

**Beitrag zur Optimierung des Verformungs- und Leckageverhaltens von
Flanschdichtungen mittels Kennfunktionen.**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Alexander Riedl

geb. am 23.10.1966 in München

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Lothar Mörl

Prof. Dr.-Ing Wolfgang Tietze

Promotionskolloquium am 27. September 2002

Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Firma W. L. Gore & Associates GmbH. Die wissenschaftliche Betreuung wurde von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Fachhochschule Münster übernommen.

Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Tietze für die stetige Unterstützung und Motivation sowie die wichtigen fachlichen Diskussionen während meiner Arbeit. Darüber hinaus möchte ich mich für die Möglichkeit der Nutzung des Labors für Dichtungstechnik an der Fachhochschule Münster bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. L. Mörl danke ich für seine wichtigen Anregungen und Impulse, die meine ganze Arbeit begleiteten.

Herrn Doz. Dr.-Ing. G. Lässig gilt mein Dank für seine fortwährende Unterstützung und das Interesse an meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. M. Becker für seine wichtige Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten an der Fachhochschule Münster.

Mein Dank gilt auch der Firma W. L. Gore & Associates GmbH, die mir die zeitliche und fachliche Möglichkeit gab, parallel zu meiner Anstellung weiterhin wissenschaftlich tätig zu sein. Einschließen möchte ich hier alle Kolleginnen und Kollegen, die mich bei der Durchführung meiner Arbeit unterstützt und angeregt haben.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit dem mechanischen und dem Leckageverhalten von Flanschdichtungen, wie sie in der chemischen und der Kraftwerksindustrie eingesetzt werden.

Zielsetzung der Arbeit ist es, Kennfunktionen für Flanschdichtungen zu schaffen, mit deren Hilfe die verschiedenen Zielgrößen in Abhängigkeit variierender Einflußgrößen beschrieben werden können. Zielgrößen sind z.B. die maximal zulässige Flächenpressung oder das Verformungsverhalten unter Betriebsbedingungen. Einflußgrößen sind dabei z.B. die Dichtungsgeometrie oder die Temperatur. Eine kombinierte Auswertung der unterschiedlichen Kennfunktionen soll die optimierte Auslegung eines Dichtsystems ermöglichen. Darüber hinaus sollen durch die Kennfunktionen, im Gegensatz zu den bisher verwendeten diskreten Kennwerten, Kennwerte berechnet werden, die die tatsächlichen Einsatzbedingungen eines Dichtsystems berücksichtigen. Erst dadurch ist ein zuverlässiger Dichtheits- und Festigkeitsnachweis möglich.

Zur Zielerreichung wurde folgendes Vorgehen realisiert.

- Durch eine Literaturrecherche wurden die notwendigen Kennwerte bestimmt, die für ein Dichtsystem maßgebend sind und deshalb die Zielgrößen der Kennfunktionen darstellen.
- Danach wurden die jeweiligen Einflußgrößen auf die einzelnen Zielgrößen erarbeitet. Das erfolgte zum einen durch die Auswertung einschlägiger Literatur, zum anderen durch orientierende experimentelle Arbeiten.
- Nachfolgend wurden die Variationsfenster der Einflußgrößen mit Hilfe einer erstmalig durchgeführten Umfrage in der europäischen Chemieindustrie bestimmt. Um diese Variationsfenster experimentell abzudecken, wurden Prüfanlagen entwickelt oder angepaßt.
- Daraufhin wurden Versuchsabläufe erarbeitet, die mit angemessener Versuchsdauer und geringen Kosten eine technisch richtige Auswertung ermöglichen und darüber hinaus Unzulänglichkeiten in den bisher verwendeten Versuchsmethoden aufdecken und beseitigen.
- Mit den Zielgrößen aus den experimentellen Untersuchungen konnten die Kennfunktionen bestimmt werden. Diese wurden als normierte Kennfunktionen hergeleitet und dargestellt. Damit ist eine schnelle und einfache Interpretation derselben gegeben. Eine optimierte Auslegung eines Dichtsystems unter Beachtung aller hier erhaltenen Kennfunktionen wird somit möglich.
- Abschließend wurde mit Hilfe eines Algorithmus, der sich aus den Optimierungen ableitet, eine Software erstellt, die es dem Anwender erlaubt, die Ergebnisse dieser Arbeit einfach und schnell zu nutzen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4
1.1 Einführung	4
1.2 Stand der Technik	5
2 Zielsetzung	10
3 Analyse der verwendeten Normen und Auslegungsvorschriften	12
3.1 Normung zur Ermittlung von Dichtungskennwerten	13
3.1.1 DIN 28090 und DIN 28091	13
3.1.2 Entwurf der europäischen Prüfnorm prEN 13555.....	17
3.2 Normung zur Dichtungsberechnung.....	20
4 Notwendige Kennwerte und Kennfunktionen für Flanschdichtungen	23
4.1 Kennwerte für Flanschdichtungen.....	23
4.2 Einflußgrößen auf die Kennwerte von Flanschdichtungen	24
4.2.1 Einflußgrößen auf die maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand.....	24
4.2.2 Einflußgrößen auf die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand.....	25
4.2.3 Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten	26
4.2.4 Einflußgrößen während des Dichtungseinbaus auf das nachfolgende	27
Leckageverhalten im Betriebszustand	
4.2.5 Einflußgrößen auf das Leckageverhalten im Betriebszustand	28
5 Berechnungsalgorithmus zum Dichtheits- und Festigkeitsnachweis für	30
Flanschdichtungen	
5.1 Flußdiagramm zum optimierten Dichtsystem für Flanschdichtungen.....	31
5.2 Erläuterungen zum Berechnungsalgorithmus	33
6 Beschreibung der in der Praxis angewendeten Einsatzgrenzen von	37
Flanschdichtungen	

6.1 Bestimmung der Dichtungshauptgruppen	38
6.2 Grundlagen zur Datenanalyse.....	39
6.3 Einsatzgrenzen, resultierend aus dem Innendruck	42
6.4 Einsatzgrenzen, resultierend aus der Temperatur	43
6.5 Einsatzgrenzen, resultierend aus der Flächenpressung und der Medienbeständigkeit	44
7 Notwendige Versuchseinrichtungen und Methoden zur Reduzierung der Versuchszahl	46
7.1 Notwendigkeit zur Weiterentwicklung der Prüftechnik.....	46
7.2 Versuchseinrichtungen zur Ermittlung des Leckageverhaltens.....	47
7.3 Versuchseinrichtungen zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens.....	52
7.4 Kennwertermittlung von Dichtungen mit Hilfe statistischer Versuchsplanung.....	54
8 Anwendung der multiplen Regressionsanalyse zur Gewinnung von Kennfunktionen	56
8.1 Grundlagen.....	56
8.2 Vorgehensweise bei der Regressionsanalyse.....	59
8.2.1 Eliminierung nicht signifikanter Größen.....	60
8.2.2 Linearisierung nichtlinearer Effekte	62
8.2.3 Teil-Implementierung der Ergebnisse in andere Modelle	63
8.2.4 Normierte Darstellung der Einflußgrößen.....	65
8.2.5 Validierung der Modelle und Prüfverfahren	70
9 Experimentelle Untersuchung und Modellierung von Flanschdichtungen	71
9.1 Verformungsverhalten	71
9.1.1 Verformungsverhalten im Einbauzustand.....	72
9.1.1.1 Allgemeine Betrachtung	72
9.1.1.2 Versuchsbeschreibung.....	73
9.1.1.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen.....	77
9.1.1.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung	80
9.1.2 Verformungsverhalten im Betriebszustand.....	80
9.1.2.1 Allgemeine Betrachtung	80
9.1.2.2 Versuchsbeschreibung.....	82

9.1.2.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen.....	85
9.1.2.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung	90
9.1.2.5 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung bezüglich Q_{MAX} und Q_{SMAX}	93
9.1.3 Bestimmung des Kriech-Relaxationsverhaltens	95
9.1.3.1 Allgemeine Betrachtung	95
9.1.3.2 Versuchsbeschreibung	97
9.1.3.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen	99
9.1.3.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung	101
9.1.4 Zusammenfassung des mechanischen Verhaltens.....	103
9.2 Leckageverhalten	106
9.2.1 Bestimmung des Leckageverhaltens im Einbauzustand	106
9.2.1.1 Allgemeine Betrachtung	106
9.2.1.2 Versuchsbeschreibung	108
9.2.1.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen	110
9.2.1.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung	115
9.2.2 Bestimmung des Leckageverhaltens im Betriebszustand	118
9.2.2.1 Allgemeine Betrachtung	118
9.2.2.2 Versuchsbeschreibung	119
9.2.2.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen	121
9.2.2.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung	123
9.2.3 Zusammenfassung des Leckageverhaltens	124
10 Optimierungssoftware	126
10.1 Grundlagen.....	126
10.2 Erläuterungen zum Algorithmus	126
11 Zusammenfassung und Ausblick	132
Literaturverzeichnis	136
Verzeichnis der Formelzeichen.....	149
Abbildungsverzeichnis	152
Tabellenverzeichnis	154
Anhangsverzeichnis	155
Anhang	159
Lebenslauf	214

1 Einleitung

1.1 Einführung

Dichtungen werden seit vielen Jahrtausenden von Menschen genutzt, um einen ungewollten Stofffluß zwischen zwei voneinander getrennten Räumen zu verhindern oder zumindest auf ein erträgliches Maß zu reduzieren [1].

Den ungewollten Stofffluß, auch Leckage genannt, kann man in gefährliche und ungefährliche Leckagen einteilen.

Ungefährliche Leckagen sind z.B. ein tropfender Wasserhahn oder eine undichte Druckluftleitung.

Unter gefährlichen Leckagen versteht man einen Stofffluß, der einen finanziell hohen Schaden und/oder eine Gefährdung von Mensch und Umwelt darstellt. Diese Leckagen gilt es zu verhindern bzw. auf ein technisch sinnvolles Maß zu verringern.

Man unterscheidet in der chemischen Industrie und der Kraftwerkstechnik dynamische und statische Dichtungsanwendungen.

Dynamische Dichtungsanwendungen sind beispielsweise Stopfbuchspackungen oder Gleitringdichtungen für Wellenantriebe. Statisch beanspruchte Dichtungen sind in diesem Bereich vor allem Flanschdichtungen einer Rohrleitung oder eines Behälters. Alle Dichtungsarten werden zumeist für lösbare Verbindungen eingesetzt.

In dieser Arbeit werden statisch beanspruchte Dichtungen aus Weichstoffen unter besonderer Berücksichtigung von expandiertem PTFE (ePTFE) behandelt. Weichstoffdichtungen stellen für Flanschverbindungen in der chemischen Industrie und der Kraftwerkstechnik die am meisten verwendete Dichtungsart dar. Sie haben die Aufgabe, unter allen Betriebsbedingungen eine zuverlässige Abdichtung zu gewährleisten, d.h. gefährliche Leckagen zu vermeiden.

Nachfolgend wird der Stand der Technik erläutert. Dieser beruht auf vorangegangenen Arbeiten und Informationen aus der industriellen Praxis. Am Beispiel der gängigsten Dichtungswerkstoffe wird ein Weg gezeigt, eine möglichst dichte und sichere Flanschverbindung unabhängig von der Dichtungsart zu gewährleisten.

1.2 Stand der Technik

In allen Bereichen der chemischen Industrie stellen statisch wirkende Flachdichtungen aus Weichstoffen in Verbindung mit Flanschen und Schrauben die am weitesten verbreitete lösbare Verbindung zur Förderung, Lagerung und/oder Verarbeitung von flüssigen und gasförmigen Medien dar. Es wird zwar angestrebt, Flanschverbindungen zu vermeiden; diese Forderung ist aber nicht in allen Fällen zu erfüllen. In der Regel sollen Flanschverbindungen nur dann Verwendung finden, wenn sie aus verfahrenstechnischen, sicherheitstechnischen und Instandhaltungsgründen notwendig sind [2]. Vorrang haben hier vor allem Sicherheitsgründe, um Mensch und Umwelt zu schützen.

Deshalb tragen das steigende Umweltbewußtsein und staatliche Forderungen wie:

- die „VDI Richtlinie 2440“ [2],
- die „Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft“ [3],
- die neue europäische Druckgeräte-Richtlinie (DGR) [4], welche die deutsche Druckbehälterverordnung [5] ersetzt,
- das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [6] und deren länderspezifischen Interpretationen,
- die „Verordnung für brennbare Stoffe“ (VbF) [7] oder
- die TRR 100 [8]

dazu bei, Flanschverbindungen hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Gefahrenquellen systematisch zu untersuchen und daraus Verbesserungspotentiale abzuleiten. In keinem der vorgenannten Regelwerke wird eine detaillierte Auflistung der geforderten Eigenschaften einer Dichtung gegeben. Die TA-Luft [3] verlangt lediglich, „hochwertige“ Dichtungen einzusetzen, ohne diese jedoch näher zu definieren [9]. Die DGR [4] fordert für Dichtungen nur ein Werkszeugnis 2.2 nach DIN EN 10204 [10, 11], das vom Dichtungshersteller selbst ausgestellt werden kann. In der VDI Richtlinie 2440 [2] wird für Flanschverbindungen auf eine Leckagerate von 10^{-4} mbar·l/(s·m) verwiesen. Das WHG [6] fordert beispielsweise eine CE-Kennzeichnung als Kriterium für Dichtungen, wohingegen die DGR [4] dieses ausdrücklich untersagt [11]. Aufgrund der sich teilweise überschneidenden bzw. widersprechenden Aussagen aus den oben genannten Regelwerken ist zu fordern, daß für Flanschverbindungen sinnvolle, dem Stand der Technik entsprechende Anforderungen an Dichtungen definiert werden.

Seit Ende des 19. Jahrhunderts werden Dichtungen in Flanschverbindungen wissenschaftlich untersucht. Mehrere Autoren haben bereits die historische Entwicklung bis etwa 1975 analysiert

[12, 13, 14]. Durch gestiegene Umweltaforderungen und ein Umdenken, das in den siebziger Jahren in der Gesellschaft stattfand, nicht zuletzt durch Katastrophen wie in Seveso [15, 16], wurden durch Industrieanlagen verursachte Emissionen erfaßt, z.B. [17].

Diese Umstände führten in den folgenden Jahren auf dem Gebiet der Dichtungstechnik zu einer intensiven Forschung mit Weichstoffdichtungen, die sich im Rahmen von größeren wissenschaftlichen Arbeiten vor allem mit den bis 1994 verwendeten It-Dichtungen (Gummi-Asbest-Dichtungen) beschäftigten [12, 13, 18 und 19]. 1994 wurde Asbest in Deutschland aus gesundheitlichen Gründen verboten. Asbest war bis dahin ein wesentlicher Bestandteil von Flanschdichtungen. Danach wurden alternative Dichtungsmaterialien vor allem durch [14, 20 und 21] wissenschaftlich untersucht.

Darüber hinaus wurden überwiegend experimentelle Arbeiten veröffentlicht, die sich aus der Entwicklungsarbeit für die Normen DIN 28090 [22], DIN 28091 [23] und DIN EN 1591 [24] ergaben [25 - 38].

Bierl, Micheely und Kämpkes [12, 18 und 19] beschäftigten sich dabei vorwiegend mit der physikalischen oder der physikalisch-empirischen Beschreibung der Leckage. In [39] wird verdeutlicht, daß alle aus den oben genannten Arbeiten entstandenen Leckagemodelle unter bestimmten Umständen einander gleichwertig sind. Aufgrund der Überführbarkeit werden nachfolgend am Modell der parallelen Kapillaren die für diese Arbeit wichtigen Erkenntnisse erläutert. Weitere Ausführungen dazu, die sich an Dichtungen auf Basis von expandiertem Graphit orientieren, sind in [40 und 41] angegeben. Alle Modelle haben gemeinsam, daß sie sich auf ein bestimmtes Dichtungsmaterial beziehen und nur unter bestimmten Randbedingungen gültig sind.

Das Modell der parallelen Kapillaren beschreibt die Leckage durch eine Dichtung (Querschnittsleckage), wobei die Leckage zwischen Flansch und Dichtung (Trennflächenleckage) nicht berücksichtigt wird [42]. Das Modell gilt damit nur unter der Voraussetzung, daß die Querschnittsleckage deutlich größer als die Trennflächenleckage ist. Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, trifft das für Dichtungen aus ePTFE und expandiertem Graphit zu, die auch bei größeren Mikro- und Makrounebenheiten eine gute Oberflächenanpassung zeigen.

Das Modell berücksichtigt für gasförmige Medien den Bereich zwischen der Molekularströmung nach Knudsen und der laminaren Strömung. Mehrere Autoren haben bewiesen, daß sich die Leckage durch Dichtungen im Übergangsbereich zwischen der Knudsen- und der laminaren Strömung bewegt [19, 37 und 40]. Die Knudsen-Strömung wird durch Gleichung (1), die laminare Strömung durch Gleichung (2) beschrieben:

$$\dot{m} = \frac{4r^3}{3} \sqrt{2\pi \frac{M}{RT} \frac{p_i - p_a}{l}} \quad (1)$$

$$\dot{m} = \frac{M}{RT} \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{(p_i - p_a)^2}{2l} \quad (2)$$

Bei beiden Gleichungen sieht man den bedeutenden Einfluß des Leckkanalradius r . Er geht bei der Knudsenströmung in dritter Potenz, bei der laminaren Strömung in vierter Potenz in die Gleichung mit ein. Da Dichtungen beim Einbau plastisch verformt werden, ist die Änderung des Leckkanalradius mit der Flächenpressungsänderung proportional.

Das heißt, im Vergleich zu den übrigen Einflußgrößen aus Gleichung (1) und Gleichung (2) muß die Flächenpressung die größte Auswirkung auf die Leckage haben.

Alle anderen Einflußfaktoren, außer dem Innendruck bei laminarer Strömung, haben einen linearen Einfluß auf den Leckagestrom. Die Kapillarlänge l läßt sich in erster Näherung als Dichtungsbreite interpretieren.

Kämpkes [19] faßte beide Strömungsformen in einer Gleichung zusammen:

$$\dot{m} = n \frac{p_i - p_a}{l} \left(\frac{M}{RT} \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{p_i + p_a}{2} + \Psi \sqrt{\frac{2\pi M}{RT} \frac{4r^3}{3}} \right) \quad (3)$$

Kämpkes ergänzte das Modell um die Anzahl der Kapillaren n . Die Kapillaranzahl n kann als Dichtungshöhe ausgelegt werden und hat ebenfalls einen linearen Einfluß auf die Leckage. Ebenso fügte er die Adzumikonstante für den Anteil der Knudsenströmung in das Modell ein. Die Adzumikonstante beträgt für Reinstoffe 0,90, für Mischungen 0,66.

Hummelt [40, 41] hat die Bedeutung der Flächenpressung erkannt und auf Basis des Modells der parallelen Kapillaren unter alleiniger Berücksichtigung der Knudsenströmung, die für Dichtungen aus expandiertem Graphit maßgebend ist, folgende Gleichung entwickelt:

$$\dot{m} = p_i \frac{n}{6b_D} \sqrt{\frac{2\pi M}{RT} \frac{d_{Kap,0}^3}{3}} e^{-\frac{6(1-2\nu)\sigma}{E}} \quad (4)$$

Der Exponent $\frac{6(1-2\nu)}{E}$ und somit die Steigung bei einfach logarithmischer Transformation in Gleichung (4) muß aufgrund des stark nichtlinearen Verhaltens von Dichtungswerkstoffen

empirisch bestimmt werden. Die experimentellen Versuche in dieser Arbeit für ePTFE und expandiertes Graphit zeigen, daß der Wert des Exponenten konstant ist und somit einen Materialkennwert darstellt.

Es ist bei Kenntnis der Steigung somit prinzipiell möglich, daß Leckageverhalten eines Dichtungswerkstoffes in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen, des Mediums und des Innendrucks über den Ausdruck:

$$\dot{m}(\sigma = 0) = p_i \frac{n}{6b_D} \sqrt{\frac{2\pi M}{RT}} \frac{d_{Kap,0}^3}{3} \quad \text{Gl. 5}$$

zu beschreiben. Die Leckage $\dot{m}(\sigma = 0)$ repräsentiert dabei die Leckage bei einer Flächenpressung von 0 MPa oder auch den y-Achsenabschnitt der Leckagefunktion, Bild 1.

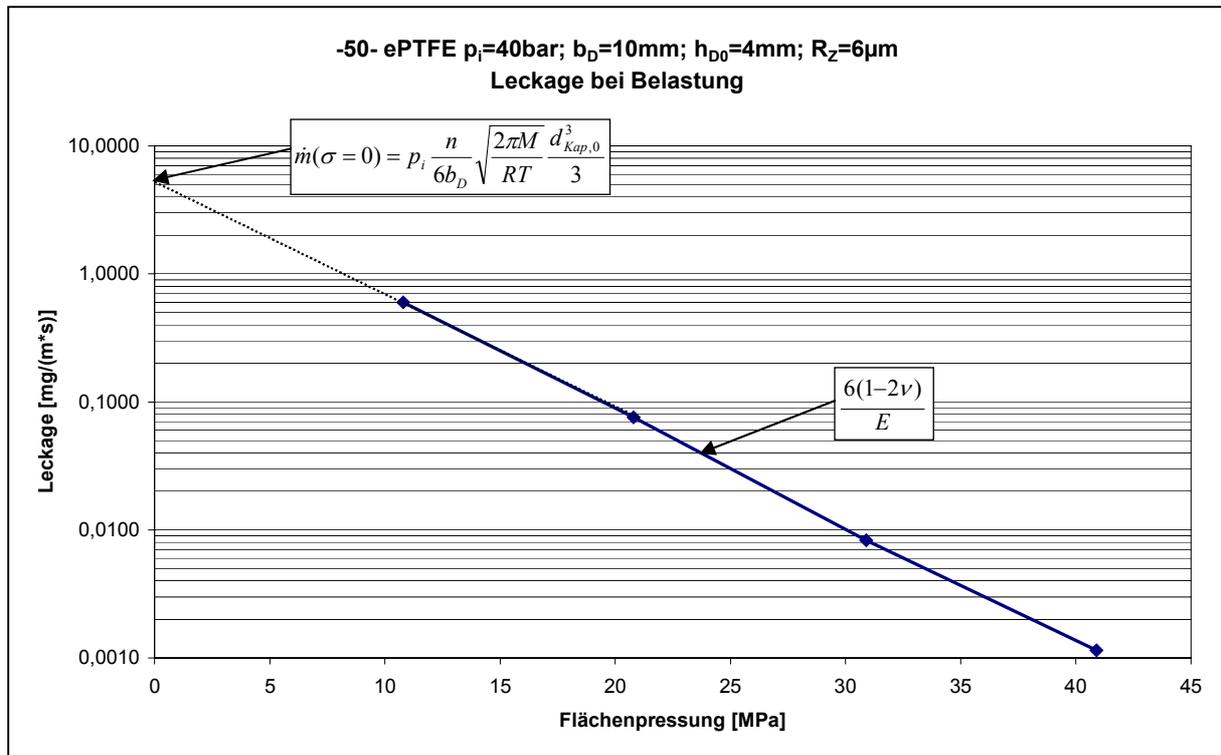


Bild 1: Darstellung des y-Achsenabschnitts und der Steigung der Leckagefunktion

Das Verhalten einer Dichtung im Betrieb wird nicht alleine durch das Leckageverhalten charakterisiert. Das Leckageverhalten ist letztlich nur ein Resultat der vorangegangenen Verformung der Dichtung beim Einbau und des Belastungsregimes während der Betriebsphase. Im Betrieb ist eine Dichtung unterschiedlichsten Belastungen, wie z.B. äußeren Kräften und Momenten und Temperaturbelastungen ausgesetzt, die wiederum eine Verformung der Dichtung bewirken.

Prinzipiell muß in das Verformungs- und das Kriech-Relaxationsverhalten unterschieden werden. Seit 1987 wurden einige Arbeiten durchgeführt, die auch die historische Entwicklung der Verformungs- und Kriech-Relaxationsuntersuchungen widerspiegeln. Bartonicek [13], Stephan [20] und Römmler [21] betrachteten bei ihren Arbeiten beide Deformationsarten, Gusko [14] lediglich die reinen Verformungsuntersuchungen.

Stephan [20] und Römmler [21] ermittelten empirische Modelle für verschiedene asbestfreie Dichtungen, wobei die verwendeten Dichtungsmaterialien allgemein charakterisiert wurden. Bartonicek untersuchte das Verhalten der Dichtungen sowohl an Flanschen als auch an Prüfständen, um eine einfache Möglichkeit zur Berechnung zu schaffen. Für die Versuche zur Ermittlung des Kriech-Relaxationsverhalten wurden Versuchseinrichtungen nach DIN 52913 [43] verwendet. Römmler untersuchte auch Dichtungen nach der amerikanischen Norm ASTM F38 [44]. Diese für die Dichtungstechnik wichtigen Erkenntnisse wurden jedoch nicht weiter verfolgt. Durch diese Arbeit soll das Kriech-Relaxationsverhalten von Dichtsystemen wieder aufgegriffen bzw. weiterentwickelt werden und dadurch in die aktuelle Normung Eingang finden.

Allgemein läßt sich feststellen, daß die Arbeiten zur Bestimmung der Verformungscharakteristik den Untersuchungen zum Leckageverhalten untergeordnet wurden. Führt man sich aber vor Augen, daß das Leckageverhalten nur so gut sein kann wie sich die Dichtung im Einbau und Betrieb mechanisch verhält, leitet sich daraus noch erheblicher Forschungsaufwand ab.

Aus der Analyse der oben aufgeführten Arbeiten, aber auch aus intensiven Gesprächen mit Mitarbeitern der Dichtungstechnik aus Forschung, europäischer Großchemie und deutscher Kraftwerkstechnik hat sich die nachfolgend dargelegte Aufgabenstellung entwickelt.

2 Zielsetzung

Verlässliche Kennwerte für Flanschdichtungen sind sehr wichtig, um einen problemlosen Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Diesbezügliche Forderungen werden sowohl von Normungsseite als auch von Anwender- und Herstellerseite gestellt. Darüber hinaus sind gesetzliche Vorgaben zu beachten.

Die bisher bekannten Dichtungskennwerte beschreiben das Verformungs- und Leckageverhalten von Flanschdichtungen nur bei einer bestimmten Einstellung der Einflußgrößen. Einflußgrößen auf die Funktion einer Flachdichtung sind z.B. der abzudichtende Innendruck, geometrische Größen der Dichtung oder die Dichtflächenpressung. Durch die Festlegung auf bestimmte Einstellwerte ist es weder möglich noch zulässig, Rückschlüsse auf die Änderung der Kennwerte bei von den Normen abweichenden Einflußgrößen zu ziehen. Dabei weichen die meisten Einsatzbedingungen in der Praxis deutlich von den festgesetzten Prüfbedingungen ab.

Erstes Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, umfassende und gesicherte Kenntnisse über das Verformungs- und Leckageverhalten von Flanschdichtungen in Form von Kennfunktionen zu gewinnen. Diese Kennfunktionen sollen zum einen Kennwerte für die Berechnungsnormen liefern, welche die realen Randbedingungen des Flanschsystems wiedergeben, zum anderen sollen aus den Kennfunktionen Maßnahmen abgeleitet werden, die der Anwender zu treffen hat, um eine möglichst dichte und eine möglichst sichere Dichtverbindung zu erhalten.

Um die Kennfunktionen erstellen zu können, ist eine genaue Analyse der momentan gültigen Normung und der Literatur notwendig. Nur dann ist es möglich zu bestimmen, welche Kennwerte bzw. welche Kennfunktionen erforderlich sind, um ein Dichtsystem zu beschreiben. Nach Bestimmung der notwendigen Kennfunktionen sind die funktionellen Abhängigkeiten, d.h. die Einflußgrößen, welche auf die einzelnen Kennfunktionen eine Auswirkung haben, zu ermitteln.

Nachdem die Einflußgrößen und Kennfunktionen bestimmt sind, ist es wichtig, den Bereich der Einflußgrößen festzulegen, in denen sie in der Praxis variiert werden. Dies stellt einen entscheidenden Beitrag dar. Denn je besser dieser Bereich bekannt ist, um so genauer können die Kennfunktionen modelliert werden. Darüber hinaus zeigt diese Analyse den Anwendern den in der Industrie akzeptierten Einsatzbereich der jeweiligen Flanschdichtungstypen auf.

Sind die Einflußgrößen und deren Variationsbreite bekannt, ist es Aufgabe, mit möglichst hoher wissenschaftlicher Produktivität die Kennfunktionen zu modellieren. Dazu sind experimentelle Untersuchungen mit Unterstützung statistischer Versuchspläne notwendig. Ausgehend von der

Variationsbreite der Einflußgrößen ist eine Prüftechnik zu bestimmen, die diesen Bereich experimentell abdecken kann. Ist das mit den momentan verfügbaren Anlagen nicht möglich, sind neue Prüfanlagen zu entwickeln.

Auf Basis der Prüfanlagen sind daraufhin bestehende Prüfsystematiken bzw. Prüfabläufe auf ihre Eignung hin zu überprüfen. Sind bisherige Prüfabläufe geeignet, die Kennfunktionen zu bestimmen, sollten diese angewandt werden. Ist das nicht der Fall, sind Prüfabläufe zu entwickeln, aus denen die jeweiligen Kennfunktionen zweckmäßig abzuleiten sind.

Um die Prüfabläufe einem breiten Anwenderfeld zur Verfügung zu stellen, ist es unumgänglich, auf die momentan entstehende Normung Einfluß zu nehmen und die in dieser Arbeit entwickelten Prüfabläufe dort aufzunehmen.

Mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen, in dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf Dichtungen aus ePTFE, früherer Arbeiten sowie theoretischer Überlegungen sind die Kennfunktionen zu entwickeln. Es gilt, nicht nur eine mathematische Beschreibung des Verhaltens der Flanschdichtungen zu entwickeln, sondern vor allem durch geeignete Transformationen während der Modellierung eine direkte Beurteilung der einzelnen Einflußgrößen auf die Zielgröße zu erhalten. Nur so ist eine einfache und effektive Möglichkeit zur Optimierung des Dichtsystems gegeben.

Um die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse im Anschluß direkt umsetzen zu können, stellt sich die Aufgabe, einen Algorithmus zu entwickeln, der die Kennfunktionen mit den Erkenntnissen der optimierten Auslegung vereint.

Abschließendes Ziel dieser Arbeit ist es, den Anwendern von Dichtungen den Algorithmus als einfaches Werkzeug in Form einer Software an die Hand zu geben. Dieses soll ihnen unter Berücksichtigung des vorhandenen Dichtsystems (Flansch, Schraube und Dichtung) eine optimale Dichtungs- und Montageauslegung ermöglichen. Vorgestellt wird das am Beispiel des Dichtwerkstoffes ePTFE.

3 Analyse der verwendeten Normen und Auslegungsvorschriften

Wie bereits erläutert, ist es aus mehreren Gründen sinnvoll, sich zunächst an gültigen Normen zu orientieren und davon ausgehend auf die in den letzten Jahren entstehende europäische Normung für Flansche und deren Verbindungen einzuwirken. Die für diese Arbeit wesentliche europäische Normung wird im Rahmen des CEN-TC74 („Flanges and their Joints“) in den beiden Working Groups WG 8 und WG 10 erarbeitet (CEN: Comité Européen de Normalisation; TC: Technical Committee). Die WG 8 hat die Aufgabe, Normen für Dichtungen zu entwickeln, um damit Kennwerte für die Berechnungsnormung zu schaffen. Die WG 10 entwickelt Berechnungsmethoden für Flanschverbindungen, um einen Dichtheits- und Festigkeitsnachweis für das Flanschsystem zu erhalten. Grundsätzlich muß in Prüf- und Berechnungsnormen unterschieden werden. Prüfnormen definieren die Ermittlung der Kennwerte für die Berechnungsnormen. Ohne technisch sinnvolle und nachvollziehbare Kennwerte ist jede Berechnungsmethode nur sehr eingeschränkt verwendbar [45, 46]. Dabei ist in Kennwerte und Kennfunktionen zu unterscheiden. Kennwerte beschreiben das Verformungs- bzw. das Leckageverhalten bei nur einer bestimmten Einstellung der Einflußgrößen. Kennfunktionen dagegen stellen einen deutlichen Qualitätssprung dar, da sich aus ihnen Kennwerte berechnen lassen, welche die realen Werte in Abhängigkeit der konkreten Einflußgrößen berücksichtigen.

Nachfolgend wird vor allem auf die momentan gültige und sich entwickelnde deutsche und europäische Normung eingegangen. Bereits ersetzte Normen, wie z.B. die DIN E 2505 [47], werden nur behandelt, wenn sie für das Verständnis notwendig sind. Die weltweit am häufigsten verwendete Norm nach ASME wird kurz im Vergleich zur europäischen Normung betrachtet.

Ein Überblick über die momentan experimentell zu ermittelnden Dichtungskennwerte ist im Anhang 1-3 angegeben [47]. Darüber hinaus gehende Kennwerte zur Qualitätssicherung sind in Anhang 4 aufgelistet. Eine detaillierte Analyse der Kennwerte ist in den folgenden Abschnitten gegeben.

3.1 Normung zur Ermittlung von Dichtungskennwerten

3.1.1 DIN 28090 und DIN 28091

Die seit September 1995 gültigen Normen DIN 28090 [22] und DIN 28091 [23] ermöglichten als erstes Normenwerk die experimentelle Bestimmung nachvollziehbarer Dichtungskennwerte für die Flanschberechnung, damals DIN E 2505 [48], und damit die Vergleichbarkeit von Flanschdichtungen [49]. Bis dahin mußten sich die Konstrukteure von Flanschverbindungen auf Herstellerangaben oder Kennwerte verlassen, die aufgrund unzureichender oder nicht dokumentierter Prüf- und Auswertemethoden oftmals nicht nachvollziehbar waren. Diese wurden von Norm zu Norm übernommen und waren in der Regel „zu gut“, so daß dem Anwender ein unrealistisch gutes Verhalten der Dichtmaterialien vorgetäuscht wurde [50].

An dieser Stelle ist anzumerken, daß die neue europäische Norm prEN 13555 [51] in absehbarer Zukunft die DIN 28090-1 [22] ersetzt. Für die Ersetzung der DIN 28091 [23] ist momentan im Rahmen des CEN-TC74-WG8 eine Working Item Nummer vergeben, unter welcher eine Norm zur Qualitätssicherung entwickelt werden soll [52].

Beide DIN-Normen geben diskrete Kennwerte für Dichtungen an, wobei in Kennwerte für Berechnung und Qualitätssicherung unterschieden wird.

Die Definitionen der Kennwerte nach DIN 28090 [22] sind zwar technisch richtig, jedoch ist die Ermittlung, d.h. der Versuchsablauf der Kennwerte und deren Interpretation teilweise fehlerhaft. Erst nach Veröffentlichung der Norm wurde versucht, die meisten Versuchsabläufe experimentell zu verifizieren. Im Rahmen der Entwicklung der prEN13555 [51] soll mit Hilfe der hier vorliegenden Arbeit versucht werden, die Nachteile der DIN 28090 [22] zu berichtigen. Nachfolgend wird eine kurze Bewertung der einzelnen Kennwerte gegeben:

Das Leckageverhalten von Dichtungen beschreiben die Kennwerte Mindestflächenpressung im Einbauzustand für eine bestimmte Leckageklasse L $\sigma_{VU/L}$ und den Betriebszustand $\sigma_{BU/L}$.

Der Versuchsablauf zur Ermittlung von $\sigma_{VU/L}$ ist grundsätzlich richtig. Nachteilig wirkt sich hierbei die schwierige Regelung der Prüfanlage aufgrund der geforderten Variation des Innendrucks und die äußerst lange Versuchsdauer aus (mindestens 98 Stunden, wenn pro Innendruckstufe eine Versuchsdauer von 2 Stunden zugrunde gelegt wird), Bild 2 [22]. Durch die oben genannten Nachteile hat sich der Versuchsablauf in der experimentellen Praxis nicht durchgesetzt. Der im ersten Entwurf der prEN 13555 [51] vorgestellte Versuchsablauf ist deutlich einfacher und innerhalb eines Tages an einem automatisierten Prüfstand durchzuführen. Deshalb wurde er auch mit geringfügigen Änderungen in diese Arbeit übernommen, Bild 3.

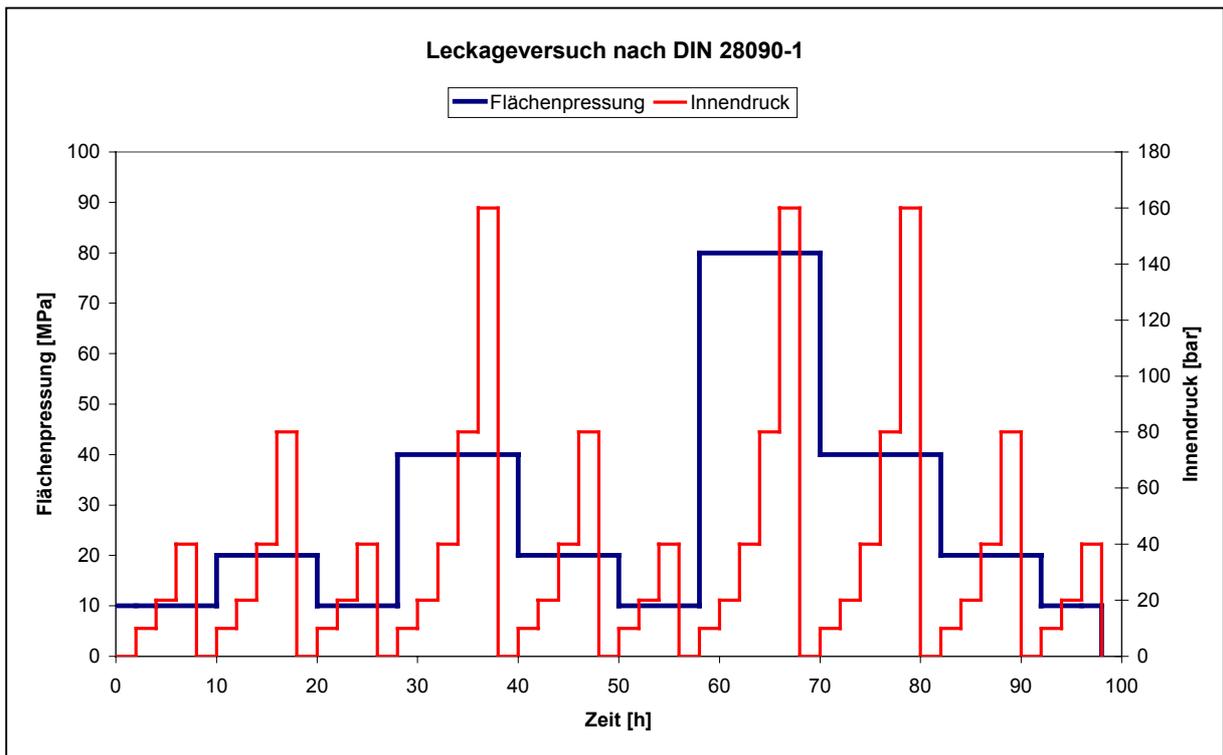


Bild 2: Versuchsablauf zur Bestimmung des Leckageverhaltens nach DIN 28090

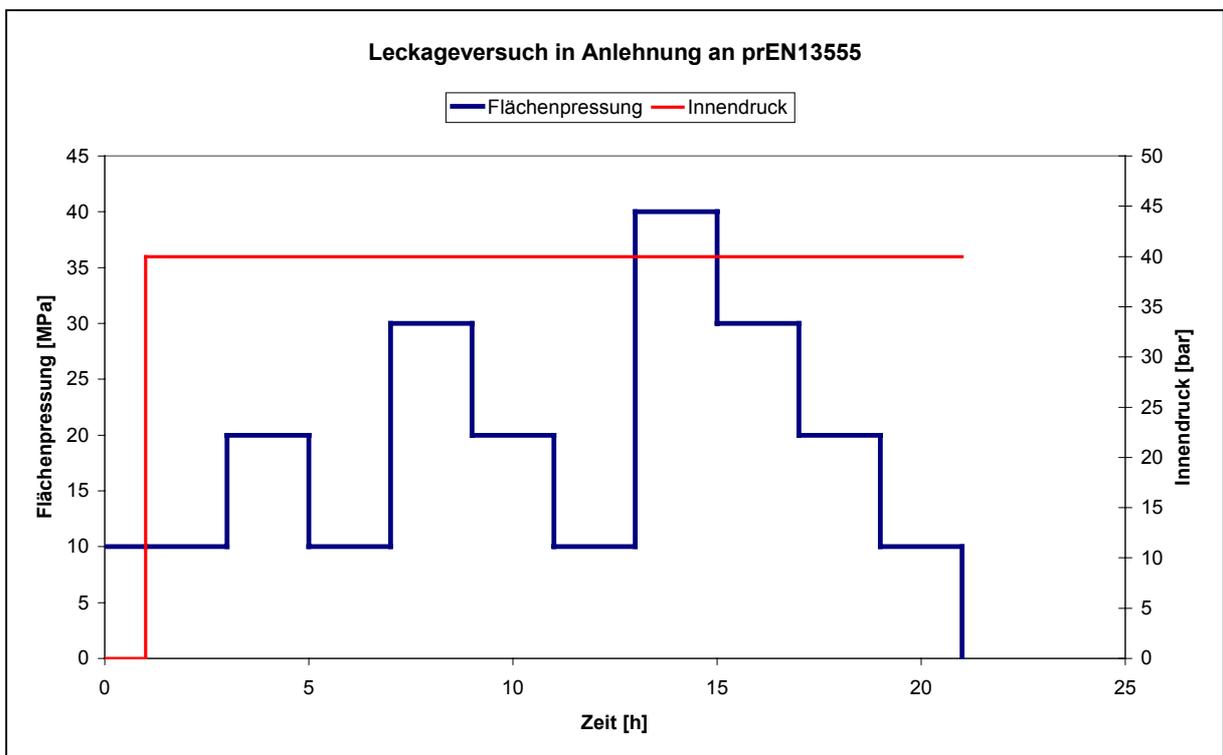


Bild 3: Versuchsablauf zur Bestimmung des Leckageverhaltens nach prEN13555 (Anlehnung)

Für die Bestimmung der Mindestflächenpressung im Betriebszustand $\sigma_{BU/L}$ gelten die gleichen Aussagen wie für den Einbauzustand, da beide Kennwerte in einem Versuch ermittelt werden.

Da die oben genannten Kennwerte im kurzzeitigen Versuch bestimmt werden, beschreiben die Teile 2 und 3 der DIN 28090 [22] einen langzeitigen Leckageversuch, der im Normflansch durchgeführt wird. Dieser einfache Versuchsaufbau, besonders nach Teil 3, wurde bereits in mehreren Fällen erfolgreich genutzt, siehe dazu [53, 54, 55].

Die mechanischen Eigenschaften der Dichtungen werden durch die Kennwerte maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand σ_{VO} , maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand $\sigma_{BO/T}$, Setzbetrag Δh_D und Ersatz-Elastizitätsmodul E_D beschrieben.

Die maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand σ_{VO} wird im Kurzzeitversuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung bei Raumtemperatur ermittelt. Liegt keine eindeutige mechanische Zerstörung der Dichtung vor, dient ein Druckstandversuch bei konstanter Flächenpressung zur Bestimmung von σ_{VO} . Hierbei wird als Kriterium für σ_{VO} ein bestimmter Setzweg definiert. Gleiches gilt für die Bestimmung von $\sigma_{BO/T}$. Wie in [56] verdeutlicht, sind die Druckstandversuche zur Bestimmung einer maximal zulässigen Flächenpressung ungeeignet.

Ausführliche Erläuterungen zu einem in dieser Arbeit entwickelten neuen Versuchsablauf, der mit geringfügigen Änderungen sowohl zur Ermittlung der maximalen Flächenpressungen σ_{VO} und $\sigma_{BO/T}$ als auch zur Ermittlung des Ersatz-Elastizitätsmoduls E_D in die neue europäische Norm prEN13555 [51] übernommen wird, sind mit technisch richtiger Interpretation im Abschnitt 9.1 dargelegt. Der in der Norm aufgenommene Versuchsablauf ist an einem Beispiel in Bild 4 dargestellt. Er ermöglicht den Herstellern und Anwendern von Dichtungen eine schnelle und kostengünstige Bestimmung des praxisnahen mechanischen Verhaltens einer Flanschdichtung.

Die Rückverformung von Dichtungen bei Entlastung wird durch den Ersatz-Elastizitätsmodul E_D beschrieben. Der Versuchsablauf nach Norm ist technisch richtig, obwohl aufgrund der kurzen Entlastungszeit nur die spontane Rückfederung ohne die Entropieelastizität berücksichtigt wird [57]. In der Regel wird jedoch die Bedeutung dieses Kennwerts, d.h. der Rückverformung, überbewertet.

Die Bestimmung des Setzbetrages Δh_D , erfolgt im Kriech-Relaxationsversuch und basiert auf dem Versuchsablauf der DIN 52913 [43], Bild 5. Im Gegensatz zu den Versuchen mit konstanter Last (Druckstandversuch) zeichnet sich der Kriech-Relaxationsversuch durch eine Kraftreduktion gleichzeitig zur Höhenabnahme der Dichtung aus [42]. Mehrere Autoren [13, 20, 21 und 58] stellten bereits fest, daß bei erhöhten Temperaturen schon nach maximal 3 Stunden keine bzw. nur noch eine sehr geringe Verringerung der Flächenpressung festzustellen ist. Deshalb ist eine Verlängerung der Versuchsdauer auf 100 Stunden, wie in der Norm gefordert,

nicht für alle Dichtungsarten notwendig. Auf Basis dieses Versuchs wurden im Rahmen dieser Arbeit Versuche mit einer deutlichen Erweiterung des Versuchsspektrums durchgeführt.

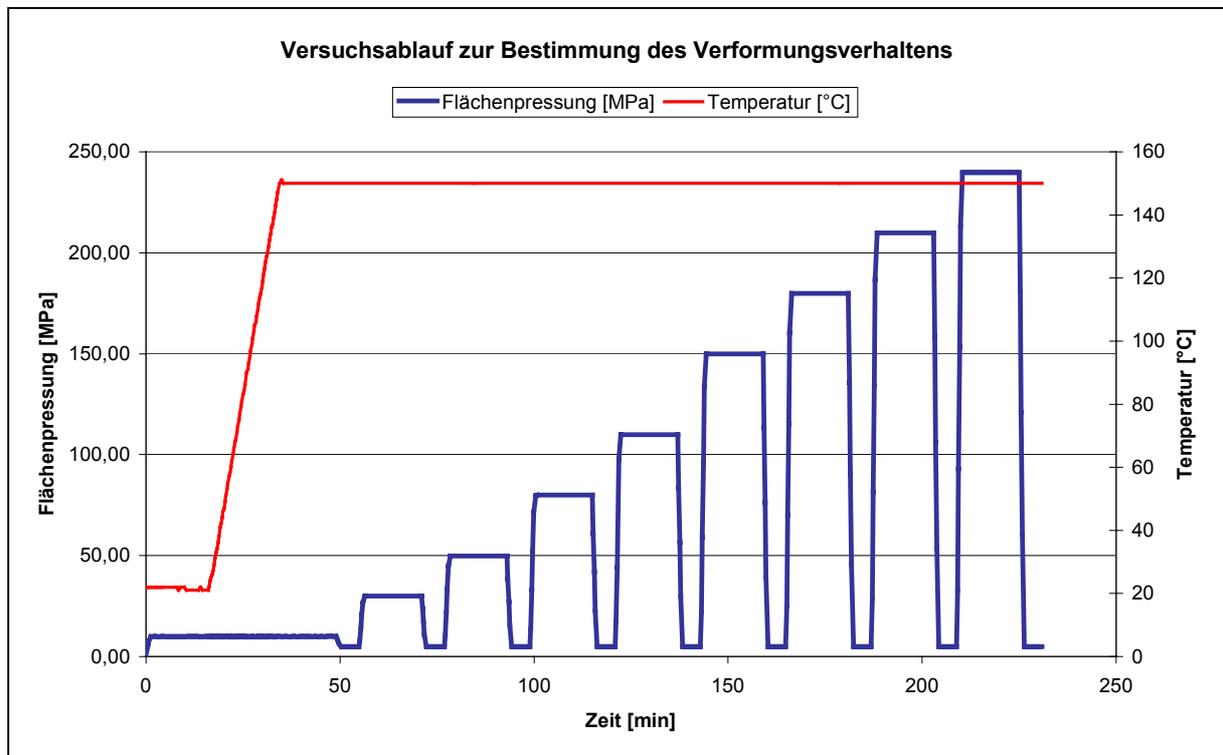


Bild 4: Versuchsablauf zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Flanschdichtungen

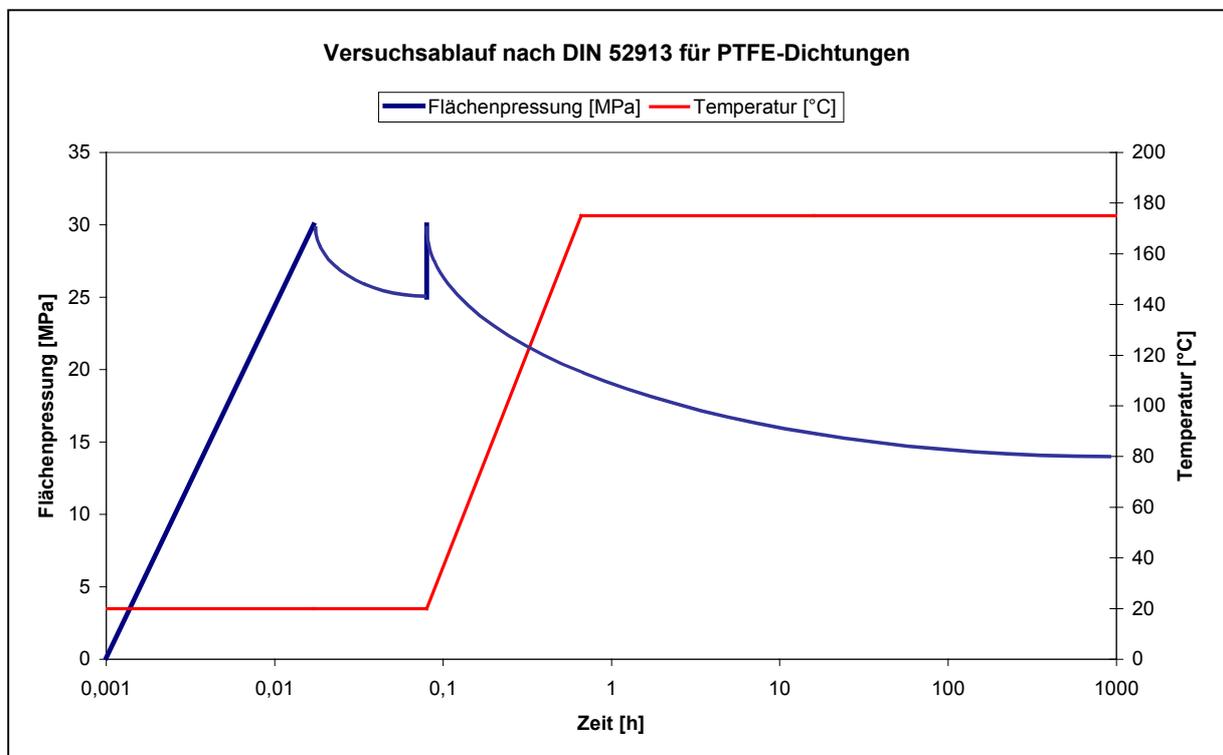


Bild 5: Versuchsablauf zur Bestimmung des Kriech-Relaxationsverhaltens nach DIN 52913

Zur Qualitätssicherung sollen die Kennwerte Kaltsetzwert ε_{KSW} , Kaltrückfederungswert ε_{KRW} , Warmsetzwert $\varepsilon_{WSW/T}$ und Warmrückfederungswert $\varepsilon_{WRW/T}$ dienen. Durch die Druckstandversuche zur Ermittlung der maximal zulässigen Flächenpressung im Einbauzustand σ_{VO} und der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand σ_{BOT} besteht die Möglichkeit, diese Kennwerte abzuleiten. Die Rückfederungswerte sind durch die Versuche zur Bestimmung des Ersatz-Elastizitätsmoduls E_D bestimmbar. Zudem haben sich aufgrund der relativ langen Versuchsdauer diese Versuche nur in Form vergleichender Untersuchungen und nicht, wie beabsichtigt, zur kontinuierlichen Qualitätssicherung durchgesetzt. Aus diesen Gründen wird hier auf diese Versuche nicht näher eingegangen.

3.1.2 Entwurf der europäischen Prüfnorm prEN 13555

Die neue europäische Norm prEN 13555 [51] wird momentan entwickelt, um auf internationaler Ebene verlässliche Dichtungskennwerte für den Teil 2 der DIN EN 1591 [24] zu schaffen. Eine zügige Umsetzung, d.h. eine Definition von Kennwerten und deren Ermittlung, ist unter anderem notwendig, weil die derzeit im Teil 2 der DIN EN 1591 [24] angegebenen Kennwerte nur eingeschränkt verwendet werden können. Die Norm gibt folgende Warnhinweise an:

- 1) „Die in diesem europäischen Vornorm-Entwurf enthaltenen Daten basieren auf Messungen, Erfahrungen und Schätzungen. Obwohl sie als Stand der Technik für Ausgangsmaterialien anzusehen sind, sollten sie nur als allgemeine Empfehlung dienen.“
- 2) „Der Anwender ist gehalten, Dichtungskennwerte zur Verwendung in der Flanschberechnungsmethode nach EN1591-1:2001 vom Dichtungslieferer zu bekommen. Wo dies nicht möglich ist, dürfen die Kennwerte aus diesem Dokument verwendet werden. In diesem Falle sollte der Anwender sicherstellen, daß er über die neueste Fassung dieses Dokumentes verfügt. Im Zweifelsfall erteilt ein nationales Mitglied von CEN Auskunft“ [24].

Die bislang meist verwendete (nur als Vornorm existierende) Berechnungsnorm DIN 2505 [48] wurde bereits im Jahr 2001 durch die EN 1591 [24] ersetzt. Problematisch ist, daß die prEN 13555 [51], welche die Kennwerte für die EN 1591 [24] liefern soll, nach dem ersten Entwurf nochmals komplett überarbeitet wurde. Somit bestand während der Anfertigung dieser Arbeit keine Möglichkeit, verlässliche Kennwerte für die Berechnung zu erhalten.

Wie schon im letzten Abschnitt dargestellt, wurde ein großer Teil der in dieser Arbeit ausgearbeiteten Versuchsmethodiken und Auswertungen in die momentan gültige prEN 13555 [51] übernommen, siehe auch Anhang 5. Das stellt einen wichtigen Beitrag zur Harmonisierung der europäischen Normung für Flanschdichtungen dar. Nachfolgend sind die Kennwerte dieser Norm kurz erläutert:

Das Leckageverhalten wird durch die Kennwerte Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN/L}$ und Mindestflächenpressung im Betriebszustand $Q_{SMIN/L}$ beschrieben. Diese sind bedeutungsgleich mit den Kennwerten $\sigma_{VU/L}$ und $\sigma_{BU/L}$ nach DIN 28090 [22].

Der Leckageversuch wird im Vergleich zur DIN 28090 [22] ähnlich durchgeführt. Änderungen ergeben sich durch die Reduktion der Versuchsstufen (geringerer Zeitaufwand), die vereinfachte Regelung der Prüfanlage durch einen konstanten Innendruck und die Verwendung von Helium anstatt Stickstoff als Prüfgas. Diese Änderung ermöglicht die Arbeit mit Helium-Massenspektrometern. Mit diesen können geringste Leckagen bis 10^{-10} mbar·l/s gemessen werden [59]. Allerdings besteht eine Einschränkung auf Prüfmedien, welche durch Massenspektrometer detektierbar sind. Um die Größenordnung von Leckageraten zu veranschaulichen, ist nachfolgend am Beispiel eines Autoreifens mit 2 bar Innendruck die Leckagerate angegeben, Tabelle 1.

Leckagerate [mg/(s·m)]	Druckabfall [bar]	Zeitraum [Tage]
1,0	0,5	0,03
1,0E-1	0,5	0,31
1,0E-2	0,5	3,13
1,0E-3	0,5	31,32
1,0E-4	0,5	313,15
1,0E-5	0,5	3.131,52
1,0E-6	0,5	31.315,21
1,0E-7	0,5	313.152,09
1,0E-8	0,5	3.131.520,87
1,0E-9	0,5	31.315.208,71
1,0E-10	0,5	313.152.087,10

Tabelle 1: Leckagebeschreibung für einen Autoreifen

Der Umrechnungsfaktor für die hier zugrunde gelegten Parameter von mg/(s·m) auf mbar·l/(s·m) beträgt 1,15 und besitzt damit eine vergleichbare Größenordnung [60].

Aufgrund der äußerst geringen Leckageraten, die mit einem Helium-Massenspektrometer zu messen sind, ist die Forderung nach einer technisch dichten Flanschverbindung mit einer Leckagerate von 10^{-4} mbar·l/(s·m) sicherlich sinnvoll. Zudem sind dadurch Leckmeßmethoden wie die FID-Methode [61] (Auflösung $5 \cdot 10^{-5}$ mbar·l/s) oder die Differenzdruckmethode [62] (Auflösung 10^{-4} mg/(s·m)) weiterhin zulässig.

Um die Meßzeit für die Leckagemessung nach prEN 13555 [51] zu reduzieren, sollte es zulässig sein, die Messungen bei Erreichen einer Leckagerate von 10^{-4} mbar·l/s zu beenden. Es ist davon auszugehen, daß an dieser Stelle eine technisch dichte Flanschverbindung erreicht ist. Geringere Leckageraten sind für Dichtungen, die in dieser Arbeit betrachtet wurden, technisch nicht relevant. Diese Aussage gilt jedoch nicht für Dichtungen aus metallischen Werkstoffen, die in der Hochvakuum- oder der Kerntechnik Verwendung finden.

Die mechanischen Eigenschaften der Dichtungsmaterialien werden durch die Kennwerte maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX} (σ_{VO}), maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} ($\sigma_{BO/T}$), den Kriechrelaxationsfaktor g_c (Δh_D), den y-Achsenabschnitt E_0 und die Steigung K_1 (E_D) des Ersatz-Elastizitätsmoduls sowie durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_G (-) beschrieben. Die vergleichbaren Kennwerte nach DIN 28090 [22] sind in Klammern angegeben. Die wesentlichen Mängel der Verformungsversuche aus der DIN 28090 [22] sollen im Rahmen der Normungsarbeit für die prEN13555 [51] korrigiert werden.

Die Bedeutung und Interpretation der Kennwerte Q_{MAX} (ähnlich σ_{VO} , maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand) und Q_{SMAX} (ähnlich $\sigma_{BO/T}$, maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand) wurden bereits im Abschnitt 3.1.1 kurz diskutiert. Wesentlich ist, daß zurückführend auf diese Arbeit eine mechanische Zerstörung als Kriterium für eine maximal zulässige Flächenpressung festgelegt wurde. Die willkürliche Fixierung auf eine bestimmte Verformungsgrenze, wie noch in der DIN 28090 [22], wurde fallengelassen. Zusammen mit der Ermittlung der Kennwerte E_0 und K_1 , die den Ersatz-Elastizitätsmodul in erster Näherung als empirisch ermittelte Geradengleichung:

$$E_D = K_1 \cdot \sigma + E_0 \tag{6}$$

beschreiben, werden diese Kennwerte in einem einzigen, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Versuchsablauf ermittelt.

Das Kriech-Relaxationsverhalten beschreibt der Kennwert g_c . Anfänglich wurde im Normungsausschuß CEN-TC74-WG8 ein reiner Druckstandversuch favorisiert. Bei experimentellen Vorversuchen ergaben sich vor allem für Dichtungsmaterialien aus PTFE sehr geringe Werte, welche zu unrealistisch hohen Einbauflächenpressungen geführt hätten. Aufgrund der in dieser Arbeit vorgestellten Versuchssystematik und Versuchsergebnisse wurde dieses Vorgehen daraufhin verworfen. An dieser Stelle ist anzumerken, daß die Diskussionen innerhalb der WG 8 des CEN-TC74 bezüglich des Kennwerts g_c zum Zeitpunkt des Abschlusses dieser Arbeit noch nicht endgültig geklärt waren. Änderungen am Versuchsablauf sind nicht zu erwarten. Die mathematische Auswertung ist jedoch noch nicht endgültig geklärt. Durch folgende Gleichung sollte sich nach Ansicht des Autors der g_c -Wert nach prEN13555 [51] errechnen:

$$g_c = \frac{Q_R}{Q_A} \leq 1 \quad (7)$$

Der Kennwert α_G beschreibt das thermische Ausdehnungsverhalten der Dichtstoffe. Da α_G von vielen Werkstoffen aus der einschlägigen Literatur heraus bekannt ist oder nach Normen, z.B. [63], geprüft werden kann, wird in dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen.

3.2 Normung zur Dichtungsberechnung

Die im vorigen Abschnitt behandelten Dichtungskennwerte können zur vergleichenden Betrachtung unterschiedlicher Dichtungen dienen. Darüber hinaus sind gesicherte Dichtungskennwerte, wichtiger noch Kennfunktionen von Dichtungen, die Basis für einen zuverlässigen Festigkeits- und Dichtheitsnachweis einer Flanschverbindung. Die derzeit dafür gültigen Berechnungsverfahren werden nachfolgend kurz behandelt. Auf nicht mehr gültige oder ersetzte Normen wird nur noch eingegangen, wenn es notwendig erscheint.

Im Wesentlichen gibt es vier aktuell gültige Berechnungsverfahren für Flanschberechnungen [64]:

- die „detaillierte/technische“ Vorgehensweise nach DIN EN 1591 [24],
- die „technisch/pragmatische“ Vorgehensweise nach KTA-Regeln [65, 66],
- die „pragmatische“ Vorgehensweise nach ASME-Code [67] und
- die Finite-Elemente- (FE-) Methode in ausgewählten Einzelfällen.

Die DIN EN 1591 [24] entstand zu 60 % aus der ehemaligen DDR-Norm TGL32903/13 [68], zu 20 % aus der DIN 2505 [48] und zu weiteren 20 % aus neuen Arbeiten der CEN-TC74-WG10. Die Norm beruht auf der Elastizitäts- und Traglasttheorie. Mit dieser Norm ist sowohl ein Festigkeits-, als auch ein Dichtheitsnachweis möglich. Die Dichtungskennwerte für die Berechnung soll die prEN 13555 [51] liefern. Im Vergleich zu den anderen oben genannten Auslegungsverfahren ergeben die Berechnungen nach DIN EN 1591 [24] meist günstigere Ergebnisse [69], d.h. die Auslastungen sind geringer. Das liegt vor allem daran, daß eine reduzierte Dichtungsbreite aufgrund der Flanschblattneigung errechnet wird und sich dadurch die notwendige Kraft zur Vorverformung der Dichtung reduziert [70, 71]. Aus Gründen der Sicherheit, aber auch um geringste Leckagen zu erreichen, bietet sich bei der Berechnung, eine iterative Vorgehensweise an. D.h. man geht von einer möglichst hohen Auslastung der Schrauben, z.B. nach VDI 2230 [72], der Flansche oder der Dichtung aus und reduziert diese solange, bis alle Auslastungsgrade im zulässigen Bereich sind.

Die neue europäische Norm DIN EN 1591 [24] wird jedoch nur Anerkennung finden, wenn Berechnungen durchgeführt werden können, welche die Realität einer Flanschverbindung widerspiegeln. Realitätsnahe Berechnungen sind aber nur möglich, wenn gesicherte Kennwerte, die aus Kennfunktionen zu berechnen sind, für die Dichtungen zur Verfügung stehen. Das wiederum ist nur ausführbar, wenn Versuchsabläufe definiert werden, die das Verformungs- und Leckageverhalten einer Dichtung richtig simulieren können. Darüber hinaus ist eine richtige und praxisnahe dichtungstechnische Interpretation der Versuchsergebnisse erforderlich.

Die KTA-Regeln basieren mit geringen Modifikationen auf der Traglasttheorie der DIN 2505 [48]. Durch diese Regeln ist es nach wie vor möglich, Festigkeits- und Dichtheitsnachweise auf Basis der DIN 2505 [48] zu führen, obwohl diese durch die EN 1591 [24] ersetzt wurde. Der Einsatz wird jedoch auf kerntechnische Anlagen beschränkt bleiben. Die Dichtungskennwerte für einen Dichtheitsnachweis liefert für die KTA-Regeln die DIN 28090 [22]. Berechnungen nach den KTA-Regeln sind noch relativ übersichtlich und können, im Gegensatz zur EN 1591 [24], grundsätzlich per Hand durchgeführt werden.

Die weltweit am meisten angewandte Berechnungsmethode für Flanschverbindungen liefert der amerikanische ASME-Code. Die auf der Elastizitätstheorie beruhende Methode führt zu kräftigen Flanschen mit hoher Steifigkeit in Verbindung mit einer möglichst hohen Vorspannung im Einbauzustand. Die hohe Vorspannung im Einbau (pragmatische Vorgehensweise) ist der Hauptgrund für die bisher positiven Betriebserfahrungen [64]. Mit dem ASME-Code ist nur ein pauschaler Festigkeitsnachweis, kein Dichtheitsnachweis, möglich. Das liegt an den in der

Norm verwendeten Dichtungskennwerten m und y , die keinen Bezug auf eine bestimmte Leckage erlauben. Der y -Wert entspricht vom Verständnis her $Q_{MIN(L)}$, der m -Wert $Q_{SMIN(L)}$. Da die Berechnungsmethode nur „formal“ ist, handelt es sich bei den Kennwerten um geschätzte Werte, die nicht im Versuch bestimmt werden können [46]. Der bestehende ASME-Code betrachtet somit nicht die dichtungstechnische Seite einer Flanschverbindung. Statt dessen wird lediglich berechnet, daß sich die Flanschverbindung nicht öffnet und somit Ausblassicherheit gegeben ist [73]. Um eine leckagebezogene Berechnung zu ermöglichen, wurde von der ASME (The American Society of Mechanical Engineers) der sogenannte ROTT-Test (Room temperature Operational Tightness Test) entwickelt. Der ROTT-Test beschreibt über die Parameter G_b und a das Einbauverhalten, über den Kennwert G_s das Betriebsverhalten eines Dichtungsmaterials. Da es bisher nicht gelang, eine gültige Norm zu erstellen, dienen die Kennwerte, die bereits seit 1979 existieren, nur der Vergleichbarkeit von Dichtungsmaterialien [73].

4 Notwendige Kennwerte und Kennfunktionen für Flanschdichtungen

Bei Kennwerten muß man in die Definition des Kennwerts und die Interpretation desselben unterscheiden. Beispielsweise ist die Definition des Kennwertes für die maximal zulässige Flächenpressung Q_{SMAX} einer Dichtung über die Bezeichnung „maximal zulässige Flächenpressung“ gegeben. Wie nun die maximale Flächenpressung versuchstechnisch bestimmt wird und welche Versuchsergebnisse als „maximaler Wert“ zulässig sind, ist interpretationsfähig. Hier versucht die vorliegende Arbeit, Klarheit zu schaffen. In diesem Abschnitt werden zuerst die Definitionen für die Kennwerte bzw. Kennfunktionen aus den bisherigen Arbeiten und Normen abgeleitet und die vermutlich relevanten Einflußgrößen bestimmt. Die technisch richtige Interpretation der Kennwerte (Versuchsablauf und Auswertung) ist in Abschnitt 9 beschrieben.

4.1 Kennwerte für Flanschdichtungen

Die Definitionen der Kennwerte wurden in erster Linie den bisherigen Normen entnommen. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Kennwerte dienen sowohl der aktuell gültigen Flanschberechnung als auch der vergleichenden Betrachtung von Dichtungen.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß einzelne Kennwerte keinen umfassenden Vergleich verschiedener Dichtungsmaterialien zulassen. Vielmehr sind die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kennwerten bzw. Kennfunktionen einzubeziehen. Zum Beispiel kann eine hohe Rückverformung (geringer E-Modul) eines Dichtungsmaterials während des Betriebs vordergründig gut erscheinen. Bei hoher Empfindlichkeit gegen Zusatzlasten (hohe plastische Verformung) kann das Dichtungsmaterial schlechter sein als ein Material mit geringer Rückverformung und gleichzeitig geringer Verformung unter Zusatzlasten. Hierdurch wird die Entlastung der Dichtung geringer.

Auf die Rückverformung der Dichtung (E-Modul) wird in dieser Arbeit nicht ausdrücklich eingegangen, da die zusätzliche Verformung unter Betriebsbedingungen einen deutlich größeren Einfluß auf eine Dichtverbindung hat als die Rückverformung, siehe Abschnitt 9.1.2.4.

Nachfolgend sind die in dieser Arbeit beschriebenen Zielgrößen der Kennfunktionen aufgelistet, welche für eine umfassende Bewertung von Flanschdichtungen, die sich im Krafthauptschluß befinden, notwendig sind:

- Maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX}
- Maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX}
- Restflächenpressung im Betriebszustand Q_R , Kriech-Relaxationsverhalten
- Minimal notwendige Flächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN(L)}$
- Minimal notwendige Flächenpressung im Betriebszustand $Q_{SMIN(L)}$

Um Kennfunktionen für oben genannte Zielgrößen, z.B. die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} schaffen zu können, ist es notwendig, die mutmaßlichen Einflußgrößen zu kennen. Das sind z.B. für Q_{SMAX} die Dichtungsdicke h_{D0} , Dichtungsbreite b_D , die Rauigkeit der Dichtflächen R_z und die Temperatur ϑ .

4.2 Einflußgrößen auf die Kennwerte von Flanschdichtungen

Um Kennfunktionen erstellen zu können, ist es erforderlich, alle Einflußgrößen zu kennen, die eine Änderung der Zielgröße bewirken können. Wie stark (signifikant) sich eine Änderung der Einflußgröße auf die Zielgröße auswirkt, ist dabei noch nicht festgelegt. Erst die Modellierung schafft die Möglichkeit, signifikante von weniger signifikanten Einflußgrößen zu unterscheiden und diese auch, was für das Verständnis des Modells besonders wichtig ist, durch eine Transformation der Einstellwerte quantitativ darzustellen.

Nachfolgend sind für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Zielgrößen die mutmaßlichen Einflußgrößen aufgeführt.

4.2.1 Einflußgrößen auf die maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand

In der Regel werden Flanschdichtungen beim erstmaligen Einbau bzw. beim Dichtungsaustausch bei Umgebungstemperatur eingebaut. Deshalb hat die Temperatur keinen Einfluß auf die maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX} . Legt man die mechanische Zerstörung als Kriterium für das Versagen an, so ergeben sich, ohne Berücksichtigung der Eigenschaften des Dichtungsmaterials, als mutmaßliche Einflußgrößen für Q_{MAX} , siehe auch [22, 51]:

- Dichtungsbreite b_D
- Dichtungshöhe h_{D0}
- Rauigkeit der Dichtflächen R_Z
- Flanschblattneigung.

Die drei zuerst genannten Einflußgrößen wurden in dieser Arbeit berücksichtigt. Die Flanschblattneigung kann ggf. über die reduzierte, effektive Dichtungsbreite, welche nach [24] eine Funktion der Flanschblattneigung ist, bei der Bestimmung der maximal zulässigen Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX} berücksichtigt werden. Aufgrund der reinen axialen Belastung kann zudem davon ausgegangen werden, daß der Dichtungsdurchmesser eine untergeordnete Rolle spielt.

4.2.2 Einflußgrößen auf die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand

Es ist davon auszugehen, daß die Betriebstemperatur einen großen Einfluß auf das mechanische Verhalten von Weichstoffdichtungen besitzt. Das gründet sich auf Untersuchungen der einschlägigen Literatur für Dichtungen aus PTFE, aber auch auf Untersuchungen vorangegangener Arbeiten [74]. Sogar mit Dichtungen aus expandiertem Graphit, die normalerweise sehr unempfindlich gegen die hier betrachteten Temperaturen sind, wurde ein temperaturabhängiges Verhalten festgestellt [14].

Aus den oben genannten Untersuchungen und aus [22, 51] ergeben sich, abgesehen von den unterschiedlichen Dichtungswerkstoffen, folgende Einflußgrößen auf Q_{SMAX} :

- Dichtungsbreite b_D
- Dichtungshöhe h_{D0}
- Rauigkeit der Dichtflächen R_Z
- Temperatur ϑ
- Flanschblattneigung.

Für die Flanschblattneigung gelten die gleichen Überlegungen wie im Abschnitt 4.2.1 für die maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX} . In der DIN 28090 [22] sind zusätzlich zu den oben genannten Einflußgrößen die Temperaturführung, die Beanspruchungsdauer bzw. die Beanspruchungsrate [51] mit angegeben.

Bei den experimentellen Versuchen zeigte sich, daß die Beanspruchungsdauer lediglich bei Dichtungen auf Basis von Aramidfasern bezüglich Q_{SMAX} zeitabhängig ist. Das liegt vor allem an

der Nachvulkanisation des elastomeren Bindemittels in den Dichtungen. Da diese Dichtungsart in dieser Arbeit nur am Rande Beachtung fand, wurde diese Einflußgröße im Prüfprogramm nicht berücksichtigt.

Beim hier vorgestellten Versuchsablauf wurde bereits zu Beginn die Temperatur bei geringer Flächenpressung aufgebracht und danach bis zum Ende des Versuchs konstant gehalten. So konnte der Einfluß der Temperaturführung ausgeschaltet werden.

4.2.3 Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten

Unter Kriech-Relaxation versteht man eine steifigkeitsabhängige Verringerung der Dichtflächenpressung bei gleichzeitiger Dickenabnahme der Dichtung. Alle Dichtungen, die sich im Kraft Hauptschluß befinden, erfahren diese Verformungsart. Dichtungen, die einer Kriech-Relaxation unterliegen, befinden sich somit im Übergangsbereich zwischen dem reinen Kriechen (= Retardation) und der reinen Relaxation, siehe Anhang 6. Zu weiterführenden Ausführungen siehe [42].

Bisherige Untersuchungen [13, 20 und 21] stützen sich vor allem auf Untersuchungen nach DIN 52913 [43]. Anhand von Prüfständen nach dieser Norm ist es möglich, mit einer Steifigkeit von ca. 150 kN/mm zu prüfen, was den untersten (nachgiebigsten) Bereich der vorhandenen Flansche darstellt. Laut DIN 28090 [22] erstreckt sich die Flanschsteifigkeit von 150 kN/mm bis zu 1000 kN/mm. Dieser Bereich wurde in der vorliegenden Arbeit experimentell getestet.

Unter Beachtung der einschlägigen Normen ergeben sich ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Dichtungsmaterialien folgende Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten:

- Dichtungsbreite b_D
- Dichtungshöhe h_{D0}
- Rauigkeit der Dichtflächen R_z
- Temperatur ϑ
- Einbauflächenpressung Q_A
- Steifigkeit des verspannten Systems C .

Die DIN 28090 [22] definiert zudem noch die Beanspruchungsdauer. Sowohl in dieser Arbeit als auch in vorausgegangenen Arbeiten zeigte sich, daß bereits kurz nach Eintreten der Betriebstemperatur der größte Teil der Verformung und damit der reduzierten Flächenpressung erreicht wurde [13, 20, 21 und 58]. Die in dieser Arbeit gewählte Versuchsdauer von 6 Stunden ist unter diesem Gesichtspunkt als ausreichend zu betrachten.

4.2.4 Einflußgrößen während des Dichtungseinbaus auf das nachfolgende Leckageverhalten im Betriebszustand

Die Bezeichnung „Mindestflächenpressung im Einbauzustand“ wurde in der Überschrift dieses Abschnitts bewußt vermieden, da Dichtungen immer ohne Innendruckbelastung eingebaut werden und somit in diesem Zustand keine Leckage auftreten kann. Ein Flanschsystem zeigt erst eine Leckage, nachdem die Anlage in Betrieb gegangen ist. Es muß also in eine Leckage unterschieden werden, die sich kurz nach dem Einbau ergibt und eine Leckage, die sich unter Temperatur- und mechanischen Zusatzlasten im nachfolgenden Betrieb einstellt.

Trotz der Betriebsleckage ist die Leckage kurz nach dem Einbau der Dichtung bei der Einbauflächenpressung Q_A die bedeutendere. Der Einbau einer Dichtung und die hier aufgebrauchte Flächenpressung sind entscheidend für die im Betrieb auftretenden Emissionen und die Betriebssicherheit des Flanschsystems.

Dabei muß in Dichtungen unterschieden werden, die nach der ersten Temperaturbelastung, z.B. bei Flanschen aus Email, nachgezogen werden müssen und Dichtungen, die nicht nachgezogen werden müssen. Das ist normalerweise bei Stahlflanschen der Fall. Dieser konservative Fall wird in dieser Arbeit betrachtet.

Die nachstehend aufgeführten Einflußgrößen haben eine Auswirkung auf die Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN(L)}$, ohne dabei die unterschiedlichen Dichtungsmaterialien zu berücksichtigen:

- Dichtungsbreite b_D
- Dichtungshöhe h_{D0}
- Rauigkeit der Dichtflächen R_z
- Innendruck p_i
- Dichtheitsklasse L
- Prüfmedium.

In dieser Arbeit wurden die vier zuerst genannten Einflußgrößen untersucht. Da ein Ziel dieses Beitrags ein optimierter Einbau von Flanschdichtungen ist, soll sich dadurch eine geringst mögliche Leckage ergeben. Vom Anwender der Dichtung ist lediglich die Zulässigkeit der erreichten Dichtheitsklasse mit den in den jeweiligen Vorschriften geforderten Dichtheitsklassen zu vergleichen. Bezüglich des Prüfmediums Stickstoff N_2 gelten ähnliche Überlegungen. Für Gase kann mit gängigen Berechnungsmodellen eine überschlägige Berechnung durchgeführt werden [12, 19 und 41]. Bezogen auf flüssige Medien sind die hier errechneten Leckagewerte

aufgrund deutlich höherer Viskosität und Dichte als konservativ anzusehen, d.h. die Leckagen mit Flüssigkeiten sind geringer als bei Gasen.

4.2.5 Einflußgrößen auf das Leckageverhalten im Betriebszustand

Wie im Abschnitt 4.2.4 erwähnt, kann der Anwender in der Regel die sich einstellende Leckage im Betriebszustand $Q_{SMIN(L)}$ nicht mehr beeinflussen. Sie ist vielmehr das Resultat der Qualität des Dichtungseinbaus und der mechanischen Eigenschaften der Dichtung. Das heißt, die Dichtung muß während des Betriebes die Eigenschaft besitzen, das Belastungsregime zu ertragen. Das können zusätzliche Verformungen durch Temperaturexpansionen der Rohrleitung, Kriech-Relaxationserscheinungen und/oder von außen aufgebrachte Kräfte und Momente auf die Rohrleitung sein. Letztlich wird sich eine bestimmte Flächenpressung einstellen, die für die Leckage im Betrieb verantwortlich ist. Um die sich einstellende reduzierte Dichtflächenpressung zu simulieren, sollten ohne Berücksichtigung des Dichtungsmaterials folgende Einflußgrößen variiert werden [22, 51].

- Dichtungsbreite b_D
- Dichtungshöhe h_{D0}
- Rauigkeit der Dichtflächen R_z
- Innendruck p_i
- Einbauflächenpressung Q_A
- Dichtheitsklasse L
- Prüfmedium
- Temperatur ϑ
- Beanspruchungsdauer t .

In der vorliegenden Arbeit wurden die ersten fünf Einflußgrößen untersucht. Für die Dichtheitsklasse und das Prüfmedium gelten die gleichen Bemerkungen wie für die Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN(L)}$. Die vorangegangene Dichtflächenpressung ergibt sich automatisch durch den optimierten Einbau und wird durch die Versuchsdurchführung beschrieben. Die Temperatur und die Beanspruchungsdauer müssen in Wechselwirkung zueinander gesehen werden. Beide Einflußgrößen bewirken sowohl eine physikalische Veränderung des Betriebsmediums (Dichte und Viskosität) als auch der Dichtung. Die Dichtung erfährt durch die Betriebstemperatur und die Beanspruchungsdauer eine Verringerung der Dichtungshöhe. Damit geht bei weiterer guter Oberflächenanpassung eine Verringerung des

Leckkanalradius r einher. Dieser Radius ist wiederum die bedeutendste Einflußgröße auf die Leckage, siehe Gleichung (5). Experimentelle Untersuchungen zeigten, daß trotz reduzierter Flächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge eine deutlich geringere Leckage durch die geprüfte Dichtung aus ePTFE auftrat, siehe Anhang 7 [75]. Dieses Verhalten von Weichstoffdichtungen erfordert noch weitere, diese Arbeit ergänzende und über sie hinausgehende wissenschaftliche Untersuchungen.

5 Berechnungsalgorithmus zum Dichtheits- und Festigkeitsnachweis für Flanschdichtungen

Der in diesem Abschnitt beschriebene Algorithmus zum optimierten Einbau und Betrieb einer Flanschdichtung stellt einen Vorgriff auf die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse dar.

Das Interesse konzentriert sich vor allem auf die Anwender von Flanschdichtungen, denen eine übersichtliche und einfache Möglichkeit an die Hand gegeben werden soll, um das Dichtsystem an seine Erfordernisse anzupassen. Im Abschnitt 10 wurde hierzu eine Software erstellt, die dem Optimierungsalgorithmus aus diesem Abschnitt folgt und auf den in dieser Arbeit erhaltenen Erkenntnissen basiert.

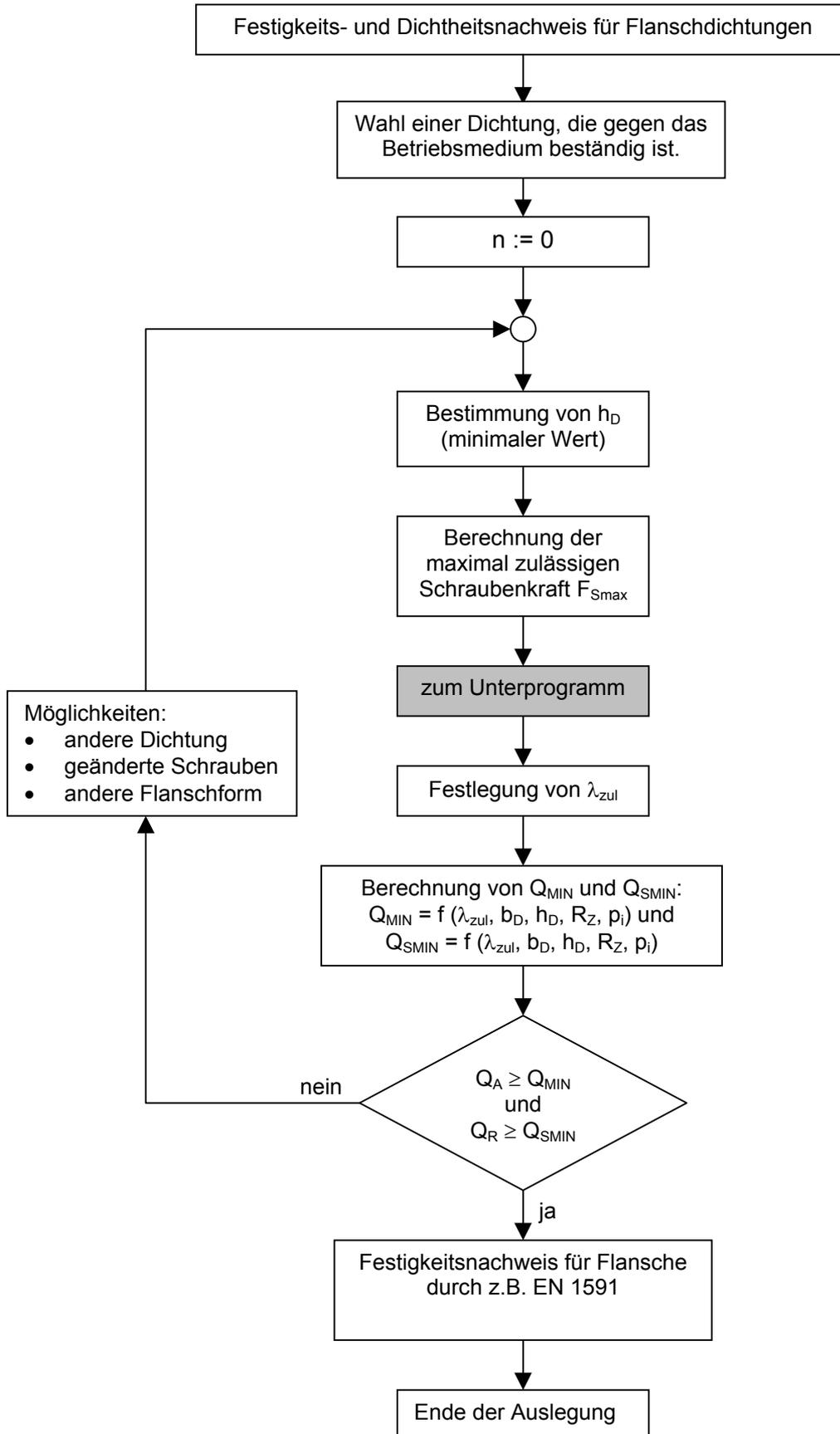
Um einen optimierten Einbau einer Flanschdichtung zu ermöglichen, müssen deshalb sowohl Kennfunktionen, die das Leckageverhalten als auch Kennfunktionen, die das Verformungsverhalten einer Dichtung beschreiben, erstellt und im Zusammenhang miteinander betrachtet werden. Das Ziel der Optimierung zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

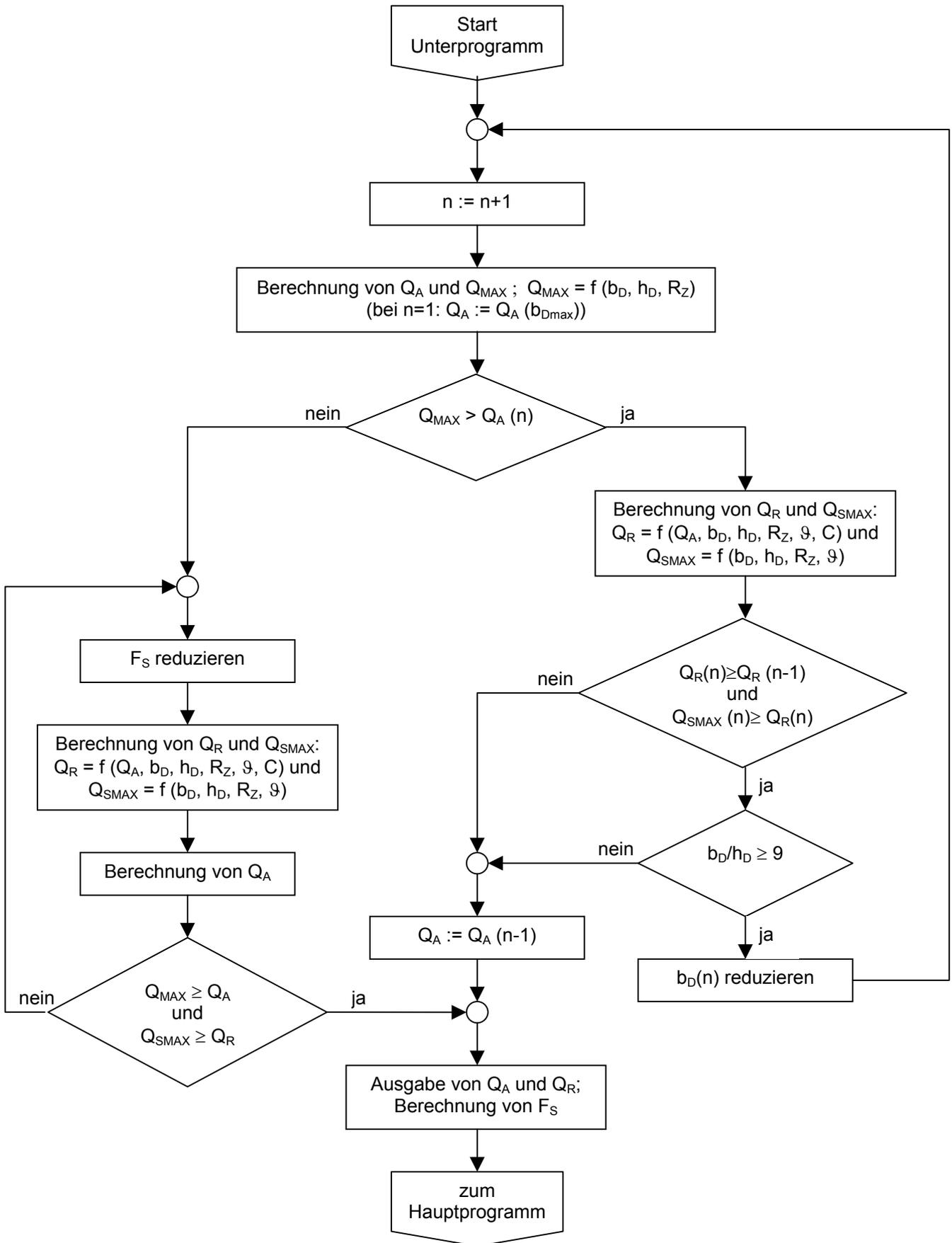
Geringst mögliche Leckage in Verbindung mit höchstmöglicher Sicherheit gegen ein Ausblasen der Dichtung, welche sich unter Berücksichtigung der optimierten Einsatzbedingungen der am Dichtsystem beteiligten Elemente ergibt.

Ist die Optimierung aus dichtungstechnischer Sicht abgeschlossen, kann der Festigkeitsnachweis für Flansche und Schrauben im Anschluß an die Optimierung mit den im Abschnitt 3.2 gegebenen Regelwerken geführt werden.

Nachfolgend ist im Abschnitt 5.1 der Berechnungsalgorithmus (in Form eines Flußdiagramms) dargestellt, welcher im Abschnitt 5.2 ausführlich diskutiert wird.

5.1 Flußdiagramm zum optimierten Dichtsystem für Flanschdichtungen





5.2 Erläuterungen zum Berechnungsalgorithmus

Der erste Schritt bei der Auswahl einer Dichtung ist die Überprüfung der chemischen Eignung einer Dichtung. Dabei sollten sowohl die Beständigkeit gegen das Betriebsmedium als auch die Langzeitbeständigkeit (Alterung) gegenüber Umwelteinflüssen, wie Sonnenstrahlung etc., in die Dichtungsauswahl mit eingehen. In der Regel ist die Beständigkeit für Dichtungen aus PTFE und expandiertem Graphit inklusive deren Füll- und Verstärkungstoffe hinlänglich bekannt. Bei Dichtungen auf Basis von Fasermaterialien müssen außer den Alterungserscheinungen durch Umwelteinflüsse auch die im Betriebsmedium mitgeführten Zusatzstoffe, wie z.B. Lösungsmittel, in die Auswahl einbezogen werden. Im allgemeinen sind Beständigkeitslisten von den Herstellern verfügbar. Deshalb wird auf diesen Punkt nicht gesondert eingegangen.

Im nächsten Schritt ist die Auswahl einer möglichst geringen Dichtungshöhe h_{D0} entscheidend. Die Auswahl richtet sich vor allem nach den Makrounebenheiten (Welligkeit) der Dichtflächen. In [76] wurden für Stahlflansche empfohlene Dichtungsdicken hergeleitet. Dabei wird beispielsweise für Nennweiten unter DN 200 eine Dichtungsdicke von 1,5 mm empfohlen. Grundsätzlich muß man in folgende hauptsächlich verwendete Flanschtypen unterscheiden:

- Stahlflansche
- Emailflansche
- Glasfaserverstärkte Flansche (GFK-Flansche) mit Auskleidung (Inliner).

Darüber hinaus gibt es noch Stahlflansche mit Auskleidungen aus PTFE oder Elastomeren sowie Flansche aus reinen Kunststoffen, wie z.B. PP, PVC oder PVDF.

Die Welligkeit der Flansche wird entweder in einschlägigen Normen angegeben [77], oder es liegen Erfahrungen aus der Praxis vor, die auch einen winkligen Versatz der Flansche berücksichtigen. Grundsätzlich ist jedoch festzustellen, daß insbesondere für Email- und GFK-Flansche noch ein erheblicher Forschungsbedarf besteht. Durch Diskussionen aus der Praxis kann allgemein davon ausgegangen werden, daß Flansche aus Stahl oder GFK mit gleichen Dichtungsdicken betrieben werden können. Aufgrund der herstellungsbedingten hohen Welligkeiten bei Emailflanschen sind hier dickere Dichtungen anzuwenden.

Wie in den folgenden Abschnitten hergeleitet, hat der Einsatz einer dünnen Dichtung folgende Vorteile:

- geringere Leckage im Betrieb,
- höhere Restflächenpressung im Betriebszustand,
- geringere Empfindlichkeit gegen Zusatzlasten, hervorgerufen durch Temperaturdehnungen oder äußere Kräfte und Momente auf der Rohrleitung und
- höhere Sicherheit gegen das Ausblasen der Dichtung.

Nach der Auswahl der Dichtungsdicke muß die maximal mögliche Schraubenkraft für die jeweiligen Flansche bestimmt werden. Für genormte Stahlflansche wurden bereits von mehreren Autoren die maximal möglichen Flächenpressungen berechnet [78]. Eine möglichst hohe Schraubenkraft wird gewählt, weil eine hohe Schraubenkraft bzw. eine dementsprechend hohe Dichtungspressung, wie in den nachfolgenden Abschnitten hergeleitet, die gleichen positiven Auswirkungen wie eine bereits oben erwähnte dünne Dichtung hat.

Im nächsten Schritt wird die iterative Optimierung durchlaufen. Auf Basis der maximalen Schraubenkraft F_{Smax} und der maximal zur Abdichtung beitragenden Dichtungsbreite $b_{Dmax}(n)$ ist die Einbauflächenpressung $Q_A(n)$ zu berechnen und mit der berechneten maximal zulässigen Flächenpressung $Q_{MAX}(n)$ zu vergleichen. Die Wahl der maximal möglichen Dichtungsbreite b_{Dmax} im ersten Schritt der Iteration erfolgt, weil eine große Dichtungsbreite ähnlich positive Eigenschaften wie eine dünne Dichtung und eine hohe Flächenpressung hat. Jedoch ist die Signifikanz, d.h. die Auswirkung, der Dichtungsbreite in Bezug auf die Zielgrößen Leckage, Restflächenpressung und zusätzliche Verformung deutlich geringer als die Einbauflächenpressung Q_A und die Dichtungsdicke h_{D0} .

Trifft die Aussage:

$$Q_{MAX}(n) > Q_A(n) \quad (8)$$

zu, besteht die Möglichkeit, bei gleicher Schraubenkraft die Einbauflächenpressung Q_A über eine Reduzierung der Dichtungsbreite b_D zu erhöhen. Weiterhin wird auf Basis dieses Iterationsschritts die Restflächenpressung Q_R mit:

$$Q_R = f(Q_A, b_D, h_D, R_Z, \vartheta, C) \quad (9)$$

und die maximal zulässige Flächenpressung Q_{SMAX} mit:

$$Q_{SMAX} = f(b_D, h_D, R_Z, \vartheta) \quad (10)$$

berechnet. Daraufhin sind die nachstehend aufgeführten Gleichungen zu überprüfen:

$$Q_R(n) \geq Q_R(n-1) \quad (11)$$

$$Q_{SMAX}(n) > Q_R(n) \quad (12)$$

Gleichung (11) vergleicht, ob sich die Restflächenpressung Q_R bei den jeweiligen Iterationsschritten verringert oder erhöht hat. Gleichung (12) vergleicht die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} mit der Restflächenpressung Q_R . Ist sowohl die Restflächenpressung des aktuellen Iterationsschritts höher als die des letzten als auch die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} nicht überschritten, kann die Dichtungsbreite b_D reduziert werden, um eine höhere Flächenpressung zu erreichen. Trifft eine der Aussagen in den Gleichungen (11) und (12) nicht zu, ist die optimale Dichtungsbreite in Verbindung mit der maximal möglichen Schraubenkraft erreicht.

Darüber hinaus darf eine gewisse Dichtungsbreite nicht unterschritten werden. Die experimentellen Versuche dieser Arbeit zeigten, daß für ePTFE-Dichtungen das Verhältnis $b_D : h_{D0}$ von 3 : 1 noch zulässig ist, da sich die Dichtungshöhe im gepreßten Zustand auf ca. 1/3 der Ausgangshöhe verringert. Umgerechnet auf relativ harte Dichtungen, wie z.B. PTFE- oder Faserdichtungen, ergibt sich somit ein minimal zulässiges Breiten-Dicken-Verhältnis von 9 : 1.

Ist im Gegensatz zum rechten Iterationsast aus Abschnitt 5.1 Gleichung (8) nicht erfüllt, d.h. die maximal zulässige Flächenpressung während des Einbaus Q_{MAX} ist entweder bei der maximal möglichen Dichtungsbreite b_{Dmax} oder bei der oben beschriebenen Iteration überschritten, muß die bisher gewählte maximale Schraubenkraft reduziert werden. Dabei werden b_{Dmax} bzw. die Dichtungsbreite des letzten Iterationsschrittes $b_D(n)$ beibehalten. Als Abbruchkriterium der Iteration gelten die Gleichungen (14) und (15):

$$Q_{MAX}(n) \geq Q_A(n) \quad (13)$$

$$Q_{SMAX}(n) > Q_R(n) \quad (14)$$

Solange nicht beide Gleichungen erfüllt sind, muß die Schraubenkraft herabgesetzt werden. Dabei sind Randbedingungen wie die Mindestauslastung der Schrauben zu beachten [72].

Nach Abschluß der Iterationen werden auf Basis der Schraubenkraft, der geometrischen Bedingungen von Dichtfläche und Dichtung sowie der Betriebstemperatur die Einbaufächenpressung und die Restflächenpressung bestimmt.

Im darauffolgenden Schritt sind für eine bestimmte Leckageklasse λ_{zul} die minimal notwendigen Flächenpressungen im Einbau und Betrieb nach folgenden Gleichungen zu bestimmen:

$$Q_{MIN(L)} = f(\lambda_{zul}, b_D, h_D, R_Z, p_i) \quad (15)$$

$$Q_{SMIN(L)} = f(\lambda_{zul}, b_D, h_D, R_Z, p_i) \quad (16)$$

Die Gleichungen (15) und (16) sind für den Einbauzustand und den Betriebszustand mit den Gleichungen (17) und (18) zu vergleichen:

$$Q_A \geq Q_{MIN(L)} \quad (17)$$

$$Q_R \geq Q_{SMIN(L)} \quad (18)$$

Sind beide Gleichungen erfüllt, ist der Dichtheitsnachweis für die Flanschverbindung und der Festigkeitsnachweis für die Dichtung erbracht. Als abschließende Maßnahme ist der Festigkeitsnachweis für den Flansch, z.B. nach EN 1591 [24] zu führen.

Ist eine der Gleichungen (17) oder (18) nicht erfüllt, müssen die Festigkeits- und Dichtheitsnachweise z.B. über eine andere Dichtung, eine geänderte Schraubenqualität oder eine andere Flanschform erbracht werden.

6 Beschreibung der in der Praxis angewendeten Einsatzgrenzen von Flanschdichtungen

Für experimentelle Arbeiten ist es unerlässlich, die Randbedingungen hierzu möglichst genau zu kennen. Ein Teil der Randbedingungen ist durch die Meß- oder Prüfbereiche, welche für die Einfluß- und Zielgrößen maßgebend sind und die gängigen Prüfmaterialien (hier: Flanschdichtungen) gegeben.

Sind die notwendigen Meßbereiche und Prüfmaterialien bekannt, kann man die Prüfstände an diese Gegebenheiten anpassen und die Experimente danach planen. Darüber hinaus werden die experimentellen Ergebnisse für den in der Industrie akzeptierten Bereich ermittelt.

Um das Verhalten von Flanschdichtungen beschreiben zu können, ist es zunächst wichtig zu wissen, welche Flanschtypen eingesetzt werden. Dieses Kenntnis ist relativ einfach zu erlangen, da hierfür Normen geschaffen wurden, denen die Anwender in der Regel folgen. Die aktuell gültige Norm für Flansche aus Stahl, von denen sich auch die Normen für Emailflansche und Kunststoffflansche bezüglich der Dichtungsgeometrie ableiten, ist durch die harmonisierten europäischen Normen für Flansche und Dichtungen mit PN-Bezeichnung (ähnlich DIN) und Flansche und Dichtungen mit Class-Bezeichnung (ähnlich ANSI) gegeben. Aus diesen Normen lassen sich die

- Standardgeometrie (d_i , d_a und b_D und R_z) der Dichtung bzw. der Flansche und die
- möglichen Schraubenkräfte bzw. die Dichtflächenpressung

ableiten. Auf bereits ersetzte DIN-Normen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Weitere Ausführungen dazu mit detaillierten Angaben zu den Normen siehe [79].

Kenntnis über die hauptsächlich verwendeten Dichtungsarten, der Einsatztemperatur und des Innendrucks ist nicht aus Normen oder Regelwerken zu erhalten. Das ist vielmehr den sogenannten „Rohrklassen“ der chemischen Industrie zu entnehmen. In der Regel enthalten diese Rohrklassen Angaben über

- das Rohrleitungsmaterial,
- den Dichtungstyp inkl. Aufbau und Kennzeichnung,
- das Betriebsmedium,
- den zulässigen Innendruck und
- die zulässige Betriebstemperatur.

Darüber hinaus sind oftmals Angaben über den Dichtungseinbau, den Lieferanten der Dichtung u.ä. zu finden.

Diese Rohrklassen sind öffentlich meist nicht zugänglich, da sie Eigentum der Unternehmen darstellen und zum Know-how der Firmen gehören. Deshalb wurden Fachleute aus den Bereichen Normung und/oder Werkstofftechnik (Dichtungsfachleute) der chemischen und pharmazeutischen Industrie über die oben genannten Einsatzbedingungen befragt. Der Fragebogen ist in Anhang 8.1 bis Anhang 8.3 einzusehen.

6.1 Bestimmung der Dichtungshauptgruppen

Nach dem Asbestverbot haben sich die im Anhang 8 dargestellten Dichtungen als Standarddichtungen etabliert. Lediglich bei Stahlflanschen werden zusätzlich zu den im Fragebogen aufgeführten Dichtungen häufiger Hüllringdichtungen mit PTFE-Hülle und verschiedenen Einlagen verwendet [80]. Vereinzelt kommt es auch zum Einsatz von Kammprofildichtungen [81].

Grundsätzlich lassen sich die Dichtungen aus Anhang 8 in folgende Dichtungshauptgruppen einteilen:

- homogene Dichtungen
- quasihomogene Dichtungen
- inhomogene Dichtungen [42].

Man spricht von einem homogenen Dichtungswerkstoff, wenn die Dichtung nur aus einem Material besteht. Typische Vertreter dieser Dichtungsgruppe sind ePTFE- und gesinterte Dichtungen aus reinem oder chemisch modifiziertem PTFE.

Quasihomogene Dichtungswerkstoffe liegen dann vor, wenn die Bestandteile der Dichtung aus einem Gemenge bestehen, das mechanisch nicht mehr in seine Einzelbestandteile zerlegt werden kann. Beispiele hierfür sind Dichtungen aus gefülltem PTFE oder faserverstärkte Dichtungen. Bei quasihomogenen Dichtungen ist die thermische oder die chemische Einsatzgrenze meist vom schwächsten Bestandteil des Materialgemenges abhängig.

Man spricht von einem inhomogenen Dichtungswerkstoff, wenn die Bestandteile der Dichtung mechanisch in ihre Einzelbestandteile zerlegt werden können. Beispiele hierfür sind Dichtungen aus expandiertem Graphit mit Metalleinlagen, Hüllringdichtungen oder mit Elastomeren ummantelte Stahldichtungen [42].

Aufgrund der in Anhang 8 enthaltenen Erkenntnisse werden in der hier vorliegenden Arbeit folgende vier Dichtungstypen geprüft, wobei der Schwerpunkt auf Dichtungen aus expandiertem PTFE liegt:

- reines bidirektional orientiertes PTFE, nachfolgend „ePTFE“ genannt
- gefülltes PTFE, nachfolgend „PTFE“ genannt
- expandierter Graphit mit Stahlblecheinlage, nachfolgend „Graphit“ genannt
- Dichtung auf Basis von Aramidfasern, nachfolgend „Faser“ genannt

Die oben genannten Dichtungen wurden dankenswerterweise von den Firmen Frenzelit¹, Garlock², Gore³ und SGL⁴ zur Verfügung gestellt.

Nachfolgend sind für die im Anhang 8 aufgeführten Dichtungs- und Flanschtypen die in der industriellen Praxis akzeptierten Einsatzgrenzen für:

- den maximal zulässigen Innendruck bei Raumtemperatur,
- den maximal zulässigen Innendruck bei Maximaltemperatur und
- die maximal zulässige Temperatur

dargestellt. Die Auswertung der Einsatzgrenzen erfolgte in Form eines sogenannten Box-und-Whisker-Plots, der im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt wird.

6.2 Grundlagen zur Datenanalyse

Der zur Analyse der Umfragedaten verwendete Box-und-Whisker-Plot geht auf einen Vorschlag von J. Tukey zurück [82]. Der Box-und-Whisker-Plot ist in der Regel durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Median, oberes und unteres Quartil
- 5 % und 95 % Quantil
- Werte, die außerhalb des 5 %- und 95 % Quantils liegen.

¹ Frenzelit Werke GmbH & Co. KG, Frankenhammer, 95460 Bad Berneck

² Garlock GmbH, Falkenweg 1, 41468 Neuss

³ W.L. Gore GmbH, Wernher-von-Braun-Str. 18, 85640 Putzbrunn/München

⁴ SGL Carbon GmbH, Werner-von-Siemens-Str. 18, 86405 Meitingen

Am Beispiel für die maximal zulässigen Temperaturen unterschiedlicher Flanschdichtungen werden die oben genannten Begriffe erläutert und die Vorteile des Box-und-Whisker-Plots vorgestellt, Bild 6.

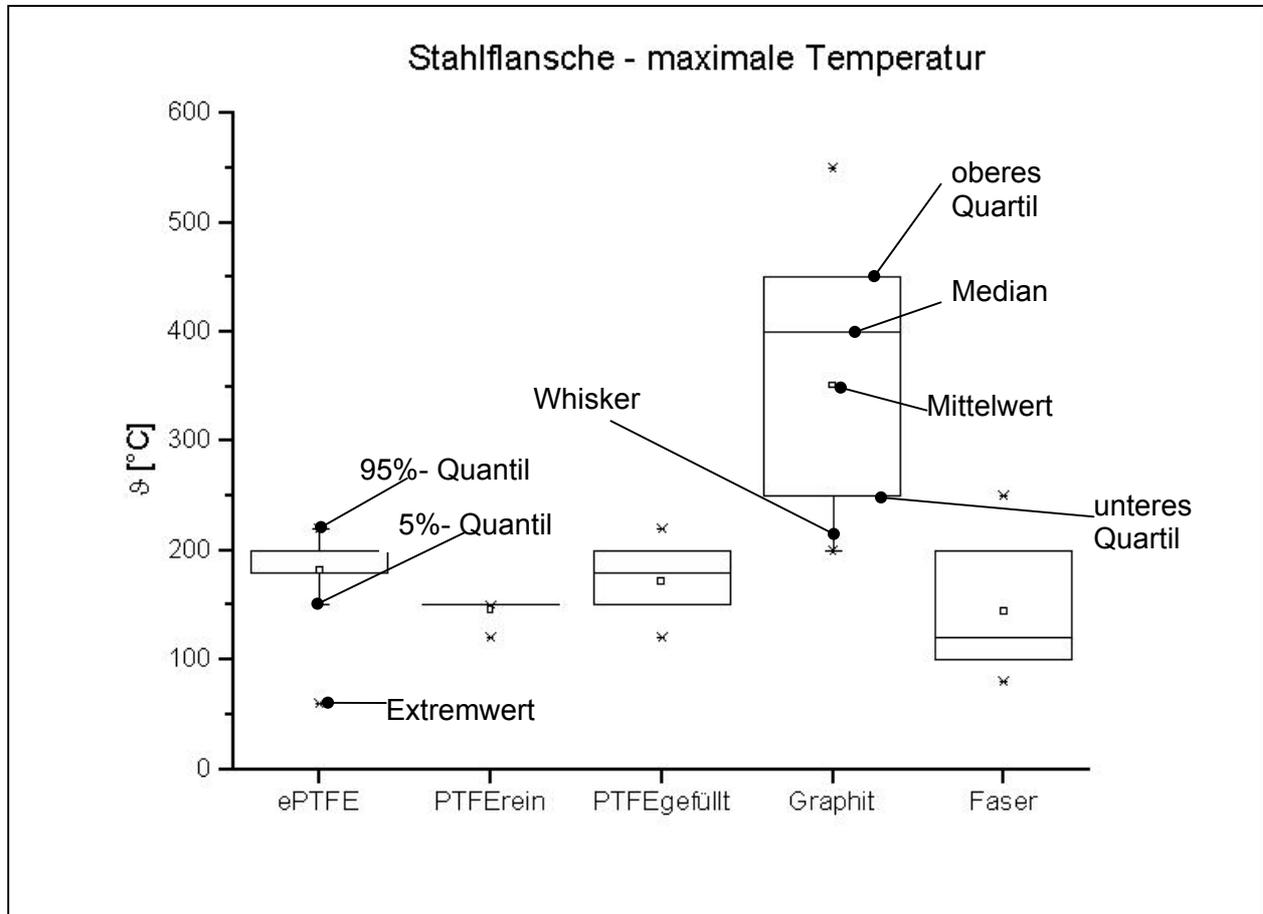


Bild 6: Box-und-Whisker-Plot für die maximal zulässige Temperatur von Flanschdichtungen

Man findet in der wissenschaftlichen Literatur oftmals die Angabe des arithmetischen Mittelwerts und der Standardabweichung, um die Breite einer Stichprobe zu beschreiben. Eine weitere Möglichkeit, eine Stichprobe zu interpretieren, ist die Angabe des Medians, der die Anzahl sortierter Umfrage- oder Meßwerte in zwei gleiche Teile teilt. Die eine Hälfte ist durch größere Werte, die andere Hälfte durch kleinere Werte als der Median, auch 50%-Quantil genannt, gekennzeichnet. Der Median einer Stichprobe von fünf Werten (1, 2, 3, 6, 33) ist z.B. 3. Das arithmetische Mittel beträgt dagegen 9, Bild 7.

In Bild 7 sieht man, daß der Median, im Gegensatz zum arithmetischen Mittelwert, von Ausreißern (im obigen Beispiel: 33) kaum beeinflußt wird [83].

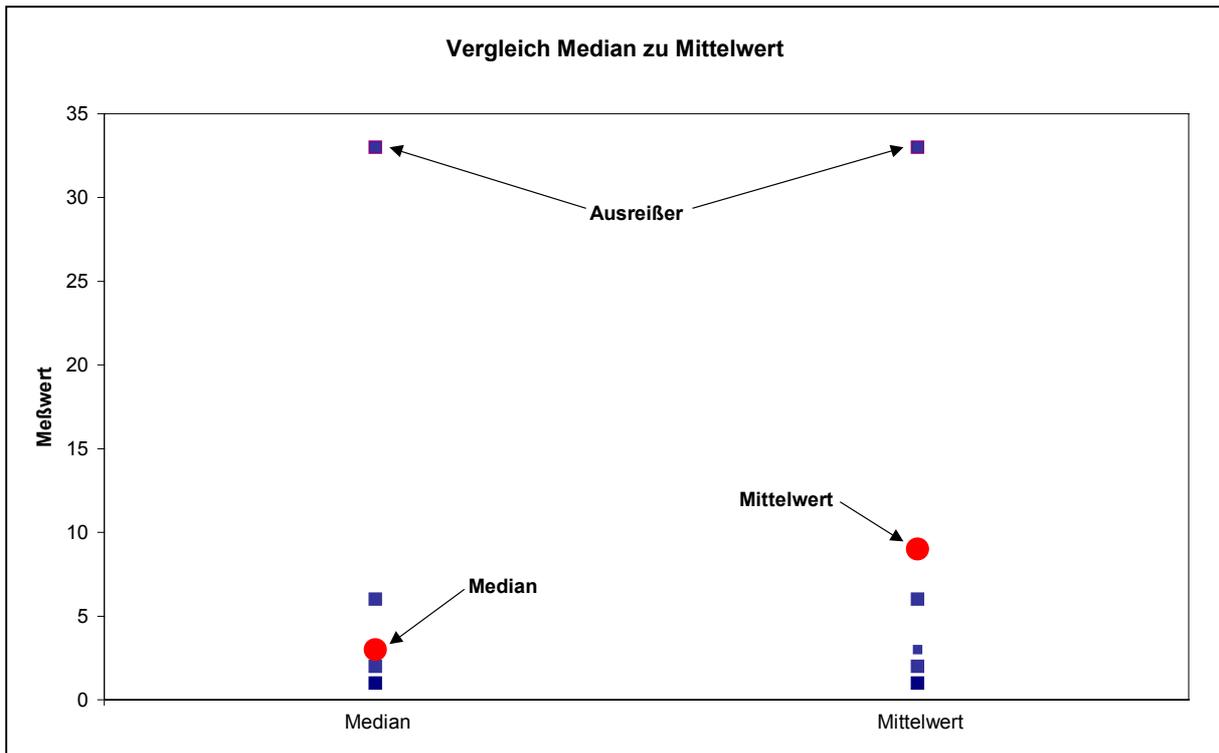


Bild 7: Vergleich von Median und arithmetischem Mittelwert einer Zahlenreihe

In Bild 6 ist der Median als mittlerer Strich der Box (Schachtel) eingezeichnet. Der arithmetische Mittelwert als kleines Rechteck.

Ein weiteres Kennzeichen der Box sind das obere und das untere Quartil. Das obere Quartil teilt den sortierten Stichprobenumfang in 25 % der Meßwerte, die oberhalb des oberen Quartils liegen und 75 %, die unterhalb des oberen Quartils liegen. Analog dazu befinden sich beim unteren Quartil 25 % der Werte des Stichprobenumfangs unterhalb und 75 % oberhalb des unteren Quartils. Somit repräsentiert die Box 50 % der Umfragewerte und ist bei kleiner Spannweite ein Indikator für eine Anhäufung der Umfragewerte um den Median.

Der Median und die Quartile stellen eine Untergruppe der sogenannten Quantile dar. Die Stichprobe bzw. der Umfragewert für das q -% Quantil wird nach folgender Gleichung berechnet [84, 85]:

$$\text{Umfragewert} = \frac{q}{100} n \quad (19)$$

In der Regel werden im Box-und-Whisker-Plot als weitere grafische Information die 5 %- und die 95 %-Quantile in Form von sogenannten Whiskers (Schnurrhaare) angegeben. Die Sterne in Bild 6 repräsentieren in der Regel die Extremwerte bzw. alle Werte, die außerhalb des 5 %- und des 95 %-Quantils liegen.

Nachfolgend werden die Prüfwerte der Einflußgrößen Innendruck und Temperatur für die verschiedenen Prüfungen auf Basis des Box-und-Whisker-Plots hergeleitet.

6.3 Einsatzgrenzen, resultierend aus dem Innendruck

Anhang 9 und 10 geben die Maximaldrücke bei Einbau- und Maximaltemperatur für Stahlflansche, Anhang 12 und 13 für Kunststoffflansche und Anhang 15 und 16 für Emailflansche an.

Die höchst zulässigen Drücke der hier betrachteten Dichtungsarten für Stahlflansche lagen bei 40 bar, wobei nur ein Wert für Graphit mit 50 bar darüber lag. Das gilt sowohl für die Raumtemperatur als auch für die Betriebstemperatur. Bei Kunststoffflanschen liegt der maximale Innendruck bei 16 bar, meist werden aber 10 bar nicht überschritten. Emailflansche werden mit einem maximal zulässigen Innendruck von 25 bar betrieben. Ansonsten werden auch Emailflansche mit Drücken unter 16 bar eingesetzt.

Vergleicht man den hauptsächlichen Druckeinsatzbereich von Stahlflanschen, der durch den Bereich zwischen oberem und unterem Quantil repräsentiert wird, werden alle Dichtungsarten bis 40 bar Innendruck eingesetzt. Der Innendruck für Graphitdichtungen liegt mit bis zu 50 bar am höchsten. Die Ursache hierfür ist vor allem darin zu sehen, daß diese Dichtungen normalerweise mit Metallverstärkungen verwendet werden. Durch die Metallverstärkungen werden diese Dichtungen oftmals als ausblässicher angesehen.

Es zeigte sich, daß bei der Umfrage die zulässigen Innendrucke bei Raumtemperatur im Vergleich zur Betriebstemperatur teilweise höher waren. Firmen, die diese Angaben machten, berücksichtigen die reduzierten Festigkeitswerte des Flanschsysteams bei erhöhten Temperaturen. Die meisten Firmen beziehen sich jedoch bei der Angabe der maximal zulässigen Innendrucke auf Flanschnormen (PN40) oder auf andere Regelwerke, wie die TRB 610, die einen Maximaldruck von 25 bar zulassen [86]. In den Fällen, wo relativ niedrige Drücke auftreten, beziehen sich die Firmen auf die maximal auftretenden Betriebs- oder Testdrücke der Anlagen. Allgemein ist festzustellen, daß sich deutsche Firmen vor allem an Regelwerken orientieren, wohingegen in anderen europäischen Ländern oftmals die Betriebsdrücke in den Produktionsanlagen ausschlaggebend sind.

Auf Basis der Umfrage bei den verschiedenen Firmen wurde der in dieser Arbeit verwendete maximale Innendruck auf 40 bar begrenzt.

Als Dichtungen für höhere Druckbereiche kommen in der Regel Spiralringdichtungen, Kammprofilabdichtungen oder reine Metalldichtungen zum Einsatz [80].

6.4 Einsatzgrenzen, resultierend aus der Temperatur

Anhang 11 gibt die Maximaltemperaturen für Stahlflansche, Anhang 14 für Kunststoffflansche und Anhang 17 für Emailflansche an.

Den für Weichstoffdichtungen mit Abstand höchsten Temperatureinsatzbereich besitzen Dichtungen aus expandiertem Graphit. Die Maximaltemperatur beträgt bei Stahlflanschen 550 °C. Den weiten Einsatzbereich verdeutlicht darüber hinaus, daß das untere Quartil der Graphitdichtungen noch über den Maximaltemperaturen der anderen Dichtungsarten liegt. Bei Kunststoffflanschen haben Graphitdichtungen aufgrund der hohen Mindestflächenpressung keine Bedeutung. Bei Emailflanschen kommen Graphitdichtungen nur als Ausgleichswerkstoff für Unebenheiten der Flanschdichtflächen in Form von Einlagen zum Einsatz. Der Temperatureinsatzbereich wird bei dieser Anwendung durch den Hüllringwerkstoff aus PTFE begrenzt.

Dichtungen aus PTFE werden in der industriellen Praxis bis maximal 220 °C eingesetzt. Dabei muß man deutlich in reines PTFE, gefülltes PTFE und ePTFE unterscheiden. Reines PTFE wird aufgrund der schlechten Kriech-Relaxationseigenschaften nur bis maximal 150 °C eingesetzt. Diesbezüglich bessere Eigenschaften werden bei gefülltem PTFE und ePTFE konstatiert. Die maximale Einsatztemperatur beträgt bei beiden Materialien bis zu 220 °C. Auffallend ist bei ePTFE die geringe Spannweite von oberem zu unterem Quartil (180 °C bis 200 °C). Die Erfahrungen zeigen hier, daß ein Einsatz bis zu 200 °C eine Standardanwendung darstellt. Die Anwendungstemperatur des 5 %-Quantils ist zudem mit 150 °C vergleichsweise hoch.

Den niedrigsten Temperatureinsatzbereich zeigen Dichtungen auf Basis von Faserverbundwerkstoffen. Abgesehen von einer Angabe bei 250 °C ist die maximale Einsatzgrenze für diese Werkstoffe bei 150 °C zu sehen.

Grundsätzlich läßt sich bemerken, daß die oben genannten Temperatureinsatzgrenzen den in der Industrie akzeptierten Bereich verdeutlichen. Abweichungen nach oben sind unter Beachtung bestimmter Randbedingungen möglich. Aus den experimentellen Ergebnissen in Abschnitt 9 läßt sich ableiten, daß Dichtungen aus PTFE bis 250 °C einsetzbar sind.

Voraussetzung ist hier, daß Belastungsregime zu kennen und vorzugsweise dünne Dichtungen zu verwenden, die unter möglichst hoher Vorspannung eingebaut werden.

Da diese Arbeit vor allem an Dichtungen aus ePTFE orientiert ist, wurden die experimentellen Versuche mit Maximaltemperaturen von 250 °C durchgeführt, um auch extreme Bedingungen simulieren zu können.

6.5 Einsatzgrenzen, resultierend aus der Flächenpressung und der Medienbeständigkeit

Wie bereits oben erläutert, ist die Bestimmung der relevanten Flächenpressung vor allem durch Normen vorgegeben. Die höchsten Flächenpressungen sind mit Nut- und Federflanschen erreichbar. Das liegt zum einen an der geringen effektiven (zur Abdichtung beitragenden) Dichtflächenbreite, zum anderen ergibt sich die hohe Flächenpressung im Vergleich zu Flanschen gleicher Nennweite mit erhabener Dichtfläche durch die gleichbleibende Schraubenanzahl und dem gleichen Schraubendurchmesser je Nennweite. Im Anhang 18 sind die möglichen Flächenpressungen für Dichtungen von Nut- und Federflanschen nach DIN 2691 mit Nenndruck 40 bar dargestellt [87]. Aus Anhang 18 erhält man eine maximale Flächenpressung von ca. 140 MPa für eine Schraubenqualität 5.6, welche als Standardschraube in der chemischen Industrie verwendet wird. Um auch höhere Schraubenqualitäten abzudecken, wurde für diese Arbeit eine maximal geprüfte Flächenpressung von 240 MPa festgelegt. Das stellt auch die Maximalkraft der verwendeten Prüfanlage für die mechanischen Untersuchungen dar.

Für Kunststoffflansche ergeben sich laut den (unveröffentlichten) Drehmomenttabellen der chemischen Industrie Einbaufächenpressungen im Bereich von 6 - 15 MPa. Dieser Bereich gilt für die am meisten eingesetzten Flansche aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) mit verschiedenen Auskleidungen (Linern), wie z.B. PP, PVC oder PVDF, sowie für Flansche aus reinen Kunststoffen mit kunststoffummanteltem Stahlflansch [88].

Bei Flanschen aus Email lassen sich Flächenpressungen im Bereich von 15 - 20 MPa verwirklichen. Hierbei muß jedoch das unterschiedliche radiale Oberflächenprofil der Emailflansche beachtet werden. Dabei ergeben sich partiell Flächenpressungen, die deutlich über den Flächenpressungen liegen, die sich durch die normale Dichtungsbreite ergeben würden [89].

Für den unteren Bereich der Flächenpressung wurde aus den oben genannten Gründen, falls technisch möglich, eine Flächenpressung von 10 MPa gewählt. Damit werden die Bereiche aller gängigen Flanschsysteme bezüglich der Anfangsflächenpressung abgedeckt.

Die Prüfung der chemischen Beständigkeit von Dichtungen ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Grundsätzlich ist jedoch bei der Dichtungsauswahl die Beständigkeit des Dichtmaterials gegen das Betriebsmedium zu prüfen. Ist ein Dichtungsmaterial gegen das Betriebsmedium nicht beständig, darf es auf keinen Fall eingesetzt werden, um größere Schäden an Mensch und Umwelt zu vermeiden.

Für die Beständigkeit von Dichtungsmaterialien gegen reine Medien existieren größtenteils Beständigkeitslisten der Dichtungshersteller. Diese Beständigkeitslisten enthalten weitgehend keine Angaben über Temperatur und Druck des Mediums. Empfehlenswert ist deshalb, Referenzen zu den jeweiligen Einsatzbedingungen bei den Dichtungsherstellern zu erfragen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Durchführung von Langzeitversuchen nach DIN 28090-3 [22]. Etwaigen Zusatzstoffen im Betriebsmedium, z.B. Lösungsmitteln, ist dabei gesondert Beachtung zu schenken.

7 Notwendige Versuchseinrichtungen und Methoden zur Reduzierung der Versuchsanzahl

Nachdem die Einflußgrößen und deren Einsatzbereiche (z.B. der Innendruck bei 0 - 40 bar oder die Temperatur von 20 °C bis 250 °C) für die Zielgrößen (z.B. die Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge) bestimmt wurden, ist es im nächsten Schritt notwendig, die zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen notwendigen Prüfstände neu zu schaffen, zu modifizieren oder bestehende Prüfstände unverändert zu übernehmen.

Nachdem die Prüfstände geschaffen wurden, stellt sich darüber hinaus die Aufgabe, die notwendige Anzahl der Versuche durch geeignete Hilfsmittel, z.B. statistische Versuchsplanung (Designed Experiments), auf das statistisch notwendige Maß zu reduzieren.

Nachfolgend sind die in dieser Arbeit verwendeten Prüfstände als auch die statistische Versuchsplanung beschrieben.

7.1 Notwendigkeit zur Weiterentwicklung der Prüftechnik

Unter „Weiterentwicklung der Prüftechnik“ versteht man folgende Punkte:

- Erhöhung der Qualität und
- der Quantität von Messungen bei angemessenem Kostenaufwand.

Die erhöhte Qualität der Messung entspricht einer höheren Genauigkeit. Das ist zum einen eine Verringerung der Nachweisgrenze, zum anderen eine mindestens gleichbleibende Reproduzierbarkeit der Meßwerte.

Eine Erhöhung der Quantität wird erreicht, wenn unter Beachtung einer gleichbleibenden Qualität der Messungen die Anzahl der Prüfungen bei gleichem Zeitaufwand erhöht wird. Das ist möglich, wenn unnötig lange Messungen vermieden oder die Zeit zum Erreichen eines bestimmten Mindestmeßwerts reduziert wird. Eine höhere Quantität wird außerdem erzielt, wenn man unnötige Messungen vermeidet. Dieses läßt sich vor allem mit statistischer Versuchsplanung bewerkstelligen.

Da für diese Arbeit eine Vielzahl an Messungen notwendig war, wurde versucht, sowohl die Qualität als auch die Quantität der Untersuchungen zu erhöhen.

Als erstes bietet sich an, die verwendeten Prüfstände den technischen Einsatzbedingungen der Flanschdichtungen anzupassen (= Erhöhung der Qualität) und nachfolgend die Versuche auf ein Mindestmaß an Zeitaufwand zu reduzieren (= Erhöhung der Quantität). Beides ist notwendig, um eine möglichst hohe wissenschaftliche Produktivität zu gewährleisten.

7.2 Versuchseinrichtungen zur Ermittlung des Leckageverhaltens

Technisch relevante bzw. heute angewandte Meßverfahren zur Bestimmung der Massenleckage können nach Betriebsmeßmethoden, auf die in dieser Arbeit nicht ausführlich eingegangen wird, und Labormeßverfahren eingeteilt werden.

Folgende Verfahren werden zur Leckagemessung im Betrieb eingesetzt [39]:

- Schnelltests und Schnüffeltests,
- Druckanstiegs- bzw. Druckabfallverfahren und
- die FID-Methode.

Alle oben genannten Verfahren bieten die Möglichkeit, an realen Flanschverbindungen Leckagen nachzuweisen. Die Schnell- und Schnüffeltests geben dabei vor allem eine qualitative Aussage zur Leckage an. Das Druckanstiegs- bzw. das Druckabfallverfahren und die FID-Methode bieten die Möglichkeit, die Leckage quantitativ zu bestimmen. Dabei erscheint die FID-Methode als sehr vielversprechende, wenn auch relativ teure Alternative zu den anderen Betriebsmeßmethoden. Die FID-Methode erreicht eine Nachweisgrenze im betrieblichen Umfeld von $5,0 \cdot 10^{-5}$ mbar·l/s [39].

Trotzdem wird in der betrieblichen Praxis die Blasenmethode (Schnelltest) nach wie vor Standard bleiben. Bei dieser Methode wird die Dichtung mit einer blasenbildenden Flüssigkeit benetzt und nach Blasenbildung am Dichtungsaußendurchmesser visuell gesucht. Diese Methode wird als Standard bei den meisten Anlagen während des sogenannten Abdrückens mit normalerweise 1,3-fachem Betriebsdruck angewendet. Dabei muß berücksichtigt werden, daß nach den hier vorliegenden Erfahrungen Leckagen sich nicht mehr nachweisen lassen, die kleiner als $5 \cdot 10^{-2}$ mg/(s·m) sind.

Die Betriebsmeßmethoden unterscheiden sich von den Labormeßmethoden vor allem dadurch, daß die Labormeßmethoden nicht (unbedingt) an realen Flanschen durchgeführt werden. Vorteile sind hier die höhere Reproduzierbarkeit und die höhere Genauigkeit der Messungen. Das liegt vor allem daran, daß die Randbedingungen (Temperatur, Flächenpressung etc.) genau geregelt werden können oder zumindest bekannt sind bzw. meßtechnisch genauer erfaßt werden können.

Die am häufigsten angewendeten Labormeßmethoden, welche den Stand der Technik darstellen, sind:

- Durchflußmethode,
- Druckabfallmethode,
- Druckauffangmethode,
- Differenzdruckmethode und
- Messungen mit Helium-Massenspektrometern.

Die Durchflußmethode basiert auf der sogenannten Hitzedrahtmethode. D.h. durch die Abkühlung eines erhitzten Drahtes, hervorgerufen durch einen Massenstrom (Leckage), wird auf den Massentransport rückgerechnet. Diese Methode erreicht minimal nachweisbare Leckagen von ca. 0,01 mg/(s·m). Aufgrund der relativ hohen Nachweisgrenze, welche die meisten Dichtungsmaterialien im relevanten Flächenpressungsbereich deutlich unterschreiten, wird diese Methode in der vorliegenden Arbeit nicht angewendet.

Die bisher verbreitetste Methode zur Leckagebestimmung stellt die Druckabfallmethode nach DIN 28090 dar [22]. Sie ist im Anhang 19 dargestellt. Mit dieser Methode sind Leckagen bis zu 10^{-3} mg/(s·m) bei ausreichender Meßzeit und sehr geringem Volumen des Meßraums zu bestimmen. Das Meßprinzip dieser Methode beruht auf der Messung des Druckabfalls eines vorher bestimmten Meßvolumens V_M als Funktion der Zeit. Größter Nachteil dieser Methode ist die relativ hohe Temperaturempfindlichkeit.

Der Einfluß der Temperaturschwankung auf die zu messende Druckdifferenz kann nach dem idealen Gasgesetz bei konstantem Meßvolumen mit folgender Gleichung näherungsweise bestimmt werden:

$$p_1 = p_0 \frac{T_1}{T_0} \Rightarrow \Delta p = p_1 - p_0 \frac{T_1}{T_0} \quad (20)$$

Eine Temperaturschwankung von nur 1,0 K hat bei Raumtemperatur und einem Innendruck von 40 bar nachstehend berechnete Druckdifferenz zur Folge:

$$p_1 = 40\text{bar} \frac{294\text{K}}{293\text{K}} \Rightarrow \Delta p = 0,137\text{bar} \quad (21)$$

Für diese Temperaturschwankung von 1,0 K würde die nach Gleichung (21) berechnete Druckdifferenz bei Stickstoff mit einer Dichte von 1,25 mg/cm³, einem DN 40 PN 40 Flansch mit einem mittleren Durchmesser von ca. 70 mm, einem inneren Volumen des Flanschsystems von 10 cm³ und einer Zeitdifferenz für die Temperaturänderung von 10 Minuten eine Fehler-Leckagerate von:

$$\lambda = \frac{V_M \rho \Delta p}{\pi d_D p_N \Delta t} = \frac{10 \text{ cm}^3 \cdot 1,25 \text{ mg/cm}^3 \cdot 0,137 \text{ bar}}{\pi \cdot 0,07 \text{ m} \cdot 1,013 \text{ bar} \cdot 600 \text{ s}} = 1,28 \cdot 10^{-2} \text{ mg/(s} \cdot \text{m)} \quad (22)$$

ergeben. D.h., falls die Temperaturschwankung nicht rechnerisch kompensiert würde, könnte bei einer Temperaturerhöhung von +1,0 K eine wirklich vorhandene Leckage von 1,28·10⁻² mg/(s·m) auftreten, ohne daß diese bemerkt würde. Das verdeutlicht, daß man mit dem reinen Druckabfallsystem nur über sehr lange Meßzeiten bei möglichst konstanten Temperaturen Messungen durchführen kann. Vorteil dieser Meßmethode ist jedoch, daß man mit relativ geringem finanziellen Aufwand nahezu alle gasförmigen Medien prüfen kann.

Eine Erweiterung der Druckabfallmethode stellt die Differenzdruckmethode dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde an der FH-Münster¹ ein Prüfstand entwickelt, der auf diesem Prinzip arbeitet. Die Leckagemessung wird an diesem Prüfstand vollautomatisch durchgeführt, wobei die Flächenpressung in Stufen variiert werden kann, um Be- und Entlastungszyklen zu simulieren. Die Variation der Flächenpressung ist mit einem Hydrauliksystem realisiert, der Innendruck wird über ein Proportionalventil geregelt [62]. Die Nachweisgrenze dieses Prüfstands liegt bei 10⁻⁴ mg/(s·m) und ist damit um eine Zehnerpotenz unter der Nachweisgrenze der Druckabfallmethode. Das Meßprinzip ist in Anhang 20, der in dieser Arbeit verwendete Prüfstand in Anhang 21 dargestellt.

Die Verbesserung der Nachweisgrenze ergibt sich vor allem durch die geringere Empfindlichkeit gegen Temperaturschwankungen. Der Prüfaufbau besteht aus einem Prüfraum, in dem die zu testende Dichtung eingebaut wird, und einem hermetisch dichten Kompensationsraum. Die zu messende Leckage wird durch einen Differenzdrucksensor als Druckabfall des Prüfraums mit Testdichtung relativ zum konstanten Druck im Kompensationsraum bestimmt. Idealerweise besitzen beide Prüfräume den gleichen mechanischen Aufbau, wobei einer der Prüfräume hermetisch dicht sein muß, siehe Anhang 20. Das ist im allgemeinen aus Kostengründen nicht realisierbar. Der an der FH Münster entwickelte Prüfstand besitzt aus diesem Grund einen hermetisch dichten Druckbehälter als Kompensationsraum.

¹ Fachhochschule Münster, Fachbereich 11, Forschungsbereich Dichtungstechnik, Stegerwaldstraße 39, 48565 Steinfurt

Tritt nun eine Temperaturschwankung auf, folgen beide Prüfräume der geänderten Temperatur und kompensieren sich dadurch selbst. Die Eigenkompensation erfolgt durch die Benutzung eines Differenzdrucksensors als Meßmittel zur Leckagebestimmung anstatt eines Absolutdrucksensors wie bei der Druckabfallmethode.

Die Erhöhung der Quantität der Prüfung ist ebenfalls auf den Differenzdrucksensor zurückzuführen. Folgt man der Empfehlung, daß man mindestens 10% des Meßwertes eines Sensors ausnutzen sollte, ergibt sich durch nachfolgenden Vergleich der Vorteil dieses Meßsystems im Vergleich zum Druckabfallprinzip.

Setzt man beispielsweise einen zu messenden Druck von 40 bar bei einem maximalen Sensordruck von 50 bar voraus, ergibt sich ein minimaler Druckabfall von 5 bar, um die 10 % des Meßbereiches auszunutzen. Das entspricht einer Meßzeit nach Gleichung (22) von ca. 6 Stunden. Nimmt man dagegen einen Differenzdrucksensor mit einem Meßbereich von 200 mbar, errechnet sich ein minimal zu messender Differenzdruck von 20 mbar, um die gleiche Meßgenauigkeit zu erhalten. Nach dem Beispiel in Gleichung (22) ergibt sich somit eine Meßzeit von ca. 1,5 Minuten. Das entspricht einer Verringerung der Meßzeit um den Faktor 250. Allgemein errechnet sich die Verringerung der Meßzeit bei Umrüstung auf das Differenzdruckprinzip durch:

$$\Delta t(\Delta p - Sensor) = \frac{\text{Meßbereich}(\Delta p - Sensor)}{\text{Meßbereich}(p - Sensor)} \Delta t(p - Sensor) \quad (23)$$

Die zeitliche Verringerung der Meßzeit nach Gleichung (23) ist gleichzeitig auch ein Beitrag zur verbesserten Nachweisgrenze, da mehrere Flächenpressungsstufen hintereinander in einem erträglichen Zeitrahmen geprüft werden können.

Nachfolgend wird die Berechnung der Leckage für das Differenzdruckprinzip hergeleitet.

Nach dem idealen Gasgesetz ergibt sich die Gleichung:

$$\frac{p_M(t=0) V_M}{T_M(t=0)} = \frac{(p_M(t=0) - \Delta p(t)) V_M}{T_M(t)} + \frac{p_U \Delta V_{Leck}(t)}{T_U} \quad (24)$$

Die linke Seite von Gleichung (24) steht für den Ausgangszustand der Leckageprüfung. Der erste Summand beschreibt den Innendruckabfall, bedingt durch die Leckage der Dichtung. Der zweite Summand kennzeichnet die ausgetretene Leckage bei Umgebungsdruck p_U und Umgebungstemperatur T_U .

Löst man Gleichung (24) auf, ergibt sich nachstehende Beziehung:

$$\frac{p_M(t=0) V_M}{T_M(t=0)} = \frac{p_M(t=0) V_M}{T_M(t)} - \frac{\Delta p(t) V_M}{T_M(t)} + \frac{p_U \Delta V_{Leck}(t)}{T_U} \quad (25)$$

Aufgrund der relativ kurzen Meßdauer kann man davon ausgehen, daß die Temperaturen T_M annähernd gleich sind. Dadurch erhält man näherungsweise folgenden Zusammenhang:

$$\frac{\Delta p(t) V_M}{T_M(t)} = \frac{p_U \Delta V_{Leck}(t)}{T_U} \quad (26)$$

Umgestellt nach ΔV_{Leck} ergibt sich:

$$\Delta V_{Leck}(t) = V_M \frac{\Delta p(t)}{p_U} \frac{T_U}{T_M(t)} \quad (27)$$

Gleichung (27) repräsentiert das Leckagevolumen bei Umgebungsbedingungen nach einer bestimmten Zeit t . Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, sollte das Leckagevolumen auf Normalbedingungen umgerechnet werden:

$$\Delta V_N = \Delta V_{Leck}(t) \frac{p_U}{p_N} \frac{T_N}{T_U} \quad (28)$$

Für die Leckage eines bestimmten Prüfmediums ergibt sich unter Normalbedingungen für die Differenzdruckmethode in differentieller Form folgende Gleichung:

$$\lambda = \frac{\rho}{\pi d_D} \frac{dV_N}{dt} \quad (29)$$

Zusätzlich zur verbesserten Nachweisgrenze und zur erhöhten Quantität der Prüfung ist der Meßaufbau des Differenzdruckprinzips im Vergleich zu anderen Meßsystemen relativ kostengünstig. Darüber hinaus kann diese Prüfung bei sehr hohen Temperaturen durchgeführt werden.

Eine weitere Meßmethode zur Leckagebestimmung ist die Druckauffangmethode, Anhang 22. Weitere Prinzipskizzen dieser Meßmethode sind in [39] angegeben. Diese Methode beruht auf

einer hermetisch abgeriegelten Kapsel, die so klein wie möglich sein sollte, in der das Leckagevolumen gesammelt wird. Die Nachweisgrenze liegt bei dieser Methode bei 10^{-4} mg/(s·m). Der Meßaufbau hat im Vergleich zur Differenzdruckmethode den Nachteil, daß die Prüftemperatur durch das Dichtmedium begrenzt ist, welches für die Abdichtung des Auffangvolumens verantwortlich ist. Vorteil dieser Methode ist, daß Leckagen, die nicht durch die Prüfdichtung bedingt sind, auf die Messung keinen Einfluß haben. Die Meßzeit und die Nachweisgrenze dieser Methode sind mit der Differenzdruckmethode vergleichbar.

Der Meßaufbau der Druckauffangmethode stellt die Basis für die Messung mit dem Helium-Massenspektrometer dar.

Die Messung mit Massenspektrometern ist auf Medien beschränkt, die von diesen detektiert werden können. In der Dichtungstechnik wird auf Helium zurückgegriffen, da man aufgrund der geringen Molekülgröße des Heliums davon ausgeht, daß man mit diesem Medium eine möglichst hohe Leckage messen kann. In [39] wird angegeben, daß mit diesem Meßsystem eine reproduzierbare Nachweisgrenze von 10^{-8} mbar·l/s meßbar ist. Das sind ca. vier Zehnerpotenzen weniger als mit den oben beschriebenen Meßsystemen. Die geringe Nachweisgrenze und die Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen machen dieses Meßsystem wahrscheinlich mittelfristig zum Standard für die Leckagemessung. Nachteilig sind zur Zeit noch die relativ hohen Investitionskosten, die etwa um den Faktor 10 über den oben genannten Labormethoden liegen. Die Prinzipskizze der Druckauffangmethode entspricht einer möglichen Anwendung der Methode mit Massenspektrometern. Es ist lediglich der Drucksensor des Auffangraums gegen ein Massenspektrometer mit Vakuumeinheit auszutauschen, siehe Anhang 22.

7.3 Versuchseinrichtungen zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens

Das mechanische Verhalten einer Flanschdichtung ist für die Beurteilung des Dichtmaterials mindestens genauso wichtig wie das Leckageverhalten. Es ist immer in Wechselwirkung mit dem mechanischen Verhalten zu sehen.

Das Leckageverhalten kann nur so gut sein, wie es die während des Einbaus aufgebrachte Vorverformung der Dichtung erlaubt. Die Vorverformung soll zur Reduzierung und/oder Verengung der Leckagewege führen. Das Leckageverhalten und die Ausblassicherheit im Betriebszustand ist ebenfalls eine Funktion des mechanischen Verhaltens des Dichtmaterials [90]. Die Belastung der Dichtung im Betrieb besteht vor allem aus:

- dem chemischen Angriff durch das Betriebsmedium,
- der Belastung durch die Temperatur
- und mechanischen Lasten.

Der chemische Angriff durch das Betriebsmedium oder auch die Alterung der Dichtung treten meist langfristig auf und sind kein Bestandteil dieser Arbeit.

Mechanische Belastungen entstehen vor allem durch äußere Kräfte und Momente, die auf die Rohrleitung einwirken, aber auch durch Wärmespannungen, welche durch die Betriebstemperatur hervorgerufen werden.

Für eine verringerte mechanische Festigkeit des Dichtmaterials ist vor allem die Temperaturbelastung verantwortlich, was wiederum zu einer erhöhten Verformung führen kann.

Beide eben genannten Verformungsarten wirken sich als Kriech-Relaxation und/oder zusätzliche plastische Verformung aus, was zu einer verminderten Flächenpressung im Betriebszustand führt. Diese Verformungsarten sind Bestandteil der vorliegenden Arbeit und wurden experimentell untersucht. Der verwendete Prüfstand wird nachfolgend beschrieben.

Für Verformungsuntersuchungen von Werkstoffen werden im allgemeinen handelsübliche Zug-Druckprüfmaschinen verwendet. Mit diesen Prüfständen ist es möglich, Dehnungen und Kräfte aufzunehmen. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse und der benötigten Regelungsformen von Prüfanlagen für Dichtungen sind diese Prüfanlagen nur eingeschränkt verwendbar. Die zu messenden Verformungen bei Weichstoffdichtungen beruhen fast ausschließlich auf Druckversuchen bei unterschiedlichen Temperaturen. Dabei soll eine Prüfanlage idealerweise über folgende Regelungsarten verfügen:

- kraftgesteuerte Regelung für reine Kriechversuche,
- steifigkeitsabhängige Regelung für Kriech-Relaxationsversuche und
- weggesteuerte Regelung für reine Relaxationsversuche.

Für Dichtungen, die sich im Krafthauptschluß befinden, sind die ersten beiden Regelungsarten notwendig. Dichtungen im Kraftnebenschluß, z.B. Dichtungen für Ventilsitze oder O-Ringe, benötigen eine weggesteuerte Regelung.

Die Prüfanlage, welche für diese Arbeit verwendet wurde, ist in modifizierter Form mit den ersten beiden Regelungsarten zu betreiben, Anhang 23. Folgende Einflußgrößen können variiert werden:

- Flächenpressung (Kraft),
- Steifigkeit (Kraft-Weg),
- Temperatur,
- Rauigkeit der Dichtfläche,
- Dichtungsgeometrie.

Mit der Prüfanlage wurden sowohl Kriech-Relaxations- als auch reine Kriechversuche mit den unter Abschnitt 9.1 aufgeführten Einstellwerten durchgeführt.

Nachdem die Prüfanlagen für die experimentellen Versuche zur Verfügung stehen, ist es notwendig, die dazu erforderlichen Versuche auf ein statistisch notwendiges Maß zu reduzieren. Das ist im folgenden Abschnitt kurz erläutert.

7.4 Kennwertermittlung von Dichtungen mit Hilfe statistischer Versuchsplanung

Zur Erhöhung der Quantität der Versuchsdurchführung bei möglichst gleichbleibender statistischer Qualität, und um eine umfassende Kenntnis der Einflußgrößen auf die Zielgröße zu erhalten, wurde zusammen mit der Abteilung für Versuchsplanung der Firma Gore ein statistischer Versuchsplan (Designed Experiment) entwickelt. Dieser bietet die Möglichkeit, mit einer relativ geringen Anzahl von Versuchen ein (multiples) Regressionsmodell für die jeweiligen Zielgrößen verschiedener Weichstoffdichtungen zu erstellen.

Bereits frühere Arbeiten haben dieses Werkzeug benutzt, um die Anzahl der Versuche zu minimieren [12, 20, 21, 76 und 91].

In dieser Arbeit wurde ein D-optimaler Versuchsplan verwendet. Ein D-optimaler Versuchsplan wurde genutzt,

- weil der Versuchsraum beliebig vorgegeben werden kann,
- bereits vorhandene Versuchsergebnisse in die Auswertung des Versuchsplans mit einbezogen werden können und
- die Möglichkeit besteht, beliebige Stufenwerte der Einflußfaktoren festzulegen [91].

Der beliebig wählbare Versuchsraum und die beliebig wählbaren Stufenwerte waren in dieser Arbeit notwendig, da der experimentell zu erfassende Bereich durch die Einsatzgrenzen der jeweiligen Einflußgrößen festgelegt ist. Diese Einsatzgrenzen wurden im Abschnitt 6 bestimmt. Die Möglichkeit, bereits vorhandene Versuchsergebnisse mit einzubeziehen, bot sich an, weil während der Arbeiten zur Modifizierung und Entwicklung der verwendeten Prüfstände, siehe

Abschnitt 7.2 f, viele Meßergebnisse anfielen, die daraufhin in die Modellierungen mit einbezogen werden konnten.

Um zu verdeutlichen, welche Vorteile durch die statistische Versuchsplanung zu erhalten sind, wird am Beispiel der für diese Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Kriech-Relaxationsverhalten gezeigt, welche zeitlichen Einsparungen erzielt werden können.

Mit der konservativen Versuchsplanung wären bei den experimentellen Versuchen für die 6 Einflußgrößen (Steifigkeit C , Anfangsflächenpressung Q_A , Temperatur ϑ , Rauigkeit der Dichtflächen R_z , Dichtungsbreite b_D und Dichtungsdicke h_{D0}) bei jeweils 3 Einstellwerten (zur Abschätzung nicht linearer Effekte) $3^6 = 729$ Versuche ohne Wiederholmessungen nötig gewesen. Bei einer Versuchsdauer von 6 Stunden wäre somit eine gesamte Versuchszeit pro Dichtungsart von 729×6 Stunden = 4374 Stunden angefallen. Geht man realistisch von zwei Versuchen pro Arbeitstag aus, wären pro Dichtungsart mindestens 365 Arbeitstage nötig gewesen. Das ist deutlich zu viel.

Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung konnte der reduzierte Versuchsplan mit nur 30 Versuchen pro Dichtungsart durchgeführt werden. Das entspricht je Dichtungsart bei zwei Versuchen pro Arbeitstag 15 Tagen. Dies führt zu deutlich erhöhter wissenschaftlicher Produktivität und, bei umfassender Anwendung des hier vorgestellten Versuchsablaufs, zu vertretbaren Kosten für Dichtungshersteller und Anwender.

8 Anwendung der multiplen Regressionsanalyse zur Gewinnung von Kennfunktionen

Die Regressionsanalyse liefert bei entsprechender Anwendung ein mathematisches Modell, das die empirische Abhängigkeit einer Zielgröße, z.B. der Restflächenpressung nach Abschluß von Kriech-Relaxationsvorgängen, von einer oder mehreren Einflußgrößen wiedergibt. Einflußgrößen werden auch als unabhängige Variable, die Zielgröße als abhängige Variable bezeichnet.

Ist das Modell nur von einer Einflußgröße abhängig, spricht man von einfacher Regression, ist die Zielgröße von mehreren Einflußgrößen abhängig, spricht man von multipler Regression.

Nachfolgend soll weniger auf die Regressionsanalyse als solche eingegangen werden, für deren Herleitung und mathematische Grundlagen es ausreichend Literatur gibt, sondern vordergründig auf die richtige Anwendung der Analyse und geeignete Transformationen zur Bewertung der Abhängigkeiten der Zielgröße. Vor allem wird Wert darauf gelegt, die Einflußgrößen nicht nur qualitativ, sondern vor allem quantitativ zu beurteilen und für die dichtungstechnischen Fragestellungen zu nutzen. Die mathematischen Grundlagen werden nur soweit angesprochen, wie sie zum Verständnis der hier angewandten Vorgehensweise wichtig sind.

Man erhält eine rein qualitative Aussage eines Regressionsmodells, wenn lediglich die Regressionskoeffizienten (= Konstanten) mit den Grundeinheiten der Einflußgrößen angegeben werden. Eine quantitative Aussage erhält man durch unterschiedliche Transformationsarten der Einflußgrößen, was nachfolgend die Basis für die Auswertungen darstellt.

Die Transformation zur quantitativen Darstellung des Regressionsmodells schafft zum einen die Möglichkeit, Teile des Regressionsmodells in physikalische Modelle einfließen zu lassen, um physikalisch-empirische Modelle zu erstellen, zum anderen dient es zur Überprüfung vorhandener physikalischer Modelle auf deren Richtigkeit bzw. deren genauerer Anpassung. Vor allem erhält man jedoch einen direkten Bezug zur Höhe der Auswirkung der Einfluß- auf die Zielgröße, was erst die Optimierung eines Dichtsystems ermöglicht.

8.1 Grundlagen

In der wissenschaftlichen Literatur findet man lineare und nichtlineare empirische Modelle, wobei oftmals als einzige Bewertungsgröße für die Qualität des Modells der Korrelationskoeffizient R^2 angegeben wird. Darüber hinaus findet man im allgemeinen noch die Angabe der Regressionsgleichung mit den einzelnen Regressionskoeffizienten.

Bessere Regressionsanalysen zeichnen sich über die Angabe von R^2 hinausgehend durch weiterführende Qualitätsmerkmale wie die t- und F-Statistiken aus. Damit ist aber lediglich der wahrscheinlichkeitstheoretische Teil der Regressionsanalyse durchgeführt.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise ist dagegen sehr viel breiter angelegt. Die Regressionsanalyse wird dabei als eine analytische Technik angesehen, um Daten zu bewerten, bzw. um die Beziehungen zwischen einer gegebenen Menge von Variablen zu verstehen. Das Hauptgewicht liegt dabei nicht auf der Analyse statistischer Tests und der Wahrscheinlichkeitsberechnung, das wird vor allem durch geeignete Software ausgeführt und stellt den Stand der Technik dar. Der Schwerpunkt liegt vielmehr auf einer informellen Analyse, die Strukturen in den Daten aufdecken soll.

Nachfolgend werden Gleichungen angegeben, die für das weitere Verständnis notwendig sind. Dabei wird die einfachste Form einer multiplen Regressionsgleichung durch die Beziehung

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_n x_{ni} + u_i \quad (30)$$

dargestellt. In dieser Gleichung sind β_j die konstanten Regressionskoeffizienten, x_i die einzelnen Einflußgrößen, y_i ist die Zielgröße und u_i ein zufälliger Störterm. Sind Wechselwirkungen zwischen den Einflußgrößen zu erwarten, so ist folgendes Regressionsmodell zu verwenden:

$$y_i = \beta_0 + \beta_n x_{ni} + \beta_{nm} x_{ni} x_{mi} + u_i \quad (31)$$

Darüber hinausgehende Modelle mit Anpassungen höherer Ordnung oder nichtlineare multiple Regressionsanalysen sind normalerweise nicht notwendig. Das liegt daran, daß man mit den sogenannten Residuen (und dem sogenannten Residuenplot) vorhandene nichtlineare Einflußgrößen erkennt, diese mit geeigneten Transformationen linearisiert und eine erneute linearisierte Regressionsanalyse durchführt. Die Residuen können sowohl für die einzelnen Einflußgrößen als auch für das komplette Modell angegeben werden.

Lineare Regressionsmodelle zeichnen sich dadurch aus, daß alle Regressionskoeffizienten in das Modell linear eingehen. Jedes der folgenden Modelle ist ein einfaches lineares Regressionsmodell [92]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (32)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 \quad (33)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 \log x \quad (34)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{x} \quad (35)$$

Dagegen ist das in der nachstehenden Gleichung dargestellte Modell nicht linear:

$$y = \beta_0 + \exp(\beta_1 x) \quad (36)$$

Deuten eine oder mehrere Einflußgrößen oder die Zielgröße auf einen nichtlinearen Effekt hin, was über bereits vorhandenes Wissen, durch Streuungsdiagramme und vor allem den Residuenplot zu erfahren ist, kann nahezu jedes nichtlineare Verhalten einer Einflußgröße oder des gesamten Modells, z.B. durch nachfolgend dargestellte Tabelle 2, linearisiert werden [92]:

nichtlineare Funktion	linearisierte Funktion
$y = \alpha_p x^{\beta_p}$	$\ln y = \ln \alpha_p + \beta_p \ln x$
$y = \alpha_e e^{\beta_e x}$	$\ln y = \ln \alpha_e + \beta_e x$
$y = \frac{x}{\alpha x - \beta}$	$\frac{1}{y} = \alpha - \beta \frac{1}{x}$
$y = \frac{e^{\alpha + \beta x}}{1 + e^{\alpha + \beta x}}$	$\ln \frac{y}{1-y} = \alpha + \beta x$

Tabelle 2: Linearisierbare Funktionen und deren Linearisierung

Die empirischen Residuen e_i sind ein Maß für die Abweichung der errechneten Werte nach dem Regressionsmodell \hat{y}_i zu den gemessenen Werten y_i .

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (37)$$

Die Residuen sind ein wichtiger Bestandteil zur Beurteilung des Regressionsmodells. In der graphischen Darstellung (Residuenplot) sollen sie gegenüber den Ziel- und Einflußgrößen keinen systematischen Einfluß haben. D.h., die Residuen sind bei einem gut angepaßten Modell bei einem Mittelwert von 0 unabhängig verteilt und besitzen eine konstante Varianz über

den gesamten empirisch erfaßten Bereich. Anders ausgedrückt, die Residuen dürfen kein systematisches Verhalten zeigen, da ansonsten Modellannahmen verletzt werden.

Abschließend muß für alle empirischen Modelle bemerkt werden, daß sie nur im experimentell erfaßten Bereich gültig sind. Extrapolationen sind damit nicht zulässig. Das verdeutlicht die Wichtigkeit der im Abschnitt 6 bestimmten Einsatzgrenzen.

8.2 Vorgehensweise bei der Regressionsanalyse

In diesem Abschnitt wird die in dieser Arbeit angewendete Art der Regressionsanalyse gezeigt. Das Ziel ist, ein gut begründetes und insbesondere leistungsfähiges Regressionsmodell zu erstellen. Bei der Analyse wurden Regressionsmodelle nach den Gleichungen (30) und (31) verwendet. Regressionsmodelle nach Gleichung (30) (ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen) sind leichter zu interpretieren und anschaulicher als die genaueren Regressionsmodelle nach Gleichung (31). Die Regressionsmodelle nach Gleichung (31) berücksichtigen Wechselwirkungen zwischen den Einflußgrößen und sind deutlich mächtiger bei der Nutzung der Gleichungen.

Die einzelnen Schritte zum Erhalt eines geeigneten Regressionsmodells sind nachfolgend aufgeführt:

- Reduzierung der Versuchsanzahl und Durchführung der Versuche,
- Eliminierung der nicht signifikanten Wechselwirkungen bzw. deren Einflußgrößen,
- Beurteilung nichtlinearer Einflüsse und deren Linearisierung,
- Transformation der Einflußgrößen zur gleichen Wertigkeit,
- Modellvalidierung und
- Interpretation des abgeschlossenen Modells.

Die oben genannten Abschnitte werden nicht nacheinander durchlaufen. Es ist vielmehr iterativ zwischen den einzelnen Stufen vorzugehen. Der zuerst notwendige Schritt zur Reduzierung der Versuchsanzahl mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung wurde bereits im Abschnitt 7.4 behandelt. Die restlichen fünf Schritte werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

8.2.1 Eliminierung nicht signifikanter Größen

Bei jeder Modellierung wird durch frühere Arbeiten, theoretisches Wissen vorangegangener Untersuchungen usw. versucht, mutmaßliche Einflußgrößen auf die Zielgröße zu bestimmen. Die Vorgehensweise, die hierzu in dieser Arbeit angewendet wurde, ist in den vorangegangenen Abschnitten erläutert.

Da nicht immer davon auszugehen ist, daß alle mutmaßlichen Einflußgrößen sich auch wirklich auf die Zielgröße auswirken, ist es in einigen Fällen sinnvoll, Einflußgrößen aus dem Modell zu nehmen, die offensichtlich keine Auswirkungen auf die Zielgröße haben.

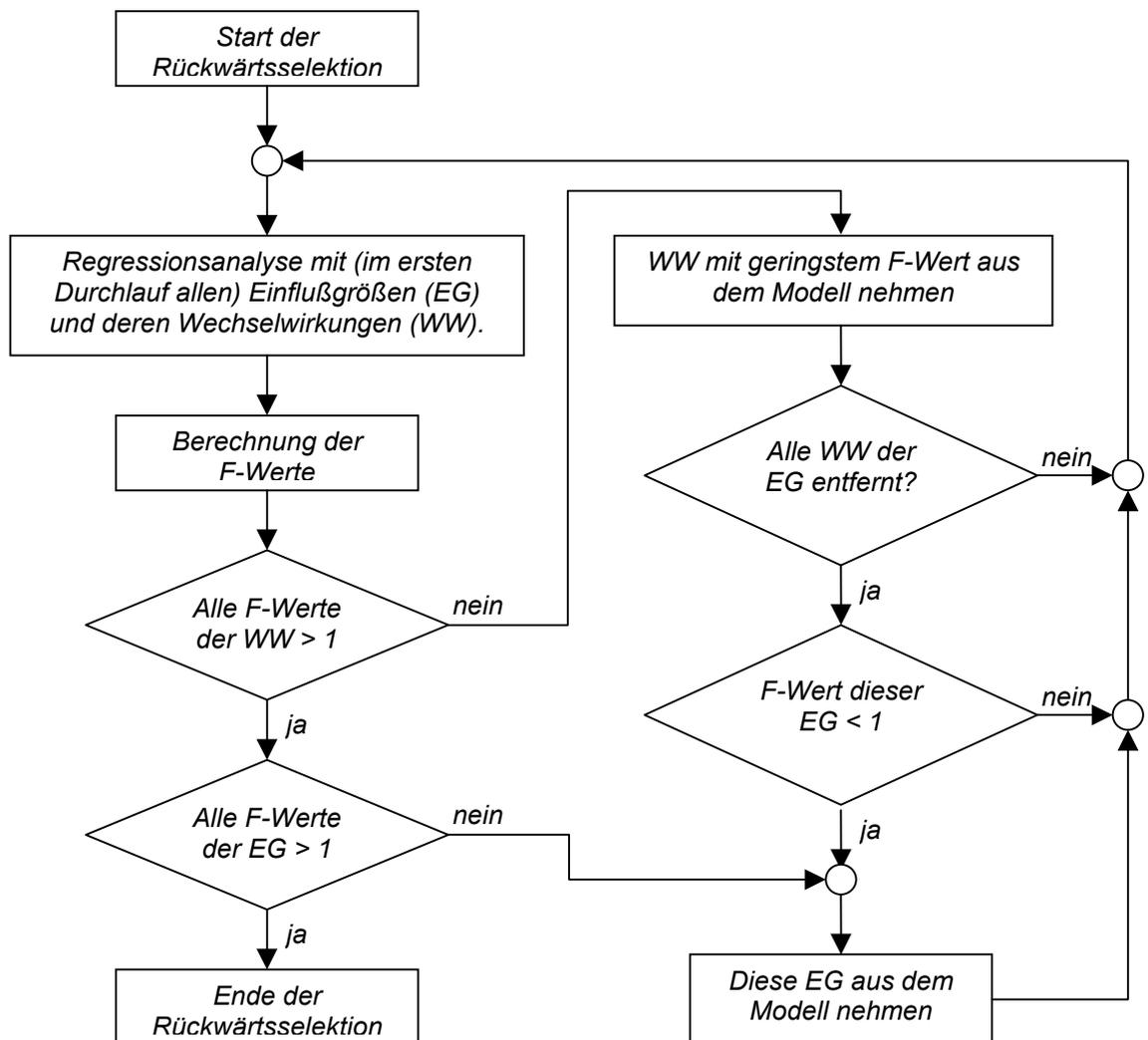
Als erster wahrscheinlichkeitstheoretischer Wert wird meist der Korrelationskoeffizient angegeben, der eine Aussage über die Anpassung des Gesamtmodells nach folgender Gleichung macht:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (38)$$

Der Zähler der Gleichung (38) ist die Summe der Abweichungen der Residuen, d.h. die Summe der Abweichungen der Meßwerte von den nach dem Modell errechneten Werten. Der Nenner ist ein Maß für die Abweichungen der Meßwerte zum Mittelwert der Meßwerte. Er kann auch als Steigung interpretiert werden. Es ist klar, daß eine große Steigung der Meßwerte bei gleichzeitig kleiner Abweichung der Modellwerte von den Meßwerten den zweiten Summanden sehr klein werden lassen. Liegt der Wert für R^2 also nahe bei eins, beschreibt das Modell die Meßdaten gut. Jedoch darf R^2 auf keinen Fall als einziges Kriterium für die Qualität eines Modells herangezogen werden. In Anhang 24.1 und 24.2 sind Auswertungen gezeigt, die diese Aussage verdeutlichen und für unterschiedliche Datenmengen die gleichen R^2 -Statistiken liefern [93]. Ein hohes R^2 ($> 0,9$) ist jedoch der erste Indikator für eine gute Modellierung. Damit ist aber keine Möglichkeit der Beurteilung der einzelnen Einflußgrößen gegeben. Das ist mit der nachfolgend erläuterten F-Statistik möglich.

Die F-Statistik bietet die Möglichkeit, signifikante von nicht signifikanten Einflußgrößen zu unterscheiden. Zur Herleitung der F-Statistik sei auf [85 und 92] verwiesen. Für diese Arbeit wurden Wechselwirkungen und/oder Einflußgrößen bei F-Werten, die kleiner 1 waren, schrittweise aus dem Modell genommen [85]. Diese Vorgehensweise wird Rückwärtsselektion (Backward Selection) genannt. Zuerst wird mit allen Einflußgrößen und deren Wechselwirkungen eine Regressionsanalyse durchgeführt. Daraufhin ist die Wechselwirkung

mit dem geringsten Betrag für den F-Wert aus dem Modell zu nehmen. Dieses Vorgehen wird schrittweise durchgeführt, bis alle F-Werte einen Betrag größer 1 aufweisen. Dabei ist zu beachten, daß bei der Eliminierung hierarchisch vorzugehen ist, d.h. erst wenn alle Wechselwirkungen, die eine bestimmte Einflußgröße beinhalten, nicht signifikant sind, darf auch der Haupteffekt aus dem Modell genommen werden. Ist dies der Fall, ist die getroffene Annahme falsch, daß diese Einflußgröße auf die Zielgröße eine Auswirkung hat. Dieses Vorgehen ist im nachfolgenden Flußdiagramm dargestellt.



In Tabelle 3 ist das Ergebnis der Rückwärtsselektion am Beispiel der Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge Q_R für ePTFE gezeigt. Q_A ist dabei die Anfangsflächenpressung, ϑ die Temperatur, h_{D0} die Dichtungshöhe, C die Steifigkeit des Dichtsystems, b_D die Dichtungsbreite und R_Z die Rauigkeit der Dichtflächen.

Einflußgrößen und deren Wechselwirkungen	F-Wert vor der Rückwärtsselektion	F-Wert nach der Rückwärtsselektion
Q_A	462,40	2613,00
g	64,74	537,00
h_{D0}	35,32	416,1
$Q_A \times h_{D0}$	30,15	272,40
$Q_A \times g$	28,45	282,00
C	26,17	186,40
$Q_A \times R_Z$	14,59	39,39
$b_D \times C$	12,46	114,6
$R_Z \times C$	11,58	81,73
b_D	9,14	60,96
$Q_A \times C$	4,17	49,41
$R_Z \times g$	1,04	2,91
$h_{D0} \times R_Z$	0,45	nicht signifikant < 1
$h_{D0} \times C$	0,44	4,19
$b_D \times h_{D0}$	0,21	nicht signifikant < 1
R_Z	0,20	11,80
$b_D \times Q_A$	0,20	nicht signifikant < 1
$h_{D0} \times g$	0,165	nicht signifikant < 1
$b_D \times g$	0,06	nicht signifikant < 1
$C \times g$	0,02	nicht signifikant < 1
$b_D \times R_Z$	0,00	nicht signifikant < 1

Tabelle 3: Vergleich der F-Werte vor und nach der Rückwärtsselektion

Tabelle 3 zeigt, daß viele Wechselwirkungen auf die Restflächenpressung Q_R von ePTFE keine Auswirkung haben. Jedoch wird deutlich, daß sich alle vor den experimentellen Versuchen festgelegten Einflußgrößen (Haupteffekte) signifikant auf die Restflächenpressung auswirken.

Somit erhält man durch die Rückwärtsselektion ein einfacheres mathematisches Modell, das die Auswertung für den Anwender erleichtert. Zudem bietet es die Möglichkeit, Einflußgrößen zu bestimmen, welche sich nicht auf die Zielgröße auswirken.

8.2.2 Linearisierung nichtlinearer Effekte

Wie bereits im Abschnitt 8.1 erläutert, ist es möglich, durch Transformationen sowohl der einzelnen Einflußgrößen als auch der Zielgröße nichtlineare Effekte zu linearisieren, um einfache Modelle zu erhalten. Das wichtigste Werkzeug zur Bestimmung des nichtlinearen Verhaltens ist der Residuenplot. Diese Art der Auswertung stellt den Stand der Technik dar und wird deshalb nicht näher diskutiert. Die Auswertungsmöglichkeit mittels Residuenplot ist ausführlich in [92, 58] dargestellt.

Darüber hinaus ergibt sich die Möglichkeit, nur einzelne Teile einer physikalischen oder einer grundsätzlich bekannten empirischen Gleichung zu modellieren, um zu aussagekräftigen und genauen Kennfunktionen zu gelangen. Das wird am Beispiel für die Leckagefunktion von Dichtungen aus ePTFE im nachstehenden Abschnitt gezeigt. Dabei werden zum leichteren Verständnis zunächst die Haupteffekte besprochen. Die genauere Analyse der Daten mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen ist in Abschnitt 9 dargestellt.

8.2.3 Teil-Implementierung der Ergebnisse in andere Modelle

Die eigenen Untersuchungen für ePTFE und das in Gleichung (4) dargestellte physikalische Modell von Bathen [40] sowie ein empirisches Modell von Tückmantel [94] zeigen, daß die Leckagefunktion wie folgt verläuft:

$$\lambda = \alpha_e \cdot e^{\beta_e \sigma} \quad (39)$$

In [12] wird ein weiteres allgemeines empirisches Modell für It-Dichtungen gezeigt, welches mit den in dieser Arbeit enthaltenen Ergebnissen für Graphitdichtungen korreliert. Die daraus hervorgehende allgemeine empirische Funktion lautet:

$$\lambda = \alpha_p \cdot \sigma^{\beta_p} \quad (40)$$

Beide oben genannten Gleichungen berücksichtigen, daß die Flächenpressung auf die Dichtung die entscheidende physikalische Größe bezüglich der Leckage darstellt, siehe zur Herleitung Abschnitt 1.2.

Wird über experimentelle Versuche eine der Abhängigkeiten nach Gleichung (39) oder (40) ermittelt, ist es möglich, den empirischen Koeffizienten α und den Exponenten β getrennt voneinander zu beschreiben. Im Abschnitt 9.2 wird gezeigt, daß der Exponent β aus den Gleichungen (39, 40) unabhängig von den Einflußgrößen ist und eine Materialkonstante darstellt. Diese Kenntnis ist ausreichend, den Koeffizienten α allein zu beschreiben.

Wie in Abschnitt 1.2 gezeigt wurde, ist der Koeffizient α als y-Achsenabschnitt der Leckagefunktion bei einer Flächenpressung von 0 MPa zu interpretieren und somit unabhängig von der Flächenpressung. Die Leckage bei einer Flächenpressung von 0 MPa stellt nur einen theoretischen Wert dar. Trotzdem wird dies aufgrund der einfacheren Darstellung in diesem Abschnitt gezeigt. Grundsätzlich ist es bei gleichen Ergebnissen möglich, den y-Achsenabschnitt bei einer anderen technisch relevanten Flächenpressung, z.B. 10 MPa, oder

der Flächenpressung im Betriebszustand zu definieren. Dies wird in Abschnitt 9.2.1.3 ausführlich erläutert.

Die in den Gleichungen (39) und (40) gezeigten Funktionen enthalten im empirischen Koeffizienten α nachstehend aufgeführte Einflußgrößen:

- Dichtungsbreite,
- Dichtungsdicke,
- Flanschrauigkeit ,
- Innendruck und
- Medium.

Das Betriebsmedium war in der vorliegenden Arbeit technisch reiner Stickstoff bei Raumtemperatur. Aus diesem Grund wird deshalb auf den Einfluß des Mediums nicht separat eingegangen.

Die Modellierung des y-Achsenabschnitts ergab bei der Beurteilung der Residuen eine quadratische Abhängigkeit des Gesamtmodells. Durch eine Transformation der Zielgröße (hier der Koeffizient α_e aus Gleichung 39) konnte ein befriedigendes empirisches Modell erzielt werden. Nach der quadratischen Rücktransformation errechnet sich der y-Achsenabschnitt der Belastungsfunktion für ePTFE nach:

$$\alpha_e = (2,375 - 0,321 b_D + 0,674 h_{D0} + 1,074 p_i - 0,101 R_Z)^2 \quad (41)$$

Bei Kenntnis der Steigung β_e aus Gleichung (39) ist es mit obiger Gleichung möglich, Vorhersagen über die Leckage bei unterschiedlicher Flächenpressung, Dichtungsbreite, Dichtungsdicke, Innendruck und Rauigkeit zu treffen. Der Dichtungsdurchmesser wird bereits durch die Normierung der Einheit der Leckagemenge λ [mg/(s·m)] auf 1 m Dichtungsumfang berücksichtigt.

Gleichung (41) berücksichtigt bereits die normierte Darstellung der Einflußgrößen, die den direkten Einfluß der einzelnen Einflußgrößen auf die Zielgröße aufzeigt. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise dazu ausführlich erläutert.

8.2.4 Normierte Darstellung der Einflußgrößen

In einem Regressionsmodell gehen normalerweise die Einflußgrößen mit den im Experiment verwendeten Einstellwerten und Einheiten in die Regressionsgleichung ein. Das bedeutet beispielsweise, daß für die Dichtungshöhe Werte zwischen 1,0 mm und 4,0 mm und für den Innendruck Werte zwischen 10,0 bar und 40,0 bar in die Gleichung eingetragen werden. Ist so das Regressionsmodell errechnet, ergibt sich aufgrund der unterschiedlich großen Zahlenwerte und Einheiten der einzelnen Einflußgrößen keine Möglichkeit, die Höhe der Auswirkung derselben auf die Zielgröße direkt zu bestimmen.

Dies ist durch eine Transformation der Einflußgrößen möglich. D.h., man normiert die Einstellwerte auf einen bestimmten Bereich. Es bietet sich an, alle Einstellwerte auf einen Bereich zu normieren, der zwischen -1 und +1 liegt. So ist aus der Regressionsgleichung anhand des Vorzeichens des jeweiligen Regressionskoeffizienten der Einflußgröße bzw. der Wechselwirkung eine Aussage zur Zunahme (positives Vorzeichen) oder Abnahme (negatives Vorzeichen) der Zielgröße erhältlich. Andere Normierungen sind aber ebenso möglich.

Beispielsweise bedeutet die Normierung für den Innendruck, daß der Wert von 10 bar auf den Wert -1 normiert wird. Der Innendruck von 40 bar erhält den Wert +1. Da in dieser Arbeit auch nichtlineare Effekte berücksichtigt bzw. geschätzt werden sollten, wurde zusätzlich zum oberen und unteren Prüfwert ein Wert gewählt, der zwischen diesen beiden Prüfwerten liegt. Der normierte Wert wurde mittels einer Geradengleichung linear errechnet. Für einen Innendruck von 20 bar beträgt er beispielsweise -1/3. In Tabelle 4 sind die Wertebereiche für das hier behandelte Beispiel aus Gleichung (41) dargestellt. Bild 8 zeigt die dazu notwendige Transformation am Beispiel des Innendrucks.

Einflußgröße	Nicht normierter Wertebereich	Normierter Wertebereich
Dichtungsbreite b_D	10 .. 20 mm	-1 .. 1
Dichtungshöhe h_{D0}	1 .. 4 mm	-1 .. 1
Innendruck p_i	10 .. 40 bar	-1 .. 1
Dichtflächenrauigkeit R_z	6 .. 160 μm	-1 .. 1

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Wertebereiche nicht normierte – normierte Einflußgröße

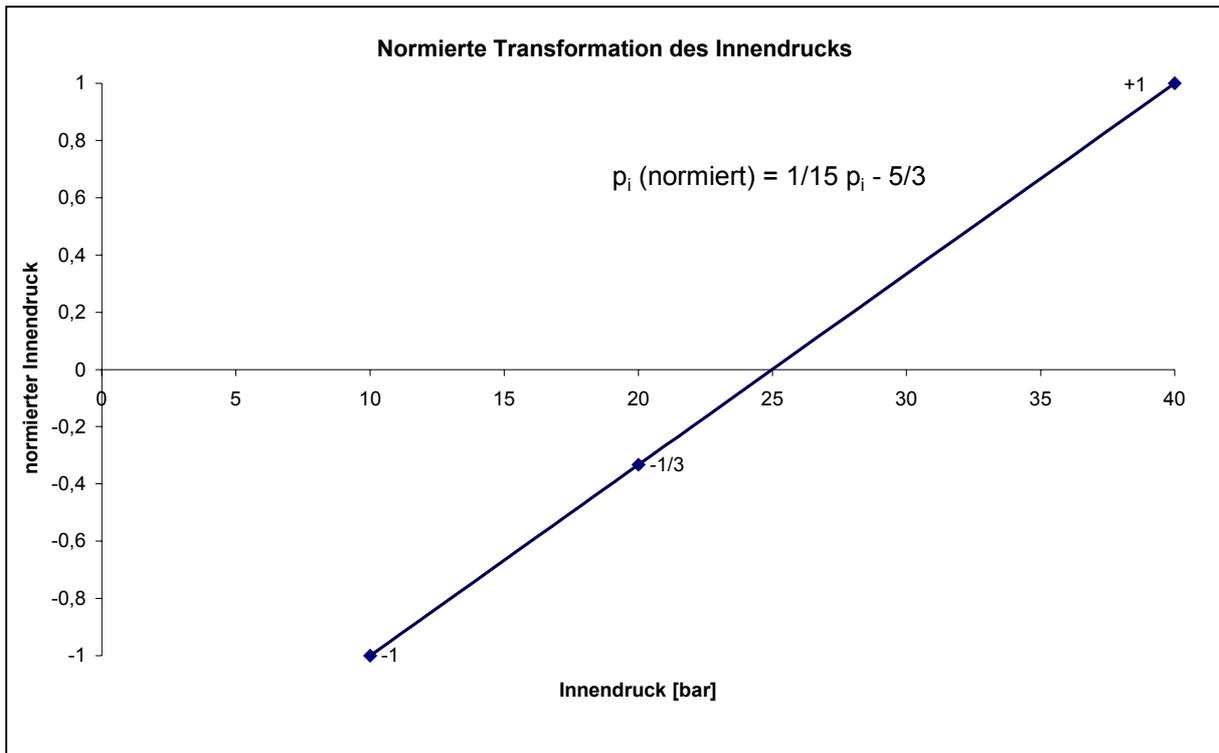


Bild 8: Darstellung der Transformation zur normierten Darstellung der Einflußgrößen

Bei Anwendung der Regressionsanalyse ergibt sich mit den normierten Werten auf einfache Art die Möglichkeit, wichtige Einflußgrößen mit großer Auswirkung oder Änderung der Zielgröße von weniger wichtigen Einflußgrößen zu unterscheiden. Das ist darauf zurückzuführen, daß sich die Zahlenwerte und Einheiten der ursprünglich verwendeten Prüfwerte nicht mehr auf den Wert des Regressionskoeffizienten auswirken. Der Regressionskoeffizient gibt dagegen direkt durch seinen Zahlenwert Auskunft darüber, wie stark sich die jeweilige Einflußgröße auf die Zielgröße auswirkt. Ein großer Zahlenwert wirkt sich stärker als ein niedriger Wert aus. Das stellt einen wichtigen Beitrag zur Optimierung eines Dichtsystems dar.

Innerhalb der Regressionsgleichung kann somit direkt am Regressionskoeffizienten die Auswirkung der Einflußgrößen abgelesen werden, siehe Gleichung (41). Ein negatives Vorzeichen zeigt eine abnehmende Zielgröße, ein positives Vorzeichen eine zunehmende Zielgröße an. Der Zahlenwert des Regressionskoeffizienten ist ein direktes Maß für die Höhe der Auswirkung auf die Zielgröße.

Diese Aussagen werden am Beispiel der Gleichung (41) erläutert. Die Gleichung enthält vier Einflußgrößen (Dichtungsbreite b_D , Dichtungshöhe h_{D0} , Innendruck p_i und die Rauigkeit der Dichtflächen R_Z) mit dem jeweiligen konstanten Regressionskoeffizienten:

- $\beta(b_D) = -0,321$
- $\beta(h_{D0}) = +0,674$
- $\beta(p_i) = +1,074$
- $\beta(R_Z) = -0,101$

Das heißt, die Leckage nimmt bei steigendem Innendruck und größerer Dichtungshöhe zu (positives Vorzeichen), bei steigender Dichtungsbreite und steigender Rauigkeit ab (negatives Vorzeichen).

Wichtiger als diese allgemeine Aussage ist aber die Möglichkeit, die Höhe der Auswirkung der Änderung einer oder mehrerer Einflußgrößen direkt anzugeben bzw. bei gleichbleibender Zielgröße die Änderung einer Einflußgröße mit der Änderung einer weiteren Einflußgröße zu kompensieren.

Hierzu ist es notwendig, die Regressionskoeffizienten auf den größten Einflußfaktor zu normieren. D.h., man bestimmt die Wertigkeit der einzelnen Einflußgrößen relativ zur stärksten Einflußgröße (= Regressionskoeffizient mit größtem Betrag) nach Gleichung (42):

$$\text{Wertigkeit } (\beta_i) [\%] = \frac{\beta_i}{|\beta_{\max}|} 100\% \quad (42)$$

Für die Regressionskoeffizienten nach Gleichung (41) erhält man mit der Normierung nach Gleichung (42) folgende Wertigkeiten mit $\beta_{\max}(p_i) = 1,074$:

- $\beta(b_D) = -0,321 \Rightarrow \text{Wertigkeit}(b_D) = -30 \%$
- $\beta(h_{D0}) = +0,674 \Rightarrow \text{Wertigkeit}(h_{D0}) = 63 \%$
- $\beta(p_i) = +1,074 \Rightarrow \text{Wertigkeit}(p_i) = 100 \%$
- $\beta(R_Z) = -0,101 \Rightarrow \text{Wertigkeit}(R_Z) = -9 \%$

Die Kompensation einer geänderten Einflußgröße mit einer weiteren wird am Beispiel einer reduzierten Dichtungsdicke h_{D0} und dem dadurch möglichen höheren Innendruck p_i bei gleichbleibender Zielgröße gezeigt. Wird h_{D0} von 4,0 mm auf 2,0 mm reduziert ($\Delta h_D = 2,0$ mm; normiert: $\Delta h_D = 5/3$), kann bei gleichbleibender Zielgröße der Innendruck (angenommen 10,0 bar) um:

$$\frac{\Delta h_D}{\Delta p_i} = \frac{\text{Wertigkeit } p_i}{\text{Wertigkeit } h_D} \Rightarrow \Delta p_i = \Delta h_D \frac{\text{Wertigkeit } h_D}{\text{Wertigkeit } p_i} = \frac{5}{3} \cdot \frac{63\%}{100\%} = 1,05 \quad (43)$$

erhöht werden. Der normierte Wert für Δp_i von 1,05 entspricht rücktransformiert einem zusätzlichen Innendruck von Δp_i 15,8 bar auf einen insgesamt zulässigen Innendruck von $p_i = 25,8$ bar.

Allgemein ausgedrückt errechnet sich die Kompensation einer Einflußgröße auf eine andere durch (g EG := **g**eänderte **E**influßgröße; k EG := **k**ompensierende **E**influßgröße):

$$\Delta g \text{ EG} = \Delta k \text{ EG} \frac{\text{Wertigkeit } k \text{ EG}}{\text{Wertigkeit } g \text{ EG}} \quad (44)$$

In den nachfolgenden Abschnitten wird die hier vorgestellte Vorgehensweise mit Angabe der Wertigkeit der Einflußgröße in Form eines anschaulichen Balkendiagramms unter Angabe des jeweiligen Vertrauensbereichs der Einflußgröße dargestellt, Bild 9.

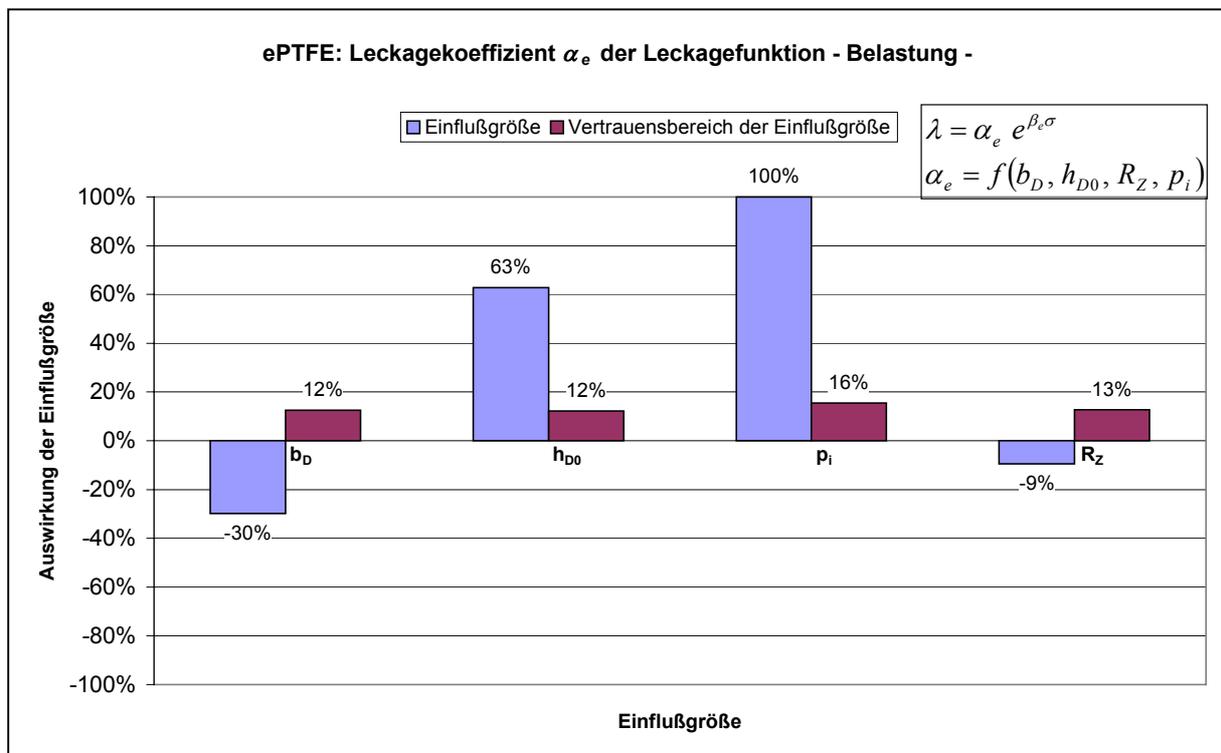


Bild 9: Darstellung der normierten Einflußgrößen nach Gleichung (42) für ePTFE

Für die in dieser Arbeit beabsichtigte Optimierung einer Dichtverbindung mit Hilfe von Kennfunktionen ergeben sich aus Bild 9 beispielsweise für die unabhängig von der Flächenpressung und der Steigung der Leckagefunktion, die eine Materialkonstante ist, zu erwartende Leckage folgende Aussagen:

- Der Innendruck p_i hat die größte Auswirkung auf die Leckage bezüglich des y-Achsenabschnitts der Leckagefunktion.
- Bei steigender Dichtungshöhe h_{D0} und steigendem Innendruck erhöht sich die Leckage.
- Eine größere Dichtungsbreite b_D und eine höhere Rauigkeit R_z der Dichtflächen verringern die Leckage.
- Eine Erhöhung der Dichtungsdicke auf das Doppelte kann in etwa durch ein Vierfaches der Dichtungsbreite ausgeglichen werden.
- Da der Innendruck meist prozeßbedingt ist und die Rauigkeit der Dichtflächen in der Regel nicht beeinflusst werden kann, bleiben zur Optimierung b_D und h_{D0} .
- Betrachtet man die oben genannten vier Einflußgrößen, sollte in erster Linie die Dichtungshöhe so gering wie möglich gewählt werden, da eine prozentual gleiche Änderung von h_D im Vergleich zu b_D etwa die doppelte Auswirkung auf die Leckage hat.

Die in diesem Abschnitt dargestellte Vorgehensweise ist prinzipiell auf alle anderen Modellierungen in gleicher Weise zu übertragen. Das erleichtert eine Optimierung hinsichtlich einer bestimmten Zielgröße (hier Leckage) deutlich. Es wird sofort sichtbar, mit welcher Einflußgröße der größte Effekt bei der Änderung bzw. Optimierung derselben erreicht werden kann.

Man kann sich somit oftmals auf eine Änderung der signifikantesten Einflußgrößen beschränken und die weniger signifikanten Einflußgrößen vernachlässigen.

8.2.5 Validierung der Modelle und Prüfverfahren

Sind die Analysen durchgeführt, ist es in den meisten Fällen notwendig, die Modelle zu validieren. D.h., es wird überprüft, ob die erhaltenen Versuchsergebnisse bzw. Prüfverfahren technisch richtige Resultate liefern. Dazu gibt es (unter anderem) verschiedene Möglichkeiten:

1. Bei großen Datenmengen kann die Validierung mit einem oder mehreren Versuchsergebnissen durchgeführt werden, die nicht in der Modellierung berücksichtigt wurden.
2. Bei kleinen Datenmengen besteht die Möglichkeit, zusätzliche Versuche zur Validierung des Modells durchzuführen.
3. Liegen keine gesicherten Kenntnisse über die Versuchsabläufe oder die verwendeten Prüfstände vor, ist es notwendig, diese zuerst dahingehend zu überprüfen, ob die erhaltenen Ergebnisse sinnvoll sind.

In Abschnitt 9 wurden vor allem die ersten beiden Arten der Validierung durchgeführt.

Für die Überprüfung der Prüfstände konnten sowohl für die Leckageversuche als auch für die reinen Kriechversuche früher ermittelte Ergebnisse zur Validierung der Prüfabläufe zugrunde gelegt werden [95, 96].

Für die Validierung des Versuchs zur Bestimmung des Kriech-Relaxationsverhaltens lagen lediglich Ergebnisse nach der DIN 52913 [43, 96] vor. Mit dem in dieser Arbeit verwendeten Prüfstand ergibt sich im Vergleich zum Prüfaufbau nach der oben genannten Norm die Möglichkeit, die Steifigkeit des Prüfaufbaus zu variieren. Da noch keine Versuchsergebnisse bekannt sind, die nach einem ähnlichen Verfahren ermittelt wurden, war es notwendig, vor der Validierung des Modells die Validierung des Versuchsablaufs und des Prüfstands durchzuführen. Die Firma *amtec*¹ entwickelte parallel zu den hier durchgeführten Versuchen einen Prüfstand, der ebenso eine steifigkeitsabhängige Regelung besitzt. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung des Prüfverfahrens und der verwendeten Prüfstände. Siehe hierzu Abschnitt 9.1.3.

Durch die Bestimmung der notwendigen Kennwerte und Einflußgrößen für das Verformungs- und Leckageverhalten und die Festlegung, welche Dichtungshauptgruppen es gibt und in welchem Bereich sie Einsatz finden, wurden in diesem Abschnitt die Grundlagen gelegt, um aussagefähige Kennfunktionen für Flanschdichtungen zu erhalten. Nachstehend sind die einzelnen Versuchsabläufe, deren Durchführung und Auswertung detailliert aufgeführt. Ebenso wird ausführlich auf die Modellierung und Interpretation der Kennfunktionen eingegangen.

¹ AMTEC GmbH, Hoher Steg 13, 74348 Lauffen / N.

9 Experimentelle Untersuchung und Modellierung von Flanschdichtungen

Experimentell ermittelte Daten stellen weitgehend die Basis in der technisch-wissenschaftlichen Untersuchung des Verhaltens von Werkstoffen dar.

Bei Werkstoffen für Flanschdichtungen ist dabei vor allem das Verhalten bezüglich des Verformungs- und des Leckageverhaltens maßgebend. Dabei muß festgestellt werden, daß das entscheidende Kriterium für ein sicher arbeitendes Flanschsystem durch das Verformungsverhalten der Dichtung im Einbau- und Betriebszustand bestimmt wird.

Das Leckageverhalten während der gesamten Standzeit einer Flanschdichtung unter Betriebsbedingungen kann nur so gut sein, wie es der Werkstoff und natürlich die fachgerechte Montage der Dichtung zulassen. Diese Aussage wird in diesem Abschnitt ausführlich diskutiert.

Bei der Festlegung der Versuchsabläufe zur Bestimmung von Kennfunktionen galt es, die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Eigenschaften der Dichtungen zu ermitteln. Darüber hinaus war es Aufgabe, die Kennfunktionen mit möglichst einfachen und kostengünstigen Versuchsdurchführungen bestimmen zu können. Die Versuchsabläufe sollen dadurch einem möglichst breitem Anwenderfeld zur Verfügung stehen. Das erfolgt u.a. durch die teilweise Einführung der hier vorgestellten Versuchsabläufe in die momentan entstehende europäische Normung für Flanschdichtungen.

9.1 Verformungsverhalten

In dieser Arbeit wurde vor allem Wert darauf gelegt, dem Anwender und Hersteller von Weichstoffdichtungen auf wissenschaftlich – technischer Grundlage eine umfassende mathematisch – empirische Methode zur Beschreibung des Verhaltens dieser Dichtungsarten zu geben. Die ermittelten Kennfunktionen sollen dem Anwender eine Zuordnung von Maßnahmen zum Erhalt einer zuverlässigen Dichtverbindung zur Verfügung stellen. Das dadurch zu beeinflussende optimierte Verformungsverhalten kann durch experimentelle Versuchsabläufe ermittelt werden, welche die Bestimmung

- der Verformungscharakteristik bei Raumtemperatur inklusive der maximal zulässigen Flächenpressungen im Einbauzustand Q_{MAX} ,
- der Verformungscharakteristik bei Betriebstemperatur inklusive der maximal zulässigen Flächenpressungen im Betriebszustand Q_{SMAX} und
- des Kriech-Relaxationsverhaltens mit dem Kennwert Q_R ermöglichen.

9.1.1 Verformungsverhalten im Einbauzustand

9.1.1.1 Allgemeine Betrachtung

Das Verformungsverhalten im Einbauzustand beschreibt die mechanischen Eigenschaften einer Weichstoffdichtung bei Raumtemperatur bis zum Erreichen der maximal zulässigen Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX} .

Die maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX} gibt Auskunft darüber, welche Flächenpressung während des Dichtungseinbaus, d.h. bei Raumtemperatur, zulässig ist. Die Eigenschaft, welche Q_{MAX} kennzeichnet, war bisher nicht genau definiert. Es gab zwei gleichwertige Definitionen:

1. eine mechanische Zerstörung der Dichtung, wobei eine 20%-ige Sicherheit bezogen auf die Flächenpressung berücksichtigt wird, die zur Zerstörung der Dichtung führt oder
2. eine bestimmte maximal zulässige Höhenabnahme im reinen Kriechversuch bei Raumtemperatur (falls keine mechanische Zerstörung festgestellt wurde).

Beide Definitionen gehen auf die DIN 28090-1 [22] zurück. Eine mechanische Zerstörung und eine bestimmte Höhenabnahme bei konstanter Flächenpressung sind jedoch widersprüchlich, wenn man die Eigenschaften betrachtet, welche eine Dichtung idealerweise während des Einbaus haben soll:

- hohe plastische Verformung bei Raumtemperatur,
- Verschluß und/oder deutliche Reduzierung der Porosität der Dichtung,
- möglichst geringe Dichtungsdicke nach dem Einbau,
- möglichst hohe ertragbare Flächenpressung.

Die ersten drei Punkte vereinen in sich die Aussage, daß die Dichtung sich während des Einbaus möglichst stark verformen sollte. Dieses widerspricht jedoch elementar der unter 2. aufgeführten Definition für Q_{MAX} . Die Begründung hierfür ist, daß eine hohe plastische Verformung der Dichtung sowohl Mikro- als auch Makrounebenheiten der Dichtfläche ausgleicht, d.h., die Trennflächenleckage minimiert wird. Darüber hinaus ist die Dichtung für das Verschließen bzw. das Verengen der inneren Leckagewege verantwortlich. Dadurch wird die Querschnittsleckage deutlich reduziert. Siehe zur strömungsmechanischen Begründung dieser Aussagen Abschnitt 1.2. Die Forderung nach einer hohen Verformung des Dichtmaterials während des Einbaus wird außerdem mit der Sicherheit gegen das Ausblasen der Dichtung

begründet. Eine dünne Dichtung bietet dem Innendruck, welcher ein Ausblasen der Dichtung bewirkt, eine deutlich geringere Angriffsfläche [90].

Um eine möglichst hohe plastische Verformung zu erreichen, ist der vierte Punkt, eine möglichst hohe mechanische Belastbarkeit zu gewährleisten, ebenso entscheidend für ein ideales Einbauverhalten.

Somit ergibt sich als einzig dichtungstechnisch relevante Definition für die maximal zulässige Einbauflächenpressung Q_{MAX} die mechanische Schädigung des Dichtungsmaterials. In der neuen europäischen Normung wird sich diese Definition höchstwahrscheinlich durchsetzen [51].

Mit der Bestimmung der maximal zulässigen Einbauflächenpressung Q_{MAX} alleine ist jedoch noch keine Aussage über das Verformungsverhalten einer Flachdichtung bei Raumtemperatur gegeben. Das Verformungsverhalten während des Einbaus ist für eine Optimierung eines Dichtsystems deutlich wichtiger als die alleinige Angabe von Q_{MAX} . Q_{MAX} dient vor allem der Berechnung einer Flanschverbindung und der Bestimmung der maximal zulässigen Schraubkraft (Drehmoment). Dagegen gibt die Kenntnis der Verformungscharakteristik Auskunft darüber, wie sich eine Dichtung an Mikro- und Makrounebenheiten anpaßt, wie die inneren Leckagewege sich verändern und welche Dichtungshöhe nach dem Einbau der Dichtung erreicht wird. Letztlich enthält sie wichtige Daten, die für eine optimierte Auslegung einer Flanschverbindung notwendig sind.

Es war Aufgabe, einen geeigneten Versuchsablauf zu entwerfen, der sowohl die Verformungscharakteristik der Dichtungsarten für den Einbau bei Raumtemperatur beschreibt, als auch eine mathematische Modellierung derselben ermöglicht und darüber hinaus den Wert für die maximal zulässige Einbauflächenpressung Q_{MAX} bestimmbar macht.

9.1.1.2 Versuchsbeschreibung

Mit dem Versuchsablauf zur Bestimmung von Q_{MAX} müssen die im Abschnitt 9.1.1.1 beschriebenen Eigenschaften zu ermitteln sein. Die Einflußgrößen mit den Einstellwerten für diesen Versuchsablauf ergeben sich aus den Abschnitten 4 und 6:

- Dichtungsbreite 10 mm, 15 mm, 20 mm
- Dichtungshöhe 1 mm, 2 mm, 4 mm
- Flanschrauigkeit 6 μ m, 60 μ m, 160 μ m
- Temperatur Raumtemperatur
- Flächenpressung bis maximal 240 MPa bei $b_D = 10$ mm.

In Anhang 25.1 ff sind alle Versuche (inklusive der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX}) mit den Einflußgrößen und den gemessenen Zielgrößen aufgeführt.

Bild 10 zeigt am Beispiel von ePTFE den in dieser Arbeit entwickelten Versuchsablauf, der mit geringfügigen Änderungen in die neue europäische Norm prEN 13555 [51] übernommen wurde.

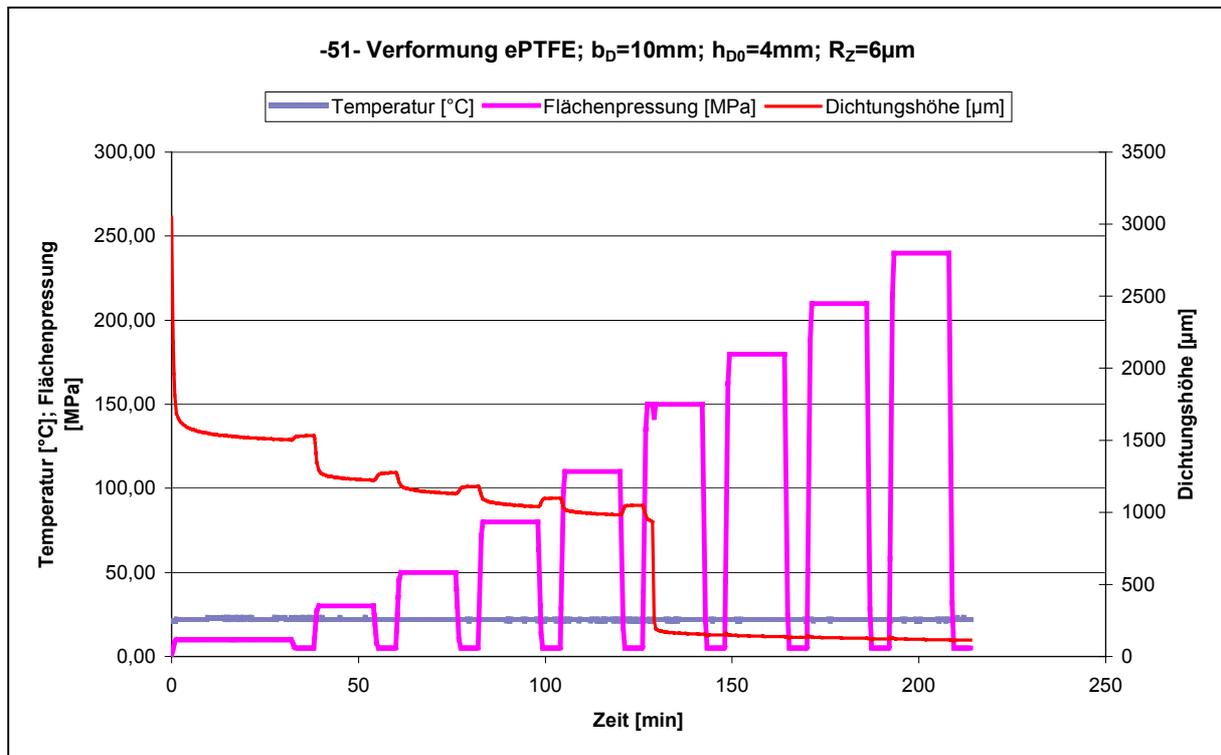


Bild 10: Versuchsablauf zur Bestimmung von Q_{MAX}

Der Versuchsablauf nach Bild 10 ist für die Bestimmung der maximal zulässigen Einbaufächenpressung Q_{MAX} und der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} identisch. Er unterscheidet sich lediglich in einer höheren Temperatur für Q_{SMAX} . Der Versuchsablauf ist nachfolgend aufgelistet:

1. Belastung auf eine bestimmte Vorlast (hier 10 MPa).
2. Halten der Flächenpressung für 15 Minuten.
3. Temperaturregelung auf 20°C.
4. Nach Erreichen der Temperatur wird die Flächenpressung für weitere 15 Minuten konstant gehalten.
5. Entlasten auf 5 MPa (konstant für alle Entlastungsstufen).
6. Durchführung der Be- und Entlastungszyklen bis zur mechanischen Schädigung der Dichtung oder der maximalen Prüfkraft des Prüfstandes bei konstanter Temperatur.

Im Vergleich zum σ_{VO} -Versuch nach DIN 28090-1 [22] (σ_{VO} entspricht prinzipiell der maximal zulässigen Einbauflächenpressung Q_{MAX} nach prEN 13555 [51]) unterscheidet sich der hier vorgestellte Versuch in folgenden Punkten:

- stufenförmige Belastung,
- Reduzierung auf eine konstante Flächenpressung nach jeder Belastungsstufe,
- praxisnahe Ermittlung des Kennwerts,
- längerer Versuchsablauf im Vergleich zum Kurzzeitversuch nach [22],
- kürzerer Versuchsablauf im Vergleich zum Druckstandversuch nach [22].

Durch den oben beschriebenen Versuchsablauf ergeben sich im Vergleich zu den bisherigen Versuchen nach [22] deutliche Vorteile, welche nachstehend beschrieben sind.

Die stufenförmige Be- und Entlastung wurde gewählt, weil beim Einbau einer Dichtung die Schrauben in der Regel in mehreren Stufen einzeln angezogen werden [97]. Es ergeben sich deshalb abhängig vom momentanen Ort der Verspannung lokale Be- und Entlastungen der Dichtung.

Für die Entlastungsstufen ist es erforderlich, eine technisch sinnvolle Flächenpressung zu verwenden, auf welche die Dichtung im wirklichen Betrieb entlastet werden darf. Das können die minimal notwendige Flächenpressung im Betriebszustand $Q_{SMIN/L}$ oder die Mindestflächenpressung sein, die notwendig sind, ein Herausdrücken der Dichtung aus dem Dichtsitz (=Ausblasen) zu verhindern. In dieser Arbeit wurden die Entlastungsstufen auf 5 MPa festgelegt, weil diese Flächenpressung (bis 40 bar Innendruck) in der Regel ausreicht, um ein Ausblasen der Dichtung zu vermeiden [90]. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Entlastungsstufen auf 1/3 der vorherigen Belastungsstufe festzulegen, um mit den Versuchen zur Ermittlung des Ersatz-Elastizitätsmoduls E_D nach [22] übereinzustimmen.

Die Flächenpressung, welche zur mechanischen Schädigung des Dichtmaterials führt, ist nach dem hier vorgestellten Versuchsablauf im Vergleich zur kontinuierlichen Belastung im Kurzzeitversuch nach DIN 28090-1 [22] niedriger. Das liegt daran, weil das mechanische Versagen aufgrund der stufenförmigen Belastung nicht zeitlich verzögert, d.h. bei einer zu hohen Flächenpressung, sondern in der Regel kurz nach Erreichen der jeweiligen Flächenpressungsstufe auftritt.

Je nach Versuchsart - kurzzeitiger Stauchversuch oder Druckstandversuch nach [22] - ergibt sich durch die neue Versuchsdurchführung eine längere bzw. kürzere Versuchsdauer. Wie bereits im Abschnitt 9.1.1.1 erläutert, ist der Druckstandversuch zur Bestimmung der maximal zulässigen Einbauflächenpressung σ_{VO} nach DIN 28090-1 [22] technisch nicht richtig. Deshalb ergibt sich in der Regel eine längere Versuchsdauer. Das ist hinzunehmen, da der Versuch

durch die stufenförmige Belastungsführung deutlich praxisnäher ist, eine einfache Bestimmung der maximal zulässigen Einbaufächenpressung Q_{MAX} zulässt sowie die zur Modellierung des Verformungsverhaltens notwendigen Daten liefert. Zudem ist es mit dieser Versuchsmethodik möglich, sowohl die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} als auch den Ersatz-Elastizitätsmodul E_D bzw. $E_{D/T}$ für die Berechnung des Dichtsystems zu erhalten.

Aus dem hier dargestellten Versuch, siehe Bild 10, lässt sich die maximal zulässige Einbaufächenpressung Q_{MAX} relativ leicht bestimmen. Kurz nach Erreichen der Flächenpressungsstufe von 150 MPa ist ein plötzlicher Abfall der Dichtungshöhe zu verzeichnen. Das kennzeichnet eine eindeutige mechanische Schädigung der Dichtung.

Da es mit den bisherigen Versuchsabläufen nach [22] oftmals schwierig ist, eine eindeutige Flächenpressung für die mechanische Schädigung des Dichtmaterials Q_{krit} zu bestimmen, war es notwendig, hierfür eine unmißverständliche Art der Darstellung zu schaffen. Durch die Ausführung als Balkendiagramm ist die Ermittlung für Q_{krit} einfach und exakt möglich, Bild 11.

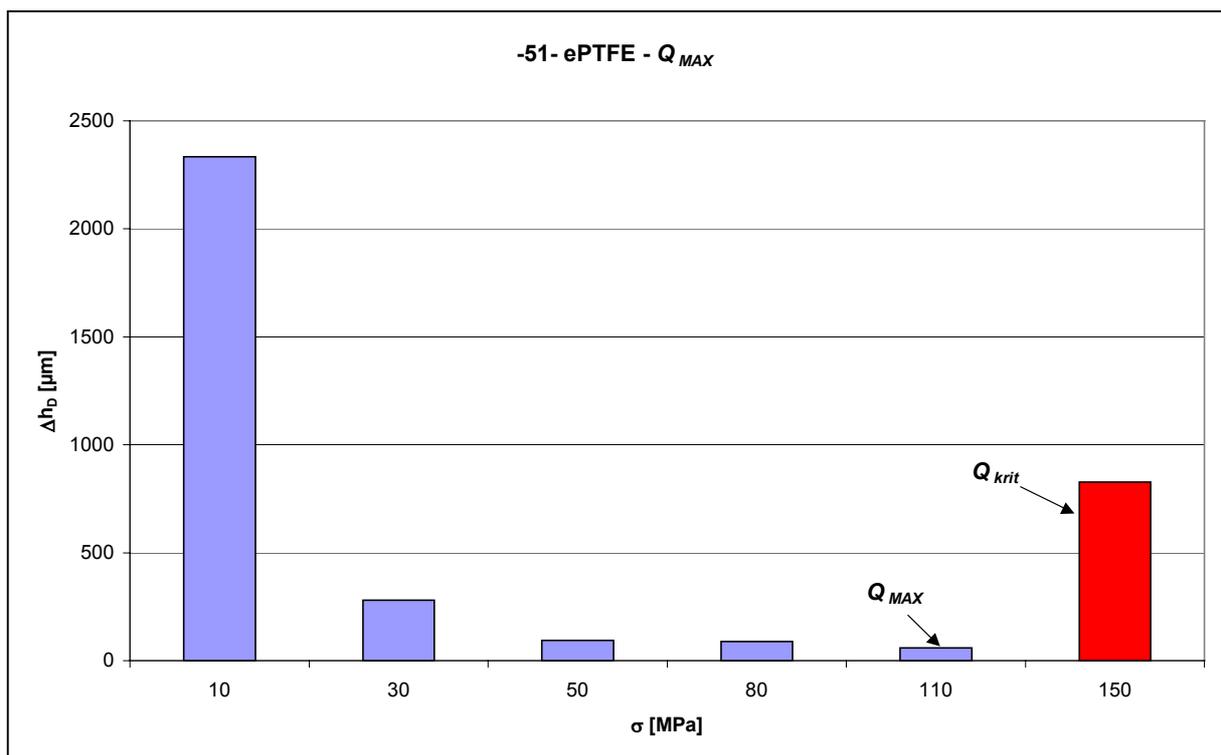


Bild 11: Diagramm zur Bestimmung von Q_{MAX} und Q_{SMAX}

Die Abszisse stellt die Stufen der Flächenpressung dar. Der erste Balken kennzeichnet dabei beispielsweise die Höhenabnahme der Dichtung bei einer Steigerung der Flächenpressung von 0 MPa auf 10 MPa. Prinzipiell wird durch diese Art der Darstellung die Steigung der Höhenabnahme zwischen zwei Flächenpressungsstufen angegeben. Ein plötzliches Ansteigen

der Höhenabnahme von einer Flächenpressungsstufe auf die nächste ist ein eindeutiges Kriterium für die mechanische Schädigung des Dichtungsmaterials. Grund hierfür ist, daß sich ein Werkstoff bei gleichbleibend zunehmender stufenförmiger Belastung von Stufe zu Stufe um einen geringeren Betrag verformen muß.

Als maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand wird anstatt der prozentualen Verringerung der Flächenpressung, wo eine mechanische Schädigung des Dichtmaterials auftritt (= Q_{krit}), die vor einer Schädigung auftretende Flächenpressungsstufe definiert. In dem hier diskutierten Versuch sind das 110 MPa, Bild 10.

Da es nur bei äußerst ungünstigen geometrischen Verhältnissen möglich war, die Dichtungen zu schädigen, ist für die maximal zulässige Einbauflächenpressung Q_{MAX} bzw. die Flächenpressung Q_{krit} , wo eine mechanische Schädigung auftrat, keine getrennte Modellierung möglich und auch nicht sinnvoll. Grundsätzlich kann aufgrund der hier erhaltenen Ergebnisse davon ausgegangen werden, daß Q_{krit} auch bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen für die in dieser Arbeit geprüften Dichtungsmaterialien mit mindestens 150 MPa angenommen werden kann. Sind höhere Flächenpressungen im jeweiligen Dichtsystem möglich, sind diese ggf. im Einzelfall nach der hier beschriebenen Versuchsmethodik zu bestimmen.

9.1.1.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen

Für die optimierte Auslegung eines Flanschsystems ist die Beschreibung der Verformungsfunktion deutlich wichtiger als die alleinige Kenntnis des diskreten Wertes der maximal zulässigen Einbauflächenpressung Q_{MAX} . Es erwies sich, daß alle hier geprüften Dichtungsarten nach folgender empirischer Gleichung bis zum Erreichen der maximal zulässigen Einbauflächenpressung Q_{MAX} bzw. der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} verformt und beschrieben werden können.

$$h_D = \alpha_p \sigma^{\beta_p} \quad (45)$$

Linearisiert man Gleichung (45), ergibt sich:

$$\ln h_D = \ln \alpha_p + \beta_p \ln \sigma \quad (46)$$

Betrachtet man die linearisierte Darstellung, entspricht α_p einem Dickenkoeffizienten und β_p der Steigung der Verformungskurve. Ist die Einbauflächenpressung bekannt, kann man mit den

Einflußgrößen Dichtungsbreite b_D , Dichtungshöhe h_{D0} und Flanschrauigkeit R_z die verpreßte Dichtungshöhe bei Einbautemperatur bestimmen. Zur grafischen Darstellung der Verformungsfunktion am Beispiel der Dichtung aus Bild 10, siehe Bild 12.

Bei Kenntnis der Anfangsdicke ergibt sich mit der Dicke der Dichtung nach Einbau ein Maß für die Anpassungs- oder Ausgleichsfähigkeit der Dichtung. Eine hohe Verformung steht für eine bessere, eine geringe Verformung für eine schlechtere Anpassungsfähigkeit an Mikro- und Makrounebenheiten der Dichtflächen.

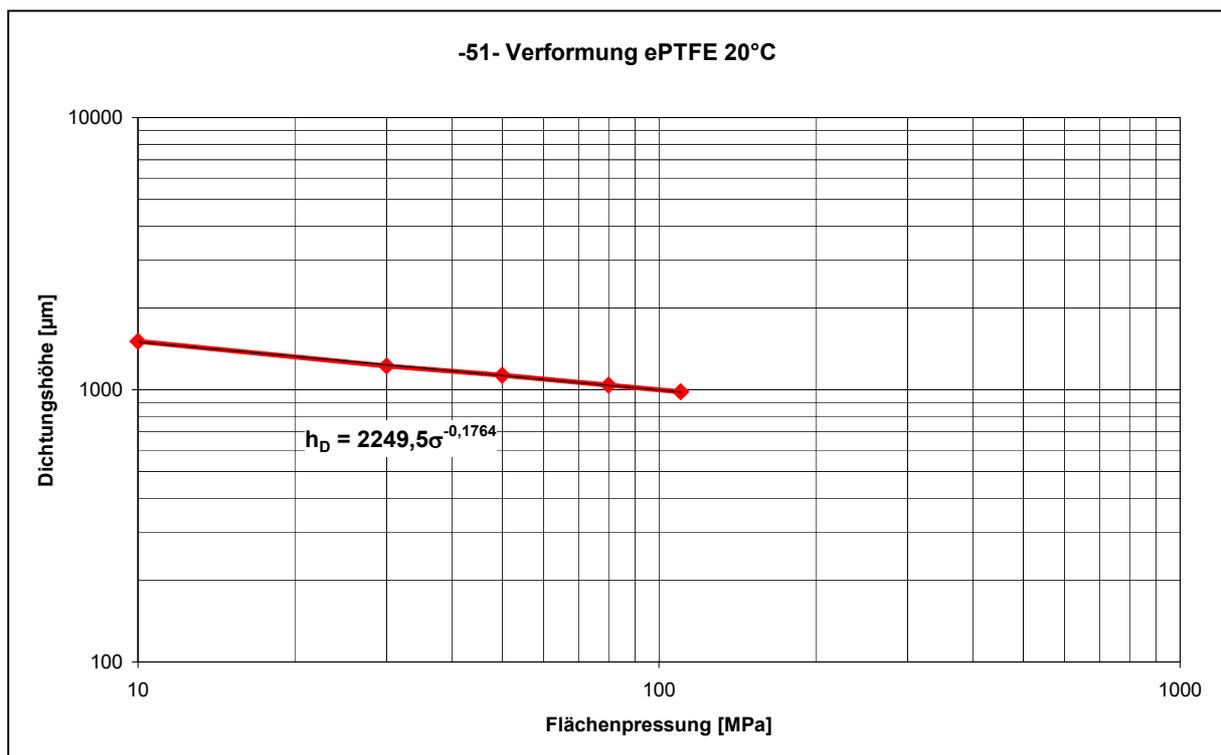


Bild 12: Darstellung der Verformungsfunktion bei Raumtemperatur

Der Dickenkoeffizient α_p sowie die Steigung der Verformungsfunktion β_p wurden, nach vorangegangenen experimentellen Untersuchungen, getrennt voneinander modelliert. In Bild 13 werden die empirisch bestimmten Modelle aus Anhang 26.1 und 26.2 mit den gemessenen Kurven grafisch verglichen.

Die Modelle zeigen dabei eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Die Dichtungen aus reinem PTFE weichen im unteren Bereich der Flächenpressung von den Modellwerten ab, da diese Dichtungen erst ab 30 MPa eine ausreichende Verformung bei Raumtemperatur mit exponentiellem Verlauf zeigten. Die Modellierung wurde unter Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen den Einflußgrößen durchgeführt und, falls notwendig, linearisiert. Nicht signifikante Einflußgrößen wurden aus dem Modell genommen. Die Darstellung erfolgt dabei immer in der normierten Form.

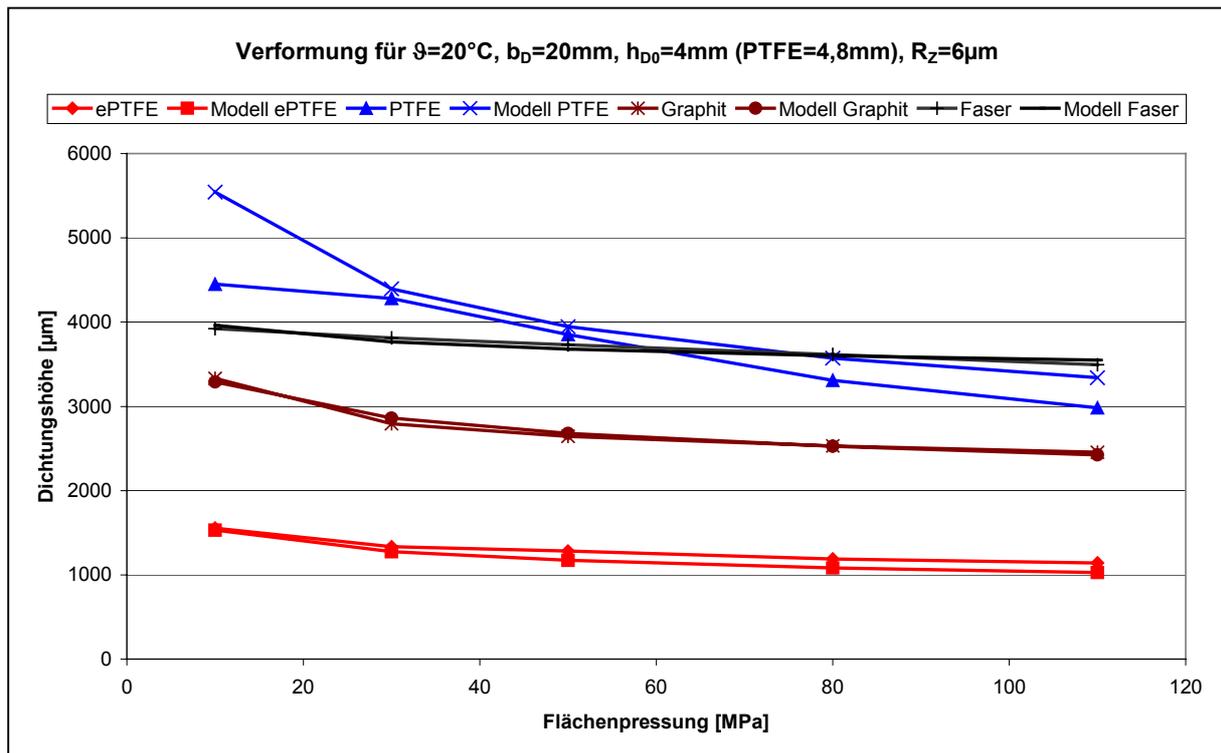


Bild 13: Vergleich der Verformungsfunktionen bei Raumtemperatur

9.1.1.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung

Für die vier geprüften Dichtungstypen, welche repräsentativ für die Dichtungshauptgruppen stehen, lassen sich für ein optimiertes Dichtsystem bezüglich des Verformungsverhaltens beim Einbau aus den oben genannten Ausführungen folgende Aussagen ableiten:

- Es ist eine Dichtung zu wählen, die in der Lage ist, die Mikro- und Makrounebenheiten der Dichtfläche auszugleichen. Jedoch muß gewährleistet sein, daß am ganzen Umfang die Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN/L}$ nicht unterschritten wird.
- Die Dichtung sollte nach dem Verpressen möglichst dünn sein.

Das Anpassungsverhalten der Dichtungen aus den Dichtungshauptgruppen ist sehr unterschiedlich. Das geringste Anpassungsverhalten bei einer Flächenpressung von beispielsweise 30 MPa besitzen Dichtungen aus Faserverbundwerkstoffen, die sich zu ca. 5 % ihrer Ausgangsdicke an Flanschunebenheiten anpassen. Dichtungen aus gefülltem PTFE verformen sich um etwa 15 %. Graphitdichtungen zeigen ein deutlich besseres Anpassungsverhalten, sie verformen sich um ca. 30 % ihrer Ausgangsdicke. Das beste

Ausgleichsvermögen liegt bei Dichtungen aus ePTFE vor, die sich um ca. 70 % verformen. Für die beiden zuletzt genannten Dichtungen (Graphit und ePTFE) ist jedoch eine bestimmte Mindestflächenpressung zur Vorverformung nötig, um die Querschnittsleckage auf ein technisch sinnvolles Maß zu reduzieren.

9.1.2 Verformungsverhalten im Betriebszustand

9.1.2.1 Allgemeine Betrachtung

Das Verformungsverhalten im Betriebszustand beschreibt die mechanischen Eigenschaften einer Weichstoffdichtung unter Betriebstemperatur bis zum Erreichen der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} . Sie gibt Auskunft darüber, welche Flächenpressung eine Dichtung während der Betriebsbelastung erfahren darf, ohne eine Schädigung zu erleiden.

Die DIN 28090 [22] definiert $\sigma_{BO/T}$ ($=Q_{SMAX}$) als eine maximal zulässige relative Höhenabnahme bei konstanter Flächenpressung und konstanter Temperatur. Für die hier betrachteten Dichtungshauptgruppen wurden die nachstehend aufgelisteten maximal zulässigen Grenzwerte definiert, die eine relative Höhenabnahme in %, bezogen auf die Dichtungshöhe bei Hauptlast, angeben:

- Faserdichtungen 15 %
- PTFE- und ePTFE-Dichtungen 25 %
- Graphitdichtungen 5 %.

Diese Definition hat sich als fehlerhaft herausgestellt. Das liegt vor allem daran, daß ein Dichtungsmaterial bis zur mechanischen Schädigung in der Regel zuverlässig arbeitet und in den seltensten Fällen einem reinen Kriechen sondern meistens einer Kriech-Relaxation unterliegt. Mit steigender Flächenpressung erhöht sich das relative Kriechen, was zu geringen zulässigen Flächenpressungen im Betrieb nach [22] führt und dadurch im schlimmsten Fall ein Versagen des Flanschsystems bewirken kann. Nähere Ausführungen dazu sind in [56] gegeben.

Wie in diesem Abschnitt gezeigt wird, ist es sinnvoll, eine möglichst hohe Flächenpressung während des Betriebs zu gewährleisten. Hierdurch wird eine deutliche Sicherheitssteigerung des Flanschsystems erreicht.

Für die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} wie für die maximal zulässige Einbauflächenpressung Q_{MAX} ergibt sich als Kriterium für das Versagen einer Dichtung die mechanische Schädigung. Diese Definition hat sich auch aufgrund der Erkenntnisse dieser Arbeit in der aktuellen europäischen Normungsarbeit durchgesetzt.

Mit der Angabe des Kennwerts Q_{SMAX} erhält man vor allem eine Größe für die Flanschberechnung. Zudem können mit diesem Kennwert verschiedene Dichtungstypen miteinander verglichen werden. Es ist aber nicht möglich, mit Hilfe dieses diskreten Wertes eine umfassende Beschreibung von Eigenschaft und Verhalten eines Dichtungswerkstoffes unter Betriebsbelastung zu geben. Dagegen erhält man mit der hier vorgestellten Versuchsmethodik, dem daraus experimentell bestimmten Verformungsverhalten und den damit bestimmten Kennfunktionen nach Anhang 26.1 und Anhang 26.2 wertvolle Erkenntnisse über:

- die zusätzliche Verformung, z.B. im Arbeitspunkt der Dichtung, bei Betriebsbelastungen, die auf ein Flanschsystem wirken und durch äußere Kräfte und Momente hervorgerufen werden sowie
- die Einflußgrößen, welche eine optimierte Auslegung des Flanschsystems ermöglichen.

Zur Bestimmung der Kennfunktionen für das Verformungsverhalten der Dichtung im Betrieb als auch für die Ermittlung der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} war es erforderlich, einen geeigneten Versuchsablauf zu entwerfen.

9.1.2.2 Versuchsbeschreibung

Für die Ermittlung der Kennfunktionen wurden folgende Einflußgrößen mit den dazugehörigen Einstellwerten variiert:

- Dichtungsbreite 10 mm, 15 mm, 20 mm
- Dichtungshöhe 1 mm, 2 mm, 4 mm
- Flanschrauigkeit 6 μm , 60 μm , 160 μm
- Temperatur 20 °C, 150 °C, 250 °C
- Flächenpressung bis maximal 240 MPa bei $b_D = 10\text{mm}$.

Der Versuchsplan ist in Anhang 25.1 ff aufgelistet. Die Versuchsdurchführung für die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} ist bis auf die Temperaturführung identisch mit dem Versuchsablauf zur Bestimmung der maximalen Einbaufächenpressung Q_{MAX} . Das erleichtert zum einen die Versuchsdurchführung, zum anderen werden die Kosten für die Kennwertbestimmung deutlich reduziert. Bild 14 zeigt am Beispiel von ePTFE einen typischen Versuchsablauf. Er wird folgendermaßen durchgeführt:

1. Belastung auf eine bestimmte Vorlast (hier 10 MPa).
2. Halten der Flächenpressung für 15 Minuten.
3. Temperaturerhöhung um 8 °C/Minute.
4. Nach Erreichen der Temperatur wird die Flächenpressung für weitere 15 Minuten gehalten.
5. Entlasten auf 5 MPa (konstant für alle Entlastungsstufen).
6. Durchführung der Be- und Entlastungszyklen bei konstanter Temperatur bis zur mechanischen Schädigung der Dichtung oder der maximalen Prüfkraft des Prüfstandes.

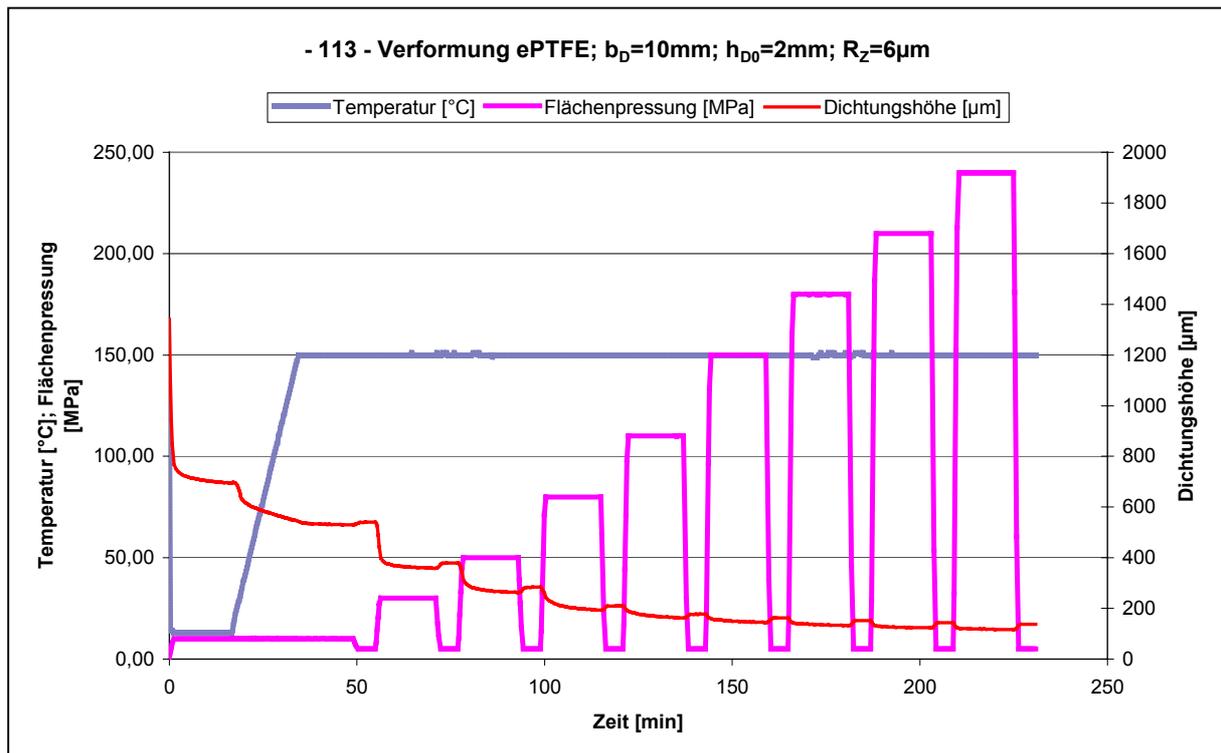


Bild 14: Versuchsablauf zur Bestimmung von $Q_{S\text{MAX}}$

Der hier vorgestellte Versuchsablauf nach Bild 14 ist zum bisherigen Normversuch deutlich unterschiedlich. Der entscheidende Unterschied ist durch die Definition des Kennwerts der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand $Q_{S\text{MAX}}$ gegeben. Die DIN 28090 [22] definiert eine maximal zulässige Höhenabnahme im reinen Kriechversuch als Versagenskriterium einer Dichtung. Dadurch ergeben sich für die meisten Dichtungsarten Flächenpressungen, die als deutlich zu niedrig einzuschätzen sind. Dies gründet auf der Tatsache, daß Dichtmaterialien bei höheren Temperaturen ein stärkeres Kriechen zeigen und somit eine steigende Abnahme der Dichtungshöhe aufweisen. Diese Abnahme kann aber durch eine höhere (nach DIN 28090 [22] nicht zulässige) Flächenpressung ausgeglichen werden, welche wiederum zu einer höheren Restflächenpressung im Betriebszustand führt [56].

Aufgrund der Mängel im Versuchsablauf nach DIN 28090-1 [22] wurde der in dieser Arbeit entwickelte Versuchsablauf in die neue europäische Norm übernommen.

Die Auswertung für die Bestimmung des Kennwerts der maximal zulässigen Flächenpressung im Betriebszustand $Q_{S\text{MAX}}$ ist identisch mit der zur Bestimmung der maximal zulässigen Einbaufächenpressung Q_{MAX} , siehe hierzu Abschnitt 9.1.1.2. In Bild 14 ist im Gegensatz zu Bild 10 ein Versuchsablauf dargestellt, der keine mechanische Schädigung des

Dichtungsmaterials aufzeigt. Bild 15 gibt analog zu Bild 11 die jeweilige Höhenabnahme der Dichtung wieder.

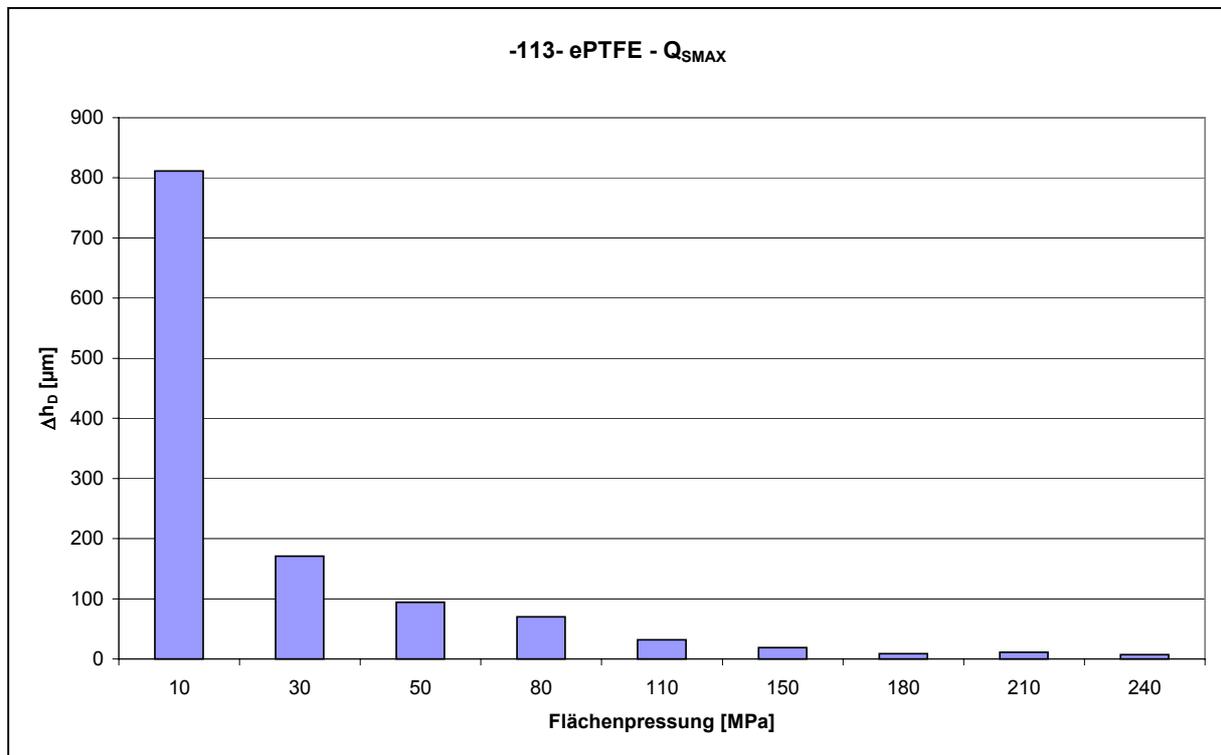


Bild 15: Diagramm zur Bestimmung von $Q_{S\text{MAX}}$

Bild 15 zeigt, daß die ePTFE Dichtung aus Bild 14 bis zur höchstmöglichen Flächenpressung des Prüfstandes von 240 MPa eine stetig verringernde Höhenänderung zwischen den Flächenpressungsstufen erfährt. D.h., daß Dichtungsmaterial weist keine mechanische Schädigung auf. Ist keine Schädigung wie in Bild 15 sichtbar, sollte der Kennwert für die maximal zulässige Flächenpressung im Betriebszustand $Q_{S\text{MAX}}$ mit dem Hinweis versehen werden, daß bei der maximalen Flächenpressung des Prüfstandes noch keine Schädigung auftrat. Die Dichtung kann damit mindestens bis zu dieser Flächenpressung belastet werden.

Bisher wurde die reine Kennwertermittlung für $Q_{S\text{MAX}}$ beschrieben. Für die Optimierung des Flanschsystems ist es jedoch entscheidend, nicht nur einen einzelnen Kennwert, sondern darüber hinaus eine Beschreibung des gesamten Verformungsverlaufs zu erhalten, d.h. eine Funktion $h_D = f(b_D, R_Z, \vartheta, \sigma)$. Aus der mathematischen Beschreibung sind dann Ableitungen möglich, wie sich die Dichtung im Betriebszustand hinsichtlich der Sicherheit und Dichtheit der Flanschverbindung verhalten wird und welche Einflußgrößen wie zu verändern sind, um dieses zu erreichen.

9.1.2.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen

Die Verformungscharakteristik, d.h. die mathematische Beschreibung, ist für den Einbau- und den Betriebszustand qualitativ gleich, da sich lediglich die Temperatur ändert. Die hier gezeigten Ausführungen gelten somit auch für den Einbauzustand nach Abschnitt 9.1.1. Bild 16 zeigt die Verformungscharakteristik am Beispiel der Dichtung aus Bild 14.

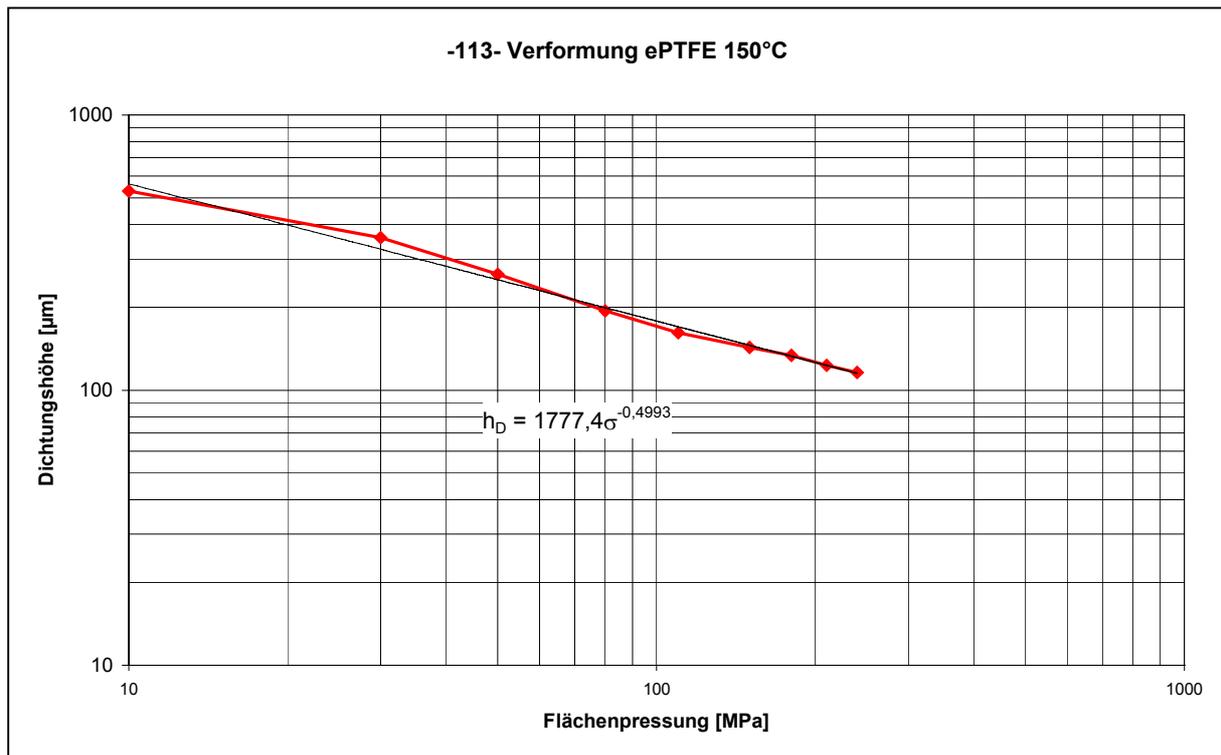


Bild 16: Darstellung der Verformungsfunktion für die Betriebstemperatur

Ein Dichtsystem im Betriebszustand befindet sich nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge in einem stabilen Arbeitspunkt. Da eine zusätzliche Verformung der Dichtung durch äußere Kräfte und Momente auf die Flanschverbindung von diesem Arbeitspunkt aus auftritt, ist es sinnvoll, dieses gesondert zu betrachten.

Das geschieht ausgehend von der allgemeinen Beschreibung der Verformungsfunktion nach Gleichung (45) bzw. deren linearisierter Form nach Gleichung (46) aus Abschnitt 9.1.1.3.

Die mathematische Beschreibung für das Verhalten der Dichtung im Arbeitspunkt ist durch eine Verschiebung des Koordinatenursprungs in den Arbeitspunkt möglich, siehe Gleichung (47). Zur mathematischen und grafischen Herleitung siehe Abschnitt 9.2.1.3.

$$\ln h_D = \frac{d \ln h_D}{d \ln \sigma} (\ln \sigma - \ln \sigma_{AP}) + \ln h_D (\sigma_{AP}) \quad (47)$$

Durch Einfügen der experimentell ermittelten Steigung in Gleichung (47) erhält man:

$$\ln h_D = \beta_p (\ln \sigma - \ln \sigma_{AP}) + \ln h_D (\sigma_{AP}) \quad (48)$$

$h_D (\sigma_{AP})$ ist dabei die Dichtungshöhe im Arbeitspunkt, σ_{AP} die Flächenpressung im Arbeitspunkt. Zur einfacheren Darstellung und Interpretation der Gleichung (48) bietet sich eine teils dimensionslose Darstellung dieser Gleichung an.

$$\ln \frac{h_D}{h_D (\sigma_{AP})} = \beta_p \ln \frac{\sigma}{\sigma_{AP}} \quad (49)$$

Mit Gleichung (49) ergeben sich zwei dimensionslose Größen:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{AP}} \quad (50)$$

und

$$\varepsilon_{hD} = \frac{h_D}{h_D (\sigma_{AP})} \quad (51)$$

Mit der zuerst genannten Kenngröße ε_σ wird die Flächenpressungsänderung relativ zum Arbeitspunkt eines Dichtsystems angegeben. Die zweite Kenngröße ε_{hD} gibt Auskunft darüber, wie sich die Dichtungshöhe bei einer Erhöhung der Flächenpressung im Arbeitspunkt ändert. Erhält man für den Quotienten einen geringen Betrag im Bereich von 0 bis 1, ist dies ein Zeichen für eine hohe zusätzliche Verformung unter zusätzlicher Belastung. Das sollte vermieden werden, weil es zu einer Entspannung des Dichtsystems führt. Die Einbausituation sollte demnach so gewählt werden, daß die Kenngröße ε_{hD} gegen 1 geht. Das bedeutet, daß sich die Dichtung unter zusätzlicher Belastung so gering wie möglich verformen sollte. Siehe hierzu auch Abschnitt 9.1.2.4.

Um eine geringst mögliche Verformung zu gewährleisten und damit ein optimiertes Dichtsystem zu erhalten, ist es in der allgemeinen Darstellung der Verformungsfunktion notwendig, die Dichtungshöhe im Arbeitspunkt und die Steigung der Verformungsfunktion, die unabhängig von der Flächenpressung ist, möglichst klein werden zu lassen.

Im Betrieb wird jede Dichtung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge einen mehr oder minder stabilen Endwert für die Flächenpressung (=Arbeitspunkt) erreichen. Treten in diesem stabilen Zustand keine zusätzlichen Belastungen auf, die eine weitere Verformung der Dichtung bewirken, wird die Dichtung in diesem Zustand verbleiben. Diese Situation wird sich jedoch nur in sehr wenigen Fällen einstellen. Dagegen zeigen sich in den meisten Fällen bei einer Flanschverbindung z.B. Temperaturwechselbelastungen oder Rohrkräfte, die zu einer zusätzlichen Verformung des Dichtmaterials führen.

Die Koeffizienten α_p bzw. $h_D(\sigma_{AP})$ und der Exponent β_p lassen sich mit Hilfe der normierten Kennfunktionen aus Anhang 26 beschreiben. In Bild 17 werden die Kennfunktionen mit den experimentell ermittelten Meßwerten verglichen.

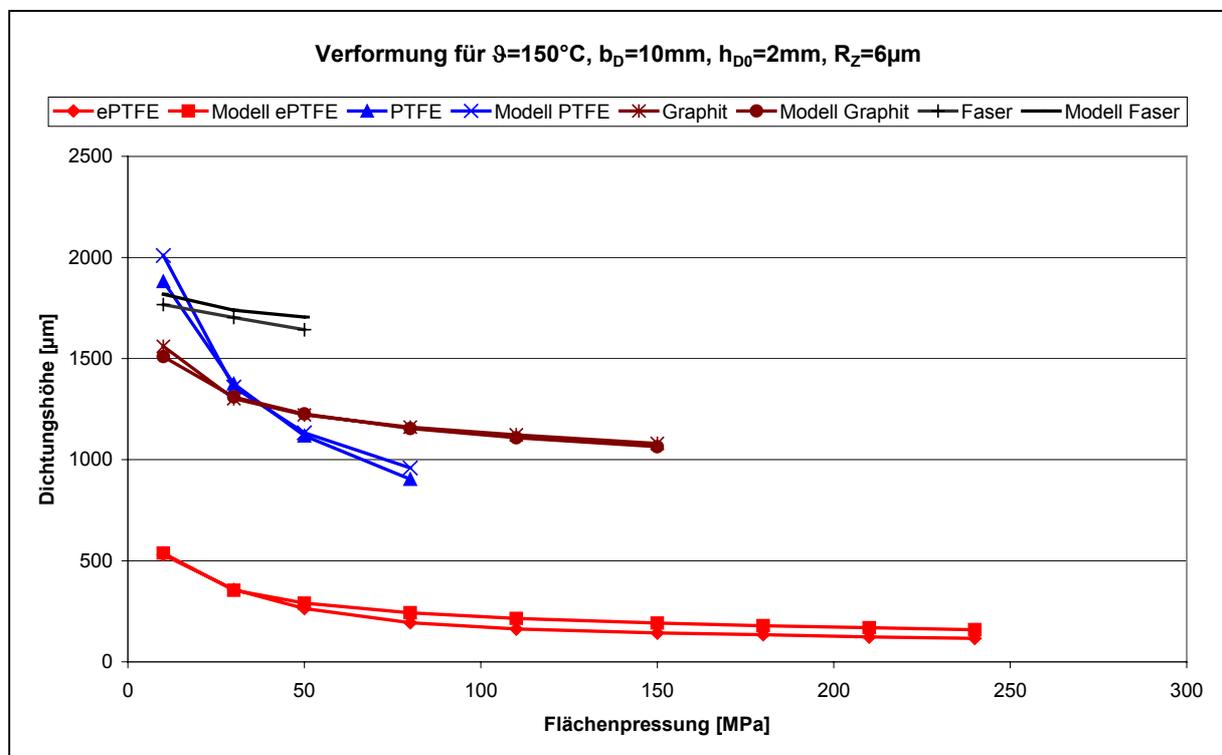


Bild 17: Vergleich der Verformungsfunktionen bei Betriebstemperatur bis (Q_{SMAX})

Bild 17 zeigt eine gute Anpassung der Kennfunktionen an die gemessenen Werte. Die Funktionen verlaufen jeweils bis zum Erreichen von Q_{SMAX} . Es ist zudem zu erkennen, daß die Kurven bei zunehmender Flächenpressung immer flacher werden. Ursache dafür ist der prinzipiell auftretende potentielle Verlauf der Verformungsfunktion gemäß Gleichung (46).

Die ideale Dichtung, welche sich unter Zusatzlasten nicht weiter verformt, ist in einer realen Flanschverbindung nicht zu erreichen, da sich ein Werkstoff bis zur Zerstörungsgrenze immer weiter verformen wird. Es existieren somit nur Dichtungen, die der idealen Dichtung mehr oder

weniger nahe kommen. Vergleicht man die unterschiedlichen Dichtungstypen aus Bild 17, ergeben sich die in Tabelle 5 aufgeführten Dichtungshöhen $h_D(\sigma_{AP})$ im frei wählbaren Arbeitspunkt (hier 30 MPa als realistischer Wert für Stahlflansche) und die Steigungen β_p der Verformungskurve.

Dichtungstyp	$h_D(\sigma_{AP})$ [μm]	Steigung β_p
ePTFE	346	-0,382
PTFE	1359	-0,356
Graphit	1310	-0,129
Faser	1739	-0,04

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Funktionskonstanten für die Dichtungen nach Bild 17

Weil das beschriebene ideale Verformungsverhalten einer Weichstoffdichtung unter Betriebsbedingungen technisch nicht möglich ist, muß die Verformung bei zusätzlicher Belastung der Dichtung dem nahe kommen und möglichst gering werden. D.h., es muß immer die Kombination der Dichtungsdicke im Arbeitspunkt $h_D(\sigma_{AP})$ und der Steigung β_p betrachtet werden, um dieses beurteilen zu können.

Beurteilt man $h_D(\sigma_{AP})$ aus Tabelle 5, sieht man, daß ePTFE den geringsten Wert aufweist. Das liegt an der großen Höhenänderung und dem damit verbundenem guten Anpassungsverhalten der Dichtung während der Vorverformung. Das deutet auf eine geringe zusätzliche Verformung bei zusätzlicher Belastung der Dichtung hin. Dagegen zeigt sich für das gleiche Material bei der Steigung der größte Wert. Das ist auf den ersten Blick eine negative Eigenschaft, da es eine große Höhenänderung bei zusätzlicher Belastung erwarten läßt. Das dem nicht so ist, wird an einem einfachen Beispiel in Bild 18 erläutert.

Bild 18 zeigt, daß bei einer Erhöhung der Flächenpressung um 10 MPa, ausgehend vom bei 30 MPa liegenden Arbeitspunkt, auf 40 MPa eine relativ geringe Höhenänderung für ePTFE-, Graphit- und Faserdichtungen erreicht wird. Dagegen ändert sich die Dichtungshöhe einer Dichtung aus PTFE im Vergleich zu einer Dichtung aus ePTFE um das Dreifache. Darüber hinaus läßt sich deutlich erkennen, daß eine Änderung der Flächenpressung um 10 MPa (gleicher Betrag wie oben) und einem Arbeitspunkt von 70 MPa (anstatt 30 MPa) eine stark verringerte zusätzliche Verformung aller Dichtungen nach sich zieht. Die Angabe der Höhenänderung von Faserdichtungen für diesen Arbeitspunkt ist aufgrund der bei dieser Flächenpressung (70 MPa) aufgetretenen mechanischen Schädigung ($\sigma_{AP} > Q_{SMAX}$) nicht möglich.

Aus dieser Erkenntnis heraus lässt sich ableiten, daß eine Flanschverbindung während des Einbaus der Dichtung immer mit der höchstmöglichen Kraft verspannt werden sollte.

Wird dies bei Einbauempfehlung und Berechnung der Flanschverbindung berücksichtigt, läßt sich immer eine relativ hohe Sicherheit des Flanschsystems erreichen. Das zeigt sich auch bei der Betrachtung der Einflußgrößen auf die Flanschdichtheit in Abschnitt 9.2.

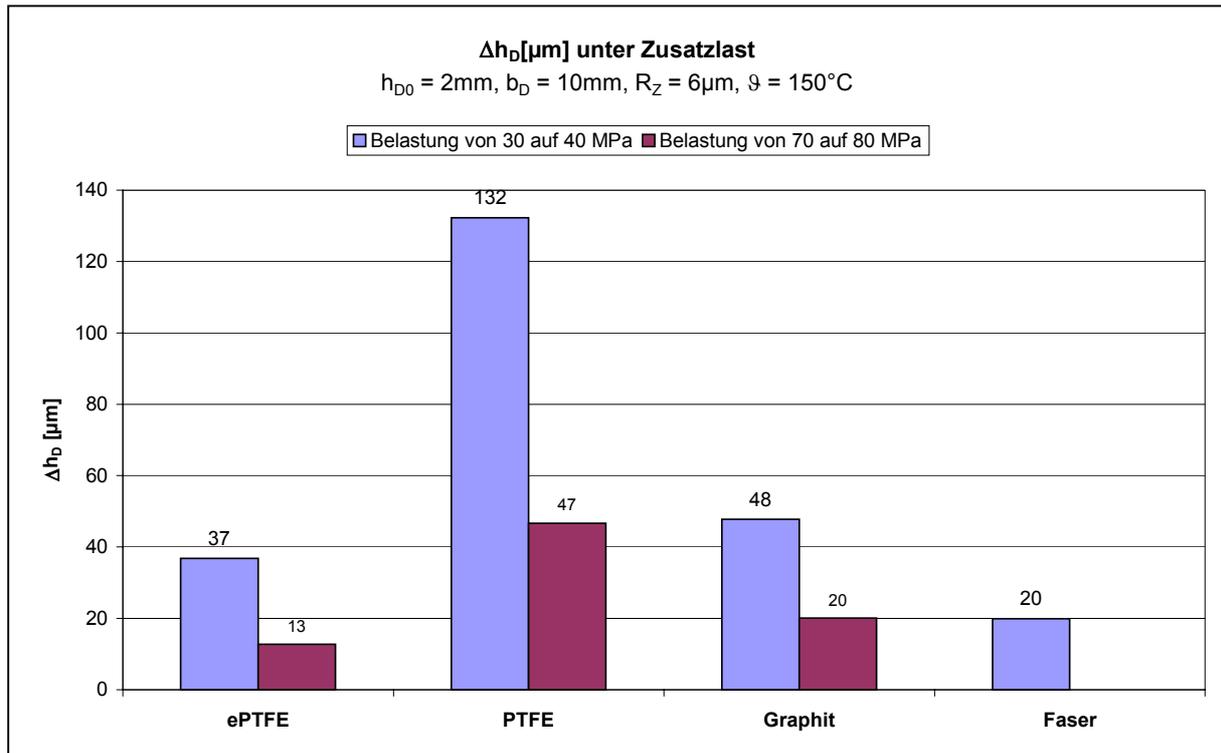


Bild 18: Gegenüberstellung der Verformung unter betrieblicher Belastung

Um eine Optimierung des Flanschsystems zu ermöglichen, sind die bisher erarbeiteten Kenntnisse noch nicht ausreichend. Bisher wurde lediglich gezeigt, daß eine möglichst hohe Einbauflächenpressung anzustreben ist. Eine umfassendere Kenntnis erhält man, wenn die Dickenkoeffizienten α_p bzw. $h_D(\sigma_{AP})$ und die Steigung β_p bezüglich der Effekte der Einflußgrößen betrachtet werden und daraus eine Empfehlung zur Optimierung abgeleitet wird. Dies ist im folgenden Abschnitt dargestellt.

9.1.2.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung

Die normierte Darstellung der Kennfunktionen aus Anhang 26 erlaubt eine Aufspaltung der Effekte der einzelnen Einflußgrößen auf die allgemeinen Parameter α_p und β_p . In Abschnitt 8.2.4 ist die dazu notwendige Methode ausführlich erläutert.

Nachfolgend sind im Bild 19 der Dickenkoeffizient α_p und in Bild 20 die Steigung der Verformungsfunktion β_p mit den Haupteffekten der Einflußgrößen am Beispiel für ePTFE-Dichtungen erörtert. Die Haupteffekte und Wechselwirkungen aller in dieser Arbeit geprüften Dichtungsarten sind im Anhang 27.1 ff gezeigt. Die Kennfunktionen, bei denen die Wechselwirkungen zwischen den Einflußgrößen berücksichtigt sind, wurden aufgrund der einfacheren Erläuterung aus den Bildern 19 und 20 herausgenommen. Die Aussagen bezüglich der hier behandelten Optimierung bleiben die gleichen, unabhängig davon, ob ausschließlich der Einfluß der Haupteffekte oder zusätzlich die Wechselwirkungen mit betrachtet werden.

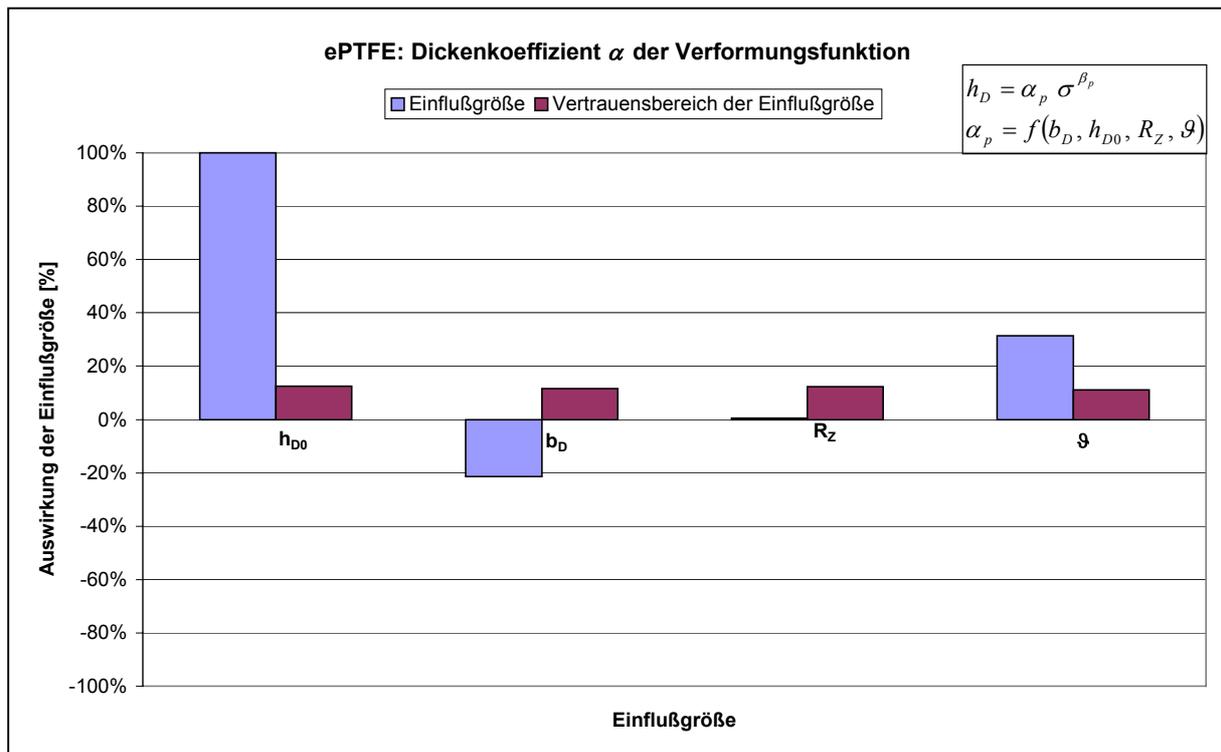


Bild 19: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p

In Bild 19 ist zu erkennen, daß die Ausgangshöhe der Dichtung h_{D0} den größten Effekt auf eine Zunahme des Dickenkoeffizienten α_p hat.

Für die Optimierung des Dichtsystems ist deshalb eine möglichst geringe Dichtungsdicke im verpreßten Zustand zu bestimmen, um unerwünschten zusätzlichen Verformungen der Dichtung im Betriebszustand entgegenzuwirken.

Die Dichtungsbreite hingegen führt zu einer Verringerung des Dickenkoeffizienten α_p . Auf den ersten Blick läßt das eine möglichst breite Dichtung als positiv erscheinen. Jedoch wurde im Abschnitt 9.1.2.3 hergeleitet, daß beim Einbau der Dichtung auf eine möglichst hohe Einbauflächenpressung Wert gelegt werden sollte.

Deshalb ist oftmals bei gleichbleibender Einbaukraft eine schmalere Dichtung einer breiteren vorzuziehen. Diese Aussage wird auch in den nachstehenden Abschnitten bewiesen.

Darüber hinaus ist bemerkenswert, daß das häufig zitierte „gute Breiten-Dicken-Verhältnis“ einer Dichtung als konstantem Wert widerlegt werden kann. Deutlich wird das, wenn die Effekte der Dichtungsbreite b_D und der Dichtungsdicke h_{D0} gegenübergestellt werden. Soll der gleiche positive Effekt der Halbierung einer Dichtungsdicke bezüglich des Dickenkoeffizienten mit der Dichtungsbreite erreicht werden, müßte die Dichtungsbreite um etwa das Fünffache verbreitert werden (100% zu 21 %).

Als weitere Einflußgrößen, die sich auf den Dickenkoeffizienten α_p auswirken, sind die Temperatur und die Rauigkeit der Dichtflächen in Bild 13 angegeben. Diese Einflußgrößen sind system- bzw. prozeßbedingt. Es ist lediglich anzumerken, daß sich bei steigender Temperatur ein größerer Dickenkoeffizient einstellt. Die Begründung hierfür liegt in der nachstehend beschriebenen größeren Steigung, die aufgrund der stärkeren Verformung bei erhöhter Temperatur in der linearisierten Form zu einem größeren Dickenkoeffizienten führt. Die Rauigkeit der Dichtflächen ist für den Dickenkoeffizienten bei ePTFE-Dichtungen ohne Bedeutung.

Für die anderen hier geprüften Dichtungen lassen sich bezüglich einer Optimierung des Dickenkoeffizienten die gleichen Aussagen treffen wie für ePTFE, siehe Anhang 27.1 ff.

Die zweite Komponente, welche die Empfindlichkeit einer Weichstoffdichtung gegen eine zusätzliche Verformung aus dem Betriebs- oder Arbeitspunkt heraus beschreibt, ist die Steigung der Verformungsfunktion β_p . Die Effekte der Einflußgrößen für ePTFE sind in Bild 20 dargestellt.

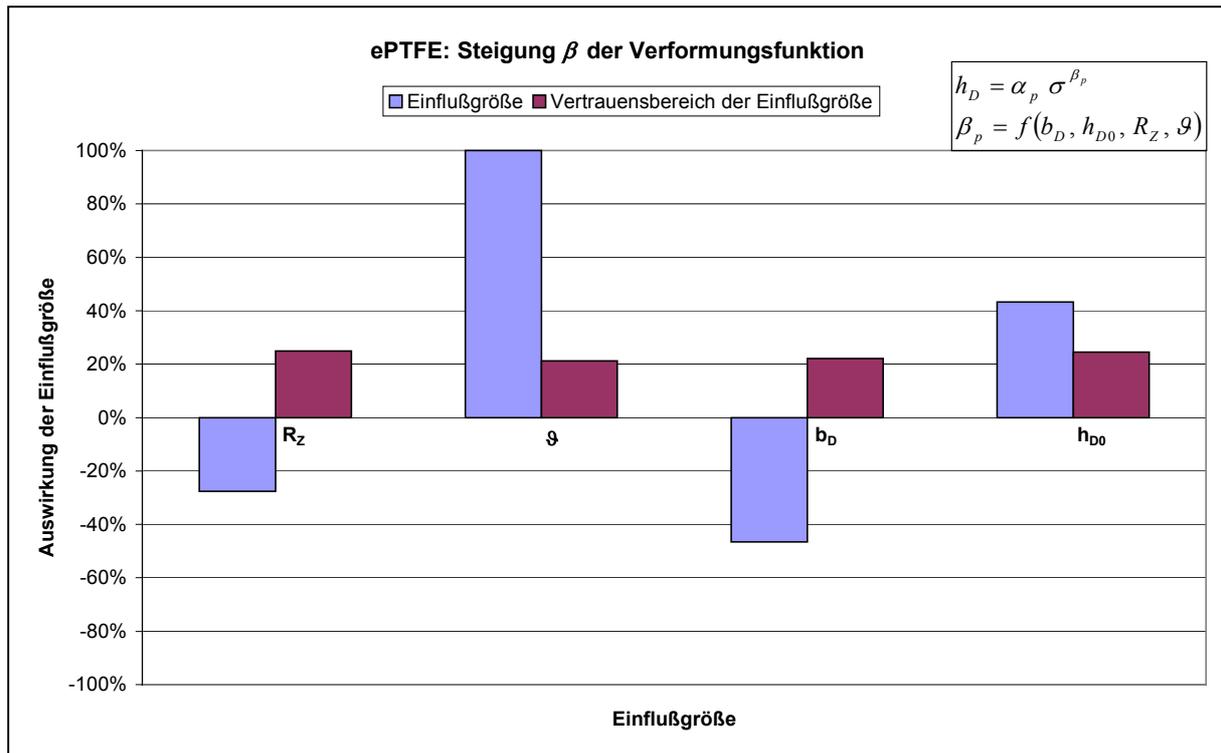


Bild 20: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung der Verformungsfunktion β_p

Der größte Effekt auf eine zunehmende Steigung der Verformungsfunktion ist durch die Temperatur gegeben. D.h., ePTFE verformt sich bei höheren Temperaturen deutlich mehr als bei niedrigeren. Das ist durch die abnehmenden mechanischen Eigenschaften aller polymeren Werkstoffe bei erhöhten Temperaturen bedingt. Weitergehende Untersuchungen und mechanische Kennwerte hierzu sind in [74] zu finden.

Eine erhöhte Flanschrauigkeit führt dagegen zu einer flacheren Steigung der Verformungskurve. Das ist auf den verbesserten Formschluß zwischen Flanschdichtflächen und Dichtmaterial zurückzuführen. Das Dichtungsmaterial wird durch den Formschluß an einer radialen Verbreiterung und an einem Abgleiten an den Dichtflächen gehindert.

Beide oben genannten Einflußgrößen stehen im allgemeinen zu einer optimierten Auslegung eines Flanschsystems nicht zur Verfügung, da sie meist systembedingt vorgegeben sind. Dagegen können die Dichtungsbreite b_D und die Dichtungsdicke h_{D0} variiert werden. Sie stehen somit zur Optimierung zur Verfügung.

Die Effekte bei ePTFE bezüglich b_D und h_{D0} sind sehr ähnlich. Im Gegensatz zum Dickenkoeffizienten kann bei der Steigung von einem konstanten Breiten-Dicken-Verhältnis gesprochen werden, da sich bei einer gleichen prozentualen Änderung von b_D und h_{D0} die Effekte gegenseitig kompensieren. Eine breitere Dichtung führt dabei zu einer geringeren, eine dickere Dichtung zu einer größeren Steigung.

Grundsätzlich gelten die oben ermittelten Erkenntnisse bezüglich der optimierbaren Einflußgrößen Dichtungsbreite b_D und Dichtungsdicke h_{D0} auch für alle anderen Dichtungstypen, siehe hierzu Anhang 27.2 ff. Bezüglich der Dichtungen auf Basis von Faserverbundwerkstoffen ist an dieser Stelle zu erwähnen, daß die Versuchsdauer etwaige Alterungsvorgänge, vor allem bei erhöhten Temperaturen, nicht berücksichtigt und deshalb langfristig ein geändertes Verhalten erwarten läßt. Das ist auf die langzeitigen Einflüsse durch eine chemisch-physikalische Änderung des elastomeren Binders in diesen Dichtungstypen zurückzuführen. Diese Aussage beruht auf Diskussionen im Rahmen der Entwicklung der VDI-Richtlinie 2200 [98].

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse läßt sich für die Optimierung des Dickenkoeffizienten $h_D (\sigma_{AP})$ ableiten, daß nach dem Einbau eine möglichst dünne Dichtung anzustreben ist, um eine möglichst geringe Verformung der Dichtung unter zusätzlichen Lasten zu gewährleisten. Die Dichtungsdicke ist dabei so zu wählen, daß am kompletten Umfang die minimal notwendige Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMIN} nicht unterschritten wird. Bei Kenntnis der Unebenheiten ist dies mit den Gleichungen aus Anhang 26 zu berechnen.

9.1.2.5 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung bezüglich Q_{MAX} und Q_{SMAX}

Über die Verformungsfunktionen hinaus kann eine Flanschverbindung durch die Kenntnis der mechanischen Schädigungsgrenze im Einbau- und im Betriebszustand optimiert werden. Um das zu ermöglichen, müssen die Effekte der Einflußgrößen auf die maximale Flächenpressung im Einbauzustand Q_{MAX} und die maximale Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} bekannt sein. Wie bereits erwähnt, waren die Dichtungen nur unter ungünstigen Voraussetzungen bis zur technisch relevanten Einsatzgrenze bezüglich der Flächenpressung mechanisch zu schädigen. Das trifft vor allem bei Dichtungen aus ePTFE und Graphit zu. Deren Auswertungen sind deshalb zwar tendenziell richtig, jedoch mit einem relativ hohen Fehler behaftet. Aus dem gleichen Grund war auch eine Bewertung eventuell vorhandener Wechselwirkungen nicht möglich. Die Aussagen bezüglich einer Optimierung sind jedoch grundsätzlich nutzbar. Da für ePTFE nur eine geringe Anzahl von auswertbaren Meßwerten (= mechanische Schädigung des Dichtmaterials) vorlag, wird nachstehend die Optimierung am Beispiel von PTFE besprochen. Die Auswertung für Faserdichtungen ist im Anhang 28 dargestellt. Aufgrund der geringen Temperaturempfindlichkeit von Graphit war keine Auswertung für diese Dichtungsart möglich. Für andere Graphitdichtungen, die für geringere Flächenpressungen ausgelegt sind, ist ggf. eine gesonderte Untersuchung durchzuführen.

In Bild 21 sind die Effekte der Einflußgrößen auf die maximale Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} für PTFE-Dichtungen beschrieben. Grundsätzlich sind die Aussagen aus Bild 21, ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses, auch für die maximale Einbaufächenpressung Q_{MAX} gültig.

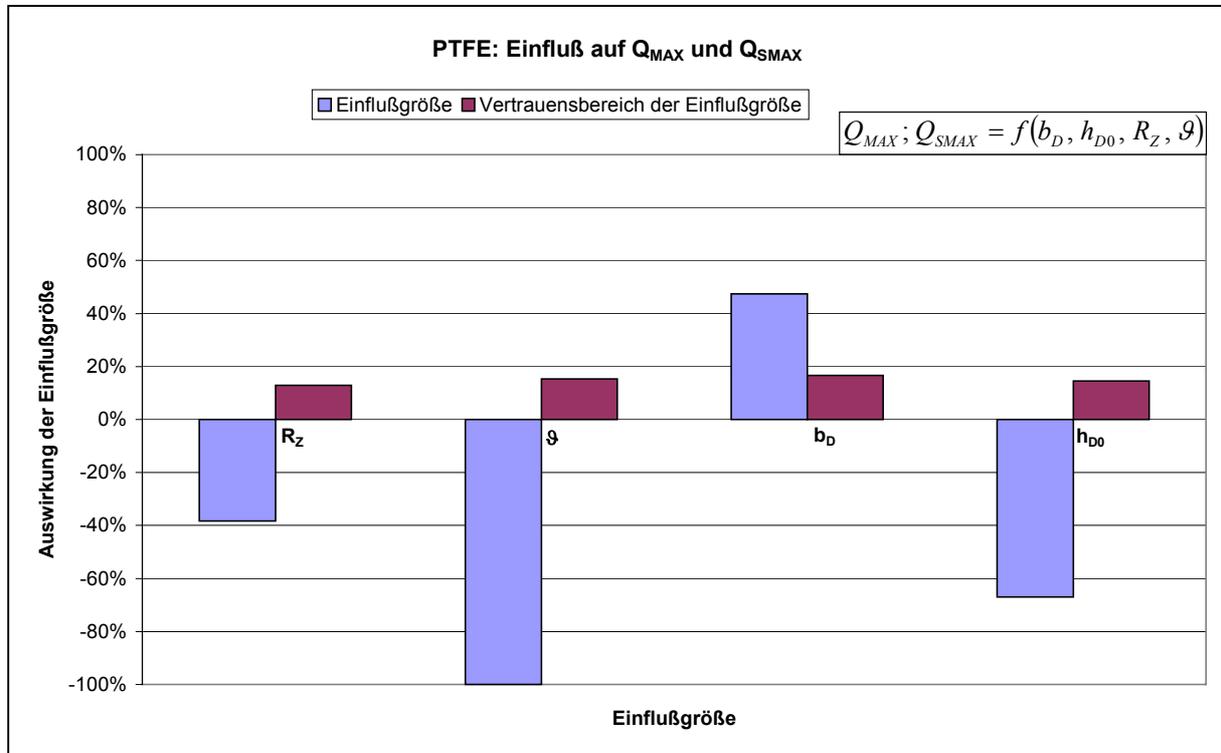


Bild 21: Effekte der Einflußgrößen auf Q_{SMAX} (und Q_{MAX})

Bild 21 verdeutlicht den großen Einfluß der Temperatur auf die maximale Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} . D.h., bei steigender Temperatur reduziert sich die zulässige Flächenpressung. Wie schon bei der Verformungsfunktion (Dickenkoeffizient α_p und Steigung β_p) diskutiert, wirkt sich eine erhöhte Dichtungsdicke h_{D0} negativ auf das Verhalten des Dichtmaterials aus, eine breitere Dichtung b_D dagegen positiv. Überraschend erscheint der negative Effekt der Rauigkeit der Dichtflächen bei PTFE, da man annehmen müßte, daß sich das Dichtmaterial dadurch selbst verstärkt. Grund für den negativen Einfluß ist aber die relativ hohe Verformung besonders bei hohen Temperaturen, was zu einem Durchdrücken der Dichtung, bedingt durch die rauhe Dichtoberfläche, und somit zur mechanischen Schädigung der Dichtung führt.

Im Gegensatz dazu wirkt sich bei Dichtungen auf Basis von Faserverbundwerkstoffen die Rauigkeit der Dichtflächen positiv aus, da diese verstärkend auf das Dichtmaterial wirkt. Die anderen Einflußgrößen besitzen den gleichen Effekt wie bei PTFE-Dichtungen.

Auch bezüglich der maximalen Einbaufächenpressung Q_{MAX} und der maximalen Flächenpressung im Betriebszustand Q_{SMAX} treffen, wie beim Verformungsverhalten, die Aussagen zur Optimierung bezüglich der Dichtungsdicke h_{D0} zu. Es sollte eine möglichst dünne Dichtung eingesetzt werden, um eine mechanische Schädigung der Dichtung zu vermeiden und somit eine möglichst hohe Flächenpressung im Einbau- als auch im Betriebszustand zu ermöglichen.

Das kurzfristige Verhalten einer Dichtung im Betriebszustand wird durch das Kriechverhalten beschrieben und ist durch die zusätzlichen Kräfte des Rohrleitungs- und Apparatesystems bestimmt. Darüber hinaus ist es notwendig zu wissen, wie sich langzeitige Einflüsse auf das Dichtverhalten auswirken. Diese Eigenschaft eines Dichtmaterials ist das (meist unerwünschte) Kriech-Relaxationsverhalten einer Dichtung im verspannten Flanschsystem, welches im nachfolgenden Abschnitt bezüglich der Optimierung und Modellierung beschrieben wird.

9.1.3 Bestimmung des Kriech-Relaxationsverhaltens

9.1.3.1 Allgemeine Betrachtung

Das Kriech-Relaxationsverhalten mit dem Kennwert Q_R gibt Auskunft darüber, welche Flächenpressung sich durch die Höhenabnahme der Dichtung im Betrieb einstellt. Diese Flächenpressung stellt in Verbindung mit der Dichtungshöhe den Arbeitspunkt des Dichtsystems dar.

Eine Kriech-Relaxation eines Dichtmaterials liegt dann vor, wenn sich während des Betriebs zur Höhenabnahme der Dichtung gleichzeitig die Kraft auf der Dichtung reduziert. Das ist durch die von 0 kN/mm abweichende Steifigkeit C des Flanschsystems bedingt. Die Höhenabnahme der Dichtung hat meist folgende Ursachen:

- Weitere durch eine reduzierte mechanische Festigkeit des Dichtmaterials hervorgerufene Anpassungsvorgänge an den Flanschdichtflächen bei Betriebstemperatur und
- Neigung des Dichtmaterials zum Kriechen.

Für das Dichtsystem muß sichergestellt sein, daß durch die oben genannte Kraftabnahme die Mindestflächenpressung im Betriebszustand der Dichtung $Q_{SMIN/L}$ nicht unterschritten wird. Die DIN 28091 [23] definiert deshalb in Anlehnung an die DIN 52913 [43] nachstehend aufgelistete Grenzwerte für die Flächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge:

- ≥ 10 MPa für ePTFE- und PTFE-Dichtungen; Anfangsflächenpressung 30 MPa; $\vartheta = 150^\circ\text{C}$.
- ≥ 45 MPa für Graphitdichtungen; Anfangsflächenpressung 50 MPa; $\vartheta = 300^\circ\text{C}$.
- ≥ 25 MPa für Faserdichtungen; Anfangsflächenpressung 50 MPa; $\vartheta = 175^\circ\text{C}$.

Mit den oben genannten Parametern ist es nur möglich, die Dichtungen der einzelnen Dichtungshauptgruppen untereinander zu vergleichen. Sie geben aber keine Auskunft darüber, welche Restflächenpressung sich unter einer Variation der verschiedenen Einflußgrößen einstellt.

Zur Darstellung der Kriech-Relaxation gibt es prinzipiell drei unterschiedliche Definitionen der Zielgröße:

- die Restflächenpressung Q_R [22],
- die Angabe der Restflächenpressung als Quotienten aus Rest- zu Anfangsflächenpressung ($= g_c$) und
- den absoluten Flächenpressungsabfall $\Delta\sigma$.

In dieser Arbeit wurde Q_R als Zielgröße zur Verbesserung und Präzisierung der Darstellung der Kriech-Relaxation gewählt. Grund hierfür ist die Bedeutung von Q_R für einen zuverlässigen Einsatz von Flanschdichtungen. Die Restflächenpressung Q_R muß nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge mindestens so groß sein, daß weder die Mindestflächenpressung im Betriebszustand $Q_{SMIN/L}$ noch die Mindestflächenpressung zur Sicherstellung der Ausblassicherheit unterschritten wird. Darüber hinaus sind die im Abschnitt 9.1.2 behandelten zusätzlichen Verformungen zu betrachten, die ebenfalls eine Reduzierung der Dichtflächenpressung bewirken. Der Anwender erhält dadurch einen direkten Bezug zur sich einstellenden Restflächenpressung, die durch die Angabe des Quotienten aus Rest- zu Anfangsflächenpressung g_c oder durch die Angabe des Abfalls der Flächenpressung $\Delta\sigma$ nicht sofort offensichtlich ist.

Mit der Angabe der Restflächenpressung Q_R aus Kennfunktionen ergibt sich zum einen ein realistischer Wert für den Festigkeits- und Dichtheitsnachweis, zum anderen die Arbeitsflächenpressung ($=$ Arbeitspunkt) des Dichtsystems, welche wiederum für die im Abschnitt 9.2.2 dargestellte Beschreibung der Leckagefunktion im Betriebszustand notwendig ist.

9.1.3.2 Versuchsbeschreibung

Der Versuchsablauf, welcher für die Modellierung der Restflächenpressung und zur Optimierung des Dichtsystems notwendig ist, wird nachstehend beschrieben.

Für die Bestimmung der Restflächenpressung Q_R wurden folgende Einflußgrößen mit den dazugehörigen Einstellwerten variiert:

- Dichtungsbreite b_D 10 mm, 15 mm, 20 mm
- Dichtungshöhe h_{D0} 1 mm, 2 mm, 4 mm
- Flanschrauigkeit R_z 6 μm , 60 μm , 160 μm
- Temperatur ϑ 20 °C, 150 °C, 250 °C
- Anfangsflächenpressung Q_A 20 MPa, 60 MPa, 110 MPa
- Steifigkeit C 150 kN/mm, 500 kN/mm, 1000 kN/mm.

Der Versuchsplan ist mit Angabe der Zielgrößen im Anhang 29.1 ff aufgelistet. Der Versuchsablauf wurde für alle Dichtungsmaterialien gleich durchgeführt:

1. Belastung auf Q_A bei Raumtemperatur.
2. Halten dieser Flächenpressung für 15 Minuten (reines Kriechen).
3. Temperaturerhöhung um 8 °C/Minute. Gleichzeitig wird die reine Kraftregelung auf eine steifigkeitsabhängige Regelung umgeschaltet.
4. Steifigkeitsabhängige Regelung bei konstanter Betriebstemperatur für weitere sechs Stunden.

Diese Versuchssystematik wurde mit geringfügigen Änderungen aufgrund der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit erhaltenen Ergebnisse in ähnlicher Form in die europäische Normung prEN 13555 [51] aufgenommen.

In Bild 22 ist ein typischer Versuchsablauf am Beispiel einer Dichtung aus ePTFE dargestellt.

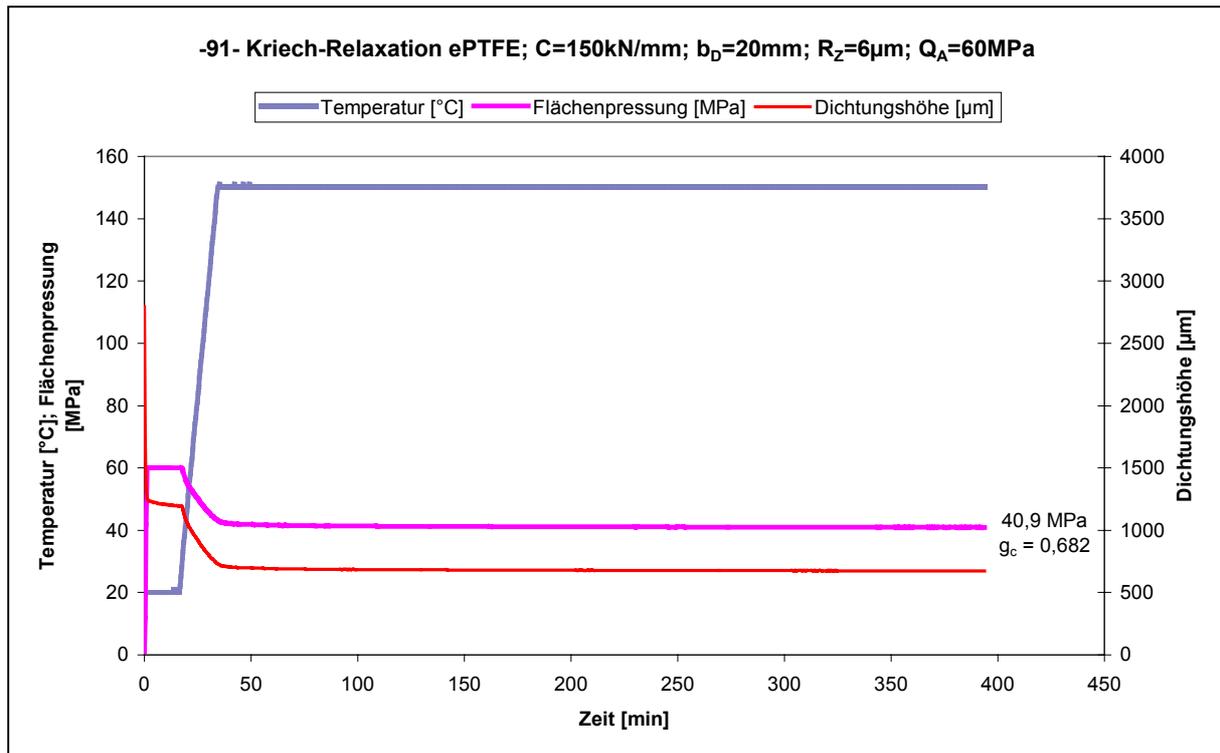


Bild 22: Versuchsablauf zur Bestimmung der Kriech-Relaxation

Der Versuchsablauf aus Bild 22 wurde nach Vorversuchen mit unterschiedlichen Versuchszeiten auf eine Versuchsdauer von sechs Stunden plus Kriechzeit und der Zeit zum Erreichen der Betriebstemperatur festgelegt. Er ist den bisher durchgeführten Versuchen nach DIN 52913 [43] ähnlich, jedoch ist die Versuchsdauer deutlich reduziert. Es zeigte sich, daß diese Zeit ausreicht, da für alle Dichtungsmaterialien, außer für Faserdichtungen, der größte Anteil der Kriech-Relaxation bereits kurz nach dem Erreichen der Betriebstemperatur abgeschlossen ist. Für Faserdichtungen müßte eine Versuchsdauer bis zum Abschluß aller Alterungsvorgänge gewählt werden. Das ist bei der Vielzahl der notwendigen Versuche, die zur Modellierung notwendig sind, nicht durchführbar, siehe hierzu auch Abschnitt 9.1.2.4. Trotzdem erlauben diese Versuche eine ausreichende Aussage im Vergleich zu den anderen Dichtungstypen. Ebenso sind grundsätzliche Bewertungen zur Optimierung für Faserdichtungen möglich.

Da im Vergleich zum Versuchsaufbau nach DIN 52913 [43], der meist ein rein mechanischer Prüfstand ist, ein vollautomatischer Prüfstand mit steifigkeitsgeführter Regelung verwendet wurde, war vor Beginn der Versuchsdurchführung eine Validierung des Prüfstandes notwendig. Deshalb wurden identische Versuche bezüglich der Randbedingungen an zwei unterschiedlich konzipierten Prüfständen durchgeführt. Die Vergleichsversuche wurden dankenswerterweise von der Firma *amtec* an einem von *amtec* entwickelten Prüfstand und an der FH Münster durchgeführt. Die Ergebnisse stimmten sehr gut überein. Darüber hinaus ist die

Meßunsicherheit des Prüfstandes relativ gering, Anhang 30. Aufgrund der konformen Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, daß die hier vorgestellten Versuchsergebnisse der Realität entsprechen.

Für Dichtungen aus ePTFE und PTFE konnte festgestellt werden, daß der größte Teil der Kriech-Relaxation bereits kurz nach dem Erreichen der Prüftemperatur abgeschlossen war und danach nahezu konstant blieb. Vergleicht man PTFE und ePTFE Dichtungen, ergeben sich für die zuletzt genannten durchweg höhere Werte für die Restflächenpressung Q_R . Das ist vor allem auf die deutlich geringere Dichtungsdicke im Betriebszustand zurückzuführen, aber auch auf die höhere Festigkeit durch die thermisch-mechanische Orientierung von ePTFE. Außerdem wurde deutlich sichtbar, daß sich PTFE-Dichtungen während des Versuchs in radialer Richtung stark verformten, d.h., daß sie breiter wurden. Bei Dichtungen aus ePTFE war dieser Effekt deutlich schwächer ausgeprägt.

Dichtungen aus Faserverbundwerkstoffen wurden bezüglich des Verhaltens bei Temperatur und der daraus resultierenden Alterung bereits im Abschnitt 9.1.2.4 besprochen.

Dichtungen aus Graphit zeigten bei den Versuchen das beste Verhalten gegen die Verformung durch Kriech-Relaxation. Wie die Ergebnisse für die Restflächenpressung Q_R aus Anhang 29.3 erkennen lassen, ist davon auszugehen, daß bei allen Betriebsbedingungen der Abfall der Flächenpressung, bezogen auf die Anfangsflächenpressung Q_A , im Bereich kleiner 10 % sein wird. Deshalb wurde in der nachstehenden Modellierung auf diese Dichtungsgruppe verzichtet.

9.1.3.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen

Die Modellierung des Kriech-Relaxationsverhaltens wurde mit der Restflächenpressung Q_R durchgeführt. Der in der DIN EN 1591 [24] bzw. in der prEN13555 [51] benötigte Kennwert g_c kann durch den einfachen Zusammenhang nach Gleichung 49 errechnet werden:

$$g_c = \frac{Q_R}{Q_A} \quad (53)$$

Da die Diskussionen innerhalb des Normungsausschusses CEN-TC74-WG8 bezüglich des Kennwerts g_c zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht endgültig abgeschlossen waren, ist es notwendig, Gleichung (53) mit der z.Zt. gültigen Version der prEN 13555 zu vergleichen.

Für Dichtungen aus Faserverbundwerkstoffen, gefülltem PTFE und ePTFE ist in Bild 23 ein Modellvergleich dargestellt. Die Ergebnisse der Kennfunktionen zeigen dabei im Rahmen der

Meßunsicherheit eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten für die Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge Q_R . Die normierten Kennfunktionen für Q_R sind im Anhang 31 aufgeführt.

Beim Vergleich der einzelnen Funktionsverläufe ist zu erkennen, daß Dichtungen aus ePTFE spätestens 60 Minuten nach Erreichen der Prüftemperatur einen nahezu konstanten Arbeitspunkt erreicht haben. Die Änderungen bei PTFE-Dichtungen sind zwar etwas größer, jedoch wird die Kurve mit zunehmender Zeitdauer immer flacher, so daß auch hier nach sechs Stunden bei gleichmäßiger Temperaturbelastung von einer konstanten Restflächenpressung ausgegangen werden kann. Lediglich bei der Dichtung aus Faserverbundwerkstoff ist auch nach sechs Stunden konstanter Temperatur ein stetig fallender Kurvenverlauf zu sehen. Die Gründe hierfür liegen in der langanhaltenden Alterung dieser Dichtungsart, siehe Abschnitt 9.2.1.4.

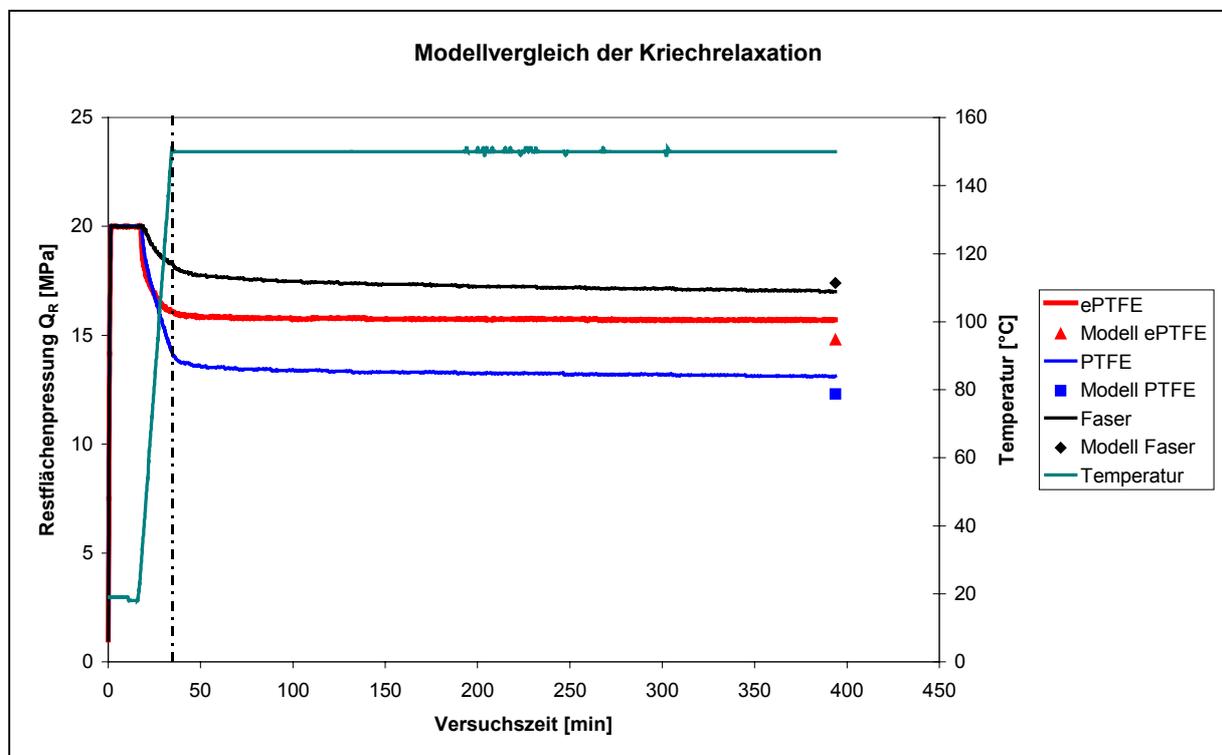


Bild 23: Vergleich der Funktionsverläufe und der Modellwerte zur Kriech-Relaxation

An Bild 23 zeigt sich, daß während des Aufheizens auf Betriebstemperatur der größte Teil des Flächenpressungsverlustes auftritt. Gekennzeichnet ist dieser Zeitraum durch die Strich-Punkt-Linie.

Der weitere Kurvenverlauf, ab ca. einer Stunde nach Erreichen der Prüftemperatur, kann durch eine potentielle Funktion gut angenähert werden. In der linearisierten Form nach Gleichung 45, siehe Abschnitt 9.1.1.2, kann vor allem durch die Steigung des Kurvenverlaufs auf den zu erwartenden Verlauf des weiteren Flächenpressungsverlustes geschlossen werden. Werden die

Kurven der Dichtungen nach Bild 23 miteinander verglichen, erhält man die in Tabelle 6 aufgeführten Steigungen und Extrapolationswerte. Dabei muß angemerkt werden, daß die hier durchgeführte Extrapolation aufgrund des sehr hohen Extrapolationsfaktors normalerweise nicht zulässig ist. Sie gibt jedoch die Größenordnung der sich einstellenden Flächenpressung nach einem Jahr ohne zusätzliche Belastung an. Diese Betrachtung wird in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt, da der Erkenntnisgewinn aus dem weiteren Kurvenverlauf keine zusätzlichen Informationen bezüglich einer optimierten Auslegung des Dichtsystems enthält.

Dichtungstyp	Gleichung	σ (t=6h) [MPa]	σ (t=1Jahr) [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]
ePTFE	$\ln \sigma = \ln 16,1 - 0,004 \ln t$	15,7	15,3	0,4
PTFE	$\ln \sigma = \ln 14,4 - 0,015 \ln t$	13,1	11,8	1,3
Faser	$\ln \sigma = \ln 19,0 - 0,020 \ln t$	17,0	14,6	2,4

Tabelle 6: Gegenüberstellung des Langzeitverhaltens bezüglich der Kriech-Relaxation

9.1.3.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung

Die normierte Darstellung der Kennfunktionen aus Anhang 31 erlaubt eine Aufspaltung der Effekte der einzelnen Einflußgrößen auf die sich einstellende Restflächenpressung Q_R . Zur Herleitung siehe Abschnitt 8.2.4.

In Bild 24 sind am Beispiel der ePTFE-Dichtungen die Haupteffekte ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen gezeigt. Die Darstellung mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen für ePTFE sowie alle ergänzenden Darstellungen für Faser- und PTFE-Dichtungen sind im Anhang 32.1 ff gegeben.

Den mit Abstand größten Effekt auf die sich einstellende Restflächenpressung im Betrieb Q_R hat die Anfangsflächenpressung Q_A , welche während des Einbaus der Dichtung aufgebracht wird.

Darüber hinaus ist der deutliche Unterschied zwischen der Dichtungsdicke h_{D0} und der Dichtungsbreite b_D in einem Verhältnis von etwa 5 : 1 zu erkennen. Eine dickere Dichtung bewirkt dabei ein deutliches Absinken der sich einstellenden Restflächenpressung, wohingegen eine größere Dichtungsbreite nur eine geringfügig höhere Restflächenpressung bewirkt. Wie schon beim Dickenkoeffizienten der Verformungsfunktion α_p , siehe Abschnitt 9.1.2.4, hat eine prozentual gleiche Änderung von Dichtungsdicke h_{D0} und Dichtungsbreite b_D einen negativen

Effekt auf das Dichtsystem, in diesem Fall auf die Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge Q_R .

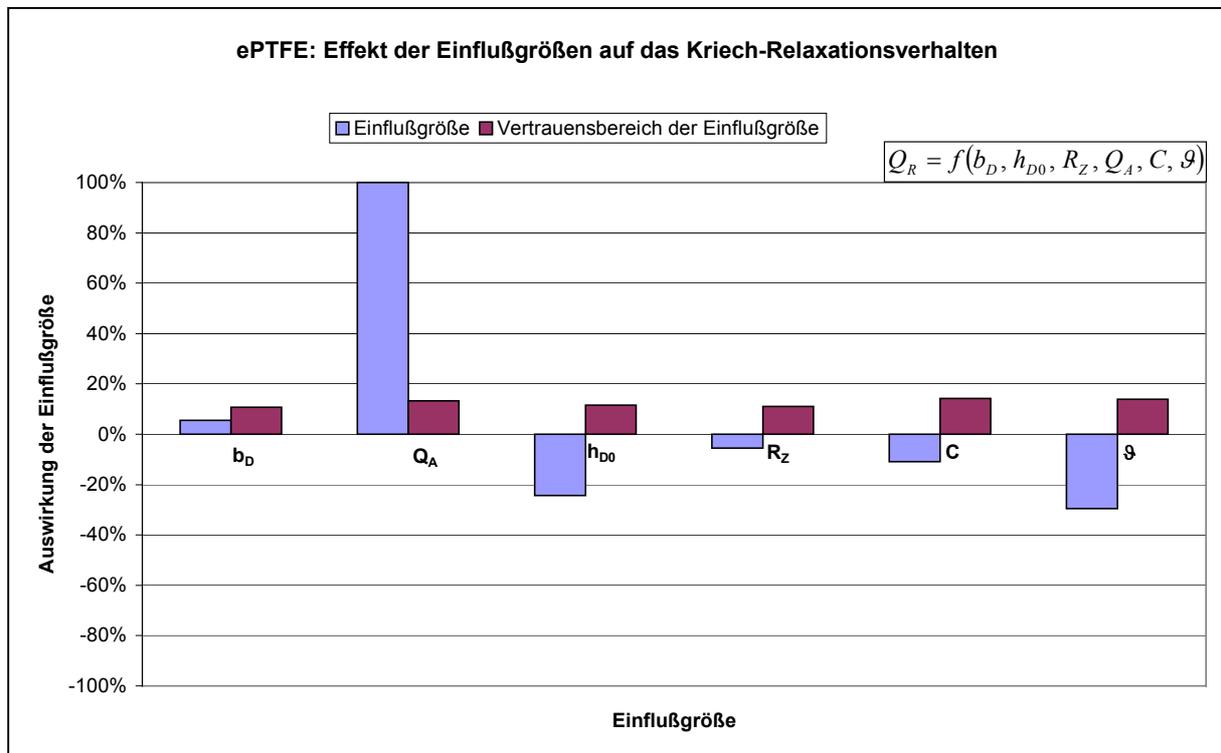


Bild 24: Effekte der Einflußgrößen auf die Restflächenpressung Q_R von ePTFE

Von den meist nicht zu beeinflussenden Einflußgrößen Temperatur ϑ , Rauigkeit der Dichtflächen R_Z und Flanschsteifigkeit C wirkt sich die Temperatur am stärksten auf eine Verringerung der Restflächenpressung Q_R aus. Weil die Temperatur systembedingt vorgegeben ist und in der Regel nicht geändert werden kann, wird hier nicht näher darauf eingegangen. Gegebenenfalls ist durch eine Erhöhung der Flächenpressung der negative Effekt der Temperatur auszugleichen.

Da mit zunehmender Steifigkeit des Flanschsystems ein geringerer Wert für die Restflächenpressung Q_R erreicht wird, könnte im ersten Ansatz vermutet werden, daß ein weniger steifes System anzustreben ist, z.B. durch den Einsatz von Tellerfedern. Bei dynamischer Belastung mit geringen äußeren Kräften und Momenten sowie geringen Kräften durch den Innendruck kann das unter Umständen sinnvoll sein. Sind dagegen hohe Kräfte auf das Flanschsystem zu erwarten, ist eine steife Auslegung vorzuziehen [58].

Für die Optimierung einer Flanschdichtung aus ePTFE ergibt sich aus diesen Erkenntnissen, daß vor allem versucht werden sollte, eine möglichst hohe Flächenpressung beim Einbau der Dichtung Q_A aufzubringen, um eine möglichst hohe Restflächenpressung im Betriebszustand Q_R zu erhalten. Darüber hinaus zeigt sich, daß eine möglichst dünne Dichtung verwendet werden sollte, um den gleichen Effekt zu erzielen.

Für Dichtungen aus PTFE und Faserverbundwerkstoffen treffen qualitativ die gleichen Aussagen wie für Dichtungen aus ePTFE zu. Siehe hierzu Anhang 32.2 ff.

9.1.4 Zusammenfassung des mechanischen Verhaltens

Beim hier beschriebenen mechanischen Verhalten von Weichstoffdichtungen wurden Kennfunktionen in Abhängigkeit der verschiedenen Einflußgrößen allgemein und vor allem für den beliebig wählbaren Arbeitspunkt eines Dichtsystems bestimmt.

Gegenstand der Untersuchungen waren das Verformungs- sowie das Kriech-Relaxationsverhalten. Mit den Kennfunktionen ist es zum einen möglich, die notwendigen Kennwerte für den Dichtheits- und Festigkeitsnachweis wirklichkeitsnah zu bestimmen, zum anderen konnte durch die Normierung der Kennfunktionen die Möglichkeit geschaffen werden, die Effekte bezüglich einer optimierten Auslegung des Flanschsystems zu untersuchen und in den Algorithmus zur optimierten Auslegung eines Dichtsystems einfließen zu lassen, siehe Abschnitt 5. Die dabei betrachteten Einflußgrößen waren:

- Dichtungsbreite b_D ,
- Dichtungshöhe h_{D0} ,
- Flächenpressung σ allgemein und Einbaufächenpressung Q_A ,
- Rauigkeit der Dichtflächen R_Z ,
- Temperatur ϑ und
- Steifigkeit des Flanschsystems C .

Die Einflußgrößen wurden in beeinflussbare und nicht beeinflussbare eingeteilt. Die drei zuerst genannten Einflußgrößen b_D , h_{D0} und σ bzw. Q_A können relativ leicht geändert werden, sind deshalb beeinflussbar und stehen daher für eine Optimierung des Dichtsystems leicht zur

Verfügung; die Einflußgrößen R_z , g und C sind bei bestehenden Anlagen meist gar nicht, bei Neuanlagen nur bedingt änderbar.

Es wurde deutlich, daß sich vor allem eine hohe Flächenpressung positiv auf ein Flanschsystem auswirkt. Dadurch wird während des Einbaus eine gute Anpassung an die Dichtflächen erreicht, innere Leckagewege werden möglichst verengt oder verschlossen. Die sich nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge einstellende Restflächenpressung im Arbeitspunkt ist möglichst hoch, und die Empfindlichkeit des Dichtsystems gegen äußere Kräfte und Momente wird so gering wie möglich. Um diese vorzugsweise hohe Flächenpressung zu erlangen, gibt es mehrere Alternativen:

- Erhöhung der Schraubenkraft durch:
 - ein höheres Drehmoment der Schrauben oder
 - eine geänderte Schraubenqualität, die höher belastet werden darf oder
 - eine geänderte Konstruktion, z.B. mehr Schrauben oder ein größerer Durchmesser der Schrauben.
- Reduzierung der Dichtungsbreite.

Die einfachste Möglichkeit zur Steigerung der Flächenpressung ist sicherlich, die Schraubenkraft zu erhöhen. Dabei ist immer ein Festigkeitsnachweis für die Flansche und Schrauben zu führen, z.B. nach DIN EN 1591 [24].

Eine oftmals effektive Möglichkeit, um zu einer höheren Flächenpressung im Einbau- und auch im Betriebszustand zu gelangen, ist die Reduzierung der Dichtungsbreite. Ein verringerter Wert für die Dichtungsbreite b_D wirkt sich, allein gesehen, negativ auf die Dichteigenschaften des Flanschsystems aus. Bei gleichbleibender Schraubenkraft wird jedoch eine deutlich höhere Flächenpressung auf die Dichtung erzeugt. Der negative Effekt durch eine geringere Dichtungsbreite b_D wird somit durch dieselbe prozentuale Erhöhung der Einbauflächenpressung überkompensiert.

Bei der Optimierung durch eine möglichst hohe Flächenpressung ist jedoch immer darauf zu achten, daß die maximal zulässige Flächenpressung nicht überschritten wird, siehe hierzu Abschnitt 9.1.2.

Unabhängig von der Dichtungsbreite b_D und der Einbauflächenpressung Q_A zeigt sich, daß eine möglichst dünne Dichtung zum Einsatz kommen sollte. Eine dünne Dichtung ist sowohl unempfindlicher gegen statische und dynamische Zusatzlasten im Betrieb als auch mitverantwortlich für eine möglichst hohe Restflächenpressung bezüglich der Kriech-Relaxation.

Bei der Wahl der Dichtungsdicke sind vor allem die Mikro- und Makrounebenheiten der Flanschdichtflächen zu beachten. Es ist dabei sicherzustellen, daß eine gewisse Mindestflächenpressung auf dem kompletten Umfang nicht unterschritten wird. Diese Mindestflächenpressung ist von einer bestimmten Leckagerate oder der Ausblassicherheit abhängig und wird durch die Kennfunktionen im nächsten Abschnitt bestimmt. Berechnen läßt sich die einstellende Flächenpressung in Abhängigkeit von den Unebenheiten mit den Kennfunktionen aus Anhang 26.1 und 26.2.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Verformungseigenschaften sind unabhängig vom Dichtwerkstoff die Voraussetzung für ein gutes Leckageverhalten. Das Leckageverhalten einer Dichtung ist in erster Linie davon abhängig, wie gut die Dichtung während des Einbaus an die Unebenheiten der Flanschdichtflächen angepaßt und die inneren Leckagewege minimiert werden. Im Betrieb ist dann eine Verformungseigenschaft des Dichtmittels gefordert, die gegen die betrieblichen Einflüsse unempfindlich ist und damit eine möglichst hohe Flächenpressung während der kompletten Einsatzdauer aufrecht erhält.

9.2 Leckageverhalten

Verformungs- und Leckageuntersuchungen sind mit der Beschreibung von Ursachen und Symptomen eines technischen Problems vergleichbar. Die Ursachen wurden im Abschnitt 9.1 behandelt. Nachstehend werden die Symptome des technischen Problems, d.h. das Verhalten einer Dichtung bezüglich der Leckage, beschrieben.

Ein Dichtsystem hat in erster Linie die Aufgabe, während der gesamten Betriebsdauer unerwünschte oder unzulässige Leckagen zu vermeiden. Die hier vorgestellte Untersuchung zum Leckageverhalten soll dem Anwender und Berechner von Flanschdichtungen auf Basis der hier ermittelten Kennfunktionen die Möglichkeit geben, verlässliche und realistische Kennwerte für die Flanschberechnung bestimmen zu können und somit weitere Kenntnisse zur optimierten Auslegung und Gestaltung des Dichtsystems zu erhalten.

Aufbauend auf dem Verformungsverhalten werden dabei experimentelle Versuche durchgeführt, die das

- Leckageverhalten abhängig vom Einbauzustand und das
- Leckageverhalten im Betriebszustand

bestimmen und durch eine geeignete Darstellung und Auswertung der Kennfunktionen das Leckageverhalten beschreiben.

9.2.1 Bestimmung des Leckageverhaltens im Einbauzustand

9.2.1.1 Allgemeine Betrachtung

Das durch den Einbau der Dichtung bestimmte Leckageverhalten wird nach DIN EN 1591 [24] durch den Kennwert Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN/L}$ definiert. Dabei wird bei unterschiedlichen Innendrücken und Flächenpressungen eine bestimmte Geometrie der Dichtung zugrunde gelegt. $Q_{MIN/L}$ beschreibt die Flächenpressung, ab der eine maximal zulässige Leckage unterschritten wird. Sie gibt aber noch keine Auskunft darüber, wie sich die Leckage der Dichtung um diesen Punkt herum verhält. Die ermittelten Kennfunktionen in den nachfolgenden Abschnitten dieser Arbeit ermöglichen das.

Als Grenzwerte für die zulässige Leckage bzw. den Dichtheitsnachweis existieren bisher Forderungen der TA Luft [3] und der DIN 28091 [23]. Für die Dichtungshauptgruppen gelten

nach [23] folgende Grenzwerte, wobei eine Druckdifferenz von 40 bar Stickstoff zugrunde gelegt wird:

- Faser: 0,1 mg/(s·m) $\sigma = 50$ MPa
- PTFE: 0,1 mg/(s·m) $\sigma = 30$ MPa
- ePTFE: 0,01 mg/(s·m) $\sigma = 30$ MPa
- Graphit: 0,1 mg/(s·m) $\sigma = 50$ MPa.

Um die Anforderungen der TA Luft zu erfüllen, beträgt nach Ansicht des TÜV Süddeutschland der Grenzwert für die zulässige Leckage bei der Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN/L}$ 0,01 mg/(s·m). Das gilt bei einem für alle Dichtungstypen gleichen Innendruck von 40 bar [9]. In der neusten Ausgabe der VDI 2440 [2] wird allerdings bei 1,0 bar Differenzdruck mit Helium, ein Grenzwert von 10^{-4} mbar·l/(s·m) gefordert. Dieses Kriterium wird als Grenzwert der TA-Luft angesehen. Das Kriterium des TÜV Süddeutschland ist jedoch aufgrund des deutlich höheren Innendrucks als schärfer zu betrachten [99].

Um diese Grenzwerte einhalten zu können, ist es notwendig, die sich aus der Einbaufächenpressung ergebende Leckagerate für den Dichtheitsnachweis zu bestimmen. Dazu gibt es gängige Modelle, die im Abschnitt 1.2 beschrieben wurden. Diese beruhen aber oftmals auf nicht mehr zugelassenen Dichtungsmaterialien, wie z.B. It-Dichtungen.

Aus strömungsmechanischen Modellen und experimentellen Untersuchungen, siehe Abschnitt 1.2, ergibt sich, daß die Flächenpressung, die während des Dichtungseinbaus aufgebracht wird, die mit Abstand größte positive Auswirkung auf das nachfolgende Leckageverhalten hat. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit diese Erkenntnis als gesicherte Tatsache zugrunde gelegt. Somit wird das Leckageverhalten unter Berücksichtigung der Flächenpressung in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen, des Innendrucks und der Rauigkeit der Flanschdichtflächen bestimmt.

Die hier betrachteten Einflußgrößen haben nach den strömungsmechanischen Modellen aus Abschnitt 1.2 folgende Auswirkung auf die Leckage:

$$\lambda \sim r^3 \dots r^4 \rightarrow r = f(\sigma) \quad (53)$$

$$\lambda \sim p_i^1 \dots p_i^2 \quad (54)$$

$$\lambda \sim 1/b_D \quad (55)$$

$$\lambda \sim h_D \quad (56)$$

Die Flanschrauigkeit R_z wurde in den Modellen nicht berücksichtigt. Unabhängig von diesen Erkenntnissen zeichnet sich eine „ideale“ Dichtung bezüglich des Leckageverhaltens, abgesehen von den Eigenschaften, welche die Verformungsfunktion charakterisieren, durch

- eine möglichst steile Leckage-Flächenpressungs-Funktion bei Belastung und
- eine möglichst flache Leckage-Flächenpressungs-Funktion bei Entlastung aus.

Die Mindestflächenpressung im Einbauzustand Q_{MINL} wird durch die zuerst genannte Funktion beschrieben, die Mindestflächenpressung im Betriebszustand Q_{SMINL} durch die zweite. Diese wird im Abschnitt 9.2.2 behandelt.

Unter einer steilen Leckage-Flächenpressungs-Funktion ist zu verstehen, daß sich die Leckage im komplett zur Verfügung stehenden Flächenpressungsbereich bei zunehmender Flächenpressung stark verringert.

Zum Überprüfen und Ergänzen der in den recherchierten Quellen gefundenen Abhängigkeiten der Leckage und zur Bestimmung von Maßnahmen des Anwenders in Bezug auf eine „ideale“ Dichtung wurden die in den nachstehenden Abschnitten aufgeführten Versuche und Modellierungen durchgeführt.

9.2.1.2 Versuchsbeschreibung

Für die Bestimmung des Leckageverhaltens wurden die nachfolgend dargestellten Einflußgrößen mit den dazugehörigen Einstellwerten variiert. Die Versuchspläne sind mit Angabe der Zielgrößen im Anhang 33.1 f aufgelistet.

- Dichtungsbreite 10 mm, 15 mm, 20 mm
- Dichtungshöhe 1 mm, 2 mm, 4 mm
- Flanschrauigkeit 6 μm , 60 μm , 160 μm
- Innendruck 10 bar, 20 bar, 40 bar
- Flächenpressung 10 MPa bis 40 MPa

Da die verwendeten Flanschtypen in der chemischen Industrie meist Vorschweißflansche aus Stahl nach den Normen DIN 2631 ff [100] (ersetzt) oder prEN 1092-1 [101] sind, wurde die Flächenpressung im oben genannten Bereich variiert. Für Nut- und Federflansche sind deutlich höhere Flächenpressungen möglich, d.h. die Leckagen sind bei diesem Flanschtyp deutlich geringer als bei Vorschweißflanschen mit glatter Dichtleiste. Da jedoch für beide Flanschtypen

oftmals die gleichen Dichtungen verwendet werden, wurde der konservative Ansatz (= höhere Leckage) mit der niedrigeren Flächenpressung gewählt.

Die Versuche werden vor allem am Beispiel von Dichtungen aus ePTFE und Graphit besprochen. Grund hierfür ist, daß mit diesen Dichtwerkstoffen die Leckagen mit der in dieser Arbeit verwendeten Leckagemessmethode systematisch auswertbar sind. Eine Versuchsauswertung am Beispiel von ePTFE ist in Bild 25 dargestellt.

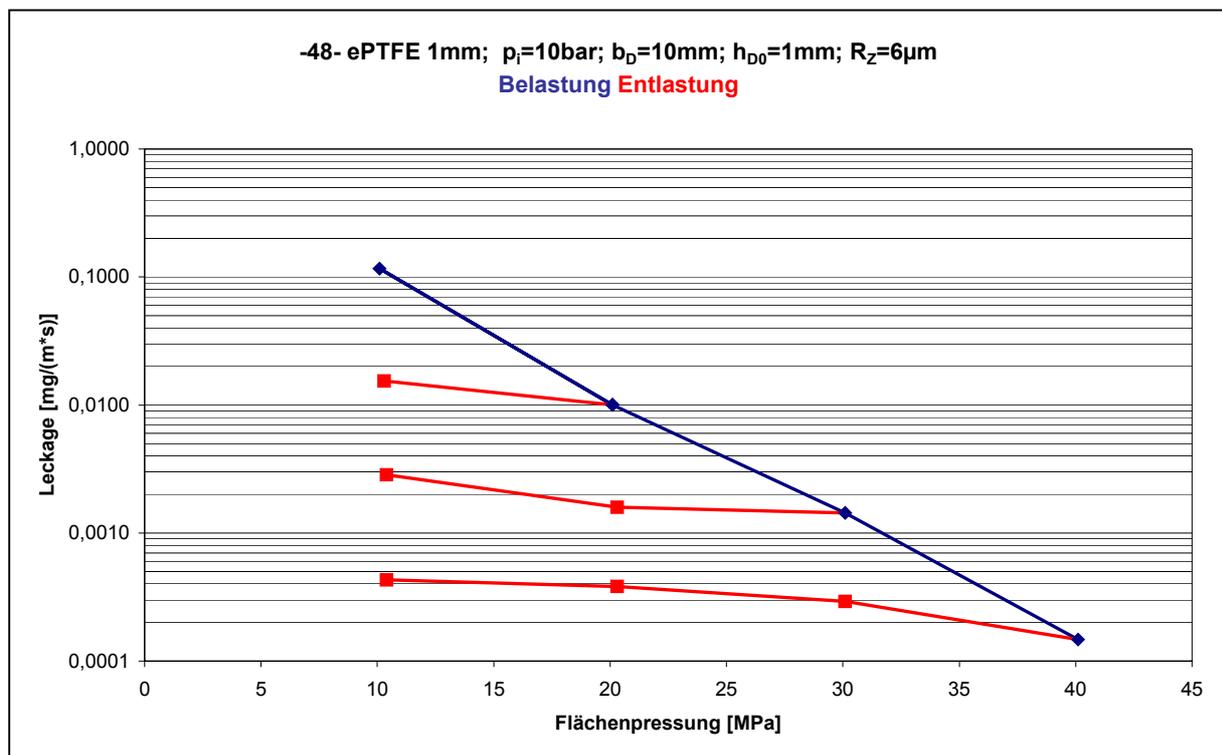


Bild 25: Versuchsauswertung zur Bestimmung des Leckageverhaltens

Die Versuchsauswertung in Bild 25 wurde prinzipiell aus der bisher bekannten Normung übernommen, da sie einen vollautomatischen Prüfablauf erlaubt. Aufgrund dessen ist mit wenigen Meßpunkten durch Interpolation die direkte Abhängigkeit der Leckage von der Flächenpressung zu bestimmen. Die Versuche wurden so ausgelegt, daß ein kompletter Versuchsablauf innerhalb eines Tages möglich war. Der zeitliche Ablauf des Versuchs ist:

1. Eine Stunde Belastung auf 10 MPa Flächenpressung.
2. Aufgabe des Innendruckes, so daß die Netto-Flächenpressung konstant bleibt.
3. Leckagemessung, i.d.R. für zwei Stunden.
4. Belastung auf 20 MPa mit anschließender Leckagemessung.
5. Entlastung auf 10 MPa mit anschließender Leckagemessung.
6. Die Flächenpressungen werden stufenweise erhöht bzw. reduziert. Dabei wurde die Leckage für je zwei Stunden gemessen.

Die Tests zeigten, daß Dichtungen mit gutem Anpassungsvermögen (ePTFE und Graphit) auch Rauigkeiten von $R_z = 6 \mu\text{m}$ bis $R_z = 60 \mu\text{m}$ gut abdichten konnten. Rauigkeiten von $160 \mu\text{m}$ dagegen konnten bei ausreichender Dichtungsdicke ($> 2,0 \text{ mm}$) nur noch mit ePTFE abgedichtet werden, d.h., daß die Leckage im Meßbereich der in dieser Arbeit verwendeten Meßmethode lag. Grund hierfür war vor allem die am Prüfstand verwendete scharfkantige Geometrie der Dichtfläche. Diese ist in den meisten industriellen Anwendungen nicht genau vorgegeben, z.B. in Form der Schneidengeometrie des Drehmeißels und der Schnittgeschwindigkeit der Drehmaschine. Durch die Wahl der scharfkantigen Geometrie wurde hier der konservative Fall einer Dichtfläche simuliert, d.h., daß auch in der Praxis vorkommende scharfkantige Dichtflächen berücksichtigt sind.

9.2.1.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen

Bezüglich der Modellierung der Leckagefunktionen von ePTFE- und Graphitdichtungen wurden frühere Arbeiten zugrunde gelegt. Alle in Abschnitt 1.2 genannten Arbeiten ergaben für die signifikanteste Einflußgröße der Leckagefunktion - die Dichtflächenpressung - entweder eine potentielle Gleichung (57),

$$\lambda = \alpha_p \sigma^{\beta_p} \quad (57)$$

oder eine exponentielle Abhängigkeit der Leckage von der Flächenpressung, Gleichung (58).

$$\lambda = \alpha_e e^{\beta_e \sigma} \quad (58)$$

In linearisierter Form ergeben sich der Koeffizient α und der Exponent β zum y-Achsenabschnitt bzw. zur Steigung der Leckagefunktion, Gleichungen (59) und (60):

$$\ln \lambda = \ln \alpha_p + \beta_p \ln \sigma \quad (59)$$

$$\ln \lambda = \ln \alpha_e + \beta_e \sigma \quad (60)$$

Aus Gleichung (4) in Abschnitt 1.2 läßt sich ableiten, daß die Steigung β der Leckagefunktion eine Materialkonstante sein muß. Das erwies sich in dieser Arbeit im Rahmen der Meßungenauigkeit als richtig. Allerdings gilt das nur, wenn sich die Dichtung an die Mikro- und

Makrounebenheiten der Dichtfläche angepaßt hat und somit vor allem eine Querschnittsleckage vorherrscht. Am Beispiel von ePTFE sind die parallel verlaufenden Kurven in Bild 26 linearisiert dargestellt.

Bei den Auswertungen zeigte sich, daß für Dichtungen aus ePTFE eine bessere Anpassung nach Gleichung (60), für Dichtungen aus expandiertem Graphit eine bessere Anpassung nach Gleichung (59) erreicht wurde.

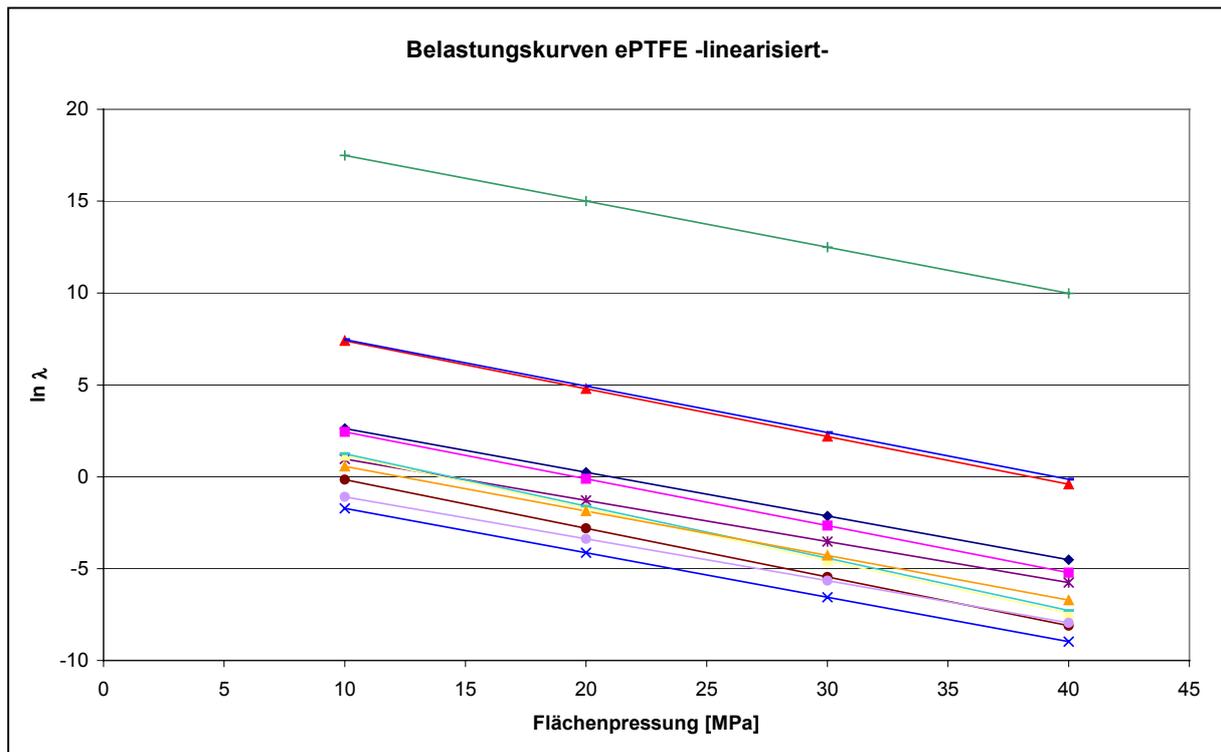


Bild 26: Darstellung der konstanten Steigung bei der Belastung

Über die rein grafische Bewertung hinaus bieten sich statistische Tests zur Beurteilung der Steigung an. Ist die Steigung eine Materialkonstante, dann müssen alle hier gemessenen Einflußgrößen einen nicht signifikanten Einfluß auf die Zielgröße haben (hier die Steigung β_e). Es wurde deutlich, daß die maßgeblichen statistischen Tests für die Einflußgrößen Dichtungsbreite b_D , Dichtungshöhe h_{D0} , Rauigkeit der Dichtflächen R_z und Innendruck p_i keine signifikante Änderung der Steigung hervorbringen [91, 92]. Sie ist somit im technisch relevanten Bereich sowohl vom Innendruck als auch von der Geometrie der Dichtung und der Dichtfläche unabhängig. Die Geometrie der Dichtung und der Innendruck führen lediglich zu einer parallelen Verschiebung der Leckagefunktionen.

Auf Basis dieser Erkenntnis ist es ausreichend, die Steigung der Leckagefunktion durch einige wenige Versuche zu ermitteln. Die Modellierung der Leckagefunktion reduziert sich daher auf die Beschreibung des y-Achsenabschnitts α der Leckagefunktion als Funktion von b_D , h_{D0} , R_z

und p_i . Die Steigung der Leakagefunktion β für die Belastungsfunktion der Leakage von ePTFE- und Graphitdichtungen ist im Anhang 34.1 aufgeführt.

Aufgrund der konstanten Steigung läßt sich der y-Achsenabschnitt formal auf einen beliebigen Wert der Flächenpressung (= Arbeitspunkt) beziehen. Legt man eine Flächenpressung von 0 MPa zugrunde, entspricht das prinzipiell der Querschnittsleakage durch die Dichtung im unverpreßten Zustand. Darüber hinaus kann der y-Achsenabschnitt der Leakagefunktion α auf den Arbeitspunkt (= Flächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge) des Dichtsystems verschoben werden, was der Realität am nächsten kommt, da nur Abweichungen um den Arbeitspunkt herum betrachtet werden. Da jedoch der Arbeitspunkt bei den meisten Anwendungen unterschiedlich ist und eine Flächenpressung von 0 MPa (unverpreßt) nur einen theoretischen Wert darstellt, ist es sinnvoll, α auf eine technisch relevante Flächenpressung, z.B. 10 MPa, zu beziehen.

Um von einem beliebigen Arbeitspunkt aus (hier: 10 MPa) die Leakage bestimmen zu können, ist es notwendig, mit den linearisierten Gleichungen (59) und (60) eine Verschiebung der Achsenkoordinaten mit der neuen Achsenbezeichnung σ' und λ' durchzuführen, Bild 27.

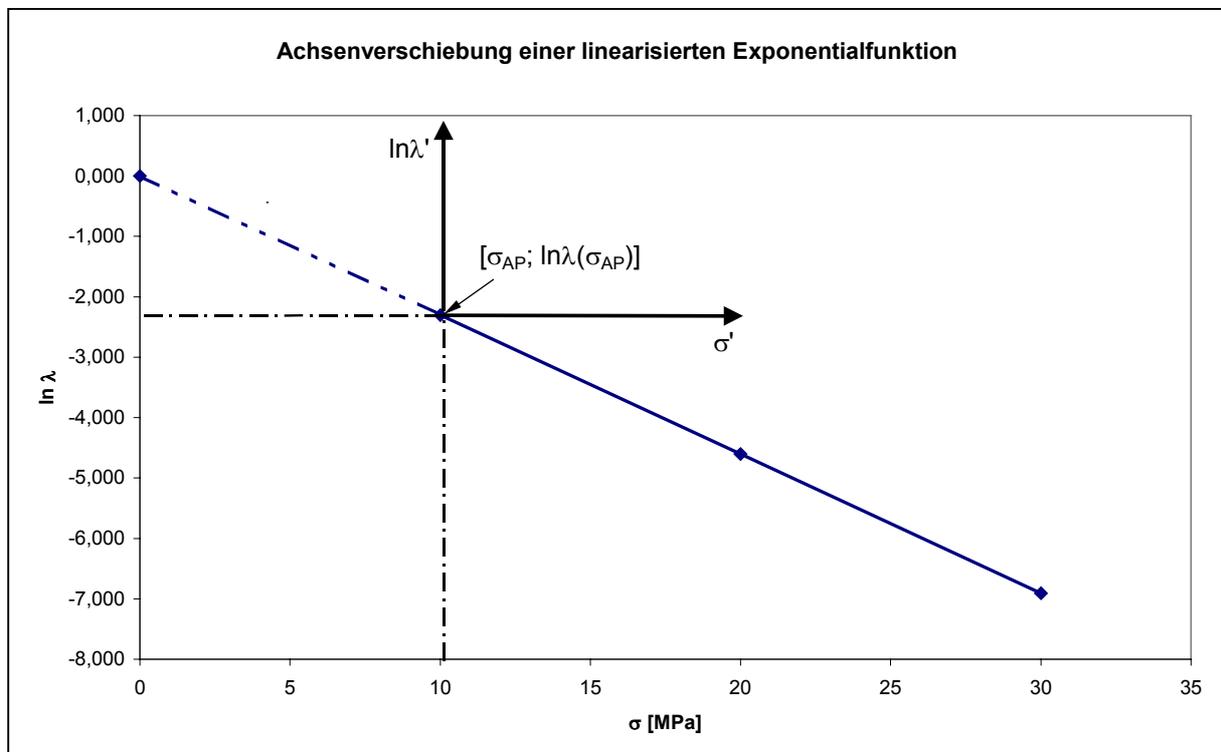


Bild 27: Verschiebung des Koordinatenursprungs in den Arbeitspunkt (Exponentialfunktion)

Bild 27 zeigt die grafische Darstellung der Verschiebung. Dabei ergibt das Wertepaar $[\sigma_{AP}; \ln \lambda(\sigma_{AP})]$ den Ursprung des verschobenen Koordinatensystems. Da die Steigung der

Leckagefunktion eine Materialkonstante darstellt, ergibt sich für die neue Ordinate $\ln \lambda'$, ausgehend vom Arbeitspunkt des Dichtsystems, folgende Ursprungsgerade:

$$\ln \lambda' = \frac{d \ln \lambda}{d \sigma} \sigma' \Rightarrow \ln \lambda' = \beta \sigma' \quad (61)$$

Für die direkte Bestimmung der absoluten Leckage einer Dichtung, welche einer Exponentialfunktion folgt, ergibt sich damit:

$$\ln \lambda = \frac{d \ln \lambda}{d \sigma} \sigma' + \ln \lambda(\sigma_{AP}) \Rightarrow \ln \lambda = \beta_e \sigma' + \ln \lambda(\sigma_{AP}) \quad (62)$$

Die Flächenpressung σ' aus Gleichung (63) ist dabei die vom Arbeitspunkt ausgehende vorzeichenbehaftete Flächenpressungsänderung. σ_{AP} steht für einen beliebig wählbaren Arbeitspunkt des Dichtsystems.

Analog dazu erhält man für den Arbeitspunkt der Potentialfunktion folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} \ln \lambda &= \frac{d \ln \lambda}{d \ln \sigma} (\ln \sigma - \ln \sigma_{AP}) + \ln \lambda(\sigma_{AP}) \\ \Rightarrow \ln \lambda &= \beta_p (\ln \sigma - \ln \sigma_{AP}) + \ln \lambda(\sigma_{AP}) \end{aligned} \quad (63)$$

σ_{AP} hat in Gleichung (63) die gleiche Bedeutung wie in Gleichung (62). σ steht für die absolut auftretende Flächenpressung.

Wie schon im Abschnitt 9.1.2.3 für die Verformungsfunktion dargestellt, bietet sich eine dimensionslose Darstellung der Leckagefunktionen zur einfacheren Interpretation der Gleichungen (62) und (63) an.

$$\ln \frac{\lambda}{\lambda(\sigma_{AP})} = \beta_e \sigma' \quad (64)$$

$$\ln \frac{\lambda}{\lambda(\sigma_{AP})} = \beta_p \ln \frac{\sigma}{\sigma_{AP}} \quad (65)$$

Der Quotient bzw. die Kennzahl:

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{AP}} \quad (66)$$

aus Gleichung (65) gibt dabei die Abweichung der Flächenpressung vom Arbeitspunkt an. Ein Betrag für die Kennzahl ε_{σ} größer 1 ergibt eine höhere, ein Betrag kleiner 1 eine geringere Flächenpressung als der angenommene Arbeitspunkt. Analog gilt das gleiche für das Vorzeichen von σ' .

Mit der Kennzahl:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda(\sigma_{AP})} \quad (67)$$

aus den Gleichungen (64) und (65) erhält man eine Aussage darüber, wie sich die Leckage ausgehend von der Flächenpressung im Arbeitspunkt ändert. Ergibt sich für die Kennzahl ε_{λ} ein Wert von 1, befindet sich das Dichtsystem im Arbeitspunkt. Ändert sich die Flächenpressung vom Arbeitspunkt aus gesehen in positiver Richtung, ergibt sich, abhängig vom Betrag der konstanten Steigung, eine geringere Leckage bzw. ein Wert < 1 für ε_{λ} . Dieser Zustand sollte immer angestrebt werden. Ein Betrag > 1 für ε_{λ} deutet auf eine Leckage hin, die unter Umständen die zulässige Leckage übersteigt. Das sollte vermieden werden.

Mit den Gleichungen (64) und (65) ist ausgehend von einem festen Arbeitspunkt und bei Kenntnis der Materialkonstanten β eine einfache Berechnung der zu erwartenden Leckage möglich. Für die Berechnung ist es vorweg notwendig, den Arbeitspunkt des Dichtsystems σ_{AP} in Abhängigkeit der Dichtungshöhe h_{D0} , der Dichtungsbreite b_D , des Innendrucks p_i und gegebenenfalls der Flanschrauigkeit R_z zu bestimmen. $\lambda(\sigma_{AP})$ stellt dabei in obigen Gleichungen eine Untermenge (den Arbeitspunkt) des Leckagekoeffizienten α dar.

Im Anhang 34.3 sind die Kennfunktionen für den allgemeinen Leckagekoeffizienten α bzw. den Arbeitspunkt $\lambda(\sigma_{AP})$ aufgeführt. In Bild 28 wird an einem Beispiel die Leckagefunktion von ePTFE und Graphit im Vergleich zu den Modellwerten gezeigt. Unter Berücksichtigung der Meßunsicherheit der Leckagemessungen und der unterschiedlichen Dichtungsmuster sind die Ergebnisse als gut anzusehen.

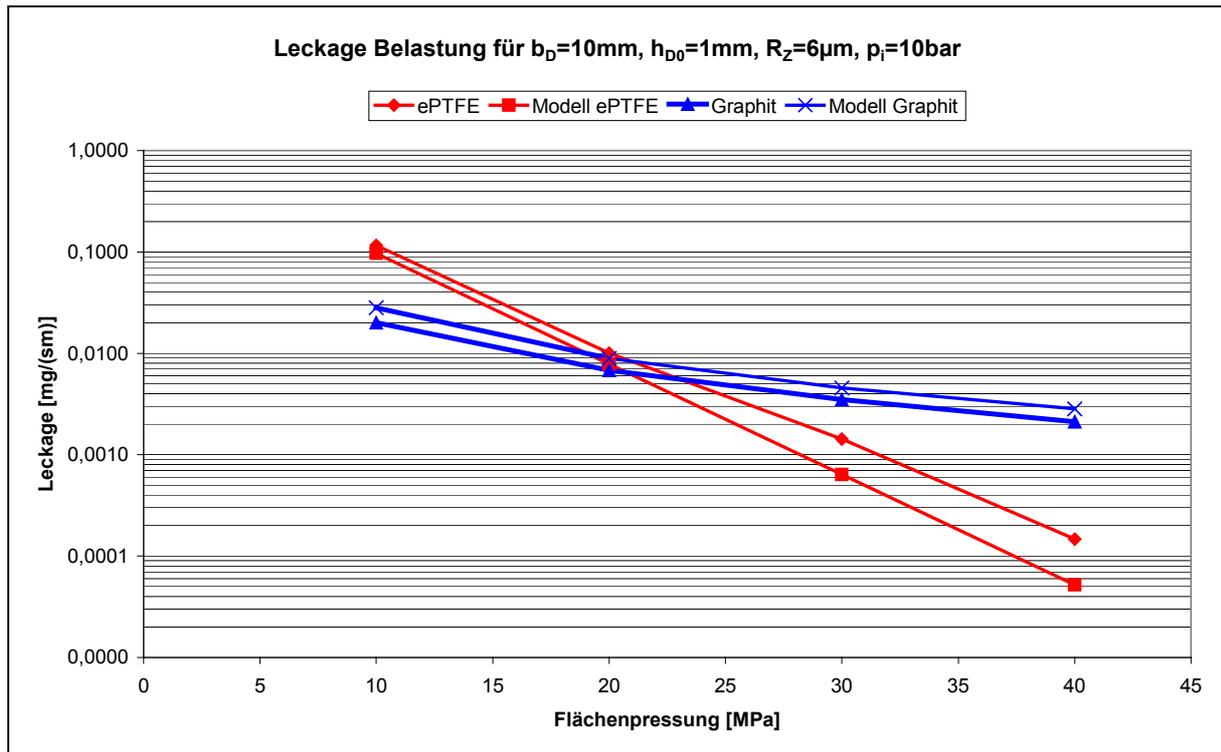


Bild 28: Vergleich der gemessenen Funktionsverläufe mit den Modellwerten der Leakage

In Bild 28 wird erkennbar, daß Dichtungen aus ePTFE bereits bei relativ geringer Änderung der Flächenpressung eine deutliche Verringerung der Leakage erfahren. Das liegt an der hohen Anpassungsfähigkeit und Kompressibilität dieses Dichtungsmaterials. Durch die konstante Steigung der Leakagefunktionen ergeben sich bei einer Steigerung der Flächenpressung um jeweils 10 MPa Reduzierungen der Leakage um etwa den Faktor 10. Bei Dichtungen aus Graphit dagegen wird bei gleicher Steigerungsrate der Flächenpressung eine Verbesserung um etwa den Faktor 3 erreicht. Dies zeigt, daß die Flächenpressung eine bedeutende Größe bei der Beschreibung der Leakage darstellt.

9.2.1.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung

Wird die Flächenpressung mit den anderen in dieser Arbeit betrachteten Einflußgrößen verglichen, ergibt sich, daß die Flächenpressung die entscheidende Einflußgröße bezüglich der Optimierung des Leakageverhaltens ist.

Die normierten Kennfunktionen aus Anhang 34.3 erlauben einen direkten Bezug zur Auswirkung der einzelnen Einflußgrößen Dichtungsbreite b_D , Dichtungsdicke h_{D0} , Innendruck p_i und gegebenenfalls Rauigkeit der Dichtflächen R_Z auf den Leakagekoeffizienten α bzw. den

Arbeitspunkt $\lambda(\sigma_{AP})$. Eine Änderung der Einflußgrößen hat eine parallele Verschiebung der transformierten Leckagefunktionen zur Folge, da die Steigung der Leckagefunktion β eine Materialkonstante darstellt. In Bild 29 werden am Beispiel von ePTFE-Dichtungen die einzelnen Haupteffekte der Einflußgrößen gezeigt. Die Auswertung mit Wechselwirkungen für ePTFE- und Graphitdichtungen wird im Anhang 35.1, 35.3 und 35.4 dargestellt.

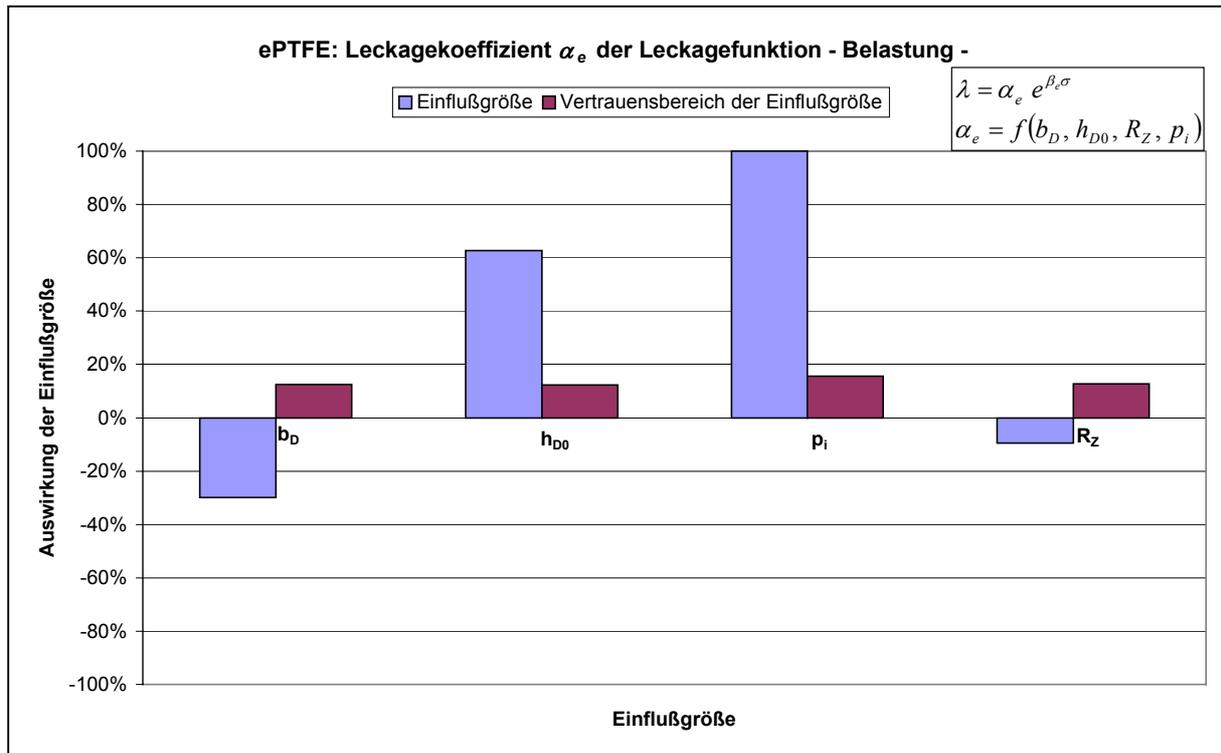


Bild 29: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e bei der Belastung

Den größten Effekt auf den Leckagekoeffizienten α_e bzw. $\lambda(\sigma_{AP})$ hat der Innendruck. Das erklärt sich durch die strömungsmechanischen Modelle. Die reale Strömungsform der Leckage liegt zwischen der reinen Knudsenströmung und der reinen laminaren Strömung, siehe Gleichungen (1) und (2). Bei der Knudsenströmung ist eine lineare Abhängigkeit der Leckage vom Innendruck gegeben, Gleichung (68), bei der laminaren Strömung eine quadratische, Gleichung (69):

$$\lambda \sim (p_i - p_a) \quad (68)$$

$$\lambda \sim (p_i - p_a)^2 \quad (69)$$

Da alle anderen Einflußgrößen außer der Flächenpressung nach den strömungsmechanischen Modellen einen rein linearen Einfluß auf die Leckage haben, erklärt sich daraus der relativ große Effekt des Innendrucks.

Die Flanschrauigkeit R_z wurde in Bild 29 belassen, obwohl der Einfluß nicht signifikant ist. Es zeigt sich hier, daß bei guten Verformungseigenschaften des Dichtungsmaterials die Rauigkeit nur eine untergeordnete Auswirkung auf die Leckage hat.

Die Einflußgrößen Innendruck p_i und Rauigkeit der Dichtflächen R_z sind in der Regel systembedingt vorgegeben. Sie stehen deshalb für eine Optimierung des Dichtsystems meist nicht zur Verfügung. Dagegen können die Dichtungsbreite b_D , die Dichtungshöhe h_{D0} und vor allem die Flächenpressung σ oftmals in einem großen Bereich variiert werden. Sie können somit gut zur Optimierung herangezogen werden.

Wie in Abschnitt 9.2.1.3 hergeleitet wurde, hat die Dichtflächenpressung σ den größten Effekt auf die Leckage, welche sich nach dem Einbau der Dichtung einstellt. Darüber hinaus ergibt sich aus Bild 29, daß eine steigende Dichtungshöhe h_{D0} zu einer relativ starken Erhöhung der Leckage führt. Dagegen führt eine geringere Dichtungsbreite b_D zu einer geringeren Leckage. Beide Einflußgrößen haben aber einen quantitativ unterschiedlichen Effekt auf die Leckage. Eine gleiche prozentuale Änderung der Dichtungshöhe h_{D0} und der Dichtungsbreite b_D führt aufgrund des größeren Effekts der Dichtungshöhe h_{D0} zu einer größeren Leckage. Es kann demnach bei der Leckagefunktion, wie auch schon bei den Kennfunktionen zur Verformung aus Abschnitt 9.1, nicht von einem konstanten Breiten-Dicken-Verhältnis gesprochen werden.

Da eine möglichst hohe Einbauflächenpressung Q_A entscheidend für die Leckage ist, sollte versucht werden, diese während des Einbaus der Dichtung möglichst hoch zu wählen. Verschiedene Möglichkeiten sind hierzu im Abschnitt 9.1.4 genannt.

Vor allem sei auf die Möglichkeit verwiesen, die Dichtungsbreite zu reduzieren. Das erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich. Jedoch wird bei geringerer Dichtungsbreite b_D durch eine gleichbleibende Schraubkraft deutlich die Einbauflächenpressung Q_A erhöht, was wiederum zu deutlich geringeren Leckagen führt.

Die Dichtungshöhe sollte, wie schon in den vorangegangenen Abschnitten zum mechanischen Verhalten, so dünn wie möglich gewählt werden, da dadurch sowohl eine geringere Leckage, als auch ein besseres Verformungs- und Kriech-Relaxationsverhalten des Dichtsystems erzielt werden kann.

Alle in diesem Abschnitt gemachten Ausführungen gelten in gleicher Weise für die restlichen in dieser Arbeit geprüften Dichtungsarten.

9.2.2 Bestimmung des Leckageverhaltens im Betriebszustand

9.2.2.1 Allgemeine Betrachtung

Man unterscheidet bei der Leckage in zwei Formen. Die erste wurde im Abschnitt 9.2.1 besprochen. Sie berücksichtigt die von äußeren Bedingungen, wie die Kriech-Relaxation, unabhängige Leckage, die sich mit der Einbauflächenpressung Q_A der Dichtung einstellt.

Die zweite Art der Leckage ist durch den Betriebszustand gekennzeichnet. Diese Leckage im Betriebszustand wird durch die Mindestflächenpressung im Betriebszustand $Q_{SMIN/L}$ charakterisiert und vor allem durch folgende Bedingungen beeinflusst:

- die beim Einbau aufgebrachte Flächenpressung Q_A und
- die sich einstellende Betriebsflächenpressung σ_{AP} .

Während des Einbaus der Dichtung wird diese vor allem plastisch verformt. Dadurch verschließen oder verengen sich vorhandene Leckagewege. Entscheidend für die Qualität dieser plastischen Verformung ist vor allem die Einbauflächenpressung Q_A .

Z.B. reduziert sich Q_A durch die Temperatur und äußere Kräfte und Momente auf einen Arbeitspunkt des Dichtsystems, der durch die Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge Q_R bzw. durch die sich einstellende Betriebsflächenpressung σ_{AP} bei zusätzlich auftretenden Kräften und Momenten charakterisiert werden kann. Q_R bzw. σ_{AP} sind dann mit den anderen Einflußgrößen für die Leckage und Sicherheit im Betrieb verantwortlich. Diese sind:

- Dichtungs- und Flanschgeometrie,
- Innendruck und
- das abzudichtende Medium.

Unter Berücksichtigung der Kennfunktionen des mechanischen Verhaltens einer Dichtung und der Kräfte, welche durch den Innendruck hervorgerufen sind, kann der Arbeitspunkt des Dichtsystems errechnet werden.

Die Reduzierung der Flächenpressung im Betrieb wird im Versuch durch eine Reduktion der Flächenpressung nach jeder Belastungsstufe simuliert, siehe dazu Bild 25.

Um unempfindlich gegen eine Entlastung der Flächenpressung im Betrieb zu sein, sollte sich die Leckage während der Entlastung nur wenig erhöhen. D.h., die Entlastungsfunktion im σ - λ -Diagramm sollte in der linearisierten Form möglichst flach verlaufen.

Wie schon im Abschnitt 9.2.1.3 für die Belastungsfunktion hergeleitet, tritt für die Entlastungsfunktion eine materialspezifisch konstante Steigung für die Entlastung auf.

9.2.2.2 Versuchsbeschreibung

Da die Daten zur Bestimmung der Mindestflächenpressung im Betriebszustand Q_{SMINL} und der Mindestflächenpressung im Einbauzustand Q_{MINL} in einem Versuchsablauf ermittelt werden, wird in diesem Abschnitt nicht näher auf die Wahl der Zielgrößen und die weiteren Auswahlkriterien eingegangen. Eine ausführliche Darstellung dazu wurde im Abschnitt 9.2.1.2 gegeben.

In Bild 25 sind die Entlastungsstufen nach jeder Belastung dargestellt. Die Entlastung wurde dabei stufenweise auf eine Flächenpressung von 10 MPa reduziert. Die Darstellung aus diesem Bild ist geeignet, eine Interpolation zwischen den einzelnen Entlastungskurven zu ermöglichen, welche die Bestimmung der Leckage für einen bestimmten Arbeitsspunkt in Abhängigkeit von der Einbaufächenpressung Q_A zulässt.

Dagegen ist diese Darstellung weniger zur Optimierung des Dichtsystem geeignet. Aufgrund dessen wurde eine Darstellungsart gewählt, die sich ähnlich wie die Belastungskurve der Leckagefunktion mathematisch leicht beschreiben lässt, Bild 30.

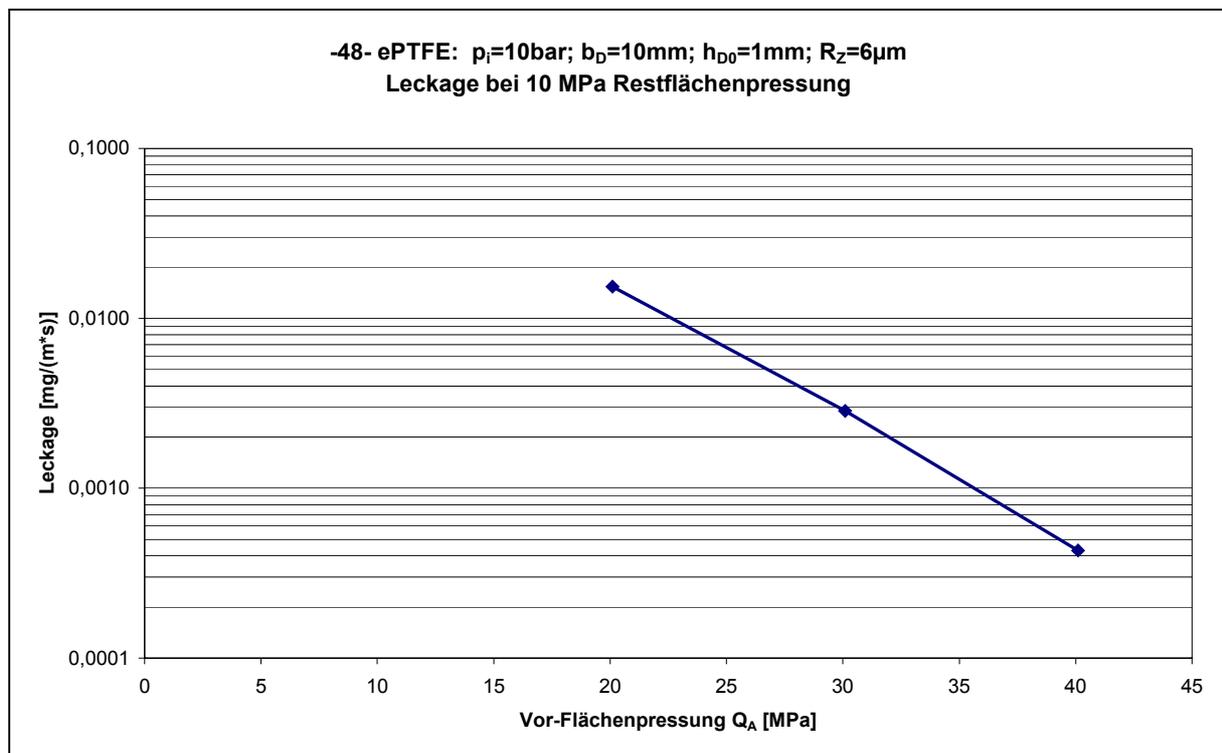


Bild 30: Darstellung der Entlastungsfunktion bei unterschiedlicher Anfangsflächenpressung Q_A

Der Kurvenverlauf aus Bild 30 stellt die Leckage für einen Betriebspunkt, hier 10 MPa, als Funktion der Einbaufächenpressung Q_A dar. Durch diese Art der Darstellung ergibt sich die Möglichkeit, den Effekt einer unterschiedlich hohen Einbaufächenpressung auf die sich im Betrieb bei einem bestimmten Arbeitspunkt einstellende Leckage zu verdeutlichen. Am Beispiel von Bild 30 heißt das, daß sich bei einer Einbaufächenpressung Q_A von 40 MPa und nachfolgender Entlastung auf eine Restflächenpressung Q_R von 10 MPa eine Leckage von ca. $0,5 \mu\text{g}/(\text{s}\cdot\text{m})$ einstellt. Dagegen erhält man bei einer Einbaufächenpressung Q_A von 20 MPa und einer gleichen Entlastung auf den Arbeitspunkt von 10 MPa eine im Betrieb um den Faktor 30 höhere Leckage von ca. $15,0 \mu\text{g}/(\text{s}\cdot\text{m})$.

Darüber hinaus ist es mit der Darstellungsart in Bild 30 möglich, die (mindestens) notwendige Einbaufächenpressung Q_A direkt zu bestimmen, Bild 31.

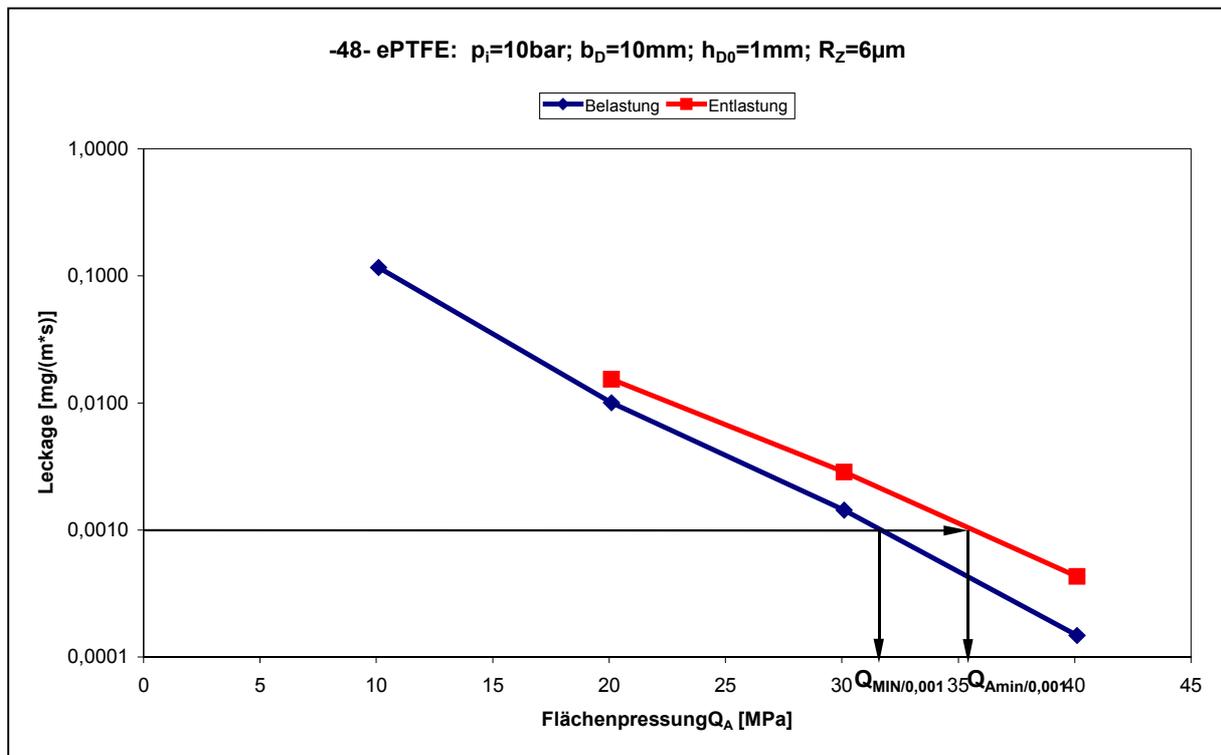


Bild 31: Bestimmung der geringsten Flächenpressung für $Q_{Amin/L}$ bei bekanntem λ_{min}

Bild 31 zeigt den Unterschied der Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN/L}$ zur wirklich (mindestens!) notwendigen Einbaufächenpressung $Q_{Amin/L}$. In der Praxis kommen immer wieder fehlerhafte Interpretationen des Kennwerts $Q_{MIN/L}$ vor, da oftmals eine Entlastung des Dichtsystems nicht berücksichtigt wird. In Bild 31 wird gezeigt, daß durch die Entlastung der Dichtung eine Mindestflächenpressung von ca. 36 MPa während des Einbaus der Dichtung aufgebracht werden muß, um nach der Entlastung eine Leckagerate von $0,001 \text{ mg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ zu

erhalten. Der Wert für die Mindestflächenpressung im Einbauzustand $Q_{MIN/L}$ dagegen beträgt lediglich ca. 32 MPa. Dadurch würde die zulässige Leckagerate im Betrieb überschritten.

Aus diesem Grund ist die Darstellung der Leckagefunktion nach Bild 30 geeigneter als die reine Belastungskurve. Die Modellierung und die Auswertungen zur Optimierung sind in den nachstehenden Abschnitten beschrieben.

9.2.2.3 Modellierung und Auswirkungen der Einflußgrößen

Für ePTFE und Graphit ergaben sich für die Kennfunktionen zur Beschreibung der Leckage bei Entlastung die gleichen exponentiellen bzw. potentiellen Grundgleichungen wie für die Belastungsfunktion, siehe Gleichungen (57) bis (60). D.h., für ePTFE ergab sich in dieser Arbeit eine bessere Anpassung hinsichtlich einer exponentiellen Funktion, Graphit folgt einer potentiellen Funktion. In der linearisierten Form kann somit die Leckage bei Entlastung der Dichtung mit einer konstanten materialspezifischen Steigung β , siehe Anhang 34.2, und dem verallgemeinerten y-Achsenabschnitt der Leckagefunktion α beschrieben werden. Die normierten Kennfunktionen hierzu sind im Anhang 34.4 aufgeführt.

Die Herleitung zur Steigung und die Bemerkungen zum Einfluß der Rauigkeit der Dichtflächen sind identisch mit denen im Abschnitt 9.2.1.3. Deshalb wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

Auch bei der Entlastungsfunktion ist es sinnvoll, den Leckagekoeffizienten α , welcher die Abhängigkeit der Leckage unabhängig von der Flächenpressung beschreibt, auf einen technisch relevanten Arbeitspunkt σ_{AP} , z.B. 10 MPa zu beziehen. Mit der transformierten Leckagefunktion ist es anschließend anhand der Kennfunktionen für α bzw. $\lambda(\sigma_{AP})$ möglich, ausgehend von diesem Arbeitspunkt die Leckage zu berechnen.

Für die zu erwartende Leckage im Betriebszustand, abgesehen vom unterschiedlichen Betrag der Steigung β für die Be- und Entlastungsfunktion, ergeben sich Gleichungen, die denen für die Belastungsfunktion der Leckage identisch sind. Zur Herleitung der Gleichungen siehe Abschnitt 9.2.1.3.

$$\ln \lambda = \beta_e \sigma' + \ln \lambda(\sigma_{AP}) \quad (70)$$

$$\ln \lambda = \beta_p (\ln \sigma - \ln \sigma_{AP}) + \ln \lambda(\sigma_{AP}) \quad (71)$$

Gleichung (70) ist die Funktion für Dichtungen mit exponentiellem Verlauf (hier ePTFE); Gleichung (71) steht für Dichtungen, die einer potentiellen Funktion folgen (hier Graphit). Zur Bedeutung der einzelnen Formelzeichen siehe Abschnitt 9.2.1.3. Angemerkt sei hier nur, daß nachfolgend anstatt des speziellen Arbeitspunktes σ_{AP} der verallgemeinerte Leckagekoeffizient α verwendet wird. Die dimensionslose Darstellung der obigen Gleichungen aus Abschnitt 9.2.1.3 gilt hier ebenso, jedoch ist auch hier die unterschiedliche Steigung bei Be- und Entlastung zu beachten.

In Bild 32 ist die Leckagefunktion von ePTFE und Graphit im Vergleich mit den Modellwerten beispielhaft gezeigt. Unter Berücksichtigung der Meßunsicherheit der Leckagemessung sind die Ergebnisse als gut anzusehen.

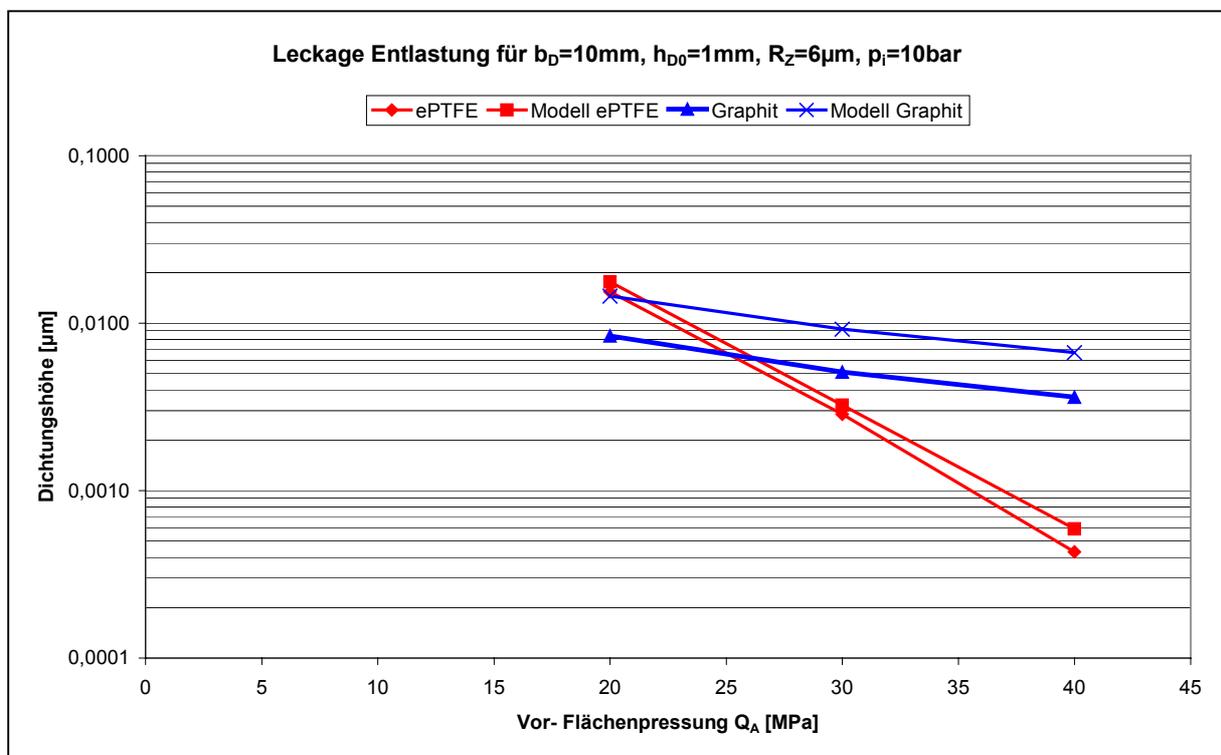


Bild 32: Vergleich der gemessenen Funktionsverläufe mit den Modellwerten der Leckage bei Entlastung

Bild 32 zeigt, daß für Dichtungen aus ePTFE ein möglichst hoher Wert für die Einbaufächenpressung Q_A angestrebt werden sollte, um bei einer Entlastung des Dichtsystems eine möglichst geringe Leckage zu erhalten. Für Graphitdichtungen erscheint das auf den ersten Blick in diesem Maße nicht zuzutreffen. Wird jedoch das mechanische Verhalten von Graphitdichtungen in die Betrachtung mit einbezogen, ist im Gegensatz zu Dichtungen aus PTFE nahezu keine Neigung zur Kriech-Relaxation festzustellen. Deshalb muß dieser Anteil der

Reduzierung der Flächenpressung nicht berücksichtigt werden. Trotzdem ergibt sich bei einer höheren Einbaufächenpressung Q_A eine deutlich geringere Leckage, vergleiche hierzu Bild 28. Auch hier zeigt sich, daß die Flächenpressung bezüglich des Leckageverhaltens die entscheidende Größe für geringe Leckagen im Betriebszustand ist. Im folgenden Abschnitt sind die über eine hohe Anfangsflächenpressung hinausgehenden, zur Optimierung notwendigen Maßnahmen erläutert.

9.2.2.4 Erkenntnisse für die optimierte Auslegung

In Bild 33 sind die Effekte der Einflußgrößen Dichtungsbreite b_D , Dichtungsdicke h_{D0} , Innendruck p_i und Rauigkeit der Dichtflächen R_Z auf den Leckagekoeffizienten α_e bzw. $\lambda(\sigma_{AP})$ bei der Entlastung am Beispiel einer Dichtung aus ePTFE gezeigt. Die Darstellung der Haupt- und Wechselwirkungen für ePTFE-Dichtungen wird im Anhang 35.2, die Auswertungen für Graphitdichtungen in den Anhängen 35.5 und 35.6 aufgeführt.

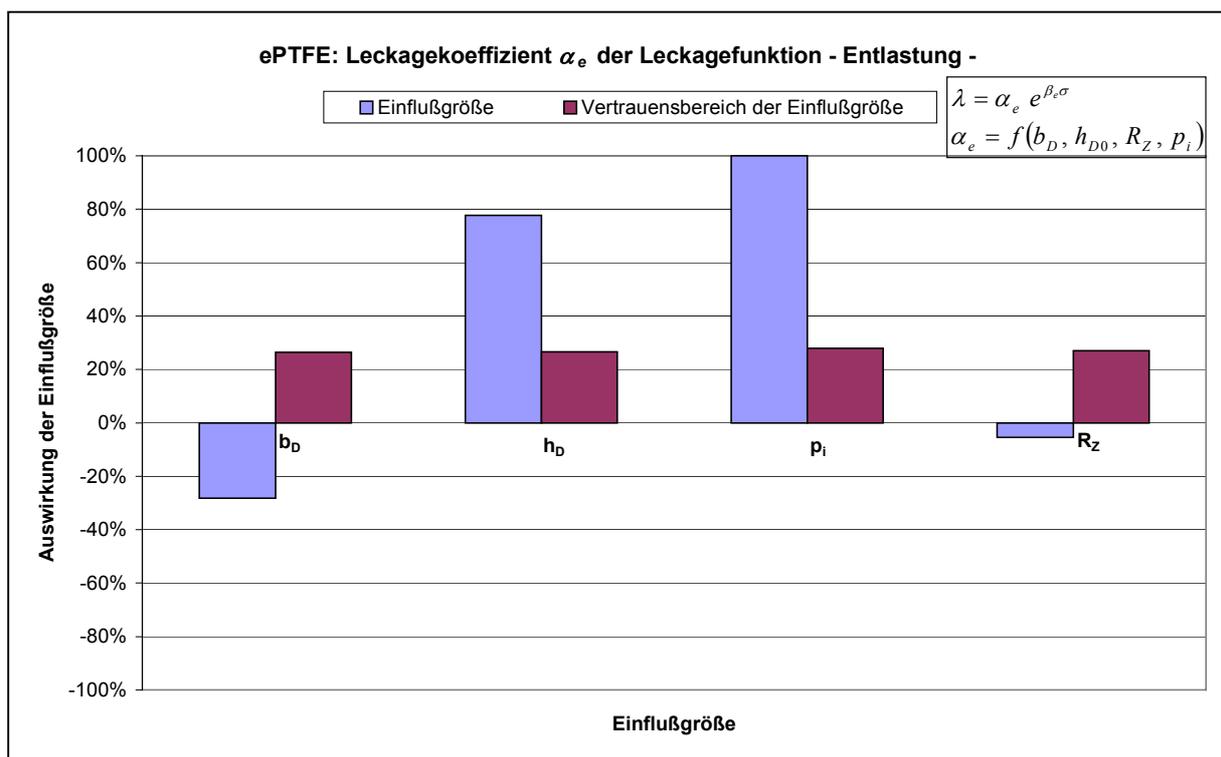


Bild 33: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e bei der Entlastung

Vergleicht man die Auswertungen zum Leckagekoeffizienten α_e bei Belastung mit den Auswertungen zum Leckagekoeffizienten bei Entlastung eines Dichtsystems, ergeben sich nahezu identische Ergebnisse. Das ist darauf zurückzuführen, daß sich die

strömungsmechanischen Gesetzmäßigkeiten für die Leckageströmung nicht ändern. Für diesen Abschnitt gelten deshalb die gleichen Ausführungen wie im Abschnitt 9.2.1.4.

Für einen optimal ausgelegten Leckagekoeffizienten der Entlastungsfunktion ist es erforderlich, daß die Dichtung mit einer möglichst hohen Flächenpressung während des Einbaus belastet wird, um auch im Betriebszustand eine möglichst geringe Leckage zu erhalten. Darüber hinaus ist darauf zu achten, daß eine möglichst geringe Dichtungsdicke verwendet wird. Die Dichtungsbreite kann bei gleichbleibender Schraubenkraft zugunsten einer hohen Flächenpressung reduziert werden.

9.2.3 Zusammenfassung des Leckageverhaltens

Im Abschnitt 9.2 wurden die Symptome der mechanischen Eigenschaften, d.h. das Leckageverhalten von Flanschdichtungen kurz nach dem Einbauzustand und im Betriebspunkt, in Abhängigkeit der verschiedenen Einflußgrößen jeweils allgemein und für einen konkreten Arbeitspunkt eines Dichtsystems bestimmt.

Dabei wurden nicht lineare potentielle und exponentielle Leckagefunktionen besprochen, welche durch eine linearisierende Transformation um Arbeitspunkte herum modelliert wurden. Die Arbeitspunkte entsprechen zum einen der Flächenpressung, die während des Einbaus erreicht wird, zum anderen der Flächenpressung, die sich im Betrieb einstellt.

Die Herleitung ergab, daß für die geprüften Dichtungen die Steigung β der Leckagefunktion materialspezifisch ist. Diese Steigung ist von den geometrischen Bedingungen und dem abzudichtenden Innendruck unabhängig. Aufgrund dieser materialspezifischen Steigung konnte die Leckagefunktion durch eine einzige Kennfunktion definiert werden, welche die Lage des Arbeitspunktes $\lambda(\sigma_{AP}) = f(b_D; h_{D0}; R_Z; p_i)$ beschreibt und unabhängig von der Flächenpressung ist.

Deutlich wurde, daß vor allem eine möglichst hohe Flächenpressung entscheidend für ein Dichtsystem ist, welches im Betrieb eine möglichst geringe Leckage erreichen soll.

Über die Flächenpressung hinaus wird die Lage des Arbeitspunktes durch die Einflußgrößen Dichtungsbreite b_D , Dichtungshöhe h_{D0} , Rauigkeit der Dichtflächen R_Z und Innendruck p_i bestimmt. Ist eine Oberflächenanpassung zwischen Dichtfläche und Dichtung erreicht, hat R_Z nur noch eine untergeordnete Bedeutung. Die parallele Verschiebung der Leckagefunktion hin

zu höheren Leckagen ist vor allem durch einen steigenden Innendruck gegeben, der meist systembedingt und deshalb nicht veränderbar ist. Bei Betrachtung der in der Regel beeinflussbaren Parameter eines Dichtsystems, Dichtungsbreite b_D und Dichtungsdicke h_{D0} , zeigt sich mit steigender Dichtungshöhe eine deutliche Verschiebung zur höheren Leckage. Wie auch schon bei der Verformungsfunktion ist deshalb auf die Wahl einer möglichst dünnen Dichtung zu achten.

Eine größere Dichtungsbreite führt normalerweise zu einer verringerten Leckage. Ergeben sich höhere Flächenpressungen, z.B. durch eine verringerte Dichtungsbreite, ist aufgrund der dominanten Flächenpressung bezüglich des Leckageverhaltens eine schmalere Dichtung vorzuziehen. Weitere Ausführungen dazu wurden bereits im Abschnitt 9.1.4 gemacht.

Die in diesem Abschnitt erarbeiteten Ergebnisse werden zusammengefaßt, um sie einem möglichst breiten Anwenderfeld zur Verfügung zu stellen und in der nachstehend beschriebenen Software iterativ einer Optimierung unterzogen [102].

10 Optimierungssoftware

10.1 Grundlagen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Kennfunktionen geschaffen, die eine optimierte Auslegung eines Dichtsystems ermöglichen. Um die Kennfunktionen, hier für ePTFE, einem breiten Anwenderfeld zur Verfügung zu stellen, war es notwendig, eine Berechnungssoftware zu erstellen. Eine Software ist unerlässlich, da die optimierte Auslegung des Dichtsystems durch den in Abschnitt 5 beschriebenen Algorithmus eine relativ hohe Anzahl von Iterationsschritten bedingt. Die dazu erforderlichen Berechnungen sind von Hand nur unter großem Aufwand durchführbar. Dieser Abschnitt dient zur Erläuterung der über den im Algorithmus aus Abschnitt 5.1 hinausgehenden Programmablauf sowie als Benutzerhinweis für die Anwender.

Die Software wurde mit der höheren Programmiersprache LabVIEW[®] erstellt und kann auf jedem Computer mit Pentium[®]-Prozessor unter allen Windows[®] Betriebssystemen mittels einer Standardroutine installiert werden.

Der Benutzer wird durch verschiedene Fenster zum Eingeben der benötigten Daten aufgefordert. Nach Abschluß der Eingaben werden die optimierten Werte berechnet, auf den Bildschirm ausgegeben und unter einem frei wählbaren Speicherplatz abspeicherbar.

10.2 Erläuterungen zum Algorithmus

Das Programm ist folgendermaßen aufgebaut:

1. Eingabe der Schraubendaten.
2. Eingabe der Dichtungswerte.
3. Eingabe zusätzlich benötigter Berechnungswerte.
4. Durchführung der Iterationen zur Optimierung.
5. Berechnung und Ausgabe der für den Anwender notwendigen Berechnungswerte.

Nach dem Programmstart erscheint das erste Eingabefenster, Bild 34. Das Fenster enthält über Pulldown-Menüs die Abfrage der Schraubenqualität, des Schraubendurchmessers und der Schraubenart. Die Anzahl der Schrauben, der Reibkoeffizient und die Temperatur sind direkt anzugeben. Danach werden die Anzahl der Schrauben und der Reibkoeffizient auf Plausibilität geprüft.

Der Anwender erhält Warnhinweise, wenn die Schraubenanzahl nicht durch 4 teilbar oder der Reibkoeffizient nicht im Bereich $0,1 \leq \mu \leq 0,3$ ist. Ein weiterer Warnhinweis wird gegeben, wenn

die Temperatur nicht im für die Kennfunktionen gültigen Bereich von $20\text{ °C} \leq \vartheta \leq 250\text{ °C}$ liegt. Das Programm wird aber trotzdem weiter ausgeführt.

Errechnet werden aus diesen Eingabedaten die maximal mögliche Gesamtkraft der Schrauben sowie die maximal mögliche Kraft und das maximal zulässige Drehmoment einer Schraube.

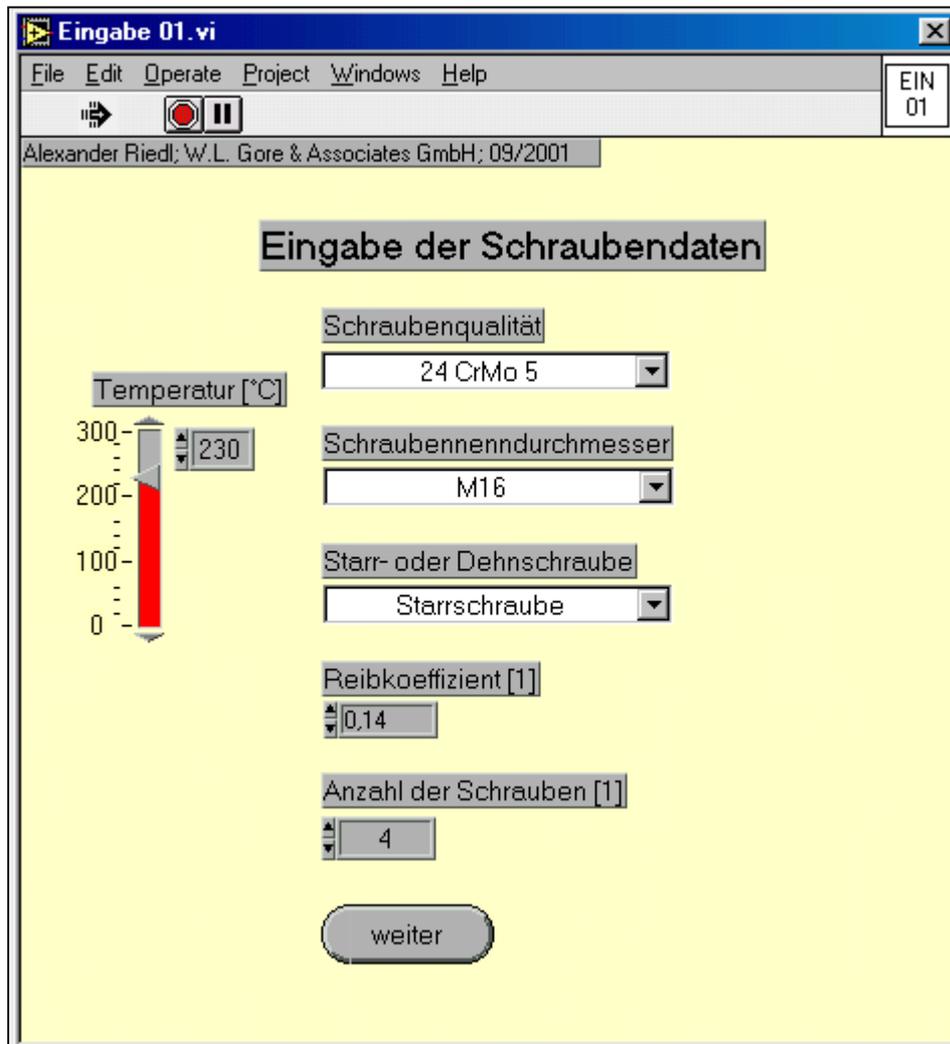


Bild 34: Eingabefenster für die Schraubendaten und die Temperatur

Das zweite Eingabefenster, Bild 35, enthält Abfragen zur Dichtungsdicke und zum maximalen Außen- und minimalen Innendurchmesser der Dichtung. Die Durchmesser geben die maximal verpreßbare Dichtungsbreite an. Darüber hinaus gibt es die Abfrage nach einer minimal zulässigen Dichtungsbreite. Ist die minimal zulässige Dichtungsbreite angewählt, wird die Optimierung, d.h. die Vergrößerung des Innendurchmessers der Dichtung, solange schrittweise durchgeführt, bis diese Breite erreicht ist. Ist die reine Optimierung angewählt, wird das Dichtsystem bis zum zulässigen Breiten-Dicken-Verhältnis optimiert, siehe Abschnitt 5. Der Innendurchmesser wird bei der Optimierung erhöht, da dadurch die Flanschblattneigung

möglichst gering gehalten und ein besseres Hebelverhältnis zur Kraftübertragung der Schraubenkraft auf die Dichtung erreicht wird.

Der Anwender erhält einen Warnhinweis, wenn die Dichtungshöhe außerhalb des für die Kennfunktionen gültigen Bereichs von $1,0 \text{ mm} \leq h_{D0} \leq 4,0 \text{ mm}$ liegt. Das Programm kann jedoch weiter ausgeführt werden. Eine weitere Abarbeitung des Programms wird verhindert, wenn der Innendurchmesser der Dichtung größer oder gleich dem Außendurchmesser ist. Erst nach Änderung dieser Daten ist eine weitere Berechnung möglich.

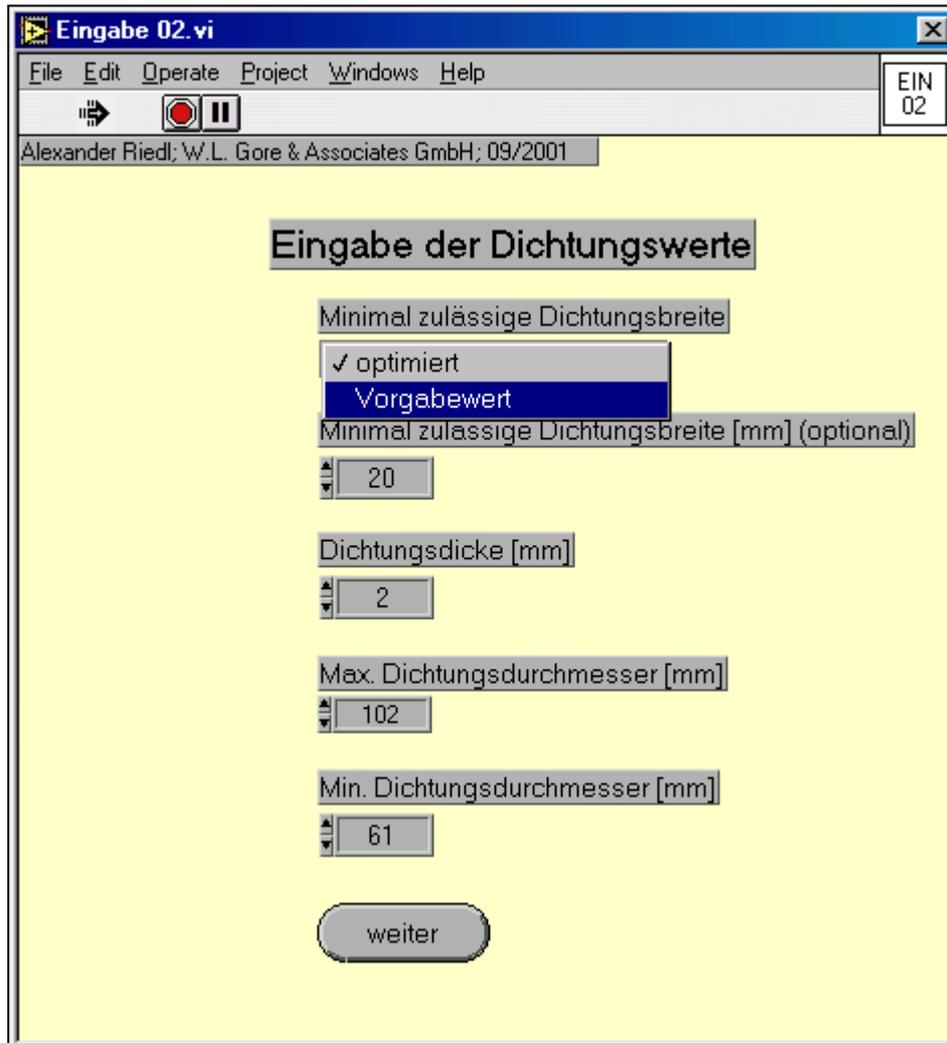


Bild 35: Eingabefenster der Dichtungsdaten

Das dritte Eingabefenster, Bild 36, enthält Abfragen zum Innendruck, zur Steifigkeit des Dichtsystems, zur Rauigkeit der Dichtflächen und der zulässigen Leckagerate. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, eine maximal zulässige Kraft für die Belastung des Flansches anzugeben. Ist diese vorgegeben, wird sie mit der maximal möglichen Gesamtschraubenkraft verglichen. Mit der geringeren Kraft wird danach die Optimierung durchgeführt. Diese

Vorgabemöglichkeit ist bei bereits bekannter zulässiger Belastungsgrenze sinnvoll, z.B. bei Flanschen aus GFK (glasfaserverstärktem Kunststoff).

Warnhinweise, die nicht zum Anhalten der Berechnung führen, werden aufgelistet, wenn die Bereiche der Kennfunktionen überschritten werden. Das sind $6 \mu\text{m} \leq R_z \leq 160 \mu\text{m}$, $150 \text{ kN/mm} \leq C \leq 1000 \text{ kN/mm}$ und $10 \text{ bar} \leq p_i \leq 40 \text{ bar}$.

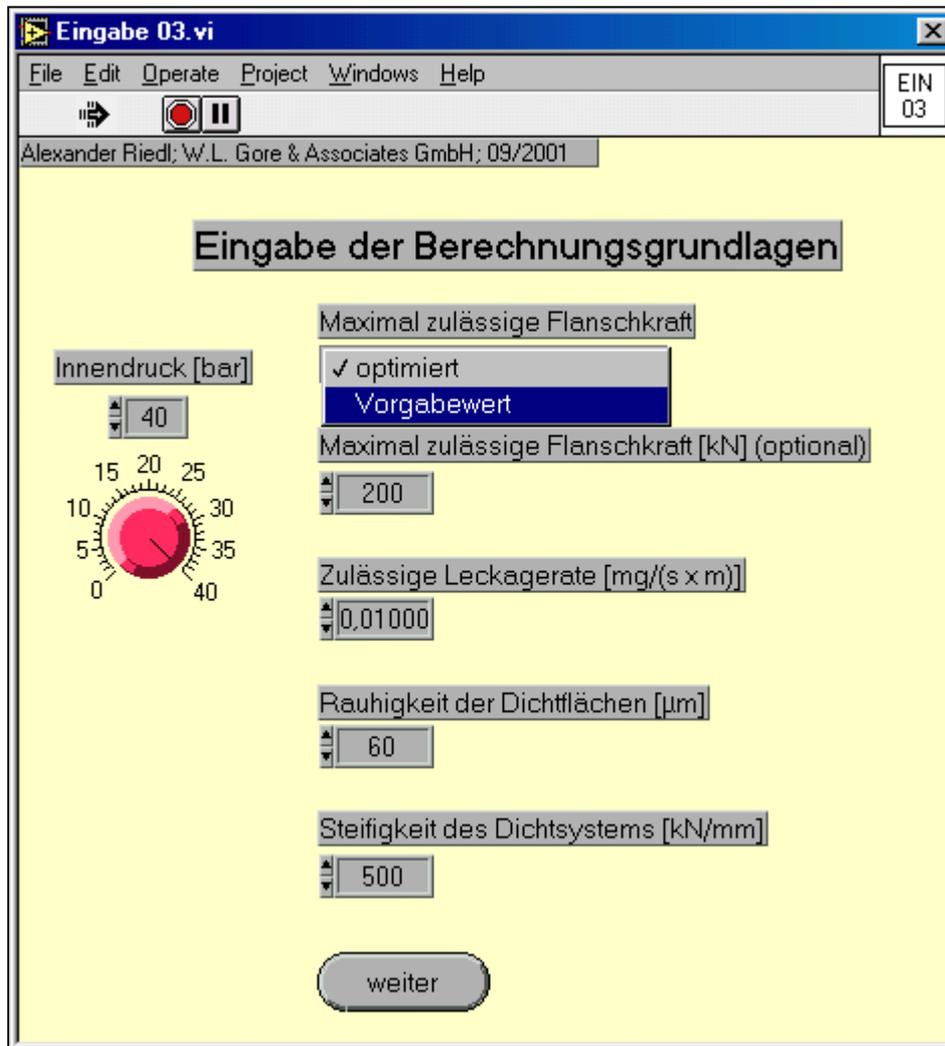


Bild 36: Eingabefenster der zusätzlich benötigten Berechnungswerte

Nach der vollständigen Eingabe der zur Berechnung benötigten Daten wird die Optimierung gemäß Abschnitt 5.1 iterativ durchgeführt. Die benötigten Daten zur Montage der Dichtung und die zum Festigkeitsnachweis benötigten Werte werden zusammengefaßt auf dem Bildschirm ausgegeben, Bild 37, und können in einer frei wählbaren ASCII-Datei abgespeichert werden.

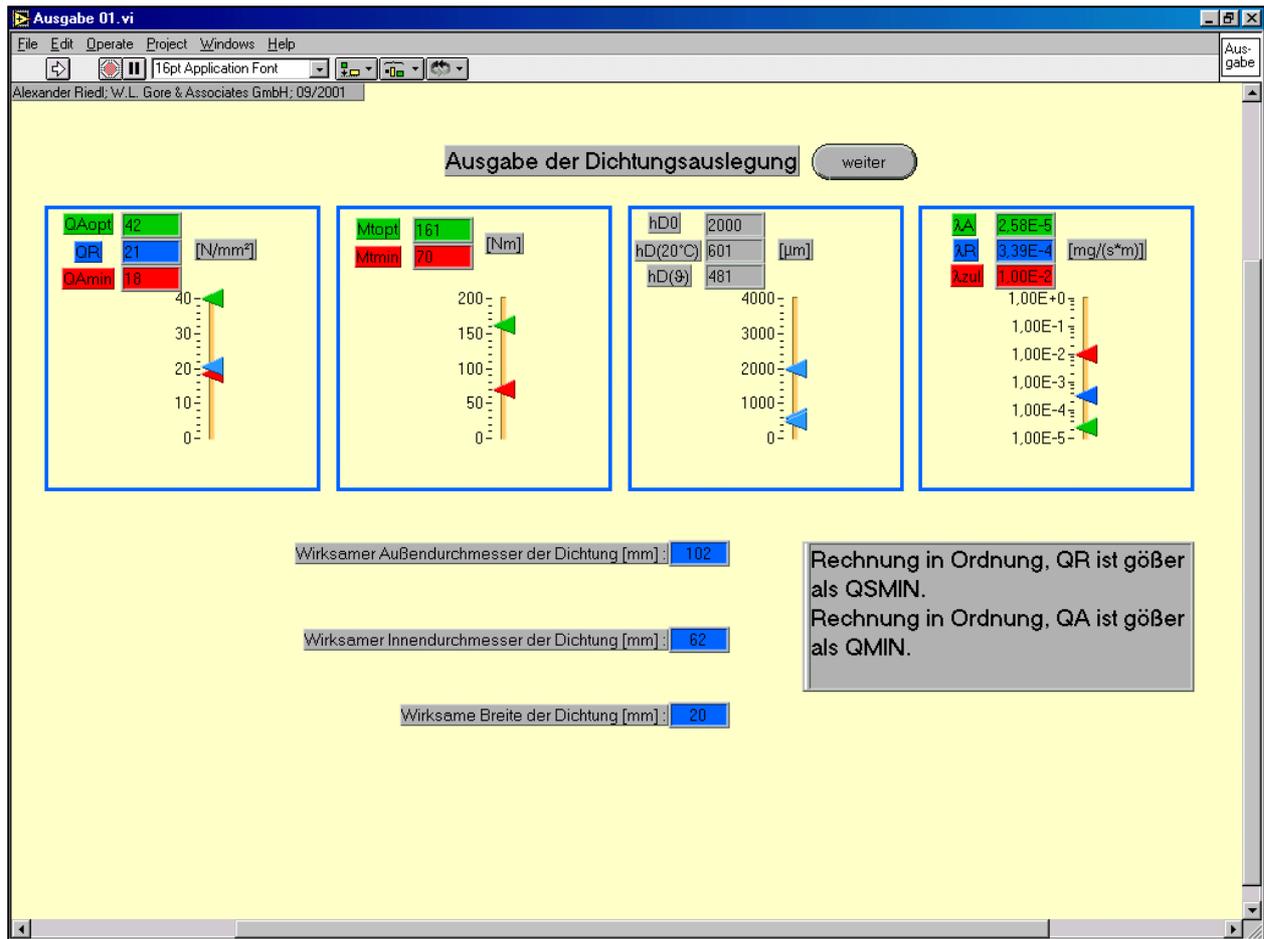


Bild 37: Ausgabefenster der Berechnungswerte

Die Ausgabedaten in Bild 37 enthalten folgende Angaben:

- die optimale und die minimal notwendige Flächenpressung während des Einbaus sowie die sich einstellende Flächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge;
- das optimale und das minimal notwendige Drehmoment der Schrauben,
- die sich einstellende Leckage kurz nach dem Einbauzustand bei Raumtemperatur, die Leckage im Arbeitspunkt des Dichtsystems und die maximal zulässige Leckage;
- die Dichtungsdicke im Ausgangszustand, nach Einbau und bei Betriebstemperatur der Dichtung;
- die wirksamen Dichtungsdurchmesser mit der dazugehörigen Dichtungsbreite.

Die in Bild 37 dargestellten Flächenpressungen beziehen sich auf die optimierte Dichtungsgeometrie bei maximal möglicher bzw. zulässiger Einbaukraft. Aus diesen Flächenpressungen errechnet sich das optimale und minimale Einbaudrehmoment der Schrauben sowie die zu erwartende Leckage. Das minimale und das maximale Drehmoment

während des Einbaus geben den Drehmomentbereich an, der beim Einbau erreicht werden muß, um im nachfolgenden Betriebszustand die zulässige Leckage nicht zu überschreiten. Beim Einbau mit optimalem Drehmoment wird eine möglichst geringe Empfindlichkeit des Dichtsystems gegen äußere Kräfte und Momente erzielt, welche auf das Dichtsystem wirken können.

Für den nachfolgenden Festigkeitsnachweis, z.B. nach EN1591 [24], lassen sich die benötigten Kennwerte aus dem Ausgabefenster direkt ablesen oder errechnen.

Grundsätzlich ist zu bemerken, daß das Dichtsystem immer mit der optimalen Flächenpressung während des Dichtungseinbaus belastet werden soll, da dies eine möglichst geringe Leckage in Verbindung mit höchstmöglicher Sicherheit für das Dichtsystem gewährleistet.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit wurde auf Basis früherer Arbeiten und der geschichtlichen Entwicklung der Normung zur Flanschberechnung und Kennwertermittlung für Flanschdichtungen abgeleitet.

Bisher existieren vor allem Kennwerte für Flanschdichtungen, die das Verhalten bei genau einer bestimmten Einstellung der Einflußgrößen ermöglichen. Für ein sicher arbeitendes Dichtsystem ist es jedoch notwendig, eine möglichst umfassende Beschreibung des Verhaltens von Flanschdichtungen unter Berücksichtigung der Variation der Einflußgrößen in Form von Kennfunktionen zu erhalten.

Aus den Kennfunktionen lassen sich nicht nur die zur Berechnung oder zum Vergleich von Dichtungen notwendigen Kennwerte berechnen, es ist darüber hinaus möglich, das Dichtsystem komplex zu beschreiben.

Zuerst wurden die für ein Dichtsystem benötigten Kennwerte abgeleitet. Hierbei wurde auf eine möglichst sichere Abdichtung in Verbindung mit möglichst geringer Leckage Wert gelegt.

Um die benötigten Kennwerte durch Kennfunktionen ersetzen zu können, war es erforderlich, die hauptsächlich eingesetzten Flanschdichtungen mit deren technisch relevanten Einsatzbedingungen zu kennen. Diese ergab eine Umfrage bei der europäischen Großchemie. Die Einsatzbedingungen geben den Bereich an, in denen die jeweiligen Dichtungsarten eingesetzt werden. In Verbindung mit der Analyse der Literatur und der Normung wurden folgende Einsatzbedingungen erfaßt:

- Dichtungsgeometrie,
- Rauigkeit der Dichtflächen,
- Steifigkeit des Dichtsystems,
- Dichtflächenpressung,
- zulässige Temperaturen,
- zulässiger Innendruck und
- zulässige Leckage.

Nachdem die technisch relevanten Einsatzbedingungen bekannt waren, stellte sich die Aufgabe, Prüfanlagen zu verwenden, die den ganzen Einsatzbereich der Dichtungstypen experimentell abdecken können. Dabei wurden vor allem Dichtungen aus ePTFE betrachtet. Prüfanlagen wurden zum Teil übernommen, modifiziert oder auch komplett neu entwickelt. Vor

allem auf dem Gebiet der Leckagemessung wurde eine deutliche Steigerung der Qualität und Quantität der Prüfungen erreicht.

Als Grundlage zur Erstellung der Kennfunktionen wurde die multiple Regressionsanalyse genutzt. Durch eine hier hergeleitete normierte Darstellung der Kennfunktionen können die Auswirkungen der einzelnen Einflußgrößen auf die dichtungstechnisch relevanten Zielgrößen direkt angegeben werden. Erst dadurch wird eine Optimierung des Dichtsystems ermöglicht. D.h., der Anwender kann direkt an den Kennfunktionen ablesen, an welcher „Schraube“ (= Einflußgröße) er zu drehen hat, um den für ihn bzw. das Dichtsystem positivsten Effekt zu erreichen.

Die zur Erstellung der Kennfunktionen notwendigen experimentellen Versuche wurden soweit wie möglich an bestehende Normversuche angelehnt. Das war nur bei Versuchen zur Bestimmung der Leckagecharakteristik realisierbar und sinnvoll. Die Versuche zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens weisen in der bestehenden deutschen und der bisher entwickelten europäischen Normung deutliche Schwächen auf.

Aufgrund der theoretischen Überlegungen und auch der Versuchsauswertungen wurden sowohl die in der Arbeit vorgestellten Versuchssystematiken zur Bestimmung der maximal zulässigen Flächenpressung als auch des Kriech-Relaxationsverhaltens entweder komplett oder mit geringen Modifikationen in die neue europäische Norm zur Ermittlung von Kennwerten für Flanschdichtungen übernommen.

Die hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen und die darauffolgenden Modellierungen wurden in die Beschreibung des Verformungs- bzw. mechanischen Verhaltens und des Leckageverhaltens unterteilt. Das Verformungsverhalten beschreibt dabei die Ursachen für das sich ergebende gute oder weniger gute Leckageverhalten des Dichtsystems. Hergeleitet wurde, daß das Leckageverhalten eines Dichtsystems nur so gut sein kann, wie es das mechanische Verhalten des Dichtwerkstoffs zuläßt. Im Ergebnis dessen wurde gezeigt, daß eine Optimierung des Dichtsystems unabhängig vom Dichtungsmaterial möglich ist. Zur Optimierung des Dichtsystems können deshalb die gleichen Maßnahmen für alle in dieser Arbeit betrachteten und meist verwendeten Dichtungsarten ergriffen werden.

Bezüglich des Verformungsverhaltens wurde das Dichtsystem ausgehend von einem Betriebspunkt, der sich nach Abschluß der Kriech-Relaxationsvorgänge einstellt, mathematisch beschrieben. Um im nachfolgenden Betriebszustand eine möglichst geringe Empfindlichkeit

gegen zusätzlich auftretende (unerwünschte) Verformungen des Dichtmaterials und eine möglichst hohe Restflächenpressung im Betriebszustand zu erhalten, zeigte sich, daß

- eine möglichst hohe Flächenpressung während des Einbaus der Dichtung und
- eine möglichst geringe Dichtungsdicke

angewendet werden sollten. Dagegen sind die weiteren Einflußgrößen, wie Dichtungsbreite oder die Rauigkeit der Dichtflächen, von geringerer Bedeutung für die Sicherheit und Leckageempfindlichkeit des Dichtsystems. Lediglich die Temperatur hat vor allem bei PTFE-Dichtungen eine relativ große Auswirkung auf das mechanische Verhalten der Flanschdichtungen. Da diese meist systembedingt vorgegeben ist, hat der Anwender nur geringe Möglichkeiten, das Dichtsystem dahingehend zu optimieren.

Bezüglich des Kriech-Relaxationsverhaltens können die gleichen Aussagen wie zum reinen Verformungsverhalten gemacht werden. Darüber hinaus wurde hergeleitet, daß für ein optimiertes Dichtsystem eine, auf den ersten Blick widersprüchliche Verringerung der Dichtungsbreite bei gleichzeitig erhöhter Flächenpressung einer breiteren Dichtung vorzuziehen ist. Ferner wurde bewiesen, daß ein immer wieder gefordertes, minimal zulässiges konstantes Breiten-Dicken-Verhältnis für Dichtungen als solches nicht existiert. Grund hierfür ist, daß die Dichtungsdicke gegenüber der Dichtungsbreite meist eine deutlich negativere Auswirkung auf das mechanische- und das Leckageverhalten eines Dichtsystems hat.

Das Verhalten von Flanschdichtungen unter Innendruckbelastung wurde, wie schon das mechanische Verhalten, durch Kennfunktionen beschrieben. Das geschah ausgehend vom Arbeitspunkt des Dichtsystems. Es zeigte sich, daß die Steigung der linearisierten Leckagefunktion materialspezifisch ist. Die Leckagefunktion konnte somit unabhängig von der Flächenpressung dargestellt werden.

Besondere Beachtung fand dabei das Leckageverhalten, welches sich ausgehend vom Einbauzustand der Dichtung zeigt, da das Dichtsystem in der Regel nach dem Einbau nicht mehr von außen beeinflußt werden kann. Die optimierte Auslegung des Dichtsystems führte zu den gleichen Erkenntnissen wie die Beschreibung des mechanischen Verhaltens. Es ist somit wichtig, eine möglichst hohe Flächenpressung während des Einbaus einer Dichtung aufzubringen. Das sollte in Verbindung mit einer möglichst dünnen Dichtung geschehen.

Um die Ergebnisse dieser Arbeit in der praktischen Anwendung umfangreich nutzen zu können, wurde auf Basis der hier erhaltenen Erkenntnisse eine Software entwickelt. Diese ermöglicht eine optimierte Auslegung eines beliebigen Dichtsystems. Gleichzeitig erhält der Anwender die

zum Festigkeitsnachweis des Dichtsystems notwendigen Kennwerte. Diese werden, im Gegensatz zum bisherigen Kenntnisstand, unter Berücksichtigung der realen Randbedingungen zur Verfügung gestellt.

Für weiterführende Arbeiten scheint es notwendig, die hier dargestellten Ergebnisse, welche vor allem auf Prüfständen unter Laborbedingungen ermittelt wurden, auf reale Flanschsysteme zu übertragen. Dabei ist vor allem bei Flanschmaterialien aus Kunststoffen (glasfaserverstärkte Flansche, aber auch reine Kunststoffflansche) und emaillierten Flanschen noch erheblicher Forschungsbedarf zu konstatieren.

Für alle Flansche, inklusive Stahlflansche, ist auch der Einfluß der Temperatur auf das Leckageverhalten zu berücksichtigen. Das scheint vor allem interessant für Dichtungen aus Werkstoffen, die sich unter Temperatur weiter setzen und somit trotz geringerer Flächenpressung eine geringere Leckage erwarten lassen. Darüber hinaus ist es erforderlich, das Dichtsystem unter thermischer und mechanischer Wechselbelastung zu beschreiben.

Die hier vorgestellten Erkenntnisse sollten künftig in die oben genannten weiteren Arbeiten zur Verringerung der Emissionen aus Flanschverbindungen münden.

Jeder Beitrag hierzu steigert die Sicherheit von Dichtsystemen und hilft Mensch und Umwelt.

Literaturverzeichnis

- [1] Firma W.L. Gore GmbH:
Historische Entwicklung der Dichtungstechnik (interne Schulung)
W.L. Gore & Associates GmbH, München, 1995

- [2] VDI 2440:
Emissionsminderung Mineralö Raffinerien
Beuth Verlag, Berlin, 2000

- [3] Bundesumweltministerium:
Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft
Heymanns Verlag, Köln, 2000

- [4] Rat der europäischen Gemeinschaft:
Druckgeräterichtlinie
DITR, Berlin, 1997

- [5] VdTÜV:
Verordnung über Druckbehälter, Druckgasbehälter und Füllanlagen
(Druckbehälterverordnung – DruckbehV)
Beuth Verlag, Berlin, 1999

- [6] Bundesumweltministerium:
Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts in der Fassung der Bekanntmachung vom
12. November 1996

- [7] VdTÜV:
Verordnung für brennbare Flüssigkeiten (VbF)
Heymanns Verlag, Köln, 2001

- [8] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V.:
Technische Regeln zur Druckbehälterverordnung - Rohrleitungen –
TRR 100 - Bauvorschriften Rohrleitungen aus metallischen Werkstoffen
Heymanns Verlag, Köln, 2001

- [9] M. Jung:
Die Anforderungen der TA Luft an Spindelabdichtungen und Flanschabdichtsysteme
Firma Gore: Enduser Training Program, München, 1997
- [10] DIN EN 10204:
Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen
Beuth Verlag, Berlin, 1995
- [11] M. Jung:
Behandlung von Kunststoffwerkstoffen nach Druckgeräterichtlinie
TÜV Süddeutschland Erfahrungsaustausch für die Herstellung und Errichtung von
Kunststoffrohrleitungen unter besonderer Berücksichtigung der Druckgeräterichtlinie.,
TÜV Süddeutschland, München, 2001
- [12] A. Bierl:
Untersuchung der Leckraten von Dichtungen in Flanschverbindungen
Dissertation Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1978
- [13] J. Bartonicek:
Beitrag zur Berechnung von Flanschverbindungen unter Innendruck-, Biegemoment-
und Temperaturbelastung
Dissertation Universität Stuttgart, Stuttgart, 1987
- [14] A. Gusko:
Charakterisierung von asbestfreien Flachdichtungen für die Auslegung von
Flanschverbindungen
Dissertation Universität Stuttgart, Stuttgart, 1999
- [15] VDI:
5 vor 12 für die Chemie, Störfallverordnung setzt Betreiber unter Druck
VDI nachrichten Nr. 20, Düsseldorf, 2000
- [16] VDI:
EU will Chemie in Europa sicherer machen
VDI nachrichten Nr. 22, Düsseldorf, 2000

- [17] Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales in Nordrhein-Westfalen:
Emissionskataster Köln
Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1972
- [18] A. Micheely:
Untersuchungen an Rohrleitungsflanschen bei Betriebsbedingungen unter besonderer
Berücksichtigung des Leckageverhaltens
Dissertation Universität Dortmund, Dortmund, 1977
- [19] W. Kämpkes:
Einflüsse der Dichtungsgeometrie auf die Gasleckage an Rohrleitungsflanschen mit It-
Flachdichtungen
Dissertation Universität Dortmund, Dortmund, 1982
- [20] H. J. Stephan:
Beitrag zur Beschreibung des Verhaltens von Flanschdichtungen auf der Grundlage
spezieller Untersuchungen asbestfreier Dichtungsmaterialien
Dissertation TH Köthen, Köthen, 1992
- [21] M. Römmler:
Beitrag zur mathematischen Modellierung und experimentellen Untersuchung des
Dichtvermögens asbestfreier Dichtungsmaterialien
Dissertation TH Köthen, Köthen, 1992
- [22] DIN 28090 Teile 1-3:
Statische Dichtungen für Flanschverbindungen
Teil 1: Dichtungskennwerte und Prüfverfahren
Teil 2: Spezielle Prüfverfahren zur Qualitätssicherung
Teil 3: Prüfverfahren zur Ermittlung der chemischen Beständigkeit
Beuth Verlag, Berlin, 1995

- [23] DIN 28091 Teile 1-4:
Technische Lieferbedingungen für Dichtungsplatten
Teil 1: Dichtungswerkstoffe. Allgemeine Festlegungen
Teil 2: Dichtungswerkstoffe auf Basis von Fasern (FA)
Teil 3: Dichtungswerkstoffe auf Basis von PTFE (TF)
Teil 4: Dichtungswerkstoffe auf Basis von expandiertem Graphit (GR)
Beuth Verlag, Berlin, 1995
- [24] DIN EN 1591 Teil 1-2:
Flansche und ihre Verbindungen – Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtungen
Teil 1: Berechnungsmethode
Teil 2: Dichtungskennwerte
Beuth Verlag, Berlin, 2001
- [25] J. Bartonicek, H. Kockelmann:
Kennwertdefinition und Prüfmethodik für Dichtungen von Flanschverbindungen
9. Int. Dichtungstagung , Dresden, 1990
- [26] J. Bartonicek, H. Kockelmann:
Zum Verhalten von asbestfreien Weichstoff-Flachdichtungen unter Stauch- und Standbeanspruchung
9. Int. Dichtungstagung , Dresden, 1990
- [27] R. Hahn, H. Kockelmann:
On the behaviour of graphite flat gaskets subjected to compressive and creep-relaxation loading
2nd International Symposium on Fluid Sealing, La Baule, France, 1990
- [28] W. Abt:
Asbestfreie Flachdichtungen: Derzeitiger Stand und Trends
cav, Stuttgart, 1991
- [29] A. Hirschvogel:
Dichtungsprüfung mit Warmlagerung im DIN-Flansch
cav, Stuttgart, 1991

- [30] M. Römmler, H. Stephan, W. Tietze:
Beitrag zur Untersuchung metallarmierter Graphitdichtungen
3R international, Essen, 1991
- [31] H. Kockelmann:
Methoden zur Ermittlung von Dichtungskennwerten als Grundlage für künftige Normung
18. Konstruktions-Symposium der DECHEMA, Frankfurt a.M., 1992
- [32] H. Kockelmann:
Prüftechnik und Kennwerte von Dichtungen für Flanschverbindungen
Tagung T-30-004-134-2 Haus der Technik, Essen, 1992
- [33] W. Tietze, S. Wilke:
Beitrag zur Beschreibung des Dichtverhaltens mit Hilfe von Kennwerten
3R international, Essen, 1992
- [34] A. Gusko, H. Kockelmann:
Dichtheitsuntersuchungen an Flanschverbindungen in Anlehnung an DIN E 28091
VIII Int. Dichtungskolloquium TH Köthen, Köthen, 1993
- [35] M. Römmler:
Prüfverfahren und Untersuchungen der Mediendurchlässigkeit von Flanschverbindungen
in Anlehnung an die DIN E 28090
IX. Int. Dichtungskolloquium FH Münster, Steinfurt, 1995
- [36] Y. Birembaut, H. Kockelmann:
Asbestos free materials for gaskets for bolted flanged connections. Synthesis report of
the Brite Euram Project BE 5191 focussing on gasket factors and associated gasket
testing procedures.
4th International Syposium on Fluid Sealing, Mandelieu La Napoule, Frankreich, 1996
- [37] H. Kockelmann:
Leckraten von Dichtungen für Flanschverbindungen: Einflußgrößen, Anforderungen,
meßtechnische Erfassung und leckratenbezogene Dichtungskennwerte .
Chemie Ingenieur Technik 68, Weinheim, 1996

- [38] J. Bartonicek und H. Kockelmann:
New ways in flange sealing methods
International Seal Forum atACHEMA 1997, Frankfurt, 1997
- [39] D. Bathen, C. Hummelt, J. Meisel:
Emissionen an Flanschverbindungen
Vulkan Verlag, Essen, 2000
- [40] D. Bathen, C. Hummelt, H. Schmidt-Traub:
Emissionen an Flanschverbindungen – Verfahren zur Berechnung und Abschätzung
XII. Int. Dichtungskolloquium FH-Münster, Steinfurt, 2001
- [41] D. Bathen, C. Hummelt:
Diffuse Emissionen an Flanschverbindungen: Einfluß der Flächenpressung
Chemie Ingenieur Technik 72, Weinheim, 2000
- [42] A. Riedl, W. Tietze (Hrsg.):
Taschenbuch Dichtungstechnik
Vulkan Verlag, Essen, 2001
- [43] DIN 52913:
Druckstandversuche an lt-Dichtungsplatten (neue Ausgabe erschien 2001)
Beuth Verlag, Berlin, 1988
- [44] ASTM F38:
Standard test methods for creep relaxation of a gasket material
Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [45] H. Kockelmann:
Comments on the present state of the standardization in Europe in the field of bolted
flange connections
ASME/JSME Joint pressure and piping conference, San Diego, 1998
- [46] J. Bartonicek, A. Kessler, M. Schaaf, M. Ulmer, A. Wiemer:
Voraussetzungen für die Absicherung der Funktion von Flanschverbindungen
25. MPA Seminar, Stuttgart, 1999

- [47] H. Kockelmann:
Kennwerte von Dichtungen für Flanschverbindungen
25. MPA Seminar, Stuttgart, 1999
- [48] DIN E 2505:
Teil 1: Berechnung von Flanschverbindungen – Berechnung
Teil 2: Berechnung von Flanschverbindungen – Dichtungskennwerte
Beuth Verlag, Berlin, 1990
- [49] H. Kockelmann:
Stand der Normung und der Regelwerke für Kennwerte von Flanschverbindungen und
Stopfbuchspackungen
Workshop Dichtverbindungen im Anlagenbau – MPA Stuttgart, Stuttgart, 1997
- [50] F. Hellerhoff, W. Tietze:
Ermittlung leckageabhängiger Kennwerte, Schlußbericht
FH-Münster, Steinfurt, 1998
- [51] prEN13555:
Flansche und ihre Verbindungen - Dichtungskennwerte und Prüfverfahren
Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [52] CEN-TC74-WG8 Work Item 00074031 (nicht veröffentlicht):
Quality Assurance of Gaskets in Accordance with the EN 1514 and EN 12560 Series of
CEN Standards
CEN, Brüssel, 2001
- [53] M. Römmler:
Prüfverfahren zur Untersuchung der Mediendurchlässigkeit von Flanschverbindungen
mit Weichstoffdichtungsmaterialien in Anlehnung an die DIN E 28090 (1993)
IX. Int. Dichtungskolloquium FH-Münster, Steinfurt, 1995
- [54] M. Römmler:
Dampftest mit asbestfreien Dichtungswerkstoffen in DIN-Flanschen bei erhöhten
Temperaturen in Anlehnung an die DIN-28090-3 (1995)
22. MPA-Seminar, Stuttgart, 1996

- [55] European Sealing Association (ESA):
Round Robin Test (unveröffentlicht)
ESA, Lancaster UK, 2001
- [56] M. Becker, A. Riedl, W. Tietze:
Beitrag zur Verbesserung der Prüfmethodik zur Ermittlung der maximal zulässigen
Flächenpressung sowie des Ersatz-Elastizitätsmoduls bei Flachdichtungen
XII. Int. Dichtungskolloquium FH-Münster, Steinfurt, 2001
- [57] M. Merkel, K. Thomas:
Taschenbuch der Werkstoffe
Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1994
- [58] M. Becker, A. Riedl, W. Tietze:
Beitrag zur Ermittlung des Kriech-Relaxationsverhaltens von Flachdichtungen mit Hilfe
der multiplen Regressionsanalyse
XII. Int. Dichtungskolloquium FH-Münster, Steinfurt, 2001
- [59] Fa. Leybold:
Produktkatalog Fa. Leybold für Gerätetyp UL200
Fa. Leybold, Köln, 2001
- [60] DIN EN 1779:
Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden
und -verfahren
Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [61] D. Bathen, C. Hummelt, J. Meisel H. Schmidt-Traub:
Emissionen an Flanschverbindungen – Messverfahren und experimentelle Ergebnisse
XII. Int. Dichtungskolloquium FH-Münster, Steinfurt, 2001
- [62] R. Körner:
Entwicklung einer Prüfeinrichtung zur Ermittlung von Schadstoffemissionen
Diplomarbeit FH-Münster, Steinfurt, 1999

- [63] DIN 53752:
Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des thermischen
Längenausdehnungskoeffizienten
Beuth Verlag, Berlin, 1980
- [64] W. Kohlpaintner, K.J. Metzner, M. Schaaf:
Berechnung von Flanschverbindungen
25. MPA Seminar, Stuttgart, 1999
- [65] KTA 3201.2:
Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 2: Auslegung,
Konstruktion und Berechnung
Carl Heymanns Verlag, Köln, 1996
- [66] KTA 3211.2:
Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des
Primärkreises; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung
Carl Heymanns Verlag, Köln, 1992
- [67] ASME Boiler and Vessel Code:
Sect. VIII, Div. 1, App. 2, 1986; Sect. VIII, Div. 2, App. 3
Beuth Verlag, Berlin, 1986 / 1989
- [68] TGL 32903/13:
Behälter und Apparate. Festigkeitsberechnung Flanschverbindungen
Ausgabe 1983
- [69] J. Wölfel:
Berechnung von Flanschverbindungen auf der Basis von prEN 1591
3R international - Heft 34, Essen, 1995
- [70] W. Hellerhoff, A. Riedl, W. Tietze:
Rechnergestützte Auslegung von Flanschverbindungen an die prEN 1591
3R international , Essen, 1998

- [71] F. Kemter, J. Sailer, E. Sedime, M. Trobitz:
Nachweis von Flanschverbindungen in Rohrleitungssystemen. Gegenüberstellung der
Ergebnisse aus unterschiedlichen Berechnungsverfahren.
25. MPA Seminar, Stuttgart, 1999
- [72] VDI 2230:
Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen
Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [73] A.F. Waterland:
Insuring desired emissions performance of gasket materials
ASME PVP-Vol. 225 Book No. H00814, 1993
- [74] H. Domininghaus:
Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften
Springer Verlag – VDI Buch, Hamburg, 1999
- [75] Firma W.L. Gore GmbH:
Interner Versuchsbericht der Firma Gore
W.L. Gore & Associates GmbH, München, 2000
- [76] J. Kästner, M. Kästner:
Beitrag zur Beschreibung des Abdichtverhaltens von Flachdichtungen unter Beachtung
einer forcierten Versuchsdurchführung und der Übertragbarkeit auf andere
Einsatzbedingungen.
Dissertation IH Köthen, Köthen, 1984
- [77] DIN E 2873:
Flansch-Rohre aus Stahl und Flansch-Formstücke aus Stahl mit Emaillierung – PN 10
und PN 25
Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [78] J. Lukavský:
Leckage und Verformungsuntersuchungen an Weichstoff- und Kombinationsdichtungen
– eine ausreichende Unterlage für Flanschverbindungen?
XII. Int. Dichtungskolloquium FH-Münster, Steinfurt, 2001

- [79] J. Bartonicek, H. Kockelmann, M. Schaaf, F. Schöckle:
Regelwerke für Flanschdichtungen mit der Dichtung im Krafthaupt- und
Kraftnebenschluß
XII. Int. Dichtungskolloquium FH-Münster, Steinfurt, 2001
- [80] W. Tietze (Hrsg.):
Handbuch Dichtungspraxis
Vulkan Verlag, 2. Auflage Essen, 2000
- [81] K. Borchers:
Flachdichtungen in Chemieanlagen
Vulkan-Verlag, Dichtungstechnik Heft 1, Essen, 2001
- [82] H.J. Andreß:
Skript: Statistik I, Statistik II und Methoden für Sozialwissenschaftler
Uni-Bielefeld, Bielefeld, 1999
- [83] R. Bender, S. Lange:
Median oder Mittelwert?
Thieme Verlag, Deutsche medizinische Wochenzeitschrift, Stuttgart, 2001
- [84] R. Bender, S. Lange:
Quantile, empirische Verteilungsfunktion und Box Plot
Thieme Verlag, Deutsche medizinische Wochenzeitschrift, Stuttgart, 2001
- [85] M. Lanzerath:
Statistik bei Gore (unveröffentlicht)
W.L. Gore & Associates GmbH, Putzbrunn/München, 1999
- [86] TRB 610:
Druckbehälterverordnung: Druckbehälter; Aufstellung von Druckbehältern zum Lagern
von Gasen
Heymanns Verlag, Köln, 1995
- [87] DIN 2691:
Flachdichtungen für Flansche mit Feder und Nut; Nenndruck 10 bis 160
Beuth Verlag, Berlin, 1971

- [88] Firma Frank:
Produktprospekt mit Drehmomentangabe für Kunststoffflansche
Firma Frank GmbH, Mörfelden-Walldorf, 2000
- [89] R. Bock:
Vergleichende experimentelle Untersuchungen von Dichtungen für emaillierte
Rohrleitungen, basierend auf einer Marktforschung und dargestellt als "Technische
Information" für den Vertrieb
Diplomarbeit FH-München, München, 2000
- [90] M. Becker, S. Hofmann, A. Riedl, W. Tietze:
Ausblässicherheit von Flachdichtungen im Krafthauptschluß
VDI-Tagung „Sicher Abdichten“, Baden-Baden, 2000
- [91] W. Kleppmann:
Taschenbuch Versuchsplanung
Hanser Verlag, München, 1998
- [92] S. Chatterjee, B. Price:
Regression Analysis by Example
Wiley Verlag, New York, USA, 1991
- [93] F.J. Anscombe:
Graphs in statistical analysis
American Stat. Nr. 27, USA, 1973
- [94] H.J. Tückmantel:
Die Berechnung statischer Dichtverbindungen unter Berücksichtigung der maximal
zulässigen Leckmenge auf der Basis einer neuen Dichtungstheorie
Konstruktion Nr. 40, 1988
- [95] A. Riedl:
Einführung der DIN 28090 und der DIN 28091 für Dichtungsplatten mittels
Modifikationen an bestehenden Prüfanlagen sowie durch Inbetriebnahme einer
Druckprüfmaschine
Diplomarbeit FH-München, München, 1997

- [96] MPA-Stuttgart:
Unveröffentlichter Versuchsbericht der MPA-Stuttgart für ePTFE Dichtungen
MPA-Stuttgart, Stuttgart, 1995
- [97] European Sealing Association (ESA):
Guidelines for safe seal usage – Flanges and Gaskets –
ESA, Lancaster, UK, 1998
- [98] VDI-Richtlinie 2200:
Ausschuß: Dichte Flanschverbindung (liegt noch nicht als Gründruck vor).
- [99] TÜV Bayern Sachsen:
Prüfgrundsätze für den Eignungsnachweis von Spindelabdichtungen in Armaturen als
gleichwertig nach TA-Luft.
TÜV Bayern Sachsen, München, 1992
- [100] DIN 2631 bis DIN 2635:
Vorschweißflansche Nenndruck 6 bis Nenndruck 40
Beuth Verlag, Berlin, 1975
- [101] prEN 1092-1:
Flansche und ihre Verbindungen - Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke
und Zubehörteile - Teil 1: Stahlflansche, nach PN bezeichnet
Beuth Verlag, Berlin, 1994
- [102] A. Riedl:
Software zur optimierten Auslegung von Dichtsystemen (auf Anfrage erhältlich)
W.L. Gore GmbH, Putzbrunn/München, 2001

Verzeichnis der im Text verwendeten Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
C	kN/mm	Steifigkeit des Dichtsystems
E	MPa	Elastizitätsmodul allgemein
E_D	MPa	Ersatz-Elastizitätsmodul nach DIN 28090
$E_{D/T}$	MPa	Ersatz-Elastizitätsmodul bei erhöhten Temperaturen
E_0	MPa	y-Achsenabschnitt des Ersatz-E- Moduls nach prEN13555
F_S	N	Schraubenkraft allgemein
F_{Smax}	N	maximal zulässige Schraubenkraft
K_1	-	Steigung des Ersatz-E- Moduls nach prEN13555
L	mg/(s·m) mbar·l/(s·m)	Leckage- oder Dichtheitsklasse
M	g/mol	Molmasse
M_{tmin}	Nm	Minimal notwendiges Drehmoment beim Einbau
M_{topt}	Nm	Drehmoment um Q_{Aopt} zu erreichen
Q_A	MPa	Einbauflächenpressung allgemein
$Q_{Amin/L}$	MPa	Minimal zulässige Flächenpressung für L
Q_{Aopt}	MPa	Einbauflächenpressung (optimiert)
Q_{krit}	MPa	Flächenpressung, bei der eine mechanische Schädigung der Dichtung auftritt, nach prEN13555
Q_{MAX}	MPa	Maximal zulässige Flächenpressung im Einbau (bzw. bei Raumtemperatur) nach prEN 13555
$Q_{MIN(L)}$	MPa	Mindestflächenpressung im Einbauzustand nach prEN 13555
Q_R	MPa	Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxation
Q_{SMAX}	MPa	Maximal zulässige Flächenpressung im Betrieb nach prEN 13555
$Q_{SMIN(L)}$	MPa	Mindestflächenpressung im Betriebszustand nach prEN 13555
R	J/(mol·K)	allgemeine Gaskonstante (= 8,314)
R^2	-	Korrelationskoeffizient
R_Z	µm	Rauhigkeit der Dichtflächen
T	K	Temperatur
T_M	K	Temperatur des Meßraums
T_N	K	Normaltemperatur (293,15 K)
T_U	K	Umgebungstemperatur
V_{Leck}	cm ³	Leckagevolumen

V_M	cm ³	Innenvolumen des Meßraums
b_D	mm	Dichtungsbreite
b_{Dmax}	mm	maximale zur Abdichtung beitragende Dichtungsbreite
d_a	mm	Außendurchmesser der Dichtung
d_i	mm	Innendurchmesser der Dichtung
$d_{Kap,0}$	m	Kapillardurchmesser der Dichtung im unverpreßten Zustand
g_c	-	Kriech-Relaxationsfaktor nach prEN13555
h_D	mm	Dichtungshöhe
h_{D0}	mm	Ausgangshöhe der Dichtung
$h_{D(20^{\circ}C)}$	mm	Dichtungshöhe bei Q_{Aopt}
$h_D(\vartheta)$	mm	Dichtungshöhe bei Betriebstemperatur
l	m	Länge der Kapillaren
\dot{m}	kg/s	Leckagestrom
n	-	Anzahl der Kapillaren; Stichprobenumfang; Laufvariable
p_i	MPa	Innendruck
p_a	MPa	Außendruck
p_M	MPa	Innendruck im Meßraum
p_N	MPa	Normaldruck (=1,013 bar)
p_U	MPa	Umgebungsdruck
q	%	q-% Quantil
r	m	Radius bzw. Leckkanalradius
t	s	Zeit
y_i		Gemessene Zielgröße eines empirischen Modells
\hat{y}_i		Errechnete Zielgröße eines empirischen Modells
Δh_D	mm	Setzbetrag einer Dichtung mit Flanschsteifigkeit nach DIN28090
Δp	bar	Differenzdruck
Δt	s	Zeitdifferenz
ϑ	°C	Temperatur
ψ	-	Adzumi-Konstante (Reinstoffe = 0,9; Mischungen = 0,66)
α	-	empirische Konstante (allgemein)
α_e	-	empirische Konstante (exponentielle Abhängigkeit)
α_p	-	empirische Konstante (potentielle Abhängigkeit)
α_G	K ⁻¹	Ausdehnungskoeffizient der Dichtung nach prEN13555
β	-	empirische Konstante (allgemein), Regressionskoeffizient

β_e	-	empirische Konstante (exponentielle Abhängigkeit)
β_p	-	empirische Konstante (potentielle Abhängigkeit)
β_{max}	-	größte empirische Konstante einer Regressionsgleichung
ε_{KRW}	-	Kaltrückfederungswert nach DIN 28090
ε_{KSW}	-	Kaltsetzwert nach DIN 28090
$\varepsilon_{WRW/T}$	-	Warmrückfederungswert nach DIN 28090
$\varepsilon_{WSW/T}$	-	Warmsetzwert nach DIN 28090
ε_{hD}	-	Dimensionsloser Kennwert zur Beschreibung der Dickenänderung einer Dichtung im Betriebspunkt
ε_λ	-	Dimensionsloser Kennwert zur Beschreibung der Leckageänderung einer Dichtung im Betriebspunkt
ε_σ	-	Dimensionsloser Kennwert zur Beschreibung der Flächenpressungsänderung einer Dichtung im Betriebspunkt
η	Pa·s	dynamische Viskosität
λ_A	mg/(s·m)	Leckage nach der Montage
λ_R	mg/(s·m)	Leckage im Betrieb
λ_{zul}	mg/(s·m)	zulässige Leckage
λ'	mg/(s·m)	Leckage, ausgehend vom Arbeitspunkt eines Dichtsystems
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	g/cm ³	Dichte
σ	MPa	Flächenpressung allgemein
σ'	MPa	Flächenpressungsänderung ausgehend von σ_{AP}
σ_{AP}	MPa	Flächenpressung im Arbeitspunkt eines Dichtsystems
$\sigma_{BO/T}$	MPa	Maximal zulässige Flächenpressung im Betrieb nach DIN 28090
$\sigma_{BU/L}$	MPa	Mindestflächenpressung im Betriebszustand nach DIN 28090
σ_{VO}	MPa	Höchstflächenpressung im Einbauzustand nach DIN 28090
$\sigma_{VU/L}$	MPa	Mindestflächenpressung im Einbauzustand nach DIN 28090

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Darstellung des y-Achsenabschnitts und der Steigung der Leakagefunktion	8
Bild 2	Versuchsablauf zur Bestimmung des Leakageverhaltens nach DIN 28090	14
Bild 3	Versuchsablauf zur Bestimmung des Leakageverhaltens nach prEN13555 (Anlehnung)	14
Bild 4	Versuchsablauf zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Flanschdichtungen	16
Bild 5	Versuchsablauf zur Bestimmung des Kriech-Relaxationsverhaltens nach DIN 52913	16
Bild 6	Box-und-Whisker-Plot für die maximal zulässige Temperatur von Flanschdichtungen	40
Bild 7	Vergleich von Median und arithmetischem Mittelwert einer Zahlenreihe	41
Bild 8	Darstellung der Transformation zur normierten Darstellung der Einflußgrößen	66
Bild 9	Darstellung der normierten Einflußgrößen nach Gleichung (42) für ePTFE	68
Bild 10	Versuchsablauf zur Bestimmung von Q_{MAX}	74
Bild 11	Diagramm zur Bestimmung von Q_{MAX} und Q_{SMAX}	76
Bild 12	Darstellung der Verformungsfunktion bei Raumtemperatur	78
Bild 13	Vergleich der Verformungsfunktionen bei Raumtemperatur	79
Bild 14	Versuchsablauf zur Bestimmung von Q_{SMAX}	83
Bild 15	Diagramm zur Bestimmung von Q_{SMAX}	84
Bild 16	Darstellung der Verformungsfunktion für die Betriebstemperatur	85
Bild 17	Vergleich der Verformungsfunktionen bei Betriebstemperatur bis (Q_{SMAX})	87
Bild 18	Gegenüberstellung der Verformung unter betrieblicher Belastung	89
Bild 19	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p	90
Bild 20	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung der Verformungsfunktion β_p	92
Bild 21	Effekte der Einflußgrößen auf Q_{SMAX} (und Q_{MAX})	94
Bild 22	Versuchsablauf zur Bestimmung der Kriech-Relaxation	98
Bild 23	Vergleich der Funktionsverläufe und der Modellwerte zur Kriech-Relaxation	100
Bild 24	Effekte der Einflußgrößen auf die Restflächenpressung Q_R von ePTFE	102
Bild 25	Versuchsablauf zur Bestimmung des Leakageverhaltens	109
Bild 26	Darstellung der konstanten Steigung bei der Belastung	111
Bild 27	Verschiebung des Koordinatenursprungs in den Arbeitspunkt (Exponentialfunktion)	112
Bild 28	Vergleich der gemessenen Funktionsverläufe mit den Modellwerten der Leakage	115

Bild 29	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e bei der Belastung	116
Bild 30	Darstellung der Entlastungsfunktion bei unterschiedlicher Anfangsflächen- pressung Q_A	119
Bild 31	Bestimmung der geringsten Flächenpressung für $Q_{Amin/L}$ bei bekanntem λ_{min}	120
Bild 32	Vergleich der gemessenen Funktionsverläufe mit den Modellwerten der Leckage bei Entlastung	122
Bild 33	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e bei der Entlastung	123
Bild 34	Eingabefenster für die Schraubendaten und die Temperatur	127
Bild 35	Eingabefenster der Dichtungsdaten	128
Bild 36	Eingabefenster der zusätzlich benötigten Berechnungswerte	129
Bild 37	Ausgabefenster der Berechnungswerte	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Leckagebeschreibung für einen Autoreifen	18
Tabelle 2	Linearisierbare Funktionen und deren Linearisierung	58
Tabelle 3	Vergleich der F-Werte vor und nach der Rückwärts-Selektion	62
Tabelle 4	Gegenüberstellung der Wertebereiche nicht normierte – normierte Einflußgröße	65
Tabelle 5	Gegenüberstellung der Funktionskonstanten für die Dichtungen nach Bild 17	88
Tabelle 6	Gegenüberstellung des Langzeitverhaltens bezüglich der Kriech-Relaxation	101

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	Dichtungskennwerte in deutschen Regelwerken und Normen	159
Anhang 2	Dichtungskennwerte nach DIN 28090, EN 1591 und ASME / PVRC	159
Anhang 3	Dichtungskennwerte nach EN 1591 und Prüfverfahren	160
Anhang 4	Dichtungskennwerte nach DIN 28090 zur Qualitätssicherung	160
Anhang 5	Schreiben des Chairmans des CEN - TC 74	161
Anhang 6	Unterscheidung Kriechen, Relaxation und Kriech-Relaxation	163
Anhang 7	Leckageversuch an ePTFE nach 150 °C Temperaturbelastung im Vergleich zur Leckage nach dem Einbau bei Raumtemperatur	164
Anhang 8.1	Fragebogen zur Bestimmung des Dichtungstyps, des zulässigen Innendrucks und der zulässigen Betriebstemperatur von Flanschdichtungen aus Weichstoffen. – Stahlflansche –	165
Anhang 8.2	Fragebogen zur Bestimmung des Dichtungstyps, des zulässigen Innendrucks und der zulässigen Betriebstemperatur von Flanschdichtungen aus Weichstoffen. – Kunststoffflansche –	166
Anhang 8.3	Fragebogen zur Bestimmung des Dichtungstyps, des zulässigen Innendrucks und der zulässigen Betriebstemperatur von Flanschdichtungen aus Weichstoffen. – Emailflansche –	167
Anhang 9	Maximal zulässiger Innendruck bei Raumtemperatur für Flanschdichtungen an Stahlflanschen	168
Anhang 10	Maximal zulässiger Innendruck bei Maximaltemperatur für Flanschdichtungen an Stahlflanschen	169
Anhang 11	Maximal zulässige Temperatur für Flanschdichtungen an Stahlflanschen	170
Anhang 12	Maximal zulässiger Innendruck bei Raumtemperatur für Flanschdichtungen an Kunststoffflanschen	171
Anhang 13	Maximal zulässiger Innendruck bei Maximaltemperatur für Flanschdichtungen an Kunststoffflanschen	172
Anhang 14	Maximal zulässige Temperatur für Flanschdichtungen an Kunststoffflanschen	173
Anhang 15	Maximal zulässiger Innendruck bei Raumtemperatur für Flanschdichtungen an Emailflanschen	174
Anhang 16	Maximal zulässiger Innendruck bei Maximaltemperatur für Flanschdichtungen an Emailflanschen	175
Anhang 17	Maximal zulässige Temperatur für Flanschdichtungen an Emailflanschen	176

Anhang 18	Maximale Flächenpressung für Flansche mit Nut und Feder, Nenndruck 40 bar, mit Dichtungen nach DIN 2691 und Schrauben der Qualität 5.6	177
Anhang 19	Prinzipskizze der Druckabfallmethode zur Leckagemessung	178
Anhang 20	Prinzipskizze der Differenzdruckmethode zur Leckagemessung	179
Anhang 21	Verwendeter Prüfstand für die Leckagemessung	180
Anhang 22	Prinzipskizze der Druckauffangmethode zur Leckagemessung	181
Anhang 23	Verwendeter Prüfstand für die Verformungsmessungen	182
Anhang 24.1	Datenmengen mit gleichen R^2 -Werten	183
Anhang 24.2	Datenmengen mit gleichen R^2 -Werten	184
Anhang 25.1	Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für Verformungsversuche; – ePTFE –	185
Anhang 25.2	Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für Verformungsversuche; – PTFE –	186
Anhang 25.3	Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für Verformungsversuche; – Graphit –	187
Anhang 25.4	Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für Verformungsversuche; – Faser –	188
Anhang 26.1	Kennfunktionen der Verformung bei Raumtemperatur und Betriebstemperatur; – Dickenkoeffizient α_p –	189
Anhang 26.2	Kennfunktionen der Verformung bei Raumtemperatur und Betriebstemperatur; – Steigung β_p –	190
Anhang 26.3	Kennfunktionen der Verformung bei Raumtemperatur und Betriebstemperatur; – maximale Flächenpressung –	190
Anhang 27.1	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von ePTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	191
Anhang 27.2	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von ePTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	191
Anhang 27.3	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte –	192
Anhang 27.4	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	192
Anhang 27.5	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte –	193
Anhang 27.6	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	193

Anhang 27.7	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von Graphit; – Haupteffekte –	194
Anhang 27.8	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von Graphit; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	194
Anhang 27.9	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Graphit; – Haupteffekte –	195
Anhang 27.10	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Graphit; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	195
Anhang 27.11	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte –	196
Anhang 27.12	Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	196
Anhang 27.13	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte –	197
Anhang 27.14	Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	197
Anhang 28	Effekte der Einflußgrößen auf Q_{MAX} und Q_{SMAX} Faser; – Haupteffekte –	198
Anhang 29.1	Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – ePTFE –	199
Anhang 29.2	Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – PTFE –	200
Anhang 29.3	Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – Graphit –	201
Anhang 29.4	Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – Faser –	202
Anhang 30	Einflußgrößen und Ergebnisse der Prüfstandvalidierung mit Angabe der Meßunsicherheit für die Kriech-Relaxationsversuche	203
Anhang 31	Kennfunktionen für die Berechnung der Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxation Q_R .	204
Anhang 32.1	Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von ePTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	205
Anhang 32.2	Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von PTFE; – Haupteffekte –	206
Anhang 32.3	Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von PTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	206

Anhang 32.4	Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von Faser; – Haupteffekte –	207
Anhang 32.5	Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von Faser; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –	207
Anhang 33.1	Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen für das Leckageverhalten inkl. der Versuchsergebnisse, die außerhalb des Meßbereichs des verwendeten Prüfstands lagen – ePTFE –	208
Anhang 33.2	Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen für das Leckageverhalten inkl. der Versuchsergebnisse, die außerhalb des Meßbereichs des verwendeten Prüfstands lagen – Graphit –	209
Anhang 34	Kennfunktionen und Konstanten der Leckagefunktion	210
Anhang 34.1	Steigung β für ePTFE und Graphit; – Belastung –	210
Anhang 34.2	Steigung β für ePTFE und Graphit; – Entlastung –	210
Anhang 34.3	Kennfunktion für den Leckagekoeffizienten α ; – Belastung –	210
Anhang 34.4	Kennfunktion für den Leckagekoeffizienten α ; – Entlastung –	210
Anhang 35.1	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e der Leckagefunktion von ePTFE; – Belastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –	211
Anhang 35.2	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e der Leckagefunktion von ePTFE; – Entlastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –	211
Anhang 35.3	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Belastung; Haupteffekte –	212
Anhang 35.4	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Belastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –	212
Anhang 35.5	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Entlastung; Haupteffekte –	213
Anhang 35.6	Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Entlastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –	213

Anhang 1: Dichtungskennwerte in deutschen Regelwerken und Normen

AD-Merkblatt B7 1977	DIN V 2505 1964	DIN E 2505 1986/1990	DIN 28090-1 1995	Beziehung Anmerkung
$k_0 K_D$	$k_0 K_D$	σ_{VU}	$\sigma_{VU/L}$	$\sigma_{VU} = k_0 K_D / b_D$ ¹⁾
k_1	k_1	σ_{BU}	$\sigma_{BU/L}$	$m = k_1 / b_D$ ²⁾
	V	σ_{VO}	σ_{VO}	$\sigma_{VO} = V k_0 K_D / b_D$ ³⁾
$k_0 K_{D,g}$	$k_2 K_{D,g}$	σ_{BO}	σ_{BO}	$\sigma_{BO} = k_2 K_{D,g} / b_D$ ³⁾
	E_D	E_D	E_D / σ	
		$- / \Delta V$	Δh_D	$\Delta h_D = \Delta V$

- 1) Dichtheitsklasse etwa 1 bis 10 mg/(s·m); für andere Dichtheitsklassen nicht anwendbar
- 2) $\sigma_{BU/L}$ nicht bestimmbar
- 3) Für V , k_0 , k_2 , K_D und $K_{D,g}$ liegen keine Versuchswerte vor; deshalb nicht anwendbar

Anhang 2: Dichtungskennwerte nach DIN 28090, EN 1591 und ASME / PVRC

DIN 28090 1995-09	prEN 1591 1996-04	ASME / ASTM (PVRC)	Beziehung Anmerkung
$\sigma_{VU/L}$	$Q_{min/L} = \sigma_{VU/L}$	G_b, G_s	$Q_{min/L} = G_b (T_{p min})^a$ $T_{p min} = 1.8275 c (p / p^*)$ $P^* = 0.101 \text{ MPa}, c = 0.1, 1, 10, 100, 1000$
$\sigma_{BU/L}$ m_L	$(Q_{Smin/L} = \sigma_{BU/L})$	a	$m_{alt} = (G_s / p) (T_{p min})^{(a \log(Q_0 / G_s)) / (\log(Q_0 / G_b))}$
σ_{VO}	$Q_{max} = \sigma_{VO}$	-	
σ_{BO}	$Q_{Smax} = \sigma_{BO}$	-	
E_D	$E_G = E_0 + K_1 Q$ $E_G = E_D$	-	
Δh_D	g_c $= 1 / (1 + \text{const. } \Delta h_D)$	-	

Anhang 3: Dichtungskennwerte nach EN 1591 und Prüfverfahren

Formelzeichen	Dichtungskennwert	Prüfverfahren
$Q_{min(L)}$	Minstdichtungsfächenpressung im Einbauzustand für geforderte Dichtheitsklasse L	Leckageversuch
$Q_{Smin(L)}$	Minstdichtungsfächenpressung im Betriebszustand für geforderte Dichtheitsklasse L	Leckageversuch
Q_{max}	Höchstdichtungsfächenpressung	Stauch-/ Kurzzeitstandversuch
g_c	Kriechfaktor	Kriech-Relaxations-Versuch
$E_G = E_0 + K_1 Q$	Ersatzelastizitätsmodul (Rückfederung bei Entlastung)	Stauchversuch
α_G	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	Thermischer Ausdehnungsversuch

Anhang 4: Dichtungskennwerte nach DIN 28090 zur Qualitätssicherung

Formelzeichen	Dichtungskennwert	Prüfverfahren
ε_{KRW}	Kaltrückfederungswert	Druckstandversuch
ε_{KSW}	Kaltsetzwert	Druckstandversuch
ε_{WRWT}	Warmrückfederungswert	Druckstandversuch
ε_{WSWT}	Warmsetzwert	Druckstandversuch

Anhang 5: Schreiben des Chairmans des CEN - TC 74

DR.-ING. HANS KOCKELMANN

STAATLICHE MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
UNIVERSITÄT STUTTGART

Stuttgart, den 17. September 2001

Herrn
Dipl.-Ing. Alexander Riedl
W.L. Gore & Assoc. GmbH
Wernher-von-Braun-Str. 18

D-85640 Putzbrunn

Betr.: CEN TC 74 WG8

Sehr geehrter Herr Riedl,

in meiner Rolle als Chairman des Technical Committee 74 (Flanges and their Joints) habe ich mit großem Interesse die Entwicklungen in der Working Group 8 (Gaskets) verfolgt, in der Sie als nationaler Vertreter der BRD mitwirken. Die Erarbeitung der Dichtungsnormen (EN 1514 und EN 12560) und der Dichtungsprüfnorm EN 13555 ist von zentraler Bedeutung für die Thematik "Auslegung von Flanschverbindungen" in der Europäischen Normung.

Bei der Erarbeitung der Dichtungsprüfnorm EN 13555 wurde zunächst die deutsche Norm DIN 28090 als Basis herangezogen. Bekannte Unzulänglichkeiten dieser Norm und Abstimmungsprobleme zwischen den in CEN vertretenen Europäischen Nationen haben in der Folge zu einer Phase der Konfusion geführt, die den Fortschritt bei der Erarbeitung der Prüfnorm behinderten. Ein Durchbruch konnte nur durch die Schaffung von Fakten auf Basis experimenteller Untersuchungen erfolgen.

Dies ist erfreulicherweise in der jüngeren Zeit gelungen. Dabei hatten die Ergebnisse Ihrer experimentellen Untersuchungen an Produkten Ihres Hauses W.L. Gore GmbH und an anderen Dichtungsarten (Graphit), durchgeführt an der Fachhochschule Münster, zweifelsfrei einen entscheidenden Anteil. Der von Ihnen vorgeschlagene zyklische Stauchversuch zur Ermittlung der maximal zulässigen Pressung und der Verformungscharakteristik ist im Rahmen eines Europäischen Forschungsvorhabens bestätigt worden und nunmehr von CEN TC 74 WG8 akzeptiert.

Auch die von Ihnen vorgestellten Untersuchungen zum Kriechfaktor von Dichtungen haben erfreulicherweise zur Klärung und Akzeptanz geführt.

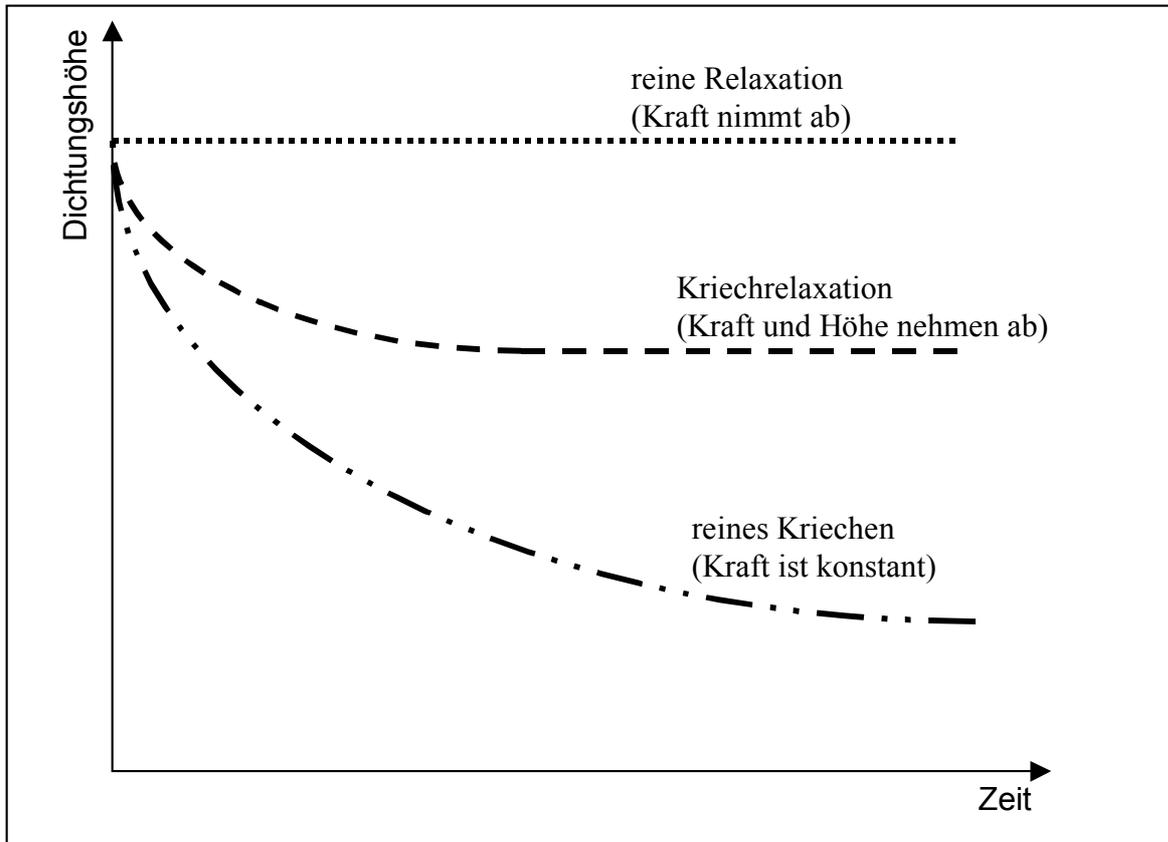
Als Chairman von CEN TC 74 und als Verantwortlicher für den Fortschritt bei der Bearbeitung der definierten Work Items möchte ich Ihnen meinen Dank für Ihre konstruktiven Beiträge in der WG8 aussprechen. Dieser Dank gilt natürlich auch Ihrem Unternehmen, der W.L. Gore GmbH, das Ihnen die Mitwirkung in der WG8 ermöglicht.

Ich hoffe, daß Sie auch künftig Ihre Kenntnisse und Erfahrungen bei der Bearbeitung weiterer Themen der WG8 einbringen werden.

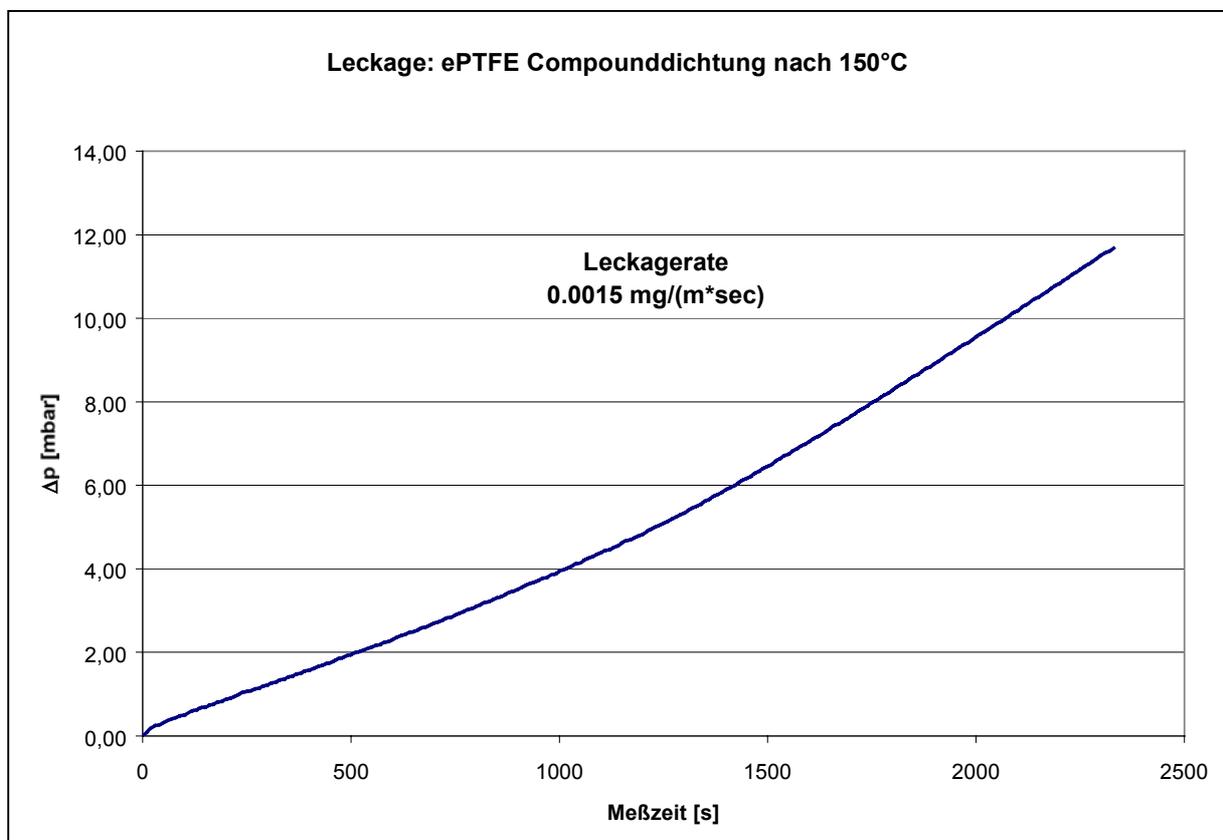
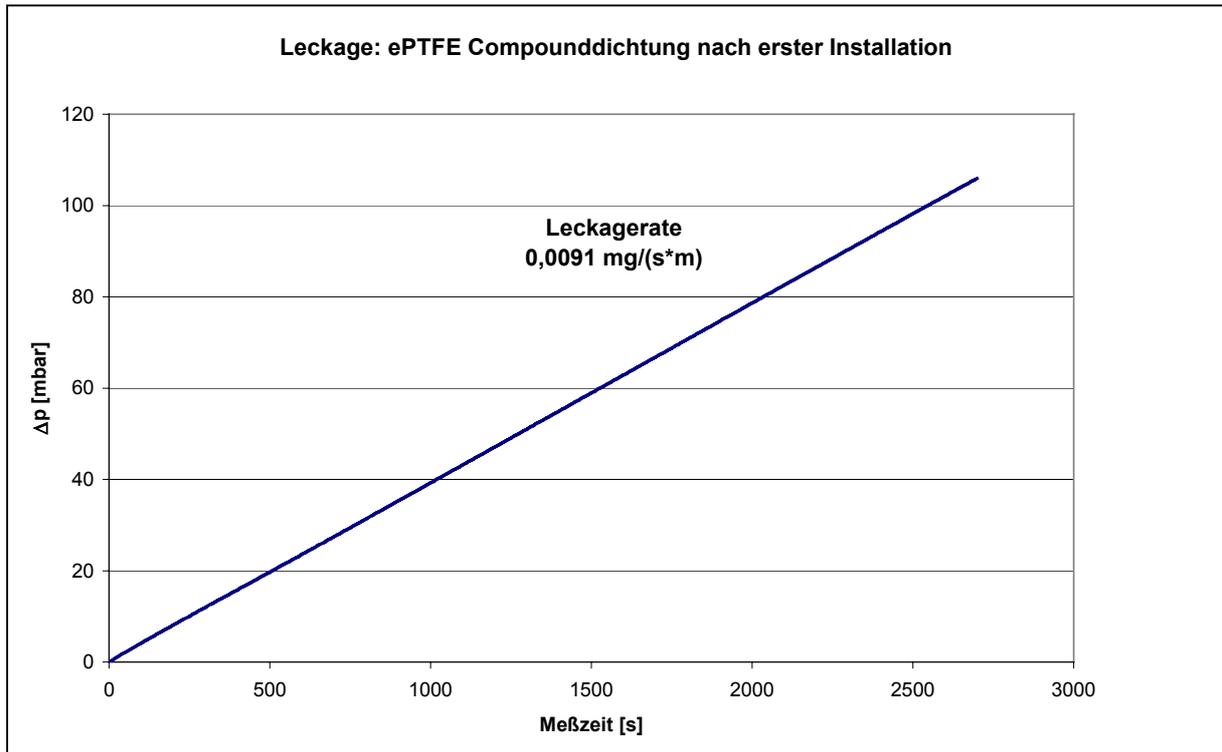
Mit freundlichen Grüßen
MPA STUTTGART



Anhang 6: Unterscheidung Kriechen, Relaxation und Kriech-Relaxation



Anhang 7: Leckageversuch an ePTFE nach 150 °C Temperaturbelastung im Vergleich zur Leckage nach dem Einbau bei Raumtemperatur



Anhang 8.1: Fragebogen zur Bestimmung des Dichtungstyps, des zulässigen Innendrucks und der zulässigen Betriebstemperatur von Flanschdichtungen aus Weichstoffen. – Stahlflansche –

1. Stahlflansche

- A Dichtungen auf Basis von Graphit, z.B. Sigraflex Universal
- B Dichtungen auf Basis von Fasern, z.B. Novatec Premium
- C Dichtungen auf Basis von reinem PTFE, z.B. TFM 1600
- D. Dichtungen auf Basis von gefülltem PTFE, z.B. Gylon Standard
- E Dichtungen auf Basis von expandiertem PTFE, z.B. Gore Tex GR style R
- F Andere.....(bitte eintragen)

Art	Maximaler Innendruck bei Raumtemperatur [bar]	Maximaltemperatur [°C]	Maximaler Innendruck bei Maximaltemperatur [bar]	Bemerkung
A				
B				
C				
D				
E				
F				

Anhang 8.2: Fragebogen zur Bestimmung des Dichtungstyps, des zulässigen Innendrucks und der zulässigen Betriebstemperatur von Flanschdichtungen aus Weichstoffen. – Kunststoffflansche –

2. Kunststoffflansche, z.B. aus PP, PE oder GFK

- A Dichtungen auf Basis von Elastomeren, z.B. aus EPDM oder Viton
- B Hüllringdichtungen mit Elastomereinlage
- C Dichtungen auf Basis von reinem PTFE, z.B. TFM 1600
- D Dichtungen auf Basis von gefülltem PTFE, z.B. Gylon Blau
- E Dichtungen auf Basis von expandiertem PTFE, z.B. Gore Tex GR style R
- F Andere.....(bitte eintragen)

Art	Maximaler Innendruck bei Raumtemperatur [bar]	Maximaltemperatur [°C]	Maximaler Innendruck bei Maximaltemperatur [bar]	Bemerkung
A				
B				
C				
D				
E				
F				

Anhang 8.3: Fragebogen zur Bestimmung des Dichtungstyps, des zulässigen Innendrucks und der zulässigen Betriebstemperatur von Flanschdichtungen aus Weichstoffen. – Emailflansche –

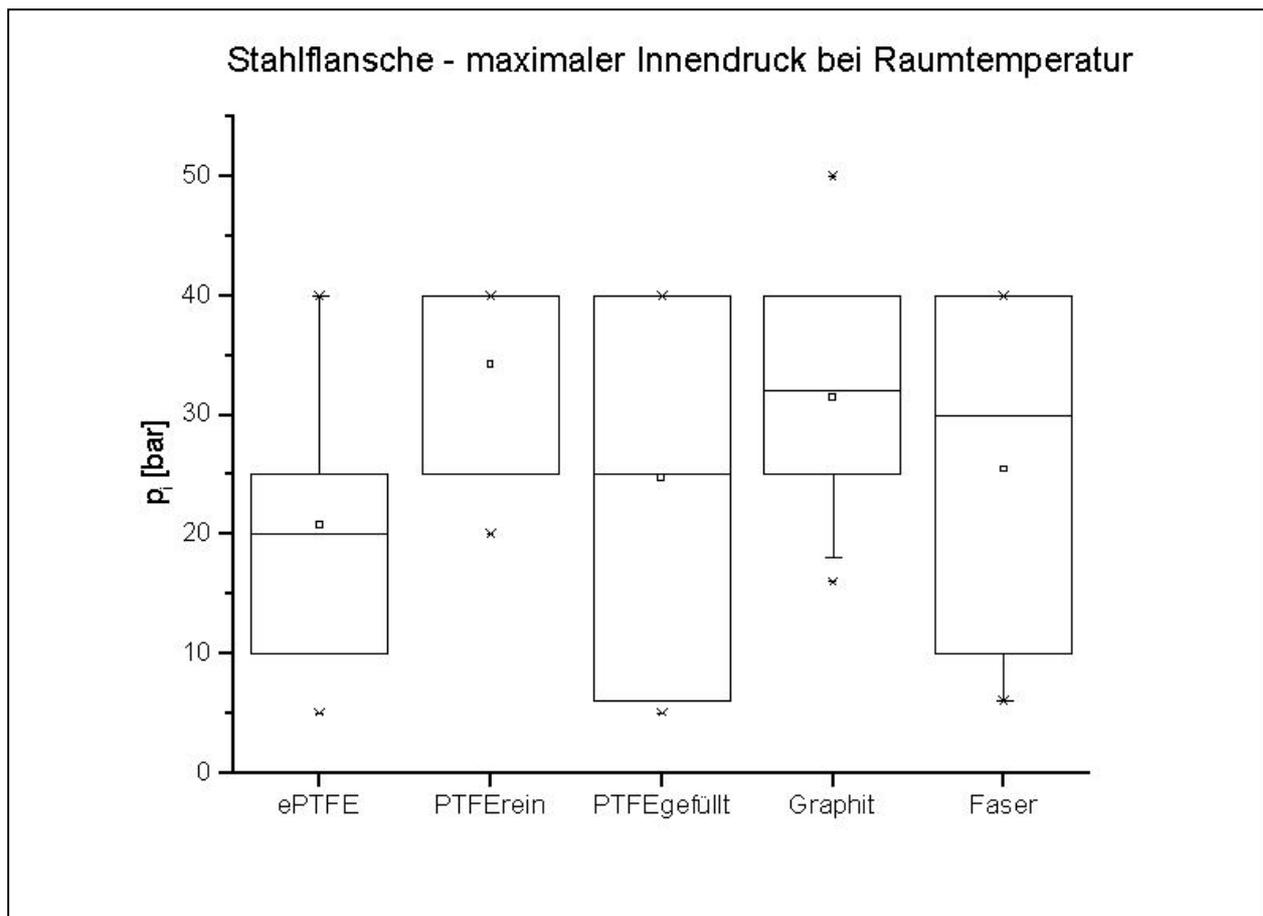
3. Emailflansche

- A Hüllringdichtungen auf Basis von PTFE mit Einlagen, z.B. Sigraflex Email
- B Dichtungen auf Basis von reinem PTFE, z.B. TFM 1600
- C Dichtungen auf Basis von gefülltem PTFE, z.B. Gylon blau
- D Dichtungen auf Basis von expandiertem PTFE, z.B. Gore Tex GR style R
- E Andere.....(bitte eintragen)

Art	Maximaler Innendruck bei Raumtemperatur [bar]	Maximaltemperatur [°C]	Maximaler Innendruck bei Maximaltemperatur [bar]	Bemerkung
A				
B				
C				
D				
E				

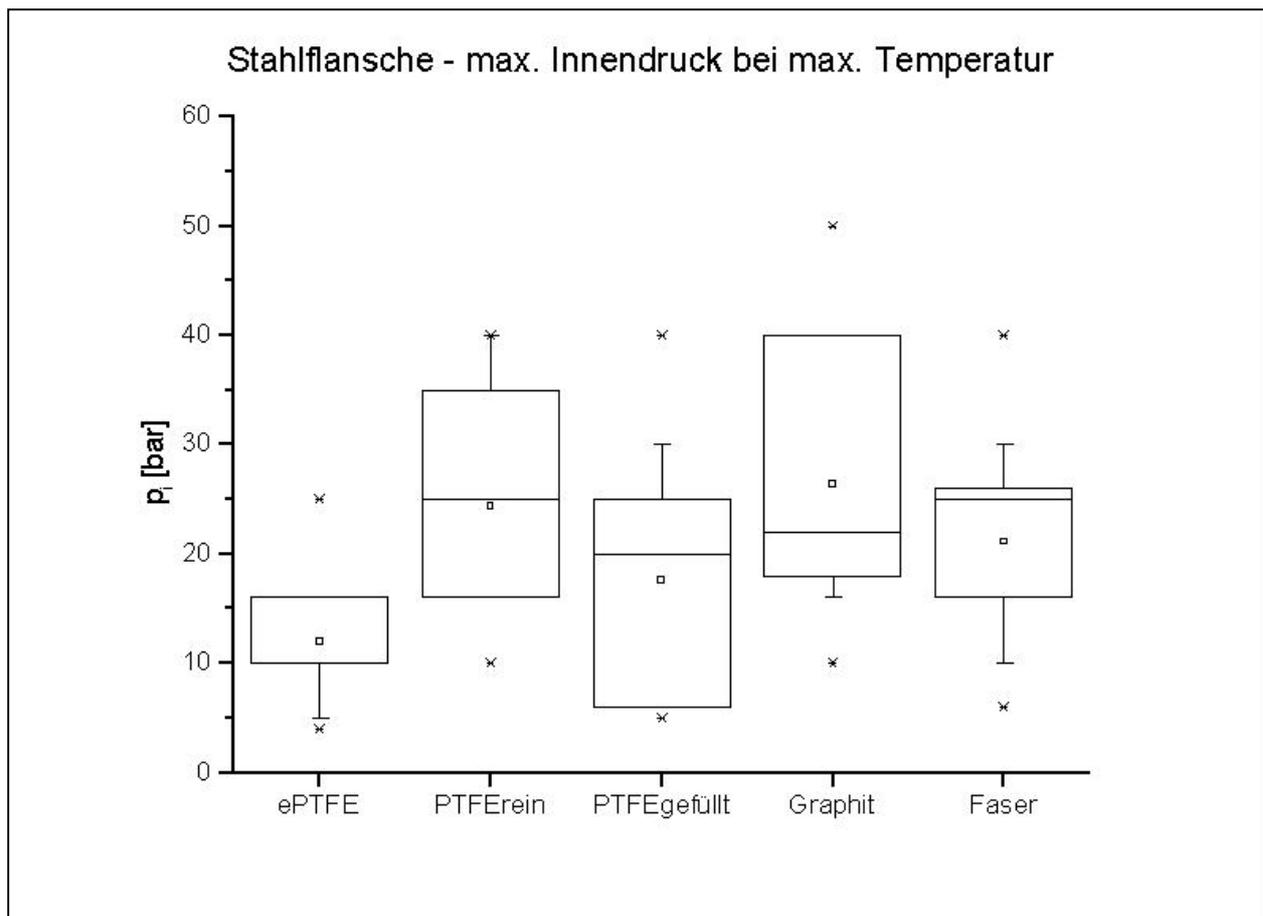
Anhang 9: Maximal zulässiger Innendruck bei Raumtemperatur für Flanschdichtungen an Stahlflanschen

Firma	Stahl p_{iRaum} [bar]				
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Graphit	Faser
A	25	25	25	25	25
B			25	25	
C		40	40	40	40
D	10	40	40	40	30
E	10		20	20	10
F	20		5	40	
G	16		6	18	6
H			6	32	32
J	40	40	40	40	40
K	40	40	40	50	40
L	5				6
M		20		16	



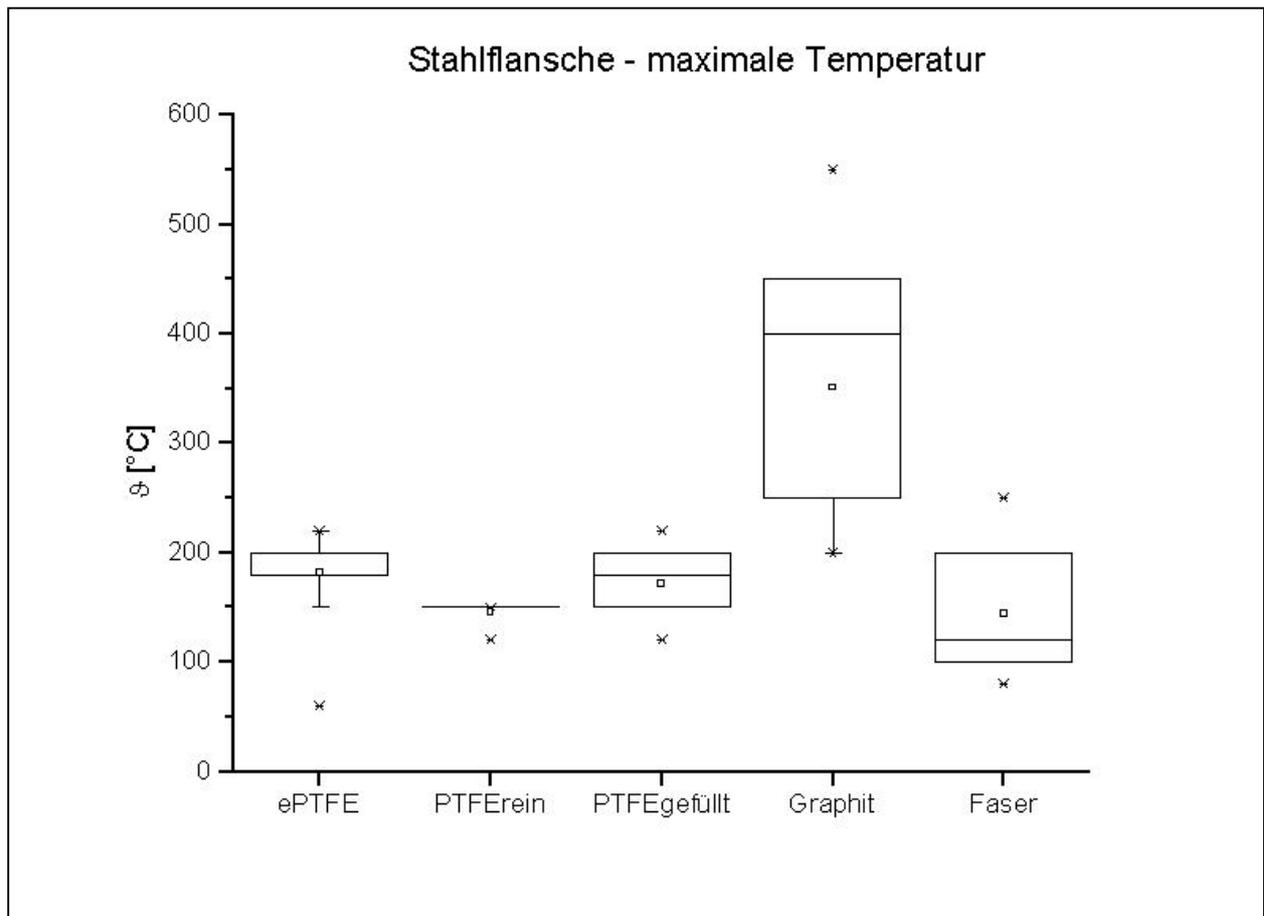
Anhang 10: Maximal zulässiger Innendruck bei Maximaltemperatur für Flanschdichtungen an Stahlflanschen

Stahl $p_{i,maxT}$ [bar]					
Firma	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Graphit	Faser
A	10	25	25	25	25
B			8	10	
C		35	30	22	40
D	10	40	40	40	30
E	10		20	20	10
F	5		5	40	
G	16		6	18	6
H			6	17	26
J	16	16	16	40	16
K	25	20	20	50	16
L	4			18	
M		10		16	



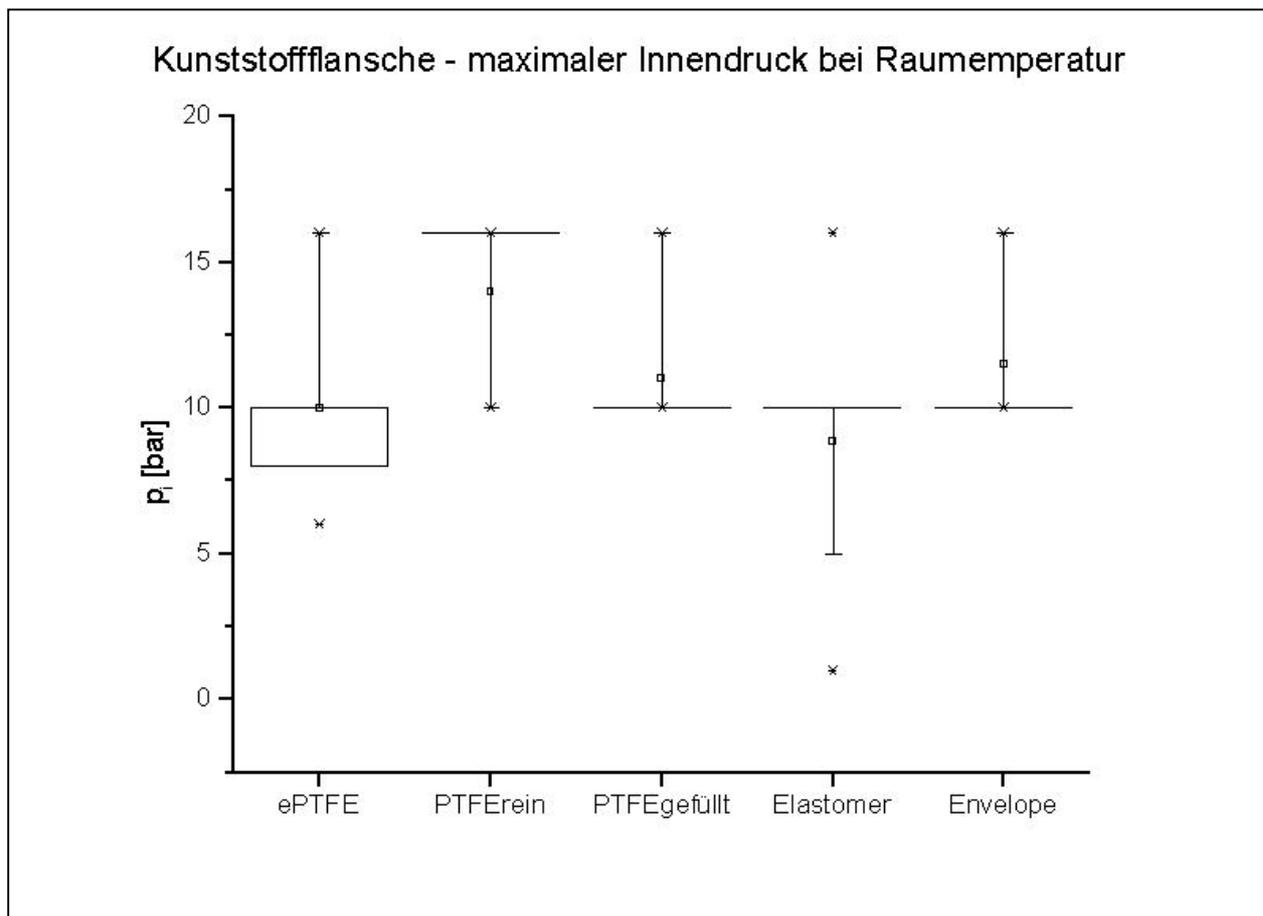
Anhang 11: Maximal zulässige Temperatur für Flanschdichtungen an Stahlflanschen

Firma	Stahl ϑ_{\max} [°C]				
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Graphit	Faser
A	200	150	150	450	250
B			200	250	
C		150	220	350	120
D	150	150	200	450	100
E	180		180	550	150
F	220		160	400	
G	200		180	200	100
H	200		120	300	100
J	220	150	150	450	200
K	200	150	150	400	200
L	60			210	80
M		120		200	



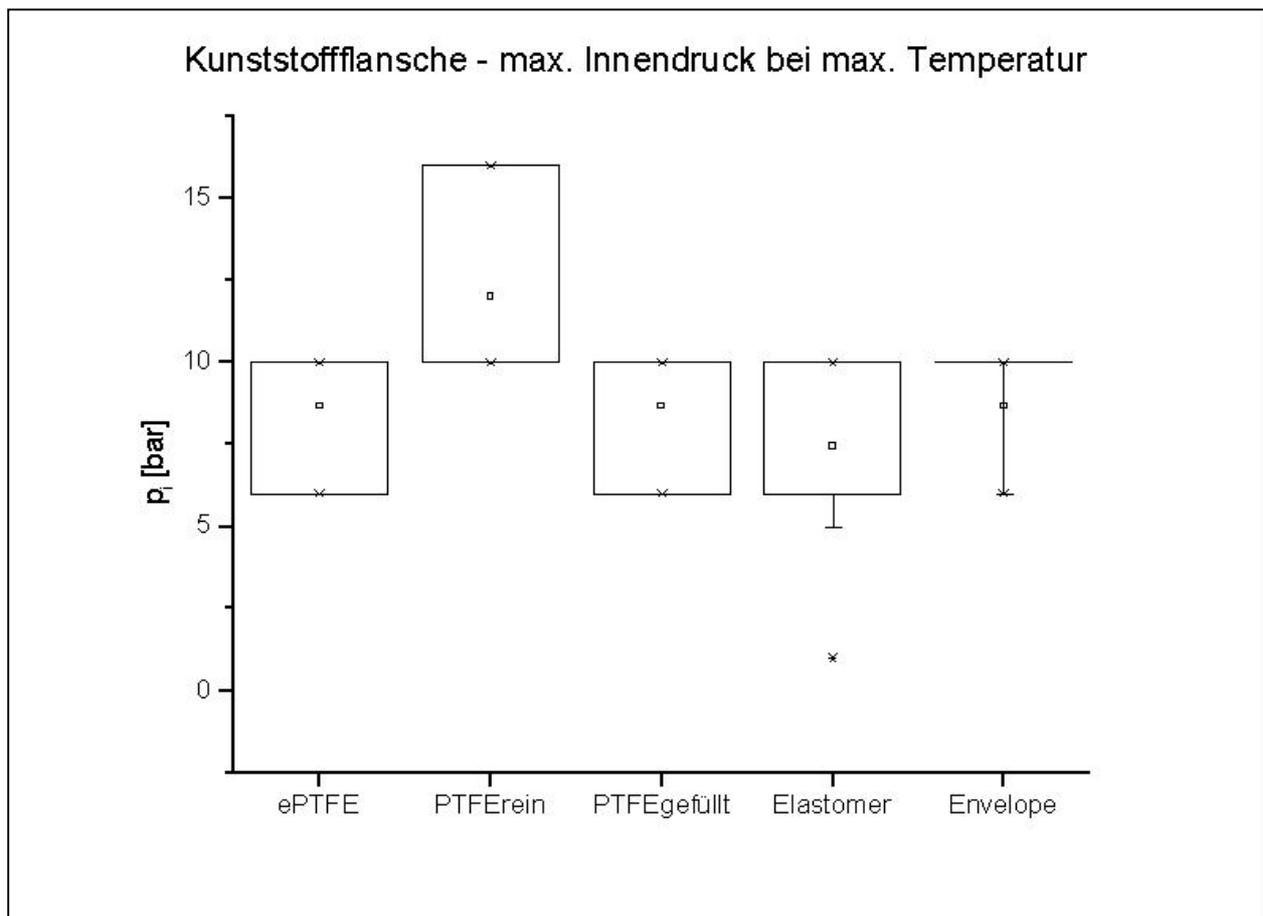
Anhang 12: Maximal zulässiger Innendruck bei Raumtemperatur für Flanschdichtungen an Kunststoffflanschen

Firma	Kunststoff p_{iRaum} [bar]				
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Elastomer e	Envelope
A				1	
B			10	10	
C			10	10	10
D	10	16	10	5	
E	10		10	10	10
F					
G					
H					
J	10	10	10	10	10
K	16	16	16	16	16
L	8				
M	6				



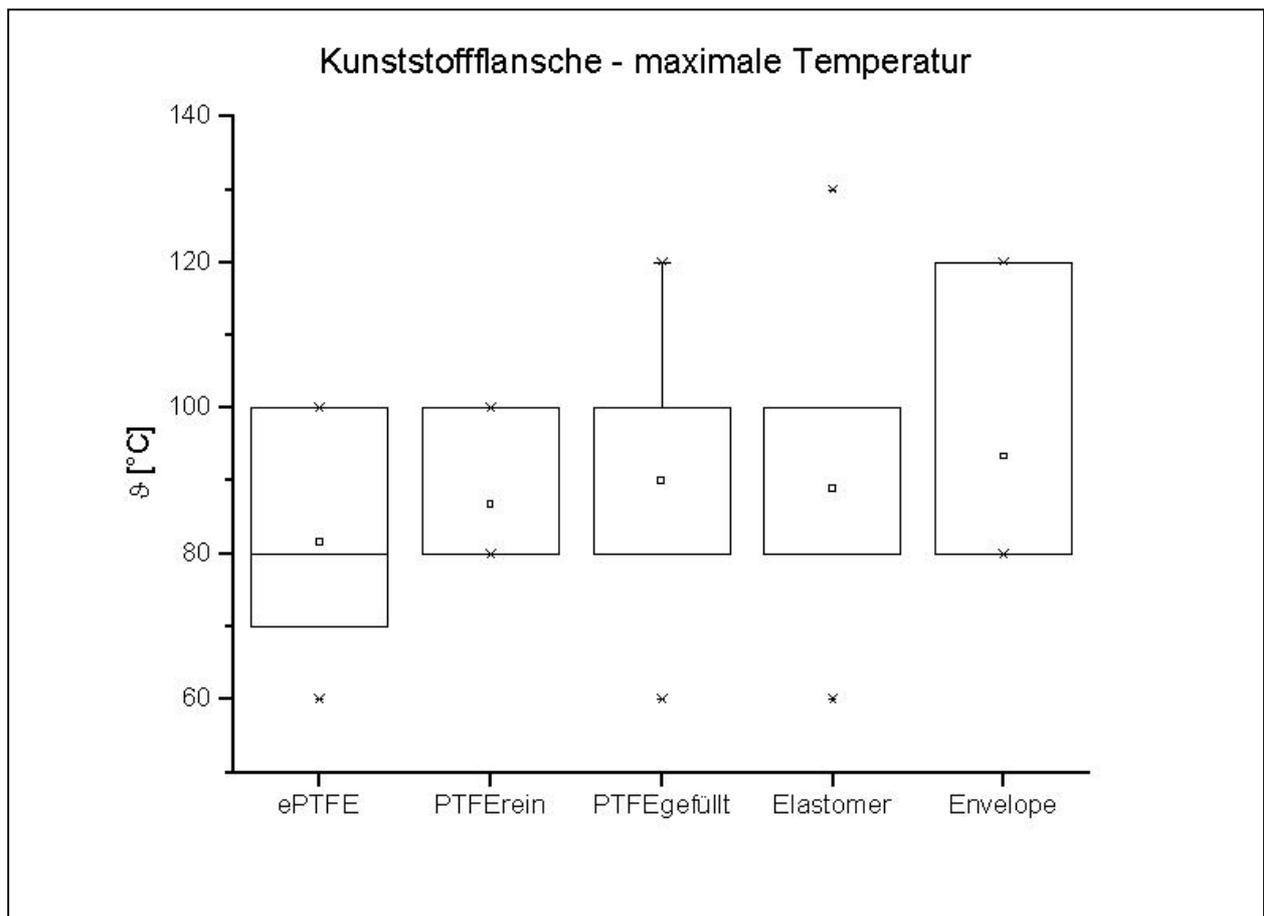
Anhang 13: Maximal zulässiger Innendruck bei Maximaltemperatur für Flanschdichtungen an Kunststoffflanschen

Firma	Kunststoff $p_{i\max T}$ [bar]				
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Elastomer e	Envelope
A				1	
B			6	6	
C			6	10	6
D	10	16	10	5	
E	10		10	10	
F					
G					
H					
J	10	10	10	10	10
K	10	10	10	10	10
L	6				
M	6				



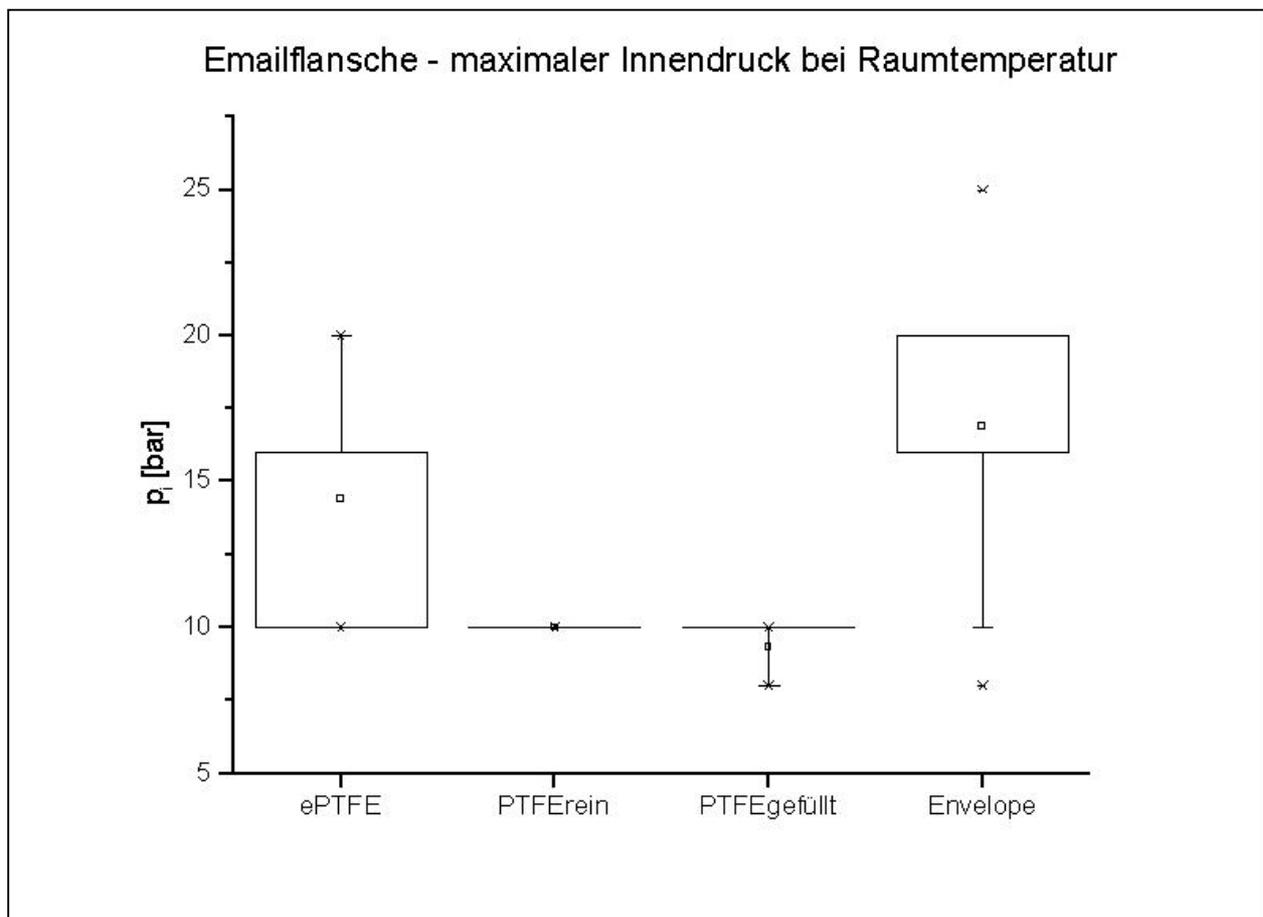
Anhang 14: Maximal zulässige Temperatur für Flanschdichtungen an Kunststoffflanschen

Firma	Kunststoff ϑ_{\max} [°C]				
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Elastomer e	Envelope
A				80	
B			60	60	
C			120	90	120
D	100	100	100	100	
E	100		100	100	
F				130	
G					
H				80	
J	80	80	80	80	80
K	80	80	80	80	80
L	60				
M	70				



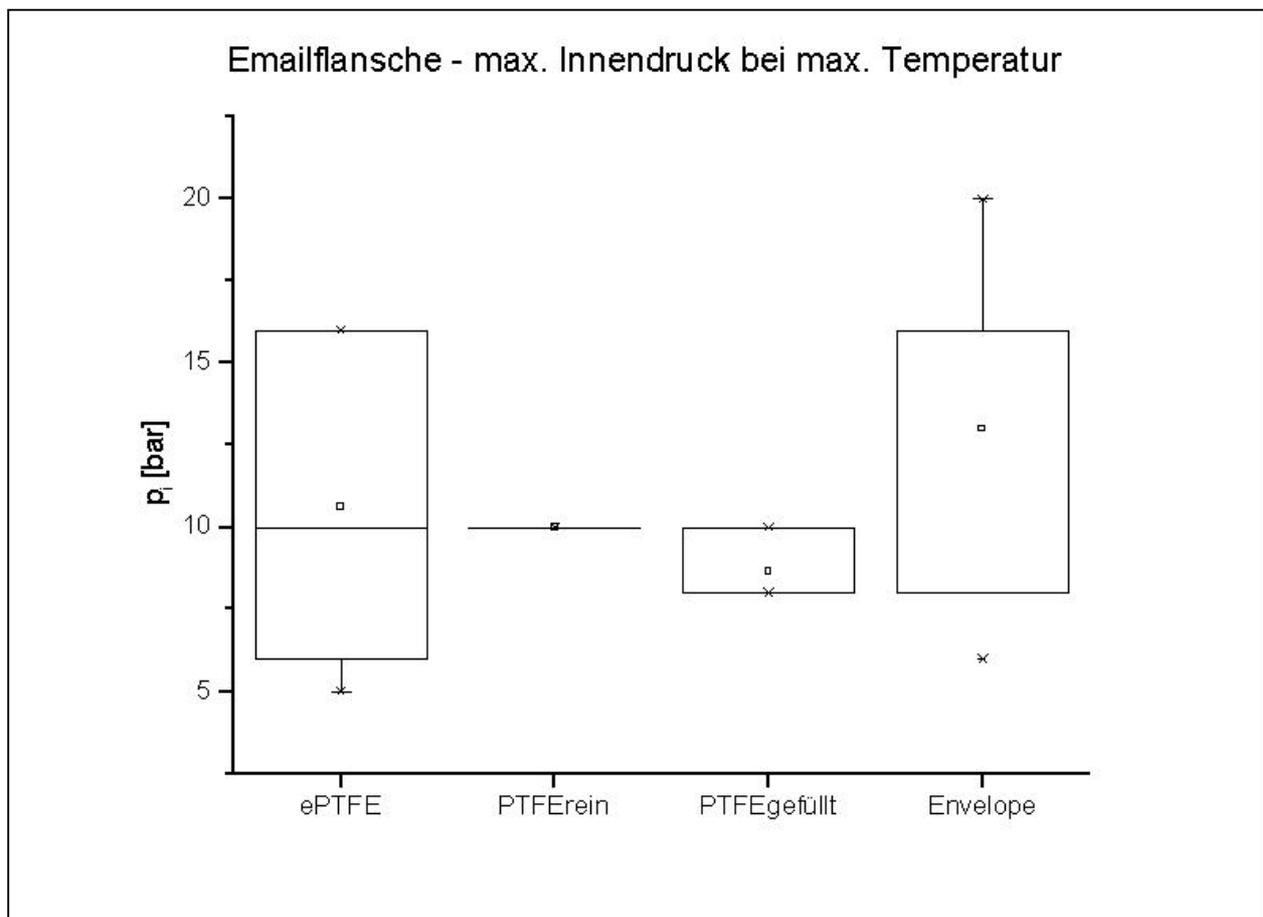
Anhang 15: Maximal zulässiger Innendruck bei Raumtemperatur für Flanschdichtungen an Emailflanschen

Firma	Email p_{iRaum} [bar]			
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Envelope
A				
B			8	8
C			10	10
D	10	10	10	20
E				
F	20			20
G				
H				25
J	16			16
K	16			16
L				
M	10			20



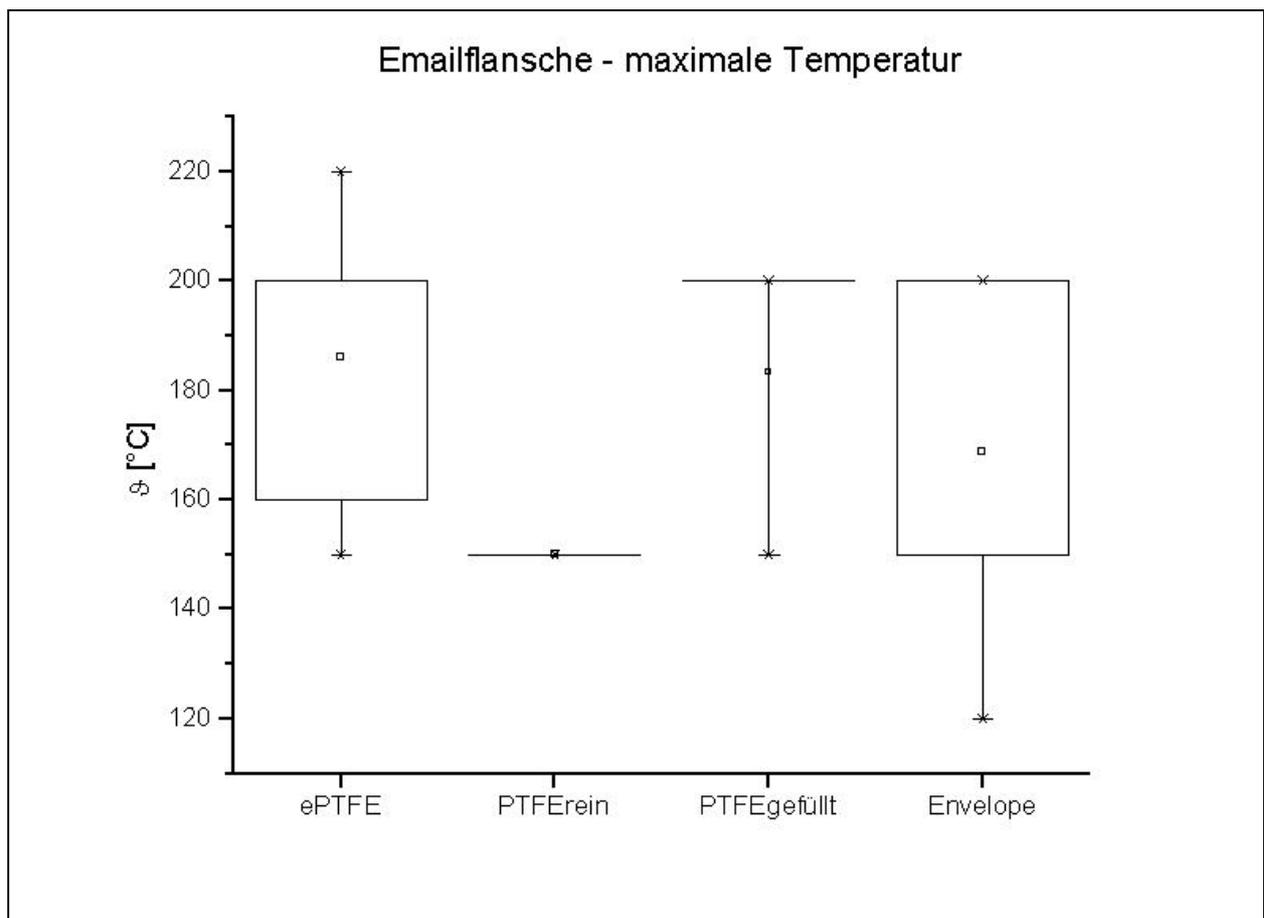
Anhang 16: Maximal zulässiger Innendruck bei Maximaltemperatur für Flanschdichtungen an Emailflanschen

Firma	Email p_{imaxT} [bar]			
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Envelope
A				
B			8	8
C			8	8
D	10	10	10	20
E				
F	5			20
G				
H				10
J	16			16
K	16			16
L				
M	6			6

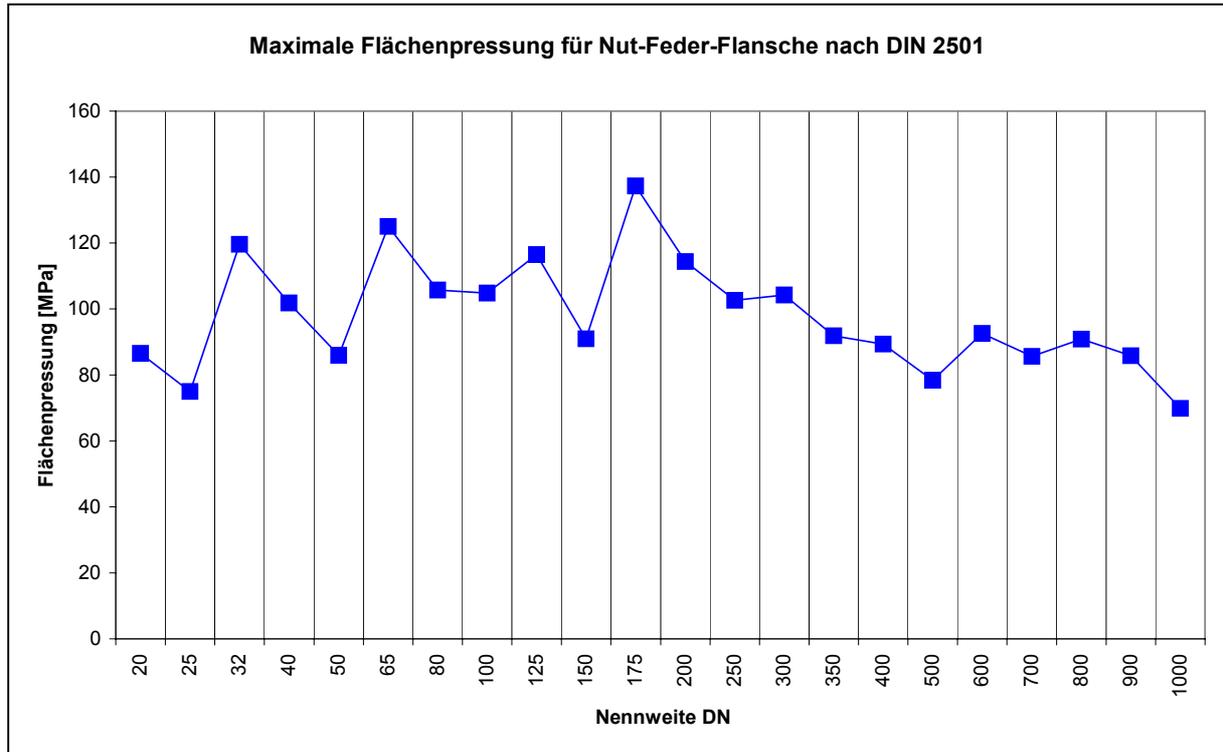


Anhang 17: Maximal zulässige Temperatur für Flanschdichtungen an Emailflanschen

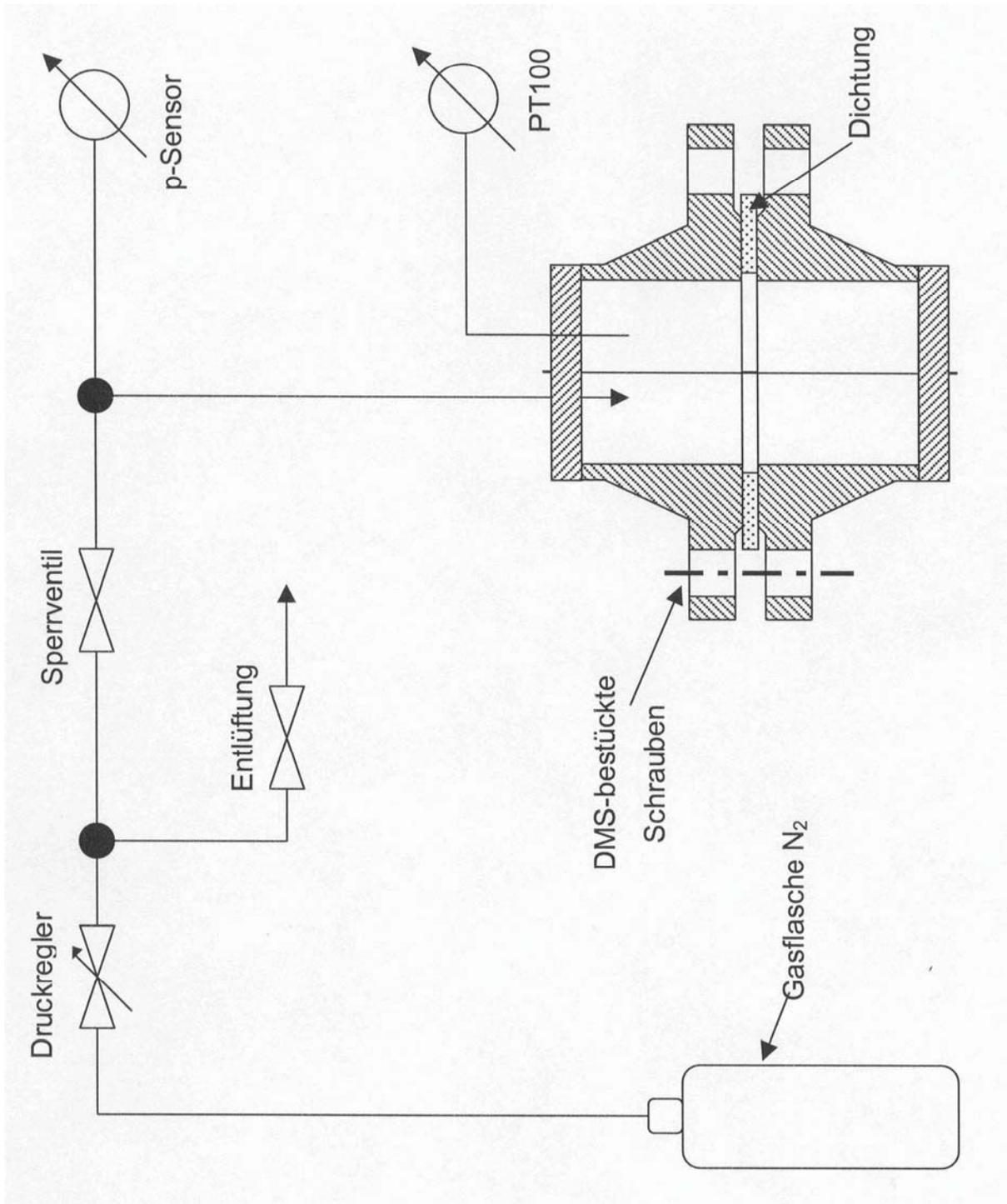
Firma	Email ϑ_{\max} [°C]			
	ePTFE	PTFE rein	PTFE gefüllt	Envelope
A				
B			200	200
C			200	200
D	150	150	150	150
E				
F	220			200
G				
H				200
J	200			120
K	200			120
L				
M	160			160



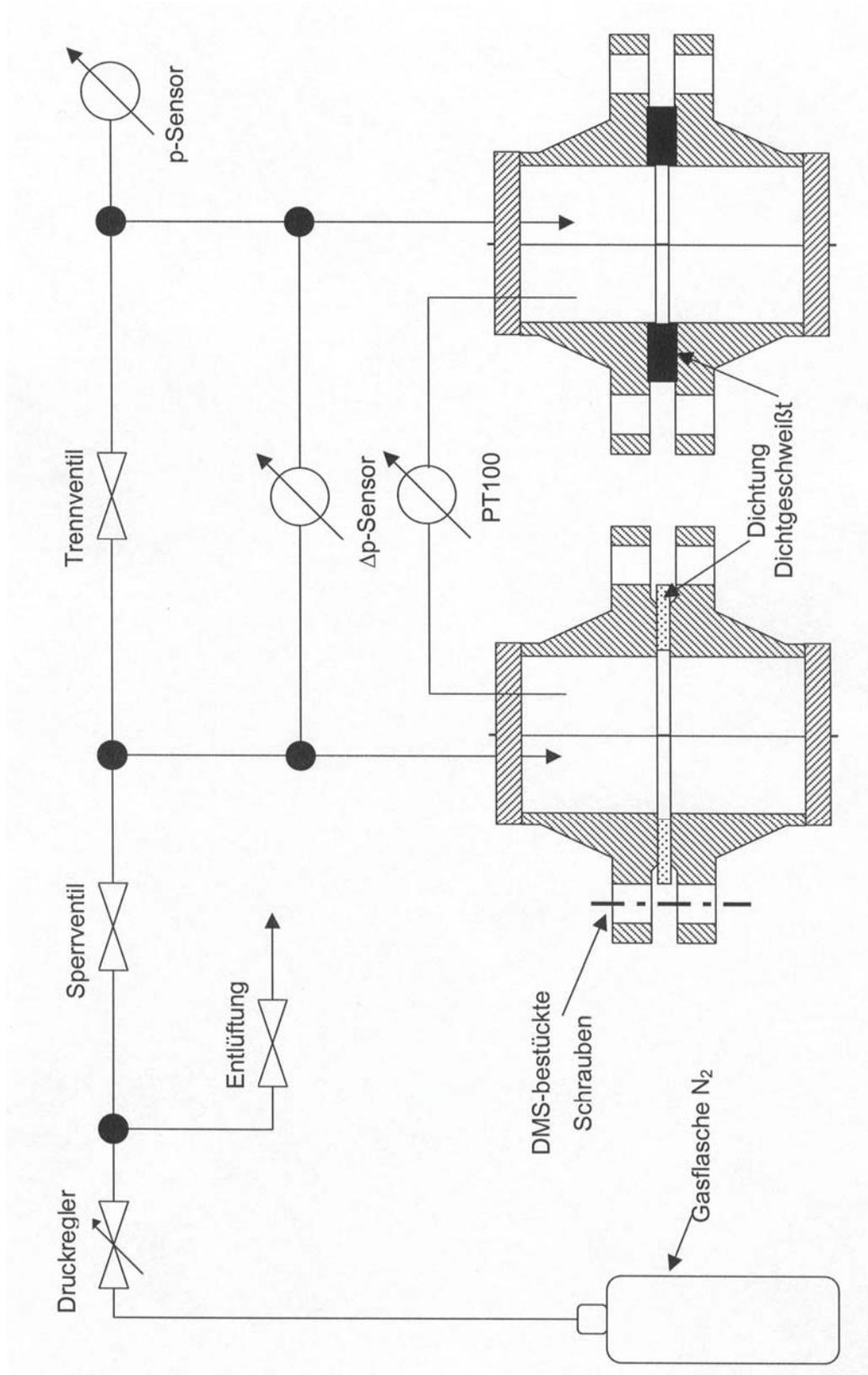
Anhang 18: Maximale Flächenpressung für Flansche mit Nut und Feder, Nenndruck 40 bar, mit Dichtungen nach DIN 2691 und Schrauben der Qualität 5.6.



Anhang 19: Prinzipskizze der Druckabfallmethode zur Leckagemessung



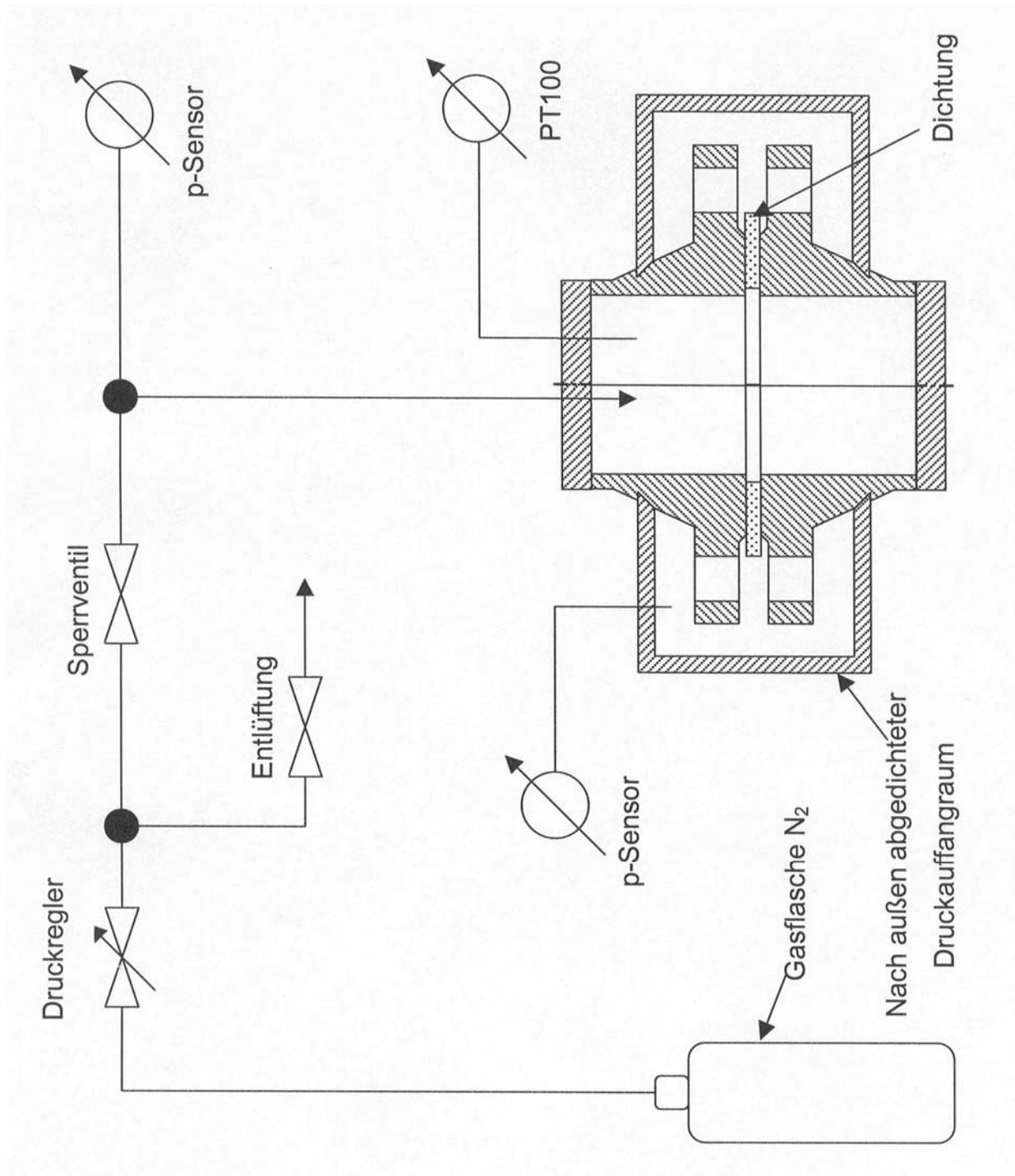
Anhang 20: Prinzipskizze der Differenzdruckmethode zur Leckagemessung



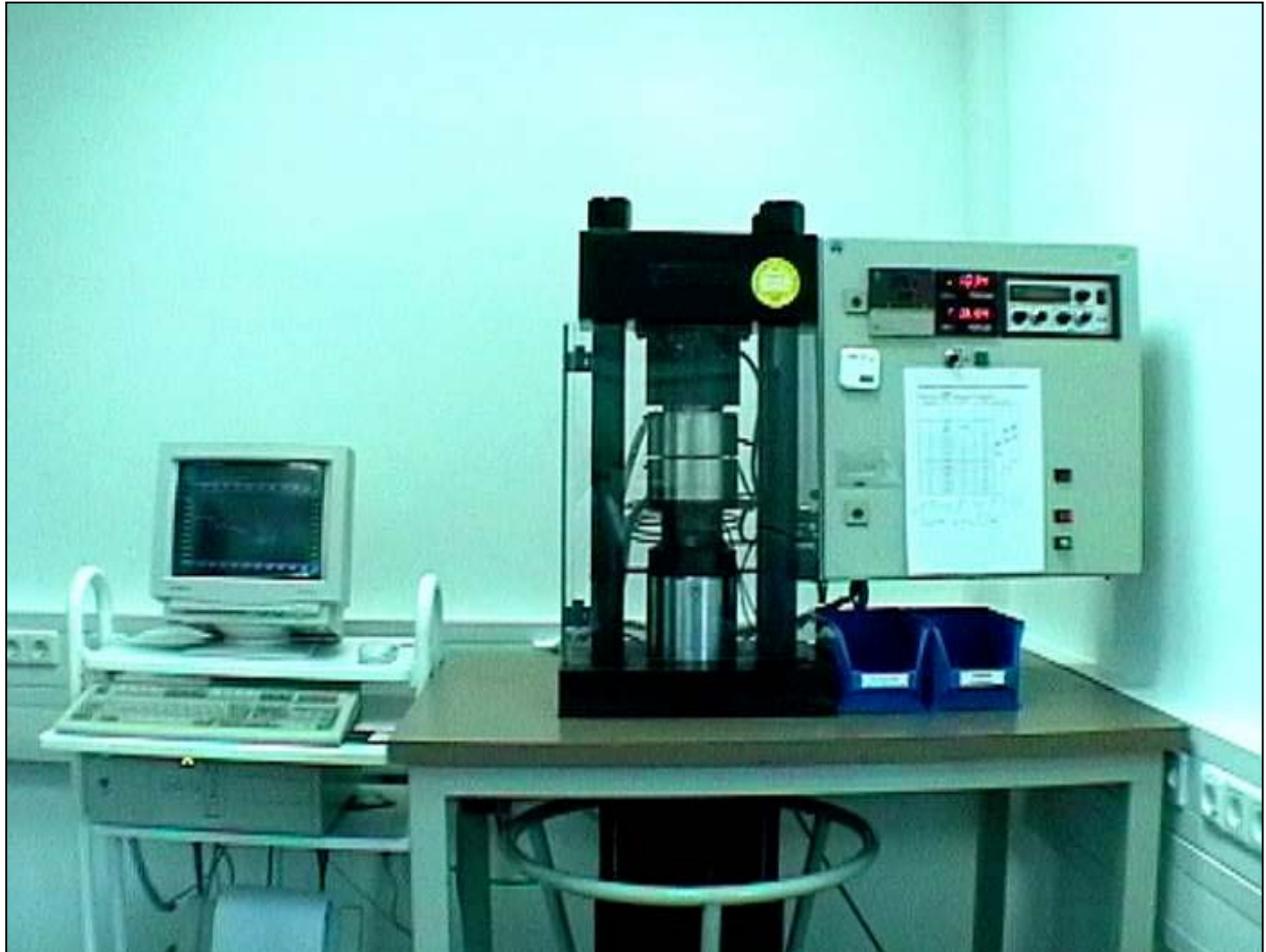
Anhang 21: Verwendeter Prüfstand für die Leckagemessung



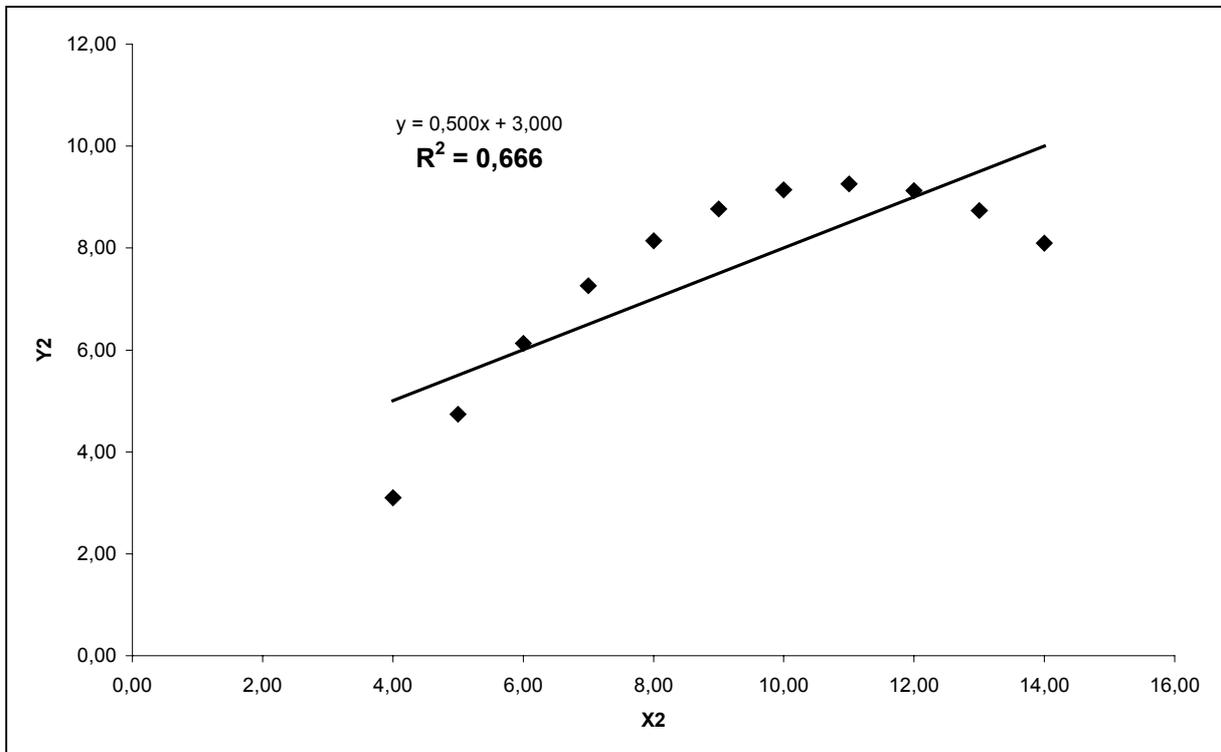
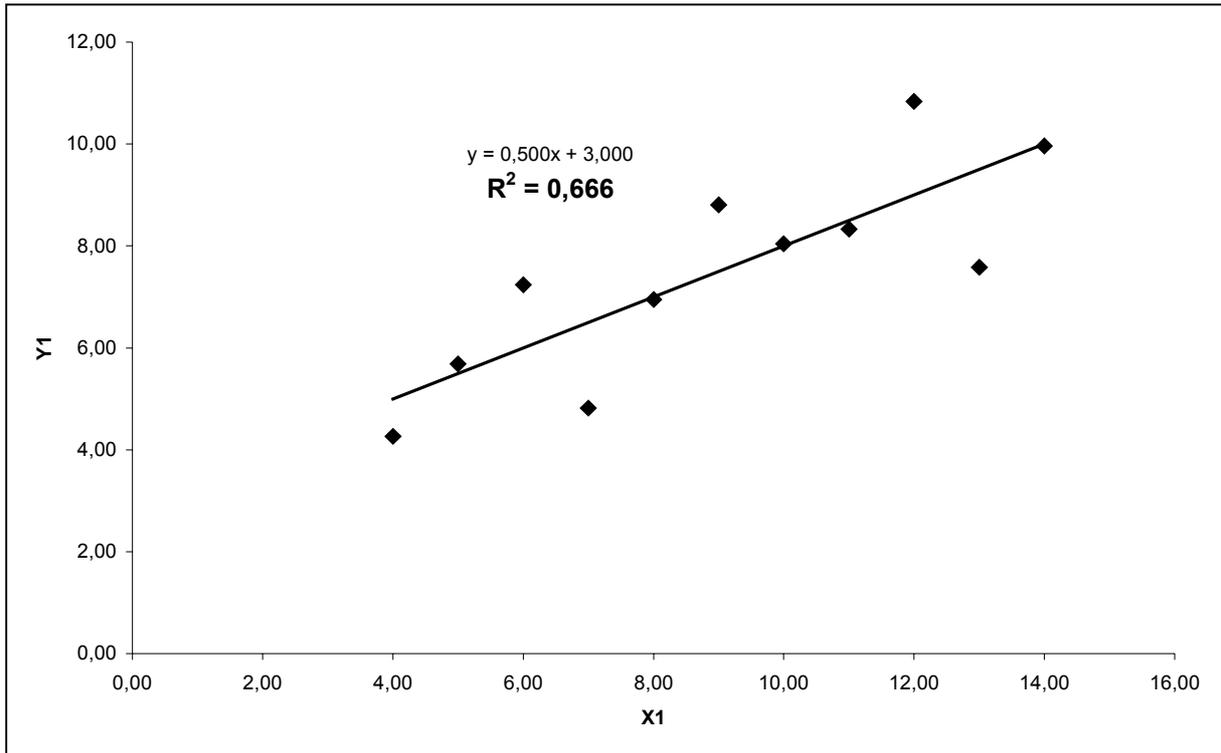
Anhang 22: Prinzipskizze der Druckauffangmethode zur Leckagemessung



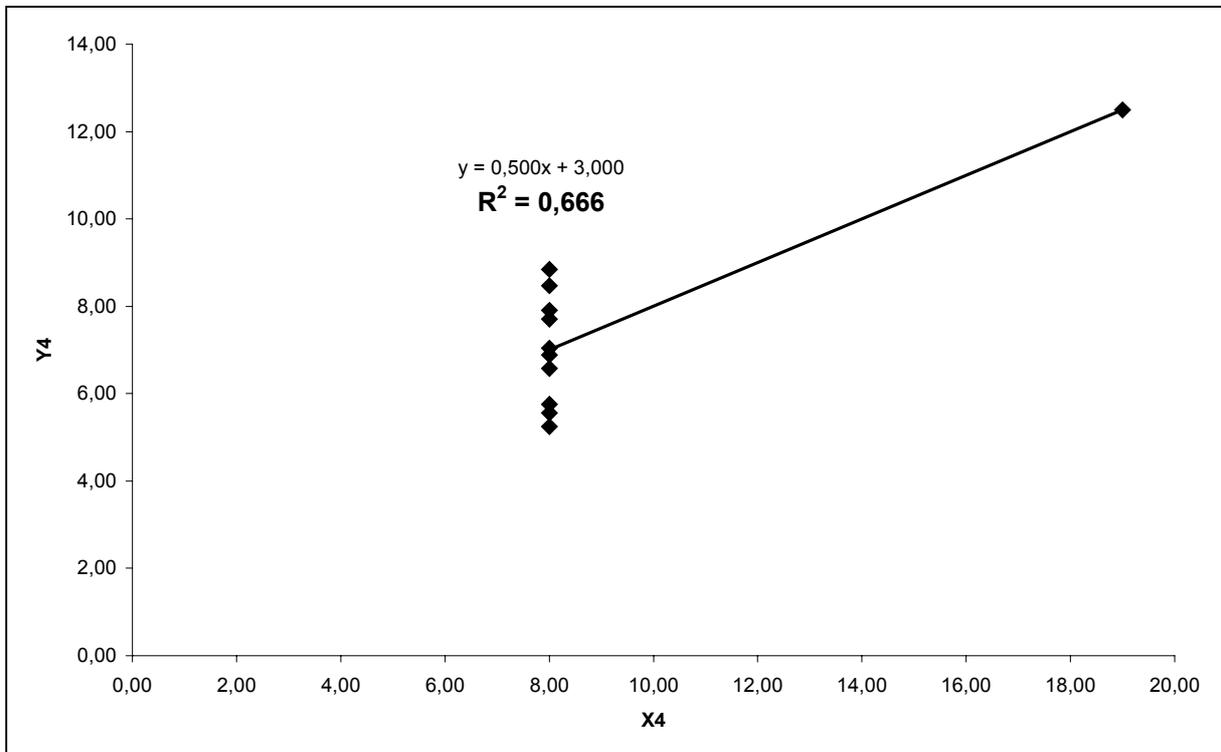
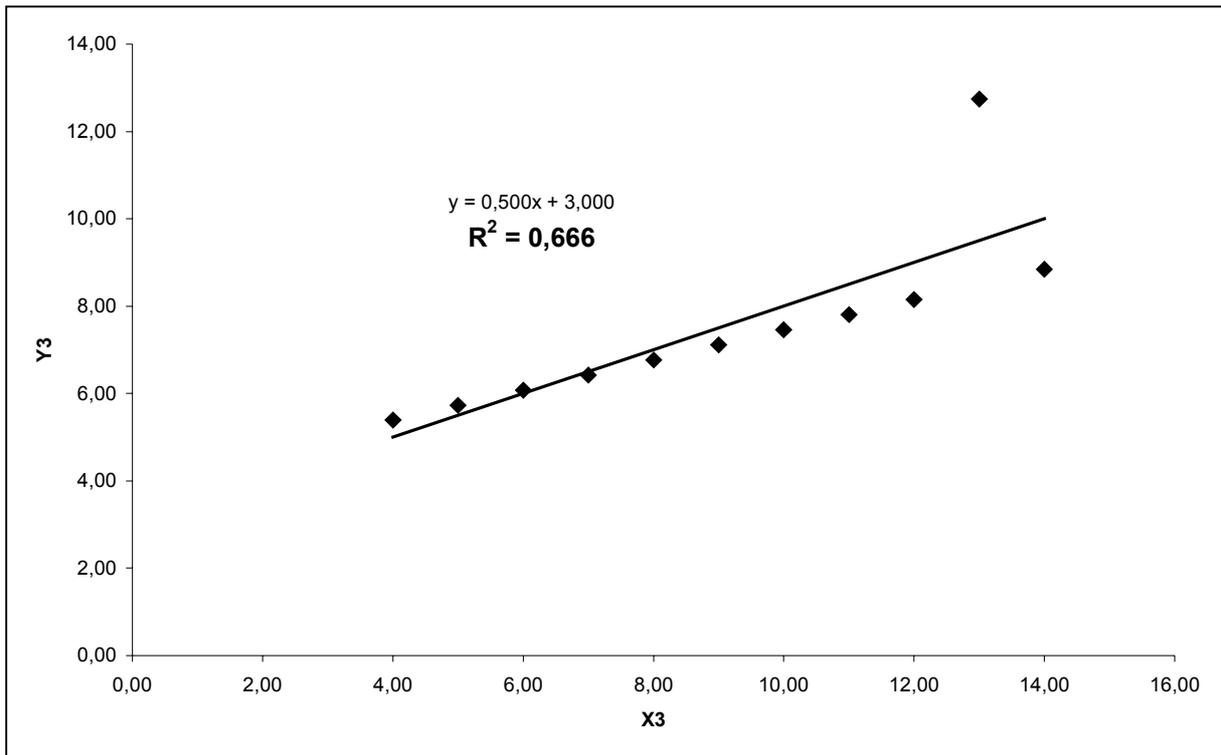
Anhang 23: Verwendeter Prüfstand für die Verformungsmessungen



Anhang 24.1: Datenmengen mit gleichen R^2 -Werten



Anhang 24.2: Datenmengen mit gleichen R^2 -Werten



**Anhang 25.1: Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für
Verformungsversuche; – ePTFE –**

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	$Q_{S\text{MAX}}$ [MPa]	Dicken- koeffizient α_p [μm]	Steigung β_p
10	4	6	250	50	4079	-0,6089
10	4	6	250	50	3777	-0,5826
20	2	160	20	>110	990	-0,1118
10	4	160	150	>240	5093	-0,5126
20	1	6	250	>110	793	-0,3775
20	1	6	250	>110	696	-0,3527
20	1	60	20	>110	610	-0,1021
20	4	160	250	30	4694	-0,5447
10	1	6	20	>240	510	-0,0993
15	4	160	20	>150	1966	-0,1033
20	4	6	20	>110	2083	-0,1274
10	1	60	250	>240	1424	-0,5008
15	4	6	250	50	3841	-0,5737
20	4	160	20	>110	2194	-0,1104
10	2	160	20	>240	1021	-0,1251
20	2	6	20	>110	836	-0,0758
15	1	160	150	>150	574	-0,0218
10	4	6	20	110	2269	-0,1770
20	2	160	250	50	675	-0,0387
20	2	160	250	50	741	-0,0491
15	1	6	20	>150	393	-0,0303
10	1	60	250	>240	1348	-0,4891
10	4	6	150	>240	3618	-0,4813
20	1	6	250	>110	730	-0,3590
10	2	6	250	110	1629	-0,4889
10	2	6	250	110	1700	-0,5035
10	2	6	20	>240	874	-0,1236
10	2	6	20	>240	888	-0,1296
10	2	6	150	>240	1659	-0,4646
10	2	6	150	>240	1777	-0,4993
10	1	6	250	>240	755	-0,5155
10	1	6	150	>240	692	-0,3792
10	2	6	150	>240	1518	-0,4159
20	2	6	150	>110	1402	-0,3385
20	2	6	150	>110	1428	-0,3363
20	2	6	150	>110	1417	-0,3329
20	2	6	150	>110	1436	-0,3488
20	2	6	150	>110	1454	-0,3370

**Anhang 25.2: Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für
Verformungsversuche; – PTFE –**

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	$Q_{S\text{MAX}}$ [MPa]	Dickenkoeffizient α_p [μm]	Steigung β_p
10	2	6	250	50	4191	-0,3757
10	2	6	250	50	4192	-0,3967
10	2	6	20	>240	5440	-0,3023
10	2	6	20	>240	5870	-0,3305
10	2	6	150	80	4427	-0,3486
10	2	6	150	110	5813	-0,3219
10	4,8	6	250	30	13322	-0,5824
10	4,8	6	20	110	20907	-0,4737
10	4,8	6	150	50	15039	-0,5309
10	1	6	250	>240	1769	-0,2710
10	1	6	20	>240	1874	-0,1879
10	1	6	150	>240	2695	-0,3313
10	4,8	6	20	110	22172	-0,4907
10	4,8	6	20	110	18972	-0,4407
10	2	6	150	80	4297	-0,3480
10	4,8	6	150	50	11031	-0,4329
10	1	160	250	50	1143	-0,1177
20	2	160	20	>110	2203	-0,0686
10	4	160	150	30	10202	-0,3936
20	1	6	250	>110	1568	-0,2288
20	1	6	250	>110	1783	-0,2404
20	1	60	20	>110	1010	-0,0518
20	4	160	250	30	6968	-0,2178
15	4	160	20	>250	6888	-0,1561
20	4	6	20	>110	11291	-0,2809
15	4	6	250	50	9341	-0,3975
20	4	160	20	>110	6004	-0,0986
10	2	160	20	>110	2685	-0,1224
15	1	160	150	>150	1001	-0,0521
20	2	160	250	50	2333	-0,0682
20	2	160	250	50	2258	-0,0627
20	1	6	250	>110	1891	-0,2530
20	4	60	20	>110	5954	-0,0929

**Anhang 25.3: Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für
Verformungsversuche; – Graphit –**

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_Z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	$Q_{S\text{MAX}}$ [MPa]	Dicken- koeffizient α_p [μm]	Steigung β_p
20	4	160	250	>110	4229	-0,1386
10	1	160	20	>240	1287	-0,2188
20	2	160	20	>110	2273	-0,1489
20	4	6	250	>110	4141	-0,1204
20	4	6	20	>110	4402	-0,1274
20	1	60	20	>110	1262	-0,1760
10	1	160	250	>240	1092	-0,1691
10	4	160	150	150	4333	-0,1441
10	2	6	150	150	2090	-0,1338
20	1	6	250	>110	1014	-0,0797
10	1	6	250	180	1052	-0,1215
10	4	6	20	180	4295	-0,1270
20	1	6	250	>110	1022	-0,0798
20	2	160	250	>110	2125	-0,1377
15	1	160	150	>150	1126	-0,1508
10	4	160	250	150	4298	-0,1447
20	4	60	150	>110	4321	-0,1436
15	1	6	20	>150	1089	-0,1063
20	1	160	20	>110	1203	-0,1580
10	2	160	20	>240	2385	-0,1862
15	4	6	250	>150	4248	-0,1272
20	4	160	20	>110	5363	-0,1648
10	2	6	250	150	1986	-0,1264
10	2	6	250	150	1988	-0,1250
10	4	6	20	180	4361	-0,1261
10	2	6	20	210	2049	-0,1364
10	2	6	20	210	2062	-0,1323
10	4	6	250	150	3903	-0,1440
10	4	6	150	150	4216	-0,1295
10	1	6	20	>240	979	-0,1291
10	1	6	150	180	950	-0,1236
10	4	6	150	150	4078	-0,1382

**Anhang 25.4: Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen (inkl. Ausreißer) für
Verformungsversuche; – Faser –**

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_Z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	$Q_{S\text{MAX}}$ [MPa]	Dickenkoeffizient α_p [μm]	Steigung β_p
20	1	160	150	>110	1049	-0,0474
10	4	60	20	110	4493	-0,0611
15	2	60	250	110	2090	-0,0410
15	2	60	250	50	2047	-0,0335
15	4	160	20	>150	4444	-0,0492
20	4	6	20	>110	4404	-0,0458
10	1	160	250	>240	1044	-0,0716
20	4	160	250	>110	4354	-0,0574
20	4	6	250	30	4210	-0,0433
20	1	160	150	>110	1045	-0,0470
10	4	160	250	80	4500	-0,0778
20	1	160	20	>110	985	-0,0408
15	4	6	250	30	4152	-0,0368
20	2	6	20	>110	2086	-0,0222
10	4	6	20	110	4670	-0,0727
10	1	6	250	50	1007	-0,0278
10	2	160	20	>240	2286	-0,0716
20	4	160	20	>110	4317	-0,0440
20	4	60	150	80	4309	-0,0497
10	2	6	250	50	2092	-0,0792
10	2	6	250	50	1923	-0,0386
10	2	6	250	30	1848	-0,0283
10	2	6	20	110	1974	-0,0392
10	2	6	20	110	1974	-0,0464
10	4	6	250	30	3895	-0,0464
10	4	6	150	50	4258	-0,0790
10	1	6	150	50	958	-0,0426
10	4	6	150	30	3925	-0,0506

Anhang 26.1: Kennfunktionen der Verformung bei Raumtemperatur und Betriebstemperatur; – Dickenkoeffizient α_p –

Dichtungsart	Gleichung für den Dickenkoeffizienten α_p [μm]
ePTFE	$\log \alpha_p = 3,156 - 0,084 b_D + 0,345 h_{D0} + 0,008 R_Z + 0,107 \mathcal{G} - 0,051 b_D \mathcal{G} - 0,038 b_D R_Z + 0,039 h_{D0} R_Z$
Vertrauensbereich	$\alpha_p = \pm 0,036 \pm 0,038 b_D \pm 0,041 h_{D0} \pm 0,037 R_Z \pm 0,034 \mathcal{G} \pm 0,036 b_D \mathcal{G} \pm 0,044 b_D R_Z \pm 0,041 h_{D0} R_Z$
PTFE	$\alpha_p = (69,280 - 6,847 b_D + 28,320 h_{D0} - 6,042 R_Z - 0,776 \mathcal{G} - 6,754 b_D h_{D0} + 4,713 b_D R_Z + 4,036 b_D \mathcal{G} - 3,878 h_{D0} R_Z - 5,307 \mathcal{G} h_{D0} + 4,379 \mathcal{G} R_Z)^2$
Vertrauensbereich	$\alpha_p = \pm 3,145 \pm 3,250 b_D \pm 3,549 h_{D0} \pm 3,545 R_Z \pm 3,296 \mathcal{G} \pm 3,570 b_D h_{D0} \pm 3,771 b_D R_Z \pm 3,565 b_D \mathcal{G} \pm 4,009 h_{D0} R_Z \pm 3,373 \mathcal{G} h_{D0} \pm 3,745 \mathcal{G} R_Z$
Graphit	$\alpha_p = 2705 + 20,6 b_D + 1597,0 h_{D0} + 65,5 R_Z - 88,2 \mathcal{G} - 44,5 b_D R_Z - 14,1 h_{D0} \mathcal{G}$
Vertrauensbereich	$\alpha_p = \pm 23,3 \pm 24,4 b_D \pm 23,8 h_{D0} \pm 24,4 R_Z \pm 24,8 \mathcal{G} \pm 25,4 b_D R_Z \pm 29,3 h_{D0} \mathcal{G}$
Faser	$\alpha_p = 2673,0 - 9,7 b_D + 1665,0 h_{D0} + 7,9 R_Z - 27,68 \mathcal{G} + 40,9 b_D \mathcal{G} + 38,7 \mathcal{G} R_Z - 45,0 b_D R_Z - 84,4 \mathcal{G} h_{D0}$
Vertrauensbereich	$\alpha_p = \pm 45,6 \pm 48,7 b_D \pm 49,7 h_{D0} \pm 48,5 R_Z \pm 51,3 \mathcal{G} \pm 59,2 b_D \mathcal{G} \pm 52,6 \mathcal{G} R_Z \pm 51,1 b_D R_Z \pm 59,2 \mathcal{G} h_{D0}$

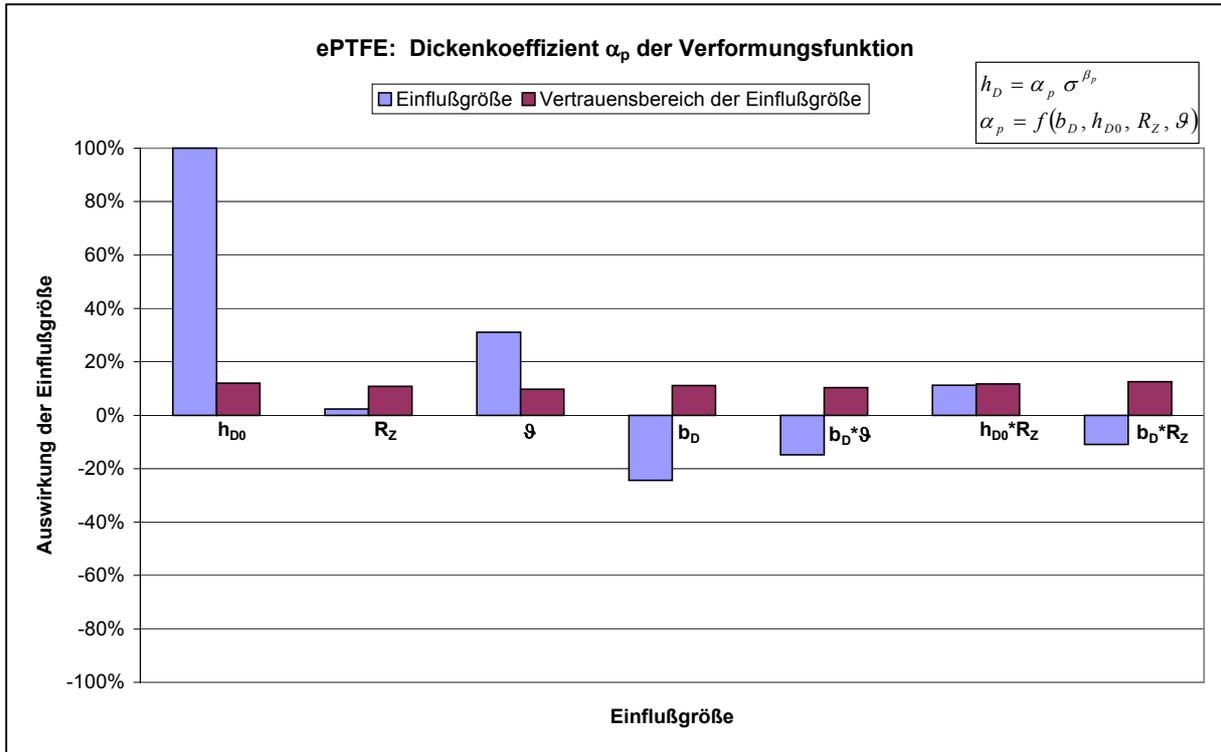
Anhang 26.2: Kennfunktionen der Verformung bei Raumtemperatur und Betriebstemperatur; – Steigung β_p –

Dichtungsart	Gleichung für Steigung β
ePTFE	$\beta_p = -(0,257 - 0,093 b_D + 0,044 h_{D0} - 0,055 R_Z + 0,121 \mathcal{G} - 0,044 b_D \mathcal{G} - 0,037 b_D R_Z - 0,056 R_Z \mathcal{G})$
Vertrauensbereich	$\beta_p = \pm 0,025 \pm 0,025 b_D \pm 0,026 h_{D0} \pm 0,027 R_Z \pm 0,025 \mathcal{G} \pm 0,025 b_D \mathcal{G} \pm 0,027 b_D R_Z \pm 0,029 R_Z \mathcal{G}$
PTFE	$\beta_p = -(0,235 - 0,071 b_D + 0,078 h_{D0} - 0,071 R_Z + 0,047 \mathcal{G} - 0,042 b_D h_{D0} + 0,013 b_D R_Z)$
Vertrauensbereich	$\beta_p = \pm 0,016 \pm 0,016 b_D \pm 0,016 h_{D0} \pm 0,018 R_Z \pm 0,016 \mathcal{G} \pm 0,017 b_D h_{D0} \pm 0,019 b_D R_Z$
Graphit	$\beta_p = -1/(7,701 + 0,814 b_D - 0,527 h_{D0} - 1,095 R_Z + 0,347 \mathcal{G} - 0,289 b_D R_Z + 0,197 b_D \mathcal{G} + 0,535 R_Z h_{D0} - 0,856 b_D h_{D0} + 0,118 R_Z \mathcal{G} - 0,330 b_D \mathcal{G})$
Vertrauensbereich	$\beta_p = \pm 0,095 \pm 0,108 b_D \pm 0,103 h_{D0} \pm 0,116 R_Z \pm 0,133 \mathcal{G} \pm 0,126 b_D R_Z \pm 0,124 b_D \mathcal{G} \pm 0,093 R_Z h_{D0} \pm 0,101 b_D h_{D0} \pm 0,108 R_Z \mathcal{G} \pm 0,124 b_D \mathcal{G}$
Faser	$\beta_p = -1(0,046 - 0,009 b_D + 0,006 h_{D0} + 0,011 R_Z - 0,001 \mathcal{G} + 0,003 b_D \mathcal{G} + 0,004 \mathcal{G} R_Z - 0,008 h_{D0} R_Z + 0,005 b_D h_{D0})$
Vertrauensbereich	$\beta_p = \pm 0,002 \pm 0,002 b_D \pm 0,002 h_{D0} \pm 0,002 R_Z \pm 0,002 \mathcal{G} \pm 0,002 b_D \mathcal{G} \pm 0,003 \mathcal{G} R_Z \pm 0,003 h_{D0} R_Z \pm 0,003 b_D h_{D0})$

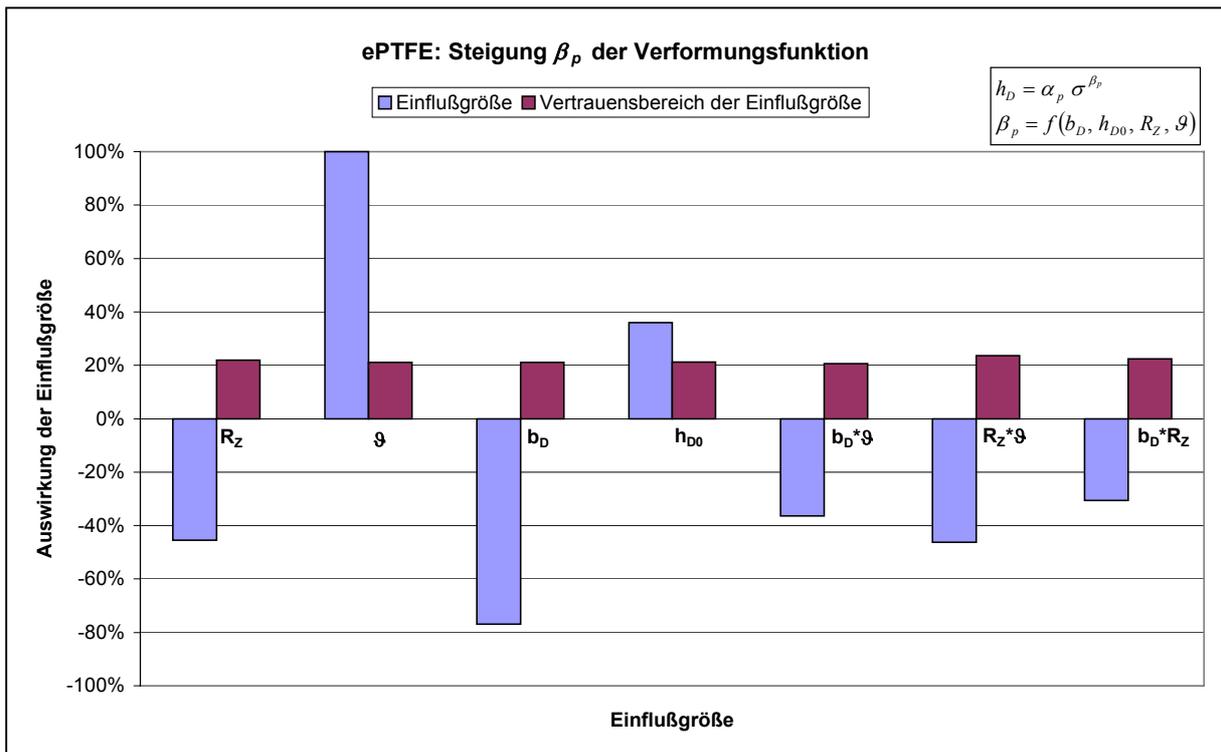
Anhang 26.3: Kennfunktionen der Verformung bei Raumtemperatur und Betriebstemperatur; – maximale Flächenpressung –

Dichtungsart	Gleichung für Q_{MAX} und Q_{SMAX} [MPa]
PTFE	$\log Q_{SMAX} = 1,967 + 0,134 b_D - 0,189 h_{D0} - 0,108 R_Z - 0,282 \mathcal{G}$
Vertrauensbereich	$\log Q_{SMAX} = \pm 0,056 \pm 0,047 b_D \pm 0,041 h_{D0} \pm 0,036 R_Z \pm 0,043 \mathcal{G}$
Faser	$\log Q_{SMAX} = 2,182 - 0,032 b_D - 0,082 h_{D0} + 0,444 R_Z - 0,190 \mathcal{G}$
Vertrauensbereich	$\log Q_{SMAX} = \pm 0,192 \pm 0,081 b_D \pm 0,070 h_{D0} \pm 0,225 R_Z \pm 0,076 \mathcal{G}$

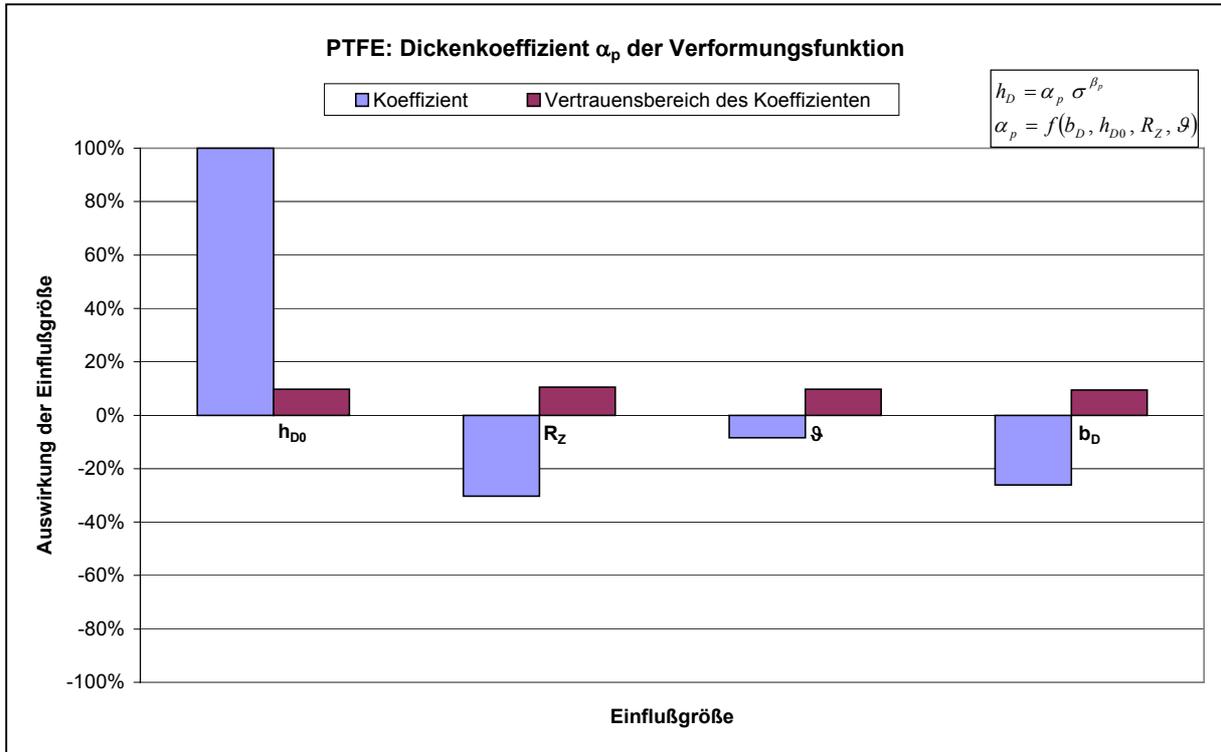
Anhang 27.1: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von ePTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



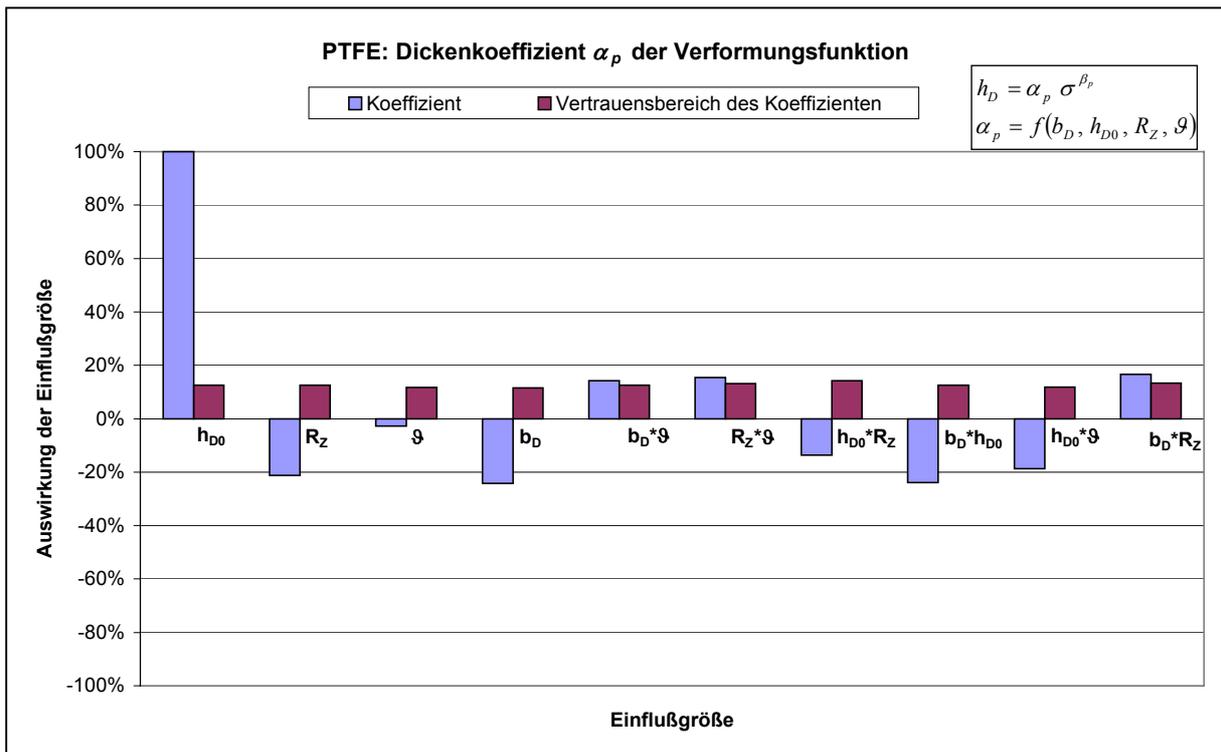
Anhang 27.2: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von ePTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



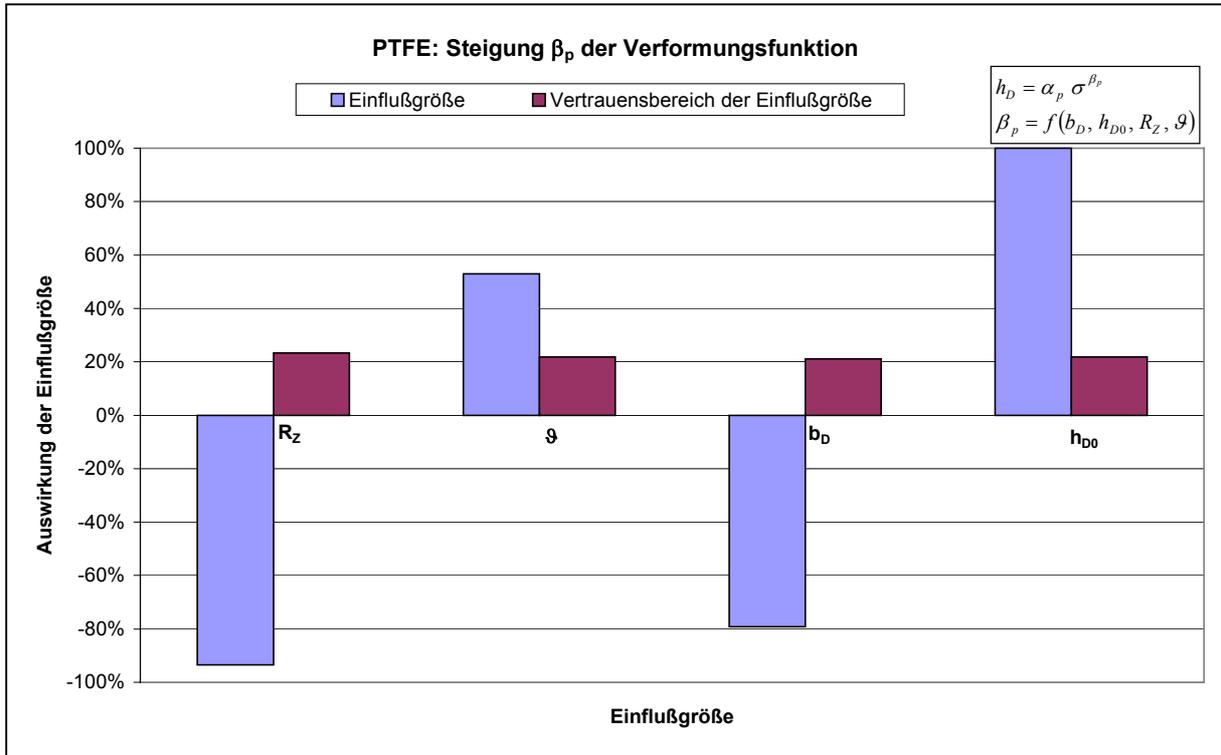
Anhang 27.3: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte –



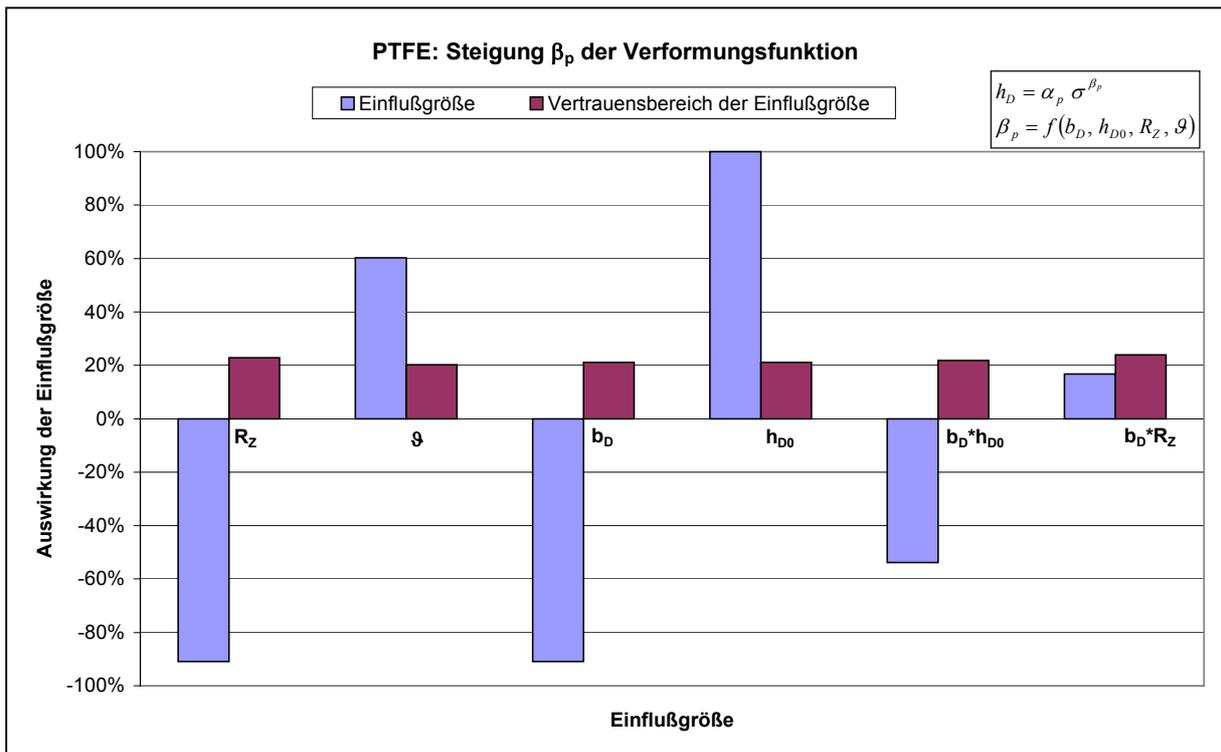
Anhang 27.4: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



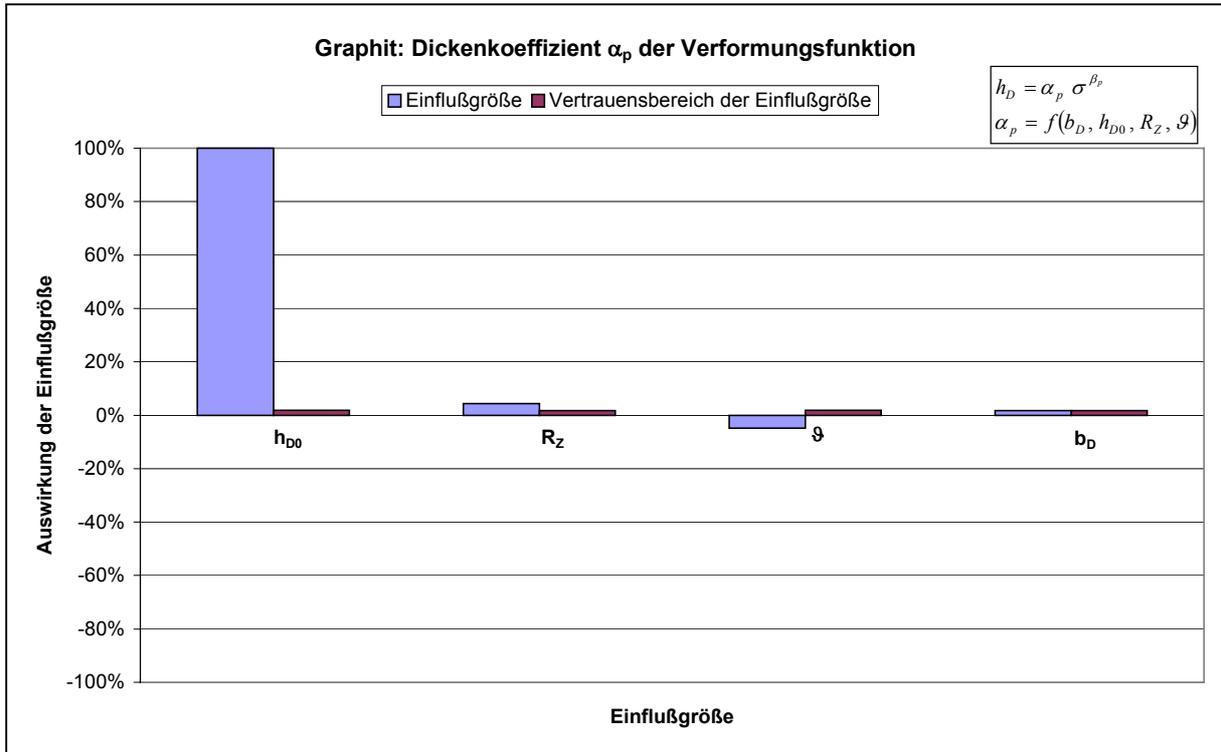
Anhang 27.5: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte –



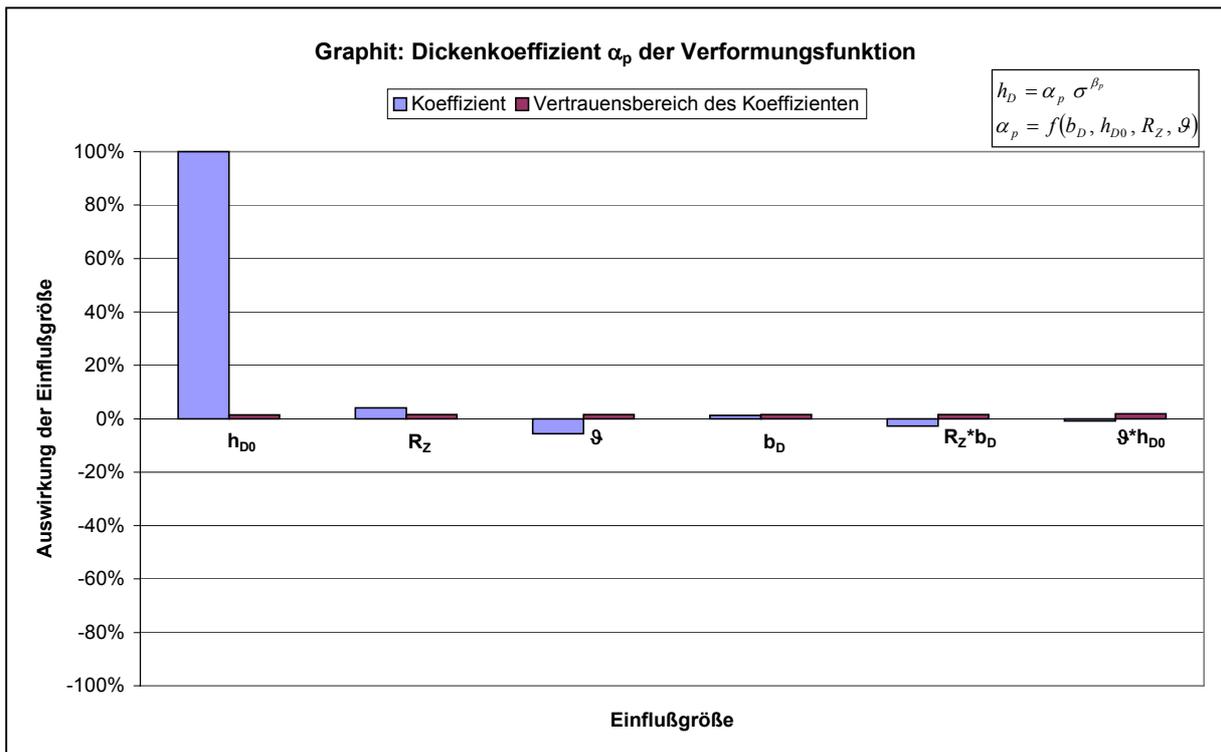
Anhang 27.6: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von PTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



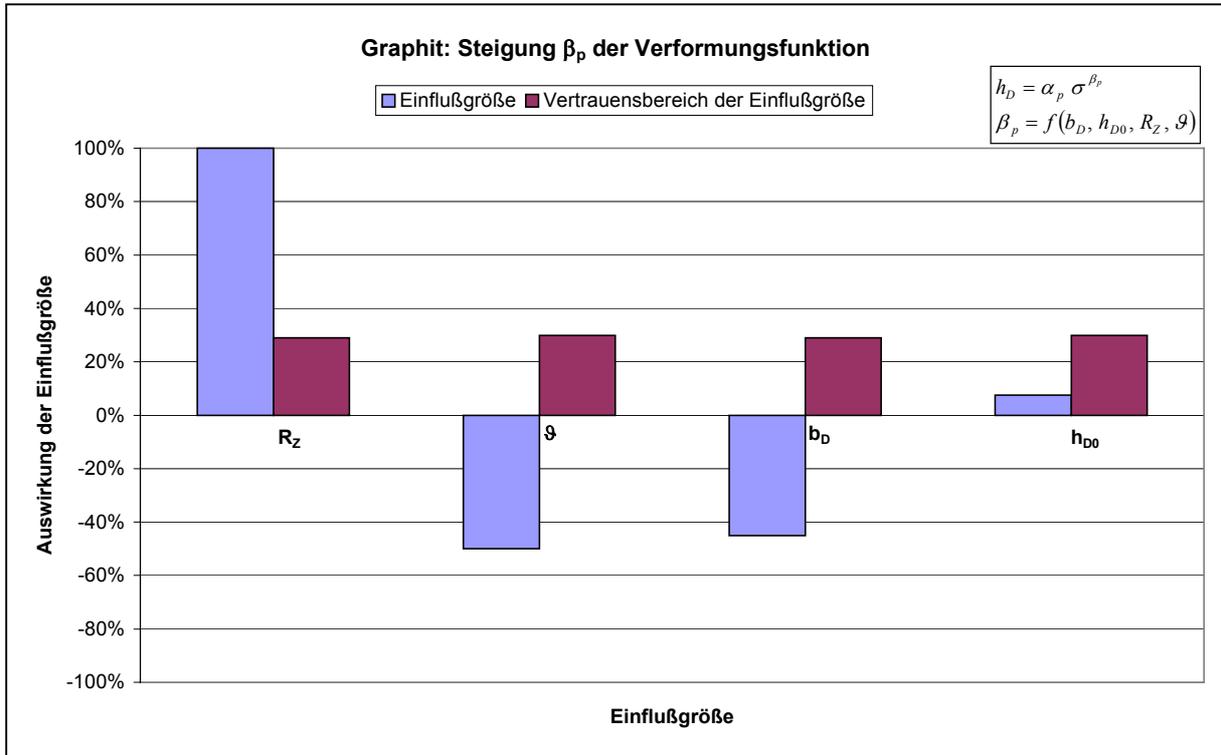
**Anhang 27.7: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungs-
funktion von Graphit; – Haupteffekte –**



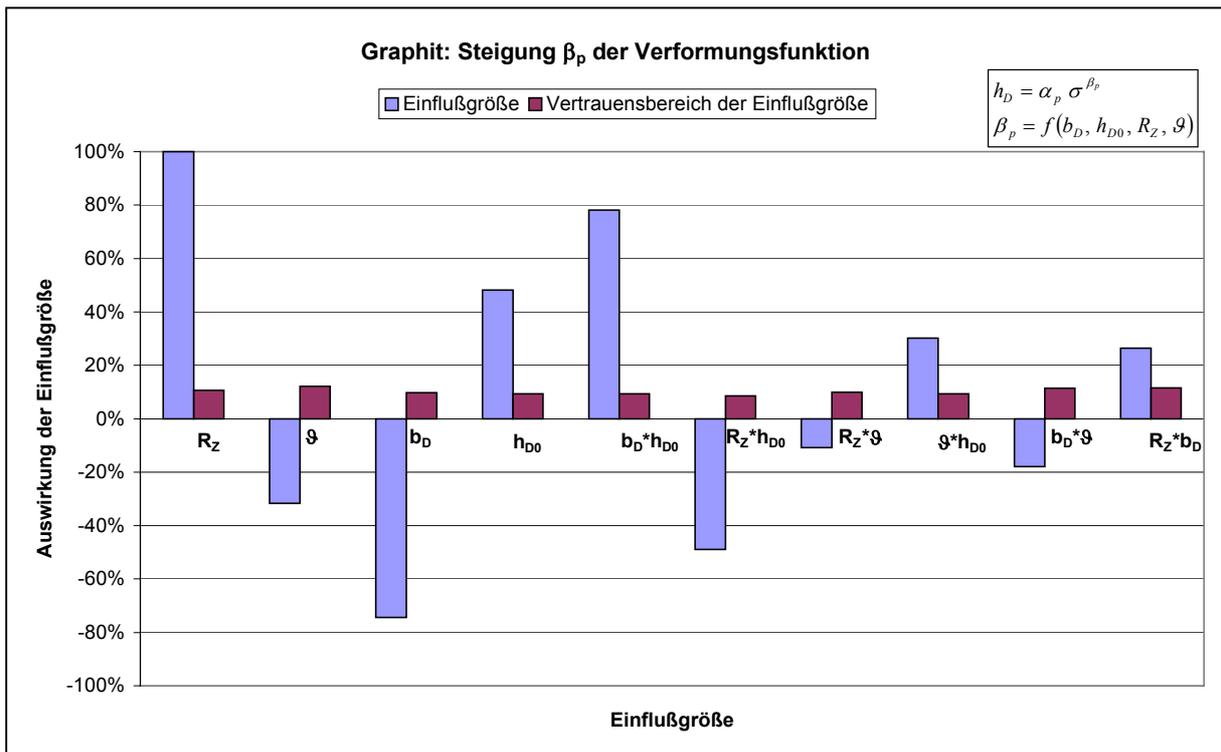
**Anhang 27.8: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungs-
funktion von Graphit; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –**



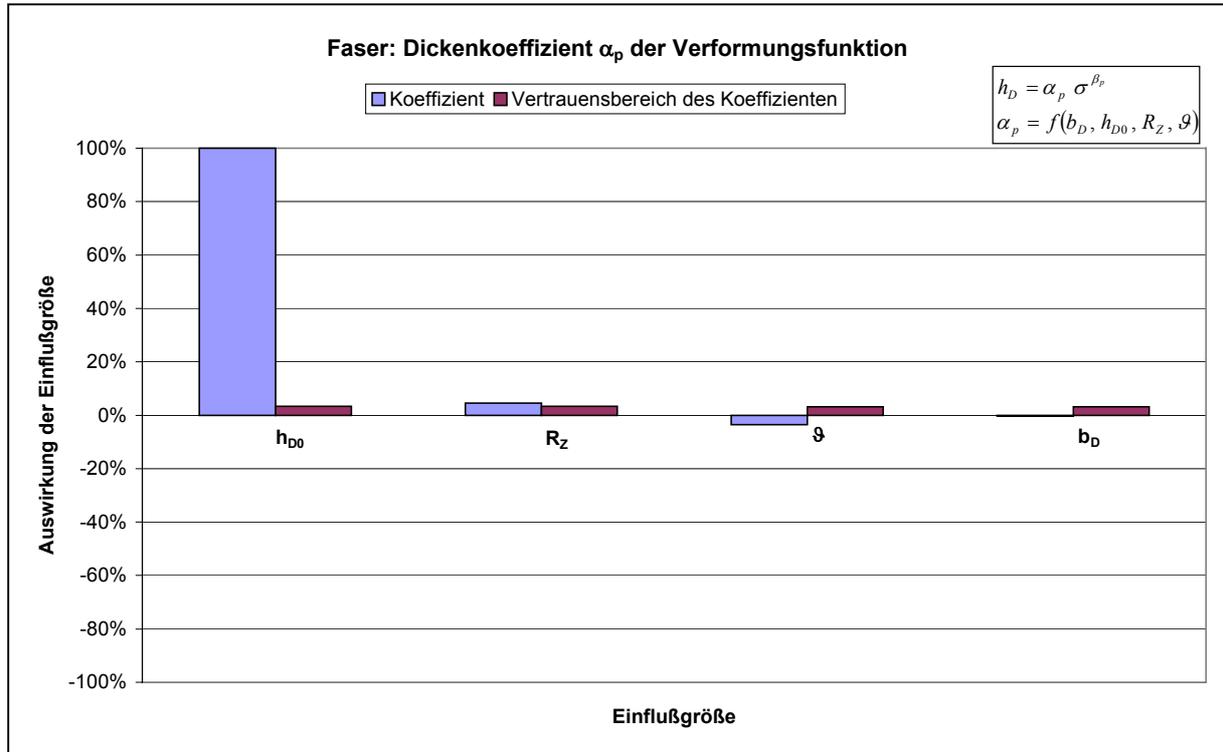
Anhang 27.9: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Graphit; – Haupteffekte –



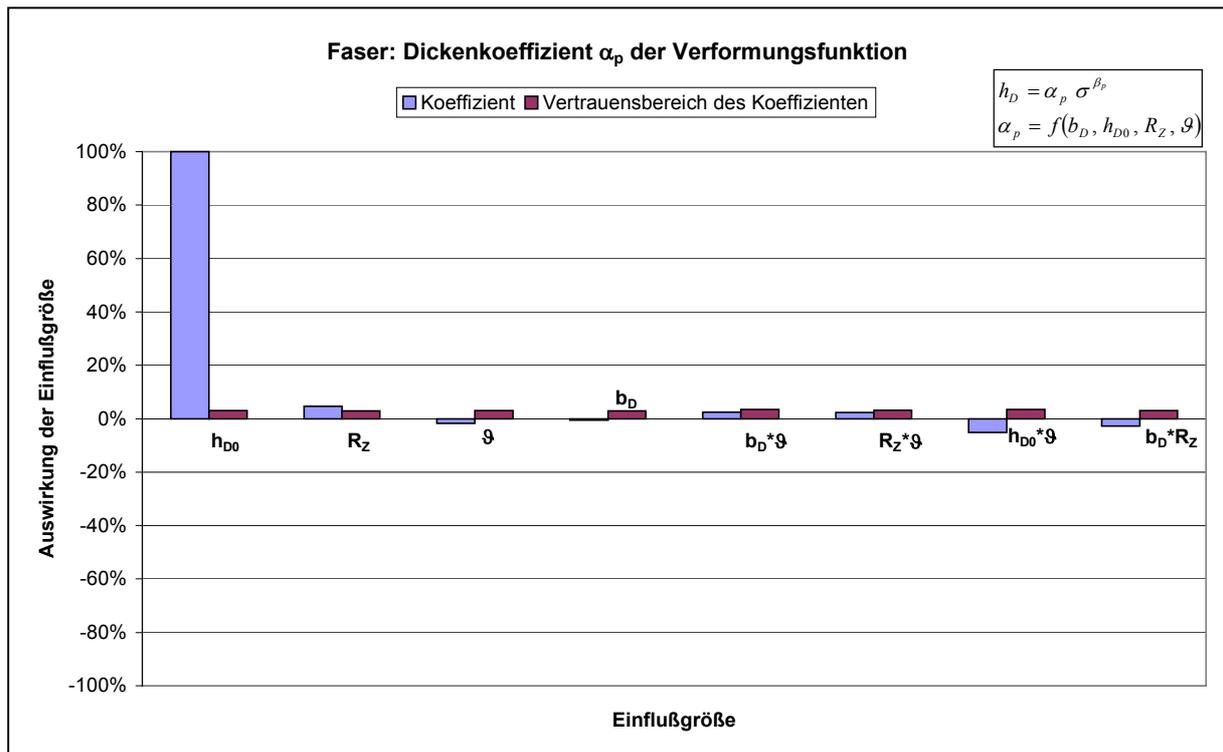
Anhang 27.10: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Graphit; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



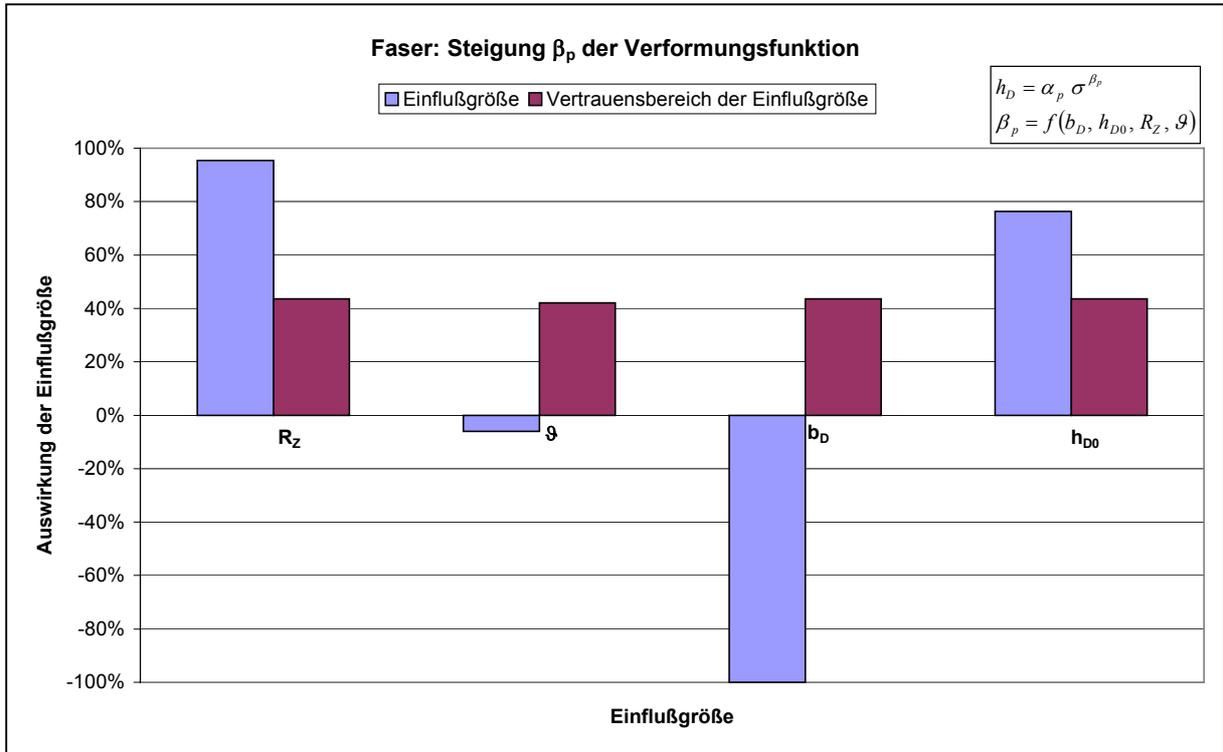
Anhang 27.11: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte –



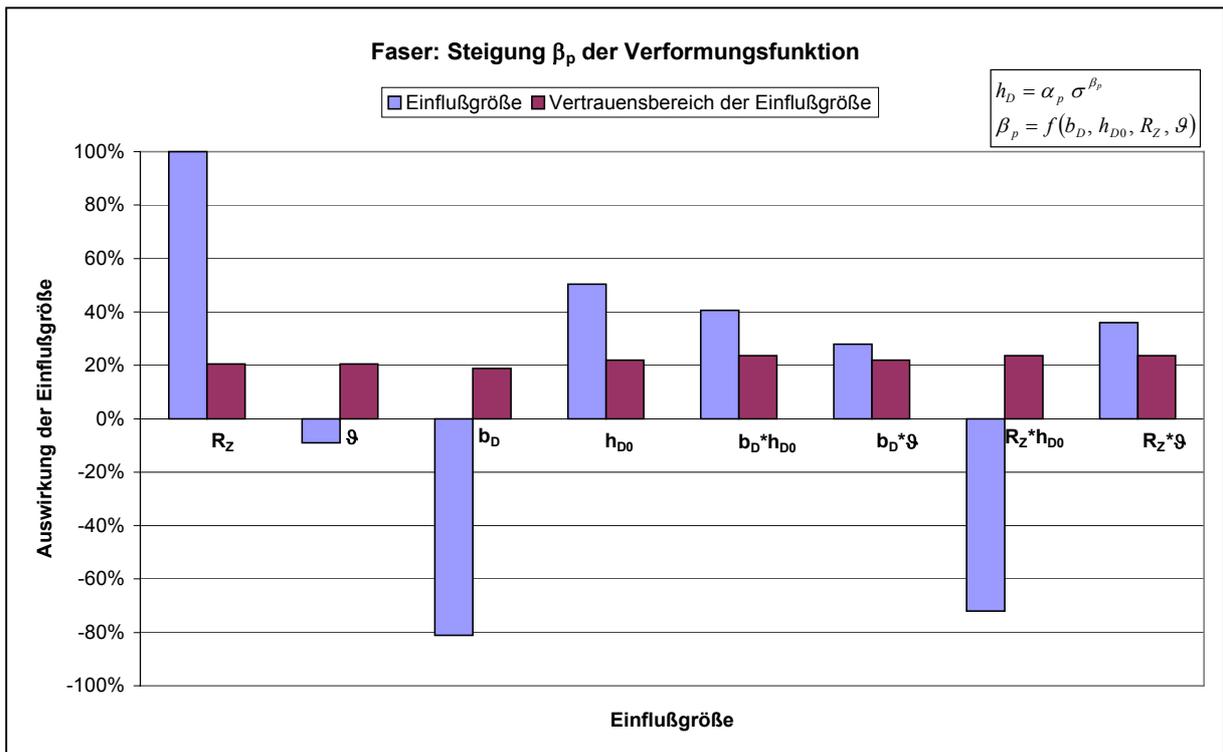
Anhang 27.12: Effekte der Einflußgrößen auf den Dickenkoeffizienten α_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



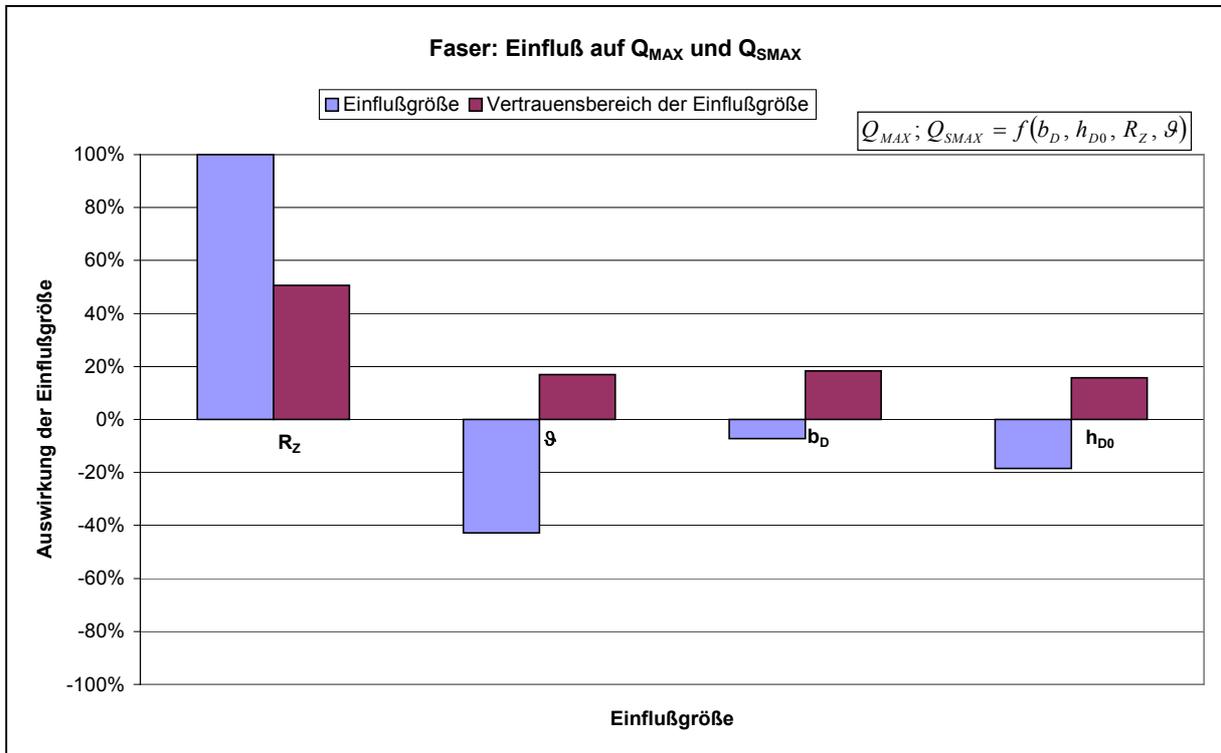
Anhang 27.13: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte –



Anhang 27.14: Effekte der Einflußgrößen auf die Steigung β_p der Verformungsfunktion von Faser; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



Anhang 28: Effekte der Einflußgrößen auf Q_{MAX} und Q_{SMAX} Faser; – Haupteffekte –



Anhang 29.1: Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – ePTFE –

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_Z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Q_A [N/mm^2]	C [kN/mm]	Q_R [N/mm^2]
10	4	160	250	60	150	20,2
10	4	160	150	110	150	53,5
20	4	6	150	60	500	23,4
15	2	160	150	110	500	68,0
20	1	160	250	110	1000	92,2
10	4	6	20	60	1000	40,1
10	1	6	150	20	1000	8,0
10	1	160	250	60	1000	47,0
10	4	160	20	60	500	51,2
10	4	6	150	110	500	27,0
20	1	160	20	20	500	17,7
20	1	6	250	60	150	52,6
20	4	60	150	20	150	16,0
20	4	60	150	20	150	15,7
20	1	6	250	110	500	82,1
10	2	60	20	20	500	15,7
15	4	160	20	20	150	17,7
10	1	6	250	20	500	8,7
20	4	6	250	20	500	4,8
20	1	6	20	20	150	19,5
20	2	160	150	20	1000	7,2
20	4	6	150	110	1000	27,8
20	2	160	20	60	1000	50,3
10	4	6	20	110	150	101,8
10	1	60	150	60	500	53,6
20	1	160	150	60	150	57,9
10	1	160	150	20	150	14,1
15	4	160	250	110	500	26,1
15	1	6	20	110	1000	108,2
10	1	60	250	110	150	91,5
10	4	60	150	20	150	8,1
10	4	60	150	20	150	8,0
20	4	60	150	60	150	41,7
20	4	60	150	60	150	41,3
20	4	60	150	60	150	41,5
20	4	60	150	60	150	40,9
20	4	60	150	60	150	39,3

Anhang 29.2: Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – PTFE –

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_Z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Q_A [N/mm^2]	C [kN/mm]	Q_R [N/mm^2]
10	4	160	250	60	150	13,0
10	4	160	150	110	150	35,2
20	4	6	150	60	500	18,2
15	2	160	150	110	500	73,9
20	1	160	250	110	1000	98,0
10	4	6	20	60	1000	32,3
10	1	6	150	20	1000	9,9
10	1	160	250	60	1000	38,8
10	4	160	20	60	500	36,7
10	4	6	150	110	500	35,8
20	1	160	20	20	500	19,7
20	1	6	250	60	150	49,6
20	4	60	150	20	150	13,1
20	4	60	150	20	150	13,4
20	1	6	250	110	500	70,0
10	2	60	20	20	500	16,9
15	4	160	20	20	150	18,1
10	1	6	250	20	500	8,2
20	4	6	250	20	500	4,1
20	1	6	20	20	150	19,7
20	2	160	150	20	1000	11,5
20	4	6	150	110	1000	22,4
20	2	160	20	60	1000	55,3
10	4	6	20	110	150	80,5
10	1	60	150	60	500	47,9
20	1	160	150	60	150	58,1
10	1	160	150	20	150	14,0
15	4	160	250	110	500	18,4
15	1	6	20	110	1000	96,5
10	1	60	250	110	150	74,4
20	4	60	150	60	150	29,7
10	4	60	150	20	150	7,9
20	4	60	150	60	150	31,1
10	4	60	150	20	150	8,4
15	4	6	20	110	1000	51,7

Anhang 29.3: Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – Graphit –

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_Z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Q_A [N/mm^2]	C [kN/mm]	Q_R [N/mm^2]
10	1	160	20	110	500	109,6
15	4	160	20	20	150	19,6
20	1	160	150	60	150	58,9
10	4	160	150	110	150	106,9
10	1	60	250	110	150	108,4
10	2	6	150	60	150	57,8
10	2	6	150	60	150	58,3
10	4	160	150	20	500	16,8
10	4	6	250	20	150	16,8
20	4	6	20	60	150	59,5
20	4	6	20	20	1000	19,4
10	4	160	150	20	500	16,8
20	1	160	250	110	1000	101,8
20	1	60	250	20	1000	16,0
20	4	6	150	110	1000	103,3
20	4	60	20	110	500	109,7
10	1	160	20	20	1000	19,5
20	4	160	250	60	1000	52,6
20	2	160	250	20	150	18,7
10	2	6	250	110	1000	98,5
10	4	6	250	60	500	54,1
10	1	160	20	110	500	109,5
20	2	160	20	60	1000	59,1
20	1	6	20	20	150	19,9
15	4	160	150	60	1000	53,9
20	4	6	250	20	500	16,6
20	1	6	150	110	150	109,5
20	1	160	250	60	500	56,5
10	4	6	20	60	1000	58,5
20	1	6	150	20	500	18,0
15	1	6	20	60	500	59,7

Anhang 29.4: Versuchsprogramm für Kriech-Relaxationsversuche mit Angabe der Restflächenpressung Q_R – Faser –

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_Z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Q_A [N/mm^2]	C [kN/mm]	Q_R [N/mm^2]
15	1	6	20	110	1000	106,5
10	4	6	250	20	150	6,9
10	1	6	250	20	500	8,6
20	4	60	150	20	150	17,4
20	4	60	150	20	150	17,0
10	2	6	150	60	150	47,9
10	2	6	150	60	150	47,2
10	2	60	20	20	500	18,5
20	1	60	250	20	1000	8,8
15	4	6	150	20	1000	8,5
20	4	6	150	60	500	35,2
10	4	160	20	110	1000	92,1
10	4	160	20	60	500	51,5
20	4	6	20	60	150	57,9
20	4	6	20	20	1000	17,3
15	1	6	20	60	500	58,9
10	1	160	150	110	1000	84,8
10	4	6	150	110	500	25,1
10	1	160	150	20	150	17,1
20	1	6	250	110	500	70,5
10	1	60	20	60	150	58,7
10	1	160	250	60	1000	23,9
20	2	160	250	20	150	16,2
20	1	160	20	20	500	19,4
10	2	6	250	110	1000	9,4
15	4	160	250	110	500	45,4
20	1	160	20	110	150	109,5
20	1	6	150	60	1000	50,7
20	4	6	250	110	150	50,2
20	1	160	250	60	500	49,2
20	4	160	150	110	500	83,6
20	4	160	250	60	1000	14,6

Anhang 30: Einflußgrößen und Ergebnisse der Prüfstandvalidierung mit Angabe der Meßunsicherheit für Kriech-Relaxationsversuche

Prüfstand	b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Q_A [N/mm^2]	C [kN/mm]	Q_R [MPa]
FH-Münster	20	4	60	150	60	150	39,3
FH-Münster	20	4	60	150	60	150	40,9
amtec	20	4	60	150	60	150	39,0
FH-Münster	10	4	60	150	20	150	8,1
FH-Münster	10	4	60	150	20	150	8,0
amtec	10	4	60	150	20	150	8,6

Meßunsicherheit des Prüfstandes:

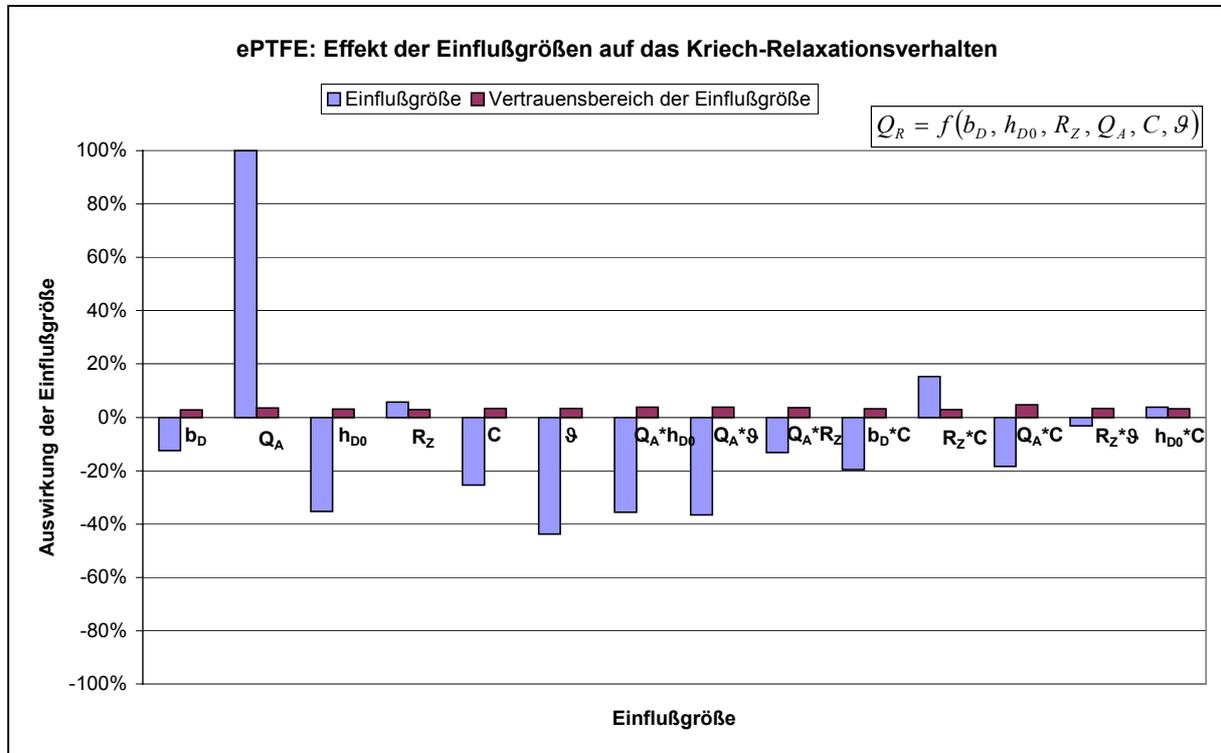
Dichtungstyp	b_D [mm]	h_{D0} [mm]	R_z [μm]	ϑ [$^{\circ}\text{C}$]	Q_A [MPa]	C [kN/mm]	Q_R [MPa]
ePTFE	20	4	60	150	60	150	40,9
ePTFE	20	4	60	150	60	150	39,3
ePTFE	20	4	60	150	60	150	41,7
ePTFE	20	4	60	150	60	150	41,3
ePTFE	20	4	60	150	60	150	41,5

Mittelwert von Q_R:	40,9 MPa
Standardabweichung von Q_R:	1,0 MPa

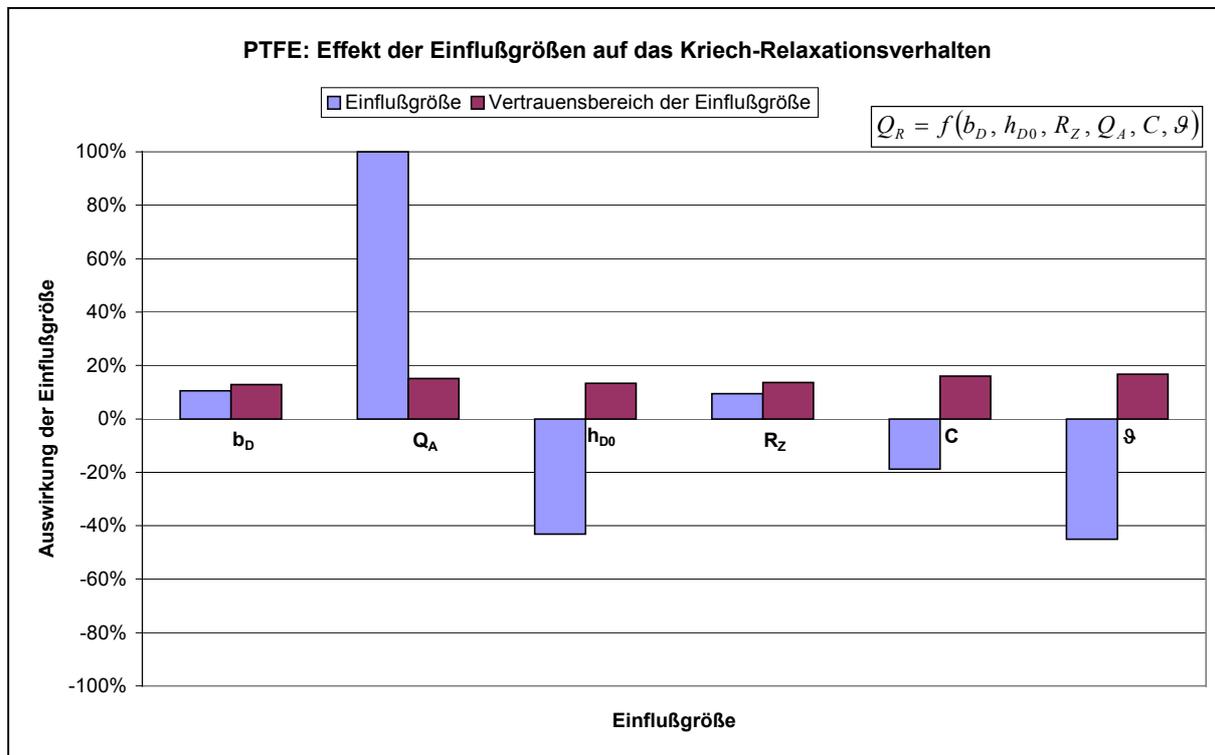
Anhang 31: Kennfunktionen für die Berechnung der Restflächenpressung nach Abschluß der Kriech-Relaxation Q_R .

Dichtungsart	Gleichung für die Restflächenpressung Q_R
ePTFE	$Q_R = 45,29 + 33,43 Q_A - 8,51 C - 4,16 b_D - 11,77 h_D + 1,91 R_Z - 14,64 \vartheta$ $- 11,90 Q_A h_D - 12,23 Q_A T - 4,43 Q_A R_Z - 6,54 b_D C + 5,10 R_Z C$ $- 6,17 Q_A C - 1,07 R_Z \vartheta + 1,27 h_D C$
Vertrauensbereich	$Q_R = \pm 0,83 \pm 1,15 Q_A \pm 1,10 C \pm 0,94 b_D \pm 1,02 h_D \pm 0,98 R_Z \pm 1,11 \vartheta$ $\pm 1,27 Q_A h_D \pm 1,28 Q_A T \pm 1,24 Q_A R_Z \pm 1,08 b_D C \pm 0,99 R_Z C$ $\pm 1,55 Q_A C \pm 1,11 R_Z \vartheta \pm 1,09 h_D C$
PTFE	$Q_R = (5,73 + 2,36 Q_A - 0,46 C + 0,08 b_D - 1,22 h_D + 0,33 R_Z - 1,14 \vartheta$ $- 0,56 Q_A h_D - 0,48 h_D T + 0,39 C R_Z - 0,34 Q_A \vartheta - 0,27 b_D C - 0,23 h_D R_Z$ $- 0,31 C \vartheta - 0,28 h_D C + 0,22 b_D \vartheta)^2$
Vertrauensbereich	$Q_R = \pm 0,16 \pm 0,16 Q_A \pm 0,16 C \pm 0,16 b_D \pm 0,16 h_D \pm 0,16 R_Z \pm 0,16 \vartheta$ $\pm 0,20 Q_A h_D \pm 0,20 h_D T \pm 0,19 C R_Z \pm 0,25 Q_A \vartheta \pm 0,17 b_D C \pm 0,17 h_D R_Z$ $\pm 0,27 C \vartheta \pm 0,24 h_D C \pm 0,20 b_D \vartheta$
Faser	$Q_R = 44,54 + 33,22 Q_A - 6,39 C + 8,22 b_D - 9,94 h_D + 5,64 R_Z - 19,4 \vartheta$ $- 7,37 Q_A \vartheta + 5,48 Q_A R_Z + 7,43 b_D C - 6,88 h_D \vartheta - 10,60 C \vartheta - 4,90 Q_A h_D$ $+ 4,02 R_Z C + 1,03 h_D R_Z + 2,21 b_D h_D - 3,53 h_D C + 1,80 R_Z \vartheta + 1,47 b_D Q_A$
Vertrauensbereich	$Q_R = \pm 0,75 \pm 1,16 Q_A \pm 1,20 C \pm 0,80 b_D \pm 0,88 h_D \pm 0,94 R_Z \pm 0,82 \vartheta$ $\pm 1,19 Q_A \vartheta \pm 1,37 Q_A R_Z \pm 1,24 b_D C \pm 1,09 h_D \vartheta \pm 1,20 C \vartheta \pm 1,27 Q_A h_D$ $\pm 1,23 R_Z C \pm 1,04 h_D R_Z \pm 0,97 b_D h_D \pm 1,37 h_D C \pm 1,02 R_Z \vartheta \pm 1,06 b_D Q_A$

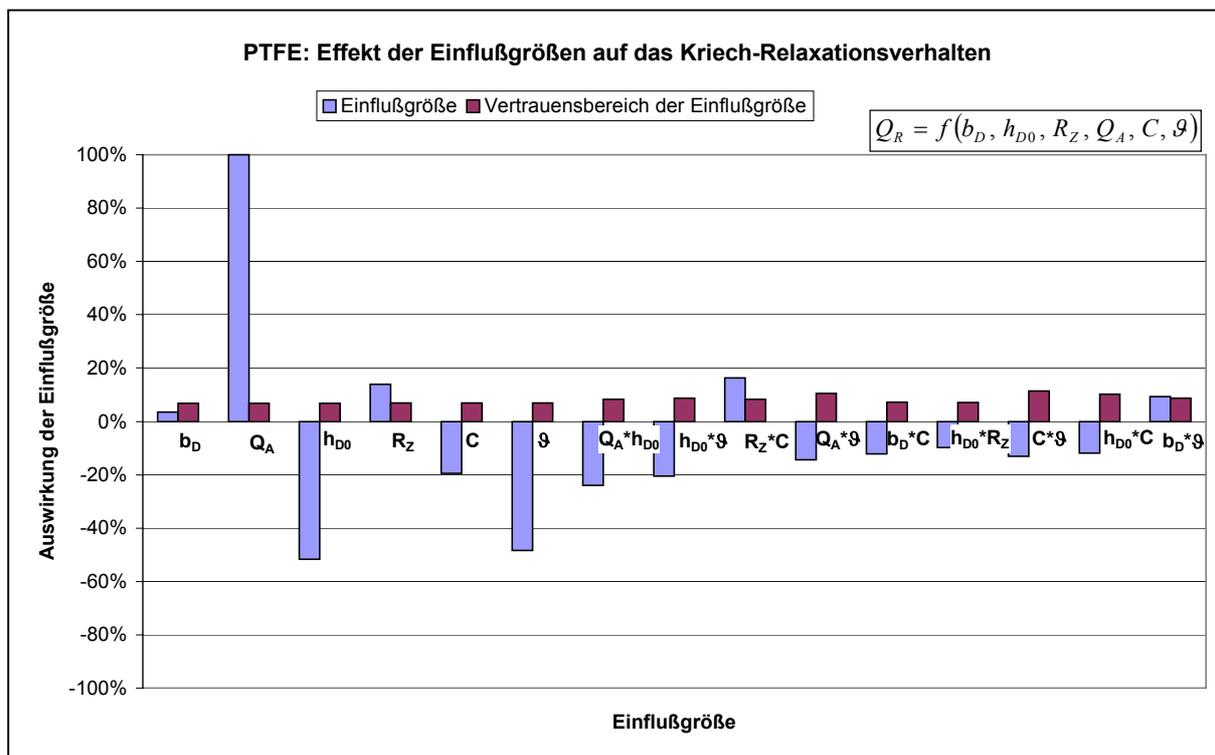
Anhang 32.1: Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von ePTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



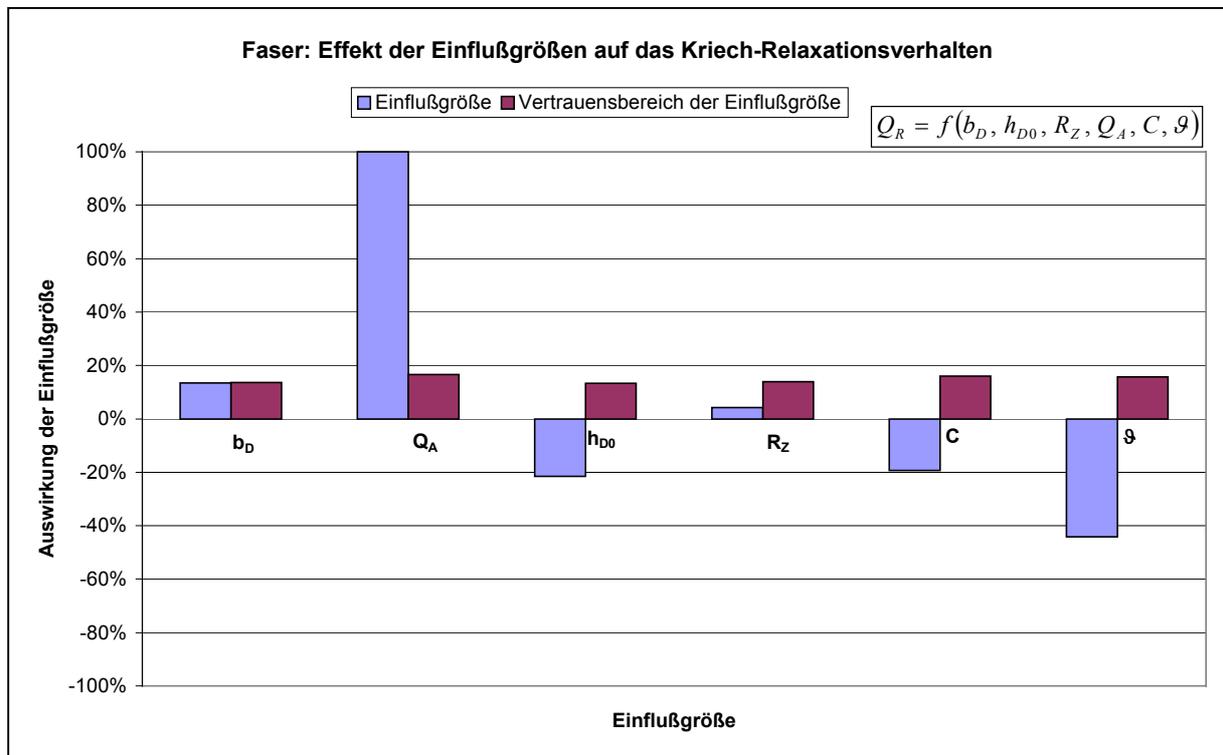
Anhang 32.2: Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von PTFE; – Haupteffekte –



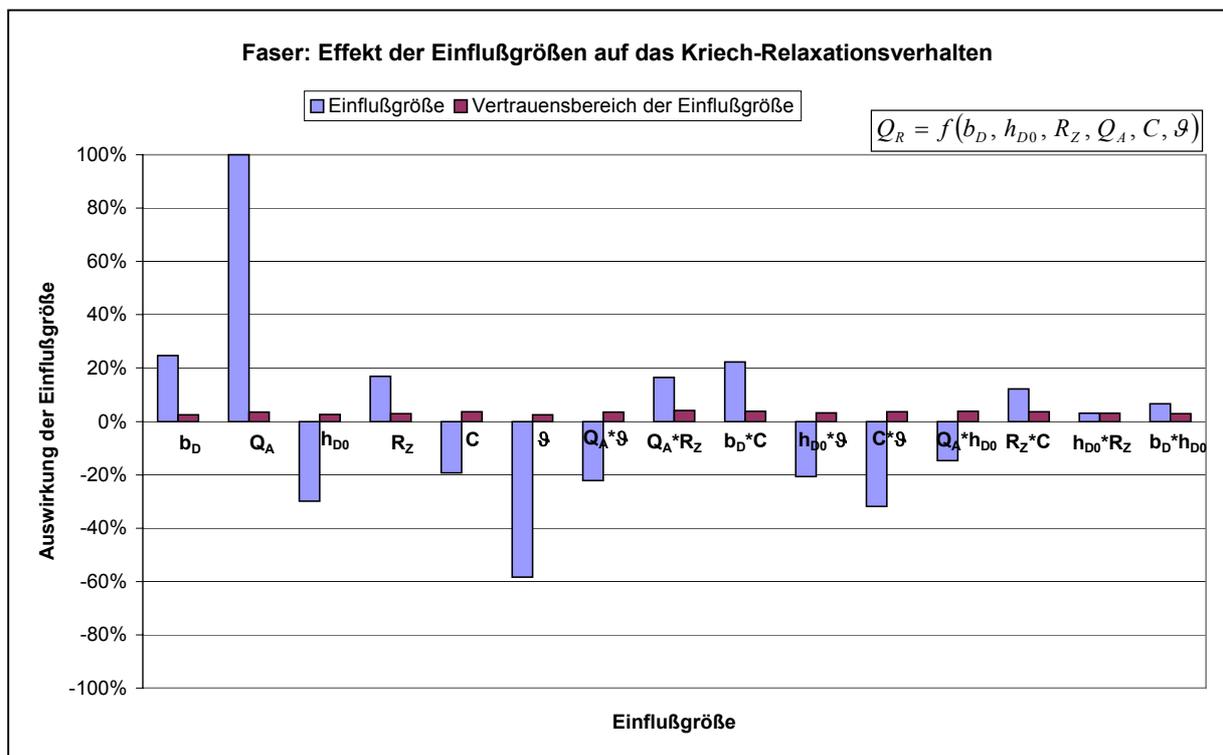
Anhang 32.3: Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von PTFE; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



Anhang 32.4: Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von Faser; – Haupteffekte –



Anhang 32.5: Effekte der Einflußgrößen auf das Kriech-Relaxationsverhalten Q_R von Faser; – Haupteffekte und Wechselwirkungen –



**Anhang 33.1: Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen für das Leckageverhalten
inkl. der Versuchsergebnisse, die außerhalb des Meßbereichs des
verwendeten Prüfstands lagen – ePTFE –**

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	p_i [bar]	R_z [µm]	Belastung		Entlastung	
				Leckage- koeffizient α_e [mg/(s·m)]	Steigung β_e	Leckage- koeffizient α_e [mg/(s·m)]	Steigung β_e
15	2	40	6	9,0	-0,259	1,8	-0,176
10	1	40	60	6,0	-0,236	1,0	-0,156
20	4	40	60	10,0	-0,260	1,9	-0,176
20	1	10	160	2,1	-0,125	1,1	-0,090
10	2	10	160	8,3	-0,144	1,4	-0,075
20	1	10	160	Dichtungs- dicke zu gering			
10	4	20	6	10,0	-0,251	1,3	-0,152
15	4	40	160	380,0	-0,278	11,5	-0,135
20	2	40	160	260,0	-0,260	16,1	-0,131
10	4	10	160	8,2	-0,198	5,3	-0,158
20	1	40	6	4,0	-0,286	0,8	-0,185
20	2	10	6	0,7	-0,242	0,4	-0,183
20	4	20	160	21,0	-0,251	4,8	-0,173
10	1	10	6	1,2	-0,229	0,6	-0,179
10	4	40	6	22,0	-0,251	3,6	-0,166
15	1	20	160	60,0	-0,234	7,9	-0,145
20	1	40	6	4,1	-0,284	0,6	-0,179
10	1	40	160	Dichtungs- dicke zu gering			
10	4	40	160	250,0	-0,253	15,4	-0,146
15	4	10	60	3,0	-0,241	0,7	-0,162
20	4	10	6	1,9	-0,227	0,8	-0,173
20	4	10	6	1,6	-0,230	0,7	-0,173
20	4	10	6	2,0	-0,244	1,2	-0,200
20	4	10	6	3,2	-0,224	1,1	-0,160
20	4	10	6	2,5	-0,265	1,0	-0,190

**Anhang 33.2: Versuchsprogramm mit Angabe der Zielgrößen für das Leckageverhalten
inkl. der Versuchsergebnisse, die außerhalb des Meßbereichs des
verwendeten Prüfstands lagen – Graphit –**

b_D [mm]	h_{D0} [mm]	p_i [bar]	R_z [μm]	Belastung		Entlastung	
				Leckage- koeffizient α_p [mg/(s·m)]	Steigung β_p	Leckage- koeffizient α_p [mg/(s·m)]	Steigung β_p
10	4	10	160	9074,0	-2,649	15915,0	-2,780
10	1	10	6	1,1	-1,684	0,3	-1,220
20	4	40	60	3,5	-1,460	1,0	-0,966
20	2	40	160	Rauhigkeit zu groß			
20	1	10	160	Rauhigkeit zu groß			
15	2	40	6	3,3	-1,706	0,8	-1,147
20	1	20	6	1,3	-1,894	0,3	-1,333
10	1	40	6	1,3	-1,734	0,4	-1,292
20	1	20	6	1,4	-1,907	0,2	-1,250
10	1	40	60	3,6	-1,848	0,9	-1,320
10	4	10	160	Rauhigkeit zu groß			
20	4	40	6	3,9	-1,502	1,5	-1,003
20	4	10	160	Rauhigkeit zu groß			
10	1	40	160	Rauhigkeit zu groß			
10	4	40	6	9,2	-1,494	2,2	-0,963
20	4	40	6	4,1	-1,533	1,1	-1,020
10	2	10	60	2,6	-1,627	0,7	-1,111
20	1	40	160	Rauhigkeit zu groß			
15	1	20	160	Rauhigkeit zu groß			
15	4	10	60	2,0	-1,687	0,4	-1,053
10	4	40	160	Rauhigkeit zu groß			
20	2	10	6	1,2	-1,724	0,2	-1,094
15	4	10	60	1,1	-1,439	0,3	-0,948

Anhang 34: Kennfunktionen und Konstanten der Leckagefunktion

Anhang 34.1: Steigung β für ePTFE und Graphit; – Belastung –

Dichtungsart	Steigung	Standardabweichung
ePTFE	-0,251	0,020
Graphit	-1,660	0,158

Anhang 34.2: Steigung β für ePTFE und Graphit; – Entlastung –

Dichtungsart	Steigung	Standardabweichung
ePTFE	-0,170	0,012
Graphit	-1,123	0,138

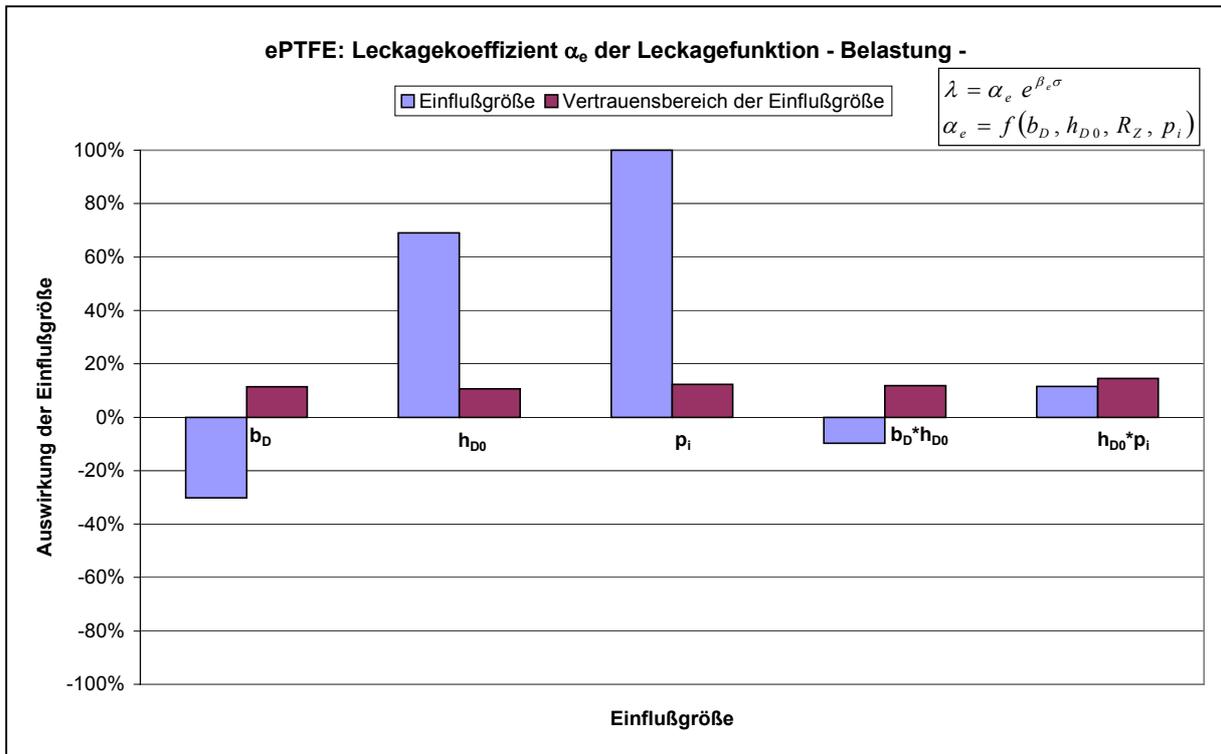
Anhang 34.3: Kennfunktion für den Leckagekoeffizienten α ; – Belastung –

Dichtungsart	Gleichung für den Leckagekoeffizienten α der Belastung [mg/(s·m)]
ePTFE	$\alpha_e = 2,394 - 0,286 b_D + 0,655 h_{D0} + 0,948 p_i - 0,093 b_D h_{D0} + 0,109 h_{D0} p_i$
Vertrauensbereich	$\alpha_e = \pm 0,093 \pm 0,108 b_D \pm 0,101 h_{D0} \pm 0,116 p_i \pm 0,112 b_D h_{D0} \pm 0,137 h_{D0} p_i$
Graphit	$\alpha_p = 2,936 - 1,032 b_D + 1,255 h_{D0} + 1,316 p_i - 1,127 b_D p_i + 1,021 h_{D0} p_i$
Vertrauensbereich	$\alpha_p = \pm 0,222 \pm 0,241 b_D \pm 0,260 h_{D0} \pm 0,272 p_i \pm 0,309 b_D p_i \pm 0,319 h_{D0} p_i$

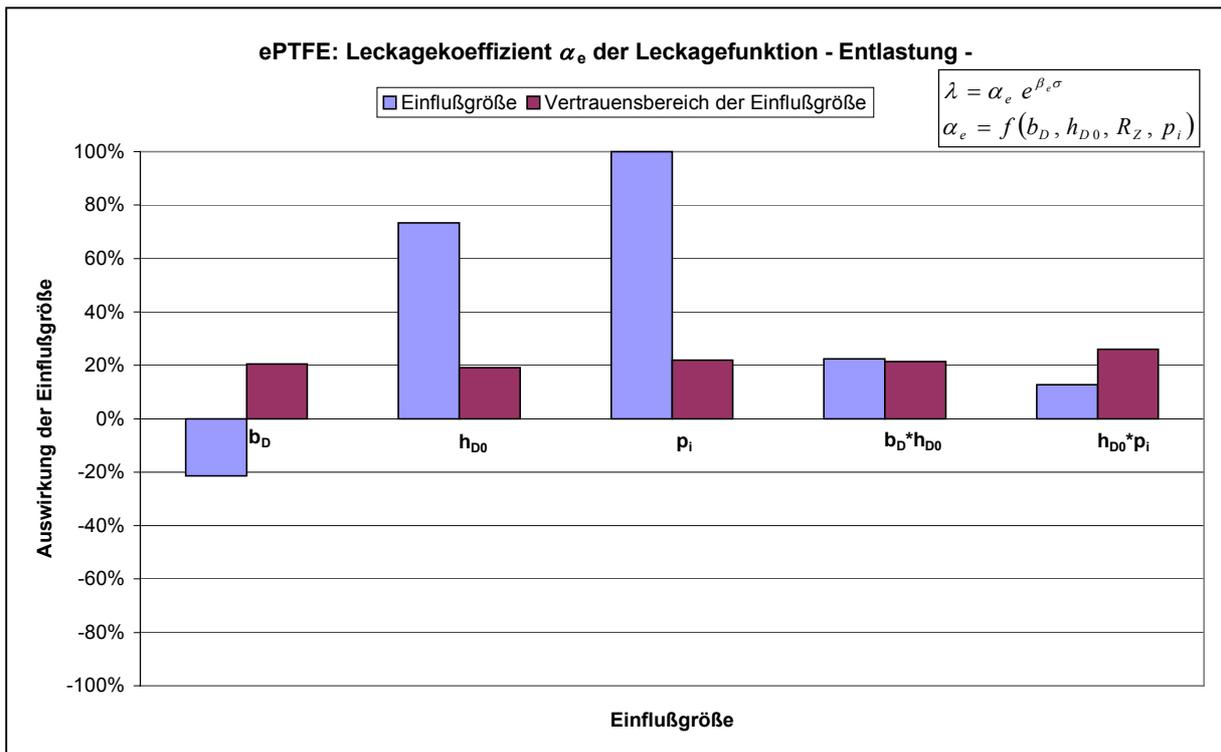
Anhang 34.4: Kennfunktion für den Leckagekoeffizienten α – Entlastung –

Dichtungsart	Gleichung für den Leckagekoeffizienten α der Entlastung [mg/(s·m)]
ePTFE	$\log \alpha_e = 0,019 - 0,054 b_D + 0,185 h_{D0} + 0,252 p_i + 0,057 b_D h_{D0} + 0,032 h_{D0} p_i$
Vertrauensbereich	$\alpha_e = \pm 0,044 \pm 0,052 b_D \pm 0,048 h_{D0} \pm 0,055 p_i \pm 0,054 b_D h_{D0} \pm 0,065 h_{D0} p_i$
Graphit	$\log \alpha_p = -0,219 - 0,095 b_D + 0,134 h_{D0} + 0,260 p_i + 0,054 b_D h_{D0} + 0,085 h_{D0} p_i$
Vertrauensbereich	$\alpha_p = \pm 0,059 \pm 0,062 b_D \pm 0,067 h_{D0} \pm 0,068 p_i \pm 0,068 b_D h_{D0} \pm 0,078 h_{D0} p_i$

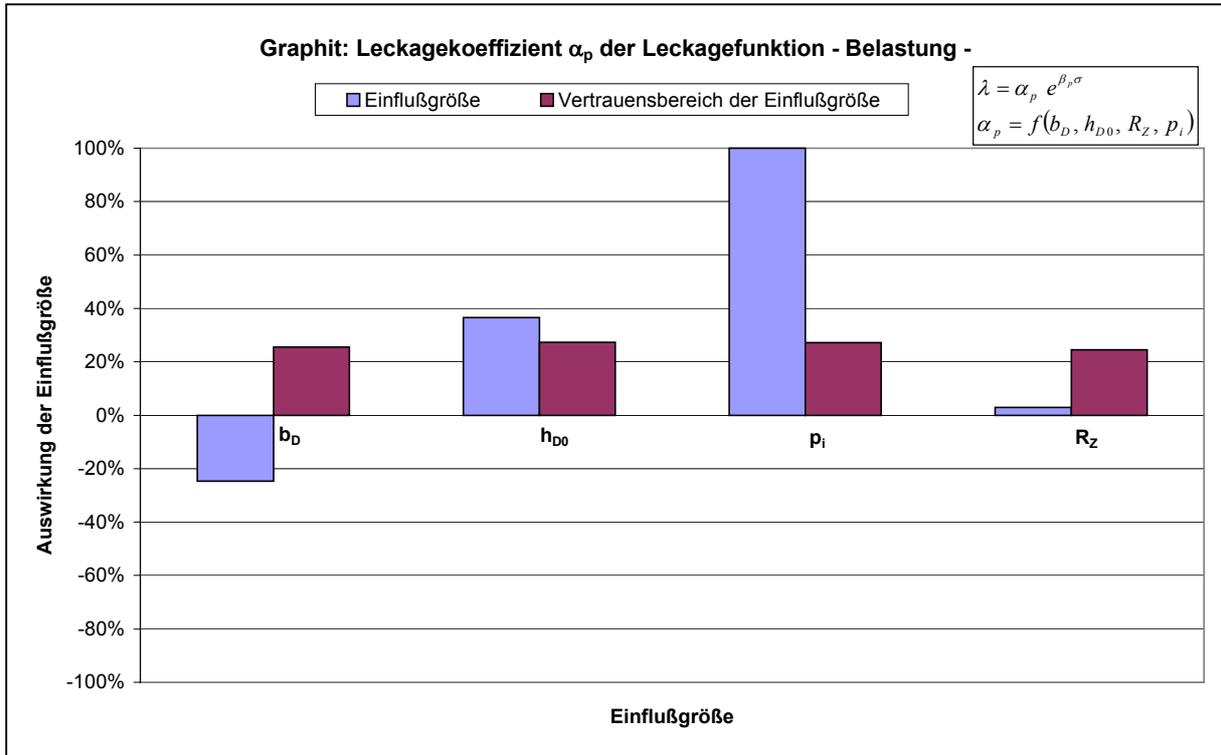
Anhang 35.1: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e der Leckagefunktion von ePTFE; – Belastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –



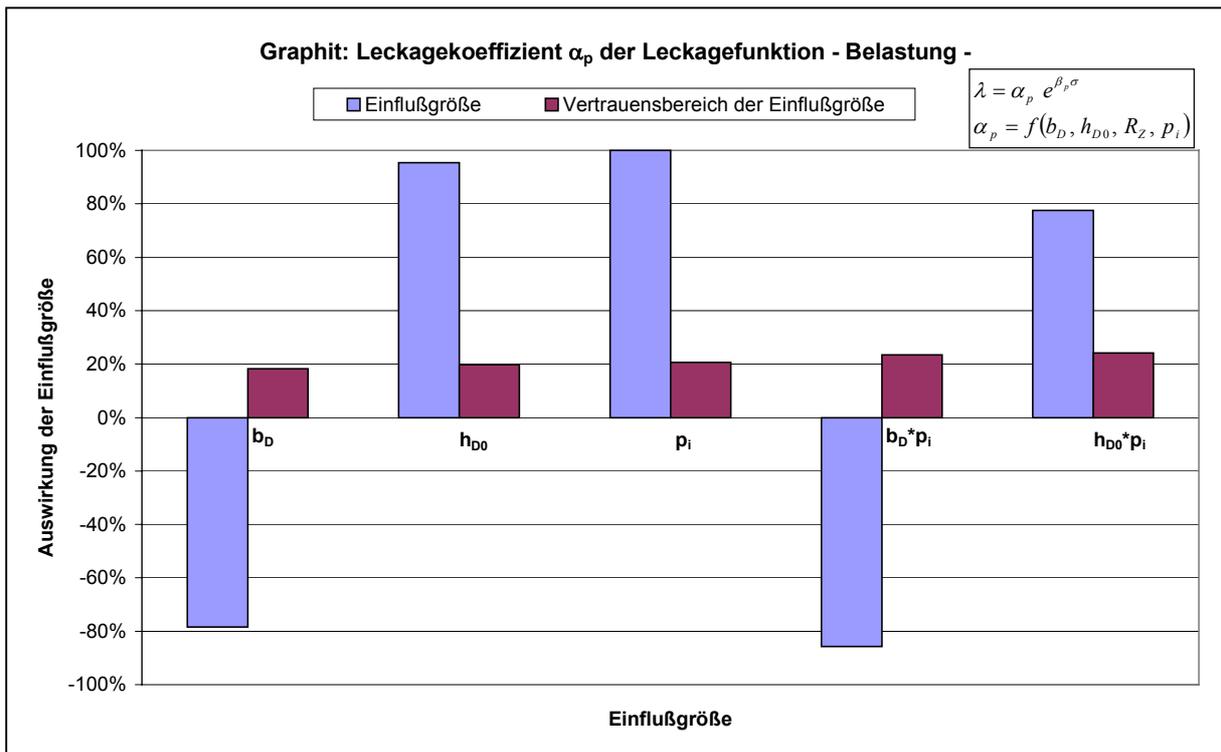
Anhang 35.2: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_e der Leckagefunktion von ePTFE; – Entlastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –



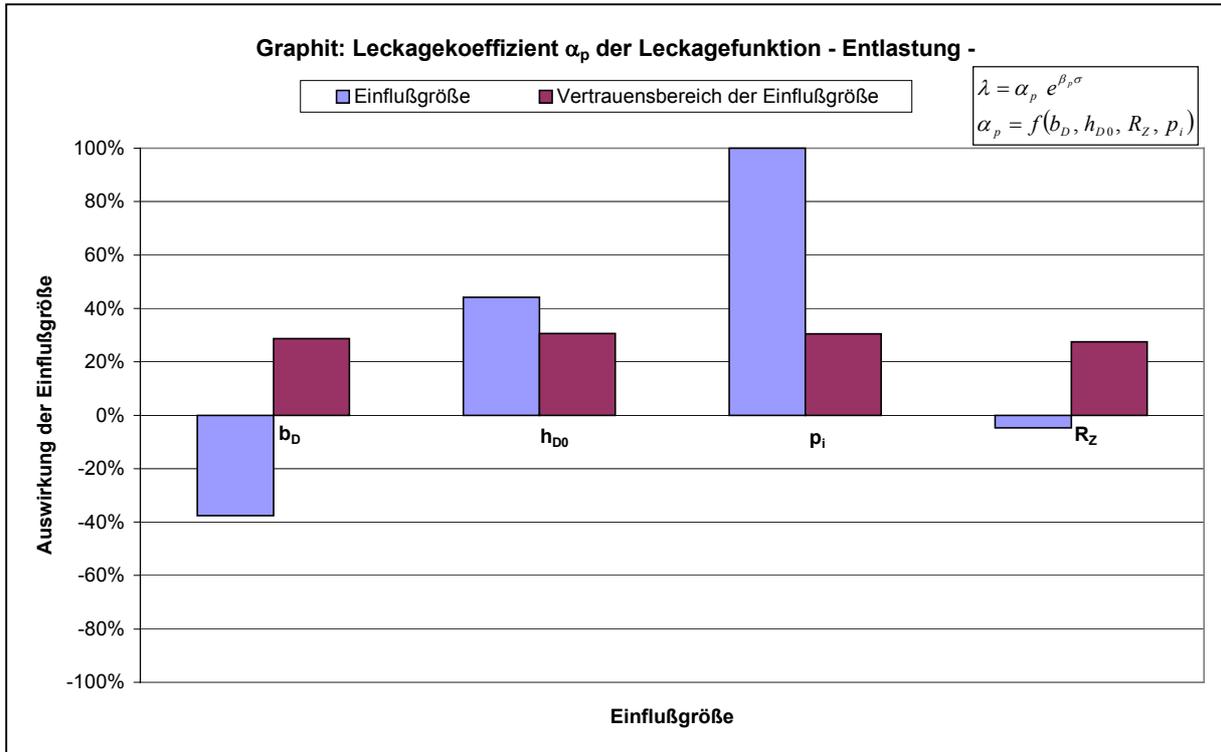
Anhang 35.3: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Belastung; Haupteffekte –



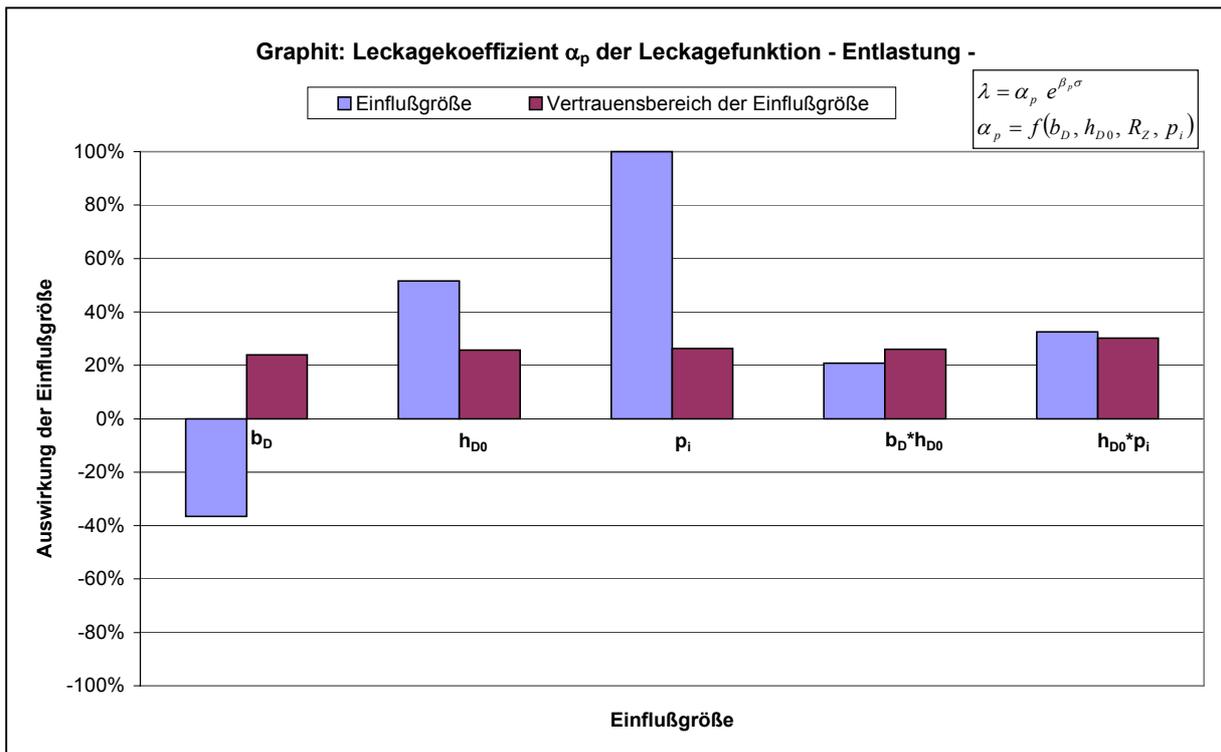
Anhang 35.4: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Belastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –



Anhang 35.5: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Entlastung; Haupteffekte –



Anhang 35.6: Effekte der Einflußgrößen auf den Leckagekoeffizienten α_p der Leckagefunktion von Graphit; – Entlastung; Haupteffekte und Wechselwirkungen –



**Lebenslauf von
Alexander Riedl**

11.02.2002

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 23.10.1966
Geburtsort: München

Ausbildung

09/72 – 07/81 Grund- und Hauptschule Kirchseeon mit Abschluß „Qualifizierender
Hauptschulabschluß“
09/81 – 02/85 Ausbildung als Maschinenschlosser bei R. Bosch GmbH München
02/85 – 02/86 Ausbildung als Elektrogerätemechaniker bei R. Bosch GmbH München
09/90 – 07/92 Technikerschule München mit Abschluß „Staatlich geprüfter
Maschinenbautechniker“
09/92 – 07/93 Fachoberschule Wasserburg mit Abschluß „Fachhochschulreife“

Berufliche Tätigkeit

02/86 – 09/90 Elektromaschinenschlosser bei R. Bosch GmbH München
02/99 – 06/99 Fertigungsplaner bei R. Bosch GmbH München
04/97 – dato Versuchsingenieur und Produktspezialist bei der W.L. Gore & Associates
GmbH Putzbrunn/München

Studium

10/93 – 03/97 Studium der Feinwerk- und Mikrotechnik an der FH-München
05/98 – 07/99 Erfüllung der Zulassungsvoraussetzung zur Promotion an der
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
07/99 – dato Promotion an der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg