im ersten Forschungsschwerpunkt sollten folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie können Druckluftleckagen durch physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden?
- Welche Einflussfaktoren auf die Höhe des Leckagestroms existieren und wie groß ist deren jeweiliger Einfluss?

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Druckluftleckagen beschrieben und auf deren Basis ein Berechnungsmodell von Leckageströmen idealer Druckluftleckagen entwickelt. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erläutert, wird Druckluft im Berechnungsmodell als ideales Gas angenommen. Das Berechnungsmodell wurde zusätzlich um die Berücksichtigung der Leckagegeometrie (Discharge Coefficient) und des Wassergehalts erweitert, um ein verbessertes Verständnis der Zusammenhänge zu erhalten. Das Berechnungsmodell besitzt eine graphische Oberfläche zur Eingabe der Berechnungsparameter.

Die Anwendung des Berechnungsmodells zeigt, dass die Leckagefläche, der Leckagedruck und die Leckagegeometrie maßgeblichen Einfluss auf den Leckagestrom besitzen. Leckagefläche und Leckagedruck verhalten sich direkt proportional zum Leckagestrom. Die Leckagegeometrie wird durch einen experimentell zu bestimmenden Faktor (Discharge Coefficient) beschrieben. Die Temperatur der durch die Leckage strömenden Druckluft, hat nur einen geringen Einfluss auf den Leckagestrom. Der Leckagestrom fällt mit steigender Temperatur auf Grund der sinkenden Dichte leicht ab. Der Einfluss des Wassergehalts auf die Höhe des Leckagestroms ist kleiner 0,1 % kann gegenüber den übrigen Faktoren vernachlässigt werden.

Im zweiten Forschungsschwerpunkt sollten durch die experimentellen Untersuchungen von Druckluftleckagen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Können die in der Theorie ermittelten Einflussfaktoren im Experiment nachgewiesen und somit validiert werden?
- Wie groß sind Leckageströme von definierten Leckagegeometrien?
- Wie groß sind Leckageströme von realitätsnahen Leckagegeometrien?

Zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen wurde eine große Anzahl von Versuchen auf dem, in dieser Arbeit konzipierten und aufgebauten Prüfstand, durchgeführt. Durch die Versuche konnten die, aufgrund der theoretischen Berechnungen vermuteten Einflussfaktoren auf den Leckagestrom, bestätigt werden. Für die Analyse der Einflussfaktoren wurden Versuche an Prüfkörpern des Typs ideale Leckagen durchgeführt.

Bei den Einflussfaktoren zeigte sich, dass die Leckagefläche und der Leckagedruck die Haupteinflussfaktoren für den Leckagestrom darstellen. Die beiden Einflussfaktoren verhalten sich, wie durch die theoretischen Berechnungen ermittelt, direkt proportional zum Leckagestrom.

Der Einfluss der Leckagegeometrie ist im Vergleich zum Leckagedruck und der Leckagefläche weniger schwächer ausgeprägt. Es konnte gezeigt werden, dass ideale Leckagen mit Langloch-Geometrie niedrigere Leckageströme bei gleicher Leckagefläche und gleichem Leckagedruck aufweisen, als kreisrunde Leckagen. Der Leckagestrom von Leckagen mit Langloch-Geometrie sinkt zudem mit steigendem Länge zu Breite Verhältnis ab, da die Umfangslänge bezogen auf die Leckagefläche und damit Randraibungseffekte anteigen. Um den Geometrieinfluss berücksichtigen zu können, wurden die jeweiligen Discharge Coefficients aller

untersuchten idealen Leckagen bestimmt. Der Median des Discharge Coefficients der untersuchten kreisrunden Leckagen beträgt 0,83, der der Langloch-Leckagen 0,73. Bei Langloch-Leckagen mit einem (großen) Länge zu Breite Verhältnis von 18,35 sinkt der Discharge Coefficient auf 0,61 ab.

Die Drucklufttemperatur hat im Vergleich zu den Haupteinflussfaktoren nur geringen Einfluss auf den Leckagestrom. Je Grad Kelvin Temperaturerhöhung sinkt der Leckagestrom um circa 0,17 %-Punkte. Der Feuchtegehalt der Druckluft keinen messbaren Einfluss auf den Leckagestrom

Neben einer Analyse der Einflussfaktoren, wurden auch die Leckageströme von insgesamt 54 idealen und 54 realen Leckageprüfkörpern untersucht. Bezüglich der Leckageströme der betrachteten Bauteile, lassen sich folgende Kernaussagen treffen:

- Kreisrunde ideale Leckagen haben größere Leckageströme, als Langloch-Leckagen gleicher Fläche.
- Der Leckagestrom von Langloch-Leckagen sinkt mit steigendem Länge zu Breite Verhältnis.
- Reale Leckagen (mit Ausnahme von Schlauchrissen) haben eher geringe Leckageströme von bis zu 20 I_N /min.
- Die Leckagegeometrie von einigen realen Leckagen ist nicht formstabil (flexible Materialien), folglich schwankt auch der Leckagestrom.
- Der Leckagestrom an Verschraubungen sinkt bei höheren Anzugsmomenten.
- Der Leckagestrom einer mit definiertem Durchmesser erzeugten Schlauchperforation ist deutlich geringer, als der einer idealen kreisrunden Leckagen mit gleichem Nenndurchmesser.

Einordnung der Ergebnisse

Das Forschungsfeld Druckluftleckagen wird bisher, wie in der Analyse der wissenschaftlichen Literatur gezeigt, nur unzureichend bearbeitet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden erste Lücken geschlossen. Auf Grund der sehr eingeschränkten Anzahl (3 Publikationen) von wissenschaftlichen Arbeiten, die Leckageströme an definierten Druckluftleckagen gemessen haben, ist ein Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit, mit anderen wissenschaftlichen Arbeiten, nur eingeschränkt möglich.

Um reproduzierbare und nachvollziehbare Messergebnisse zu erzielen, wurden für diese Arbeit deshalb besondere Anstrengungen unternommen. Hierzu zählt die Konzipierung eines automatisierten Prüfstands mit standardisierten Messprotokollen für die Messdurchführung,

sowie eine Vielzahl an Versuchen zur Überprüfung und Sicherstellung bestmöglicher Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit der Versuche.⁴⁴

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Vielzahl an Prüfkörpern der Typen ideale bzw. reale Leckagen hergestellt und untersucht. Dennoch ist die Auswahl der betrachteten Leckagegeometrien eingeschränkt. Dies betrifft vor allem den Bereich der realen Leckagen, da hier nahezu eine unendliche Anzahl an Leckagegeometrien denkbar ist. Durch die Fokussierung auf Verschraubungen und Schlauchleckagen sollte neben eher theoretischen auch reale Fälle abgedeckt werden.

8.2 Leckagequantifizierung mittels Ultraschall

Im dritten Forschungsschwerpunkt der Arbeit ging es um die Untersuchung, inwiefern sich die Messung und Auswertung eines (Ultra-) Schallsignals einer Leckage eignet, um den tatsächlichen Leckagestrom zu bestimmen. Hierbei sollten die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- Ist die Quantifizierung einer Druckluftleckage durch Analyse des (Ultra-) Schallsignals möglich?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Schallsignal und dem Leckagestrom und welche Genauigkeiten können bei der Quantifizierung erreicht werden?

Die in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass sich der Leckagestrom einer Druckluftleckagestelle anhand des emittierten Schallsignals näherungsweise bestimmen lässt. Die entwickelte Korrelation setzt den maximalen Schalldruckpegel⁴⁵ bei einer Ultraschallfrequenz von 40 kHz in Relation zum Leckagestrom. Der Schalldruckpegel steigt mit steigendem Leckagestrom an und wird über ein Mikrofon gemessen. Dieses besitzt jedoch einen hardwarebedingten Messbereich. Wird der Messbereich des Mikrofons erreicht, so kann keine weitere Steigerung des Schalldruckpegels erfasst werden. Folglich kann bei Überschreitung eines gewissen Grenzwerts, für diese Arbeit circa 82 dB bei 40 kHz, keine verlässliche Quantifizierung des Leckagestroms erfolgen. Dies entspricht, bei einem Messabstand von 20 cm, in etwa einem Leckagestrom von 100 l_N/min.

Die Höhe des Schalldruckpegels ist jedoch nicht ausschließlich vom Leckagestrom abhängig. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Leckagegeometrie die Höhe des Schalldruckpegels beeinflusst. Durch die Erweiterung der Korrelation zu Berücksichtigung des Messab-

⁴⁴ Mit den zusätzlichen Versuchen wurden folgende Themen abgedeckt: Reproduzierbarkeit der Prüfkörperfertigung, Reproduzierbarkeit der Prüfstandregelung, Reproduzierbarkeit der Messungen, Dichtheitsprüfung des Prüfstands. Die Versuche sind in Kapitel 5.1.3 (S. 62) ausführlicher dargestellt.

⁴⁵ Mit „maximaler Schalldruckpegel“ wird hier der maximal gemessene Schalldruckpegel auf einer horizontalen Halbkreisbahn um die Leckagestelle bezeichnet. Die genaue Ermittlung ist in Kapitel 7.2.2 (S. 128) im Detail erläutert.

stands, sowie der Einführung des Leckagegeometriefaktors, wurde die Genauigkeit der Bestimmung verbessert. Auf Basis von 267 Messungen an unterschiedlichen Leckagen, konnte gezeigt werden, dass sich in 90 % der betrachteten Fälle, die Leckageströme mit einer Abweichung von kleiner ± 42 % mit der entwickelten Korrelation ermitteln lassen.

Um die Ergebnisse zu validieren, wurden 16 neue Prüfkörper gefertigt und vermessen. In der Auswertung hat sich gezeigt, dass die Verwendung und Werte der ermittelten Leckagegeometriefaktoren, mit Ausnahme von Leckagen des Typs Verschraubungen, bestätigt werden konnte. Die Leckagegeometrie „Verschraubungen“ ist zu inhomogen, um durch einen einzelnen Leckagegeometriefaktor beschrieben zu werden. Eine Quantifizierung ist mit verminderter Genauigkeit im Vergleich zu den anderen Prüfkörpern dennoch möglich.

Insgesamt, inklusive der Betrachtung von Verschraubungen, weichen 71 % der via Ultraschallsignal ermittelten Leckageströme um weniger als ± 40 % vom gemessenen Leckagestrom des Prüfkörpers ab (Basis: 129 Messungen). Werden die Verschraubungen von der Auswertung ausgeschlossen, erhöht sich die Anzahl der Messwerte in diesem Intervall auf 89 % (Basis: 76 Messungen).

Die Validierung zeigt, dass eine auf diese Weise durchgeführte Leckagequantifizierung kein hochpräzises Messverfahren mit geringen Toleranzen darstellt. Dennoch ist eine zuverlässige Aussage zur Höhe eines Leckagestroms möglich.

Einordnung der Ergebnisse

Die Lokalisierung von Druckluftleckagen mittels Ultraschall ist seit über zehn Jahren Stand der Technik. Innerhalb der letzten Jahre haben diverse Hersteller von (Druckluft-) Leckagesuchgeräten eine Anzeige des Leckagestroms in die Geräte implementiert, bzw. eine Tabelle zur Ermittlung des Leckagestroms anhand des Schalldruckpegels beigelegt.⁴⁶ In den allermeisten kommerziellen Produkten wird der Schalldruckpegel einer Ultraschallfrequenz, z.B. 40 kHz in Bezug zum Leckagestrom gesetzt. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Schallsignal von Druckluftleckagen nicht ausschließlich vom Leckagestrom, sondern zusätzlich von der Leckagegeometrie beeinflusst wird. Eine Quantifizierung, die lediglich auf der Auswertung eines Schallpegels beruht, muss folglich eine stark eingeschränkte Genauigkeit im Ergebnis aufweisen.

Zudem ist unbekannt, auf welcher Basis die in den kommerziellen Produkten hinterlegten Trendfunktionen, entwickelt wurde. Die meisten Hersteller von (Druckluft-) Leckagesuchgeräten sind kleine und mittelständische Unternehmen, so dass die Vermutung nahe liegt, dass

⁴⁶ Im Regelfall wird in der Bedienungsanleitung des Gerät eine Vorgehensweise zur Leckagequantifizierung beschrieben. Diese besteht im Regelfall aus der Nennung eines Abstands der eingehalten werden sollte und dem Auftrag das Maximum des Schallpegels durch „Abfahren“ der Leckage zu lokalisieren.

die Trendfunktion nur an einer geringen Anzahl von unterschiedlichen Prüfkörpern und Messungen entwickelt wurde. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass für eine möglichst genaue Quantifizierung von Druckluftleckagen mittels Ultraschall, eine Vielzahl an Messungen an unterschiedlichen Prüfkörpern bzw. Leckagegeometrien benötigt wird.

Auch das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Leckagequantifizierung steht noch am Anfang der Entwicklung zu einem verlässlichen und präzisen Messverfahren. Im aktuellen Status der Entwicklung empfiehlt sich die Einteilung des Leckagestroms in ein nach Höhe des Leckagestroms geordnetes Klassifizierungssystem. Ein Vorschlag für eine solche Klassifizierung ist in Abb. 8-1 dargestellt. Neben einer Zuordnung des Leckagestroms in die einzelnen Klassen, wird auch der Handlungsbedarf an der jeweiligen Druckluftleckage bewertet. Zusätzlich kann bei bekannten Stromkosten und Effizienz der Druckluftbereitstellung (Druckluftherzeugung + Druckluftaufbereitung) eine Berechnung der jährlichen Stromkosten⁴⁷ der jeweiligen Leckageklasse erfolgen.

Klasse	Leckagestrom	Jährliche Stromkosten	Bezeichnung	Handlungsbedarf
1	< 1 l _N /min	< 10 €/a	Sehr kleine Leckage	★
2	< 5 l _N /min	< 51 €/a	Kleine Leckage	★★
3	< 10 l _N /min	< 101 €/a	Mittlere Leckage	★★★
4	< 20 l _N /min	< 202 €/a	Mittelgroße Leckage	★★★★
5	< 40 l _N /min	< 405 €/a	Große Leckage	★★★★★
6	≥ 40 l _N /min	≥ 405 €/a	Sehr große Leckage	★★★★★

Abb. 8-1: Vorschlag für ein Klassifizierungssystem von Druckluftleckagen

⁴⁷ Annahmen für die Berechnung:

Energiebedarf der Druckluftbereitstellung: 110 Wh/m_N³ (≅ 6,6 kW/(m³/min)). Strompreis: 17,5 Ct/kWh. Jährliche „Betriebsstunden“ der Leckage: 8760 h/a.

8.3 Zukünftige Weiterentwicklungsansätze zur indirekten Leckagequantifizierung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur indirekten Leckagequantifizierung über das Schallsignal entwickelt und in Bezug auf den Messabstand zur Leckage, sowie die untersuchte Leckagegeometrie erweitert. Die Entwicklung eines verlässlichen und präzisen Verfahrens für die Praxis steht jedoch noch am Anfang. Bei der Durchführung der Messungen, sowie der anschließenden Datenanalyse, wurden Ideen für die Weiterentwicklung des Verfahrens entwickelt, die zukünftig verfolgt werden können.

In der Arbeit wurde der Leckagegeometriefaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Schalldruckpegel verschiedener Leckagen, bei gleichem Leckagestrom, eingeführt. Dieser Ansatz kann um neue Bauteile/Leckagegeometrien ergänzt werden, was die Anwendbarkeit der aufgestellten Korrelationen erhöht. Denkbar ist zudem die Untersuchung realer, in der Praxis gefundener Bauteile mit Leckagen. Diese könnten, z.B. durch einen Servicepartner im Rahmen von Wartungsarbeiten im Betrieb ausgetauscht und anschließend zur Untersuchung im Labor zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiterer Entwicklungsansatz ist die Auswertung zusätzlicher Ultraschallfrequenzen. Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur indirekten Leckagequantifizierung verwendet den maximalen Schalldruckpegel bei einer Frequenz von 40 kHz, die Auswertungen der Messergebnisse haben jedoch gezeigt, dass auch bei höheren Frequenzen von 70 bis zu 100 kHz Schalldruckpegel in vergleichbarer Höhe existieren. Durch die Berücksichtigung weiterer Frequenzen in der Auswertung, könnte ggf. die Qualität und Zuverlässigkeit der Leckagequantifizierung erhöht werden.

Für die Auswertung zusätzlicher Ultraschallfrequenzen muss jedoch die große Anzahl an Messwerten und Kombinationsmöglichkeiten in der Auswertung beachtet werden. Bei nur einer Messung des Ultraschallsignals einer Druckluftleckage nach dem in dieser Arbeit verwendeten Messprotokoll, werden 3721 Messwerte ermittelt. Diese ergeben sich aus dem jeweiligen Signaldruck von 61 Frequenzblöcken zu je 1 kHz von 40 bis 100 kHz pro vermessenen Winkelschritt zu je 3° (\cong 61 Winkel). Auf Grund der großen Datenmengen empfiehlt sich ggf. die Verwendung von Algorithmen des Maschinellen Lernens zur Lösung des Problems. Zusätzliche Trainingsdaten können durch den automatisierten Prüfstand mit akzeptablem Zeitaufwand ermittelt werden.

Zudem zeigen die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen, dass die Verteilung der Schallintensität auf die einzelnen Frequenzen, nicht für alle Prüfkörper gleich ist. Dieser Einfluss wird für die Frequenz von 40 kHz durch den Leckagegeometriefaktor berücksichtigt. Gegebenenfalls ist es durch die Auswertung einer großen Anzahl an ähnlichen Bauteilen möglich, die Leckagegeometrie anhand der „Ultraschallsignatur“ mittels Mustererkennung zu identifizieren. Auch in diesem Fall empfiehlt sich ein Ansatz des Maschinellen Lernens zur Problemlösung. Beide Ansätze könnten in einem gemeinsamen Maschinellen Lernen-Ansatz zusammenfasst werden.

Alle in dieser Arbeit vorgestellten Schallmessungen fanden in einem Laborraum im Keller am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung statt. Der Raum hat keine besonderen Maßnahmen zur Schallisolierung oder Reduktion der Schallreflexion. Es befinden sich keine zusätzlichen Lärmquellen wie z.B. Maschinenlärm, Leuchtstoffröhren, etc. im Laborraum. Ein Weiterentwicklungsansatz besteht deshalb in der Überprüfung des Verfahrens auf Stabilität der Leckagequantifizierung bei Störgeräuschen, wie z.B. Maschinengeräusche und einer ggf. nötigen Anpassung.

8.4 Schlusswort

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine gute Grundlage zum Verständnis von Druckluftleckagen geschaffen. Der konzipierte und gebaute Prüfstand weist eine hohe Wiederholgenauigkeit auf. Die am Prüfstand verbaute Messtechnik verfügt über eine hohe Messgenauigkeit. Durch die Automatisierung des Prüfstands sind die Voraussetzungen für weiterführende Forschungsaktivitäten im Bereich der Druckluftleckagen gelegt. Ein verlässliches Verfahren zur indirekten Quantifizierung von Druckluftleckagen kann durch die konkrete Bezifferung der Kosten, zur Hebung des großen Einsparpotentials in der Praxis beitragen.

9. Literaturverzeichnis

AGEB 2019.

Rohde, C. (2019): Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=isi_industrie_ghd_18.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2021.

AGEB 2020.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) (2020): Energieverbrauch sinkt auf historisches Tief. Deutliche Auswirkungen der Corona-Pandemie / Anteil fossiler Energien sinkt. Berlin. Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_pressedienst_07_2020.pdf, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Agricola et al. 2005.

Agricola, A.; Radgen, P.; Zelinger, M. (2005): Druckluft effizient Abschlussbericht. Hg. v. VDMA Kompressoren, Druckluft- und Vakuumtechnik. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://www.druckluft-effizient.de/downloads/Abschlussbrochuere-druckluft-effizient.pdf>, zuletzt geprüft am 10.02.2021.

Baehr und Kabelac 2012.

Baehr, H. Dieter; Kabelac, S. (2012): Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. 15. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher). ISBN: 9783642241604. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=968264>.

Baetz et al. 2009.

Baetz, W.; Kroll, A.; Bonow, G.; IEEE International Conference on Robotics and Automation; ICRA (2009): IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA '09 ; Kobe, Japan, 12 - 17 May 2009. Kobe, Japan: IEEE. ISBN: 9781424427888. Online verfügbar unter <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5076472>.

Baetz et al. 2010.

Baetz, W.; Kroll, A.; Soldan, S. (2010): On Gas Leak Detection of Pressurised Components by Using Thermograms and Pattern Recognition Algorithms. In: 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components.

Batzias et al. 2011.

Batzias, F. A.; Siontorou, C. G.; Spanidis, P.-M. P. (2011): Designing a reliable leak bio-detection system for natural gas pipelines. In: Journal of hazardous materials 186 (1), S. 35–58. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.09.115.

Beko 2017.

BEKO TECHNOLOGIES GmbH (Beko) (2017): Datenblatt Metpoint DPM. Neuss. Online verfügbar unter <https://www.beko-technologies.com/de/de/produkte/messtechnik/sensortechnik/metpoint-dpm-drucktaupunktmessung/>, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

BMWi 2016a.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016): Grünbuch Energieeffizienz. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/gruenbuch-energieeffizienz-august-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=15, zuletzt geprüft am 17.10.2020.

BMWi 2016b.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016): Impulspapier Strom 2030. Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/impulspapier-strom-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=23, zuletzt geprüft am 17.10.2020.

BMWi 2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Energieeffizienzstrategie 2050. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 17.10.2020.

Bonow et al. 2013.

Bonow, G.; Cramar, L.; Hegenberg, J.; Kroll, A.; Müller, A.; Schmidt, L.; Soldan, S. (2013): Schlussbericht Verbundvorhaben RoboGasInspektor. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A83472569X/>, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

Bosch 2018.

Robert Bosch Power Tools GmbH (Bosch) (2018): UniversalDistance 50 Betriebsanleitung. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.bosch-diy.com/storage/de-de/universaldistance-50-47597-original-pdf-293791-de-de.pdf>, zuletzt geprüft am 07.02.2021.

CS 2016a.

CS INSTRUMENTS GmbH & Co. KG (CS) (2016): Datenblatt Drucksensoren CS. Villingen-Schwenningen. Online verfügbar unter https://www.cs-instruments.com/fileadmin/cs-data/Datenblaetter/Datenbl%C3%A4tter%20-%20DE/Technisches_Datenblatt_Drucksensoren_DE.pdf, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

CS 2016b.

CS INSTRUMENTS GmbH & Co. KG (CS) (2016): Datenblatt Durchflusssensor

VA520. Villingen-Schwenningen. Online verfügbar unter https://www.cs-instruments.com/fileadmin/cs-data/Datenblaetter/Datenbl%C3%A4tter%20-%20DE/Technisches_Datenblatt_VA520_DE.pdf, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

Cushman-Roisin 2019.

Cushman-Roisin, B. (2019): *Environmental Fluid Mechanics*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0471344377.

DIN 1343

DIN 1343:1990-01 (1990): Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte; Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 1945-1

DIN 1945-1:1980-11 (1980): Verdrängerkompressoren; Thermodynamische Abnahme- und Leistungsversuche; Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 2533

DIN ISO 2533:1979-12 (1979): Normatmosphäre; Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 66001

DIN 66001:1983-12 (1983): Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung; Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Dudić et al. 2012a.

Dudić, S.; Ignjatovic, I.; Seslija, D.; Blagojevic, V.; Stojiljkovic, M. (2012): Leakage quantification of compressed air on pipes using thermovision. In: *Thermal Science* 16 (suppl. 2), S. 555–565. DOI: 10.2298/TSCI120503191D.

Dudić et al. 2012b.

Dudić, S.; Ignjatović, I.; Šešlija, D.; Blagojević, V.; Stojiljković, M. (2012): Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography. In: *Measurement* 45 (7), S. 1689–1694. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.04.019.

Eco Fair 2016.

Eco Fair (2016): *Efficient Compressed Air Systems*. Online verfügbar unter <https://www.yumpu.com/en/document/read/49745216/efficient-compressed-air-systems-eco-fair>, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

EGIG 2018.

EGIG (2018): *Gas Pipeline Incidents. 10th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2016)*. Groningen (Niederlande). Online verfügbar unter [https://www.egig.eu/reports/\\$97/\\$157](https://www.egig.eu/reports/$97/$157), zuletzt geprüft am 14.02.2021.

EnEffAH 2012.

Hülsmann, S.; Köpschall, M.; Neumann, R.; Ohmer, M.; Hobusch, G.; Ruppelt, E. et al.

(2012): EnEffAH. Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik. Hg. v. EnEffAH - Projektkonsortium. Online verfügbar unter https://www.eneffah.de/EnEffAH_Broschuere.pdf, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

Energie Schweiz 2006.

Energie Schweiz (2006): Infoblätter Druckluft - Druckluftleckagen. Hg. v. Bundesamt für Energie Schweiz (BFE). Online verfügbar unter www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_800391399.pdf, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

Eret et al. 2012a.

Eret, P.; Harris, C.; O'Donnell, G.; Meskeel, C. (2012): A practical approach to investigating energy consumption of industrial compressed air systems. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy 226 (1), S. 28–36. DOI: 10.1177/0957650911423173.

Eret et al. 2012b.

Eret, P.; Meskeel, C. (2012): Compressed Air Leak Detection Using Microphone Array Techniques. In: Leveraging Technology for a Sustainable World - Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, S. 347–352. DOI: 10.1007/978-3-642-29069-5_59.

Festo 2014.

Festo (2014): Effizienz@Festo. Esslingen. Online verfügbar unter <https://www.haberkorn.com/kataloge/festo-energieeffizienz/files/assets/common/downloads/publication.pdf>, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

Gedore 2020.

Gedore GmbH (Gedore) (2020): Drehmomentschlüssel TORCOFIX K 4550-10. Online verfügbar unter <https://www.gedore.com/de-de/produkte/drehmomentwerkzeuge/torcofix-k---uk/4549---4550---4551-drehmomentschluessel-torcofix-k-1-850-nm---0,75-630-lbfft/4550-10---7601530>, zuletzt geprüft am 07.02.2021.

Geller 2015.

Geller, W. (2015): Thermodynamik für Maschinenbauer. Grundlagen für die Praxis. 5., erg. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch). ISBN: 978-3-662-44960-8. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44961-5>.

Gernert et al. 2016.

Gernert, J.; Span, R. (2016): EOS–CG: A Helmholtz energy mixture model for humid gases and CCS mixtures. In: The Journal of Chemical Thermodynamics 93, S. 274–293. DOI: 10.1016/j.jct.2015.05.015.

Gewilli 2019.

Gewilli, S. (2019): Experimentelle Analyse multipler Einflussfaktoren auf Druckluftleckagen (Bachelorarbeit). Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Bandnummer 1035.

Holstein et al. 2016.

Holstein; Peter; Barth; Manuela; Probst; Christian (2016): Acoustic methods for leak detection and tightness testing. In: 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016. Online verfügbar unter <https://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we2f5.pdf>, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

ImageJ

Version 1.53e.

Rasband, W. (2019) : National Institute of Health, USA. Bethesda (MD), USA. Online verfügbar unter <https://imagej.nih.gov/ij/>.

ISO 8778

ISO 8778:2003-03 (2003): ISO 8778:2003-03 Fluidtechnik - Norm-Referenzatmosphäre für die Pneumatik; International Organisation for Standardisation: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

LabVIEW 2016

Version 16.0: National Instruments (2016). Austin (TX), USA.

Laur 2019.

Laur, J. (2019): Numerische Simulation einer Leckageströmung (interner Bericht). Hg. v. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Stuttgart.

Leckagetool 2020

Version 1.0. Unger, M. (2020). Internes Tool. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Stuttgart.

Loth et al. 2003.

Loth, J. L.; Morris, G. J.; Palmer, G. M.; Guiler, R.; Mehra, D.; West Virginia University (2003): Technology Assessment of On-Line Acoustic Monitoring for Leaks/Infringements in Underground Natural Gas Transmission Lines. Morgantown (USA). Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/03d5/54e07d4eefe0fc97df8f1b41a06b5d85875a.pdf>, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

Lufft 2021.

G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH (Lufft) (2021): Datenblatt WS300-UMB. Fellbach. Online verfügbar unter <https://www.lufft.com/de-de/produkte/intelligente-wettersensoren-309/ws300-umb-intelligente-wettersensorik-2253/>, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

Mandal 2014.

Mandal, P. Chandra (2014): Gas Leak Detection in Pipelines & Repairing System of Titas Gas. In: Journal of Applied Engineering 2014 (2), S. 23–34. Online verfügbar unter https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/35809774/Leak_Detection-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1628932958&Signature=S91uQD15SvsynxI8sq5I56qFHFQq11Ckk-jAFB8UXkt0jzovxkERWMvpvyk5y5hueUCFUmRw5gLShoVbHjVCKfr7v7hFMioI-

IZRQmGGZSYWglwpPvPZVOKRxuwp1hXNo3KgkqxDUvMkHB7W5fxTNmE6jvL-DrUne~CztH9dJ8YIPF2FVa1-vUKVMVp1AF6Tw6PWgWIF3aOtNXfGs92ePZ3L-DB9AYjWVzYfAkiIutFL0PHXseF8HsLg3JaBF0PgZSiF0KcF6R~yO-sUIBx55QOq2QQ08DJZ38uBXUEPIrp61a82cIO42VjX4o9FYihN-ZyDPCTXjK5Pq~j2WLwEvxVDew__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA, zuletzt geprüft am 14.08.2021.

MATLAB (R2018a)

Version 9.4.0.813654: The MathWorks Inc. (2018). Natick, Massachusetts.

McKane et al. 2010.

McKane, A.; Hasanbeigi, A. (2010): Motor Systems Efficiency Supply Curves. Hg. v. United Nations Industrial Development Organization. Wien (Österreich). Online verfügbar unter https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/resources/unido_-_un-energy_-_2010_-_motor_systems_efficiency_supply_curves_2.pdf, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Meschede 2015.

Meschede, D. (2015): Gerthsen Physik. 25. Auflage. Berlin: Springer Spektrum (Springer-Lehrbuch). ISBN: 9783662459768.

Möser 2010.

Möser, M. (2010): Messtechnik der Akustik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-68086-4.

Murvay et al. 2012.

Murvay, P.-S.; Silea, I. (2012): A survey on gas leak detection and localization techniques. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25 (6), S. 966–973. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.05.010.

Norgren 2011.

Norgren (2011): Energy Saving. The Norgren guide to saving energy in compressed air systems. Fellbach. Online verfügbar unter <http://cdn.norgren.com/pdf/ENERGY.pdf>, zuletzt geprüft am 18.07.2020.

Peper 2019.

Peper, T. (2019): Konzeption, Konstruktion und Fertigung einer automatisiert verstellbaren Mikrofonstativ-Vorrichtung zur Ultraschallklangmessung an Druckluftleckagen (Forschungsarbeit). Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Bandnummer 1010.

Qin und McKane 2007.

Qin, H.; McKane, A. (2007): Improving Energy Efficiency of Compressed Air System Based on System Audit. In: Victor Zhou und Paolo Bertoldi (Hg.): *Conference proceedings / EEMODS'07. Fifth International Conference on Energy Efficiency in Motor*

Driven Systems, Beijing, June, 10 - 13, 2007. International Copper Association; International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems; EEMODS; Dianji Xitong Nengxiao Luntai Huiyi. Beijing: Zhongguo-Shuili-Shuidian-Chubanshe.

Radgen und Blaustein 2001.

Radgen, P.; Blaustein, E. (2001): Compressed air systems in the European Union. Energy, emissions, savings potential and policy actions. Stuttgart: LOG_X. ISBN: 3-932298-16-0.

REFPROP

Version 10.0.

Lemmon, E. W.; Bell, I. H.; Huber, M.L., McLinden, M.O. (2018). Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (NIST Standard Reference Database 23): National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg (MD), USA.

Riegraf 2018.

Riegraf, R. (2018): Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Druckluftleckagemessung (Forschungsarbeit). Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Bandnummer 971.

Sahin 2019.

Sahin, E. (2019): Ermittlung des Einflusses von Leckagegeometrie auf Druckluftleckagen (Bachelorarbeit). Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Bandnummer 998.

Seslija et al. 2011.

Seslija, D.; Ignjatovic, I.; Dudic, S.; Lagod, B. (2011): Potential Energy Savings in Compressed Air Systems in Serbia. In: African Journal of Business Management (Vol. 5(14)), S. 5637–5645.

Sick 2020.

Sick AG (Sick) (2020): Datenblatt Temperatursensor TCT-1AAGE1006MZ. Waldkirch. Online verfügbar unter https://cdn.sick.com/media/pdf/0/30/330/dataSheet_TCT-1AAGE1006MZ_6043218_de.pdf, zuletzt geprüft am 14.02.2021.

Sieger 2019.

Sieger, S. (2019): Experimentelle Untersuchung realer Leckagen zur Quantifizierung von Leckagevolumen in Druckluftsystemen (Studienarbeit). Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Bandnummer 1036.

Sigloch 2017.

Sigloch, H. (2017): Technische Fluidmechanik. 10., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-54466-2. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54467-9>.

Sonotec 2020.

Sonotec GmbH (Sonotec) (2020): Ultraschallprüfgerät Sonaphone. Halle (Saale). Online verfügbar unter https://www.sonotec.de/fileadmin/media/DE/Produkte/Vorbeugende_Instandhaltung/sonaphone_3/fl-sonaphone-de-sonotec.pdf, zuletzt geprüft am 22.10.2020.

Tam et al. 1998.

Tam, C.; Auriault, L. (1998): Mean flow refraction effects on sound radiated from localized sources in a jet. In: *Journal of Fluid Mechanics* 370, S. 149–174. DOI: 10.1017/S0022112098001852.

Toolbox Leckagen

Version v2.2.

Radgen, P. (2006) : Bundesamt für Energie (Schweiz). Online verfügbar unter <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/3019>, zuletzt geprüft am 15.02.2021.

Truckenbrodt 2008.

Truckenbrodt, E. (2008): *Fluidmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. ISBN: 978-3-540-79017-4.

Unger und Radgen 2021 (unpublished).

Unger, M.; Radgen, P. (2021 (unpublished)): Theoretical and Experimental Evaluation of compressed air leakages. Tokio, Japan: Proceedings of the Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS) 2019 (Konferenz vom 17. - 19.09.2019).

Wolstencroft 2008.

Wolstencroft, H. (2008): *Ultrasonic Air Leak Detection: An Investigation to Improve Accuracy of Leak Rate Estimation* (Masterarbeit). The University of Waikato, Hamilton, Neuseeland. Online verfügbar unter <https://researchcommons.waikato.ac.nz/handle/10289/6780>, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

Zhang 1997.

Zhang, J. (1997): Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system. In: *Pipes and Pipelines International* (42), S. 20–26.

Anhang A Zusatz: Theoretische Grundlagen

A-1 Herleitung der Strömungsgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt der Leckage

In Kapitel 3.1.1 wird die Strömungsgeschwindigkeit (c) als Funktion der idealen Gaskonstante (R_{Luft}), dem Isentropenexponent (κ), dem Druckverhältnis aus Druck im Austrittsquerschnitt der Leckage (p_{Aus}) zum Druck der an der Eintrittsseite der Leckage ansteht (p_{Lck}), sowie der Temperatur der Druckluft an der Eintrittsseite der Leckage (T_{Lck}), eingeführt. Die nachfolgende Gleichung (Gl. A-1) ist identisch mit Gl. 3-4 und dient lediglich der Wiederholung, zur vollständigen Darstellung des Sachverhalts.

$$c = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} R_{Luft} T_{Lck} \left(1 - \frac{p_{Aus}}{p_{Lck}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad \text{Gl. A-1}$$

Die Herleitung dieser Gleichung basiert auf dem Energieerhaltungssatz [(Baehr et al. 2012), S. 377]. Die Druckluft muss vor Eintritt in die Leckagestelle und im Austrittsquerschnitt die gleiche Energiemenge enthalten, jedoch kann die Energie umgewandelt werden. Gl. A-2 stellt diesen Zusammenhang dar. Die Formelzeichen mit dem Index 2 beziehen sich auf den Austrittsquerschnitt, Index 1 bezieht sich auf den Zustand vor dem Austritt. Die Summe aus dem Wärmefluss, sowie der technischen Arbeit ist gleich der Summe aus den einzelnen Energieanteilen für die Differenzen in den Strömungsgeschwindigkeiten, den Enthalpien (h) und den Höhenunterschieden (z). Die Leckageströmung wird als adiabat betrachtet, es wird keine technische Arbeit zu- oder abgeführt. Die Summe aus Wärmefluss und technischer Arbeit ist folglich gleich 0. Die Höhe von Eintritts- und Austrittszustand ist gleich, weshalb der letzte Term entfällt.

$$q_{12} + w_{t,12} = \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + h_2 - h_1 + g(z_2 - z_1) \quad \text{Gl. A-2}$$

Der Ausdruck lässt sich hierdurch stark vereinfachen und die Geschwindigkeit im Austrittsquerschnitt wird mit Gl. A-3 beschrieben. Der Anteil durch die Geschwindigkeit im Eintrittszustand ist in den meisten Fällen, im Vergleich zum Anteil durch die Enthalpieänderung (Δh), sehr gering und kann näherungsweise vernachlässigt werden.

$$c = c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2|\Delta h|} \quad \text{Gl. A-3}$$

Unter Annahme einer isentropen Zustandsänderung eines idealen Gases, lässt sich die Enthalpiedifferenz von Gl. A-4 vereinfacht zu Gl. A-5 schreiben. Die isentrope Enthalpiedifferenz (Δh_s) ist somit direkt von der isobaren Wärmekapazität (c_p) und der auftretenden Temperaturdifferenz abhängig. Für ideale Gase und die hier angestrebten Berechnungen ist die isobare Wärmekapazität näherungsweise unabhängig vom herrschenden Druck, sowie der Temperatur und kann als konstant angenommen werden.

$$dh = T ds + v dp \quad \text{Gl. A-4}$$

$$\Delta h_s = \int_{p_1}^{p_2} v dp = v(p_2 - p_1) = c_p(T_2 - T_1) \quad \text{Gl. A-5}$$

Für ein ideales Gas gilt der in Gl. A-6 gezeigte Zusammenhang der spezifischen, isobaren Wärmekapazität (c_p), dem Isentropenexponent (κ) und der spezifischen Gaskonstante der Luft (R_{Luft}).

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_{Luft} \quad \text{Gl. A-6}$$

Die Zusammenführung der Gleichungen, sowie die Vernachlässigung des Geschwindigkeitsanteils auf der Eintrittsseite ergibt Gl. A-7. Die Expansion der Druckluft am Austritt der Leckage, führt zu einer Abkühlung der Druckluft, folglich kann durch die Umkehrung des Vorzeichens auf die Betragsstriche bei der Temperaturdifferenz verzichtet werden. Die Temperatur T_{Lck} entspricht der Systemtemperatur der Druckluft. T_{Aus} muss individuell berechnet werden, hierauf wird in Kapitel 3.1.1 vertieft eingegangen. Durch Einsetzen von T_{Aus} (nach Gl. 3-5, S. 28) und Ausklammern von T_{Lck} erhält man Gl. A-8, welche der herzuleitenden Gleichung (Gl. 3-4) entspricht.

$$c = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_{Luft} (T_{Lck} - T_{Aus})} \quad \text{Gl. A-7}$$

$$c = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_{Luft} T_{Lck} \left(1 - \left(\frac{p_{Aus}}{p_{Lck}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)} \quad \text{Gl. A-8}$$

A-2 Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt der Leckage bei kritischen Druckverhältnissen

In Kapitel 3.1.1 wird eine vereinfachte Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit (c) bei kritischen Druckverhältnissen im Austrittsquerschnitt der Leckage gezeigt (vgl. Gl. 3-7). Die Strömungsgeschwindigkeit ist bei kritischen Druckverhältnissen lediglich eine Funktion der idealen Gaskonstante (R_{Luft}) und des Isentropenexponenten (κ). Die nachfolgende Gleichung (Gl. A-9) ist identisch mit Gl. 3-7 und dient lediglich der Wiederholung, zur vollständigen Darstellung des Sachverhalts

$$c = \sqrt{\kappa R_{Luft} T_{Aus}} \quad \text{Gl. A-9}$$

Die Herleitung der Gleichung basiert auf der, im vorangegangenen Abschnitt gezeigten Gleichung (Gl. A-8) zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt einer Leckage in Abhängigkeit des Austritts- (p_{Aus}) und Leckagedrucks (p_{Lck}). Der Austrittsdruck an einer Druckluftleckage kann bei kritischen Druckverhältnissen als Funktion des Leckagedrucks und des Isentropenexponenten beschrieben werden (vgl. Gl. 3-6, S. 28). Zur vollständigen Darstellung des Sachverhalts ist die Gleichung nachstehend aufgeführt (vgl. Gl. A-10).

$$p_{Aus} = p_{krit.} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} p_{Lck} \quad \text{Gl. A-10}$$

Durch Einsetzen von Gl. A-10 in Gl. A-8, erhält man Gl. A-11, welche mathematisch weiter vereinfacht werden kann.

$$c = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_{Luft} T_{Aus} \left[\left(\frac{\left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} p_{Lck}}{p_{Lck}} \right)^{\frac{1 - \kappa}{\kappa}} - 1 \right]} \quad \text{Gl. A-11}$$

In einem ersten Schritt kann der Ausdruck in der Klammer durch Kürzen des Leckagedrucks, sowie der Verrechnung der Potenzen, zu Gl. A-12 vereinfacht werden.

$$c = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_{Luft} T_{Aus} \left[\frac{\kappa + 1}{2} - 1 \right]} \quad \text{Gl. A-12}$$

Die Gleichung kann durch die Auflösung der Klammer, sowie weiteren mathematischen Umformungen schließlich zu Gl. A-9 vereinfacht werden. Die zentralen Umformungsschritte, sowie die finale Gleichung sind in Gl. A-13 aufgeführt.

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{\left(\frac{(2\kappa)(\kappa+1)}{(\kappa-1)(2)} - \frac{2\kappa}{\kappa-1}\right) R_{Luft} T_{Aus}} = \sqrt{\left(\frac{2\kappa^2 + 2\kappa - 4\kappa}{2(\kappa-1)}\right) R_{Luft} T_{Aus}} \\ &= \sqrt{\left(\frac{2\kappa(\kappa-1)}{2(\kappa-1)}\right) R_{Luft} T_{Aus}} = \sqrt{\kappa R_{Luft} T_{Aus}} \end{aligned} \quad \text{Gl. A-13}$$

Anhang B Ergänzung zu Versuchstand und Messtechnik

B-1 Datenblätter der verwendeten Messgeräte

Abb. B - 1 bis Abb. B - 6 sind die Datenblätter der verwendeten Messgeräte.

2. Anwendungsbereiche:

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



max. 50 Nm

3. Technische Daten:

Messstoffberührte Bauteile:	316L
Gehäuse:	316L
Nichtlinearität:	0,5 BFSL
Einheit:	bar
Druckart:	relativ, absolut, Vakuum
Messbereich:	0...16 bar, 32 bar Überlast-Druckgrenze
Prozessanschluss:	G 1/4A nach DIN 3852-E
Dichtung:	NBR
zulässige Messstofftemperatur:	0...+80 °C
Ausgangssignal:	4...20 mA, 2-Leiter
Hilfsenergie:	8...30 VDC
Genauigkeit bei Raumtemperatur:	≤ ±1 % der Spanne (optional ≤ ±0,5 % der Spanne)
Elektrischer Anschluss:	Winkelstecker DIN EN 175301-803 A, Schutzart IP 65, Aderquerschnitt bis max. 1,5 mm², Kabeldurchmesser: 6...8 mm

Abb. B - 1: Datenblatt Drucksensor CS10 (Ausschnitt) (CS INSTRUMENTS GmbH & Co. KG 2016a)

Technische Daten

WS300-UMB Intelligente Wettersensoren



Schnittstelle	RS485, 2-Draht, halbduplex
Spannungsversorgung	4...32 VDC
Spannungsversorgung	5...11 VDC (Betrieb mit eingeschränkte Messgenauigkeit)
Spannungsversorgung	24 VDC +/- 10%
Leistungsaufnahme	135mA bei 24VDC, ergibt eine Leistung von ca. 3.25W
zul. Betriebstemperatur	50 ... 60°C
zul. rel. Feuchte	0...100% r.F.
Kabellänge	10m
Schutzart Gehäuse	IP66
Masthalterung passend für	Mastdurchmesser 60 - 76mm

Temperatur	
Prinzip	NTC
Messbereich	-50 ... 60 °C
Einheit	°C
Genauigkeit	±0,2°C (-20...50°C), sonst ±0,5°C (>-30°C)

Rel. Feuchte	
Prinzip	kapazitiv
Messbereich	0 ... 100 % r.F.
Einheit	% r.F.
Genauigkeit	±2% r.F.

Luftdruck	
Prinzip	MEMS kapazitiv
Messbereich	300 ... 1200 hPa
Einheit	hPa
Genauigkeit	±0,5 hPa (0...40°C)

Seite 2

Technische Änderungen und Irrtümer vorbehalten - Erstellt 29.03.2020
G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH Fellbach, Deutschland



Abb. B - 2: Datenblatt Wetterstation WS-300-UMB (Ausschnitt) (Lufft 2021)

Messbereiche Durchfluss VA 520 (Max-Version 185 m/s) für Druckluft (ISO 1217:1000 mbar, 20 °C) Messbereich für andere Gase siehe Seite 94 bis 97									
Anschlussgewinde	AD Rohr mm	ID Rohr mm	Messbereichsendwerte		L mm	L1 mm	H mm	H1 mm	A mm
			m ³ /h	cfm					
R 1/4"	13,7	8,9	105 l/min	3,6	194	137	174,7	165,7	15
R 1/2"	21,3	16,1	90	50	300	210	176,4	165,7	20
R 3/4"	26,9	21,7	175	100	475	275	179,2	165,7	20
R 1"	33,7	27,3	290	170	475	275	182,6	165,7	25
R 1 1/4"	42,4	36,0	530	310	475	275	186,9	165,7	25
R 1 1/2"	48,3	41,9	730	430	475*	275	186,9	165,7	25
R 2"	60,3	53,1	1195	700	475*	275	195,9	165,7	30

*Achtung: Verkürzte Einlaufstrecke. Bauseits auf empfohlene Mindesteinlaufstrecke (Länge = 15 x Innendurchmesser) achten!

BESCHREIBUNG	BESTELL-NR. Edelstahl 1.4571	BESTELL-NR. Edelstahl 1.4301	TECHNISCHE DATEN VA 520
VA 520 Verbrauchszähler mit 1/4" Messstrecke	0695 1520	0695 0520	Messgrößen: m ³ /h, l/min (1000 mbar, 20°C) bei Druckluft bzw. Nm ³ /h, NI/min (1013 mbar, 0°C) bei Gasen
VA 520 Verbrauchszähler mit 1/2" Messstrecke	0695 1521	0695 0521	Einheiten über Tastatur am Display einstellbar: m ³ /h, m ³ /min, l/min, l/s, ft ³ /min, cfm, m/s, kg/h, kg/min, g/s, lb/min, lb/h
VA 520 Verbrauchszähler mit 3/4" Messstrecke	0695 1522	0695 0522	Sensor: Thermischer Massenstromsensor
VA 520 Verbrauchszähler mit 1" Messstrecke	0695 1523	0695 0523	Messmedium: Luft, Gase
VA 520 Verbrauchszähler mit 1 1/4" Messstrecke	0695 1526	0695 0526	Gasarten über CS Service Software oder CS Datenlogger einstellbar: Luft, Stickstoff, Argon, CO ₂ , Sauerstoff
VA 520 Verbrauchszähler mit 1 1/2" Messstrecke	0695 1524	0695 0524	Messbereich: Siehe Tabelle oben
VA 520 Verbrauchszähler mit 2" Messstrecke	0695 1525	0695 0525	Genauigkeit: ± 1,5 % v. M. ± 0,3 % v. E. auf Wunsch: (v. M. = vom Meswert) (v. E. = vom Endwert) ± 1 % v. M. ± 0,3 % v. E.
Bi-Direktionale Messung - beinhaltet 2x4...20 mA Analogausgänge und 2x Impulsausgänge. Diese entfallen bei Ethernet (PoE) und M-Bus		Z695 6000	Einsatztemp.: -30...80 °C
Hochdruckversion PN 40		Z695 0411	Betriebsdruck: -1 bis 16 bar optional bis PN 40
NPT-Gewinde (anstelle R-Gewinde) - nur bestellbar bei Edelstahl 1.4571	Z695 5015		Digitalausgang: RS 485 Schnittstelle, (Modbus-RTU), optional: Ethernet-Interface (PoE), M-Bus
Messbereiche:			Analogausgang: 4...20 mA für m ³ /h bzw. l/min
Low-Speed (50 m/s)		Z695 0520	Impulsausgang: 1 Impuls pro m ³ bzw. pro Liter galvanisch isoliert. Impulswertigkeit am Display einstellbar. Alternativ ist der Impulsausgang als Alarmrelais nutzbar
Standard (92,7 m/s)		Z695 0521	Versorgung: 18...36 VDC, 5 W
High-Speed (224 m/s)		Z695 0522	Bürde: < 500 Ω
Optionen:			Gehäuse: Polycarbonat (IP 65)
Sondermessbereich für VA 520 nach Kundenwunsch		Z695 4006	Messstrecke: Edelstahl, 1.4301 oder 1.4571
1 % Genauigkeit v. M. ± 0,3 % v. E.		Z695 5005	Anschlussgewinde der Messstrecken R 1/4" bis R 2" (BSP British Standard Piping) bzw. 1/2" bis 2" NPT-Gewinde
Ethernet-Interface für VA 500/520 und FA 500		Z695 5006	Einbaulage: beliebig
Ethernet-Interface PoE für VA 500/520 und FA 500		Z695 5007	
M-Bus Platine für VA 500/520 und FA 500		Z695 5004	
ISO-Kalibrierzertifikat (5 Kalibrierpunkte) für VA Sensoren		3200 0001	
Gasart: ___ (Gasart bei Bestellung angeben)		Z695 5009	
Gasgemisch: ___ (Gasgemisch bei Bestellung angeben)		Z695 5010	
Echtgasabgleich		3200 0015	
Spezielle Reinigung öl- und fettfrei (z. B. Sauerstoffanwendung)		0699 4005	
LABS- und Silikonfreie Ausführung inkl. Reinigung öl- und fettfrei		0699 4007	
Zusätzliche Kalibrierkurve im Sensor hinterlegt (über Display wählbar)		Z695 5011	
Ursprungszeugnis		Z695 5012	

Weiteres Zubehör siehe Seite 82 bis 86

Abb. B - 3: Datenblatt Volumenstromsensor VA520 (CS INSTRUMENTS GmbH & Co. KG 2016b)

Technische Daten METPOINT® DPM

Messbereich	-60 ... +30 °Ctd
Max. zulässiger Betriebsüberdruck	50 bar [ü]
Max. Messabweichung	± 4 K für -60 ... -50 °Ctd ± 3 K für -50 ... -30 °Ctd ± 2 K für -30 ... -10 °Ctd ± 1 K für -10 ... +30 °Ctd
Ansprechzeit t95	< 10 Sek. (von trocken nach feucht) < 40 Sek. (von feucht nach trocken)
Ausgangssignal	4 ... 20 mA, Analog, 4-Leiter (0 ... 10 V, Analog, 4-Leiter als Sonderanfertigung) RS485, Digitalausgang, 4-Leiter
Prozessmedium-Temperatur	-30 °C ... +70 °C
Umgebungstemperatur im Betrieb	-25 °C ... +60 °C
Lager- und Transporttemperatur	40 °C ... +85 °C
Umgebungsfeuchte	0 ... 95 %, nicht kondensierend

Abb. B - 4: Datenblatt Feuchtesensor Metpoint DPM (Ausschnitt) (Beko 2017)

LUFTSCHALLSENSOR BS10

Ausführung	Sensor zur Messung von Luftultraschallsignalen, inkl. Ziellaser und LED-Leuchte
Bedienung	Über Tasten am Sensor oder am Gerät Tasten: Messung starten/stoppen Laser LED-Leuchte Lautstärke
Maße (B x H x T)	30 x 155 x 30 mm
Gewicht	80 g
Temperaturbereiche	Lagertemperatur: -20 bis +60 °C Betriebstemperatur: -10 bis +40 °C
Schutzart	IP40
Breitbandiger Frequenzbereich	20 bis 100 kHz (Simultanerfassung)
Messauflösung	1 dB
Stromanschluss	Kabelverbindung mit dem SONAPHONE Länge Spiralkabel: 160 cm
Zubehör	Zur Erhöhung der akustischen Signalstärke: Kleines akustisches Horn für den Nahbereich, großes akustisches Horn für größere Entfernungen, Feinsucher

Abb. B - 5: Datenblatt Ultraschallmikrofon BS10 (Ausschnitt) (Sonotec 2020)

TCT-1AAGE1006MZ | TCT TEMPERATURSENSOREN



Abbildung kann abweichen



Bestellinformationen

Typ	Artikelnr.
TCT-1AAGE1006MZ	6043218

Weitere Geräteausführungen und Zubehör → www.sick.com/TCT

Technische Daten im Detail

Merkmale

Messbereich	-50 °C +150 °C
Messelement	Pt100
Analoges Ausgangssignal und zulässige Bürde R_A	4 mA ... 20 mA, 2-Leiter (R _A ≤ (L ⁺ - 9 V) / 0,023 A [Ohm])

Mechanik/Elektrik

Prozessanschluss	Gewinde G ½ B
Einbaulänge/Durchmesser des Messfühlers	100 mm / 6 mm
Medienberührende Werkstoffe	Edelstahl 1.4571
Druckbelastbarkeit	Max. 120 bar
Gehäusematerial	Edelstahl 1.4571
Elektrischer Anschluss	Rundsteckverbinder M12 x 1, 4-polig, IP67 ¹⁾
Messstrom	0,3 mA ... 1 mA
Versorgungsspannung	10 V DC ... 36 V DC
Maximale Stromaufnahme	Ca. 30 mA
Elektrische Sicherheit	Schutzklasse: III, Isolationsspannung: 500 V, Verpolungsschutz: L+ gegen M
Schutzklasse III	✓
RoHS-Zertifikat	✓
Gewicht	Ca. 145 g (je nach Ausführung)
Initialisierungszeit	< 10 ms

¹⁾ Schutzart IP nach IEC 60529. Die angegebenen Schutzarten gelten nur im gesteckten Zustand mit Leitungssteckern entsprechender Schutzart.

Performance

Genauigkeit des Messelements	Klasse A nach IEC 60751
Genauigkeit des Messumformers	≤ ± 1,0 % der Spanne
Linearität des Messumformers	≤ 0,1 % der Spanne
Ansprechzeit	T ₅₀ : ≤ 2,8 s ¹⁾ t ₉₀ : ≤ 9,1 s ¹⁾

¹⁾ Abhängig von der Sensorkonfiguration, nach IEC 60751.

Abb. B - 6: Datenblatt Temperatursensor TCT-1AAGE1006MZ (Ausschnitt) (Sick 2020)

B-2 Kalibrierzertifikat des Volumenstrommessgeräts

Abb. B - 7 bis Abb. B - 10 enthalten die Kalibrierdaten der verwendeten Messdüsen. Die relative Messabweichung im jeweiligen unteren Messbereich der Messdüse leicht erhöht.

Messergebnisse

Absolutdruck PAp, Temperatur Tp und Feuchte Hp wurden am Eingang des Prüflings gemessen.

Qs	Qp	PAp	Tp	Hp	ABW		MU
L/min	L/min	mbar	°C	%	L/min	%vM	L/min
0,00	0,00	982,6	22,4	20,3			
47,65	48,39	983,5	22,4	20,2	0,74	1,55	0,12
75,51	75,76	984,6	22,3	20,2	0,25	0,33	0,20
166,35	165,86	991,5	22,2	20,1	-0,49	-0,29	0,43
268,90	267,79	1003,9	22,2	20,2	-1,11	-0,41	0,70
394,24	392,70	1026,6	22,1	20,1	-1,54	-0,39	1,0
599,82	596,64	1081,6	22,1	20,0	-3,18	-0,53	1,6
800,10	794,89	1159,8	22,0	20,1	-5,21	-0,65	2,1
1005,83	998,05	1272,6	22,2	20,3	-7,78	-0,77	2,6

Verwendete Bezeichner und Referenznormale

Qs Normvolumenstrom des Normals für die folgenden Normbedingungen:
 Absolutdruck: 1013,25 mbar, Temperatur: 20,00 °C, Feuchte: 0,0 % rF
 Q Air, DKZ Drehkolbengaszähler G100 DELTA S1 Flow, SerNo: 3400774470

Qp Normvolumenstrom des Prüflings

PAp Absolutdruck, max. erweiterte MU: 5 mbar

Tp Temperatur, max. erweiterte MU: 0,2 °C

Hp Relative Feuchte, max. erweiterte MU: 3 %

ABW Abweichung Qp - Qs absolut und in Prozent vom Messwert

MU Erweiterte Messunsicherheit

Die Volumenstromangabe Qp des Prüflings entspricht dem arithmetischen Mittelwert des Anzeigewertes über 60 Sekunden.

Abb. B - 7: Kalibrierdaten der 0,5 Zoll Messdüse

Messergebnisse aus 2 Messreihen

Absolutdruck PAp, Temperatur Tp und Feuchte Hp wurden am Eingang des Prüflings gemessen.

R	Qs	Qp	PAp	Tp	Hp	ABW		MU
	L/min	L/min	mbar	°C	%	L/min	%vM	L/min
1	0,000	0,000	982,8	23,0	21,3			
1	2,510	2,482	986,2	23,0	21,3	-0,028	-1,12	0,0095
1	5,046	5,036	990,4	23,0	21,3	-0,010	-0,20	0,019
1	8,847	8,848	997,7	23,0	21,4	0,001	0,01	0,034
1	12,574	12,587	1006,4	23,0	21,5	0,013	0,10	0,048
2	17,963	17,933	1005,4	23,0	21,8	-0,030	-0,17	0,068
2	25,103	25,099	1025,5	23,1	22,1	-0,004	-0,02	0,095
2	35,132	35,252	1066,7	23,1	23,0	0,120	0,34	0,13
2	45,015	45,154	1125,1	23,1	24,2	0,139	0,31	0,17
2	55,021	55,013	1208,7	23,0	26,0	-0,008	-0,01	0,21

Abb. B - 8: Kalibrierdaten der 2,4 mm Messdüse

Messergebnisse

Absolutdruck PAp, Temperatur Tp und Feuchte Hp wurden am Eingang des Prüflings gemessen.

Qs	Qp	PAp	Tp	Hp	ABW		MU
					L/min	%vM	
0,000	0,000	985,8	23,1	3,0			
0,605	0,597	988,5	23,1	3,0	-0,008	-1,37	0,0023
1,000	0,998	991,6	23,1	3,0	-0,002	-0,21	0,0038
1,616	1,612	998,3	23,1	3,0	-0,004	-0,23	0,0061
2,698	2,700	1015,8	23,1	3,1	0,002	0,08	0,010
3,606	3,606	1035,7	23,1	3,1	0,000	0,00	0,014
5,503	5,406	1075,1	23,1	3,2	-0,097	-1,76	0,021
7,000	6,989	1112,6	23,1	3,3	-0,011	-0,15	0,027
8,518	8,478	1175,5	23,1	3,5	-0,040	-0,47	0,032
10,010	9,951	1267,2	23,1	3,8	-0,059	-0,59	0,038

Abb. B - 9: Kalibrierdaten der 1 mm Messdüse

Messergebnisse

Absolutdruck PAp, Temperatur Tp und Feuchte Hp wurden am Eingang des Prüflings gemessen.

Qs	Qp	PAp	Tp	Hp	ABW		MU
					L/min	%vM	
0,0000	0,000	982,1	23,2	20,5			
0,1050	0,105	984,0	23,2	20,7	0,0000	-0,01	0,00045
0,2155	0,214	987,9	23,2	20,7	-0,0015	-0,68	0,00093
0,4432	0,441	1000,5	23,2	20,9	-0,0022	-0,50	0,0019
0,6386	0,641	1015,8	23,2	21,2	0,0024	0,38	0,0027
1,1076	1,105	1068,1	23,2	22,2	-0,0026	-0,23	0,0048
1,5403	1,542	1138,5	23,2	23,5	0,0017	0,11	0,0066
1,8987	1,900	1212,3	23,2	24,9	0,0013	0,07	0,0082
2,3179	2,312	1318,8	23,2	27,1	-0,0059	-0,26	0,0100

Abb. B - 10: Kalibrierdaten der 0,5 mm Messdüse

B-3 Benutzeroberfläche der Prüfstandssteuerung

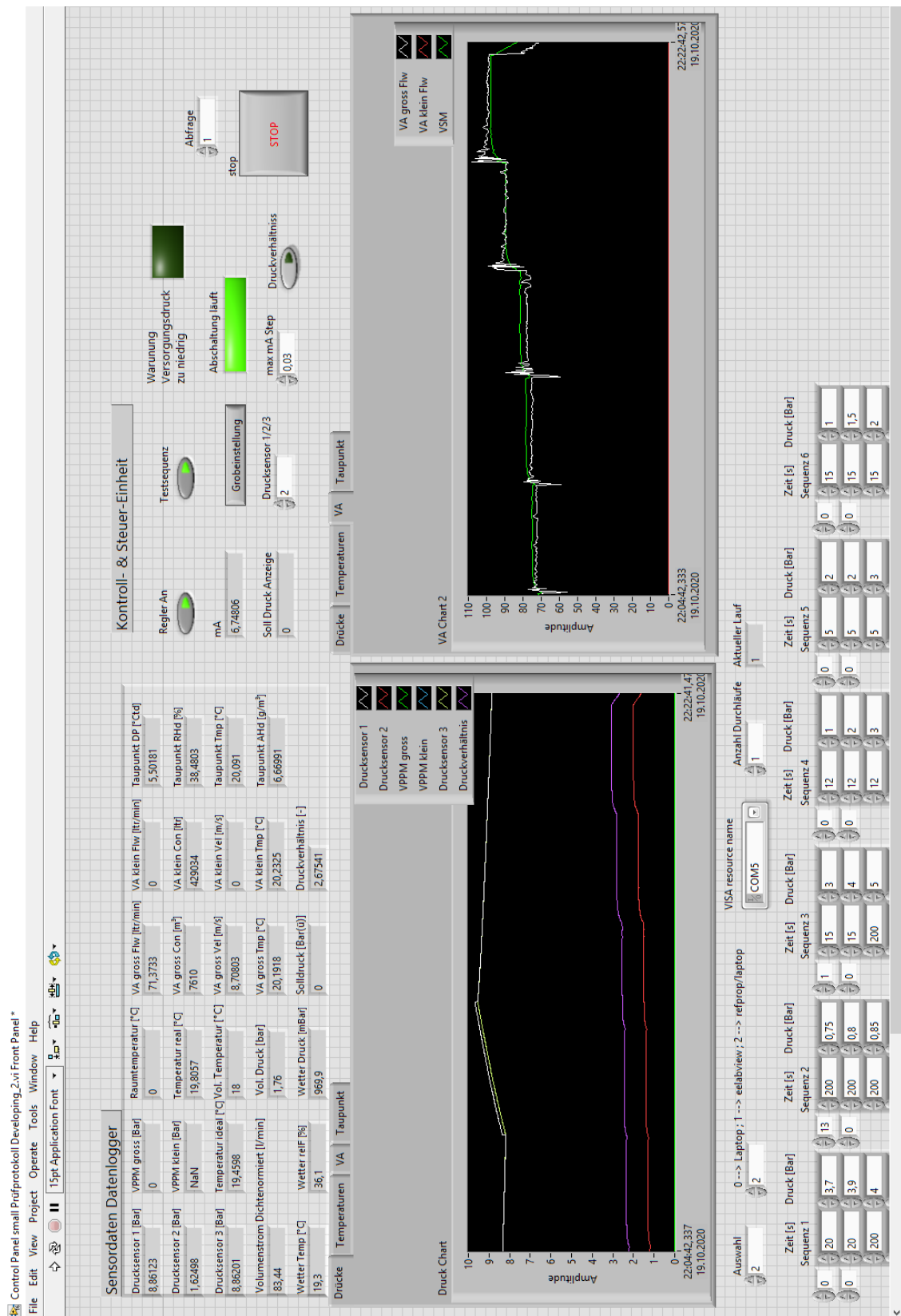


Abb. B - 11: LabView Benutzeroberfläche

Anhang C Zusatz: Optische Flächenvermessung

Um den Messfehler des entwickelten Flächenmessverfahrens zu bestimmen, wurden Präzisionsbohrungen (Reibahle, ISO-Toleranzklasse H7) mit Durchmessern von 2 und 4 mm gefertigt und vermessen (Sahin 2019). Die Abweichungen der Flächen sind in Abb. C - 1 und Abb. C - 2 dargestellt. Der Messfehler steigt erwartungsgemäß mit sinkender Leckagefläche.

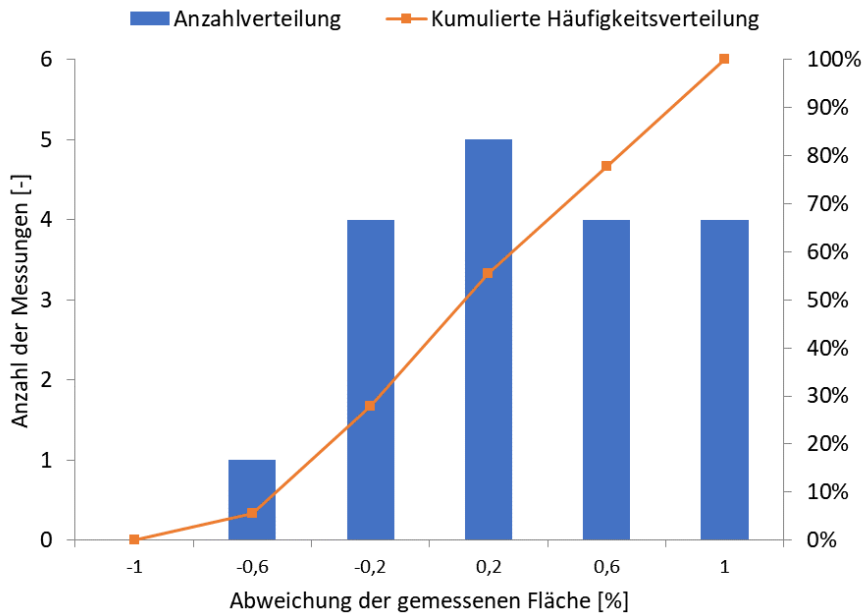


Abb. C - 1: Messfehler durch die optische Flächenbestimmung bei 4 mm Bohrungen, Quelle: (Sahin 2019)

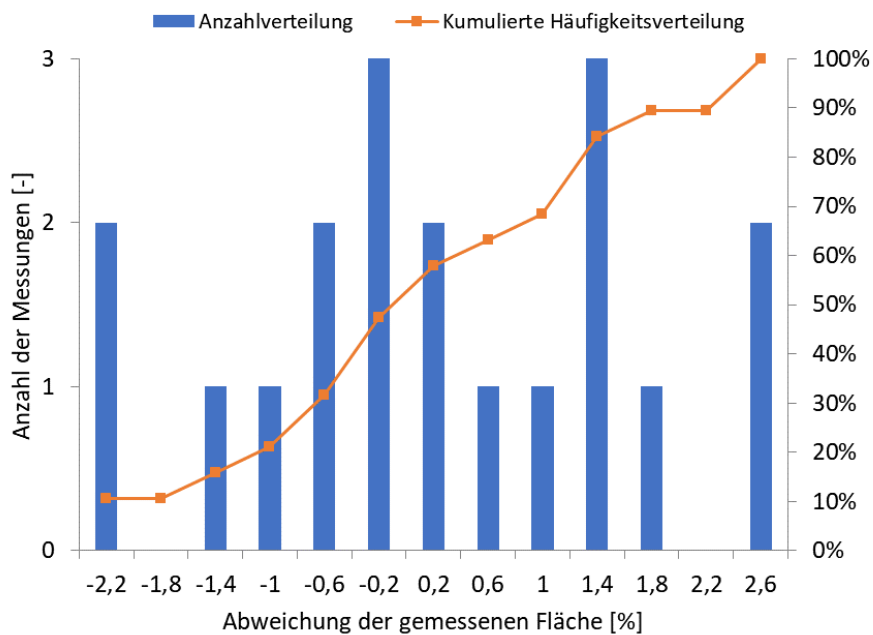


Abb. C - 2: Messfehler durch die optische Flächenbestimmung bei 2 mm Bohrungen, Quelle: (Sahin 2019)

Anhang D Detailanalyse: Leckageströme aller untersuchten idealen Leckagegeometrien

D-1 Kreisrunde ideale Leckagen

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen mit kreisrunder Geometrie aufgeführt (vgl. Tabelle D - 1 bis Tabelle D – 16)

Tabelle D - 1: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-010 (1.0 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	35,37	0,27	0,78
4,50	38,91	0,31	0,78
5,00	42,50	0,45	0,78
5,50	46,09	0,35	0,78
6,00	49,67	0,42	0,79
6,50	53,27	0,39	0,79
7,00	56,86	0,39	0,79
7,50	60,38	0,60	0,79
8,00	64,03	0,40	0,79

Tabelle D - 2: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-015 (1.5 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	87,99	0,12	0,87
4,50	96,48	0,12	0,86
5,00	105,07	0,14	0,86
5,50	113,53	0,16	0,86
6,00	122,03	0,13	0,86
6,50	130,47	0,15	0,86
7,00	138,93	0,14	0,85
7,50	147,36	0,17	0,85
8,00	155,59	0,23	0,85

Tabelle D - 3: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-016 (1.6 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	88,98	1,67	0,77
4,50	97,70	1,52	0,77
5,00	107,40	1,74	0,77
5,50	116,89	1,42	0,78
6,00	126,38	1,84	0,78
6,50	135,56	1,46	0,78
7,00	144,98	1,34	0,78
7,50	154,06	1,49	0,78
8,00	162,75	1,43	0,78

Tabelle D - 4: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-017 (1.7 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	104,62	1,68	0,80
4,50	115,07	1,23	0,80
5,00	125,74	1,25	0,80
5,50	135,96	1,25	0,80
6,00	146,82	1,23	0,80
6,50	157,35	1,31	0,80
7,00	167,82	1,56	0,80
7,50	179,19	1,32	0,81
8,00	190,29	1,50	0,81

Tabelle D - 5: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-018 (1.8 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	114,31	1,58	0,78
4,50	125,14	1,31	0,78
5,00	137,07	1,40	0,78
5,50	149,37	1,33	0,79
6,00	161,40	1,47	0,79
6,50	173,62	1,25	0,79
7,00	186,10	1,33	0,79
7,50	197,90	1,43	0,80
8,00	210,36	1,35	0,80

Tabelle D - 6: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-019 (1.9 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	133,54	1,61	0,82
4,50	147,13	1,35	0,82
5,00	161,23	1,47	0,82
5,50	174,67	1,36	0,82
6,00	188,91	1,69	0,83
6,50	203,48	1,56	0,83
7,00	216,85	1,31	0,83
7,50	230,79	1,33	0,83
8,00	244,88	1,83	0,83

Tabelle D - 7: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-020 (2.0 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	153,17	1,16	0,85
4,50	168,94	1,31	0,85
5,00	184,36	1,15	0,85
5,50	200,82	1,33	0,85
6,00	216,81	1,39	0,86
6,50	232,70	1,32	0,86
7,00	248,72	1,46	0,86
7,50	264,88	1,23	0,86
8,00	280,76	1,33	0,86

Tabelle D - 8: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-025 (2.5 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	231,07	0,87	0,82
4,50	254,81	1,10	0,82
5,00	278,70	1,04	0,82
5,50	302,50	1,04	0,82
6,00	326,24	1,15	0,83
6,50	349,88	1,15	0,83
7,00	373,58	1,29	0,83
7,50	397,16	1,35	0,83
8,00	420,13	1,40	0,83

Tabelle D - 9: Ergebnisse der Leckagegeometrie D-030 (3.0 mm Durchmesser)

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	361,24	2,17	0,89
4,50	398,17	2,22	0,89
5,00	435,44	1,96	0,89
5,50	472,30	1,71	0,89
6,00	509,00	2,19	0,89
6,50	545,33	2,07	0,89
7,00	581,68	2,33	0,89
7,50	618,10	2,74	0,89
8,00	653,67	3,01	0,89

D-2 Ideale Leckagen mit Langlochgeometrie

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen mit Langlochgeometrie aufgeführt (vgl. Tabelle D - 10 bis Tabelle D - 16). Die Standardabweichung einiger Leckagegeometrien ist, im Vergleich zu kreisrunden Leckagen, erhöht. Dies ist auf die größere Fertigungstoleranz zurückzuführen (Fräsen + Nachbearbeitung).

Tabelle D - 10: Ergebnisse der Leckagegeometrie 10-0228

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
5,00	106,71	3,26	0,65
5,50	116,27	3,97	0,66
6,00	125,78	4,21	0,66
6,50	134,35	4,95	0,66
7,00	143,43	4,38	0,66

Tabelle D - 11: Ergebnisse der Leckagegeometrie 08-0300

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
5,00	127,47	10,12	0,66
5,50	138,63	10,62	0,66
6,00	149,20	11,17	0,66
6,50	159,92	11,55	0,66
7,00	171,39	12,65	0,66

Tabelle D - 12: Ergebnisse der Leckagegeometrie 08-0400

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	159,79	4,23	0,74
4,50	175,40	4,36	0,73
5,00	191,06	4,57	0,73
5,50	206,94	4,19	0,73
6,00	223,26	3,99	0,73
6,50	239,49	4,21	0,74
7,00	255,70	4,51	0,74
7,50	271,62	4,76	0,74
8,00	286,93	4,50	0,73

Tabelle D - 13: Ergebnisse der Leckagegeometrie 04-0734

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
5,00	167,46	4,68	0,60
5,50	182,23	5,38	0,61
6,00	196,08	5,70	0,61
6,50	210,71	6,19	0,61
7,00	225,09	6,49	0,61

Tabelle D - 14: Ergebnisse der Leckagegeometrie 20-0300

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
5,00	290,18	0,27	0,73
5,50	315,22	0,38	0,73
6,00	340,04	0,30	0,73
6,50	364,99	0,19	0,74
7,00	389,25	0,36	0,74

Tabelle D - 15: Ergebnisse der Leckagegeometrie 08-0895

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	341,08	0,69	0,73
4,50	376,20	0,67	0,73
5,00	410,91	0,54	0,73
5,50	445,75	0,84	0,73
6,00	480,09	1,00	0,73
6,50	514,72	0,95	0,73
7,00	549,11	1,38	0,73
7,50	582,90	1,65	0,73
8,00	616,42	1,24	0,73

Tabelle D - 16: Ergebnisse der Leckagegeometrie 10-0725

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]	Discharge Coefficient [-]
4,00	368,22	11,14	0,78
4,50	405,81	12,34	0,78
5,00	443,63	13,50	0,78
5,50	481,10	14,42	0,78
6,00	518,32	15,53	0,78
6,50	555,69	16,93	0,78
7,00	593,13	18,04	0,78
7,50	630,54	19,30	0,78
8,00	665,52	19,65	0,78

Anhang E Detailanalyse: Leckageströme aller untersuchten realen Leckagegeometrien

E-1 Verschraubungen ohne Dichtmittel

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen des Typs Verschraubung ohne Dichtmittel für Anzugsmomente von 10 bis 40 Nm aufgeführt (vgl. Tabelle E - 1 bis Tabelle E - 6).

Tabelle E - 1: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-10

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	13,75	2,64
5,50	15,01	2,91
6,00	16,23	3,19
6,50	17,45	3,46
7,00	18,68	3,75

Tabelle E - 2: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-15

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	12,34	3,66
5,50	13,47	4,00
6,00	14,63	4,35
6,50	15,74	4,71
7,00	16,82	5,10

Tabelle E - 3: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-20

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	10,70	3,52
5,50	11,66	3,82
6,00	12,62	4,18
6,50	13,61	4,52
7,00	14,60	4,87

Tabelle E - 4: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-25

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	8,89	3,29
5,50	9,68	3,57
6,00	10,50	3,88
6,50	11,29	4,18
7,00	12,10	4,47

Tabelle E - 5: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-30

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	7,35	1,89
5,50	8,00	2,05
6,00	8,62	2,20
6,50	9,29	2,34
7,00	9,91	2,52

Tabelle E - 6: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-Z-40

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	6,11	0,29
5,50	6,64	0,32
6,00	7,17	0,36
6,50	7,74	0,37
7,00	8,29	0,38

E-2 Verschraubungen mit defektem Kupferring

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen des Typs Verschraubung mit defektem Kupferring für Anzugsmomente von 10 bis 40 Nm aufgeführt (vgl. Tabelle E - 7 bis Tabelle E - 12).

Tabelle E - 7: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-10

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	4,09	0,80
5,50	4,47	0,87
6,00	4,86	0,96
6,50	5,24	1,04
7,00	5,64	1,14

Tabelle E - 8: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-15

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	3,37	0,19
5,50	3,67	0,24
6,00	3,97	0,24
6,50	4,28	0,26
7,00	4,60	0,29

Tabelle E - 9: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-20

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	3,11	0,09
5,50	3,40	0,10
6,00	3,70	0,10
6,50	3,99	0,10
7,00	4,26	0,12

Tabelle E - 10: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-25

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	2,96	0,03
5,50	3,23	0,03
6,00	3,51	0,02
6,50	3,76	0,03
7,00	4,04	0,03

Tabelle E - 11: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-30

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	2,80	0,01
5,50	3,05	0,04
6,00	3,30	0,01
6,50	3,58	0,02
7,00	3,81	0,01

Tabelle E - 12: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-K-40

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	2,62	0,04
5,00	2,85	0,05
6,00	3,10	0,03
6,50	3,35	0,05
7,00	3,58	0,03

E-3 Verschraubungen mit unzureichender Menge Dichtband

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen des Typs Verschraubung mit unzureichender Menge an Dichtband aufgeführt (vgl. Tabelle E - 13).

Tabelle E - 13: Ergebnisse der Leckagegeometrie V-B-1_2-D_1,5-10

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	0,99	0,52
5,50	1,10	0,59
6,00	1,20	0,62
6,50	1,31	0,69
7,00	1,43	0,74

E-4 Schlauchrisse

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen des Typs Schlauchriss für Risslängen von 5 und 7 mm aufgeführt (vgl. Tabelle E - 14 und Tabelle E - 15).

Tabelle E - 14: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-10-R-7

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	200,90	33,81
5,50	237,75	41,09
6,00	278,53	47,73
6,50	325,91	58,28
7,00	379,75	72,33

Tabelle E - 15: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-10-R-5

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	47,15	16,27
5,50	53,32	18,00
6,00	59,71	19,47
6,50	66,71	20,87
7,00	74,44	21,92

E-5 Punktierte Schläuche

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen des Typs punktierte Schläuche aufgeführt (vgl. Tabelle E - 16 bis Tabelle E - 20).

Tabelle E - 16: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-0,7

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	0,76	0,30
5,50	0,85	0,35
6,00	0,94	0,39
6,50	1,04	0,44
7,00	1,16	0,49

Tabelle E - 17: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-1,2

Leckagedruck [bar _i]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	1,77	0,91
5,50	1,86	0,93
6,00	1,90	0,90
6,50	1,90	0,86
7,00	1,89	0,82

Tabelle E - 18: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-1,8

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	6,78	1,61
5,50	7,71	1,97
6,00	8,71	2,34
6,50	9,74	2,76
7,00	10,83	3,19

Tabelle E - 19: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-2,0

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	5,37	0,26
5,50	6,06	0,41
6,00	6,83	0,52
6,50	7,71	0,63
7,00	8,62	0,73

Tabelle E - 20: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-L-2,5

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	5,65	1,79
5,50	6,13	2,20
6,00	6,61	2,69
6,50	7,09	3,23
7,00	7,56	3,76

E-6 Undichte Schlauchschellen

Nachfolgend sind alle Ergebnisse für Leckagen des Typs undichte Schlauchschelle aufgeführt (vgl. Tabelle E - 21).

Tabelle E - 21: Ergebnisse der Leckagegeometrie S-6-S-8_16

Leckagedruck [bar _ü]	Leckagestrom [l _N /min]	Standardabweichung [l _N /min]
5,00	2,40	0,27
5,50	2,66	0,32
6,00	2,92	0,35
6,50	3,16	0,36
7,00	3,41	0,37

Anhang F Leckagestrom und Schallgeschwindigkeit

Abb. F - 1 zeigt Messungen des Leckagestroms des Prüfkörpers D-020-01 bei niedrigen Leckagedrücken. Es zeigt sich, dass der Leckagestrom bei Leckagedrücken kleiner $1 \text{ bar}_{\ddot{u}}$ stark ansteigt. In diesem Bereich ist im Austrittsquerschnitt der Leckage noch keine Schallgeschwindigkeit erreicht. Bei einem Leckagedruck von $1 \text{ bar}_{\ddot{u}}$ steigt der Leckagestrom streng linear an, was ausschließlich auf die Dichteerhöhung der Luft zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 3.1.1).

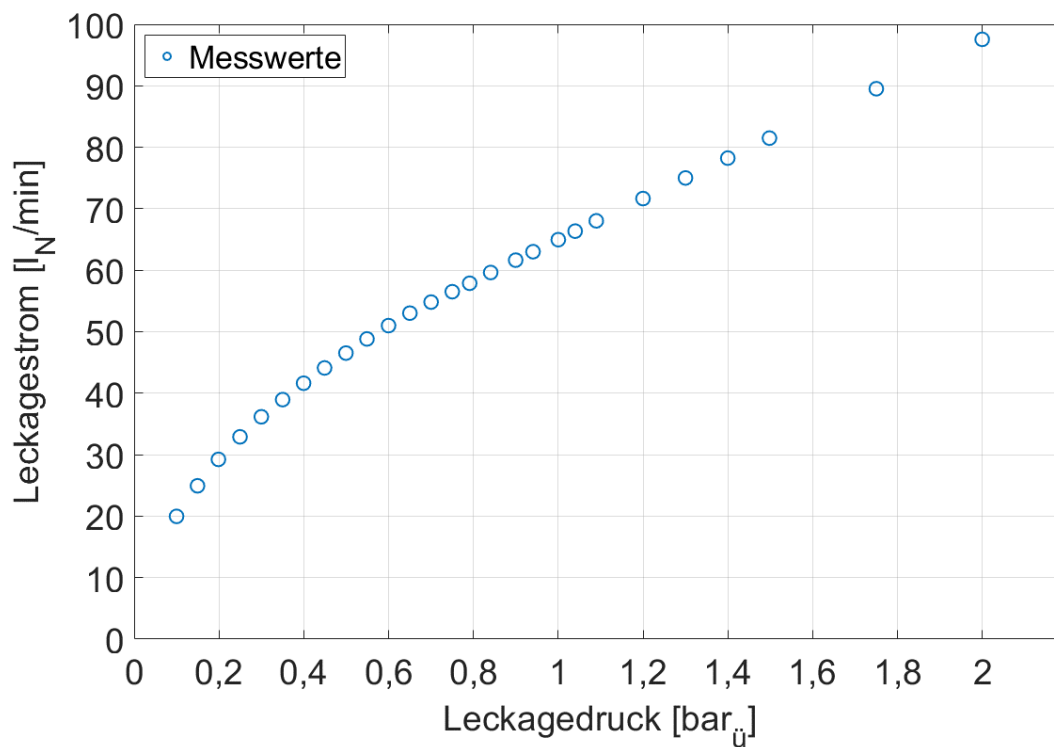


Abb. F - 1: Leckagestrom des Prüfkörpers D-020-01 bei niedrigen Leckagedrücken

Anhang G Zusatz: Ultraschallmessungen von Druckluftleckagen

G-1 Schallmessung ohne Leckage („Nullmessung“)

Abb. G - 1 beinhaltet die Messergebnisse eines Messdurchlaufs ohne Prüfkörper. Anhand der Grafik lässt sich belegen, dass der Gesamtschalldruckpegel mit circa 34 dB sehr gering ist. Die Schallintensität im Ultraschallbereich ist äußerst gering und beträgt teilweise negative Intensitätswerte. Hierbei handelt es sich nicht um einen Fehler in der Auswertung der Messdaten des Mikrophons, die negativen Werte ergeben sich aus der Definition des Schalldruckpegels als logarithmierten Verhältniswert zur Hörschallschwelle von $20 \mu\text{Pa}$. Unterschreiten die gemessenen Werte $20 \mu\text{Pa}$, wird der Schalldruckpegel negativ (vgl. Gl. 3-11, Seite 42). Der Messausschlag im Frequenzbereich von circa 85 – 100 kHz, bei einem Winkel von circa -18° , wird durch die farbliche Gestaltung deutlich hervorgehoben. Die Schallintensität beträgt jedoch nur circa 11 dB und ist damit vernachlässigbar gering. Durch die dargestellte „Nullmessung“ kann gezeigt werden, dass keine (Ultra-) Schallquellen in der Prüfumgebung, welche die Ergebnisse der Arbeit beeinflussen.

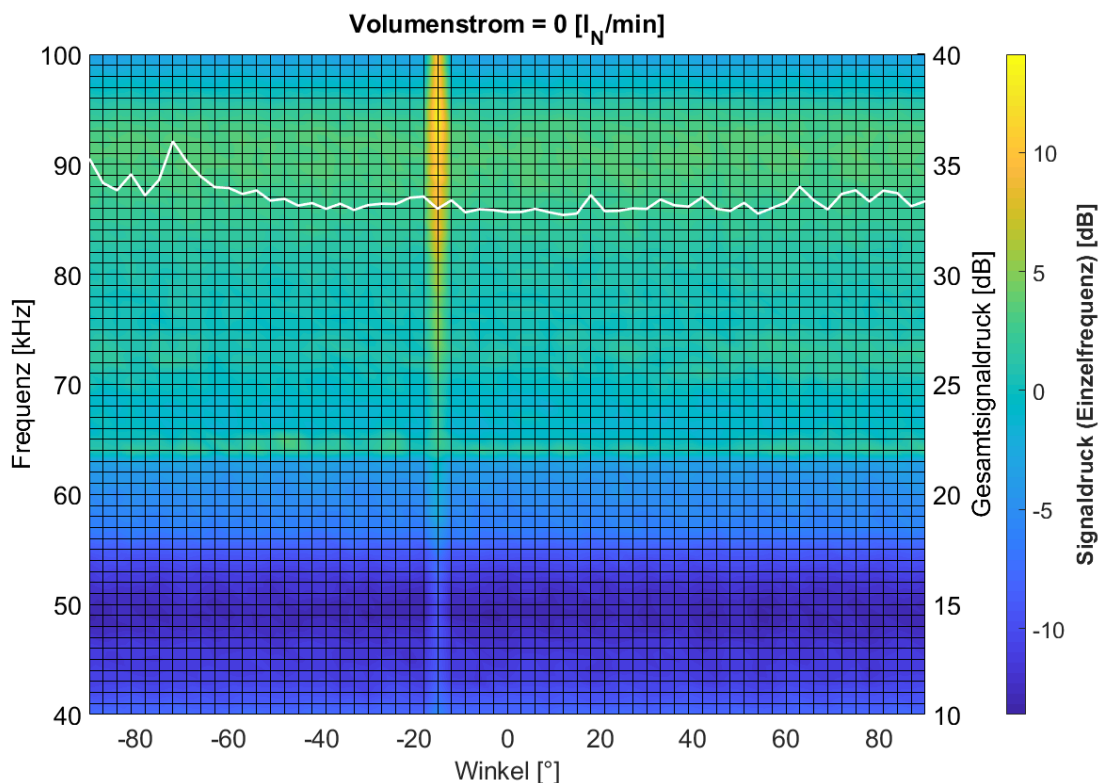


Abb. G - 1: Messergebnisse des Schallsignals am Prüfstand ohne eine zu vermessende Leckage bei angeschalteter LED Beleuchtung

G-2 Schallsignal einer Leckage ohne ausgeprägte Luftstrahlbildung

Bei einigen Verschraubungen tritt auf Grund einer komplexen Austrittsgeometrie kein konzentrierter Luftstrahl aus, was direkte Auswirkungen auf das Schallsignal hat. Ein Beispiel für eine solche Verschraubung ist der Prüfkörper V-B-0,5-Z-40-1. In Abb. G - 2 ist das Messergebnis der Schallmessung des Prüfkörpers dargestellt. Der typische Verlauf des Gesamtschalldruckpegels (vgl. z.B. Abb. 7-1, S. 120) ist nicht gegeben. Bei einem Messwinkel von 0° wird kein lokales Minimum erreicht, der Prüfkörper weist einen parabelförmigen Verlauf des Gesamtschalldruckpegels auf.

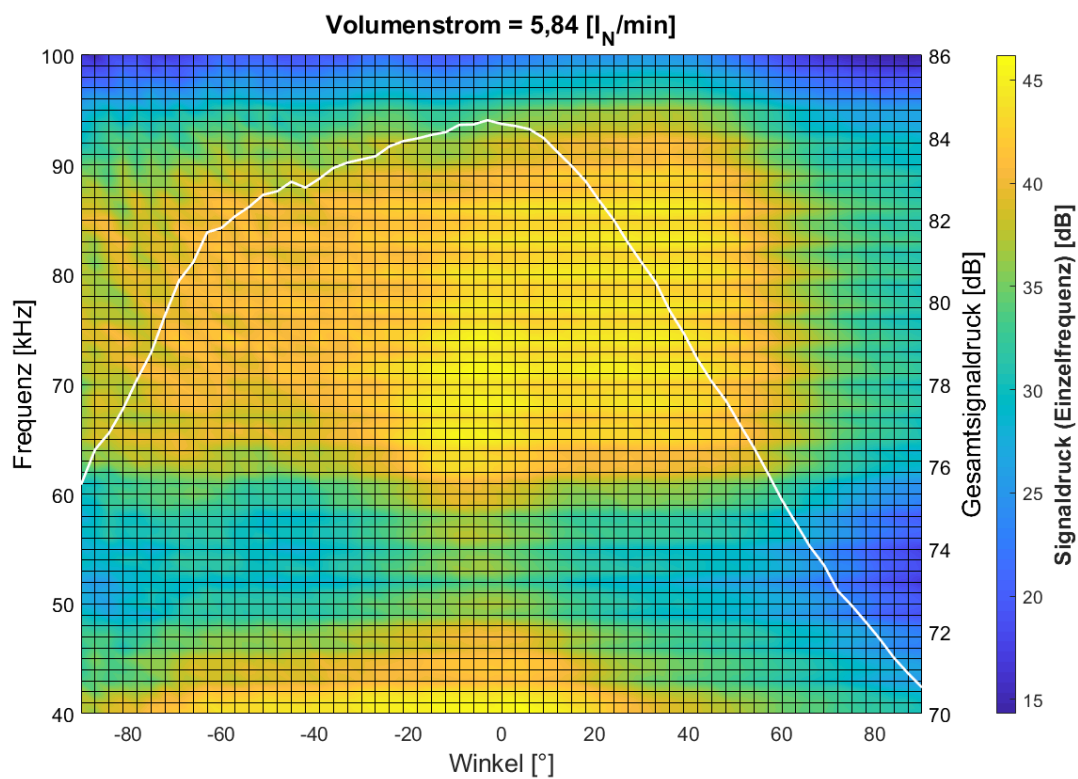


Abb. G - 2: Messergebnisse des Prüfkörpers V-B-0,5-Z-40-1 (Leckedruck: 4 bar_i, Messabstand: 20 cm)

Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Bezugsadresse: Universität Stuttgart
 Institut für Energiewirtschaft
 und Rationelle Energieanwendung
 - Bibliothek –
 Tel.: 0711 / 685 87861
 Fax: 0711 / 685 87873
 E-Mail: bib@ier.uni-stuttgart.de

Bestellungen sind auch über Internet möglich:

<https://www.ier.uni-stuttgart.de>

- Band 145 M. Unger
 Systematische Analyse von Druckluftleckagen
 September 2021, 186 Seiten
- Band 144 N. Li, G. Huang, R. Friedrich, S. Schürmann, D. Straub
 Messung und Bewertung der Schadstoffemissionen von Holzfeuerungen in Innenräumen
 Juli 2019, 44 Seiten
- Band 143 N. Li
 Long-term Exposure of European Population Subgroups to PM2.5 and NO₂
 August 2020, 152 Seiten
- Band 142 M. Miller
 Wege zur Ermittlung von Energieeffizienzpotenzialen von Informations- und Kommunikationstechnologien
 Februar 2020, 391 Seiten
- Band 141 R. Flatau
 Integrierte Bewertung interdependenter Energieeffizienzmaßnahmen – Eine modellgestützte Analyse am Beispiel von Querschnittstechnologien
 Juli 2019, 216 Seiten
- Band 140 B. Fleischer
 Systemeffekte von Bioenergie in der Elektrizitäts- und Fernwärmewirtschaft – Eine modellgestützte Analyse langfristiger Energiewendeszenarien für Deutschland
 April 2019, 190 Seiten
- Band 139 B. Mousavi
 Analysis of the relative roles of supply-side and demand-side measures in tackling global climate change – Application of a hybrid energy system model
 Januar 2019, 167 Seiten

- Band 138 S. Bothor
Prognose von Netzverlusten
August 2019, 152 Seiten
- Band 137 C. Schieberle
Development of a stochastic optimization approach to determine costefficient environmental protection strategies: Case study of policies for the future European passenger transport sector with a focus on railbound and on-road activities
Mai 2019, 218 Seiten
- Band 136 J. Welsch
Modellierung von Energiespeichern und Power-to-X im deutschen und europäischen Energiesystem
Dezember 2018, 158 Seiten
- Band 135 M. Stenull
Stand und Entwicklungspotenziale der landwirtschaftlichen Biogasnutzung in Baden-Württemberg – ein regionalspezifischer Vergleich
Juni 2017, 171 Seiten
- Band 134 J. Brunke
Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland: Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven
August 2017, 353 Seiten
- Band 133 S. Wolf
Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme – Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung
Juli 2017, 177 Seiten
- Band 132 S. Marathe
Recognising the Change in Land Use Patterns and its Impacts on Energy Demand and Emissions in Gauteng, South Africa
April 2017, 202 Seiten
- Band 131 T. Haasz
Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Demand Side Management in einem optimierenden Energiesystemmodell – Fallbeispiele für Deutschland in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte
April 2017, 177 Seiten
- Band 130 M. Steurer
Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung
April 2017, 230 Seiten

- Band 129 S. Bubeck
Potenziale elektrischer Energieanwendungstechniken zur rationellen Energieanwendung
Januar 2017, 255 Seiten
- Band 128 R. Beestermöller
Die Energienachfrage privater Haushalte und ihre Bedeutung für den Klimaschutz – Volkswirtschaftliche Analysen zur deutschen und europäischen Klimapolitik mit einem technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell
Januar 2017, 211 Seiten
- Band 127 M. Ohl
Analyse der Einsatzpotenziale von Wärmeerzeugungstechniken in industriellen Anwendungen
August 2016, 202 Seiten
- Band 126 W. Genius
Grüne Bilanzierung - Internalisierung von Umwelt- und Gesundheitsschäden im Rahmen der Input-Output-Rechnung
April 2015, 243 Seiten
- Band 125 E. Heyden
Kostenoptimale Abwärmerückgewinnung durch integriert-iteratives Systemdesign (KOARiiS) - Ein Verfahren zur energetisch-ökonomischen Bewertung industrieller Abwärmepotenziale
2016, 121 Seiten
- Band 124 K. Ohlau
Strategien zur wirksamen Minderung von Fluglärm in Deutschland - Minderungsmaßnahmen und langfristige Perspektiven
2015, 192 Seiten
- Band 123 T. Telsnig
Standortabhängige Analyse und Bewertung solarthermischer Kraftwerke am Beispiel Südafrikas
September 2015, 285 Seiten
- Band 122 M. Henßler
Ganzheitliche Analyse thermochemischer Verfahren bei der Nutzung fester Biomasse zur Kraftstoffproduktion in Deutschland
April 2015, 243 Seiten
- Band 121 B. Fais
Modelling policy instruments in energy system models - the example of renewable electricity generation in Germany
Januar 2015, 194 Seiten

- Band 120 M. Blesl
Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas – eine Energiesystem- und Technikanalyse
August 2014, 204 Seiten
- Band 119 S. Kempe
Räumlich detaillierte Potenzialanalyse der Fernwärmeversorgung in Deutschland mit einem hoch aufgelösten Energiesystemmodell
Juli 2014, 204 Seiten
- Band 118 B. Thiruchittampalam
Entwicklung und Anwendung von Methoden und Modellen zur Berechnung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Emissionen in Europa

April 2014, 238 Seiten
- Band 117 T. Kober
Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue fossil befeuerte Kraftwerke mit CO₂-Abscheidung im liberalisierten europäischen Elektrizitätsmarkt
März 2014, 158 Seiten
- Band 116 S. Wissel
Ganzheitlich-integrierte Betrachtung der Kernenergie im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung
Februar 2014, 230 Seiten
- Band 115 R. Kuder
Energieeffizienz in der Industrie – Modellgestützte Analyse des effizienten Energieeinsatzes in der EU-27 mit Fokus auf den Industriesektor
Februar 2014, 286 Seiten
- Band 114 J. Tomaschek
Long-term optimization of the transport sector to address greenhouse gas reduction targets under rapid growth – Application of an energy system model for Gauteng province, South Africa
Dezember 2013, 263 Seiten
- Band 113 B. Rühle
Kosten regionaler Energie- und Klimapolitik - Szenarioanalysen mit einem Energiesystemmodell auf Bundesländerebene
November 2013, 196 Seiten
- Band 112 N. Sun
Modellgestützte Untersuchung des Elektrizitätsmarktes - Kraftwerkseinsatzplanung und -investitionen
August 2013, 173 Seiten
- Band 111 J. Lambauer
Auswirkungen von Basisinnovationen auf die Energiewirtschaft und die Energienachfrage in Deutschland - Am Beispiel der Nano und Biotechnologie
März 2013, 303 Seiten

- Band 110 R. Barth
Ökonomische und technisch-betriebliche Auswirkungen verteilter Elektrizitätserzeugung in Verteilungsnetzen - eine modellgestützte Analyse am Beispiel eines Mittelspannungsnetzes
 März 2013, 234 Seiten
- Band 109 D. Bruchof
Energiewirtschaftliche Verkehrsstrategie - Möglichkeiten und Grenzen alternativer Kraftstoffe und Antriebe in Deutschland und der EU-27
 März 2012, 226 Seiten
- Band 108 E. D. Özdemir
The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector - A model based scenario analysis with respect to technical, economic and environmental aspects with a focus on road transport
 Januar 2012, 194 Seiten
- Band 107 U. Kugler
Straßenverkehrsemissionen in Europa - Emissionsberechnung und Bewertung von Minderungsmaßnahmen
 Januar 2012, 236 Seiten
- Band 106 M. Blesl, D. Bruchof, U. Fahl, T. Kober, R. Kuder, B. Götz, A. Voß
Integrierte Szenarioanalysen zu Energie- und Klimaschutzstrategien in Deutschland in einem Post-Kyoto-Regime
 Februar 2011, 200 Seiten
- Band 105 O. Mayer-Spohn
Parametrised Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Hard-Coal-Fuelled Power Plants with Carbon Capture and Storage
 Dezember 2009, 210 Seiten
- Band 104 A. König
Ganzheitliche Analyse und Bewertung konkurrierender energetischer Nutzungspfade für Biomasse im Energiesystem Deutschland bis zum Jahr 2030
 Juli 2009, 194 Seiten
- Band 103 C. Kruck
Integration einer Stromerzeugung aus Windenergie und Speicher-systemen unter besonderer Berücksichtigung von Druckluft-Speicherkraftwerken
 Mai 2008, 162 Seiten
- Band 102 U. Fahl, B. Rühle, M. Blesl, I. Ellersdorfer, L. Eltrop, D.-C. Harlinghausen, R. Küster, T. Rehrl, U. Remme, A. Voß
Energieprognose Bayern 2030
 Oktober 2007, 296 Seiten
- Band 101 U. Remme, M. Blesl, U. Fahl
Global resources and energy trade: An overview for coal, natural gas, oil and uranium
 Juli 2007, 108 Seiten

- Band 100 S. Eckardt
Energie- und Umweltmanagement in Hotels und Gaststätten: Entwicklung eines Softwaretools zur systematischen Prozessanalyse und Management-unterstützung
Mai 2007, 152 Seiten
- Band 99 U. Remme
Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell
August 2006, 336 Seiten
- Band 98 L. Eltrop, J. Moerschner, M. Härdtlein, A. König
Bilanz und Perspektiven der Holzenergienutzung in Baden-Württemberg
Mai 2006, 102 Seiten
- Band 97 B. Frey
Modellierung systemübergreifender Energie- und Kohlenstoffbilanzen in Entwicklungsländern
Mai 2006, 148 Seiten
- Band 96 K. Sander
Potenziale und Perspektiven stationärer Brennstoffzellen
Juni 2004, 256 Seiten
- Band 95 M. A. dos Santos Bernardes
Technische, ökonomische und ökologische Analyse von Aufwindkraftwerken
März 2004, 228 Seiten
- Band 94 J. Bagemihl
Optimierung eines Portfolios mit hydro-thermischem Kraftwerkspark im börslichen Strom- und Gasterminmarkt
Februar 2003, 138 Seiten
- Band 93 A. Stuitable
Ein Verfahren zur graphentheoretischen Dekomposition und algebraischen Reduktion von komplexen Energiesystemmodellen
November 2002, 156 Seiten
- Band 92 M. Blesl
Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungs-systeme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs
August 2002, 282 Seiten
- Band 91 S. Briem, M. Blesl, M. A. dos Santos Bernardes, U. Fahl, W. Krewitt, M. Nill, S. Rath-Nagel, A. Voß
Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg
August 2002, 138 Seiten

- Band 90 B. Frey, M. Neubauer
Energy Supply for Three Cities in Southern Africa
Juli 2002, 96 Seiten
- Band 89 A. Heinz, R. Hartmann, G. Hitzler, G. Baumbach
Wissenschaftliche Begleitung der Betriebsphase der mit Rapsölmethylester befeuerten Energieversorgungsanlage des Deutschen Bundestages in Berlin
Juli 2002, 212 Seiten
- Band 88 M. Sawillion
Aufbereitung der Energiebedarfsdaten und Einsatzanalysen zur Auslegung von Blockheizkraftwerken
Juli 2002, 136 Seiten
- Band 87 T. Marheineke
Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken
Juli 2002, 222 Seiten
- Band 86 B. Leven, C. Hoeck, C. Schaefer, C. Weber, A. Voß
Innovationen und Energiebedarf - Analyse ausgewählter Technologien und Branchen mit dem Schwerpunkt Stromnachfrage
Juni 2002, 224 Seiten
- Band 85 E. Laege
Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie - Eine modellgestützte Systemanalyse
Januar 2002, 254 Seiten
- Band 84 S. Molt
Entwicklung eines Instrumentes zur Lösung großer energiesystemanalytischer Optimierungsprobleme durch Dekomposition und verteilte Berechnung
Oktober 2001, 166 Seiten
- Band 83 D. Hartmann
Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien
September 2001, 228 Seiten
- Band 82 G. Kühner
Ein kosteneffizientes Verfahren für die entscheidungsunterstützende Umweltanalyse von Betrieben
September 2001, 210 Seiten
- Band 81 I. Ellersdorfer, H. Specht, U. Fahl, A. Voß
Wettbewerb und Energieversorgungsstrukturen der Zukunft
August 2001, 172 Seiten

- Band 80 B. Leven, J. Neubarth, C. Weber
Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen
 Mai 2001, 166 Seiten
- Band 79 R. Krüger, U. Fahl, J. Bagemihl, D. Herrmann
Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg
 April 2001, 142 Seiten
- Band 78 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe
 Februar 2001, 248 Seiten
- Band 77 W. Rüdfler
Integrierte Ressourcenplanung für Baden-Württemberg
 Januar 2001, 284 Seiten
- Band 76 S. Rivas
Ein agro-ökologisches regionalisiertes Modell zur Analyse des Brennholzversorgungssystems in Entwicklungsländern
 Januar 2001, 200 Seiten
- Band 75 M. Härdtlein
Ansatz zur Operationalisierung ökologischer Aspekte von "Nachhaltigkeit" am Beispiel der Produktion und Nutzung von Triticale (*×Triticosecale* Wittmack)-Ganzpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der luftgetragenen N-Freisetzen
 September 2000, 168 Seiten
- Band 74 T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß
Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken
 August 2000, 118 Seiten
- Band 73 J. Sontow
Energiewirtschaftliche Analyse einer großtechnischen Windstromerzeugung
 Juli 2000, 242 Seiten
- Band 72 H. Hermes
Analysen zur Umsetzung rationeller Energieanwendung in kleinen und mittleren Unternehmen des Kleinverbrauchersektors
 Juli 2000, 188 Seiten
- Band 71 C. Schaefer, C. Weber, H. Voss-Uhlenbrock, A. Schuler, F. Oosterhuis, E. Nieuwlaar, R. Angioletti, E. Kjellsson, S. Leth-Petersen, M. Togeby, J. Munksgaard
Effective Policy Instruments for Energy Efficiency in Residential Space Heating - an International Empirical Analysis (EPISODE)
 Juni 2000, 146 Seiten

- Band 70 U. Fahl, J. Baur, I. Ellersdorfer, D. Herrmann, C. Hoeck, U. Remme, H. Specht, T. Steidle, A. Stuible, A. Voß
Energieverbrauchsprognose für Bayern
Mai 2000, 240 Seiten
- Band 69 J. Baur
Verfahren zur Bestimmung optimaler Versorgungsstrukturen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete in Entwicklungsländern
Mai 2000, 154 Seiten
- Band 68 G. Weinrebe
Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerken
April 2000, 212 Seiten
- Band 67 C.-O. Wene, A. Voß, T. Fried (eds.)
Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies
April 2000, 282 Seiten
- Band 66 A. Schuler
Entwicklung eines Modells zur Analyse des Endenergieeinsatzes in Baden-Württemberg
März 2000, 236 Seiten
- Band 65 A. Schäfer
Reduction of CO₂-Emissions in the Global Transportation Sector
März 2000, 290 Seiten
- Band 64 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (eds.)
Biogenic Emissions of Greenhouse Gases Caused by Arable and Animal Agriculture - Processes, Inventories, Mitigation
März 2000, 148 Seiten
- Band 63 A. Heinz, R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer, D. Jezierska
Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten
Dezember 1999, 308 Seiten
- Band 62 U. Fahl, M. Blesl, D. Herrmann, C. Kemfert, U. Remme, H. Specht, A. Voß
Bedeutung der Kernenergie für die Energiewirtschaft in Baden-Württemberg - Auswirkungen eines Kernenergieausstiegs
November 1999, 146 Seiten
- Band 61 A. Greßmann, M. Sawillion, W. Krewitt, R. Friedrich
Vergleich der externen Effekte von KWK-Anlagen mit Anlagen zur getrennten Erzeugung von Strom und Wärme
September 1999, 138 Seiten

- Band 60 R. Lux
Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Stromerzeugung konventioneller Kraftwerkssysteme
September 1999, 162 Seiten
- Band 59 M. Kayser
Energetische Nutzung hydrothermalen Erdwärmevorkommen in Deutschland - Eine energiewirtschaftliche Analyse -
Juli 1999, 184 Seiten
- Band 58 C. John
Emissionen von Luftverunreinigungen aus dem Straßenverkehr in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung - Untersuchung von Emissionsszenarien am Beispiel Baden-Württembergs
Juni 1999, 214 Seiten
- Band 57 T. Stelzer
Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen - Lebensweganalysen von Umweltwirkungen
Mai 1999, 212 Seiten
- Band 56 R. Lux, J. Sontow, A. Voß
Systemtechnische Analyse der Auswirkungen einer windtechnischen Stromerzeugung auf den konventionellen Kraftwerkspark
Mai 1999, 322 Seiten
- Band 55 B. Biffar
Messung und Synthese von Wärmelastgängen in der Energieanalyse
Mai 1999, 236 Seiten
- Band 54 E. Fleißner
Statistische Methoden der Energiebedarfsanalyse im Kleinverbraucher-sektor
Januar 1999, 306 Seiten
- Band 53 A. Freibauer, M. Kaltschmitt (Hrsg.)
Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture
Januar 1999, 252 Seiten
- Band 52 J. Haug, B. Gebhardt, C. Weber, M. van Wees, U. Fahl, J. Adnot, L. Cauret, A. Pierru, F. Lantz, J.-W. Bode, J. Vis, A. van Wijk, D. Staniaszek, Z. Zavody
Evaluation and Comparison of Utility's and Governmental DSM-Programmes for the Promotion of Condensing Boilers
Oktober 1998, 156 Seiten
- Band 51 M. Blesl, A. Schweiker, C. Schlenzig
Erweiterung der Analysemöglichkeiten von *NetWork* - Der Netzwerkeditor
September 1998, 112 Seiten

- Band 50 S. Becher
Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe - Energie- und Emissionsbilanzen
Juli 1998, 200 Seiten
- Band 49 P. Schaumann, M. Blesl, C. Böhringer, U. Fahl, R. Kühner, E. Läge, S. Molt, C. Schlenzig, A. Stuible, A. Voß
Einbindung des ECOLOG-Modells 'E³Net' und Integration neuer methodischer Ansätze in das IKARUS-Instrumentarium (ECOLOG II)
Juli 1998, 110 Seiten
- Band 48 G. Poltermann, S. Berret
ISO 14000ff und Öko-Audit - Methodik und Umsetzung
März 1998, 184 Seiten
- Band 47 C. Schlenzig
PlaNet: Ein entscheidungsunterstützendes System für die Energie- und Umweltplanung
Januar 1998, 230 Seiten
- Band 46 R. Friedrich, P. Bickel, W. Krewitt (Hrsg.)
External Costs of Transport
April 1998, 144 Seiten
- Band 45 H.-D. Hermes, E. Thöne, A. Voß, H. Desprez, G. Weimann, G. Kamelander, C. Ureta
Tools for the Dissemination and Realization of Rational Use of Energy in Small and Medium Enterprises
Januar 1998, 352 Seiten
- Band 44 C. Weber, A. Schuler, B. Gebhardt, H.-D. Hermes, U. Fahl, A. Voß
Grundlagenuntersuchungen zum Energiebedarf und seinen Bestimmungsfaktoren
Dezember 1997, 186 Seiten
- Band 43 J. Albiger
Integrierte Ressourcenplanung in der Energiewirtschaft mit Ansätzen aus der Kraftwerkseinsatzplanung
November 1997, 168 Seiten
- Band 42 P. Berner
Maßnahmen zur Minderung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus der Lackanwendung - Vergleich zwischen Abluftreinigung und primären Maßnahmen am Beispiel Baden-Württembergs
November 1997, 238 Seiten
- Band 41 J. Haug, M. Sawillion, U. Fahl, A. Voß, R. Werner, K. Weiß, J. Rösch, W. Wölfle
Analysis of Impediments to the Rational Use of Energy in the Public Sector and Implementation of Third Party Financing Strategies to improve Energy Efficiency
August 1997, 122 Seiten

- Band 40 U. Fahl, R. Krüger, E. Läge, W. Rüffler, P. Schaumann, A. Voß
Kostenvergleich verschiedener CO₂-Minderungsmaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland
 August 1997, 156 Seiten
- Band 39 M. Sawillion, B. Biffar, K. Hufendiek, R. Lux, E. Thöne
MOSAIK - Ein EDV-Instrument zur Energieberatung von Gewerbe und mittelständischer Industrie
 Juli 1997, 172 Seiten
- Band 38 M. Kaltschmitt
Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
 April 1997, 108 Seiten
- Band 37 C. Böhringer, T. Rutherford, A. Pahlke, U. Fahl, A. Voß
Volkswirtschaftliche Effekte einer Umstrukturierung des deutschen Steuersystems unter besonderer Berücksichtigung von Umweltsteuern
 März 1997, 82 Seiten
- Band 36 P. Schaumann
Klimaverträgliche Wege der Entwicklung der deutschen Strom- und Fernwärmeversorgung - Systemanalyse mit einem regionalisierten Energiemodell
 Januar 1997, 282 Seiten
- Band 35 R. Kühner
Ein verallgemeinertes Schema zur Bildung mathematischer Modelle energiewirtschaftlicher Systeme
 Dezember 1996, 262 Seiten
- Band 34 U. Fahl, P. Schaumann
Energie und Klima als Optimierungsproblem am Beispiel Niedersachsen
 November 1996, 124 Seiten
- Band 33 W. Krewitt
Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme
 November 1996, 196 Seiten
- Band 32 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, T. Schulze, U. Fahl, A. Voß, A. Perrels, W. van Arkel, W. Pellekaan, M. O'Connor, E. Schenk, G. Ryan
Consumers' Lifestyles and Pollutant Emissions
 September 1996, 118 Seiten
- Band 31 W. Rüffler, A. Schuler, U. Fahl, H.W. Balandynowicz, A. Voß
Szenariorechnungen für das Projekt *Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg*
 Juli 1996, 140 Seiten
- Band 30 C. Weber, B. Gebhardt, A. Schuler, U. Fahl, A. Voß
Energy Consumption and Air-Borne Emissions in a Consumer Perspective
 September 1996, 264 Seiten

- Band 29 M. Hanselmann
Entwicklung eines Programmsystems zur Optimierung der Fahrweise von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
August 1996, 138 Seiten
- Band 28 G. Schmid
Die technisch-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsstrategien mit Hilfe von Energiemodellen
August 1996, 184 Seiten
- Band 27 A. Obermeier, J. Seier, C. John, P. Berner, R. Friedrich
TRACT: Erstellung einer Emissionsdatenbasis für TRACT
August 1996, 172 Seiten
- Band 26 T. Hellwig
OMNIUM - Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung in Industriebetrieben
Mai 1998, 118 Seiten
- Band 25 R. Laing
CAREAIR - ein EDV-gestütztes Instrumentarium zur Untersuchung von Emissionsminderungsstrategien für Dritte-Welt-Länder dargestellt am Beispiel Nigerias
Februar 1996, 221 Seiten
- Band 24 P. Mayerhofer, W. Krewitt, A. Trukenmüller, A. Greßmann, P. Bickel, R. Friedrich
Externe Kosten der Energieversorgung
März 1996, Kurzfassung, 40 Seiten
- Band 23 M. Blesl, C. Schlenzig, T. Steidle, A. Voß
Entwicklung eines Energieinformationssystems
März 1996, 76 Seiten
- Band 22 M. Kaltschmitt, A. Voß
Integration einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung in den konventionellen Kraftwerksverbund
Juni 1995, Kurzfassung, 51 Seiten
- Band 21 U. Fahl, E. Läge, W. Rüffler, P. Schaumann, C. Böhringer, R. Krüger, A. Voß
Emissionsminderung von energiebedingten klimarelevanten Spurengasen in der Bundesrepublik Deutschland und in Baden-Württemberg
September 1995, 454 Seiten
- Band 20 M. Fishedick
Erneuerbare Energien und Blockheizkraftwerke im Kraftwerksverbund - Technische Effekte, Kosten, Emissionen
Dezember 1995, 196 Seiten

- Band 19 A. Obermeier
Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg
Mai 1995, 208 Seiten
- Band 18 N. Kalume
Strukturmodule - Ein methodischer Ansatz zur Analyse von Energiesystemen in Entwicklungsländern
Dezember 1994, 113 Seiten
- Band 17 Th. Müller
Ermittlung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung
November 1994, 142 Seiten
- Band 16 A. Wiese
Simulation und Analyse einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland
Juni 1994, 223 Seiten
- Band 15 M. Sawillion, T. Hellwig, B. Biffar, R. Schelle, E. Thöne
Optimierung der Energieversorgung eines Industrieunternehmens unter Umweltschutz- und Wirtschaftlichkeitsaspekten - Wertanalyse-Projekt
Januar 1994, 154 Seiten
- Band 14 M. Heymann, A. Trukenmüller, R. Friedrich
Development prospects for emission inventories and atmospheric transport and chemistry models
November 1993, 105 Seiten
- Band 13 R. Friedrich
Ansatz zur Ermittlung optimaler Strategien zur Minderung von Luftschadstoffemissionen aus Energieumwandlungsprozessen
Juli 1992, 292 Seiten
- Band 12 U. Fahl, M. Fishedick, M. Hanselmann, M. Kaltschmitt, A. Voß
Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentiale energiebedingter CO₂-Emissionen durch einen verstärkten Erdgaseinsatz in der Elektrizitätsversorgung Baden-Württembergs unter besonderer Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten
August 1992, 471 Seiten
- Band 11 M. Kaltschmitt, A. Wiese
Potentiale und Kosten regenerativer Energieträger in Baden-Württemberg
April 1992, 320 Seiten
- Band 10 A. Reuter
Entwicklung und Anwendung eines mikrocomputergestützte Energieplanungsinstrumentariums für den Einsatz in Entwicklungsländern
November 1991, 170 Seiten

- Band 9 T. Kohler
Einsatzmöglichkeiten für Heizreaktoren im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland
Juli 1991, 162 Seiten
- Band 8 M. Mattis
Kosten und Auswirkungen von Maßnahmen zur Minderung der SO₂- und NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen in Baden-Württemberg
Juni 1991, 188 Seiten
- Band 7 M. Kaltschmitt
Möglichkeiten und Grenzen einer Stromerzeugung aus Windkraft und Solarstrahlung am Beispiel Baden-Württembergs
Dezember 1990, 178 Seiten
- Band 6 G. Schmid, A. Voß, H.W. Balandynowicz, J. Cofala, Z. Parczewski
Air Pollution Control Strategies - A Comparative Analysis for Poland and the Federal Republic of Germany
Juli 1990, 92 Seiten
- Band 5 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Neckar-Alb
Juli 1990, 484 Seiten
- Band 4 Th. Müller, B. Boysen, U. Fahl, R. Friedrich, M. Kaltschmitt, R. Laing, A. Voß, J. Giesecke, K. Jorde, C. Voigt
Regionale Energie- und Umweltanalyse für die Region Hochrhein-Bodensee
Juni 1990, 498 Seiten
- Band 3 D. Kluck
Einsatzoptimierung von Kraftwerkssystemen mit Kraft-Wärme-Kopplung
Mai 1990, 155 Seiten
- Band 2 M. Fleischhauer, R. Friedrich, S. Häring, A. Haugg, J. Müller, A. Reuter, A. Voß, H.-G. Wystrcil
Grundlagen zur Abschätzung und Bewertung der von Kohlekraftwerken ausgehenden Umweltbelastungen in Entwicklungsländern
Mai 1990, 316 Seiten
- Band 1 U. Fahl
KDS - Ein System zur Entscheidungsunterstützung in Energiewirtschaft und Energiepolitik
März 1990, 265 Seiten

Inhalt

Die Steigerung der Energieeffizienz ist das zentrale Element der Strategie der Bundesregierung, um das Gelingen der Energiewende zu ermöglichen. Bis zum Jahr 2050 soll der Primärenergieverbrauch um 50 % gesenkt werden. Der Strombedarf industrieller Druckluftsysteme in Deutschland beträgt circa 16 TWh/a, was einem Anteil von 7 % des Gesamtstrombedarfs der Industrie entspricht. Gleichzeitig existieren große, wirtschaftliche Einsparpotentiale im Bereich der Druckluftsysteme. Das größte Einsparpotential, mit einer Einsparung von bis zu 2,5 TWh/a, liegt in der Identifikation von Druckluftleckagen und deren Beseitigung. Trotz des großen Potentials sind Druckluftleckagen wenig wissenschaftlich untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist es, Druckluftleckagen systematisch zu untersuchen. Hierzu fokussiert sich die Arbeit auf drei Forschungsschwerpunkte: Leckageberechnungen, Leckageströme und Leckagequantifizierung. Zunächst werden die physikalischen Grundlagen von Druckluftleckagen hergeleitet, auf deren Basis ein Berechnungsmodell für den Leckagestrom entwickelt wird. Die beiden weiteren Kernthemen werden experimentell untersucht, hierfür wird ein Versuchsstand konzipiert und aufgebaut. Im zweiten Forschungsschwerpunkt werden die Leckageströme einer großen Anzahl an Prüfkörpern mit idealisierter und realitätsnaher Leckagegeometrie ermittelt. Ebenso werden mögliche Einflussfaktoren auf den Leckagestrom von Leckagestellen untersucht. In einem letzten Schritt wird überprüft, inwiefern sich die Schallsignale einer Druckluftleckage eignen, um den Leckagestrom anhand des Signals indirekt zu quantifizieren.

Die Ergebnisse der Arbeit teilen sich auf die betrachteten Forschungsschwerpunkte auf. In Bezug auf das Themenfeld Leckageberechnungen werden analytische Gleichungen aufgestellt, die eine idealisierte Bestimmung des Leckagestroms ermöglichen. Das entwickelte Berechnungsmodell ermöglicht die Durchführung von Sensitivitätsanalysen relevanter Eingangsparameter.

Bei der experimentellen Untersuchung von Leckagen können die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Leckagestrom bestimmt werden, diese sind: Der Leckagedruck, die Leckagefläche, sowie die Leckagegeometrie. Die Temperatur hat nur einen geringen, der Wassergehalt der Druckluft keinen, messbaren Einfluss. Ideale Leckagen weisen gegenüber den meisten realen Leckagen einen deutlich höheren Leckagestrom auf. Reale Leckagen, mit Ausnahme von Schlauchrissen, liegen für Drücke von 5 bis 7 bar_i in den meisten Fällen unter 100 l_N/min, in vielen Fällen sogar unter 20 l_N/min. In der Arbeit kann zudem gezeigt werden, dass eine indirekte Leckagebewertung durch die Analyse des Schallsignals möglich ist. Zur Betrachtung wird der Leckagestrom in Bezug zum Schalldruckpegel bei 40 kHz gesetzt. Die Genauigkeit des Verfahrens kann durch die Berücksichtigung des, in dieser Arbeit eingeführten, Leckagegeometriefaktors deutlich gesteigert werden. In einer abschließenden Validierung konnte gezeigt werden, dass 71 % der indirekt bestimmten Leckageströme eine Abweichung von kleiner ± 40 % besitzen. Werden Prüfkörper des Typs Verschraubungen von der Auswertung ausgeschlossen steigt der Anteil der Messwerte in diesem Intervall auf 89 %.