

# **Strategie zur Verminderung von Emissionen aus Flanschverbindungen**

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

Vorgelegt von

**Dipl.-Phys. Manfred Schaaf**

geboren in Heilbronn

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas

Tag der mündlichen Prüfung: 30.04.2015

Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart

2015



## Vorwort

Die hier vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Firma amtec Messtechnischer Service GmbH und als Mitglied verschiedener Arbeitsgremien des europäischen Normenausschusses TC 74 "Flansche und ihre Verbindungen". Die wissenschaftliche Betreuung wurde vom Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) der Universität Stuttgart übernommen.

Mein besonderer Dank gilt dem ehemaligen Direktor der MPA Universität Stuttgart Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. E. Roos, der mich auch nach seiner Emeritierung bei meiner Arbeit stets unterstützt und gefördert hat.

Für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Mitberichtes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. W. Haas sehr herzlich.

Den Kollegen in den Normungsgremien danke ich für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen, die letztendlich die Motivation für meine Arbeit darstellten. Allen voran darf ich hier Herrn Dr.-Ing. H. Kockelmann erwähnen, der mir immer ein wertvoller Diskussionspartner war.

Dankbar bin ich auch allen Kollegen bei amtec, die mich bei den experimentellen Untersuchungen tatkräftig unterstützt haben. Für das Zugeständnis der zeitlichen und fachlichen Möglichkeiten, ohne die ein Gelingen der Arbeit nicht möglich gewesen wäre, danke ich unserem "Direktor", Herrn Dipl.-Phys. F. Schöckle.

Nicht vergessen darf ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. J. Bartonicek, der mich mit seiner unermüdlichen Art immer wieder antrieb. Herzlichen Dank für deine immer währende Diskussionsbereitschaft und deine wertvollen Impulse!

Meiner Frau Viola danke ich für die hingenommenen Entbehrungen, ihre Geduld und ihre treue Unterstützung. Zu guter Letzt danke ich meinem Sohn Marcus, der auch seinen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet hat.

Neckarwestheim, April 2015



## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen .....	7
Zusammenfassung .....	16
Abstract .....	19
1 Einleitung .....	22
2 Zielsetzung.....	28
3 Stand von Wissenschaft und Technik .....	30
3.1 Berechnungsverfahren .....	30
3.2 Dichtungskennwerte .....	33
3.3 Anforderungen an die Dichtheit von Flanschverbindungen .....	39
3.4 Montage der Verbindung und Absicherung der Dichtheit im Betrieb .....	42
4 Bewertung des Kenntnisstandes zur Auslegung von Flanschverbindungen ..	45
4.1 Abdichtverhalten und zulässige Emissionen.....	45
4.2 Voraussetzungen für die Begrenzung von Emissionen .....	46
4.3 Belastungen der Flanschverbindung .....	47
4.4 Auswahl der geeigneten Konstruktion .....	47
4.5 Dichtungen und Dichtungskennwerte .....	48
4.5.1 Beständigkeit der Dichtungen .....	49
4.5.2 Dichtungstypen und –abmessungen.....	50
4.5.3 Dichtungskennwerte .....	50
4.5.4 Qualitätssicherung bei den Herstellern .....	52
4.6 Dichtheits- und Festigkeitsnachweis .....	52
4.6.1 Dichtheitsnachweis .....	53
4.6.2 Festigkeitsnachweis.....	54
5 Prüfeinrichtung zur Kennwertermittlung .....	56
5.1 Multifunktionsprüfeinrichtung TEMES <sub>fl.ai1</sub> .....	56
5.2 Kompensationskurven .....	60
5.3 Optimierung der Leckageratenmessung mit Massenspektrometern .....	61
5.4 Leckageratenmessung mit Flammen-Ionisationsdetektoren.....	63
5.5 Leckageratenmessung unter Temperatur.....	64
5.6 Ermittlung der Reibungskoeffizienten .....	65
6 Ermittlung der Kennwerte für Dichtungen im Krafthauptschluss .....	68

---

6.1	Stauchversuch .....	68
6.2	Druckstandversuch .....	73
6.3	Kriech-/Relaxationsversuch .....	81
6.4	Leckageversuch.....	88
6.5	Reibversuch.....	94
6.6	Ausblasversuch .....	98
7	Analytisches Verfahren für Festigkeits- und Dichtheitsnachweise .....	103
7.1	Elastizitäten der Bauteile .....	104
7.2	Dehnhülsen.....	107
7.3	Effektive Breite der Dichtung .....	108
7.4	Kräfte und Momente .....	115
7.5	Kriech-/Relaxationsverhalten der Dichtung.....	122
7.6	Dichtheitsnachweis .....	124
7.7	Ausblaussicherheit.....	128
7.8	Festigkeitsnachweis.....	129
8	Exemplarische Verifikation mit Finite Elemente Analyse .....	131
8.1	Modellaufbau und Elementierung .....	132
8.2	Kopplung der Teilmodelle .....	133
8.3	Externe kinematische Randbedingungen .....	134
8.4	Belastungen.....	135
8.5	Werkstoffe.....	136
8.6	Ergebnisse.....	137
9	Schlussfolgerungen.....	145
10	Literaturverzeichnis .....	151

## Abkürzungen und Formelzeichen

### Abkürzungen

AD	Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ATV-MB	Merkblatt der Abwassertechnischen Vereinigung e. V.
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschriften
BRITE	Basic Research in Industrial Technologies for European Research
EURAM	and Technological Development Program in the Fields of Industrial Manufacturing Technologies and Advanced Materials
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BvT	Merkblätter zur Besten verfügbaren Technik
CH <sub>4</sub>	Methan
CEN	Comité Européen de Normalisation
DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Nennweite (Diameter Nominal)
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency
FA	Dichtung aus Faserwerkstoff
FEM	Finite Elemente Methode
FID	Flammen-Ionisationsdetektor
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GR	Dichtung aus Grafitwerkstoff
He	Helium
IBC	Flachdichtung (inner bolt circle)
IED	Industrial Emission Directive 2010/75/EC
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control Directive 2008/1/EC
ISO	International Organization for Standardization
IVU-RL	Richtlinie 2008/1/EG zu Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
JWG	Joint Working Group
KHS	Krafthauptschluss
KNS	Kraftnebenschluss
KP	Kammprofilabdichtung

KS D	Kerntechnische Spezifikation Deutschland
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
L	Dichtheitsklasse
LDAR	Leak Detection and Repair
N <sub>2</sub>	Stickstoff
NBR	Nitril-Butadien-Kautschuk
PAS	Public Available Specification
PERL	Pressure Equipment, Reduction of Leak Rate Project
PN	Nennndruck (Pressure Nominale)
prEN	Entwurf einer Europäischen Norm
PTFE	Dichtung aus Polytetrafluorethylen
SFK	Störfall-Kommission
StörfallV	Störfallverordnung
SWG	Spiraldichtung
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TC	Technical Committee
TGL	Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen
TRAS	Technische Regeln für Anlagensicherheit
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
TRFL	Technische Regel für Rohrfernleitungen
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TS	Technical Specification
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WR	Wellringdichtung

## Indizes

B	Schraube (Bolt)
C	Kriechen der Dichtung (z. B. $\Delta e_{GC}$ )
D	äquivalenter Zylinder (konischer Ansatz + angeschlossene Schale) zur Berechnung der Belastungsgrenze
E	äquivalenter Zylinder (konischer Ansatz und angeschlossene Schale) zur Berechnung der Nachgiebigkeit
F	Flansch (Flange)
G	Dichtung (Gasket)
I	Kennzahl für den Belastungszustand I (mit den Werten 0, 1, 2 ...)
L	Losflansch (Loose Flange)



M	Moment
P	Druck
S	Schale (Shell)
W	Dehnhülse, Unterlegscheibe (Washer)
X, Y, Z	Koordinatenachsen
e	effektiv
max	Maximum
min	Minimum
nom	Nennwert
req	erforderlich (required)
0	Montagezustand ( $I = 0$ , siehe Index I)
t	theoretisch

### Sonderzeichen

~	Zeichen, das über den Symbolen für die Flanschparameter steht und sich auf den zweiten Flansch der Verbindung bezieht, der sich möglicherweise vom ersten Flansch unterscheidet
*	Zeichen, um zu kennzeichnen, dass es sich um aus Näherungsfunktionen ermittelte physikalische Größen handelt

### Formelzeichen

$A_1, A_2, A_3$	Koeffizienten der Terme im Zähler der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung der Verformungskurve $Q^*(\Delta e_G)$ , siehe Gl. (6.6)
$A_B$	Effektive Gesamtquerschnittsfläche aller Schrauben [ $\text{mm}^2$ ]
$A_F$	Querschnittsfläche des Flanschrings [ $\text{mm}^2$ ]
$A_G, A_{Ge}, A_{Gt}$	Dichtungsfläche, effektiv, theoretisch [ $\text{mm}^2$ ]
$B_1, B_2$	Koeffizienten der Terme im Nenner der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung der Verformungskurve $Q^*(\Delta e_G)$ , siehe Gl. (6.6)
C	Steifigkeit der Flanschverbindung im Kriech-/Relaxationsversuch [ $\text{kN/mm}$ ]
$C_1, C_2, C_3$	Koeffizienten der Terme im Zähler der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung des Ersatzelastizitätsmoduls $E_G^*(Q_A)$ , siehe Gl. (6.7)

$D_1, D_2$	Koeffizienten der Terme im Nenner der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung des Ersatzelastizitätsmoduls $E_G^*(Q_A)$ , siehe Gl. (6.7)
$E_1, E_2, E_3$	Koeffizienten der Terme im Zähler der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung der Verformungskurve $Q^*(\Delta e_G/e_G)$ , siehe Gl. (6.10)
$E_D$	Ersatzelastizitätsmodul der Dichtung nach DIN 28090 [MPa]
$E_F, E_B, E_L, E_W$	Elastizitätsmodul des mit dem entsprechenden Index bezeichneten Teils [MPa]
$E_G$	Ersatzelastizitätsmodul der Dichtung nach EN 13555 [MPa], siehe Gl. (6.8)
$F_1, F_2$	Koeffizienten der Terme im Zähler der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung der Verformungskurve $Q^*(\Delta e_G/e_G)$ , siehe Gl. (6.10)
$F_A$	äußere axiale Zusatzkraft [N], Zugkraft > 0, Druckkraft < 0, siehe Bild 7.10
$F_B$	Schraubenkraft (Summe aller Schrauben) [N]
$F_{B,FA}$	Schraubenkraft zum Abtragen der Axialkraft [N], siehe Gl. (7.24)
$F_{B,FL}$	Schraubenkraft zum Abtragen der Querkraft [N], siehe Gl. (7.32)
$F_{B,MA}$	Schraubenkraft zum Abtragen des Biegemomentes [N], siehe Gl. (7.31)
$F_{B,MT}$	Schraubenkraft zum Abtragen des Torsionsmomentes [N], siehe Gl. (7.35)
$F_{B0all}$	Maximal zulässige Schraubenkraft beim Erreichen des Auslastungsgrades $\Phi = 1$ [N], siehe Bild 7.14
$F_{B0nom}$	Nominelle Schraubenkraft unter Berücksichtigung der Streuung des Anziehverfahrens zum Erreichen der geforderten Dichtheitsklasse [N], siehe Gl. (7.58)
$F_{B0nom,min}$	Minimal erforderliche Schraubenkraft zur Einhaltung der geforderten Dichtheitsklasse L unter Berücksichtigung der Streuung der Schraubenkraft durch das Anziehverfahren [N], siehe Bild 7.14
$F_{B0nom,max}$	Maximal zulässige Schraubenkraft unter Berücksichtigung der Streuung der Schraubenkraft durch das Anziehverfahren [N], siehe Bild 7.14
$F_{B0req}$	Erforderliche Mindestschraubenkraft zum Erreichen der geforderten Dichtheitsklasse [N], siehe Gl. (7.54)
$F_D$	Dichtungskraft [N], siehe Bild 1.2
$F_G$	Dichtungskraft [N]
$F_{G0}$	Dichtungskraft im Einbauzustand [N]

$F_{G0min}$	Minimal erforderliche Dichtungskraft zur Einhaltung der geforderten Dichtheitsklasse L unter Berücksichtigung der Streuung der Schraubenkraft durch das Anziehverfahren [N], siehe Gl. (7.51)
$F_{G0req}$	Erforderliche Mindestdichtungskraft zum Erreichen der geforderten Dichtheitsklasse [N], siehe Gl. (7.53)
$F_{G\Delta}$	Mindestdichtungskraft im Montagezustand, die nach allen Lastwechseln bei nachfolgenden Zuständen die erforderliche Dichtungskraft sicherstellt [N], siehe Gl. (7.52)
$F_L$	Querkraft [N] , siehe Gl. (7.21) und Bild 7.10
$F_{Pi}$	Innendruckkraft [N], siehe Bild 1.2
$F_Q$	axiale Kraft des Mediendrucks [N], siehe Gl. (7.19)
$F_{q,Gl}$	Querkraft zur Überwindung der Gleitreibung [N], siehe Gl. (6.16)
$F_{q,L}$	Querkraft zur Überwindung der Haftreibung [N] , siehe Gl. (6.15)
$F_R$	Kraft, die sich aus $F_A$ und $M_A$ ergibt [N]
$F_S$	Schraubenkraft [N], siehe Bild 1.2
$F_X, F_Y, F_Z$	Äußere Kraft in x-, y-, z-Richtung [N], siehe Gl. (7.20) und Gl. (7.21)
$G_1, G_2, G_3$	Koeffizienten der Terme im Zähler der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung der Restflächenpressung $Q_R^*(\Delta e_{GC}/e_G)$ , siehe Gl. (6.11)
$H_1, H_2$	Koeffizienten der Terme im Nenner der gebrochen rationalen Funktion zur Beschreibung der Restflächenpressung $Q_R^*(\Delta e_{GC}/e_G)$ , siehe Gl. (6.11)
$I$	Nummer des Belastungszustands; Montagezustand: $I = 0$ ; Folgezustände: $I = 1, 2, 3, \dots$
$K_S$	systematischer Fehler infolge der Ungenauigkeit des Schrauben-Anziehverfahrens [-]
$L_D$	Dichtungshöhe [mm], siehe Bild 1.2
$L_S$	Schraubenlänge [mm], siehe Bild 1.2
$M$	Molmasse [g]
$M_A$	Äußeres Biegemoment [N·mm] , siehe Gl. (7.22) und Bild 7.10
$M_T$	Äußeres Torsionsmoment [N·mm] , siehe Gl. (7.23) und Bild 7.10
$M_X, M_Y, M_Z$	Äußere Moment in x-, y-, z-Richtung [N·mm] , siehe Gl. (7.22) und Gl. (7.23)
$P$	Mediendruck [MPa], Innendruck $> 0$ , Außendruck $< 0$
$P_{QR}$	Kriech-/Relaxationsfaktor als Verhältnis von Rest- und Ausgangsflächenpressung der Dichtung im Belastungszustand [-]
$Q$	Flächenpressung [MPa]

$Q_A$	Flächenpressung der Dichtung im Montagezustand vor der Entlastung, die für die Gültigkeit von $Q_{Smin(L)}$ im Belastungszustand erforderlich ist [MPa]
$Q_{BO}$	Flächenpressung der Dichtung bei Ausblasen [MPa]
$Q_{crit}$	Flächenpressung, bei der ein Versagen der Dichtung eintritt [MPa]
$Q_e$	effektive Flächenpressung bei Flanschblattneigung [MPa], siehe Gl. (7.18)
$Q_i$	Flächenpressung der Dichtung im Dichtungsring $i$ [MPa], siehe Gl. (7.13)
$Q_R$	Restflächenpressung am Ende des Kriech-/Relaxationsversuches [MPa], siehe Bild 6.9
$Q_{Smin(L)}$	Mindestflächenpressung der Dichtung für die Dichtheitsklasse L im Belastungszustand [MPa]
$Q_{min(L)}$	Mindestflächenpressung der Dichtung für die Dichtheitsklasse L im Montagezustand [MPa]
$Q_{Smax(RT)}$	maximal zulässige Flächenpressung der Dichtung bei Raumtemperatur [MPa]
$Q_{Smax(T)}$	maximal zulässige Flächenpressung der Dichtung bei Temperatur [MPa]
$R_m$	Zugfestigkeit des Werkstoffes [MPa]
$R_{p0,2}$	0.2%-Dehngrenze des Werkstoffes [MPa]
$S_{BO}$	Sicherheitsfaktor gegen das Ausblasen der Dichtung [-], siehe Gl. (7.59)
$T_B, T_F, T_G, T_L,$ $T_W$	Temperatur (Mittelwert) der durch Index bezeichneten Bauteile [°C] oder [K]
$T_0$	Temperatur der Verbindung im Montagezustand [°C] oder [K] (gewöhnlich + 20 °C)
$V$	Grenzlastfaktor [-]
$W_F, W_L$	Widerstand des durch Index bezeichneten Bauteils und/oder Querschnitts [N·mm]
$X_B, X_G, X_W$	axialer Elastizitätsmodul von Schrauben, Dichtung, Dehnhülse bzw. Unterlegscheibe [1/mm]
$Y_G, Y_Q, Y_R$	axiale Nachgiebigkeit der geschraubten Flanschverbindung bezogen auf $F_G, F_Q, F_R$ [mm/N], siehe Gl. (7.7), Gl. (7.8) und Gl. (7.9)
$Y_X$	Hilfsterm zur Berechnung der axialen Nachgiebigkeiten $Y_G, Y_Q, Y_R$ [mm/N], siehe Gl. (7.6)
$Z$	Summe der Fehlerquadrate für $n$ Messwerte, siehe Gl. (6.2) [-]

$Z_F, Z_L$	Elastizitätsmodul bei Drehung des Flansches, losen Flansches [1/mm <sup>3</sup> ]
$b_F, b_L$	effektive Breite des Flansches, losen Flansches [mm]
$b_{Ge}, b_{Gt}$	effektive, theoretische Breite der Dichtung (radial) [mm]
$b_W$	effektive Breite einer Dehnhülse [mm]
$c_F$	Korrekturfaktor [-]
$d_0$	Innendurchmesser des Flanschrings [mm]
$d_1$	mittlerer Durchmesser des Ansatzes am Schalenanschluss [mm]
$d_2$	mittlerer Durchmesser des Ansatzes am Konus [mm]
$d_3, d_{3e}$	tatsächlicher, effektiver Lochkreisdurchmesser [mm]
$d_4$	Außendurchmesser des Flansches [mm]
$d_5, d_{5t}, d_{5e}$	Durchmesser des Schraubenloches, Durchgang, geschlossen, effektiv [mm]
$d_{B0}, d_{Be}, d_{Bs}$	Schraubendurchmesser: Nenndurchmesser, effektiver Durchmesser, Schaftdurchmesser [mm]
$d_{B2}, d_{B3}$	Flankendurchmesser, kleinerer Durchmesser des Gewindes [mm]
$d_{B4}$	Maximal möglicher Außendurchmesser der Auflagefläche Schraubenkopf/Mutter und Flansch/Dehnhülse [mm]
$d_{Ge}, d_{Gt}$	Dichtungsdurchmesser, effektiv, theoretisch [mm]
$d_{G1}, d_{G2}$	Innen-, Außendurchmesser der theoretischen Dichtungsfläche [mm]
$d_E, d_F, d_L, d_S$	mittlerer Durchmesser des durch Index bezeichneten Bauteils [mm]
$d_{W1}, d_{W2}$	Innen-, Außendurchmesser der Dehnhülse bzw. Unterlegscheibe [mm]
$e_1, e_2$	Wanddicke am Rohransatz, am Konus [mm]
$e_D, e_E$	Wanddicke der äquivalenten Schale [mm], für die Berechnung der Belastungsgrenzen, für Berechnungen der Nachgiebigkeit
$e_F, e_L$	Effektive axiale Dicke des Flansches, losen Flansches [mm]
$e_G$	Dicke der Dichtung [mm]
$e_{G0}$	Dicke der Dichtung im Einbauzustand [mm]
$e_{Gt}$	theoretische Ausgangsdicke der Dichtung [mm]
$e_{G,Qi}$	Dicke der Dichtung bei der Flächenpressung $Q_i$ [mm]
$e_{G,Qi/3}$	Dicke der Dichtung nach Entlastung auf die Flächenpressung $1/3 \cdot Q_i$ [mm]
$e_P$	Dicke des Flanschblattes mir radialer Druckbeaufschlagung [mm]
$e_S$	Dicke der angeschlossenen Schale [mm]
$e_W$	Höhe der Dehnhülse bzw. Unterlegscheibe [mm]
$f_W$	Nenn-Berechnungsspannung [MPa] der Dehnhülse bzw. der Unterlegescheiben
$h_G, h_H, h_L$	Hebelarme [mm]

$h_P, h_Q, h_R, h_S,$	Hebelarm-Korrekturen [mm]
$h_t$	
$k_0 \cdot K_D$	auf den mittleren Dichtungsumfang bezogene, erforderliche Einbauschraubenkraft [N/mm]
$k_1$	fiktive Wirkbreite der Dichtung [mm]
$k_2 \cdot K_{D9}$	Standkraft der Dichtung bei Betriebstemperatur [N/mm]
$k_9$	Kriech-/Relaxationsfaktor [-]
$l_B, l_S$	Klemmlänge, Schaftlänge der Schrauben [mm]
$l_e$	Differenz zwischen Klemm- und Schaftlänge [mm]
$l_h$	[mm]
$m$	Proportionalitätsfaktor zwischen erforderlicher Flächenpressung und Innendruck [-]
$m$	Dichtheitsfaktor (maintenance factor) [-]
$m_L$	Proportionalitätsfaktor zwischen erforderlicher Flächenpressung und Innendruck zur Einhaltung der Dichtheitsklasse L [-]
$n$	Anzahl Messwerte [-]
$n_B$	Anzahl der Schrauben [-]
$r_0$	Radius am Übergang Konus zum Flanschblatt [mm]
$u_z$	Verschiebung in z-Richtung [mm]
$y$	minimale Dichtheitsflächenpressung (minimum seating stress) [psi]
$\Delta e_G$	Verformung der Dichtung [mm]
$\Delta e_{G0}$	konstanter Anteil der Verformung der Dichtung bei Flanschblattneigung [mm], siehe Bild 7.5
$\Delta e_{G\theta}$	aus Flanschblattneigung resultierender Anteil der Verformung der Dichtung [mm], siehe Bild 7.5
$\Delta e_{GC}$	Verformung der Dichtung durch Kriech-/Relaxationseffekte [mm], siehe Gl. (6.14) und Bild 6.13
$\Delta h_D$	Setzbetrag der Dichtung [mm]
$\Delta l_D$	Dichtungsverformung [mm], siehe Bild 1.2
$\Delta l_F$	Flanschblattneigung [mm], siehe Bild 1.2
$\Delta l_S$	Schraubenlängung [mm], siehe Bild 1.2
$\Delta U_I$	differentielle thermische axiale Ausdehnung [mm], siehe Gl. (7.49)
$\Theta_F$	Drehung des Flansches durch einwirkendes Moment [rad], siehe Gl. (7.10)
$\Phi_W$	Auslastungsgrad der Dehnhülsen bzw. Unterlegscheiben [-]
$\alpha_B, \alpha_F, \alpha_G, \alpha_L,$	Wärmeausdehnungskoeffizient des durch Index bezeichneten Bauteils, gemittelt zwischen $T_0$ und $T_B, T_F, T_G, T_L, T_W$ [K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_W$	
$\nu$	Querkontraktionszahl [-]
$\varepsilon_{1+}, \varepsilon_{1-}$	Streuwert beim Schrauben-Anziehen, bezogen auf eine einzelne

$\varepsilon_+, \varepsilon_-$	Schraube, oberhalb des Nennwertes, unterhalb des Nennwertes [-] Streuwert der gesamten Belastung aller Schrauben, oberhalb des Nennwertes, unterhalb des Nennwertes [-]
$\eta$	dynamische Viskosität [ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
$\lambda$	Leckagerate [ $\text{mg}/\text{m}/\text{s}$ ]
$\mu_G$	Reibungskoeffizient zwischen Dichtung und Flanschdichtfläche [-]
$\mu_H, \mu_{GI}$	Haft- bzw. Gleitreibungskoeffizient [-]
$\sigma_{BO}$	Höchstflächenpressung der Dichtung im Betriebszustand [MPa]
$\sigma_{BU/L}$	Mindestflächenpressung der Dichtung im Betriebszustand zur Einhaltung der Dichtheitsklasse L [MPa]
$\sigma_{VO}$	Höchstflächenpressung der Dichtung im Einbauzustand [MPa]
$\sigma_{VU/L}$	Mindestflächenpressung der Dichtung im Einbauzustand zur Einhaltung der Dichtheitsklasse L [MPa]

## Zusammenfassung

Stetig steigende Anforderungen an die Dichtheit von Flanschverbindungen bzw. an die Begrenzung von flüchtigen Emissionen stellen immer neue Herausforderungen an Betreiber aller Industrieanlagen, insbesondere in der chemischen und petrochemischen Industrie. Nationale oder europäische Regelwerke bieten hinsichtlich der Umsetzung dieser Umweltschutzziele nur unzureichend genaue Angaben, so dass die Betreiber immer zu individuellen Lösungen für ihren Standort tendieren. Ziel der vorliegenden Arbeit soll es daher sein, die Grundlage zur Ergänzung der betreffenden Normen und Richtlinien zu erarbeiten, damit zukünftig ein umfassendes, einheitliches und akzeptiertes Verfahren zur Begrenzung von Emissionen aus Flanschverbindungen zur Verfügung steht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diverse Weiterentwicklungen der Prüfeinrichtungen zur Ermittlung von Dichtungskennwerten realisiert, die die Genauigkeit der ermittelten Kennwerte erhöhen und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse steigern. Die Minimierung der Eigenverformung des Prüfstandes bzw. der Prüfplatten durch konstruktive Änderungen und die Korrektur der erfassten Verformungen durch die Kompensation der Eigenverformung durch die Lastaufgabe bzw. beim Aufbringen der Prüftemperatur per Software steigern die Messgenauigkeit und damit auch die Wiederholgenauigkeit bei den Prüfungen.

Außerdem wurden Zusatzmodule entwickelt, die es ermöglichen, neben den Dichtungskennwerten für die Berechnung von Flanschverbindungen weitere Dichtungscharakteristika experimentell zu ermitteln. Hierbei spielen insbesondere beheizbare Prüfplatten für Leckageversuche zur Untersuchung der Ausblassicherheit von Dichtungen und die Ermittlung der Reibungskoeffizienten zwischen Dichtung und Flanschdichtfläche in einer speziellen Belastungsvorrichtung eine zentrale Rolle.

Durch neu entwickelte Auswertalgorithmen mit Hilfe von gebrochen rationalen Funktionen können die Dichtungseigenschaften über wenige Parameter in Abhängigkeit von den Prüfparametern charakterisiert werden. Eine solche Beschreibung der Kennwerte bringt bei der Anwendung in der Berechnung von Flanschverbindungen letztendlich deutliche Vorteile, da im Prinzip für jeden beliebigen Zustand die zugehörigen Dichtungskennwerte aus diesen Näherungsfunktionen ermittelt werden können. Dies ist nicht nur für analytische Berechnungsverfahren wie EN 1591-1, sondern auch für Finite Elemente Berechnungen von großer Bedeutung, da somit die elastoplastischen Verformungseigenschaften realitätsnah abgebildet werden können. Ebenso können



dadurch die Versuchsdurchführungen teilweise vereinfacht und reduziert werden, wodurch die Kennwertermittlung deutlich effizienter und weniger aufwändig erfolgen kann.

Bei der Durchführung der Kriech-/Relaxationsversuche können die größten Vereinfachungen umgesetzt werden. Aus einhüllenden Verformungskurven bei Raumtemperatur und bei Betriebstemperatur und der nominellen Dichtungshöhe kann das Setzen der Dichtung für jede Steifigkeit der Flanschverbindung berechnet werden.

Die experimentell gewonnenen Erkenntnisse bei der Kennwertermittlung wurden in der vorliegenden Arbeit in den Berechnungsalgorithmus der EN 1591-1 integriert. Dies betrifft die Berücksichtigung der Verformung der Dichtung zur realistischen Abschätzung der Dichtungshöhe im Montagezustand genauso wie die modifizierte Definition des Kriech-/Relaxationsverhaltens der Dichtungen oder die Betrachtung der Abtragbarkeit von Querlasten über Reibung zwischen Dichtung und Flanschdichtflächen.

Zentraler Punkt bei den rechnerischen Nachweisen ist aber die Bestimmung der Flanschblattneigung und der daraus resultierenden effektiv verpressten Dichtungsbreite. Hierbei wird nun erstmalig das reale Verformungsverhalten der Dichtung und die daraus resultierende Flächenpressungsverteilung über die Breite der Dichtung bei der Bestimmung einer effektiv verpressten Dichtungsgeometrie berücksichtigt. Der Begriff der effektiven Breite muss hierbei neu definiert werden. Es handelt sich nicht um den Teil der Dichtung, der mit den Dichtflächen in Kontakt steht, sondern durch die reduzierte effektive Breite wird vielmehr das Verformungsverhalten der Flansche bei der Annahme einer konstanten Flächenpressung realitätsnah wiedergegeben.

Im Rahmen des Dichtheitsnachweises von Flanschverbindungen wird nicht nur gezeigt, dass die Mindestdichtungsflächenpressung in allen Betriebszuständen für die angestrebte Dichtheitsklasse nicht unterschritten wird, sondern dass ebenso ein genügend großer Sicherheitsabstand gegen das Ausblasen der Dichtung eingehalten wird. Steht die Begrenzung von flüchtigen Emissionen im Fokus der Berechnung von Flanschverbindungen, so dürfen im Festigkeitsnachweis keine lokalen Plastifizierungen toleriert werden, wie dies nach EN 1591-1 in begrenztem Maße zulässig wäre. Dadurch würden nämlich undefinierte Zustände bzgl. den Schrauben- und Dichtungskräften entstehen, die eine Beurteilung der vorhandenen Flächenpressungen unmöglich machen.

Im Rahmen der Verifikation der neuen analytischen Berechnungsalgorithmen zur Bestimmung der Flanschblattneigung, der effektiv verpressten Dichtungsbreite und der Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite wurde eine gute Übereinstimmung zu Finite Elemente Berechnungen nachgewiesen. Allerdings ist hierfür eine Modifikation des effektiven Lochkreisdurchmessers erforderlich, von dem aus der Hebelarm der wirkenden Dichtungskraft ermittelt wird. Die Ergebnisse bestätigen letztendlich auch die neue Begriffsdefinition der effektiven Breite der Dichtung, um das Verformungsverhalten der Flansche bei der Annahme einer konstanten Flächenpressung realitätsnah wiederzugeben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit der entwickelten mathematischen Darstellung der Dichtungscharakteristika und deren Integration in einen neuen analytischen Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung der auftretenden Verformungen das Auslegungsverfahren für Flanschverbindungen im Krafthauptschluss mit dem Ziel der Emissionsminderung wesentlich verbessert und auch vereinfacht werden kann.

## Abstract

Increased demands on the tightness of bolted flanged joints or on the reduction of fugitive emissions continue to pose new challenges to operators of industrial plants, especially in the chemical and petrochemical industries. National or European regulations may not provide sufficiently accurate information, so operators tend use to individual solutions for their location in order to implement these environmental objectives. The aim of the present thesis is to develop a basis for supplementing the relevant standards and guidelines, so that in the future a comprehensive, unified and accepted method for the control of emissions from bolted flanged joints is available.

In the present work, various developments of the testing equipment to determine gasket characteristics were implemented that increase the accuracy of the determined characteristics and increase the reproducibility of the results. The accuracy and, thus, the repeatability of the tests are increased by minimization of the inherent deformation of the test rig and the test platens by design changes and the correction of the detected deformations by the compensation of the intrinsic deformation by applying the load or applying the test temperature via software.

Additional modules have been developed that make it possible to determine experimentally further gasket characteristics in addition to the gasket characteristics for the calculation of bolted flanged joints. A central role is played by a particular test platens that can be heated for leakage tests to study the blow-out behavior of gaskets and the determination of the coefficient of friction between the gasket and the flange facing in a special loading device.

Using newly developed algorithms using fractional rational functions, the sealing properties can be characterized by a few parameters as a function of the test parameters. Such a description of the characteristics leads to distinct advantages when used in the calculation of bolted flanged joints, since in principle the associated gasket characteristics can be determined from these approximate functions for any condition. This is true not only for analytical calculation method such as EN 1591-1, but also for finite element calculations of great importance, since thus the elasto-plastic deformation properties can be reproduced realistically. The experimental

procedures can be simplified and reduced somewhat, by which the determination of the characteristics can be made much more efficient and less costly.

In the creep/relaxation tests significant simplifications can be implemented. Using enveloping curves for the deformation at room temperature and at operating temperature and the nominal height of the gasket, the additional deflection due to creep / relaxation can be calculated for each rigidity of the flange connection.

In the present work, the experimental findings in the determination of the gasket characteristics have been integrated into the calculation algorithm of EN 1591-1. This affects the consideration of the deformation of the gasket for a realistic estimate of the gasket height when assembled as well as the modified definition of creep / relaxation behavior of the gaskets or the consideration of the counterbalance of the lateral loads by friction between the gasket and flange faces.

However, the focal point for the theoretical evidence is to determine the rotation of the flange ring and the resulting compressed effective gasket width. Here, the real deformation behavior of the gasket and the resulting surface pressure distribution over the width of the gasket in determining an effective gasket compressed geometry is now for the first time considered. The concept of the effective width must be redefined here. The effective width is not the part of the gasket, which is in contact with the flange surfaces, rather the flange rotation can be determined realistically using the reduced effective width under the assumption of a constant gasket surface pressure

In the tightness test of bolted flanged joints it is not only shown that the minimum gasket surface pressure is met in all operating conditions for the desired tightness class, but also that a sufficiently large safety margin against the blow-out of the gasket is maintained. If elimination of fugitive emissions is in the focus of the calculation of bolted flanged joints, no local plastifications should be tolerated in the stress analysis, as would be admissible to a limited extent in accordance with EN 1591-1. As a result of plastifications, the bolt and gasket forces would attain undefined states, which would make an assessment of the existing gasket surface pressures impossible.

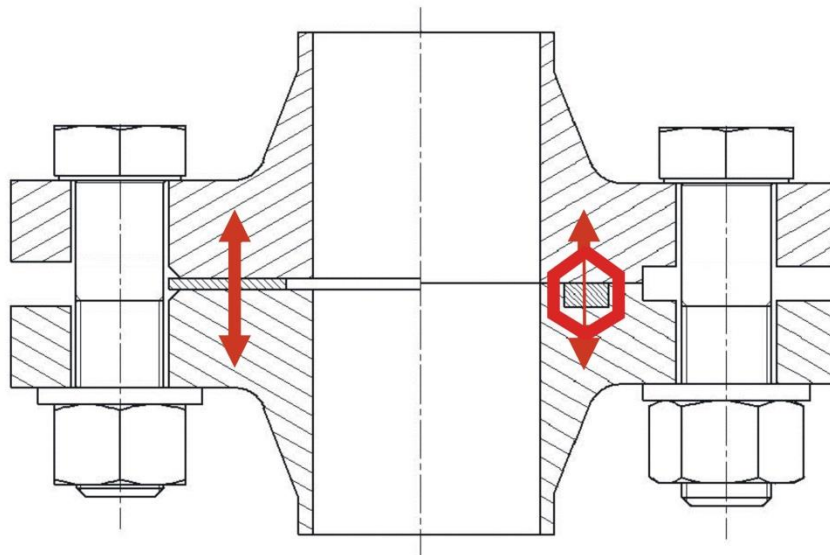
As part of the verification of the new analytical calculation algorithms for determining the flange rotation, the effective compressed gasket width and the gasket surface pressure distribution over the gasket width achieved good agreement with finite element calculations. However, this required a modification of the effective bolt circle diameter from which the lever arm of the acting gasket force is determined. The results validate the new definition of the effective width of the gasket to reflect the deformation behavior of the flanges on the assumption of a constant surface pressure.

In summary, with the developed mathematical representation of the gasket characteristics and their integration into a new analytical calculation algorithm to determine the occurring deformations, the design process for bolted flanged joints with the goal of reducing emissions can be significantly improved and simplified.

## 1 Einleitung

Flanschverbindungen gehören bei mediumführenden Komponenten (Rohrleitungen, Behälter, Armaturen, Pumpen, usw.) zu den am meisten verwendeten Konstruktionselementen, da sie oft als lösbare Verbindungen für die Montage, die Reinigung, die Instandhaltung, die Prüfung der inneren Oberfläche, usw. benötigt werden. Für die Abdichtung des geführten Mediums wird zwischen die Flansche eine Dichtung eingelegt, welche üblicherweise durch Schrauben verspannt wird. Grundsätzlich sind zwei Konstruktionen möglich, siehe **Bild 1.1**:

- Flanschverbindung mit der Dichtung im Kraftauptschluss (KHS),
- Flanschverbindung mit der Dichtung im Kraftnebenschluss (KNS).

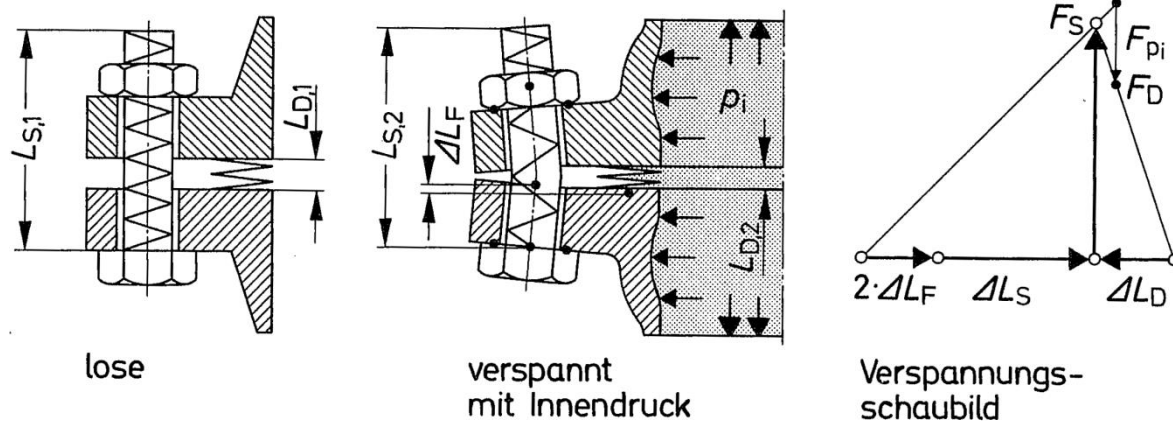


**Bild 1.1: Kraftfluss in Flanschverbindungen im Kraftauptschluss (links) und im Kraftnebenschluss (rechts)**

Die Dichtung im KHS liegt zwischen den Dichtleisten, sie überträgt bei der Montage grundsätzlich die volle Vorspannkraft. Die Flächenpressung der Dichtung verändert sich im Betrieb wesentlich durch äußere Belastungen, wie z. B. durch den Innendruck, Rohrleitungskräfte und –momente, Wärmedehnungsunterschiede sowie durch plastische Verformungen der Einzelteile (Flansche, Schrauben, Dichtung).

Die Kraftverformungsverhältnisse, die in verschiedenen Betriebszuständen in einer Flanschverbindung vorherrschen, können in einem Verspannungsschaubild dargestellt werden, siehe z. B. /1/. Hierzu wird die Flanschverbindung als ein im

Kräftefluss liegendes Federsystem aufgefasst. Im Spannungsschaubild, welchem die Federkennlinien der spannenden und gespannten Teile zu Grunde liegen, werden auf der Abszisse die elastischen Formänderungen in Richtung der Rohrachse der spannenden Teile (Flansche  $\Delta L_F$  und Schrauben  $\Delta L_S$ ) und des gespannten Teiles (Dichtung  $\Delta L_D$ ) und auf der Ordinate die entsprechenden Kräfte (Schraubenkraft  $F_S$ , Dichtungskraft  $F_D$ , Innendruckkraft  $F_{Pi}$ ) aufgetragen, vgl. **Bild 1.2.**



**Bild 1.2:** Flanschverbindung mit der Dichtung im Kraft Hauptschluss, in der die Schrauben sowie die Flanschblätter als spannende Teile und die Dichtung als gespanntes Teil wirken /1/

Die Dichtung im KNS liegt in einer Nut bzw. ein spezielles Dichtelement (Dichtung mit Träger) liegt zwischen den glatten Dichtleisten. Die Dichtung bzw. das Dichtelement übertragen nur einen (kleinen) Teil der Vorspannkraft, nämlich die, die zum Erreichen des Kontakts der metallischen Flächen (Blocklage) beim Vorspannen erforderlich ist; eine darüber hinaus gehende Vorspannkraft wird über die metallischen Flächen abgetragen. Die Vorspannkraft muss so hoch sein, dass die Blocklage in keinem Betriebszustand verlassen wird. Eine Änderung der Dichtungsflächenpressung im Betrieb kann dann nur durch Relaxation der Dichtung erfolgen.

Zu den Flanschverbindungen werden nicht nur die Verbindungen Flansch/Flansch sondern auch Verbindungen Flansch/Deckel, Flansch/Gehäuse sowie Gehäuse/Deckel gezählt. Allgemein werden solche Verbindungen als statische Dichtverbindungen bezeichnet.

Für die Flanschverbindungen mit einer Dichtung im KHS existieren Normen für ausgewählte Flanschformen /2/ - /8/, deren Abmessungen in Abhängigkeit vom Nenndruck und Nennweite angegeben werden. Die Dimensionierung dieser Flansche erfolgte mit pauschalen Angaben zu Belastungen und Dichtungskennwerten nach dem damaligen Kenntnisstand. Für die Flanschverbindungen mit der Dichtung im KNS existieren keine genormten Flansche. Die Flansche für KNS müssen bei der Auslegung zuerst dimensioniert werden (Nachweis der ausreichenden Steifigkeit).

Für die standardisierten Flansche existieren Normen /9/ - /22/, in welchen die Abmessungen der zugehörigen Dichtungen festgelegt sind. Da sie aber keine Angaben zu Kennwerten der verwendeten Dichtungen beinhalten, sind auch bei Verwendung von genormten Flanschen und Dichtungen keine quantitativen Aussagen zur Dichtheit solcher Flanschverbindungen möglich. Die Dichtheit aller Verbindungen ist jeweils für den konkreten Fall (Innendruck, Medium, äußere Belastungen, Dichtungskennwerte für die verwendete Dichtung) entsprechend den Dichtheitsanforderungen (zulässige Emissionen bzw. geforderte Dichtheitsklasse) nachzuweisen.

Die Dichtungskennwerte zum Beschreiben der Abdichteigenschaften sind aufgrund des Verhaltens der Verbindungen im KHS und KNS unterschiedlich. Im KHS sind hierzu die minimal erforderliche Vorspannung der Dichtung bei der Montage, d. h. das Erreichen der einzuhaltenden Dichtheitsklasse, sowie die minimal erforderliche Dichtungsflächenpressung im Betrieb, d. h. die Einhaltung der geforderten Dichtheitsklasse in Abhängigkeit von der bei der Montage aufgebrauchten Dichtungsflächenpressung, notwendig. Im KNS muss der Innendruck bei relevanten Betriebszuständen kleiner sein als der für die Einhaltung der geforderten Dichtheitsklasse maximal abdichtbare Innendruck. Während im KHS mit der Erhöhung der Vorspannung der Dichtung die Abdichteigenschaften verbessert werden, ist im KNS das Abdichtverhalten durch die Flächenpressung zum Erreichen der Blocklage festgelegt. Eine Änderung der Dichtungsflächenpressung kann in diesem Fall nur durch Relaxationseffekte der Dichtung (in der Blocklage) selbst hervorgerufen werden, eine Verbesserung der Abdichteigenschaften durch Erhöhung der Vorspannkraft über den Kraftnebenschluss hinaus ist daher für Dichtungen im KNS nicht möglich.

Eine Dichtverbindung kann nicht "absolut" dicht sein, sondern sie kann nur eine bestimmte (endliche) Dichtheit erreichen, die vom Dichtungstyp, vom Dichtungswerkstoff und von weiteren Parametern wie z. B. der

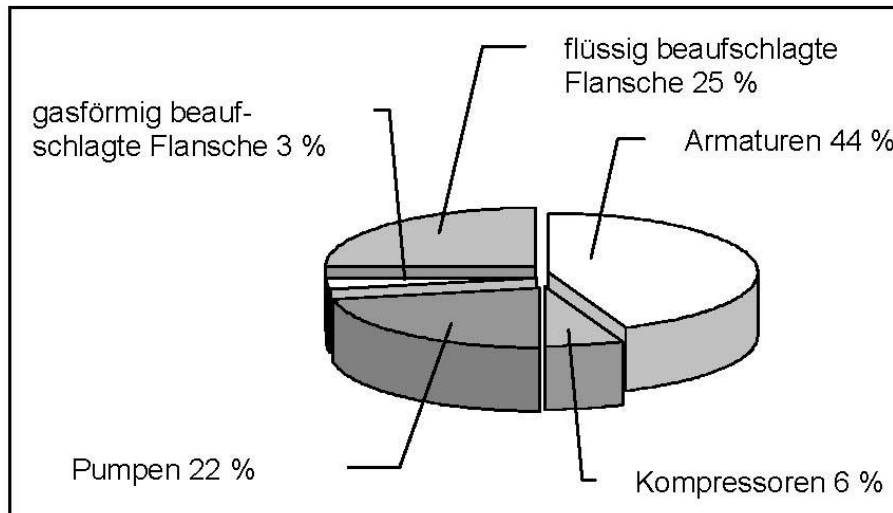


Dichtungsflächenpressung abhängig ist. Die Dichtheit bzw. die Emissionen der Verbindung können durch die spezifische Leckagerate (mg/m/s) der Dichtung charakterisiert werden, die zulässige Emission wird über die geforderte Dichtheitsklasse L definiert.

Die Anforderungen an die Begrenzung der Emission sind zuerst von der Art des geförderten Mediums (giftig, toxisch, radioaktiv, brennbar, explosiv, usw.) bzw. dessen Energiegehalt (Druck, Temperatur) abhängig. Für den Betreiber einer Anlage gewinnen aufgrund der sehr großen Anzahl an Flanschverbindungen auch die wirtschaftlichen Aspekte (Medienverlust, Instandhaltungskosten, Reparaturkosten, Ausfallzeiten, Folgekosten z. B. für die Beseitigung der Schäden, usw.) an Bedeutung. Die gesetzlichen bzw. behördlichen Regelungen berücksichtigen nur die sicherheitstechnischen Aspekte und beinhalten weltweit vorwiegend nur pauschale Forderungen hinsichtlich der Emission. Die Anforderungen an die quantitative Absicherung der Emission, also die Einhaltung einer zulässigen Dichtheitsklasse, existierten in Deutschland über viele Jahre nur in den Regelwerken für die kerntechnischen Anlagen (KTA). Mit der Veröffentlichung der VDI 2290 in 2012 /23/ sind nun aber auch konkrete Dichtheitsanforderungen für andere Industriebranchen definiert.

Die geforderte Begrenzung der Emissionen muss schon bei der Auslegung durch einen entsprechenden Dichtheitsnachweis erfolgen. Hierbei wird die erforderliche Vorspannung der Verbindung ermittelt, die notwendig ist, um die geforderten Dichtheitsanforderungen einzuhalten. Für den Dichtheitsnachweis sind daher leckageratenabhängige Kennwerte für die Abdichteigenschaften der verwendeten Dichtung notwendig, die für KHS seit 1995 (DIN 28090-1 /24/, später in EN 13555 /25/) und bei KNS seit 2003 (KTA 3211.2 /26/) zur Verfügung stehen. Ebenso ist für den Dichtheitsnachweis eine ausreichend genaue Berechnung der Dichtungsflächenpressung im Betrieb erforderlich, die die Verwendung der relevanten Kennwerte für die Verformungseigenschaften der Dichtung inklusive der Kriech- bzw. Relaxationseigenschaften sowie die Berücksichtigung der äußeren Belastungen ermöglichen muss. Ein solches Verfahren wurde erstmals 1990 in DIN 2505 /27/ aufgenommen (weiterentwickelt in KTA 3201.2 - 1996 /28/ bzw. in KTA 3211.2 – 2003 /26/). Die 2001 veröffentlichte europäische Norm EN 1591-1 /29/ ermöglicht ebenfalls Dichtheits- und Festigkeitsnachweise, während das Berechnungsverfahren im ASME Boiler and Pressure Vessel Code /30/ und in abgeleiteten Normen /31/ - /32/ hingegen nur reine Dimensionierungsberechnungen sind.

Aus vielen Untersuchungen zur Erfassung der Emissionen aus industriellen Anlagen geht hervor, dass in Abhängigkeit von der Art der Anlage die Emission aufgrund der Undichtigkeiten der Flanschverbindungen einen bedeutenden Teil der Gesamtemission darstellt. Ein Beispiel zeigt **Bild 1.3**.



**Bild 1.3: Anteil der Quellen an diffusen Emissionen /33/**

Durch die Überwachung der Emissionen im Betrieb, die z. B. in den USA gefordert wird, können nur die Folgen einer unzureichenden Auslegung und/oder einer nicht ausreichend qualitätsgesicherten Montage der jeweiligen Verbindung ermittelt werden. Mit den Ergebnissen dieser Überwachung alleine können die Ursachen der Undichtigkeit nicht ermittelt werden, was eine Bestimmung der Maßnahmen zur Vermeidung der Emissionen nicht ermöglicht. Es ist ersichtlich, dass die Überwachung der Emissionen die systematische Auslegung nicht ersetzen kann. Auch sogenannte Leckerkennungs- und Reparaturprogramme (Leak detection and repair – LDAR) setzen hier an der falschen Stelle an, da sie nicht die Ursachen der Emissionen abstellen, sondern nur ihre Folgen bekämpfen.

Für die geforderte Begrenzung der Emission im Betrieb sind zusammenfassend folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Ausreichende Kenntnisse über die betrieblichen Randbedingungen und Anforderungen (Betriebsparameter, Belastungen, Medien, Dichtheitsklasse, usw.),
- Auswahl einer geeigneten konstruktiven Ausführung der Flanschverbindung (Typ, Dimensionierung, usw.),
- Kenntnis der Kennwerte für die einzusetzende Dichtung,

- Dichtheitsnachweis (Bestimmung der erforderlichen Vorspannkraft),
- Festigkeitsnachweis (Begrenzung der Beanspruchungen der Einzelteile),
- Festlegung der geeigneten Vorgehensweise bei der Montage (Qualitätssicherung, Anziehverfahren, Kontrolle der Vorspannkraft, usw.).

Die konkrete Vorgehensweise ist abhängig vom Stand der Regelwerke und vom Stand von Wissenschaft und Technik. Während für die Flanschverbindungen mit der Dichtung im KHS weltweit Normen für Bauteilabmessungen und auch für die Dimensionierung sowie die Durchführung von Festigkeitsnachweisen existieren, sind für KNS keine gültigen Normen verfügbar. Lediglich in Regelentwürfen (KTA 3201.2 /34/, KTA 3211.2 /35/) und in einer Technischen Spezifikation (CEN/TS 1591-3 /36/) wird dieses Thema aufgegriffen. Der Stand von Wissenschaft und Technik ist hinsichtlich der Begrenzung der Emissionen sowohl für KHS als auch für KNS als ausreichend zu bezeichnen.

## 2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll für Krafthauptschlussverbindungen eine konkrete Vorgehensweise zur Reduzierung von Emissionen aus Flanschverbindungen aufgezeigt werden.

Nach der Darstellung der Entwicklung des Kenntnisstandes und der Bewertung des Kenntnisstandes hinsichtlich der Absicherung der anforderungsgerechten Qualität von Dichtverbindungen werden dann die Ermittlung der relevanten Dichtungskennwerte und die Durchführung der rechnerischen Nachweise näher betrachtet.

Zunächst stehen die Optimierung und die Weiterentwicklung der Prüftechnik für Dichtungen im Vordergrund, um verlässliche Dichtungskennwerte reproduzierbar ermitteln zu können. Da die zu messenden Verformungen bzw. Rückfederungen der Dichtungen oftmals nur wenige Mikrometer betragen, müssen die Eigenverformungen des Prüfstandes minimiert oder zumindest kompensiert werden. Insbesondere gilt es auch, einen Versuchsaufbau zu entwickeln, in welchem die Reibungskoeffizienten der Dichtungsmaterialien ermittelt werden können, die für den rechnerischen Nachweis der Abtragbarkeit von Querbelastungen an der Flanschverbindung benötigt werden.

Im Weiteren sollen die existierenden Prüfverfahren der EN 13555 /25/ an die heutigen Anforderungen bzw. an den Stand der Technik angepasst bzw. um zusätzliche Prüfverfahren für die Ermittlung der Reibungskoeffizienten oder zur Ausblassicherheit ergänzt werden. Ziel ist dabei auch, die ermittelten Dichtungskennwerte über Näherungsverfahren zu charakterisieren, damit universelle Kennwerte bzw. Gleichungen für deren Verwendung im jeweiligen Berechnungsalgorithmus zur Verfügung stehen.

Für eine analytische Berechnung von Flanschverbindungen kann die EN 1591-1 /37/ als Basis herangezogen werden. Einige Schwachpunkte dieser Norm, wie z. B. die technisch zweifelhafte Ermittlung der effektiv verpressten Dichtungsbreite, die fehlende Betrachtung von Scherkräften und Torsionsmomenten, die fehlende Berücksichtigung von Dehnhülsen oder die Tolerierung von lokalen Plastifizierungen sollen diskutiert und beseitigt werden. Ebenso sollen die im Berechnungsverfahren eingesetzten Dichtungskennwerte und die experimentell ermittelten Kennwerte aufeinander abgestimmt werden. Durch die zeitlich versetzte Veröffentlichung der

Berechnungs- und der Prüfnorm und der zwischenzeitlichen Weiterentwicklung des Standes der Technik differierten diese in den letzten Jahren.

Mit Hilfe von Finite Elemente Analysen werden abschließend für verschiedene Flanschgeometrien und verschiedene Dichtungsmaterialien die aufgestellten analytischen Formeln verifiziert.

Die vorliegende Arbeit ist Grundlage für eine umfassende Überarbeitung der Prüfnorm zur Dichtungskennwertermittlung EN 13555 und der Berechnungsnorm für Flanschverbindungen EN 1591-1.

### **3 Stand von Wissenschaft und Technik**

Untersuchungen zur Absicherung der Dichtheit und der Festigkeit von Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthauptschluss erfolgten seit vielen Jahrzehnten, wobei bis in die fünfziger Jahre die Eigenschaften der Dichtung und die Berechnung der Flanschverbindung (Dimensionierung, Festigkeit, Dichtheit) getrennt behandelt wurden. Nicht zuletzt durch die Entwicklung neuer Dichtungsmaterialien, insbesondere durch die in den 90er Jahren geforderte Asbestsubstitution, und die stetig gestiegenen Dichtheitsanforderungen ist dieses Thema aber auch heute noch aktuell.

Im vorliegenden Kapitel soll die Entwicklung des Kenntnisstandes zum Thema Flanschverbindungen chronologisch zusammengestellt werden, um später den heutigen Kenntnisstand bewerten und neue Zielsetzungen formulieren zu können.

#### **3.1 Berechnungsverfahren**

Grundlage für die erste deutsche Norm für die Auslegung von Flanschverbindungen /38/ waren die Arbeiten von Bach /39/ bis /41/. Die "Bach-Methode" wurde aus den Ergebnissen von experimentellen Untersuchungen der Flansche unter Biegebelastung abgeleitet.

Die Untersuchungen von Schwaigerer et al. /42/ - /45/ und Haenle /46/ führten zu einem experimentell verifizierten Näherungsverfahren für die Auslegung der Flansche, das auf der Basis eines plastischen Gelenks erstellt wurde. Dieses Berechnungsverfahren wurde auch in der Vornorm DIN V 2505, Oktober 1964 /47/ übernommen. Die Flansche werden darin mit einem Stülpmoment belastet, das neben dem Innendruck und den äußeren Rohrkräften auch die Abdichteigenschaften der Dichtung (erforderliche Vorverformung bei der Montage, erforderliche Dichtungsflächenpressung im Betrieb) berücksichtigt. Die Vorspannung der Schrauben muss größer oder gleich der minimal erforderlichen Kraft bei der Montage und im Betrieb sein. Die durch die Vorspannkraft hervorgerufenen Beanspruchungen in den Flanschen werden in drei Schnitten kontrolliert. Liegen die Beanspruchungen der Einzelteile nicht unter den zulässigen Grenzen, dann müssen geeignete Maßnahmen festgelegt werden, und die Festlegung der Vorspannkraft sowie die Bestimmung der Beanspruchungen sind zu wiederholen (iterative Vorgehensweise).

Die in der Norm für unterschiedliche Dichtungsarten angegebenen Dichtungskennwerte für die Abdichteigenschaften wurden in Leckageversuchen für eine "konkrete" Leckagerate ermittelt. Die Kraft- und Verformungsverhältnisse sind in einem Verspannungsschaubild zu überprüfen, womit auch ein Dichtheitsnachweis möglich ist. Im Entwurf DIN E 2505, Januar 1986 /48/, wurden auch Dichtungskennwerte für die Verformungseigenschaften der Dichtung verwendet und die Bestimmung der Stülpmomente sowie der Widerstandsmomente der Flansche ergänzt. Diese Berechnungsnorm wurde prinzipiell auch in das AD-Regelwerk und in die kerntechnischen Regeln übernommen. Schließlich beinhaltet der Entwurf DIN E 2505, April 1990 /27/ auch eine Formel zur Berechnung der Kräfte im Betrieb aus den Kräften beim Vorspannen der Verbindung unter Berücksichtigung der jeweils wirkenden Belastungen bzw. Verformungen und der Steifigkeiten der Einzelteile. Dieses Berechnungsverfahren ermöglicht neben der Dimensionierung auch die Dichtheits- und Festigkeitsnachweise. Während mit den Dichtungskennwerten für die Abdichteigenschaften aus DIN E 2505, Teil 2 (1990) /49/, nur die zu diesen Kennwerten zugehörige Leckagerate abzusichern ist, kann dieses Berechnungsverfahren mit den leckageratenabhängigen Kennwerten nach DIN 28090-1 /24/ zur Absicherung von zulässigen Emissionen (Dichtheitsklasse L) verwendet werden. Dieses Berechnungsverfahren wird auch in KTA 3201.2 /28/ und KTA 3211.2 /50/ verwendet.

In einigen Veröffentlichungen, wie z. B. /51/ und /52/, wurde für die Auslegung der Flanschverbindungen eine Vorgehensweise zur direkten Berechnung der Flanschabmessungen vorgeschlagen. Da starke Vereinfachungen und unsichere Annahmen notwendig waren, für deren Zuverlässigkeit der experimentelle Nachweis fehlte, fanden solche Vorschläge keine breite Anwendung.

Auch in /53/ - /55/ sollte die Verbesserung der Berechnungsnorm DIN 2505 durch eine vereinfachte, direkte Berechnung der Vorspannkraft erreicht werden. Die hierfür verwendete Vernachlässigung der Änderung der Kräfte zwischen Montage- und Betriebszuständen ist als zu starke Vereinfachung der Verhältnisse in einer verspannten KHS-Verbindung zu betrachten und deshalb für eine allgemeine Berechnung unzulässig. Weiter wurden in der Berechnung Dichtungskennwerte verwendet, die nicht experimentell zu bestimmen sind und nur abgeschätzt werden können. Es wurden auch keine Vergleiche zwischen berechneten und experimentell ermittelten Kräften dargestellt. Da diese Vorschläge keine technische Verbesserung brachten, fanden sie ebenfalls keine weitere Anwendung.

Bei der Erstellung der europäischen Norm für die Auslegung von KHS-Flanschverbindungen wurde die deutsche Norm DIN 2505 nicht verwendet, da sie nur als Vornorm bzw. Entwurf zur Verfügung stand. Als Grundlage diente die Norm TGL 32913/13 /56/ aus der früheren DDR, die wiederum von der DIN 2505 abgeleitet wurde /57/, /58/.

Die Nachweisführung in der neuen europäischen Norm EN 1591-1 /29/ erlaubt plastische Verformungen der Schrauben und der Flansche im Betrieb, da die Schraubenkräfte im Betrieb festigkeitsmäßig als sekundäre Belastungen betrachtet werden. Damit ist sie aber für einen Dichtheitsnachweis zunächst nicht geeignet, da die Dichtungsflächenpressung im Betrieb nicht ausreichend genau bestimmt werden kann. Für den Dichtheitsnachweis ist einerseits die Anpassung der Nachweisführung und andererseits die Verwendung von relevanten Dichtungskennwerten für die einzusetzende Dichtung notwendig, die pauschalen Kennwerte für verschiedene Dichtungstypen in EN 1591-2 /59/ müssen daher als ungeeignet eingestuft werden. Durch die erforderlichen Iterationsschritte ist der Berechnungsalgorithmus relativ kompliziert, so dass er nur mit entsprechender Software am Rechner sinnvoll verwendet werden kann. Die Eignung der einzelnen Berechnungsverfahren wird z. B. in /60/ - /70/ ausführlich behandelt.

Neben der EN 1591-1 existieren noch weitere europäische Normen, die sich dem Thema Berechnung von Flanschverbindungen angenommen haben. Letztendlich sind aber alle Berechnungsverfahren entweder auf die EN 1591-1 oder auf die Taylor-Forge-Methode, welche die Basis im amerikanischen ASME-Code darstellt, zurückzuführen.

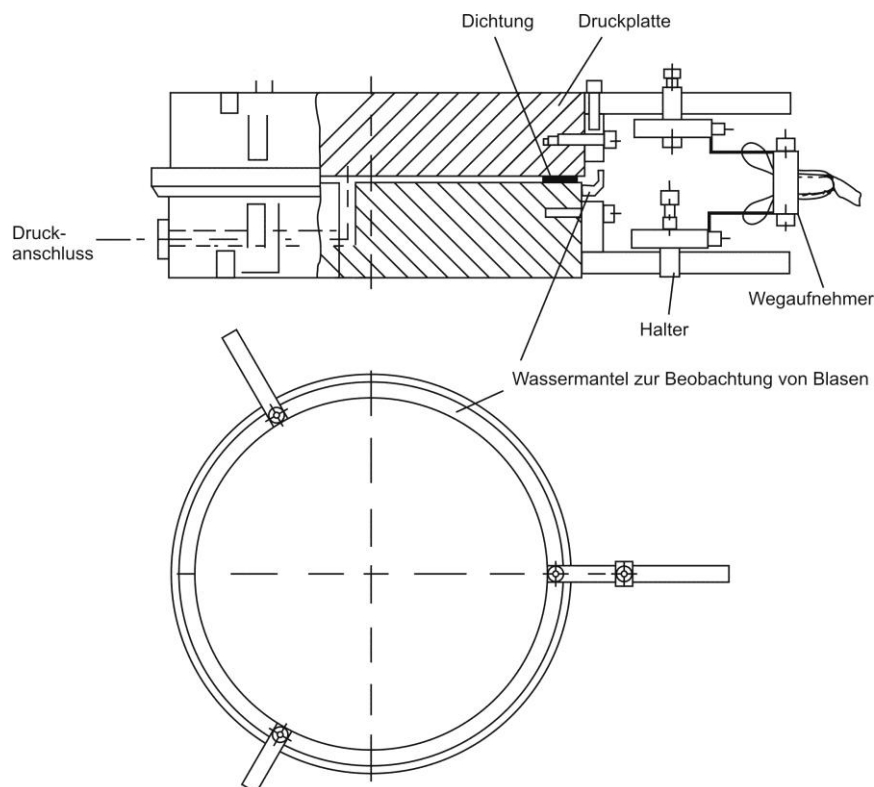
Am deutlichsten wird dies in den Normen für unbefeuerte Druckbehälter EN 13445-3 /71/ und für industrielle Rohrleitungen EN 13480-3 /72/. Jeweils im Hauptteil dieser Normen findet sich ein Berechnungsverfahren analog zur Taylor-Forge-Methode, in Anhängen sind dann alternative Berechnungsverfahren zu finden, die auf der EN 1591-1 basieren. Leider sind in diesen Normen aber nicht nur die Verweise auf die ursprüngliche Fassung der EN 1591-1:2001 angegeben, sondern die Formeln wurden direkt übernommen und mittlerweile teilweise auch modifiziert. Im Jahr 2007 wurde eine gemeinsame Arbeitsgruppe (JWG) der betroffenen fünf Technischen Komitees des CEN (TC's) mit dem Ziel der Harmonisierung der europäischen Berechnungsvorschrift für Flanschverbindungen gegründet. Ziel ist hierbei, alle existierenden Algorithmen in einer Berechnungsnorm zu bündeln und alle anderen nur noch mit Verweisen auf diese harmonisierte Berechnungsnorm zu veröffentlichen.



In den letzten zwei Jahrzehnten wurden auch die Finite Elemente Programme sehr stark weiterentwickelt, so dass diese heute ebenfalls ein geeignetes Werkzeug für die Berechnung von Flanschverbindungen darstellen. Es stehen verschiedene Elemente zur Verfügung, die für die Modellierung der Flansche, der Schrauben und der Dichtung verwendet werden können. Diese Elemente haben spezielle Eigenschaften, welche der Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Bauteile dienen. So kann z. B. dem Dichtungselement in der Berechnung direkt das elastoplastische Verhalten der realen Dichtung aufgeprägt werden.

### 3.2 Dichtungskennwerte

In Deutschland wurden die Dichtungsuntersuchungen seit Anfang der dreißiger Jahre vorwiegend an der MPA Universität Stuttgart durchgeführt /73/ - /84/. Die Abdichteigenschaften, die bei diesen Untersuchungen im Fokus standen, wurden hauptsächlich mit gasförmigem Medium untersucht, wobei die Leckageraten durch das Zählen der am äußeren Umfang der Dichtungen im Wasserbad beobachteten Bläschen des ausgetretenen Mediums ermittelt wurden, siehe **Bild 3.1**.



**Bild 3.1:** Versuchsvorrichtung zur Ermittlung der Leckagerate (Bläschenzählmethode) /79/

Die auf diese Weise ermittelbare Leckagerate lag etwa zwischen 1 und 10 mg/m/s, wobei die Leckagerate als ein Massenstrom bezogen auf den mittleren Dichtungsumfang angegeben wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden durch /85/ bis /87/ bestätigt.

Zu den wesentlichen Erkenntnissen dieser Arbeiten zählt, dass zur optimalen Abdichteigenschaft einer Dichtung, d. h. zur Anpassung an die Flanschoberfläche und das Schließen der inneren Undichtigkeitskanäle, eine bestimmte Vorspannkraft erforderlich ist. Nach dem Aufbringen dieser Vorspannkraft konnte keine wesentliche Verbesserung der Abdichteigenschaften mehr festgestellt werden.

Diese Kennwerte der Abdichteigenschaften, die auch im Wesentlichen durch Flanschversuche bestätigt werden konnten, wurden später als Grundlage für die Bestimmung der minimal erforderlichen Kräfte bei der Montage und im Betrieb in der deutschen Norm DIN V 2505 /47/ verwendet. Sie wurden tabellarisch für unterschiedliche Dichtungsarten und -formen, jeweils in Abhängigkeit von der Dichtungsbreite, angegeben. Die angegebenen Daten waren als Grenzwerte gedacht, die mit der Änderung des Kenntnisstandes anzupassen waren. Eine Norm zur Ermittlung der Kennwerte der Abdichteigenschaften wurde aber nicht erstellt, so dass in den Dichtungsdatenblättern der Dichtungshersteller vorwiegend nur die Werte aus der Norm zu finden waren, und nur selten die für die eigenen Dichtungen ermittelten Kennwerte.

Die maximal zulässigen Beanspruchungen der Dichtung zur Begrenzung der Dichtungsbeanspruchung bei der Montage und im Betrieb wurden zuerst nicht ermittelt, da man der Meinung war, dass hier genug Spielraum vorhanden ist. In der Norm DIN V 2505 wurde daher nur ein pauschaler Grenzlastfaktor für Weichstoffdichtungen zur Bestimmung der Belastbarkeit im Einbauzustand bzw. ein Faktor zur Bestimmung der Standkraft der metallischen Dichtungen bei Betriebstemperatur verwendet. Weiter wurde zur Bestimmung der Rückfederung der Dichtung ein Elastizitätsmodul angegeben.

Erfahrungen mit dem Verhalten von Flanschverbindungen unter Betriebsbedingungen haben gezeigt, dass auftretende Leckagen oft auf die Entspannung der Dichtungsflächenpressung durch Relaxationseffekte des Dichtungsmaterials zurückzuführen waren. Zur Auswahl einer geeigneten Dichtung wurde daher für Gummi-Asbestdichtungen (**lt**-Dichtungen) der Druckstandversuch in DIN 52913 /88/ genormt. Die ermittelten Eigenschaften ermöglichten zwar einen Vergleich unterschiedlicher Dichtungen, die Ergebnisse dieses Versuches liefern

aber keine allgemeingültigen Kennwerte für die Berechnung von Flanschverbindungen.

Wegen fehlender Prüfnormen existierten keine Kennwerte für die am Markt verfügbaren Dichtungen, weshalb die in DIN V 2505 veröffentlichten Werte Anwendung fanden. Diese als Grenzwerte gedachten Zahlen bereiteten den Anwendern aber oft Schwierigkeiten, da sie die Einflüsse der verwendeten Werkstoffe, der Herstellungsverfahren, usw. nicht berücksichtigten bzw. die Undichtigkeiten der Verbindung nicht erklären konnten. Dies führte zur Ableitung von neuen Kennwerten oder von Korrekturfaktoren /89/ – /91/. Doch dadurch konnte die Situation auch nicht wesentlich verbessert werden.

Im Folgenden wurden sowohl aufgetretene Schäden analysiert als auch die Problematik der Bestimmung der Kennwerte bzw. die Auswahl einer geeigneten Dichtung behandelt /92/ und /93/. Der Stand der Technik bis etwa 1970 wurde in /94/ dargestellt.

In /53/ - /55/ sollte eine Verbesserung der Berechnungsnorm DIN V 2505 durch neue Kennwerte und eine vereinfachte, direkte Berechnung der Vorspannkraft erreicht werden. Da diese neuen Kennwerte nicht ausreichend genau definiert wurden und auch dem Sinne nach nicht geprüft werden konnten, wurden sie nur "abgeschätzt" und tabellarisch für unterschiedlichste Dichtungen angegeben. Diese Vorschläge brachten aber keine wesentliche technische Verbesserung.

Auf Grund der Erfahrungen mit der Anwendung der DIN V 2505 sowie der Erkenntnisse aus weiteren Dichtungsuntersuchungen /95/ - /98/ wurden die Kennwerte der Abdichteigenschaften als unterer Grenzwert der Dichtungsflächenpressung bei der Vorverformung bzw. im Betriebszustand definiert und beispielhaft deren Abhängigkeit vom Dichtungstyp und von den Dichtungsabmessungen bestimmt. Für die Verformungseigenschaften wurde ein oberer Grenzwert der Dichtungsflächenpressungen bei der Montage (Raumtemperatur) und im Betrieb (erhöhte Temperatur) definiert und ebenfalls beispielhaft deren Abhängigkeit vom Dichtungstyp und von den Dichtungsabmessungen bestimmt.

Diese Kennwerte wurden in DIN 2505, Entwurf Januar 1986, übernommen. Weiter wurde aus der Rückfederung der Dichtung der (Ersatz-) Elastizitätsmodul  $E_D$  als Sekantenmodul aus der Verformung der Dichtung bei der Ausgangsflächenpressung und der Entlastung auf ein Drittel der ursprünglichen Flächenpressung, in

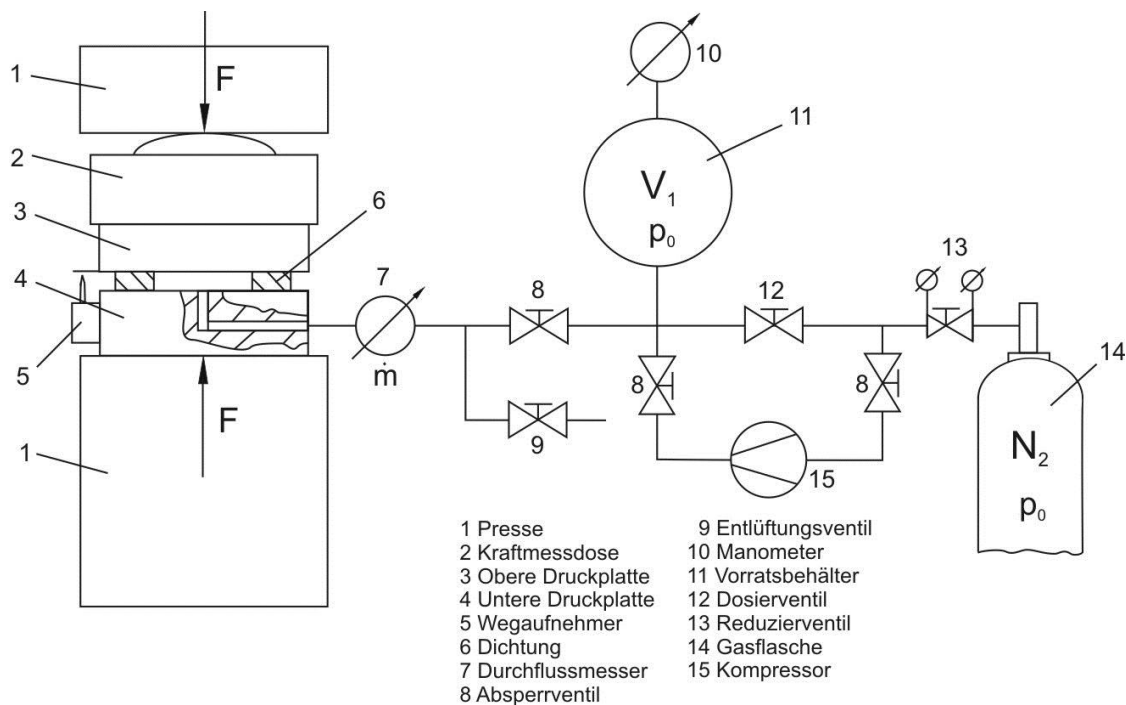
Abhängigkeit von der Ausgangsflächenpressung, bestimmt. Schließlich wurde durch die Anpassung des Druckstandversuches auch ein Kriech-/Relaxationsfaktor  $k_9$  als Dichtungsflächenpressung am Versuchsende bezogen auf die Dichtungsflächenpressung nach dem Vorspannen zu Beginn des Versuchs definiert und experimentell ermittelt.

Umfangreiche Untersuchungen zur Beschreibung des Verhaltens von Dichtungen wurden in den achtziger Jahren auch in der ehemaligen DDR durchgeführt /99/ - /103/. Grundlagen für diese Untersuchungen waren die bereits erwähnten Arbeiten an der MPA Universität Stuttgart. Da sie sich sehr stark an der Berechnungsnorm TGL 32903/13 /56/ orientierten und die wirklichen Dichtungsflächenpressungen, hauptsächlich im Betrieb, nicht ausreichend berücksichtigten, konnten keine qualitativ neuen Lösungen entwickelt werden.

Im Zuge der Asbestsubstitution und in Verbindung mit erhöhten Anforderungen hinsichtlich des Umweltschutzes wurden Ende der achtziger und zu Beginn der neunziger Jahre umfangreiche Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens AIF-Nr. 7 708 (1988 – 1991) durchgeführt /104/. In einem europäischen Forschungsprogramm, dem BRITE EURAM (Basic Research in Industrial Technologies for European Research and Technological Development Program in the Fields of Industrial Manufacturing Technologies and Advanced Materials) Project BE-5191 /105/ - /107/, wurden diese Untersuchungen vertieft. Bei diesen Untersuchungen wurde eine neue Messtechnik (Aufnehmer, Messverfahren), hauptsächlich zur Ermittlung der Leckagerate, verwendet und Prüfvorrichtungen zur Ermittlung der Kennwerte inklusive der Verifikation der Einflussgrößen entwickelt, siehe **Bild 3.2**. Zu den wichtigsten Ergebnissen dieser Arbeiten zählen die Definition der leckageratenabhängigen Kennwerte für die Abdichteigenschaften und die Verifikation der Übertragbarkeit der Kennwerte aus den Prüfvorrichtungen auf reale Flanschverbindungen.

Die Ergebnisse der genannten Untersuchungen waren dann Grundlage zur Erstellung der deutschen Prüfnorm DIN 28090-1 /24/, die im September 1995 veröffentlicht wurde. Die Prüfnorm beinhaltet die Definition der Kennwerte für die Abdichteigenschaften in Abhängigkeit von der Dichtheitsklasse L, die Höchstflächenpressung im Einbauzustand bzw. im Betriebszustand, den Ersatzelastizitätsmodul und den Setzbetrag sowie Angaben zu den Prüfverfahren und zu den Einflussgrößen.

Damit konnte erstmals für die gegebenen Betriebsbedingungen und die geforderte Dichtheit (Dichtheitsklasse L) eine geeignete Dichtung ausgewählt und für die Flanschverbindung rechnerisch ein Dichtheits- und Festigkeitsnachweis nach DIN E 2505 (1990) /27/ bzw. nach dem kerntechnischen Regelwerk KTA 3201.2 /28/ durchgeführt werden.



**Bild 3.2: Innendruckprüfstand mit Leckgeratenmessung über Massenflusssensor /97/**

In einem weiteren europäischen Forschungsprojekt, dem Pressure Equipment, Reduction of Leak Rate Project (PERL) /108/, wurden die in der europäischen Vornorm prEN 13555 /109/ definierten Prüfverfahren zur Ermittlung der Dichtungskennwerte verifiziert und optimiert. Im Jahr 2004 wurde schließlich die überarbeitete Norm EN 13555 /25/ veröffentlicht, die z. Z. turnusmäßig zur Revision ansteht, aber noch immer den Stand der Technik im Hinblick auf die Definition der Dichtungskennwerte für Dichtungen im Kräftehauptschluss darstellt.

Als Kennwerte für die Auswahl einer geeigneten Dichtung sowie für die Durchführung der Festigkeits- und Dichtheitsnachweise wurden weitgehend dieselben Kennwerte und Prüfverfahren wie in DIN 28090-1 eingesetzt. Nur zur Ermittlung der Änderung der Belastungen infolge plastischer Verformung der Dichtung nach der Montage der Verbindung wurde anstelle des Setzbetrages ein Kriech-/Relaxationsfaktor definiert, der in einem Kriech-/Relaxationsversuch zu ermitteln ist.

**Tabelle 3.1: Dichtungskennwerte in verschiedenen Regelwerken**

	AD Merkl. B7 1977	DIN V 2505 1964	DIN E 2505 1986	DIN 28090 1995	EN 13555 2004	ASME BPVC 2013
Mindestflächenpressung bei der Montage	$k_0 \cdot K_D$	$k_0 \cdot K_D$	$\sigma_{VU}$	$\sigma_{VU/L}$	$Q_{\min(L)}$	y
Mindestflächenpressung im Betrieb	$k_1$	$k_1$	$\sigma_{BU} = m \cdot P$	$\sigma_{BU/L} = m_L \cdot P$	$Q_{S\min(L)}$	m
Max. zul. Flächenpressung bei der Montage		V	$\sigma_{VO}$	$\sigma_{VO}$	$Q_{S\max(RT)}$	
Max. zul. Flächenpressung im Betrieb	$k_0 \cdot K_{D\beta}$	$k_2 \cdot K_{D\beta}$	$\sigma_{BO}$	$\sigma_{BO}$	$Q_{S\max(T)}$	
Ersatzelastizitätsmodul		$E_D$	$E_D$	$E_D$	$E_G$	
Kriech-/Relaxationsfaktor				$\Delta h_D$	$P_{QR}$	

In **Tabelle 3.1** sind die wesentlichen Kennwertdefinitionen der letzten 50 Jahre für Dichtungen im Kraft Hauptschluss zur Übersicht gegenübergestellt.

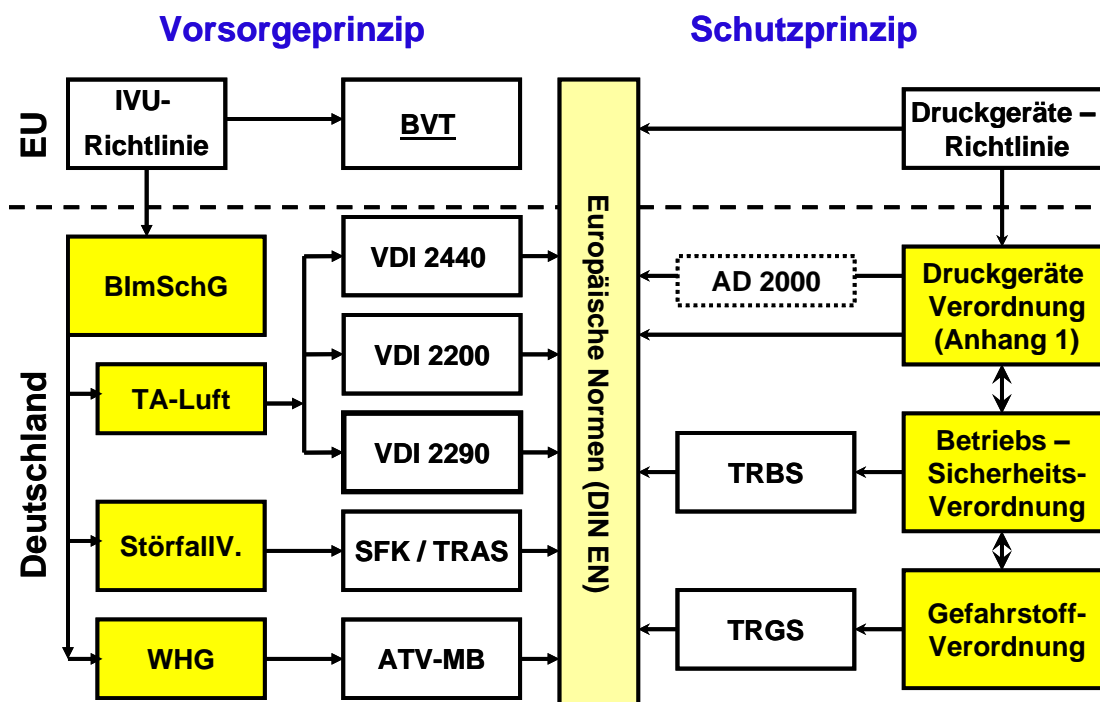
Ein weiteres Untersuchungsergebnis des PERL-Projektes war die Tatsache, dass die bei Raumtemperatur ermittelten Abdichteigenschaften abdeckend für erhöhte Temperatur sind. Eine Ermittlung der Leckagerate unter Temperatur ist für die Kennwertbestimmung daher nicht erforderlich /110/ und /111/. Eine Datenbank, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurde und in welcher Dichtungskennwerte für den Endanwender zur Verfügung gestellt werden sollten, hat sich in den vergangenen Jahren nicht am Markt durchsetzen können. Vielmehr wurde von der Fachhochschule Münster eine andere Dichtungsdatenbank ([www.gasketdata.org](http://www.gasketdata.org)) konzipiert, in welcher experimentell ermittelte Dichtungskennwerte verschiedener Hersteller zu finden sind. Diese Daten ermöglichen die Auswahl einer geeigneten Dichtung auch im Hinblick auf die Einhaltung einer geforderten Dichtheitsklasse.

Die EN 1591-2 wurde im Jahr 2008 überarbeitet /59/. Sie beinhaltet nun experimentell ermittelte Dichtungskennwerte aus dem PERL-Projekt, die allerdings nicht konkreten Dichtungen zugeordnet werden können, sondern nur typische Werte für einen bestimmten Dichtungstyp darstellen (sollen). Die tabellierten Daten sind nur für Vorabschätzungen nach EN 1591-1 bestimmt, z. B. können diese Werte für Dimensionierungen herangezogen werden. Für die endgültigen Berechnungen, d. h. für Festigkeits- und Dichtheitsnachweise der festgelegten Verbindung, muss der Anwender der EN 1591-1 Dichtungskennwerte der einzubauenden Dichtung verwenden.

Von den Dichtungskennwerte  $m$  und  $y$ , die bereits in den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts in den USA in den ASME Boiler and Pressure Vessel Code aufgenommen wurden, und die die erforderliche Flächenpressung bei der Montage ( $y$ ) und einen Dichtheitsfaktor ( $m$ ) beschreiben sollen, war von Anfang an bekannt, dass sie nur eine sehr stark vereinfachte Beschreibung des Dichtungsverhaltens in einer eher komplexen Anwendung erlaubten. Insbesondere mit dem Verbot von Asbest als Dichtungswerkstoff und dem Einsatz von neuen Dichtungsmaterialien, für die keine langjährigen Erfahrungen vorlagen, wurde die Problematik der fehlenden Dichtungseigenschaften offensichtlich.

### 3.3 Anforderungen an die Dichtheit von Flanschverbindungen

In Abhängigkeit von der Art des geförderten Mediums (toxisch, brennbar, explosiv, radioaktiv, usw.) bzw. vom Energieinhalt (Druck, Temperatur) beinhalten viele Gesetze, Verordnungen, Richt- und Leitlinien, Beispiele siehe in **Bild 3.3** /112/, auch Anforderungen an die Dichtheit von Flanschverbindungen. Diese Dichtheitsanforderungen geben sich vorwiegend aber nur mit pauschalen Hinweisen auf die geforderte Verwendung von "hochwertigen" Dichtungen bzw. Dichtverbindungen zufrieden. Die Gründe für die pauschale Anforderung



**Bild 3.3:** Gesetzliche und behördliche Vorgaben zur Dichtheit von Flanschverbindungen /112/

"Hochwertigkeit" sind in den zuerst fehlenden leakageabhängigen Kennwerten für die Abdichteigenschaften der Dichtung sowie in den unzureichenden Kenntnissen über die geeigneten Berechnungsverfahren zu suchen, die erst eine quantitative Führung der Dichtheitsnachweise bei der Auslegung ermöglichen. Die ersten konkreten Angaben zum Nachweisverfahren für "hochwertige" Dichtsysteme beinhaltet die VDI-Richtlinie 2440 /113/.

In der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft /114/) werden die Konzentrationen umweltkritischer Medien in der Umgebung begrenzt. Für die Emissionen aus Dichtverbindungen, die als "diffuse Quellen" bezeichnet sind, werden keine Grenzwerte ("zulässige" Dichtheitsklasse) angegeben, auch wenn diese den großen Anteil der Emissionen darstellen, siehe Bild 1.3. Die TA Luft selbst beinhaltet zu Dichtverbindungen dieselben Anforderungen wie sie bereits in VDI 2440 verankert sind.

In beiden Regelungen wird der Nachweis der "Hochwertigkeit" des Dichtsystems unter Betriebsbedingungen durch die Einhaltung der Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen Dichtungskennwerte und des rechnerischen Festigkeits- und Dichtheitsnachweises erreicht. Die geforderte Bauteilprüfung ist nur als Einhaltung der festgelegten Leckagerate bei den gegebenen Prüfbedingungen zu betrachten, nicht als alleiniger Nachweis der Hochwertigkeit der Dichtung nach TA Luft, wie oft in Zertifikaten von Gutachtern bzw. Prüfinstituten bestätigt wird. Umfangreiche Untersuchungen zum Thema hochwertige Dichtsysteme wurden im AiF/DECHEMA Forschungsvorhaben 13239 /115/ an der MPA Universität Stuttgart durchgeführt. Die Hauptergebnisse sind:

- Eine hochwertige Qualität wird durch eine geeignete Auswahl der konstruktiven Ausführung, einschließlich der geeigneten Dichtung, und die Dichtheits- und Festigkeitsnachweise für die gegebenen Betriebsbedingungen für die geforderte Dichtheitsklasse erzielt. Für die Dichtheit im Betrieb ist zusätzlich eine qualitätsgesicherte Montage erforderlich.
- Zum Erreichen der geforderten Abdichteigenschaften sind bei unterschiedlichen Dichtungen auch unterschiedliche Dichtungsflächenpressungen notwendig. Die im Bauteilversuch festgelegte Flächenpressung von 30 MPa kann nicht repräsentativ sein.
- Ebenfalls kann der Prüfdruck von 1 bar nicht für unterschiedliche Betriebsdrücke abdeckend bzw. repräsentativ sein.
- Der Bauteilversuch kann zur experimentellen Ermittlung der Zuordnung der Dichtheitsklasse des Prüf- und Betriebsmediums dienen.



Die Ergebnisse der Untersuchungen führten zur Anpassung der Versuchsbedingungen für den Bauteilversuch in VDI-Richtlinie 2200 /116/. Alternativ zu den Prüfbedingungen 30 MPa/1 bar dürfen die Dichtungen nun auch bei einem Innendruck von 40 bar geprüft werden. Dafür wurde aber auch die geforderte Dichtheit, die zulässige Leckagerate, in diesem Versuch auf  $1 \cdot 10^{-2}$  mbar·l/m/s angepasst.

Zwischenzeitlich ist an der MPA Universität Stuttgart auch ein "alternatives" Prüfverfahren entwickelt worden /117/, mit dem die Leckageraten flüchtiger flüssiger organischer Substanzen (z. B. Alkohole), die eigentlichen TA Luft-Medien, nachgewiesen werden können. Dieses Verfahren ist in die PAS TA Luft /118/ aufgenommen worden und mit ihm wurde der Hochwertigkeitsnachweis häufig eingesetzter Graphit-Spießblech-Dichtungen erfolgreich geführt. Mit der Helium-Massenspektrometrie war dies nicht gelungen.

Für die quantitative Beurteilung der Dichtheit einer Flanschverbindung reichten die bisherigen Vorschriften bzw. Richtlinien nicht aus, da keine zulässigen Leckageraten gefordert waren. Die Zuordnung der einzuhaltenden Dichtheitsklasse für das Prüfmedium (Stickstoff) zu dem abzudichtenden Medium wurde erstmals in der kerntechnischen Spezifikation KS D 2021/50 /119/ verankert, siehe **Tabelle 3.2**. Hierin werden für verschiedene Medien unterschiedliche Dichtheitsanforderungen gestellt, siehe auch /120/.

**Tabelle 3.2: Dichtheitsklassen nach KS D 2021/50**

Dichtheitsklasse L	Leckagerate bei der Dichtungsprüfung mit den Prüfmedien He und N <sub>2</sub> mg/(m·s)	Medium
L <sub>1,0</sub>	1	Wasser ohne Aktivität
L <sub>0,1</sub>	10 <sup>-1</sup>	a) Wasser aktivitätsführend
		b) Wasserdampf ohne Aktivität
		c) Druckluft
L <sub>0,01</sub>	10 <sup>-2</sup>	Wasserdampf aktivitätsführend

Das Thema der Dichtheitsklassen greift nun die neue VDI-Richtlinie 2290 /23/ auf. In dieser Richtlinie ist ergänzend zu den Anforderungen der TA Luft konkret eine Dichtheitsklasse definiert, nämlich die Dichtheitsklasse L<sub>0,01</sub>, deren Einhaltung im rechnerischen Dichtheitsnachweis nachgewiesen werden muss. Hierbei bezieht sich die geforderte Dichtheitsklasse nicht auf die Leckagerate des abzudichtenden Mediums, sondern auf die mit dem Prüfmedium Helium gemessene Leckagerate in

Dichtungsprüfungen nach EN 13555. Eine Unterscheidung der geforderten Dichtheitsklasse für die verschiedenen Medien erfolgt in VDI 2290 nicht.

Neben der Begrenzung von Emissionen muss natürlich auch ein katastrophales Versagen einer Flanschverbindung ausgeschlossen werden. Hierzu stand in den letzten Jahren die Untersuchung des Ausblasverhaltens von Dichtungen im Fokus von zwei Forschungsvorhaben an der MPA Universität Stuttgart /121/ und /122/. Auf der einen Seite fordern zwar die Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften (BGV), die Technischen Regeln zur Betriebssicherheitsverordnung (TRBS), das AD 2000 Regelwerk und die Technischen Regeln für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL) Dichtungen, die nicht aus ihrem Sitz gepresst werden können oder kammprofilierte, metallinnenrandgefasste, metallarmierte, metallummantelte oder metallische Dichtungen, auf der anderen Seite gibt es weltweit aber keine Normen oder Richtlinien, die den Nachweis der Ausblasseicherheit von Dichtungen für Flanschverbindungen eindeutig regeln.

Da die im ASME Berechnungsverfahren verwendeten Dichtungskennwerte  $m$  und  $y$  nur abgeschätzte Werte sind, die lediglich für die Auslegung einer Flanschverbindung anzuwenden sind und die nicht experimentell ermittelt werden können, wurden diese nie für die Absicherung der Dichtheit der Verbindung gedacht. Auf Grund der fehlenden Dichtungskennwerte sowie der unzureichenden Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Dichtungsflächenpressungen unter relevanten Betriebsparametern sind Dichtheits- und Festigkeitsnachweise und damit eine nachgewiesene, quantitative Begrenzung der Emission bei der Auslegung in den USA nicht möglich. Dies führt letztendlich dazu, dass vom Betreiber von Industrieanlagen umfangreiche Leckagemessungen durchgeführt werden müssen, um einen Beleg der Dichtheit der Flanschverbindungen zu erhalten.

### **3.4 Montage der Verbindung und Absicherung der Dichtheit im Betrieb**

Als Voraussetzungen für die Absicherung der anforderungsgerechten Qualität im Betrieb gelten einerseits die Auswahl einer für die relevanten betrieblichen Belastungen und für die geforderte Dichtheit geeigneten Konstruktion und andererseits die Nachweise der Dichtheit und Festigkeit bei der Auslegung. Die erforderliche Qualität muss bei der Montage erzeugt werden, wozu eine ausreichende Qualitätssicherung bei der Montage festzulegen ist. Bei den Flanschverbindungen mit den höchsten Anforderungen bezüglich der Gewährleistung der einzuhaltenden Dichtheitsklasse müssen im Betrieb ggf.

ausreichende Maßnahmen zur Verifikation der Nachweise aus der Auslegung festgelegt werden. Während die Ergebnisse des Festigkeitsnachweises durch die Überwachung der Folgen möglicher Schädigungsmechanismen z. B. mit Hilfe wiederkehrender zerstörungsfreien Prüfungen erfolgt, sind die Ergebnisse der Dichtheitsnachweise z. B. mit der Erfassung der Emissionen zu kontrollieren /65/.

Zu der Qualitätssicherung bei der Montage gehören einerseits die Absicherung der Annahmen aus den Nachweisen, wie die Kontrolle des Zustandes und die Eigenschaften der Einzelteile sowie die Kontrolle der relevanten Belastungen, und andererseits das Vorspannen der Verbindung mit der im Festigkeits- und Dichtheitsnachweis festgelegten Vorspannkraft der Schrauben. In Abhängigkeit von den Anforderungen an die Gewährleistung der Dichtheit im Betrieb, der verwendeten Dichtung, der eingesetzten Schrauben sowie der Höhe der Vorspannkraft ist ein geeignetes Anziehverfahren einschließlich der Montageprozedur (Belastungsstufen, Reihenfolge, usw.) sowie ggf. die Kontrolle der Vorspannung festzulegen /123/ - /129/. Die Qualitätssicherung bei der Montage wird vom Betreiber idealerweise in einer Montagevorschrift festgelegt.

Zur Absicherung der Dichtheit der Flanschverbindungen im Betrieb existieren keine europaweit harmonisierten Regelungen zur Emissionskontrolle /130/. In den einzelnen Ländern sind einige Vorgaben für bestimmte Anwendungsbereiche vorhanden, die auf die Forderungen der EU-Richtlinie IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control Directive /131) bzw. deren Nachfolger IED (Industrial Emission Directive /132/) zurückgehen. In Deutschland sind z. B. in TA Luft und in VDI 2440 Vorgaben für die Absicherung der anforderungsgerechten Qualität von Flanschverbindungen hinsichtlich der Auswahl der geeigneten Konstruktion und der Nachweise der Qualität bei der Auslegung definiert. Die Flanschverbindungen werden aber als diffuse Quellen betrachtet, für die keine konkreten Angaben zur zulässigen Leckagerate bzw. zur einzuhaltenden Dichtheitsklasse festgelegt wurden. Ohne diese Angabe war ein quantitativer Dichtheitsnachweis bisher nicht möglich.

Ein in den Richtlinien festgelegter Bauteilversuch konnte aufgrund der Randbedingungen und der Vorgehensweise, wie in Kapitel 3.2 gezeigt, keinen Beitrag zur Einhaltung der geforderten Dichtheitsklasse liefern. Erst durch die in VDI 2290 festgelegte einzuhaltende Dichtheitsklasse  $L_{0,01}$  sind jetzt quantitative rechnerische Dichtheitsnachweise möglich.

In den USA wird die Erfassung der Emissionen aus Flanschverbindungen z. B. im Clean Air Act /133/ bzw. im South Coast Air Quality Management Plan /134/ verlangt.

Von der EPA (US Environmental Protection Agency) wurde auch eine Emissionsmesstechnik (Methode 21) für die Überwachung der Emissionen in den Industrieanlagen beschrieben /135/. Solche Messungen müssen an allen relevanten Flanschverbindungen durchgeführt werden. Da sie nur Folgen der unzureichenden Absicherung der anforderungsgerechten Qualität erfassen, können sie nur bedingt einen Beitrag zur Ermittlung der Ursachen liefern.

## 4 Bewertung des Kenntnisstandes zur Auslegung von Flanschverbindungen

In diesem Kapitel erfolgt eine Bewertung des Kenntnisstandes zur Auslegung von Flanschverbindungen, um dann in den darauffolgenden Kapiteln detailliert Weiterentwicklungen zur Verbesserung und Vereinfachung der Prüfmethodik und des Berechnungsverfahrens aufzuzeigen.

### 4.1 Abdichtverhalten und zulässige Emissionen

Die Abdicht- und Verformungseigenschaften einer Dichtung werden wesentlich durch die Verformungen beim Vorspannen der Verbindung beeinflusst. Für die im KHS eingesetzten Dichtungen werden die Abdichteigenschaften mit der in Abhängigkeit vom Medium und vom Innendruck ermittelten minimal erforderlichen Dichtungsflächenpressung  $Q_{\min(L)}$  zum Erreichen der geforderten Dichtheitsklasse L beim Vorspannen und der minimal erforderlichen Dichtungsflächenpressung  $Q_{S\min(L)}$  zur Einhaltung dieser Dichtheitsklasse L im Betrieb charakterisiert.  $Q_{S\min(L)}$  ist dabei von der beim Vorspannen der Verbindung erzeugten Dichtungsflächenpressung  $Q_A$  ( $\geq Q_{\min(L)}$ ) abhängig. Mit der Erhöhung der Vorspannkraft werden die Abdichteigenschaften der Dichtung verbessert, wobei die maximale Vorspannkraft durch die zulässigen Beanspruchungen der Einzelteile (Flansche, Schrauben, Dichtung) bei der Montage (bei Raumtemperatur) begrenzt wird.

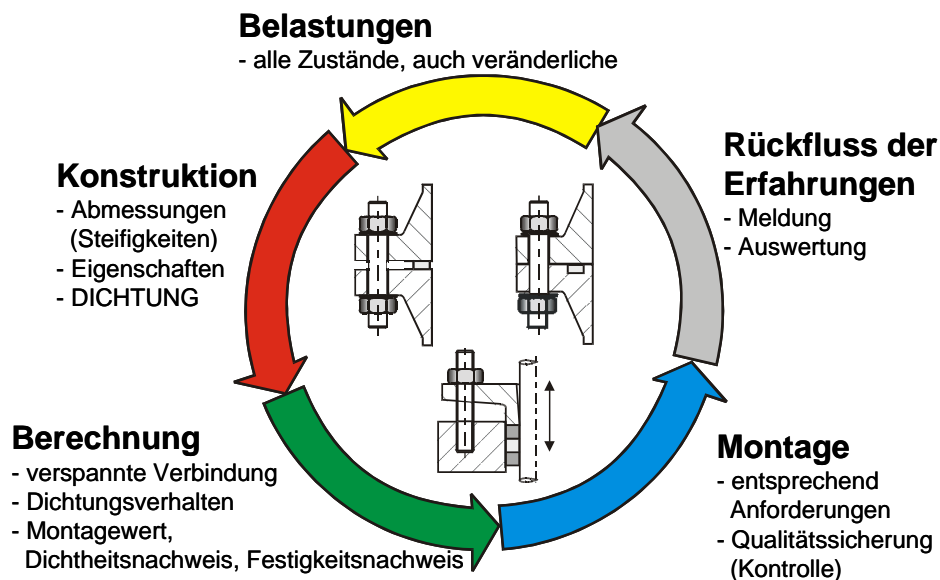
Bei der Auslegung ist nachzuweisen, dass durch die festgelegte Vorspannkraft mindestens  $Q_{\min(L)}$  erzeugt wird und die aus der Vorspannkraft resultierende Dichtungsflächenpressung im Betrieb größer als die in Abhängigkeit von  $Q_A$  mindestens erforderliche Flächenpressung  $Q_{S\min(L)}$  ist. Bei der Berechnung der Dichtungsflächenpressung in den einzelnen Betriebszuständen sind neben den äußeren Belastungen auch die Steifigkeiten und die elastoplastischen Verformungseigenschaften der Einzelteile ausreichend genau zu berücksichtigen. Weiter ist mit einem Festigkeitsnachweis zu zeigen, dass die maximalen Beanspruchungen der Einzelteile unter den jeweils zulässigen Beanspruchungen liegen, da sonst große Undichtigkeiten nicht ausgeschlossen werden können.

Zur Durchführung der Nachweise zur Begrenzung der Emission muss die einzuhaltende Dichtheitsklasse L für das Betriebsmedium festgelegt werden. Ein Beispiel für die Zuordnung der einzuhaltenden Dichtheitsklasse des Prüfmediums zum Betriebsmedium, die von den Gutachtern und Aufsichtsbehörden bestätigt

wurde, zeigt Tabelle 3.2. Eine allgemeine Festlegung, unabhängig vom Betriebsmedium, ist in VDI 2290 getroffen, bei der die rechnerische Einhaltung der Dichtheitsklasse  $L_{0,01}$  für das Prüfmedium Helium nachzuweisen ist. Hierbei wird dann angenommen, dass für das eigentliche Betriebsmedium immer kleinere Leckageraten erzielt werden.

## 4.2 Voraussetzungen für die Begrenzung von Emissionen

Für die Erfüllung der Forderungen der IED Directive bzw. der TA Luft ist ein umfassendes Integritätskonzept für Flanschverbindungen erforderlich, wie es beispielhaft im Qualitätsmanagementzirkel in **Bild 4.1** dargestellt ist.



**Bild 4.1: Konzept für eine sichere Funktion von Flanschverbindungen**

Für die nachweisliche Begrenzung der Emission einer Verbindung (Dichtheit, Festigkeit) sind dabei folgende Voraussetzungen einzuhalten:

- Kenntnisse der Anforderungen (betriebliche Parameter wie Medium, Innendruck, Temperatur; relevante äußere Belastungen wie Kräfte und Momente, einzuhaltende Dichtheitsklasse  $L$  für das Betriebsmedium und der äquivalenten Dichtheitsklasse  $L$  für das Prüfmedium),
- Auswahl der für die Anforderungen geeigneten Konstruktion (KHS oder KNS bzw. Flanschttyp, Werkstoff, Dichtungstyp, usw.) sowie Dimensionierung der Flansche und Schrauben,

- Kenntnisse der Dichtungskennwerte und der Beständigkeit der verwendeten Dichtung,
- Dichtheitsnachweis (Festlegung der Vorspannung, Dichtungsflächenpressung im Betrieb),
- Festigkeitsnachweis (Begrenzung der Beanspruchungen beim Vorspannen und im Betrieb),
- qualitätsgesicherte Montage und
- ggf. Kontrolle von Undichtigkeiten im Betrieb.

### **4.3 Belastungen der Flanschverbindung**

Zu den relevanten Belastungen, die einen Einfluss auf die Funktion einer Flanschverbindung haben können, zählen:

- Innendruck und Temperatur (ggf. deren Änderungen bzw. Temperaturverteilung in der Verbindung),
- äußere Kräfte und Momente aus angeschlossenen Rohrleitungen bzw. Komponenten,
- Bedingungen bei der Montage wie z. B. der Abstand der Flansche vor dem Anziehen und der Winkel zwischen den Flanschen (Schiefstellung),
- Schwingungen, kleine Vibrationen, einmalige Bewegungen.

Die zu betrachtenden relevanten Belastungen sind zu spezifizieren (z. B. aus den Systembeschreibungen, Komponenten- oder Rohrleitungsberechnungen) bzw. im Betrieb experimentell zu ermitteln /65/.

### **4.4 Auswahl der geeigneten Konstruktion**

Die Abmessungen von Rohrleitungs- und Behälterflanschen für Krafthauptschlussverbindungen sind größtenteils genormt, weshalb diese in der Praxis deutlich öfter zum Einsatz kommen als Kraftnebenschlussverbindungen. Die Hauptvorteile von KHS-Flanschverbindungen liegen in der Möglichkeit, die Abdichteigenschaften durch die Erhöhung der Dichtungsflächenpressung bei der Montage zu verbessern. Die Hauptnachteile liegen in der großen Verminderung der Dichtungsflächenpressung mit den äußeren Belastungen bzw. mit einer plastischen Verformung der Dichtung im Betrieb sowie einer großen Undichtigkeit beim Versagen der Dichtung.

Die Dimensionierung der Flansche wurde nach DIN (PN-Flansche) oder nach ASME (Class-Flansche) mit pauschalen Angaben zu den auftretenden Belastungen und zu den Dichtungseigenschaften nach dem jeweiligen Kenntnisstand durchgeführt. Als kennzeichnende Belastung ist bei der Berechnung nach ASME der Innendruck zu sehen, bei einer Berechnung nach DIN die aus den im Montagezustand sowie in den relevanten Betriebszuständen wirkenden Kräften ermittelten Stülpmomente.

Die bisherigen Erfahrungen mit der Anwendung von genormten Flanschen zeigen einerseits, dass die Class-Flansche überdimensioniert sind und andererseits, dass die PN-Flansche hauptsächlich bei größeren Durchmessern (über DN300) und niedrigeren Innendrücken (unter 16 bar) unterdimensioniert sind. In diesen Fällen ist die Verifikation der Dimensionierung mit realistischen Angaben hinsichtlich den auftretenden Belastungen und der Dichtungskennwerte sinnvoll.

Die Auswahl der Schrauben betrifft einerseits den Schraubentyp und andererseits den Werkstoff. Für die Auswahl des Schraubentyps stehen entsprechende Normen zur Verfügung, in welchen auch die Schraubengrößen dimensioniert sind. Bei der Werkstoffauswahl ist auf eine ausreichende Zähigkeit und die Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten an den Flanschwerkstoff Wert zu legen.

Für die ausgewählte Flanschkonstruktion muss ebenso eine geeignete Dichtung ausgewählt werden, die eine für die Anforderungen ausreichende Beständigkeit haben muss und für die die Abdicht- und Verformungseigenschaften, letztendlich also die Dichtungskennwerte, bekannt sein müssen.

## **4.5 Dichtungen und Dichtungskennwerte**

Zur Auswahl einer Dichtung für die gegebenen Anforderungen (Belastungen, Medien, Dichtheitsklasse) sowie zur Durchführung der Nachweise sind allgemein folgende Angaben zu den Dichtungen erforderlich:

- Chemische Beständigkeit und Temperaturbeständigkeit über die vorgesehene Betriebsdauer,
- Abdicht- und Verformungseigenschaften und
- Qualitätssicherung und Dokumentation bei der Herstellung.



### 4.5.1 Beständigkeit der Dichtungen

Die Beständigkeit der Dichtung bzw. der Flanschverbindung ist für die bestimmungsgemäße Lebensdauer, also vorwiegend die Zeit zwischen zwei Montagevorgängen bis zum Austausch der Dichtung, zu gewährleisten. Dabei sind z. B. folgende Punkte zu betrachten:

- Gültigkeit der Berechnungskennwerte,
- Medienbeständigkeit der Dichtung,
- Ausschluss der Korrosion der Flansche sowie der angeschlossenen Bereiche,
- Ausblassicherheit und
- Feuerbeständigkeit (Fire-Safe).

Die Änderung der Eigenschaften der Dichtung im Betrieb sollte durch DIN 28090-2 /136/ verifiziert werden. Da bis jetzt keine systematischen Untersuchungen bekannt sind, konnten keine Kriterien bestimmt werden, um die Änderung der Abdichteigenschaften über längere Zeit zu bestimmen. So wird bis jetzt nur die Grenztemperatur angegeben, bis zu der die Dichtungen einsetzbar sind.

Die Medienbeständigkeit der Dichtung kann z. B. nach DIN 28090-3 /137/ bestimmt werden. Im Rahmen des BRITE EURAM-Projekts /105/ wurden systematische Untersuchungen durchgeführt, um Kriterien und ggf. auch Kennwerte zu bestimmen. Es konnten aber keine allgemein gültigen Ergebnisse ermittelt werden, so dass bis jetzt nur aufgrund von Einzelergebnissen, hauptsächlich aus der chemischen Industrie, für spezielle Medien Aussagen hinsichtlich Medienbeständigkeit gemacht werden können.

Korrosion von Flanschen und von angeschlossenen Bereichen durch die Dichtung und das Medium kann zuerst durch die geeignete Auswahl der chemischen Zusammensetzung der Dichtung ausgeschlossen werden, z. B. durch die Begrenzung der Chloranteile (siehe DIN 28090-2), wie es in entsprechenden Spezifikationen gefordert wird.

Bei gefährlichen, insbesondere brennbaren Medien unter hohen Drücken und hoher Temperatur wird oft auch die Ausblassicherheit betrachtet, wobei bisher keine allgemeine Definition in Normen bzw. Regelwerken zu finden sind. Ein genormtes Verfahren zum Nachweis der Ausblassicherheit existiert z. Z. noch nicht. Im Rahmen zweier Forschungsprojekte an der MPA Universität Stuttgart wurden aber die Grundlagen hierfür geschaffen /121/, /122/.

Die Anforderungen an die Feuerbeständigkeit von Dichtungen (Fire-Safe) werden bis jetzt nur für Armaturen in einschlägigen Prüfnormen (ISO-Norm ISO 10497 /138/, American Petroleum Institute Standard API 607 /139/) definiert. Eine "Anpassung" dieser Prüfnormen auf Flanschverbindungen steht noch aus.

Da weltweit keine ausreichenden Regelwerke zum Nachweis der Beständigkeit von Dichtungen vorhanden sind, muss der Dichtungshersteller die Eignung der einzusetzenden Dichtung für die gegebenen Betriebsbedingungen und -zeiten bestätigen. Diese Angaben sind von dem Anwender mit den Betriebserfahrungen und dem Kenntnisstand zu verifizieren.

#### **4.5.2 Dichtungstypen und –abmessungen**

In der Normenreihe EN 1514-1 bis EN 1514-8 /9/ - /15/ sind die Maße und die Kennzeichnung für Dichtungen für Flansche nach EN 1092-1 bis EN 1092-4 /2/ - /5/ (PN bezeichnete Flansche) festgelegt. Die Abmessungen der Dichtungen sind hierbei an die Dichtflächenformen der Flansche angepasst. Für die Flansche nach EN 1759-1 bis EN 1759-4 /6/ - /8/ (Class bezeichnete Flansche) sind die zugehörigen Dichtungsgeometrien in der Normenreihe EN 12560-1 bis EN 12560-7 /16/ - /22/ definiert.

Von den Dichtungsherstellern wurden auch zahlreiche Sondertypen für die unterschiedlichsten Anwendungen entwickelt, so dass insgesamt eine sehr große Anzahl von unterschiedlichen Dichtungen existiert. Eine Auswahl der geeigneten Dichtung ist letztendlich nur aufgrund der Beständigkeit und der Kennwerte für die Abdicht- und Verformungseigenschaften möglich. Der Anwender muss hierzu die Angaben für die verwendete Dichtung vom Hersteller erfragen.

#### **4.5.3 Dichtungskennwerte**

Die für die Beschreibung der Abdicht- und der Verformungseigenschaften von Dichtungsmaterialien erforderlichen Kennwerte wurden in EN 13555 definiert, siehe **Tabelle 4.1**. Bei den die Abdichteigenschaften charakterisierenden Kennwerten handelt es sich um

- die Mindestflächenpressung im Einbauzustand ( $Q_{\min(L)}$ ) zum Erreichen der Dichtheitsklasse L und
- die Mindestflächenpressung im Betriebszustand ( $Q_{S\min(L)}$ ) zur Einhaltung der Dichtheitsklasse L.

Zu den Kennwerten der Verformungseigenschaften zählen

- die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{S\max}$  (Einbauzustand, Betriebszustand),
- der Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$  zur Bestimmung der Änderung der Kräfte zwischen dem Einbau- und Betriebszustand aufgrund der auftretenden Belastungen und
- der Kennwert zur Charakterisierung der Kriech-/Relaxationseigenschaften der Dichtung  $P_{QR}$  (Bestimmung der Verminderung der Dichtungsflächenpressung durch die plastische Verformung der Dichtung).

**Tabelle 4.1: Dichtungskennwerte nach DIN 28090-1 und EN 13555**

DIN 28090-1	EN 13555	Dichtungskennwert	Zielsetzung
$\sigma_{VO}$	$Q_{S\max(RT)}$	Höchstflächenpressung im Montagezustand	Vermeidung von Zerstörung und übermäßiger Verformung
$\sigma_{BO}$	$Q_{S\max}$	Höchstflächenpressung im Betriebszustand	Vermeidung von Zerstörung und übermäßiger Verformung
$E_D$	$E_G$	Ersatzelastizitätsmodul	Berechnung von Änderungen der Schrauben- und Dichtungskraft
$\Delta h_D$	$P_{QR}$	Kriech-/Relaxationsfaktor	Ermittlung der Relaxation
$\sigma_{VU/L}$	$Q_{\min(L)}$	Mindestflächenpressung im Montagezustand	Optimale Anpassung und Dichtheit
$\sigma_{BU/L}$	$Q_{S\min(L)}$	Mindestflächenpressung im Betriebszustand	Begrenzung der Leckagerate

Die Kennwerte der EN 13555 gehen weitestgehend auf Definitionen in der DIN 28090-1 zurück. Die Versuchsdurchführung ist in beiden Normen nahezu identisch; Unterschiede gibt es lediglich bei der Auswertung der Versuche und der Kennwertdefinition.

Die Eignung der Kennwerte für die Beschreibung der Dichtungseigenschaften sowie die Überprüfung der Einflussgrößen und die Übertragbarkeit der in einer Prüfmaschine ermittelten Ergebnisse auf reale Flanschverbindungen erfolgte im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens BRITE EURAM Project BE-5191,

vgl. /105/ - /107/. In dem europäischen Forschungsprojekt PERL /108/ wurden zum einen Kennwerte entsprechend /109/ ermittelt und damit die Prüfverfahren verifiziert, und zum anderen wurde der Einfluss der Temperatur auf das Abdichtverhalten untersucht.

Die erforderlichen Dichtungskennwerte sind vom Dichtungshersteller für die einzusetzende Dichtung zur Verfügung zu stellen. Die experimentell ermittelten und von einem unabhängigen Prüfinstitut verifizierten Dichtungskennwerte nach EN 13555 werden in Form von Dichtungsdatenblättern auf der Dichtungsdatenbank [www.gasketdata.org](http://www.gasketdata.org) veröffentlicht. Diese Kennwerte wurden nur für die in der Norm angegebenen Prüfabmessungen ermittelt.

#### **4.5.4 Qualitätssicherung bei den Herstellern**

Die zur Qualitätssicherung bei der Herstellung von Dichtungen existierenden Normen, wie z. B. DIN 28090-2 /136/, DIN 28091 /141 - /144/, DIN 52913 /145/ oder EN 14772 /146/, können nur zur Kontrolle einer gleichbleibenden Qualität der Dichtung herangezogen werden. Die Prüfergebnisse dieser Versuche erlauben keinen Aufschluss über die vorhandenen Dichtungskennwerte für die Abdicht- und Verformungseigenschaften nach EN 13555.

Für die Absicherung der Qualität bei der Herstellung sowie die Bestätigung der Qualität nach der Herstellung sind vom Dichtungshersteller entsprechende Dokumentationen zu erstellen.

#### **4.6 Dichtheits- und Festigkeitsnachweis**

Da die Dimensionierung der genormten Flansche mit pauschalen Angaben zu den auftretenden Belastungen und den Dichtheitskennwerten nach dem Kenntnisstand der 90er Jahre erfolgte und die Dimensionierung von "Sonderkonstruktionen" ebenfalls mit solchen Angaben und ohne Berücksichtigung der möglichen Änderung der Schraubkraft im Betrieb vorgenommen wird, sind bei der Auslegung von Dichtverbindungen, bei denen die Emission im Betrieb zu begrenzen ist, quantitative Nachweise der Dichtheit und Festigkeit für die relevanten Betriebsbedingungen unumgänglich.

Für die Nachweise sind geeignete Berechnungsverfahren einzusetzen, die einerseits die Verwendung der Eingangsgrößen und andererseits die ausreichend genaue Ermittlung der Beanspruchungen ermöglichen. Eine solche Vorgehensweise wird in EN 1591-1 beschrieben, welche daher in VDI 2290 neben einer FEM-Analyse als einziges anwendbares Berechnungsverfahren für die Durchführung von Dichtheits- und Festigkeitsnachweisen genannt wird. Alternativ müssen natürlich auch die kerntechnischen Regeln KTA 3201.2 und KTA 3211.2 genannt werden, die aber außerhalb dieses Industriezweiges nicht angewandt werden.

#### 4.6.1 Dichtheitsnachweis

Beim Dichtheitsnachweis ist die Vorspannkraft zu bestimmen, die einerseits eine ausreichende Verformung der Dichtung bei der Montage der Verbindung zum Erreichen der geforderten Dichtheitsklasse L ( $Q_A \geq Q_{\min(L)}$ ) garantiert und die andererseits eine ausreichend hohe Dichtungsflächenpressung in allen relevanten Betriebszuständen zur Einhaltung der Dichtheitsklasse L ( $Q \geq Q_{S\min(L)}$ ) sicherstellt. Bei der Bestimmung der betrieblichen Dichtungsflächenpressung müssen nicht nur die relevanten Belastungen sondern auch die Verformungseigenschaften der verwendeten Dichtung (Rückfederung -  $E_G$ , Kriech-/Relaxation -  $P_{QR}$ ) berücksichtigt werden. Es ist auch nachzuweisen, dass die Dichtungsflächenpressung bei der Montage  $Q_A$  unterhalb der maximal zulässigen Dichtungsflächenpressung  $Q_{S\max}$  liegt, da ansonsten die ermittelten Kennwerte für die Abdichteigenschaften nicht gültig sind und die Dichtung bei der Montage dadurch bereits zerstört werden könnte.

Für den Dichtheitsnachweis können die analytischen Formeln nach EN 1591-1 verwendet werden, mit denen bei der Ermittlung der Dichtungskräfte in den einzelnen Betriebszuständen die Steifigkeiten der Einzelteile, die relevanten Belastungen, die Wärmeausdehnung der Einzelteile und das Setzverhalten der Dichtung berücksichtigt werden.

In EN 1591-1 werden die Kräfte im Betrieb als sekundäre Belastungen betrachtet, die durch lokale plastische Verformungen begrenzt werden. Lediglich die Einbauschraubenkraft im Montagezustand und die für die Einhaltung der Dichtheitsklasse L erforderliche Schraubenkraft in den Betriebszuständen dürfen keine Spannungen hervorrufen, die unzulässig hoch wären. Die u. U. auftretenden lokalen plastischen Verformungen führen jedoch dazu, dass die Dichtungsflächenpressungen in den Betriebszuständen unbestimmt sind, und dass somit der Dichtheitsnachweis, d. h. die Gewährleistung der Mindestflächenpressung

$Q_{Smin(L)}$  nicht möglich ist. Für einen allgemeingültigen Dichtheitsnachweis muss EN 1591-1 daher angepasst werden. Weitere Aspekte, die bei einer Überarbeitung der Norm in den Berechnungsalgorithmus integriert werden sollten, betreffen folgende Punkte:

- Berücksichtigung der Verformung der Dichtung bei der Montage, da ansonsten der Ersatzelastizitätsmodul der Dichtung sowie die Klemmlänge der Schrauben nicht stimmen,
- Berücksichtigung von Dehnhülsen bzw. Unterlegscheiben, welche die Klemmlänge der Schrauben und die Steifigkeit der Verbindung beeinflussen,
- Überprüfung der Abtragbarkeit von Torsionsmomenten und Scherkräften,
- modifizierte Bewertung der zulässigen lokalen Plastifizierungen und
- modifizierte Bewertung der effektiven Dichtungsbreiten über die elastoplastische Verformungseigenschaften der Dichtung.

Ein Dichtheitsnachweis ist auch mit der Methode der Finiten Elemente möglich. Der jetzige Stand ermöglicht die Auswahl der geeigneten Elemente für die Modellierung von Flanschen und Schrauben, die Verwendung von Dichtungselementen mit Eingabe der realen Verformungseigenschaften sowie die Berücksichtigung der realen Belastungen. Die Verwendung der FE Methode ist aber aufgrund der deutlich aufwändigeren Modellierung nur in besonders wichtigen Fällen und nur unter bestimmten Voraussetzungen sinnvoll. Sie ist für standardisierte Flanschverbindungen zu aufwändig.

#### **4.6.2 Festigkeitsnachweis**

Beim Festigkeitsnachweis sind die Beanspruchungen der Flansche und Schrauben zu begrenzen, um ein Versagen der Einzelteile und damit auch große Undichtigkeiten ausschließen zu können. Größere plastische Verformungen der Flansche und Schrauben im Betrieb sind dabei auszuschließen, auch wenn die betrieblichen Belastungen festigkeitsmäßig als sekundäre Belastungen zu betrachten sind. Zu starke plastische Verformungen führen nämlich zur unkontrollierten Verminderung der Flächenpressung der Dichtung, was die Durchführung eines Dichtheitsnachweises unmöglich macht.

Die Ermittlung der Kräfte in den relevanten Betriebszuständen kann, wie bereits beim Dichtheitsnachweis erläutert, ebenfalls mit den analytischen Formeln der EN 1591-1 erfolgen. Die Bewertung dieser resultierenden Kräfte in den Folgezuständen muss

allerdings überdacht werden, da die Zulässigkeit von lokalen Plastifizierungen neu zu überprüfen ist. Durch die Verwendung der elastoplastischen Verformungseigenschaften der Dichtung und die Berücksichtigung der hervorgerufenen Flanschblattneigung kann die Verteilung der Dichtungsflächenpressung über die Dichtungsbreite ermittelt und der Hebelarm der wirkenden Dichtungskraft entsprechend korrigiert werden, wie dies in EN 1591-1 bereits in ähnlicher Form vorgesehen ist. Die Streuung der Vorspannkräfte durch das Anzugsverfahren ist nur bei der Absicherung der Beanspruchung der Schrauben im Einbauzustand zu berücksichtigen. Sie kann aufgrund diverser durchgeführten Untersuchungen bei der Absicherung der Beanspruchungen der Schrauben im Betrieb sowie bei Absicherung der Beanspruchung der Flansche sowohl im Einbauzustand als auch im Betrieb vernachlässigt werden.

Eine Ermüdungsanalyse ist bei der Verwendung einer geeigneten Konstruktion, der Durchführung eines Dichtheits- und Festigkeitsnachweises sowie einer qualitätsgesicherten Montage nicht erforderlich, da die Flanschverbindungen durch die Ermüdungsanalyse für die zugehörige Komponente oder Rohrleitung abgesichert sind. Falls die Ergebnisse einer Ermüdungsanalyse für die betreffende Komponente bzw. Rohrleitung auf mögliche Schwierigkeiten hindeuten, ist aber über die Notwendigkeit einer Ermüdungsanalyse auch für die Flanschverbindung zu entscheiden.

## 5 Prüfeinrichtung zur Kennwertermittlung

Dichtungskennwerte müssen die Verformungs- und Abdichteigenschaften der in einer Flanschverbindung einzusetzenden Dichtung ausreichend genau charakterisieren. Sie sind für die Auswahl der für die Anforderungen (Betriebsparameter, geforderte Dichtheitsklasse) geeigneten Dichtung und die Durchführung von Dichtheits- und Festigkeitsnachweisen unumgänglich. Auf Grund der vielseitigen Einflussgrößen (Eigenschaften der Grundwerkstoffe, Herstellungsverfahren, usw.) sind die Dichtungskennwerte grundsätzlich nur experimentell mit einer geeigneten Prüfvorrichtung, Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung zu bestimmen. Neben den Betriebsbedingungen und der geforderten Dichtheitsklasse müssen bei der Bestimmung der Dichtungskennwerte auch die geometrischen Größen, d. h. die Dichtungsabmessungen der einzusetzenden Dichtung, berücksichtigt werden.

Zur Ermittlung der Dichtungskennwerte sind allgemein

- Stauchversuche,
- Druckstandversuche,
- Kriech-/Relaxationsversuche,
- Leckageversuche und
- Reibversuche

erforderlich.

### 5.1 Multifunktionsprüfeinrichtung TEMES<sub>fl.ai1</sub>

Mit der Veröffentlichung der Prüfnorm DIN 28090-1 im Jahr 1995 waren erstmalig Versuchsabläufe zur Ermittlung von Dichtungskennwerten definiert. Zu diesem Zeitpunkt standen aber nur wenige Prüfvorrichtungen zur Verfügung, die die Durchführung dieser Versuche erlaubten.

Bereits seit Anfang der neunziger Jahre wurden Prüfvorrichtungen entwickelt, die eine systematische Vorgehensweise unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrößen ermöglichen /65/. Zunächst wurden hierbei einfache Vorrichtungen mit Flanschpaaren eingesetzt. Jedoch war der zeitliche Aufwand für die Bestimmung der Dichtungskennwerte in diesen Vorrichtungen sehr hoch. Außerdem waren die Prüfbedingungen nur mit großem Aufwand einzuhalten, da die Stauch-, Druckstand-



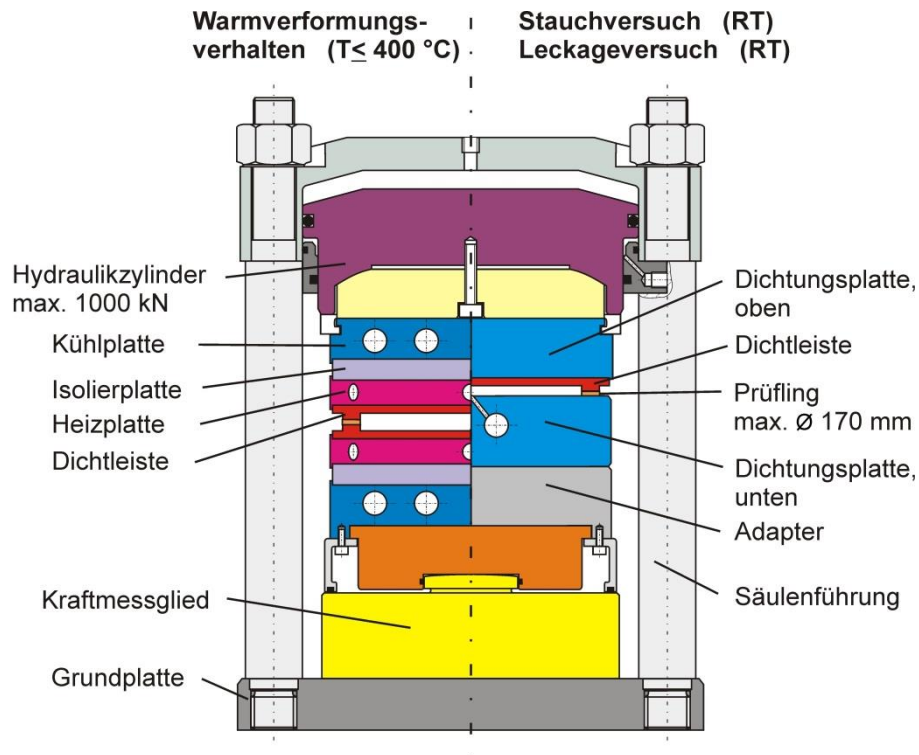
und Leckageversuche mit stetig ansteigender bzw. mit konstant gehaltener Last durchzuführen sind. Auch die Durchführung von Kriech-/Relaxationsversuchen, in welchen die anfänglich aufgebrachte Dichtungsflächenpressung in Anhängigkeit von der plastischen Verformung der Dichtung sowie der Steifigkeit des Prüfgeräts zu regeln ist, stellte eine versuchstechnische Herausforderung dar.

Erst mit der Entwicklung der universellen Multifunktionsprüfeinrichtung TEMES<sub>fl.ai1</sub> konnten alle genannten Versuche mit einer sehr guten Reproduzierbarkeit durchgeführt werden. Bei dieser Prüfvorrichtung handelt es sich um eine computergesteuerte, servogeregelte hydraulische Presse mit einem Kraftbereich von max. 1 MN, vgl. **Bild 5.1** und **Bild 5.2**.



**Bild 5.1:** Multifunktionsprüfeinrichtung TEMES<sub>fl.ai1</sub> zur Ermittlung von Dichtungskennwerten

Die Erfassung der Dichtungskraft erfolgt über eine auf der Grundplatte montierte Kraftmessdose, die Verformung der Dichtung wird über drei äquidistant auf dem Umfang verteilte Glasmaßstäbe aufgenommen. Außerdem werden die Temperaturen an verschiedenen Stellen des Prüfstandes gemessen. In der Leckagevorrichtung kommen ein Absolutdruckaufnehmer und ein Differenzdruckaufnehmer zum Einsatz.

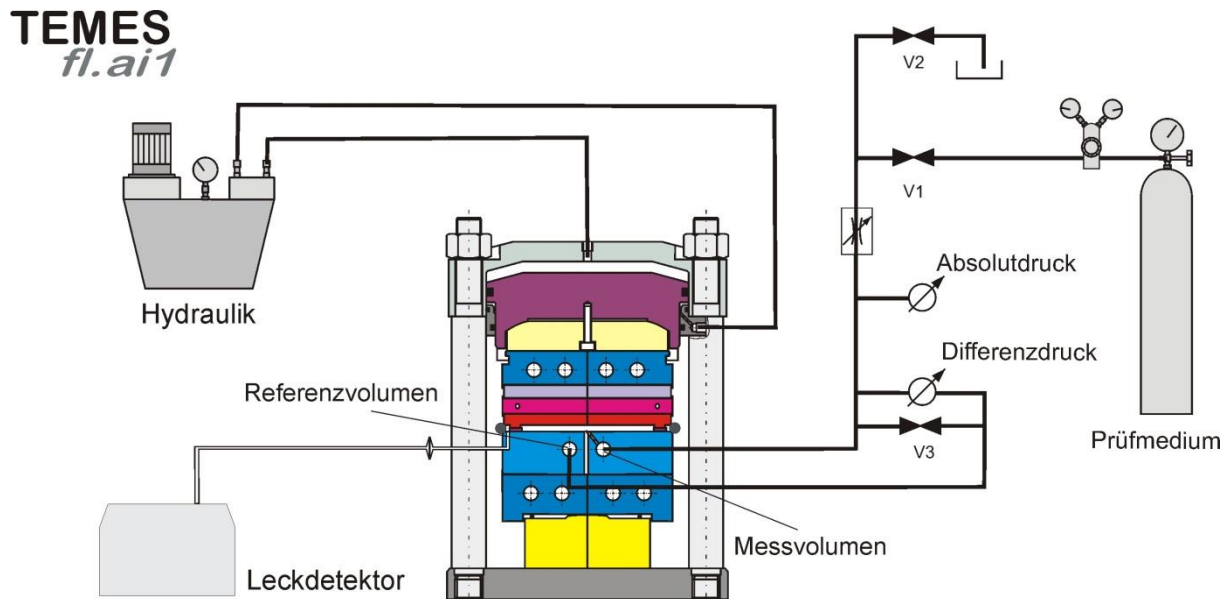


**Bild 5.2: Schnittzeichnung der hydraulischen Presse der Multifunktionsprüfeinrichtung TEMES<sub>fl.ai1</sub>**

Druckstandversuche können in diesem Aufbau bis zu einer Temperatur von 400 °C durchgeführt werden. Auch die Kriech-/Relaxationskennwerte können in dieser servohydraulischen Prüfmaschine ermittelt werden. Softwaregesteuert wird hierbei die Flächenpressung in Abhängigkeit von der gemessenen Verformung der Dichtung und der gewählten Steifigkeit, die die Steifigkeit der Flanschverbindung simulieren soll, reduziert.

Durch die modulare Bauweise kann der Prüfstand dahingehend erweitert werden, dass auch Leckageversuche zur Ermittlung der Abdichteigenschaften durchführbar sind, vgl. Bild 5.2. Hierzu werden die Heiz-, Isolier- und Kühlplatten gegen Dichtungsplatten ausgetauscht, die mit einer separaten Befüllvorrichtung mit einer speziellen Messeinheit verbunden werden, siehe **Bild 5.3**. Als Messprinzip für die Bestimmung der Leckagerate können die Druckabfallmethode und die Helium-Massenspektrometrie eingesetzt werden.

Bei der Leckageratenmessung nach der Differenzdruckmethode werden zwei Volumen benötigt, das eigentliche Messvolumen und das Referenzvolumen. Zwischen beiden Volumen ist ein Differenzdruckaufnehmer eingebaut, des Weiteren gibt es eine Verbindungsleitung, die über ein Ventil geschlossen werden kann, vgl.



**Bild 5.3: Prinzip der Leckageratenmessung in der Multifunktionsprüfeinrichtung TEMES<sub>fl.ai1</sub>**

Bild 5.3. Eine Leckage am Dichtungsprüfling erzeugt nach Schließen von Ventil V3 einen Druckabfall im Messvolumen gegenüber dem metallisch gedichteten Referenzvolumen. Die Leckageratenberechnung erfolgt bei bekanntem Volumen aus der zeitlichen Änderung des Druckabfalls gemäß der allgemeinen Gasgleichung.

Das Differenzdruckverfahren hat eine Auflösungsgrenze von ca.  $10^{-4}$  mg/m/s, bezogen auf den mittleren Umfang der Dichtung. Bei der Messung von Leckageraten nahe der Auflösungsgrenze sind stabile Temperaturverhältnisse im Prüfraum vorauszusetzen, da Temperaturschwankungen das Messergebnis verfälschen können.

Mit dem Helium-Massenspektrometer - auch Lecksucher bezeichnet - kann die Heliumkonzentration in einem Prüfraum bestimmt werden. Dazu kann das Massenspektrometer entweder im Schnüffelbetrieb oder im Vakuumbetrieb eingesetzt werden. Im Schnüffelbetrieb wird über die Schnüffelleitung das Prüfmedium angesaugt, im Vakuumbetrieb muss der Prüfraum evakuiert werden, was über eine Vorpumpe bzw. über die Turbomolekularpumpe des Massenspektrometers geschieht.

Der Messbereich des Helium-Massenspektrometers erstreckt sich von  $10^{-10}$  mbar·l/s bis  $10^{-1}$  mbar·l/s, was bei einer Flachdichtungsnormgeometrie von DN40/PN40 und bei Raumtemperatur einer Leckagerate von  $8 \cdot 10^{-11}$  mg/m/s bis  $8 \cdot 10^{-2}$  mg/m/s

entspricht. Das Gerät wird über ein internes Testleck in seinem Arbeitspunkt kalibriert. Die Nennleckagerate liegt bei  $10^{-7}$  mbar-l/s, in diesem Bereich ist dann eine Ungenauigkeit des Messergebnisses von  $\pm 15\%$  zu unterstellen.

Bei hohen Leckagen und entsprechender Messung hoher Heliumkonzentrationen reichert sich Helium im Massenspektrometer an. Die Empfindlichkeit des Messgerätes verschlechtert sich dadurch. Die Messung von zu hohen Leckageraten sollte daher vermieden werden, denn bei zu hohen Verunreinigungen muss das Massenspektrometer über eine spezielle Funktion wieder von der Hintergrundkonzentration gereinigt werden. Dies ist für eine verlässliche Messung der Heliumkonzentration von entscheidender Bedeutung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden einige Weiterentwicklungen der Prüfeinrichtung realisiert, die die Genauigkeit der ermittelten Dichtungskennwerte erhöhen und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse steigern sollen. Außerdem wurden Zusatzmodule entwickelt, die es ermöglichen, neben den Dichtungskennwerten für die Berechnung von Flanschverbindungen weitere Dichtungscharakteristika (wie z. B. das Ausblasverhalten, die Reibungskoeffizienten und die Leckageraten für verschiedene Prüfmedien) experimentell zu ermitteln. Diese sind nachfolgend dargestellt.

## 5.2 Kompensationskurven

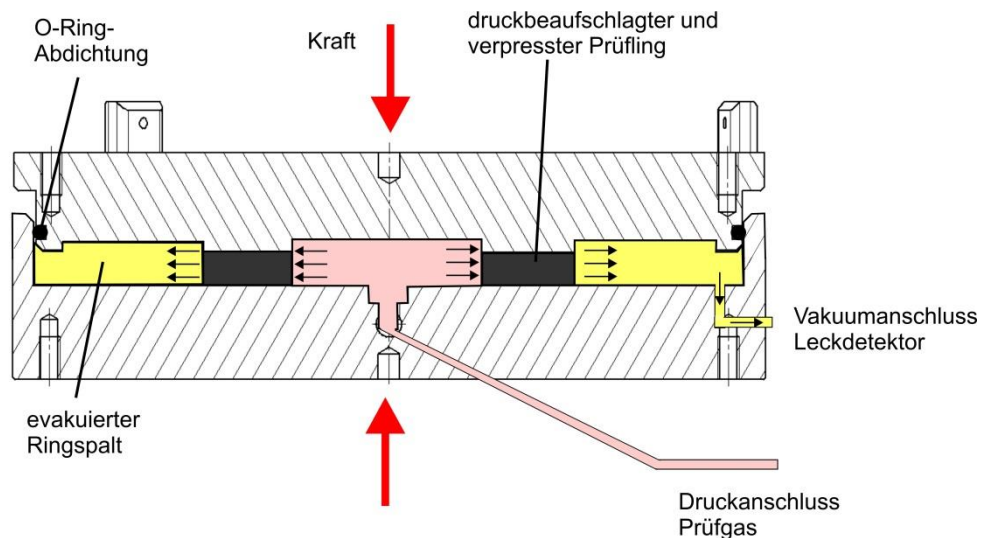
Grundsätzlich ist bei jedem Prüfstand mit einer bestimmten Eigenverformung zu rechnen, die die Messung der Dichtungshöhe verfälscht. Diese Eigenverformung kann sowohl von der Krafteinleitung als auch von der Wärmeausdehnung der Prüfplatten herrühren. Die Eigenverformung in Folge der Krafteinleitung wird durch die Verwendung von Isolationsscheiben mit demselben Durchmesser wie der Außendurchmesser der Dichtleiste minimiert. Dadurch wird eine möglichst zentrale Krafteinleitung in den Prüfling realisiert, womit eine Durchbiegung der Prüfplatten und somit eine Fehlmessung der Dichtungshöhe verhindert wird.

Insbesondere bei den Druckstandversuchen zur Ermittlung der Ersatzelastizitätsmodule spielen jedoch schon Dickenänderungen unter 0,01 mm eine bedeutende Rolle. Deshalb wurde in die Ablaufsteuerung eine Routine integriert, welche eine Kompensation der Eigenverformung in Abhängigkeit von der aufgebrauchten Kraft bzw. der Prüftemperatur erlaubt. Eine solche Kompensationskurve muss vor der eigentlichen Prüfung einmalig für jedes

Prüfplattenpaar und die zugehörigen Isolationsscheiben aufgenommen werden. Damit kann die wegen der Eigenverformung hervorgerufene Abweichung auf wenige Mikrometer reduziert werden.

### 5.3 Optimierung der Leckageratenmessung mit Massenspektrometern

Weitere Optimierungen der Prüfeinrichtung betreffen die Durchführung von Leckageversuchen mit Helium-Massenspektrometern. Die Prüfplatten wurden so konstruiert, dass ein O-Ring radial abdichtet, siehe **Bild 5.4**. Die zur Verformung des O-Ringes erforderliche Kraft wirkt bei dieser Konstruktion radial und beeinflusst die Kraftmessung zur Bestimmung der Dichtungsflächenpressung nicht. Lediglich bei der Verformung bzw. Entlastung der Dichtung, also bei der axialen Bewegung der beiden Prüfplatten gegeneinander, entstehen Reibkräfte, die von der Kraftmessdose gemessen werden. Diese liegen jedoch im Bereich von ca. 0,2 kN und verfälschen das Kraftsignal nur marginal.



**Bild 5.4: Radiale O-Ring-Abdichtung**

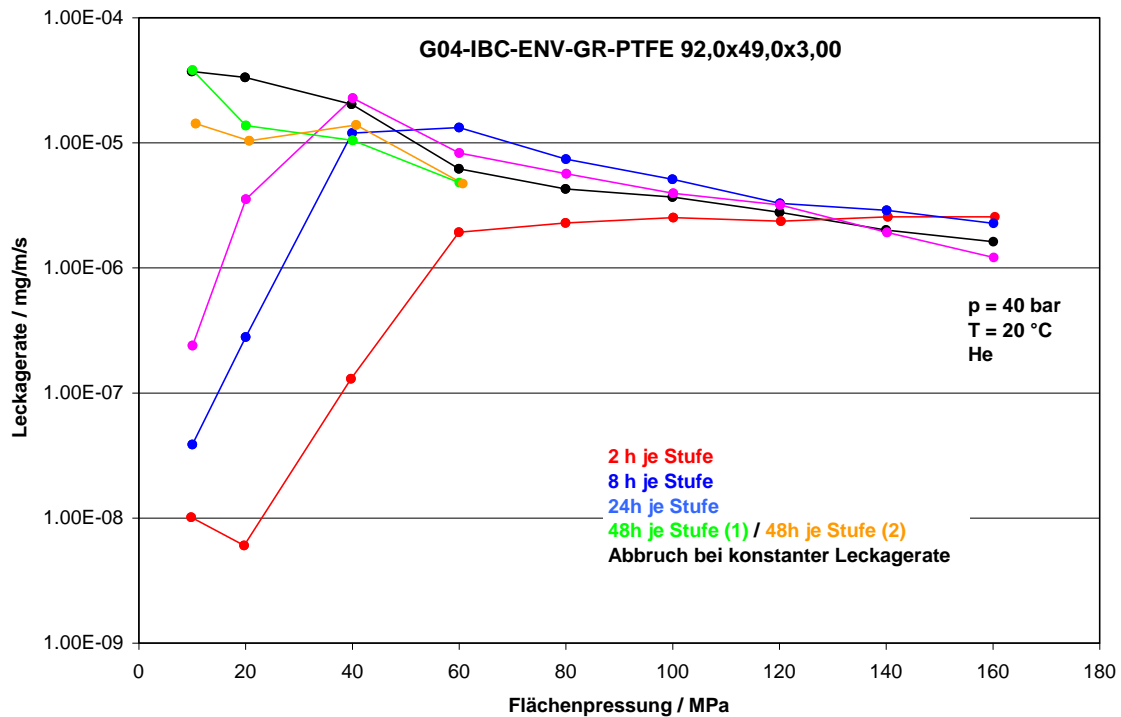
Die Kontamination der Lecksucher mit Helium stellt in der Dichtungsprüfung ein weiteres Problem dar. Da eine Dichtung über ihren gesamten Einsatzbereich untersucht wird, treten bei den ersten, niedrigen Flächenpressungsstufen sehr hohe Leckageraten auf, durch welche die Geräte stark kontaminiert werden. Hat man im Lecksucher dann erst einmal eine hohe Hintergrundkonzentration, werden die nachfolgenden Messungen bei höheren Dichtungsflächenpressungen dadurch verfälscht.

Im Prüfablauf des Leckageversuches wird daher gezielt zwischen den beiden Messmethoden Differenzdruckmessung und Massenspektrometrie gewechselt, um die Dichtungskennwerte in den jeweils messtechnisch günstigen Bereichen der Geräte zu ermitteln. Zurzeit werden Heliumleckageraten oberhalb von  $10^{-2}$  mg/m/s ausschließlich nach dem Differenzdruckverfahren bestimmt, wobei der Übergangswert durch den Benutzer verändert werden kann. Erst bei Unterschreitung dieses Grenzwertes wird der Lecksucher zugeschaltet. Damit ist gewährleistet, dass dieses Gerät vor einer zu hohen Heliumkontamination in den anderen Leckagestufen geschützt ist.

Auch zeigte sich, dass die Messzeit eine entscheidende Rolle spielt. Während mit dem Differenzdruckverfahren relativ schnell eine konstante Leckagerate erreicht wird, dauert es bei der Messung mit dem Massenspektrometer zumeist deutlich länger, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. Dies kann zum einen am oben geschilderten erforderlichen Abbau der Heliumkonzentration im Gerät liegen, zum anderen kann es auch lange dauern, bis sich ein (konstanter) Leckagestrom durch die Dichtung aufgebaut hat. Zunächst wird das Dichtungsmaterial vergleichbar einem Schwamm mit Helium gesättigt, ehe die Helium-Moleküle die Dichtung vollständig durchströmt haben. Während der Druckabfall im Prüfraum sofort gemessen werden kann, reagiert der Lecksucher erst zeitlich verzögert.

Da in der Prüfnorm Messzeiten für die Ermittlung der Leckagerate bei jeder Flächenpressungsstufe als Anhaltswerte angegeben sind, interpretierten viele Anwender diese Zeiten als verbindliche Vorgabe. Diese Messzeiten, 2 Stunden bei der Aufnahme der Belastungskurve und 5 Stunden bei der Aufnahme von Entlastungskurven, können aber viel zu kurz sein, wie das Diagramm in **Bild 5.5** verdeutlicht.

Deshalb wurde ein grenzwertgesteuertes Abbruchkriterium in der Messsoftware integriert, welches eine Messung bei einer Flächenpressungsstufe erst beendet, sobald wirklich eine konstante Leckagerate erreicht ist. Hierzu wird in der Software immer der Messwert des Massenspektrometers mit dem Messwert, der 20 Minuten früher erfasst wurde, verglichen. Solange die Änderung zwischen den beiden Messwerten größer als 2% ist, läuft die Leckageratenmessung in dieser Flächenpressungsstufe weiter. Erst wenn die Differenz unter diesen Grenzwert fällt, wird die Messung beendet und die nächste Flächenpressungsstufe angefahren.



**Bild 5.5:** Leckagerate in Abhängigkeit von der Messzeit in jeder Stufe

#### 5.4 Leckageratenmessung mit Flammen-Ionisationsdetektoren

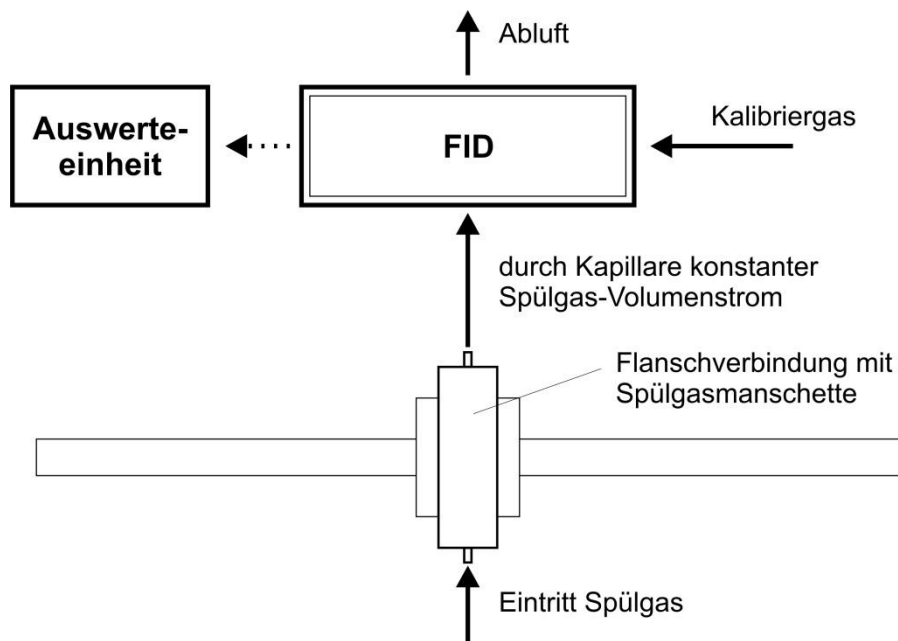
Zur Messung der Leckagerate von Kohlenwasserstoffen können neben der Druckabfallmethode auch Flammen-Ionisationsdetektoren (FID) eingesetzt werden. Bei diesem Verfahren wird an Stelle des Helium-Massenspektrometers der FID an die außerhalb des Prüflings liegende Kapselung angeschlossen. In diesem Fall wird jedoch kein Vakuum angelegt, sondern die Kammer wird mit einem Spülgas durchströmt, so dass das durch die Dichtung austretende Prüfgas aus dem Zwischenraum zum FID transportiert wird.

Bei bekanntem Volumenstrom des Spülgases und der Messung der Konzentration im Spülgasstrom kann man durch Umrechnung der FID-Anzeige auf den Leckagestrom bzw. die Leckagerate durch die Dichtung schließen. **Bild 5.6** zeigt den prinzipiellen Aufbau der Versuchsanordnung.

Die Spülgasmethode eignet sich zur Messung der Emissionen an jedem Flanschverbindungstyp für beliebige Nenndurchmesser und Nenndrücke. Sie kann daher auch am Dichtungsprüfstand TEMES<sub>fl.ai1</sub> zum Einsatz kommen. Als Prüfmedium können bei Verwendung eines FID als Detektor flüssige oder gasförmige organische Kohlenwasserstoffverbindungen eingesetzt werden. Aufgrund

des einfachen Versuchsaufbaus sind mit diesem Verfahren neben Labormessungen auch experimentelle Untersuchungen im laufenden Anlagenbetrieb möglich. Die Nachweisgrenze dieses Verfahrens liegt bei  $1,0 \cdot 10^{-5}$  mbar·l/s.

Das FID-Messprinzip zeichnet sich durch eine (physikalisch) lineare Kennlinie über mehrere Dekaden aus. In Standardausführung sind die meisten FID-Analysatoren in den Messbereichen bis 10.000 ppm Propan bzgl. Linearität und Nachweisgrenze optimiert. Somit können im Messbereich bis 10 ppm Messungen mit niedriger Nachweisgrenze durchgeführt und es kann bis in den Messbereich von 10.000 ppm noch mit einer linearen Kennlinie gearbeitet werden. Zwischen 10.000 ppm und 100.000 ppm ist die Kennlinie in der Regel zunehmend unlinear. Durch eine Mehrpunkt-Kalibrierung dieses Messbereiches kann der Linearitätsfehler jedoch rechnerisch kompensiert werden.



**Bild 5.6: Prinzip der Leckageratenmessung mit der FID-Spülgasmethode**

## 5.5 Leckageratenmessung unter Temperatur

Anstelle der unteren Prüfplatte mit einer Dichtleiste kann auch eine Prüfplatte eingebaut werden, die mit einer Stichbohrung zur Plattenmitte und einem Swagelok-Anschluss zur Verbindung an die Leckagemesseinheit ausgestattet ist. Diese Prüfplatte, die mit der Heizplatte verschraubt wird, kann wie eine "normale" Prüfplatte beheizt werden. Das Messvolumen dieser "heißen Leckageplatte" ist im Vergleich



zur Standardprüfplatte für Leckageversuche bei Raumtemperatur sehr klein. Außerdem besitzt diese Leckageplatte kein Referenzvolumen in der Platte. Die Referenzseite der Befüllvorrichtung muss daher bei der Verwendung der heißen Leckageplatte blind gestopft werden.

Als Messverfahren kann das Differenzdruckverfahren problemlos eingesetzt werden. Da sich die Zufuhrleitung nur noch wenige Millimeter außerhalb der Isolierung aufheizt, kann das Messvolumen relativ genau in einen "heißen" und in einen "kalten" Teil aufgeteilt werden. Die Formel zur Berechnung der Leckagerate wird dementsprechend angepasst, so dass die jeweilig herrschende Temperatur dem Volumenanteil zugeordnet werden kann, womit die allgemeine Gasgleichung weiterhin anwendbar ist.

Soll das Massenspektrometer bei Leckageratenmessungen unter Temperatur verwendet werden, ist die maximal zulässige Einsatztemperatur des O-Rings zu beachten. Bei Temperaturen von ca. 200 °C ist somit die obere Einsatzgrenze erreicht.

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass die Leckageraten, die bei Raumtemperatur aufgenommen werden, konservativ hinsichtlich der Abdichteigenschaften bei erhöhten Temperaturen sind. Deshalb erfolgen die Kennwertermittlungen der erforderlichen Mindestflächenpressungen zur Einhaltung einer definierten Dichtheitsklasse ausschließlich bei Raumtemperatur.

Der beschriebene Aufbau eignet sich aber nicht nur, um Leckageratenmessungen unter Temperatur durchzuführen, er kann auch für die Ermittlung der Ausblaseigenschaften der Dichtungen verwendet werden. Bei diesen Versuchen wird die wirkende Dichtungsflächenpressung gezielt reduziert, bis es zu einem drastischen Anstieg der Leckagerate kommt. Aus diesen Versuchen kann dann die Sicherheit gegen Ausblasen aus der Differenz zwischen der Mindestflächenpressung im Betrieb zur Einhaltung der Dichtheitsklasse L und der Flächenpressung beim Auftreten des Ausblasens ermittelt werden.

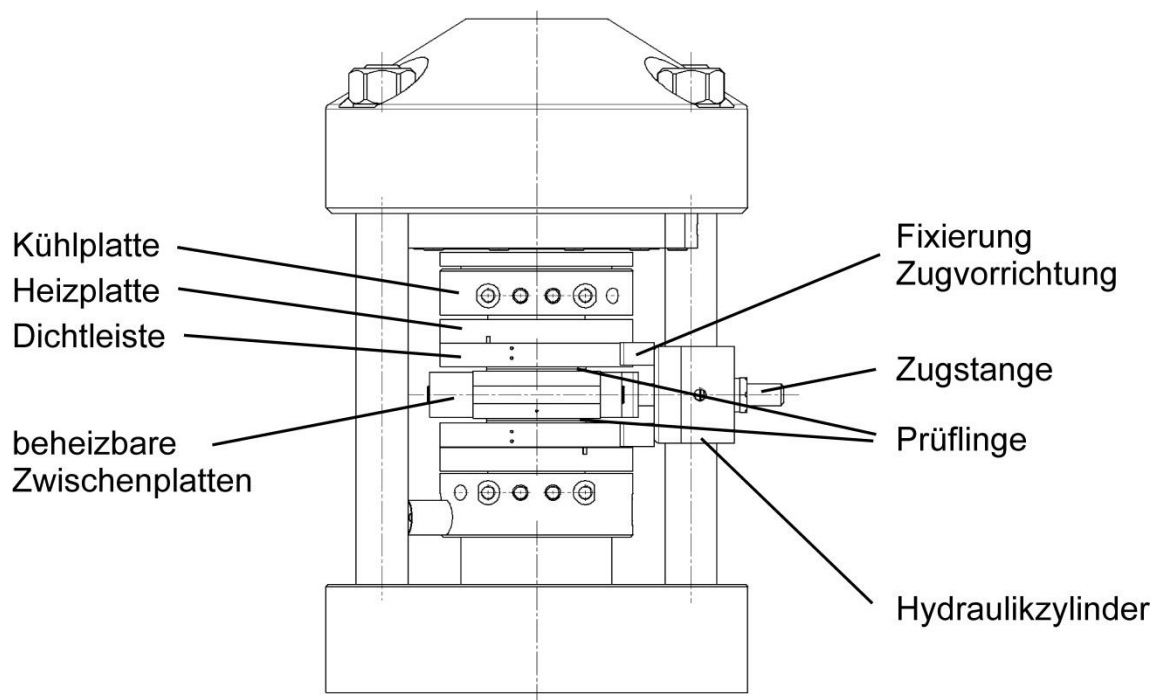
## **5.6 Ermittlung der Reibungskoeffizienten**

Äußere Zusatzkräfte, die in Querrichtung zu der Flanschverbindung wirken, und Torsionsmomente müssen entweder über Formschluss der beiden Flansche oder über Reibschluss zwischen den Dichtungs- und den Flanschoberflächen abgetragen

werden. Um die hierzu erforderlichen Reibkräfte bestimmen zu können, ist die Kenntnis der Reibungskoeffizienten zwischen Dichtung und Dichtfläche erforderlich. In KTA 3201.2 bzw. KTA 3211.2 sind für verschiedene Dichtungswerkstoffe Reibungskoeffizienten angegeben:

- $\mu_G = 0,25$  (fasergebundene Werkstoffe),
- $\mu_G = 0,10$  (graphitbasierende Werkstoffe) und
- $\mu_G = 0,05$  (PTFE-Werkstoffe).

Die Quelle dieser Werte ist nicht mehr nachvollziehbar. Um eine fundierte Datenbasis zu generieren, wurde daher ein spezieller Prüfaufbau konstruiert, bei welchem zwischen die normalen Prüfplatten zwei Dichtungen und ein weiteres, beheizbares Prüfplattenpaar in den Kraftfluss eingebracht werden können. Die Zwischenplatte, deren Oberflächen mit derselben Rauigkeit wie die Dichtleisten entsprechend den Forderungen der EN 13555 gefertigt sind, wird nach Aufbringen der Vorverformungskraft für die Dichtung und der Prüftemperatur mit Hilfe eines Hydraulikzylinders kontrolliert aus dem Zwischenraum herausgezogen, vgl. **Bild 5.7**.



**Bild 5.7: Prüfaufbau für Reibversuche mit Dichtungen**

Aus der Korrelation zwischen aufgebrachtener Flächenpressung, welche der wirkenden Normalkraft bzw. Vorverformungskraft entspricht, und der erforderlichen Querkraft zum Überwinden der Haftreibung bzw. zum Herausbewegen der separaten Prüfplatte

aus dem Prüfstand können dann die Haftreibungs- bzw. Gleitreibungskoeffizienten der verschiedenen Dichtungsmaterialien im Zusammenspiel mit den metallischen Oberflächen der Dichtleisten ermittelt werden. Als wesentliche Versuchsparameter kommen hierbei die aufgebrachte Flächenpressung und die Prüftemperatur in Frage.

Für die Beurteilung der Abtragbarkeit der Querbelastrungen kann schließlich der Haftreibungskoeffizient herangezogen werden, der Gleitreibungskoeffizient ist für diese Betrachtung nicht von Bedeutung.

## 6 Ermittlung der Kennwerte für Dichtungen im Krafthauptschluss

In diesem Kapitel werden die Versuchsdurchführungen und -auswertungen zur Ermittlung der Dichtungskennwerte für Dichtungen im Krafthauptschluss näher betrachtet. Wie bereits in Kapitel 4 ausführlich erläutert, handelt es sich hierbei um die in DIN 28090-1 bzw. EN 13555 definierten Dichtungskennwerte, wobei im Weiteren jedoch nur noch auf die Festlegungen in der EN 13555 eingegangen wird, da die DIN 28090-1 durch diese ersetzt wurde.

Es handelt sich somit um folgende Dichtungskennwerte:

- Mindestflächenpressung im Einbauzustand  $Q_{\min(L)}$ , die erforderlich ist, um die Dichtheitsklasse L zu erreichen,
- Mindestflächenpressung im Betriebszustand  $Q_{S\min(L)}$ , die erforderlich ist, um die Dichtheitsklasse L unter Betriebsbedingungen einzuhalten,
- maximal zulässige Flächenpressung im Einbauzustand  $Q_{S\max(RT)}$  und im Betriebszustand  $Q_{S\max(T)}$ , bis zu der ein Versagen der Dichtung sicher ausgeschlossen werden kann,
- Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$  zur Bestimmung der Änderung der Kräfte zwischen dem Einbau- und Betriebszustand aufgrund der auftretenden Belastungen und
- Kriech-/Relaxationsfaktor der Dichtung  $P_{QR}$ , der die Bestimmung der Verminderung der Dichtungsflächenpressung durch die inelastische Verformung der Dichtung erlaubt.

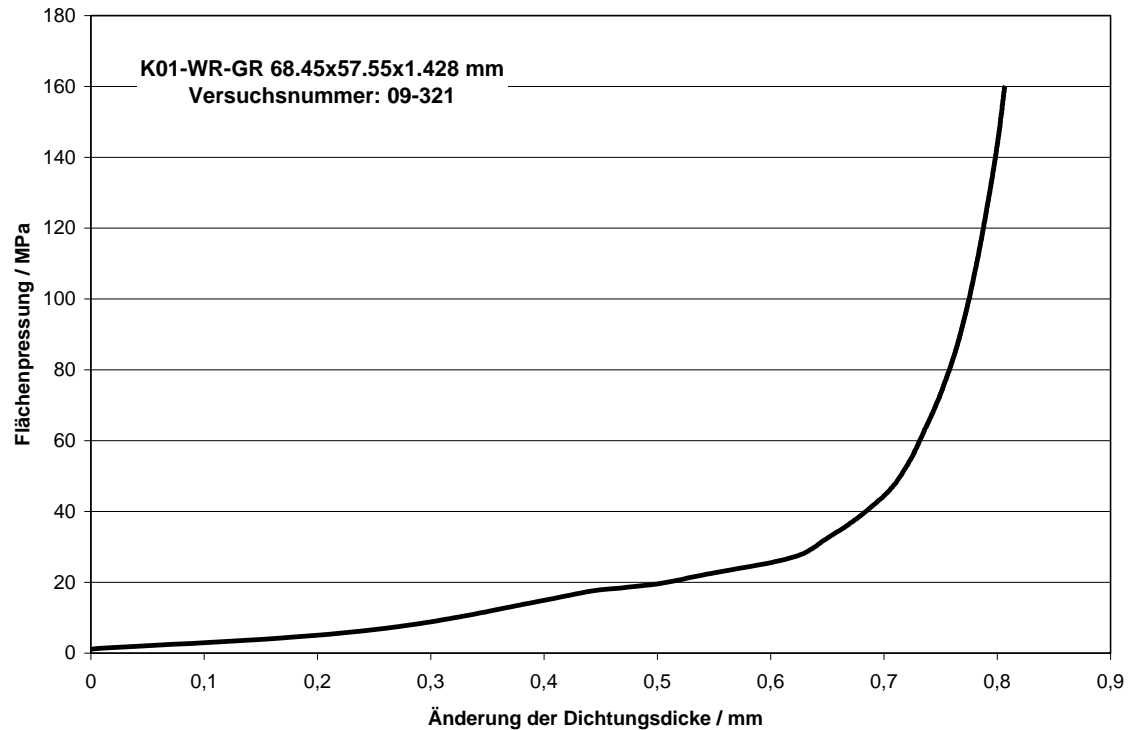
Außerdem werden noch zusätzliche Kennwerte für die Dichtungen definiert, die für die Berechnung von Flanschverbindungen von Bedeutung sind:

- Reibungskoeffizient  $\mu_G$ , der für die Überprüfung der Abtragbarkeit von an der Flanschverbindung wirkenden Querkräften und Torsionsmomenten benötigt wird, und
- Sicherheitsfaktor  $S_{BO}$  gegen das Ausblasen von Dichtungen.

### 6.1 Stauchversuch

Der Stauchversuch dient der Aufnahme der Verformungskurve und der Ermittlung des Versagenspunktes der Dichtung. Mit einer materialabhängigen Belastungsrate (0,1 MPa/s für Dichtungen auf PTFE-Basis, 0,5 MPa/s für alle anderen Dichtungstypen) wird hierbei der Prüfling bis zum Versagenspunkt der Dichtung oder

bis zum Erreichen der maximalen Last der Prüfeinrichtung belastet und die zugehörige Dichtungshöhe bzw. Stauchung der Dichtung gemessen, vgl. **Bild 6.1**.



**Bild 6.1: Stauchkurve einer Wellringdichtung Typ SC (selbstzentrierend)**

Aus diesen Stauchkurven werden üblicherweise keine Kennwerte ermittelt. Lediglich wenn ein eindeutiger Versagenspunkt zu erkennen ist, werden diese Stauchkurven zur Festlegung der maximal zulässigen Flächenpressung  $Q_{Smax}$  im Einbauzustand herangezogen. Dieser Kennwert muss dann aber in jedem Fall nochmals im Druckstandversuch verifiziert werden.

Der Versuch gewinnt jedoch an Bedeutung, sobald die Dichtungshöhe in Abhängigkeit von der aufgetragenen Flächenpressung in der Berechnung von Flanschverbindungen nach EN 1591-1 berücksichtigt werden soll. In diesem Fall ist es dann hilfreich, wenn die Verformungskurve über eine Näherungsfunktion beschrieben wird.

Hierzu kann entweder zwischen einigen Messpunkten linearisiert oder aber eine mathematische Funktion aufgestellt werden. Bei dem typischen Verlauf einer Verformungskurve einer Dichtung ist es offensichtlich, dass eine lineare Geradengleichung ungeeignet ist. Aber auch eine polynomische Gleichung 5. Grades bzw. eine exponentielle Funktion bringen keine zufriedenstellende

Näherungen, um ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Verformungskurve aufstellen zu können, vgl. **Bild A.1 bis Bild A.3** im Anhang.

Als geeignet für die Beschreibung sämtlicher Dichtungscharakteristika haben sich hingegen gebrochen rationale Funktionen vom Typ

$$Y^*(X) = \frac{A_1 \cdot X + A_2 \cdot X^2 + A_3 \cdot X^3}{1 + B_1 \cdot X + B_2 \cdot X^2} \quad (6.1)$$

erwiesen. Der Kennwert  $Y^*$  kann über diese gebrochen rationale Funktion mit einem Polynom 3. Ordnung mit den Koeffizienten  $A_j$  im Zähler und einem Polynom 2. Ordnung mit den Koeffizienten  $B_k$  im Nenner für jeden beliebigen Wert der Variable  $X$  aus den gemessenen Wertepaaren  $(X, Y)$  berechnet werden.

Um eine gebrochen rationale Funktionsgleichung aufstellen zu können, müssen zunächst die Koeffizienten  $A_j$  und  $B_k$  an Hand der gemessenen Daten so bestimmt werden, dass eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messkurve und berechneter Kurve erzielt wird. Hierbei bedient man sich der mathematischen Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Die Summe der Fehlerquadrate  $Z$ , siehe Gl. (6.2), d. h. die Abweichung zwischen berechnetem Wert  $Y^*(X_i)$  und gemessenem Wert  $Y_i$  für  $n$  Messwerte, muss minimal werden, was gleichbedeutend mit der Extremwertforderung der Gl. (6.3) zu sehen ist.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n (Y^*(X_i) - Y_i)^2}{n} \quad (6.2)$$

$$\frac{dZ}{dA_j} = 0 \quad (6.3)$$

Für jeden Koeffizienten  $A_j$  lässt sich somit eine Gleichung entsprechend Gl. (6.3) aufstellen, so dass sich ein eindeutiges Gleichungssystem ergibt, aus welchem die Koeffizienten  $A_j$  bestimmt werden können. Zur Vereinfachung der Schreibweise wurde noch die Funktion im Nenner der gebrochen rationalen Funktion als  $N(X_i)$  definiert.

$$N(X_i) = 1 + B_1 \cdot X_i + B_2 \cdot X_i^2 \quad (6.4)$$

Somit ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{X_i^2}{N(X_i)^2} & \sum_{i=1}^n \frac{X_i^3}{N(X_i)^2} & \sum_{i=1}^n \frac{X_i^4}{N(X_i)^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{X_i^3}{N(X_i)^2} & \sum_{i=1}^n \frac{X_i^4}{N(X_i)^2} & \sum_{i=1}^n \frac{X_i^5}{N(X_i)^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{X_i^4}{N(X_i)^2} & \sum_{i=1}^n \frac{X_i^5}{N(X_i)^2} & \sum_{i=1}^n \frac{X_i^6}{N(X_i)^2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \frac{X_i^1}{N(X_i)^2} \\ \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \frac{X_i^2}{N(X_i)^2} \\ \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \frac{X_i^3}{N(X_i)^2} \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Dieses Gleichungssystem wird zuerst für fest vorgegebene Koeffizienten  $B_1$  und  $B_2$  gelöst. Die Koeffizienten  $B_1$  und  $B_2$  werden anschließend in einem weiteren Schritt durch freie Optimierung variiert, so dass die Summe der Fehlerquadrate insgesamt minimal wird. Somit stehen dann alle 5 Koeffizienten ( $A_j, B_k$ ) zur Verfügung, um die Messkurven über eine gebrochen rationale Funktion beschreiben zu können.

Zur Ermittlung der Koeffizienten für die Regressionsfunktionen wurde ein Programm in Visual Basic erstellt. Zunächst werden in diesem Programm die Messdaten eingelesen und ggf. reduziert, damit die Rechenzeit minimiert wird. Hierzu kann das Intervall der zu betrachtenden Messdaten festgelegt werden, genauso kann die Schrittweite zur Bestimmung der Koeffizienten  $B_1$  und  $B_2$  frei gewählt werden.

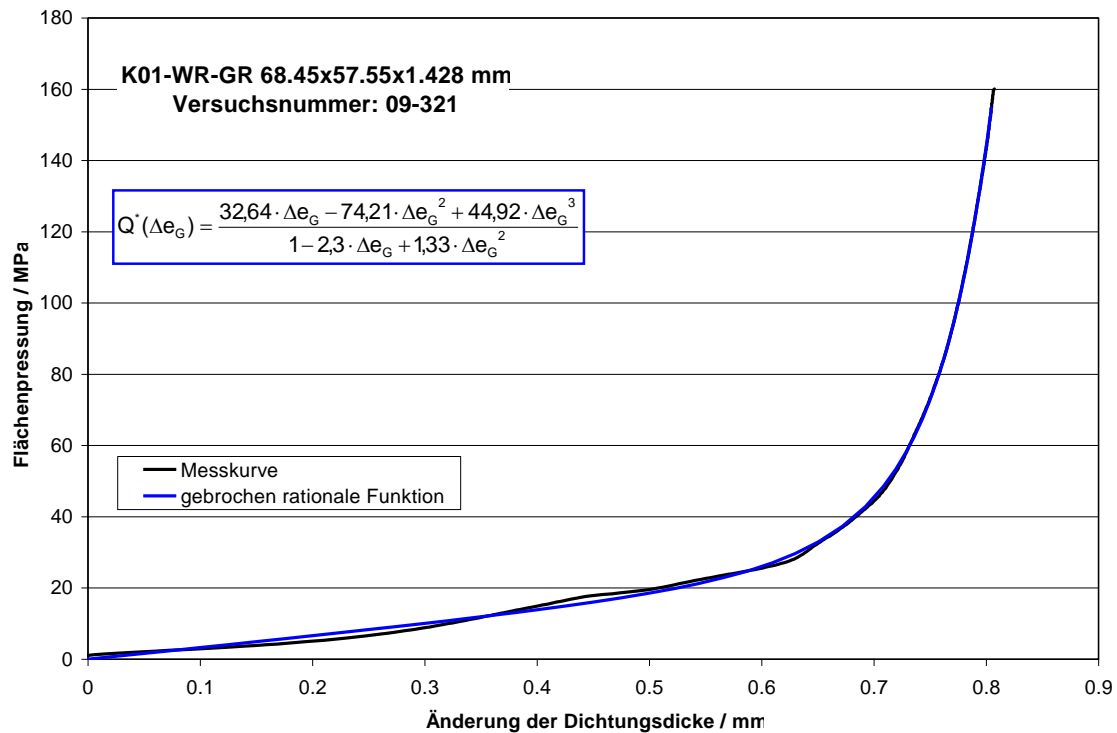
Mit diesen so ermittelten gebrochen rationalen Funktionen können nahezu alle bisher gemessenen Verformungskurven der unterschiedlichsten Dichtungsmaterialien hinreichend genau beschrieben werden. Um eine Stauchkurve über eine Formel darstellen zu können, werden die 5 Koeffizienten ( $A_j, B_k$ ) ermittelt, die als zusätzliche "Kennwerte" einer Dichtung angegeben werden.

Wie später noch gezeigt wird, kann aber nicht nur die Verformungskurve der Dichtung mittels einer gebrochen rationalen Funktion mathematisch beschrieben werden, auch der Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$ , und der Setzbetrag der Dichtung  $\Delta e_{GC}$  aufgrund von Kriech-/Relaxationsvorgängen können über jeweils 5 Parameter mit einer gebrochen rationalen Funktion dargestellt werden.

Übertragen auf die Abhängigkeit zwischen Flächenpressung  $Q$  und Verformung  $\Delta e_G$  einer Dichtung ergibt sich aus Gl. (6.1) die folgende Darstellung:

$$Q^*(\Delta e_G) = \frac{A_1 \cdot \Delta e_G + A_2 \cdot \Delta e_G^2 + A_3 \cdot \Delta e_G^3}{1 + B_1 \cdot \Delta e_G + B_2 \cdot \Delta e_G^2} \quad (6.6)$$

Für die untersuchte Wellringdichtung Typ SC (siehe Bild 6.1) ist in **Bild 6.2** die Stauchkurve zusammen mit der Näherungsfunktion gemäß Gl. (6.6) dargestellt. Ein Maß für die Genauigkeit der ermittelten Regression ist die Summe der Fehlerquadrate  $Z$ , normiert auf die Anzahl der Messwerte. Für obige Funktion beträgt dieser Wert 0,88.



**Bild 6.2: Gebrochen rationale Funktion zur Beschreibung der Stauchkurve einer Wellringdichtung Typ SC**

Zur Verifikation dieser Regressionsanalyse wurden Stauchkurven verschiedener Dichtungsmaterialien, die ganz unterschiedliche Verformungscharakteristika aufweisen, dahingehend ausgewertet. Im Anhang in **Bild A.4 bis Bild A.9** sind Stauchkurven einer Grafitflachdichtung, die bei ca. 230 MPa einen eindeutigen Versagenspunkt  $Q_{crit}$  aufzeigt, einer Grafitflachdichtung ohne eindeutigen Versagenspunkt, einer Flachdichtungen auf Faserbasis bzw. einer auf PTFE-Basis, einer Spiraldichtung mit Grafitfüllung und einer Kammprofilichtung mit Grafitauflage sowie ihre zugehörigen Näherungsfunktionen dargestellt.

**Fazit:** Der Stauchversuch dient der Ermittlung der maximal zulässigen Flächenpressung  $Q_{Smax}$  einer Dichtung. Der in EN 13555 definierte Versuchsablauf ist geeignet, diesen Dichtungskennwert zu ermitteln, sofern ein eindeutiger Versagenspunkt vorliegt, d. h. sofern die Dichtung beim Stauchversuch zerstört wird.



Grundsätzlich kann man zwischen drei verschiedenen Verhalten der Dichtungsmaterialien unterscheiden:

1. Eindeutiger Versagenspunkt  $Q_{crit}$  (siehe Bild A.4): Für diese Dichtungen kann die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  aus einem Stauchversuch ermittelt werden.  $Q_{Smax}$  muss dann als eine Flächenpressungsstufe unter der Versagensspannung  $Q_{crit}$  definiert werden, wobei dieser Wert anschließend im Druckstandversuch zu bestätigen ist.
2. Kein Versagenspunkt, stetige Stauchkurve: Diese Dichtungen zeigen bei der Dichtungsprüfung nie ein Versagen. Die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  entspricht bei diesen Dichtungen der maximalen Lastkapazität der Prüfeinrichtung.
3. Kein Versagenspunkt, starkes Kriechen: Für diese Dichtungen müssen in anderen Versuchen Kriterien definiert werden, an Hand derer die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  bestimmt werden kann. Ggf. sollte für diese Dichtungen die Änderungsrate unabhängig vom Dichtungsmaterial auf 0,1 MPa/s festgelegt werden, damit die Kriecheffekte bei der Aufnahme der Stauchkurve deutlich sichtbar werden.

Für alle Dichtungstypen ist es möglich, ihre Verformungskurven über eine Regressionsfunktion auf Basis von gebrochen rationalen Funktionen zu beschreiben. Somit ist die Grundlage geschaffen, für jede Einbauschraubenkraft, d. h. für jede erzeugte Flächenpressung, die zugehörige Dichtungshöhe zu berechnen.

## 6.2 Druckstandversuch

Der Druckstandversuch dient der Ermittlung der maximal zulässigen Flächenpressung  $Q_{Smax}$  und des Ersatzelastizitätsmoduls  $E_G$  der Dichtung. Im Druckstandversuch werden die Dichtungen mit derselben Änderungsrate wie im Stauchversuch zyklisch belastet, bei verschiedenen Flächenpressungsstufen wird die Dichtung wieder bis auf 1/3 der ursprünglichen Flächenpressung entlastet. Die Flächenpressungsstufen sind entsprechend EN 13555 nach folgender **Tabelle 6.1** zu wählen.

Nach Erreichen jeder vordefinierten Flächenpressungsstufe wird diese vor Beginn der Entlastung 5 Minuten konstant gehalten. Dadurch wird bei vielen Dichtungen

**Tabelle 6.1: Flächenpressungsstufen im Druckstandversuch nach EN 13555**

$Q_A$ / MPa	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	...	$Q_{A(i-1)} + 20$
$Q_A/3$ / MPa	6,7	10	13,3	16,7	20	26,7	33,3	40	46,7	53,3	...	$(Q_{A(i-1)} + 20)/3$

bereits im Druckstandversuch das Kriechverhalten deutlich. Die Haltezeit von 5 Minuten soll das Dichtungsverhalten bei der Montage einer Flanschverbindung abdecken, da hierbei die Schrauben oftmals mit demselben Anzugsmoment nochmals nachgezogen werden.

Nach Norm wird auch bei der Entlastung nach Erreichen der einzustellenden Flächenpressung  $Q_A/3$  diese für 5 Minuten konstant gehalten. Dies macht jedoch keinen Sinn, da es das Kriechen der Dichtung in diesem Zustand verstärkt, was letztendlich zu einem unrealistischen Ersatzelastizitätsmodul führen kann.

Sofern ein eindeutiger Versagenspunkt im Verlauf des Versuches zu erkennen ist, wird die Flächenpressungsstufe vor dem Versagen als die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  definiert. Für die wenigsten Dichtungen ist jedoch dieser Versagenspunkt zu ermitteln, die meisten Dichtungsmaterialien neigen eher zu einem starken Fließen bei Überschreiten einer bestimmten Flächenpressungsstufe, wie dies auch schon im Stauchversuch zu erkennen ist.

Der Druckstandversuch kann auch bei erhöhter Temperatur durchgeführt werden. In diesem Fall wird bei einer Flächenpressung von 20 MPa die Prüftemperatur mit einer Aufheizrate von 2 K/min aufgebracht. Um die Prüftemperaturen zu vereinheitlichen, sind auch die Temperaturstufen in EN 13555 definiert, vgl. **Tabelle 6.2**. Diese Temperaturstufen sind aber nur als Empfehlungen zu betrachten, sie sind entsprechend den Einsatzgrenzen der Dichtung auszuwählen. Es bedeutet also auch nicht, dass Kennwerte für alle in Tabelle 6.2 definierten Temperaturstufen zu ermitteln sind.

**Tabelle 6.2: Empfohlene Temperaturstufen nach EN 13555**

T / °C	50	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	550	600
T / K	323	373	398	423	448	473	498	523	548	573	623	673	723	773	823	873
T / °F	122	212	257	302	347	392	437	482	527	572	662	752	842	932	1022	1112

Aus den im Druckstandversuch aufgenommenen Entlastungskurven wird über eine lineare Interpolation zwischen der Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  und der Endflächenpressung  $Q_A/3$  der Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$  der Dichtung für jede

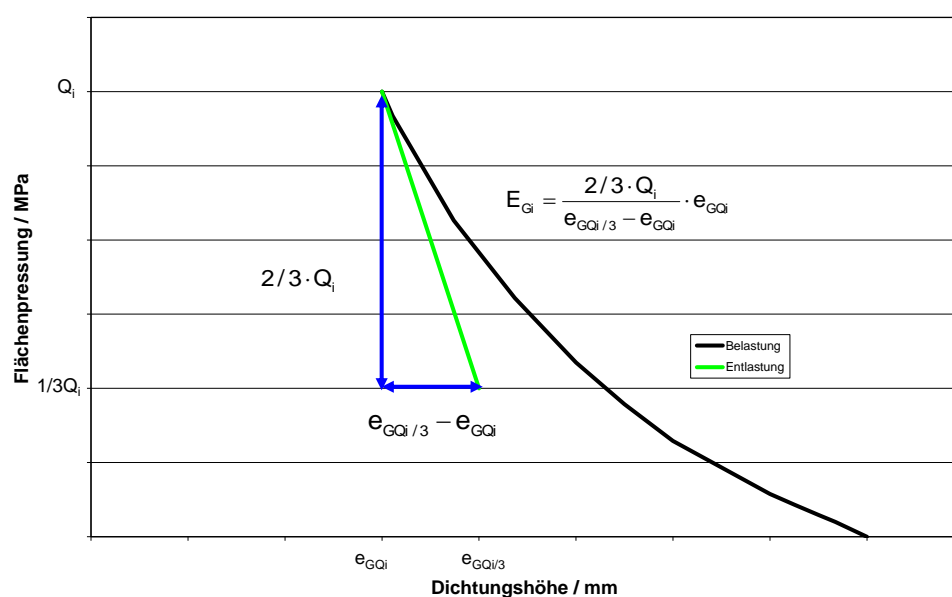
einzelne Flächenpressungsstufe ermittelt. Im Gegensatz zum Elastizitätsmodul  $E_D$  in DIN 28090-1 wird die Entlastung auf die Dichtungshöhe im verpressten Zustand (vor der Entlastung der Dichtung) bezogen und nicht auf die ursprüngliche Dichtungshöhe, die bei kleiner Vorlast gemessen wird. Dies stellt jedoch eine Inkonsequenz dar, da die verpresste Dichtungshöhe z. Z. nicht in der Berechnung nach EN 1591-1 verwendet wird.

Neben der Verformungskurve der Dichtung kann auch die Abhängigkeit des Ersatzelastizitätsmoduls von der aufgetragenen Flächenpressung sehr gut über gebrochen rationale Funktionen beschrieben werden. Entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise in Kapitel 6.1 lautet die Formel für die Regressionskurven für den Ersatzelastizitätsmodul:

$$E_G^*(Q_A) = \frac{C_1 \cdot Q_A + C_2 \cdot Q_A^2 + C_3 \cdot Q_A^3}{1 + D_1 \cdot Q_A + D_2 \cdot Q_A^2} \quad (6.7)$$

Die Parameter  $C_j$  und  $D_k$  sind hierbei die charakterisierenden Koeffizienten der gebrochen rationalen Funktion des Ersatzelastizitätsmoduls.

In der gültigen Fassung der EN 13555 wird in der Formel zur Berechnung des Ersatzelastizitätsmoduls fälschlicherweise statt der Dichtungshöhe die Änderung der Dichtungshöhe verwendet, deshalb soll die Formel hier richtig dargestellt werden, vgl. auch **Bild 6.3**:

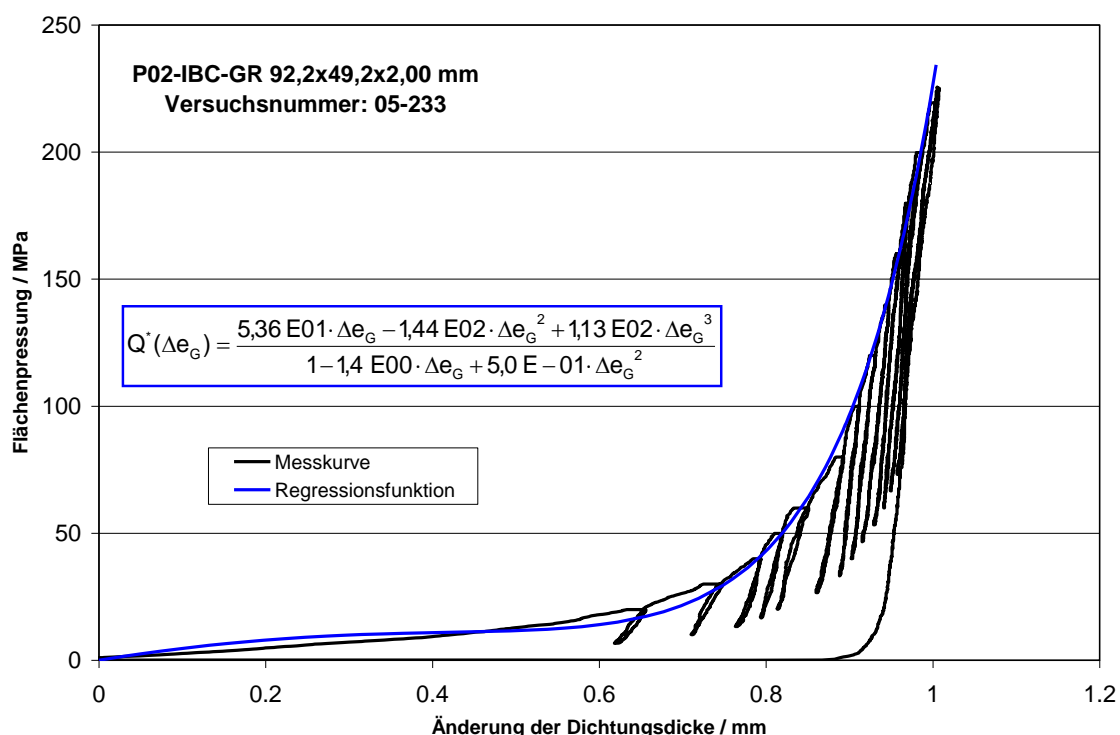


**Bild 6.3:** Ermittlung des Ersatzelastizitätsmoduls aus der Entlastungskurve im Druckstandversuch

$$E_G = \frac{2/3 \cdot Q_i}{e_{GQi/3} - e_{GQi}} \cdot e_{GQi} \quad (6.8)$$

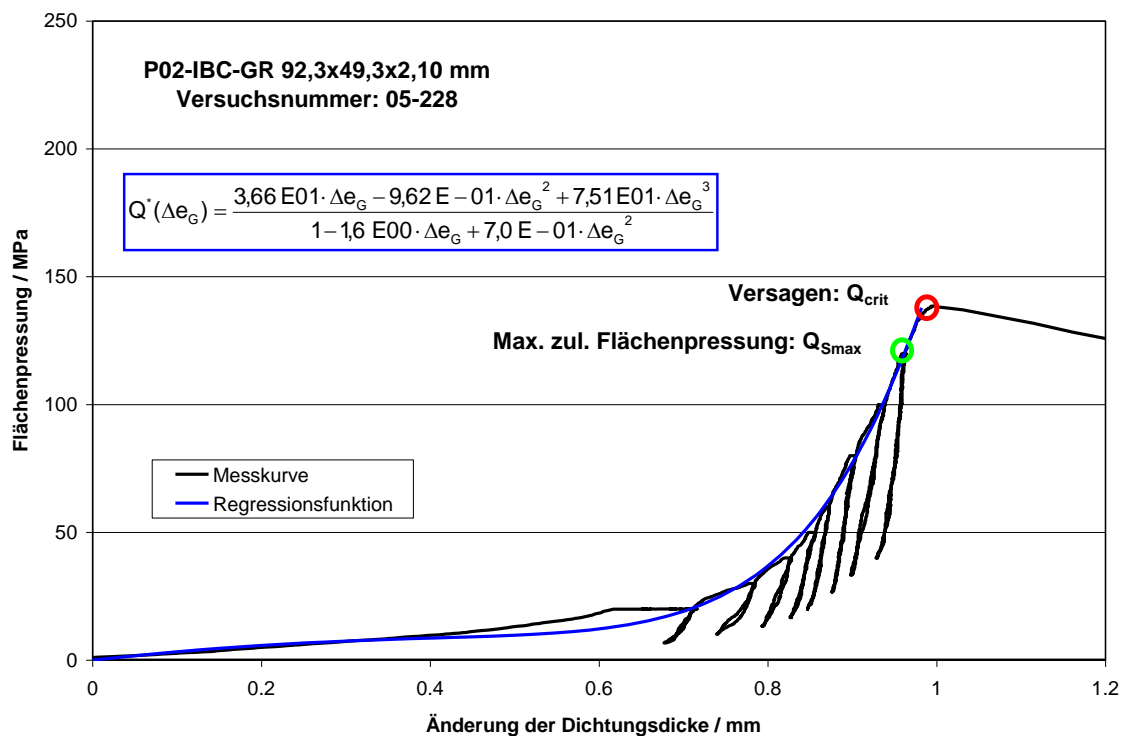
In **Bild 6.4** ist die Druckstandkurve einer Flachdichtung aus Graphit bei Raumtemperatur dargestellt. Auch in dieser Kurve ist das typische elastoplastische Verformungsverhalten von Dichtungsmaterialien zu erkennen. Schon bei geringer Kraftaufbringung wird die Dichtung stark verformt, so ist z. B. bei einer Flächenpressung von lediglich 13 MPa die Dichtung bereits um 25% ihrer Ausgangsdicke (2,0 mm) verpresst. Bei höheren Flächenpressungen nimmt die Verformung immer weniger stark zu, da das Dichtungsmaterial schon in sich verpresst ist und für eine zusätzliche Verformung immer höhere Kräfte erforderlich sind. Wird die Dichtung entlastet, federt die Dichtung zurück, aber bei weitem nicht um das Maß, wie sie verformt wurde. Bei der vollständigen Entlastung nach der höchsten Flächenpressungsstufe von 230 MPa, bei welcher der Prüfling um ca. 1,0 mm verformt wurde, ist zu sehen, dass die Dichtung lediglich um ca. 0,13 mm zurückfedert, d. h. die Dichtung bleibt um 0,87 mm plastisch verformt. Das elastische Rückfedervermögen der Dichtung ist somit relativ gering im Vergleich zur Gesamtverformung.

Für die Verformung der Dichtung kann auch in diesem Fall eine gebrochen rationale Funktion für eine Regressionsfunktion bestimmt werden, die das Verformungsverhalten sehr gut beschreibt, vgl. Bild 6.4.



**Bild 6.4:** Druckstandkurve einer Graphitflachdichtung bei RT

In **Bild 6.5** ist die Druckstandkurve derselben Grafitflachdichtung bei erhöhter Temperatur (150 °C) abgebildet. In diesem Verlauf ist ein eindeutiges Versagen der Dichtung zu sehen. Die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  ist somit temperaturabhängig und muss entsprechend den Einsatzgrenzen der Dichtungen bei verschiedenen Temperaturen ermittelt werden. Wie dieses Versuchsergebnis auch belegt, gehören die Grafitflachdichtungen zu den wenigen Dichtungstypen mit einer eindeutig bestimmbarer maximal zulässiger Flächenpressung  $Q_{Smax}$ .



**Bild 6.5:** Druckstandkurve einer Grafitflachdichtung bei 150 °C

In **Bild 6.6** und **Bild 6.7** ist der Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$  bei Raumtemperatur bzw. 150 °C in Abhängigkeit von der Flächenpressung entsprechend Gl. (6.7) und (6.8) für die Flachdichtung aus Grafit aufgetragen. Sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 150 °C steigt der E-Modul zunächst nahezu linear mit der Flächenpressung an, was früheren Vorstellungen entspricht, als der E-Modul über eine lineare Funktion charakterisiert wurde. Erst bei höheren Flächenpressungen streuen die Werte, und der E-Modul steigt nur noch wenig an. Bis 80 MPa sind die E-Modulwerte bei RT und bei 150 °C vergleichbar, kurz vor Erreichen der Versagensflächenpressung steigt der E-Modul bei Temperatur jedoch nicht mehr so stark an wie bei Raumtemperatur. Dies könnte ein Anzeichen für die kurz bevorstehende Zerstörung der Dichtung sein.

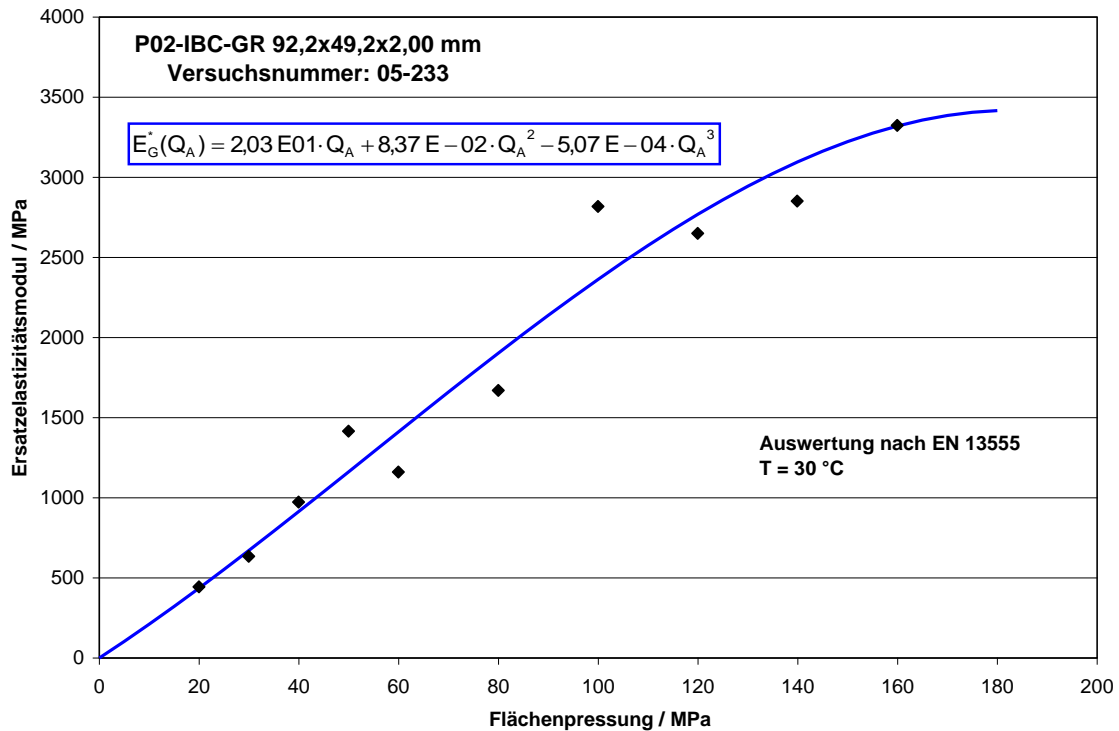


Bild 6.6: Ersatzelastizitätsmodul Grafitflachdichtung bei RT

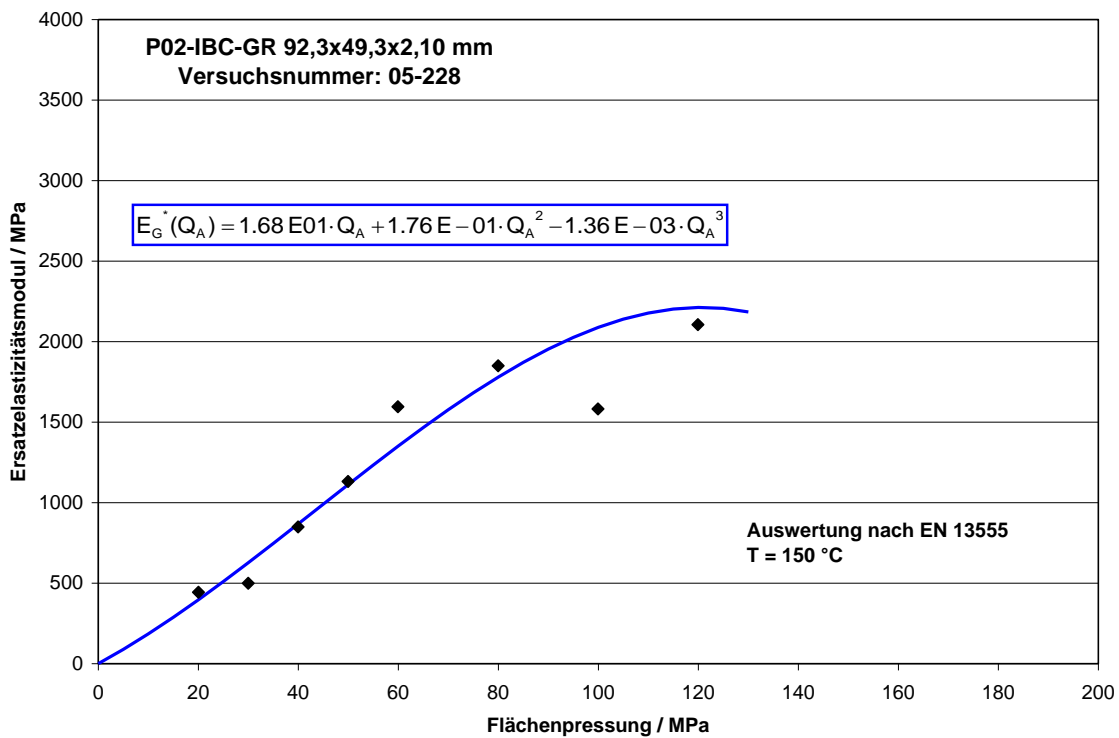


Bild 6.7: Ersatzelastizitätsmodul Grafitflachdichtung bei 150 °C

Im Anhang sind in **Bild A.10 bis Bild A.20** weitere Diagramme zu finden, in welchen das Verformungsverhalten bzw. der Ersatzelastizitätsmodul einer Flachdichtung aus expandiertem PTFE, einer multidirektional orientierten PTFE-Flachdichtung mit Bariumsulfatfüllung, einer gummi gebundenen Faserdichtung, einer Kammprofil dichtung mit Grafitauflage, einer "eng gekammerten" Spiraldichtung mit Grafitfüllung und einer "normalen" Spiraldichtung mit Grafitfüllung zu sehen ist.

Aus all diesen Verformungskurven können die maximal zulässigen Flächenpressungen  $Q_{Smax}$  der verschiedenen Dichtungsmaterialien nicht eindeutig bestimmt werden, weshalb zusätzliche Versagenskriterien definiert werden sollten. So steigt z. B. der E-Modul der Flachdichtung aus expandiertem PTFE zunächst linear an, siehe Bild A.16, bei 120 MPa ist ein starker Ausreißer zu erkennen, bei höheren Flächenpressung tritt dann eine hohe Streuung bei den E-Modulwerten auf. Da auch bereits in der Druckstandkurve bei dieser Flächenpressungsstufe eine Veränderung des Verformungsverhaltens zu erkennen ist, siehe Bild A.10, könnte diese Flächenpressung als die kritische Flächenpressung definiert werden. Die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  beträgt demnach 100 MPa. Ähnliches gilt für die Flachdichtung aus Faserwerkstoff, bei der ein linearer Zusammenhang zwischen E-Modul und aufgebrachtener Flächenpressung zu erkennen ist, bevor dann bei einer Flächenpressungsstufe ein extrem hoher E-Modul auftritt. Bei noch höheren Flächenpressungsstufen liegt der E-Modul in derselben Größenordnung wie vor diesem Ausreißer, fällt dann aber kontinuierlich ab. Auch für diese Dichtung könnte somit diese Flächenpressungsstufe von 100 MPa als der Versagenspunkt definiert werden.

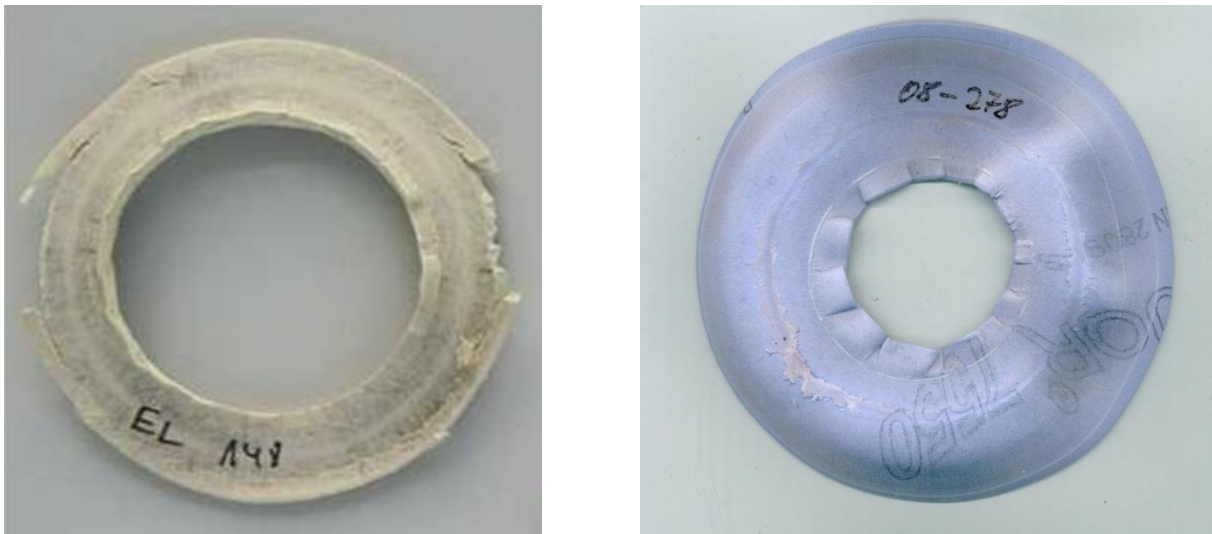
**Fazit:** Der Druckstandversuch dient zum einen der Ermittlung der maximal zulässigen Flächenpressung  $Q_{Smax}$  und zum anderen des Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$  der Dichtung. Der in EN 13555 definierte Versuchsablauf ist prinzipiell geeignet, diese Dichtungskennwerte zu ermitteln. Lediglich die Haltezeit von 5 Minuten nach Entlastung auf  $1/3$  der Anfangsflächenpressung und die Anzahl der Entlastungszyklen sollte überdacht werden. Die Haltezeit kann komplett gestrichen, die Anzahl der Flächenpressungsstufen (vor allem über 160 MPa) deutlich reduziert werden.

Es gilt aber bzgl. der maximal zulässigen Flächenpressung  $Q_{Smax}$  dasselbe wie beim Stauchversuch. Sofern kein eindeutiger Versagenspunkt vorliegt, ist es nicht eindeutig möglich, diese zu bestimmen. Auch die zusätzliche Definition über eine starke Zunahme der Dichtungsverformung zwischen zwei Flächenpressungsstufen ermöglicht nur in den seltensten Fällen eine klare Festlegung. Letztendlich kann die

maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  nur über verschiedene Kriterien ermittelt werden, die aber immer Interpretationsmöglichkeiten offen lassen. Zu diesen Kriterien zählen:

- Änderung des Verformungsverhaltens ab einer bestimmten Flächenpressung,
- Änderung des Rückfederverhaltens der Dichtung,
- Schädigungen der Dichtung nach dem Versuch (optische Beurteilung).

Zu den optischen Beurteilungskriterien können z. B. Risse im Außenbereich der Dichtung oder ein zu starkes Kriechen der Dichtung in den Innenraum (Verschließen des Flanschsinnendurchmessers) zählen, siehe **Bild 6.8**. Da diese Kriterien nicht während des Versuches beurteilt werden können, sondern erst am Ende nach dem Ausbau der Dichtung, kann es notwendig sein, den Versuch bis zu einer geringeren Flächenpressungsstufe zu wiederholen, um zu überprüfen, ob diese Schädigungen dann auch schon aufgetreten sind.



**Bild 6.8: Schädigung im Außenbereich der Dichtung (links) bzw. übermäßiges Kriechen in den Innenraum (rechts)**

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  nur bei einem eindeutigen Versagen wirklich von Bedeutung ist, da es dann zu einem Ausfall der Flanschverbindung kommt. Wenn die Kriech- bzw. Relaxationseigenschaften und die Abdichteigenschaften immer bis zu der maximal zulässigen Flächenpressung bestimmt werden, kann ausgeschlossen werden, dass ein zu "großzügig" angegebener  $Q_{Smax}$ -Wert zu Schwierigkeiten in der Flanschverbindung führt.



Für alle Dichtungstypen ist es möglich, sowohl ihre Verformungskurven als auch die Abhängigkeit der E-Modulwerte von der Ausgangsflächenpressung über Regressionsfunktionen auf Basis von gebrochen rationalen Funktionen zu beschreiben. Dies kann in einem analytischen Berechnungsverfahren ausgenutzt werden, um für jede beliebige Einbauschraubenkraft die zugehörige Verformung der Dichtung und das Rückfederverhalten zu berechnen.

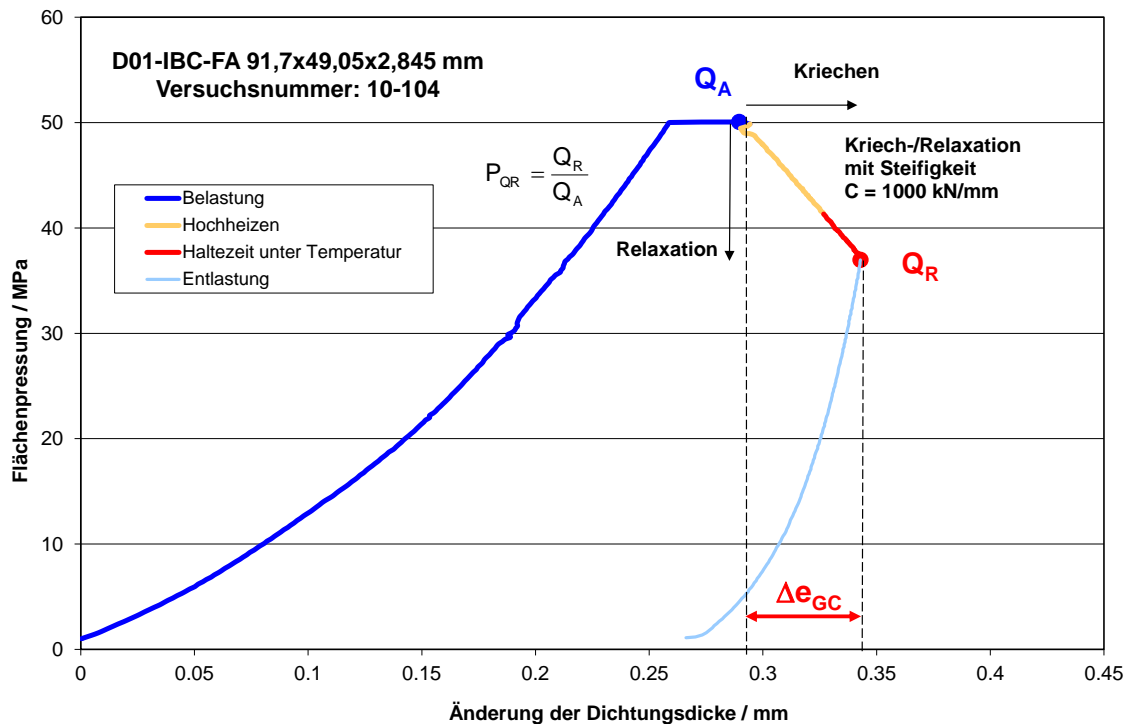
### 6.3 Kriech-/Relaxationsversuch

Im Kriech-/Relaxationsversuch sollen die Kriech-/Relaxationsfaktoren  $P_{QR}$  der Dichtung ermittelt werden. Wie bereits aus der Bezeichnung zu entnehmen ist, handelt es sich bei diesem Versuch um eine Kombination aus Kriechen (bei konstanter Last) und Relaxation (bei konstanter Dichtungsverformung).

Zunächst wird die Anfangsflächenpressung mit der bereits aus dem Stauch- oder Druckstandversuch bekannten Änderungsrate eingestellt. Nach einer Haltezeit von 5 Minuten wird die Prüftemperatur mit einer Aufheizrate von 2 K/min aufgebracht. Ab diesem Versuchsabschnitt wird die Flächenpressung nicht mehr konstant gehalten, sondern die Last wird entsprechend der gewählten Steifigkeit  $C$  in Abhängigkeit von der auftretenden Dichtungsverformung reduziert. Nach 4 h unter Temperatur wird die Restflächenpressung bestimmt, deren Verhältnis zur Anfangsflächenpressung  $Q_A$  den Kriech-/Relaxationsfaktor  $P_{QR}$  ergibt:

$$P_{QR} = \frac{Q_R}{Q_A} \quad (6.9)$$

In **Bild 6.9** ist ein typischer Kriech-/Relaxationsversuch dargestellt, aus welchem der oben beschriebene Ablauf ersichtlich wird. Nach Erreichen der Anfangsflächenpressung (50 MPa) und nach Ablauf der Haltezeit von 5 Minuten beginnt die steifigkeitsabhängige Versuchsregelung, d. h. die Flächenpressung wird bei einer auftretenden Verformung der Dichtung entsprechend der gewählten Steifigkeit kontinuierlich reduziert. Bei konstanter Last würde das reine Kriechen und bei festgehaltener Dichtungshöhe das reine Relaxieren des Dichtungsmaterials gemessen werden; durch die steifigkeitsabhängige wegkontrollierte Regelung werden diese beiden Effekte kombiniert, so dass das reale Verhalten in einer Flanschverbindung simuliert werden kann.



**Bild 6.9: Versuchsabschnitte beim Kriech-/Relaxationsversuch**

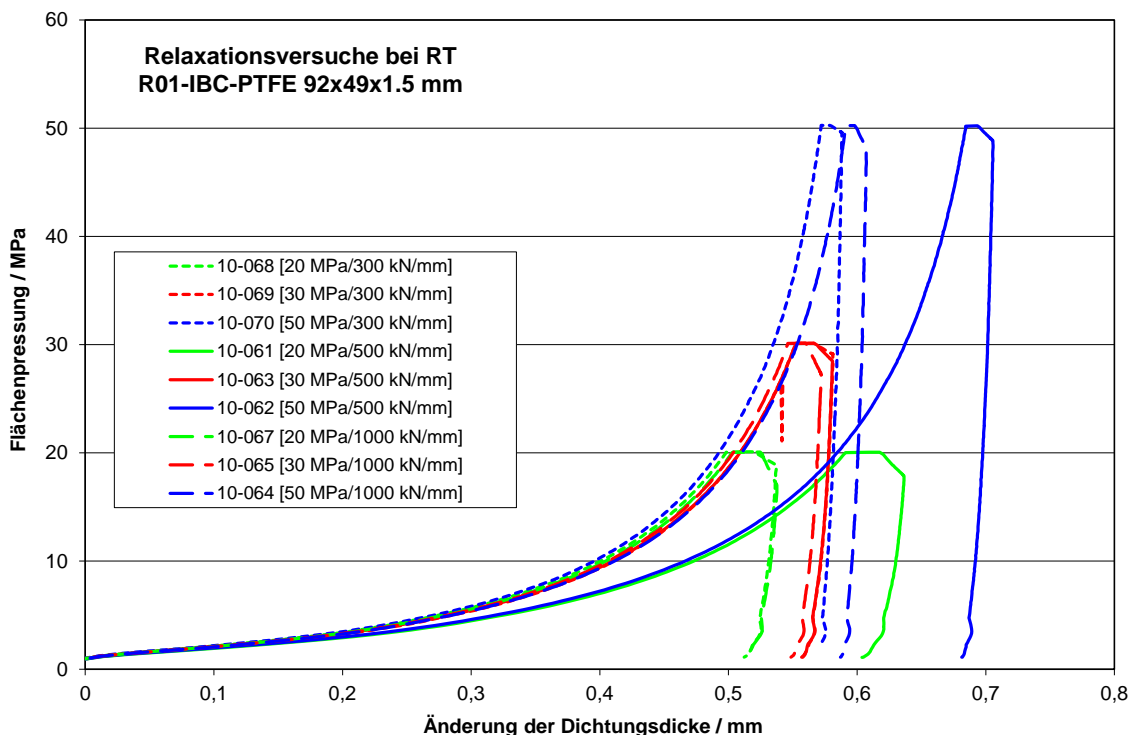
Die Steigung der Verformungskurve während des Aufheizens und der Haltezeit unter Temperatur entspricht hierbei der gewählten Steifigkeit. Im vorliegenden Fall beträgt die Verformung der Dichtung während des Kriech-/Relaxationsvorgangs 0,053 mm, die Flächenpressung nimmt während dieses Prozesses von 50 auf 37,4 MPa ab. Bei der Dichtungsfläche von 4190 mm<sup>2</sup> entspricht dies einer Kraftabnahme von 53,4 kN, die Steigung und somit die gewählte Steifigkeit beträgt 1000 kN/mm. Ein typischer Wert für PN-bezeichnete Flansche, wie sie z. B. in DIN EN 1092-1 genormt sind, beträgt 500 kN/mm. Class-bezeichnete Flansche (z. B. nach ASME B16.5) weisen eine höhere Steifigkeit auf, diese liegt bei ca. 1500 kN/mm.

Wie dem Verlauf in Bild 6.9 zu entnehmen ist, tritt der größte Anteil des Kriechens bzw. Relaxierens schon während des Hochheizens des Prüflings auf. Dies unterstreichen auch die zeitlichen Verläufe von Kriech-/Relaxationsversuchen, wie sie in **Bild A.21** und **Bild A.22** im Anhang zu sehen sind. Eine Versuchsdauer von lediglich 4 Stunden erscheint daher für die meisten Dichtungsmaterialien gerechtfertigt zu sein. Allerdings gibt es Dichtungswerkstoffe, bei denen dieser Effekt nach diesem Zeitraum noch nicht abgeschlossen ist. Für diese Materialien empfiehlt es sich, die Versuchsdauer zu erhöhen.

Da der Kriech-/Relaxationsfaktor  $P_{QR}$  von den Versuchsparametern Anfangsflächenpressung, Temperatur und Steifigkeit der Verbindung abhängig ist, sind zahlreiche Prüfungen für die Ermittlung eines umfassenden Kennfeldes notwendig. Die Prüfnorm EN 13555 spricht von 3 Flächenpressungsstufen, 3 Temperaturstufen und mindestens zwei Steifigkeiten, womit sich für eine Dichtung 18 Versuche ergeben, was bei einer Prüfdauer von ca. 6 Stunden pro Versuch (inklusive Abkühlen und Reinigen) 9 Arbeitstagen entspricht.

Ein Ziel der Untersuchungen bei den Kriech-/Relaxationsversuchen war es daher, eine Prüfprozedur zu finden, die mit wenigen Versuchen eine verlässliche Aussage zum Kriech-/Relaxationsverhalten von Dichtungen über ihren gesamten Einsatzbereich erlaubt. Die Versuche wurden lediglich an zwei unterschiedlichen Materialien durchgeführt, von denen bekannt ist, dass sie eine deutliche Tendenz zum Kriechen/Relaxieren aufzeigen. Hierbei handelte es sich um eine Flachdichtung aus expandiertem PTFE (ePTFE) mit multidirektional orientierter Fibrillenstruktur und eine NBR-gebundene Faserdichtung.

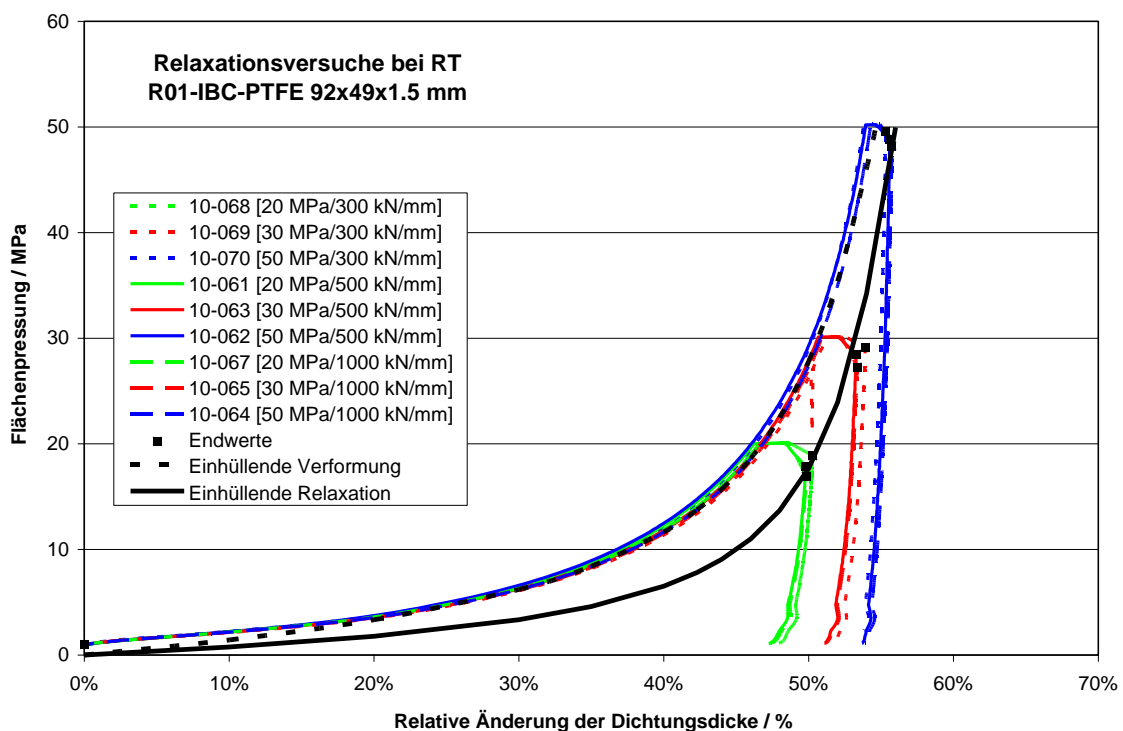
In **Bild 6.10** sind sämtliche Versuchsergebnisse der ePTFE-Dichtung bei Raumtemperatur zusammengestellt. Insgesamt wurden 9 Versuche durchgeführt, bei 3 unterschiedlichen Flächenpressungen (20, 30 und 50 MPa) und je 3 Steifigkeiten



**Bild 6.10:** Ergebnisse von Kriech-/Relaxationsversuchen an einer ePTFE-Dichtung (RT)

(500, 1000, 1500 kN/mm). Auf den ersten Blick ist keine Gesetzmäßigkeit erkennbar. Betrachtet man jedoch die Ausgangsdicke der Prüflinge, so ist festzustellen, dass diese auch um 0,1 bis 0,2 mm variiert. Deshalb wurde in einer zweiten Auswertung die Verformung auf die Ausgangsdicke der Prüflinge normiert.

Wie in **Bild 6.11** zu sehen ist, sind die Verformungskurven während der Lastaufgabe dann nahezu deckungsgleich und auch die verbleibenden Restflächenpressungen folgen einer gewissen Gesetzmäßigkeit und können durch eine einhüllende Kurve beschrieben werden. Auch bei erhöhter Temperatur ist dieses Verhalten der Dichtung erkennbar, vgl. **Bild A.23** im Anhang. Dasselbe gilt auch für die NBR-gebundene Faserdichtung, welche sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 100 °C im Kriech-/Relaxationsversuch ein charakteristisches Verformungsverhalten besitzt, vgl. **Bild A.24 und A.25** im Anhang, welches mathematisch beschrieben werden kann, vgl. **Bild A.26**.



**Bild 6.11: Modifizierte Auswertung der Kriech-/Relaxationsversuche an einer ePTFE-Dichtung (RT)**

Sowohl die Verformungskurven als auch die einhüllende Kurve der Restflächenpressungen können wiederum über gebrochen rationale Funktionen entsprechend Gl. (6.1) beschrieben werden. Die Verformungskurven entsprechen im Wesentlichen denselben Näherungskurven, die schon im Stauchversuch oder im

Druckstandversuch ermittelt wurden, vgl. Kapitel 6.1 und 6.2. Allerdings wird durch die im Kriech-/Relaxationsversuch gewonnenen Ergebnisse deutlich, dass diese Gleichungen nicht für die absolute Verformung der Dichtung  $\Delta e_G$ , sondern für die relative Verformung der Dichtung  $\Delta e_G/e_G$  als Variable aufzustellen sind, vgl. Gl. (6.10). Somit ergibt sich für die Stauchkurve bei Raumtemperatur folgende Gleichung mit den Koeffizienten  $E_i$  und  $F_j$ :

$$Q^* \left( \frac{\Delta e_G}{e_G} \right) = \frac{E_1 \cdot \left( \frac{\Delta e_G}{e_G} \right) + E_2 \cdot \left( \frac{\Delta e_G}{e_G} \right)^2 + E_3 \cdot \left( \frac{\Delta e_G}{e_G} \right)^3}{1 + F_1 \cdot \left( \frac{\Delta e_G}{e_G} \right) + F_2 \cdot \left( \frac{\Delta e_G}{e_G} \right)^2} \quad (6.10)$$

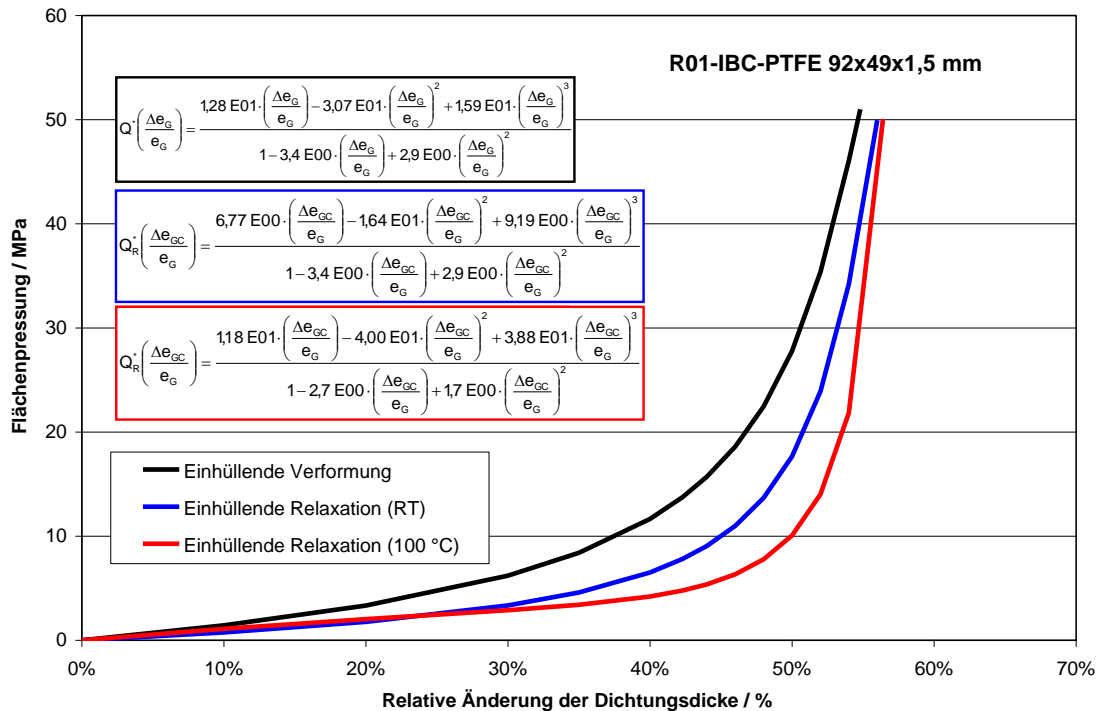
Die Restflächenpressung  $Q_R$  nach 4 h Haltezeit unter Temperatur kann ebenso in Abhängigkeit der relativen Gesamtverformung der Dichtung  $\Delta e_{GC}/e_G$  am Ende des Versuches mit Gl. (6.11) abgeschätzt werden. Für jede Prüftemperatur ergibt sich damit eine individuelle Näherungsgleichung mit eigenen Koeffizienten ( $G_i, H_j$ ):

$$Q_R^* \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right) = \frac{G_1 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right) + G_2 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right)^2 + G_3 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right)^3}{1 + H_1 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right) + H_2 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right)^2} \quad (6.11)$$

Sowohl für Raumtemperatur als auch für erhöhte Temperatur (100 °C) können für die Flachdichtung aus expandiertem PTFE unabhängig von der Anfangsflächenpressung und unabhängig von der Steifigkeit einhüllende Kurven für die Restflächenpressung ermittelt werden, vgl. Kurven in **Bild 6.12**. Aus diesen Regressionsfunktionen können für die entsprechende Temperatur, die Anfangsflächenpressung und die Steifigkeit die Restflächenpressung bzw. die zusätzliche Verformung der Dichtung durch den Kriech-/Relaxationsprozess ermittelt werden.

**Fazit:** Der Kriech-/Relaxationsversuch dient der Ermittlung des Setzverhaltens der Dichtung unter Betriebsbedingungen, was bisher durch den Kriech-/Relaxationsfaktor  $P_{QR}$  entsprechend Gl. (6.9) ausgedrückt wird. Aufgrund der Abhängigkeit von den Randbedingungen Anfangsflächenpressung, Temperatur und Steifigkeit der Verbindung ist die Ermittlung eines umfassenden Kennfeldes sehr aufwändig.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass für jede Prüftemperatur eine einhüllende Kurve für die Restflächenpressungen bestimmt werden kann. Am

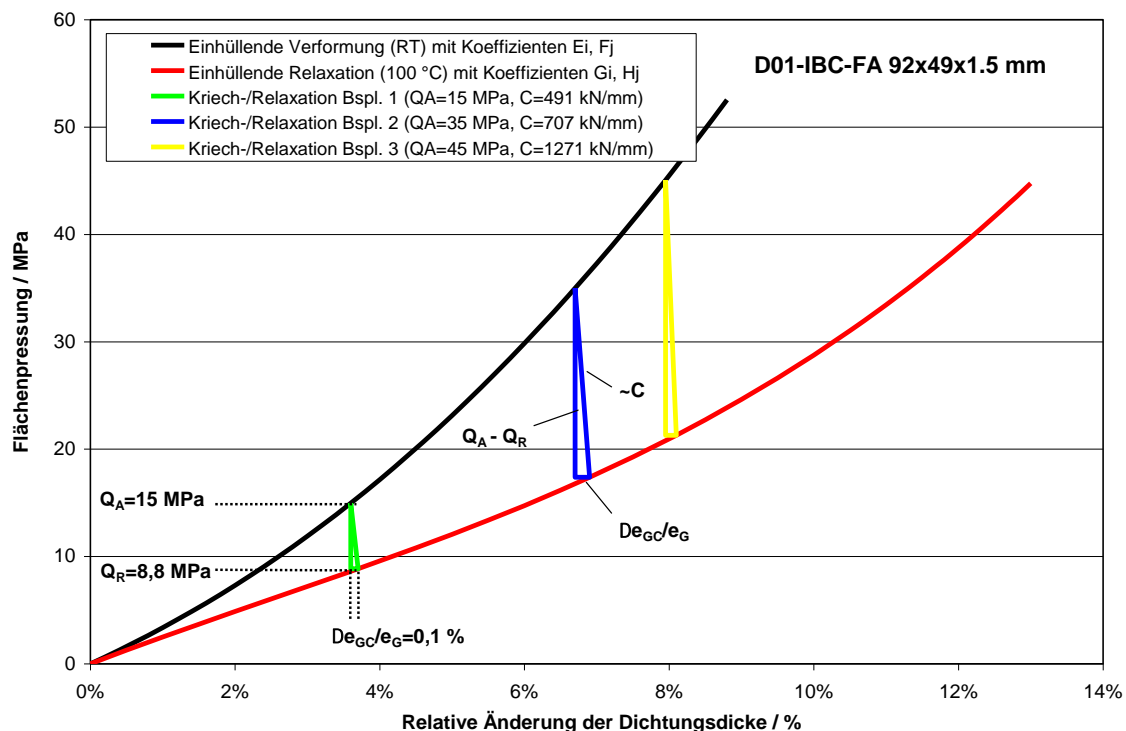


**Bild 6.12: Einhüllende Verformungskurven einer ePTFE-Dichtung aus Kriech-/Relaxationsversuchen**

einfachsten können Restflächenpressungen zur Bestimmung dieser Einhüllenden entsprechend der in Kapitel 6.1 beschriebenen mathematischen Vorgehensweise in reinen Kriechversuchen bei unterschiedlichen konstanten Flächenpressung  $Q_A$  gemessen werden. Mit vier bis fünf Kriechversuchen, in denen der zulässige Flächenpressungsbereich (bis maximal  $Q_{Smax}$ ) der Dichtungen abgedeckt wird, können diese einhüllenden Kurven bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Einhüllenden kann für jede Flächenpressung und jede Steifigkeit die Restflächenpressung berechnet werden. Dies wird in **Bild 6.13** an Hand von 3 Beispielen erläutert.

In Beispiel 1 in Bild 6.13 wurde eine Ausgangsflächenpressung von 15 MPa angenommen. Bei einer Steifigkeit der Verbindung von 491 kN/mm ergibt sich demnach eine Restflächenpressung von 8,8 MPa. Die zusätzliche relative Verformung während des Kriech-/Relaxationsvorgangs beträgt 0,10%, bei einer Dichtungshöhe von 3,0 mm bedeutet dies ein absolutes Setzen von 0,003 mm. Analog lassen sich die beiden anderen Beispiele in Bild 6.13 analysieren.

Die Kriech-/Relaxationsversuche können aufgrund der vorliegenden Ergebnisse durch reine Kriechversuche ersetzt werden. Die Versuchsparameter wie Änderungsrate der Flächenpressung, Aufheizrate oder Haltezeit unter Temperatur können aus der Definition des bisherigen Versuchsablaufs übernommen werden.



**Bild 6.13: Bestimmung der Restflächenpressung bzw. der Dichtungsverformung durch Kriech-/Relaxationseffekte**

Insbesondere die Haltezeit nach Erreichen der Prüftemperatur von 4 Stunden ist für die meisten Dichtungsmaterialien ausreichend. Lediglich bei einer nicht konstanten Verformung nach dieser Haltezeit sollte die Messzeit verlängert werden. Dieses Konstanzkriterium könnte z. B. mit maximal 1 µm zwischen der dritten und der vierten Stunde in der Haltezeit unter Temperatur definiert werden.

Der Kriech-/Relaxationsfaktor  $P_{QR}$  in Abhängigkeit von der Temperatur, der Ausgangsflächenpressung und der Steifigkeit der Verbindung wird demnach nicht mehr benötigt. Aus den beiden einhüllenden Verformungskurven bei Raumtemperatur und bei Betriebstemperatur und der nominellen Dichtungshöhe kann das Setzen der Dichtung  $\Delta e_{GC}$  für jede Steifigkeit  $C$  der Flanschverbindung berechnet werden. Für bereits experimentell ermittelte  $P_{QR}$ -Werte kann der Setzbetrag  $\Delta e_{GC}$  über folgende Beziehung aus der Dichtungsfläche  $A_G$  und der Steifigkeit  $C$  berechnet werden, so dass die bisherigen Versuchsergebnisse weiter genutzt werden können:

$$\Delta e_{GC} = \frac{A_G \cdot Q_A \cdot (1 - P_{QR})}{C} \quad (6.12)$$

Dieser Setzbetrag  $\Delta e_{GC}$  der Dichtung gilt aber dann für die Steifigkeit C, die im Kriech-/Relaxationsversuch angesetzt wurde. Der Vorteil der Ermittlung von einhüllenden Setzkurven liegt darin, dass für jede beliebige Steifigkeit der Flanschverbindung der zugehörige Setzbetrag der Dichtung ermittelt werden kann. Dies muss aber iterativ erfolgen, da die Restflächenpressung von der Verformung der Dichtung (inklusive des Setzbetrages) abhängig ist, vgl. Bild 6.13.

Als Steifigkeit der Verbindung kann bei der Bestimmung des Setzbetrages der Dichtung der reziproke Wert der Nachgiebigkeit  $Y_G$  unter Einwirkung der Dichtungskraft  $F_G$  angesetzt werden. Somit ergibt sich unter Verwendung der Gl. (6.9) folgende Formel zur Berechnung des Setzbetrages:

$$\Delta e_{GC} = (Q_A - Q_R) \cdot Y_G \cdot A_G \quad (6.13)$$

Unter Einbeziehung der ermittelten Regressionskurve für die verbleibende Restflächenpressung entsprechend Gl. (6.11) kann der Setzbetrag  $\Delta e_G$  für jede beliebige Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  und Nachgiebigkeit  $Y_G$  berechnet werden:

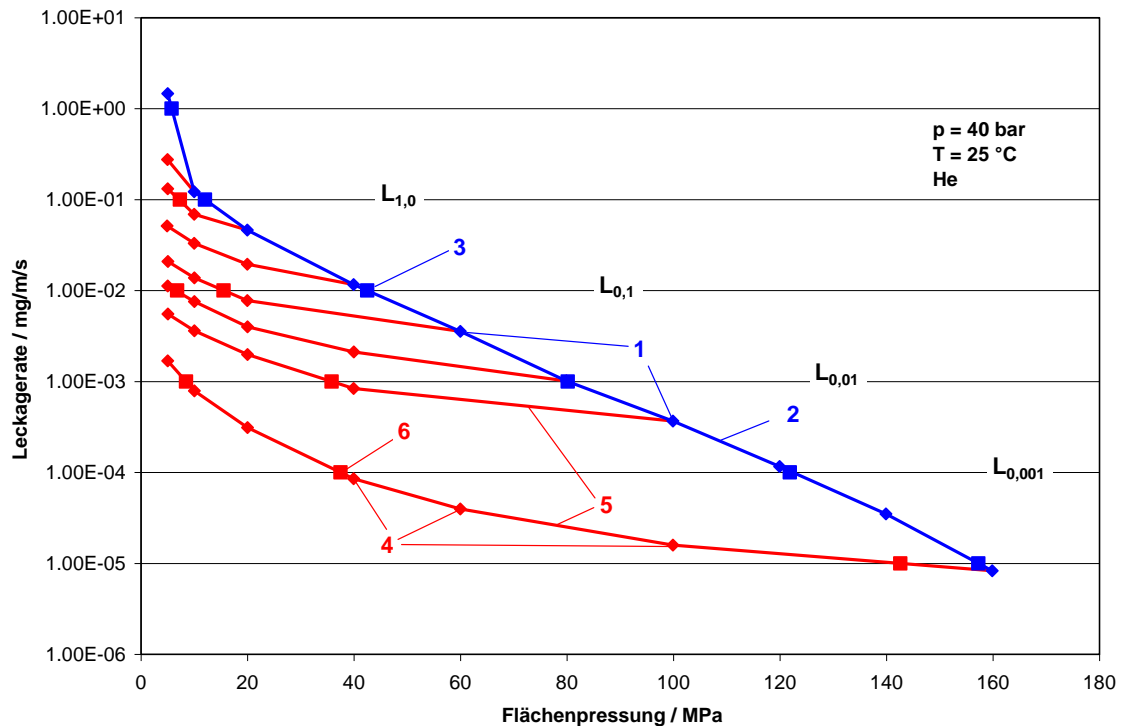
$$\Delta e_{GC} = \left( Q_A - \frac{G_1 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right) + G_2 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right)^2 + G_3 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right)^3}{1 + H_1 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right) + H_2 \cdot \left( \frac{\Delta e_{GC}}{e_G} \right)^2} \right) \cdot Y_G \cdot A_G \quad (6.14)$$

## 6.4 Leckageversuch

Im Leckageversuch werden die Abdichteigenschaften der Dichtung ermittelt, welche die Basis für einen rechnerischen Dichtheitsnachweis darstellen. Diese werden über zwei Kennwerte charakterisiert, die minimal erforderliche Flächenpressung im Einbauzustand  $Q_{\min(L)}$  und die minimal erforderliche Flächenpressung im Betriebszustand  $Q_{S\min(L)}$ . Diese Kennwerte hängen vom Innendruck  $p$  und der geforderten Dichtheitsklasse  $L$  ab, die minimal erforderliche Flächenpressung im Betriebszustand außerdem von der zuvor aufgebrauchten Ausgangsflächenpressung  $Q_A$ . An Hand des Diagramms in **Bild 6.14** soll die Versuchsdurchführung und die Ermittlung der Dichtungskennwerte erläutert werden.

Zunächst wird eine geringe Anfangsflächenpressung mit der bereits aus den anderen Versuchstypen bekannten Änderungsrate eingestellt. Anschließend wird der





**Bild 6.14: Schematische Auswertung eines Leckageversuches**

Innenraum der Dichtung mit dem Prüfmedium beaufschlagt, wobei der Innendruck während des Befüllvorgangs kompensiert wird, d. h. die effektive Flächenpressung auf der Dichtung wird konstant gehalten. Als Prüfmedium dient Helium, weil dieses auch schon in kleinsten Mengen mit Hilfe von Massenspektrometern nachgewiesen werden kann. Der Innendruck wird in EN 13555 auf 40 bar festgelegt, wobei zusätzliche Versuche auch bei anderen Druckstufen durchgeführt werden können (z. B. 10 bar oder 80 bar). Grundsätzlich ist aber hier zu erwähnen, dass die Druckstufen immer entsprechend den Einsatzgrenzen der Dichtung ausgewählt werden sollten.



Bei dieser ersten Flächenpressungsstufe wird dann die Leckagerate mit einem geeigneten Prüfverfahren und einer adäquaten Messzeit gemessen, vgl. Kapitel 5.1 und 5.3. Im nächsten Schritt wird die Flächenpressung entsprechend den Vorgaben in **Tabelle 6.3** erhöht, und die Ermittlung der Leckagerate wird von neuem gestartet. In dieser Tabelle sind bereits zusätzliche Flächenpressungsstufen (grün gekennzeichnet) definiert, die aus den Erfahrungen mit der Umsetzung der Prüfnorm EN 13555 in den letzten Jahren gewonnen wurden. Ursprünglich war eine Entlastung unter den zweifachen Innendruck, also auf 8 MPa bei einem Innendruck von 4 MPa (40 bar) aus Sicherheitsgründen nicht zulässig. Diese Sicherheitsaspekte wurden aber bei der Entwicklung der Prüfeinrichtung beachtet, so dass auch ein Bersten der


**Tabelle 6.3: Flächenpressungsstufen im Leckageversuch (40 bar Innendruck)**

Belastungsstufe der Dichtung [MPa]	Entlastungsstufen der Dichtung [MPa]
5	-
10	5
20	10, 5
40	20, 10, 5
60	40, 20, 10, 5
80	40, 20, 10, 5
100	40, 20, 10, 5
120	-
140	-
160	80, 40, 20, 10, 5

Dichtung zu keiner Gefährdung und keinen Schäden an der Messtechnik führen würde.

Wie aus Tabelle 6.3 hervorgeht, wird die Dichtung nicht nur kontinuierlich immer höher belastet, sondern ausgehend von definierten Stufen auch immer wieder (in mehreren Schritten) entlastet. Da für jede einzelne Laststufe eine Ermittlung der Leckagerate zu erfolgen hat, kann ein Leckageversuch mehrere Tage dauern. Umso wichtiger ist es daher, dass die Prüfungen in einem klimatisierten Raum ablaufen, um Temperatureinflüsse auf die Bestimmung der Leckagerate zu minimieren.

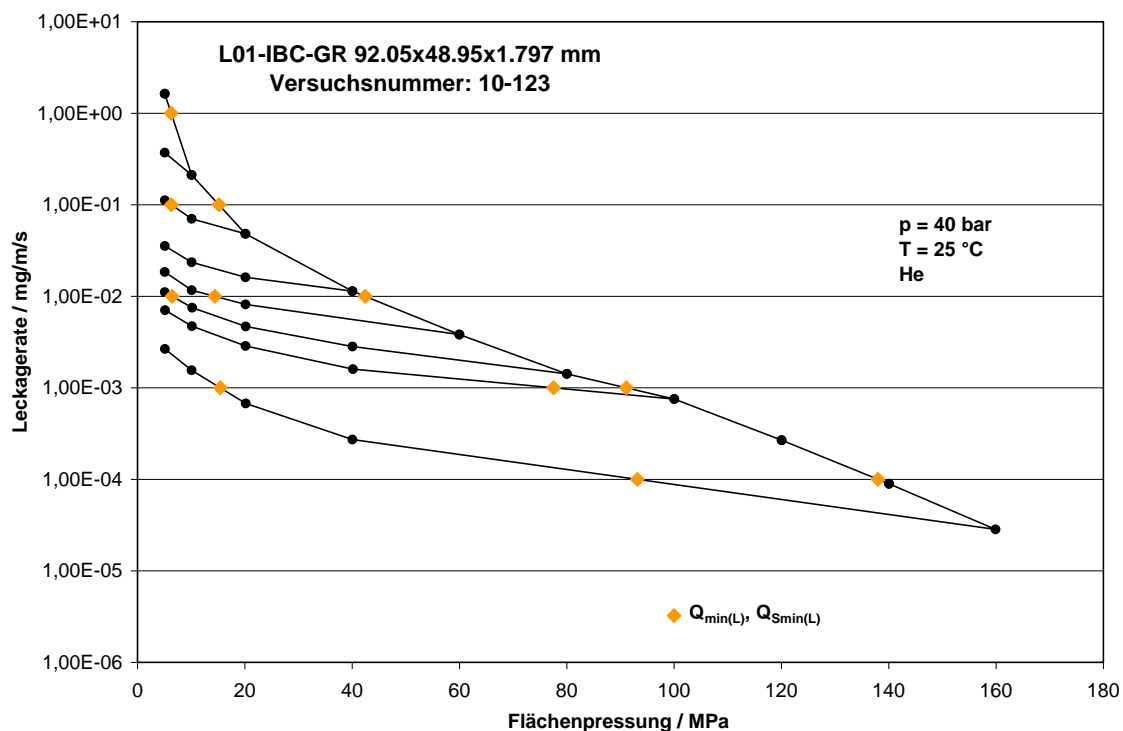
Die Auswertungen der Ermittlungen der Leckageraten bei ansteigender Flächenpressung (1:  in Bild 6.14) liefern die Belastungskurve (2) im Leckagediagramm, siehe Bild 6.14. Die minimal erforderlichen Flächenpressungen im Einbauzustand  $Q_{\min(L)}$  sind durch die Schnittpunkte mit den Dichtheitsklassen L definiert (3: ). Diese Flächenpressungen sind mindestens notwendig, um die zugehörigen Dichtheitsklassen erreichen zu können. Da aber eine Dichtung im Betriebszustand zumeist wieder entlastet wird, reicht diese Flächenpressung in der Regel nicht aus, um die Dichtheitsklasse auch unter Betriebsbedingungen einzuhalten.

Ausgehend von den Eckpunkten bei der Belastung (1), den sogenannten Ausgangsflächenpressungen  $Q_A$ , liefern die Leckageraten bei abfallender Flächenpressung (4: ) auch mehrere Entlastungskurven (5). Die Schnittpunkte mit

den Dichtheitsklassen ergeben dann die minimal erforderlichen Flächenpressungen im Betriebszustand  $Q_{Smin(L)}$  (6: ■). Da es mehrere Entlastungskurven gibt, ist der Kennwert  $Q_{Smin(L)}$  nicht eindeutig zu bestimmen. Er hängt nämlich von der zuvor bei der Belastung aufgetragenen Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  für diesen Entlastungsarm ab.

Grundsätzlich gilt, dass eine Dichtung unter Betriebsbedingungen umso stärker entlastet werden kann, je höher sie bei der Montage vorgespannt war, ohne dass die Dichtheitsklasse L überschritten wird. Ein Ziel bei der Montage muss daher sein, die Dichtung sehr hoch zu verformen, damit unter Betriebsbedingungen eine große Sicherheit hinsichtlich der Einhaltung der Dichtheitsklasse L vorliegt.

In **Bild 6.15** ist eine Leckagekurve einer Grafitflachdichtung mit Spießblecheinlage zu sehen, die das beschriebene Abdichtverhalten nochmals verdeutlicht.



**Bild 6.15: Leckagekurve einer Grafitflachdichtung mit Spießblecheinlage**

Das soeben beschriebene Verhalten ist zwar tendenziell für alle Dichtungstypen ähnlich, im Detail unterscheiden sich die Leckagekurven aber deutlich. Dies liegt zum einen an den verschiedenen Strukturen der Dichtungsmaterialien und zum anderen an der unterschiedlichen Anpassungsfähigkeit an die Flanschdichtflächen. Zur Illustration dieser Unterschiede sind im Anhang in **Bild A.27 bis Bild A.32** mehrere

Leckagekurven unterschiedlicher Dichtungswerkstoffe dargestellt. Die bei derselben Flächenpressung gemessenen Leckageraten der verschiedenen Materialien können dabei mehrere Zehnerpotenzen auseinander liegen.

Da die Leckageversuche mit einem speziellen Prüfmedium und bei fest definierten Innendruckstufen durchgeführt werden, stellt sich immer wieder die Frage, ob Leckageraten auf andere Medien oder andere Druckstufen übertragen werden können. Hierzu existieren zahlreiche Theorien, den Stofftransport durch eine Dichtung zu beschreiben, die allesamt auf zwei unterschiedliche Modelle zurückgeführt werden können. Zum einen handelt es sich um das Modell der parallelen Kapillaren /147/, /148/ und zum anderen um das Dusty-Gas-Modell /149/.

Im Anhang sind in **Bild A.33** experimentell ermittelte Leckagekurven für eine Spiraldichtung bei vier Innendruckstufen dargestellt. Ausgehend von den theoretischen Ansätzen, d. h. quadratische Innendruckabhängigkeit für laminare ( $\lambda \sim P^2$ ) und lineare Abhängigkeit für molekulare Strömung ( $\lambda \sim P$ ), sind für die Innendruckstufe 10 bar bzw. 150 bar die umgerechneten Leckagekurven den Messkurven gegenübergestellt, siehe **Bild A.34 und A.35**. Wie hieraus ersichtlich wird, spiegeln die theoretischen Ansätze nur in engen Flächenpressungsbereichen die Realität wider, eine Verallgemeinerung auf den gesamten Einsatzbereich einer Dichtung ist nicht möglich. Bei kleinen Flächenpressungsstufen herrscht eine laminare Strömung vor, während bei höheren Flächenpressungen molekulare Strömung überwiegt. Auch ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Belastungskurven und den Entlastungskurven zu beobachten. Bei einer bereits vorverformten Dichtung stimmen die theoretischen Strömungsansätze bei einer anschließenden Entlastung nur sehr grob mit den real gemessenen Leckageraten überein.

Ähnlich verhält es sich mit der Umrechnung auf andere Medien. Bei einer laminaren Strömung kann die Leckagerate über das Verhältnis der Viskositäten des Referenzgases und des Prüfgases ( $\lambda \sim \eta_{\text{Ref}}/\eta_{\text{Prüf}}$ ) umgerechnet werden, bei einer molekularen Strömung über die Quadratwurzel des Verhältnisses der Molmassen des Referenzgases und des Prüfgases ( $\lambda \sim \sqrt{M_{\text{Prüf}}/M_{\text{Ref}}}$ ) /150/. In **Tabelle 6.4** sind diese Verhältnisse für die Gase Helium, Stickstoff und Methan zusammengestellt. Am deutlichsten wird der Unterschied bei der Umrechnung von Stickstoff auf Methan. Während beim laminaren Ansatz die Leckagerate für Methan größer als die von Stickstoff ist, liegt sie bei molekularer Strömung unter der von Stickstoff. Bei der Umrechnung von Helium auf Methan ergeben sich für beide Strömungsbedingungen kleinere Leckageraten für Helium.

**Tabelle 6.4: Umrechnung der Leckagerate über die Molmasse bzw. die Viskosität**

Medium	dyn. Viskosität / $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	Molmasse / g
He	18.6	4
N <sub>2</sub>	16.6	28
CH <sub>4</sub>	10.8	16

		Umrechnung über Viskosität			Umrechnung über Molmasse		
Referenzgas	Prüfgas	He	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	He	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
	He		1.00	1.12	1.72	1.00	2.65
N <sub>2</sub>		0.89	1.00	1.54	0.38	1.00	0.76
CH <sub>4</sub>		0.58	0.65	1.00	0.50	1.32	1.00

Die experimentell ermittelten Leckagekurven für die drei Medien Helium, Stickstoff und Methan und die entsprechenden Kurven bei einer Umrechnung der Leckageraten jeweils für Helium als Referenzgas sind in **Bild A.36 bis Bild A.38** im Anhang zu sehen.

Während bei der Umrechnung von Helium auf Stickstoff der Ansatz über die Molmassen (molekulare Strömung) die bessere Näherung liefert, ist bei der Umrechnung von Helium auf Methan der Ansatz über die Viskositäten (laminare Strömung) realitätsnaher. Aber auch hier gilt, dass es sich lediglich um eine grobe Abschätzung handelt, und dass sich die Verhältnisse mit der Verformung der Dichtung, also mit der Flächenpressung ändern.

**Fazit:** Der Leckageversuch dient der Ermittlung der Abdichteigenschaften der Dichtung bei verschiedenen Innendrücken. Die minimal erforderliche Flächenpressung im Einbauzustand  $Q_{\min(L)}$  und die minimal erforderliche Flächenpressung im Betriebszustand  $Q_{S\min(L)}$  in Abhängigkeit von der Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  charakterisieren diese Abdichteigenschaften. Bei der Bestimmung dieser Kennwerte müssen einige Randbedingungen beachtet werden, um reproduzierbare Werte zu bestimmen. So müssen ausreichend lange Messzeiten angesetzt werden, um konstante Leckageraten zu erfassen. Ebenso muss das Messverfahren in Abhängigkeit von der zu erwartenden Leckagerate ausgewählt werden.

Die Kennwerte sind für jede relevante Innendruckstufe experimentell zu ermitteln. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, ist eine Umrechnung auf eine andere Innendruckstufe praktisch nicht möglich. Außerdem sind weitere Flächenpressungsstufen hilfreich, um die Kennwerte hinreichend genau bestimmen zu können.

Eine Umrechnung der mit dem Prüfmedium Helium gemessenen Leckageraten auf andere Medien ist nur in eingeschränkten Bereichen möglich. Hierbei ist dann aber die Kenntnis der vorherrschenden Strömungsart notwendig, was letztendlich dann doch experimentelle Untersuchungen erfordert. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden nur Leckageraten von Gasen miteinander verglichen, eine Umrechnung auf Flüssigkeiten ist vermutlich noch schwieriger. Es ist hierbei sicherlich lediglich eine Abschätzung der Größenordnung der Leckagerate möglich.

Als Konsequenz aus diesen Erfahrungen muss festgehalten werden, dass rechnerische Dichtheitsnachweise zur Begrenzung von Emissionen immer mit Kennwerten, die mit einem Prüfgas (i. d. R. Helium) ermittelt wurden, durchzuführen sind und eine Übertragbarkeit auf reale Medien nicht möglich ist. Dementsprechend müssen auch die zulässigen Leckageraten bzw. die geforderten Dichtheitsklassen sich immer auf das Prüfgas beziehen.

## 6.5 Reibversuch

Ziel der Untersuchungen im Reibversuch ist die Ermittlung der Reibungskoeffizienten  $\mu_H$  (Haftreibung) und  $\mu_{Gl}$  (Gleitreibung) der Dichtungsmaterialien. Diese Faktoren sind erforderlich, um die Abtragbarkeit von äußeren Kräften, und zwar von Querkräften und/oder Torsionsmomenten, beurteilen zu können. Hintergrund dieser Überlegungen ist, dass diese Querbelastungen in Krafthauptschlussverbindungen nur über die Reibung zwischen Dichtung und Flanschdichtflächen abgetragen werden können. Sind die wirkenden Reibkräfte zu gering, könnten sich die Flansche gegeneinander verschieben. Eine Prüfnorm zur Ermittlung dieser Reibungskoeffizienten existiert z. Z. noch nicht.

Im Reibversuch werden die Dichtungen bei der Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  auf die Prüftemperatur aufgeheizt, bevor die Prüflinge dann auf die Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  entlastet werden, um so einen Betriebslastfall zu simulieren. Die Änderungsrate der Lastaufgabe und die Aufheizrate entsprechen den Festlegungen für die anderen Versuchstypen der EN 13555. Nach einer Haltezeit von 5 Minuten

wird dann der eigentliche Reibversuch durchgeführt. Dabei wird das mittig zwischen zwei Dichtungen angeordnete Heiz- und Prüfplattenmodul an einer Gewindestange mit Hilfe eines hydraulischen Spannzylinders horizontal aus dem gesamten Aufbau herausgezogen. Bei der entsprechenden Prüfung bei Raumtemperatur entfällt das Hochheizen auf Prüftemperatur, ansonsten handelt es sich um den identischen Prüfablauf.

Das in diesem Versuch ermittelte Losbrechen des Heiz- und Prüfplattenmoduls wird zur Bestimmung des Haftreibungsfaktors  $\mu_H$  bei Raumtemperatur oder erhöhter Temperatur herangezogen. Der Haftreibungsfaktor ergibt sich aus der quer zur Flanschachse wirkenden Losbrechkraft  $F_{q,L}$  und der axial aufgetragenen Dichtungskraft  $F_A$  zu:

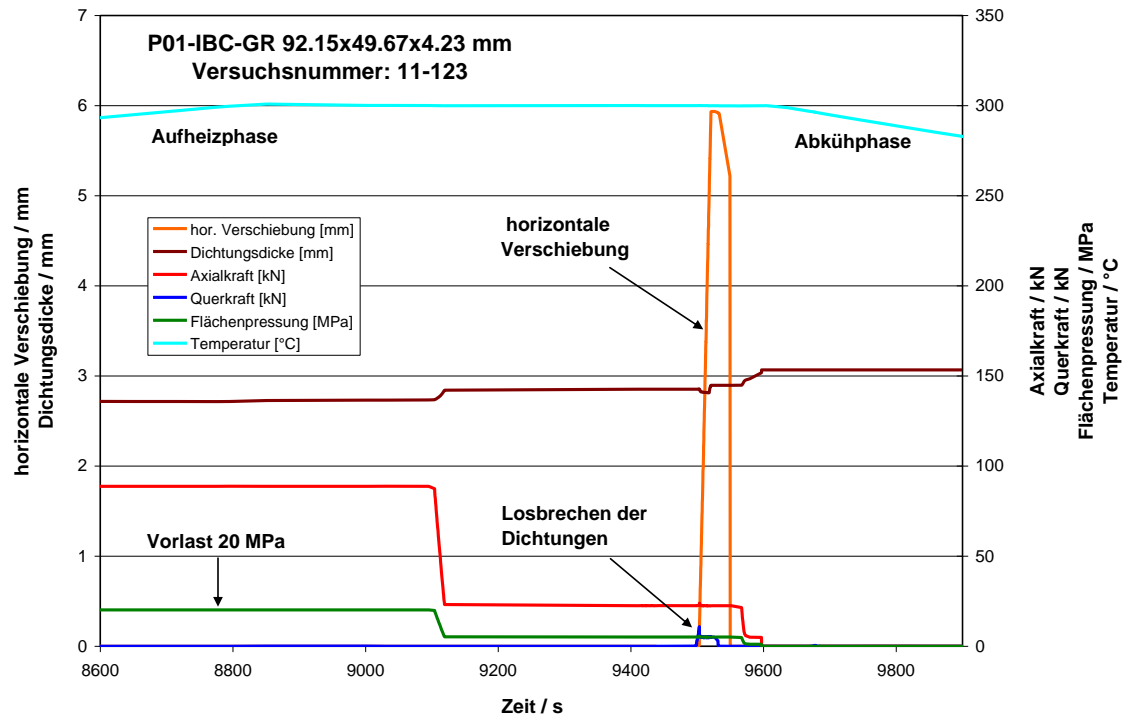
$$\mu_H = \frac{F_{q,L}}{2 \cdot F_A} \quad (6.15)$$

Das Modul wird nach dem Losbrechen ca. 4 bis 5 mm in horizontaler Richtung aus dem Aufbau herausgezogen. Aus der erforderlichen Querkraft während dieser Verschiebung  $F_{q,Gl}$  kann der Gleitreibungsfaktor  $\mu_{Gl}$  bestimmt werden. Der Gleitreibungsfaktor ergibt sich zu:

$$\mu_{Gl} = \frac{F_{q,Gl}}{2 \cdot F_A} \quad (6.16)$$

In **Bild 6.16** ist ein Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs einer Prüfung zur Illustration der verschiedenen Vorgänge dargestellt. Bei einer höheren Vorlast von 20 MPa wird die Prüftemperatur von 300 °C auf die Prüfapparatur aufgebracht. Bei konstanter Temperatur wird die Flächenpressung auf die Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  (5 MPa) abgesenkt, bevor die Mittelplatten aus dem Prüfstand herausgezogen werden. Hierbei wird der Hydraulikdruck im Spannzylinder langsam erhöht, die Querkraft steigt somit kontinuierlich an, bis sich die Platten in Bewegung setzen. Ab diesem Moment wird dann die Gleitreibungskraft gemessen.

Zur Verifikation dieser neu entwickelten Prüfeinrichtung wurden erste Reibversuche mit verschiedenen Flachdichtungen auf Grafitbasis durchgeführt. Bei den untersuchten Prüflingen handelt es sich um eine Grafitdichtung mit Spießblecheinlage, eine Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen und eine Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen und metallischem Innenbördel. In **Tabelle 6.5**



**Bild 6.16:** Zeitlicher Verlauf eines Reibversuches bei 300 °C

sind die Ergebnisse der Reibversuche tabellarisch zusammengestellt. Angegeben sind hierbei die Werte:

- Vorverformung der Dichtung  $Q_A$  beim Aufbringen der Prüftemperatur,
- wirkende Flächenpressung  $Q$  bei den Reibversuchen (entsprechend  $Q_{Smin(L)}$ ),
- zugehörige Axialkraft  $F_A$ , mit der die Dichtungen belastet werden,
- Querkraft (Losbrechen)  $F_{q,L}$ , die überwunden werden muss, um das Modul in Bewegung zu versetzen,
- Querkraft (Gleiten)  $F_{q,Gl}$ , die zur horizontalen Verschiebung des Moduls erforderlich ist,
- Haftreibungsfaktor  $\mu_H$  und
- Gleitreibungsfaktor  $\mu_{Gl}$ .

Reibversuche wurden für jeden Dichtungstyp bei Raumtemperatur sowie bei einer Prüftemperatur von 300 °C durchgeführt. Die Dichtungen wurden jeweils mit 20 MPa Flächenpressung vorverformt, bevor dann bei einer Pressung von 5 MPa die Reibversuche durchgeführt wurden.

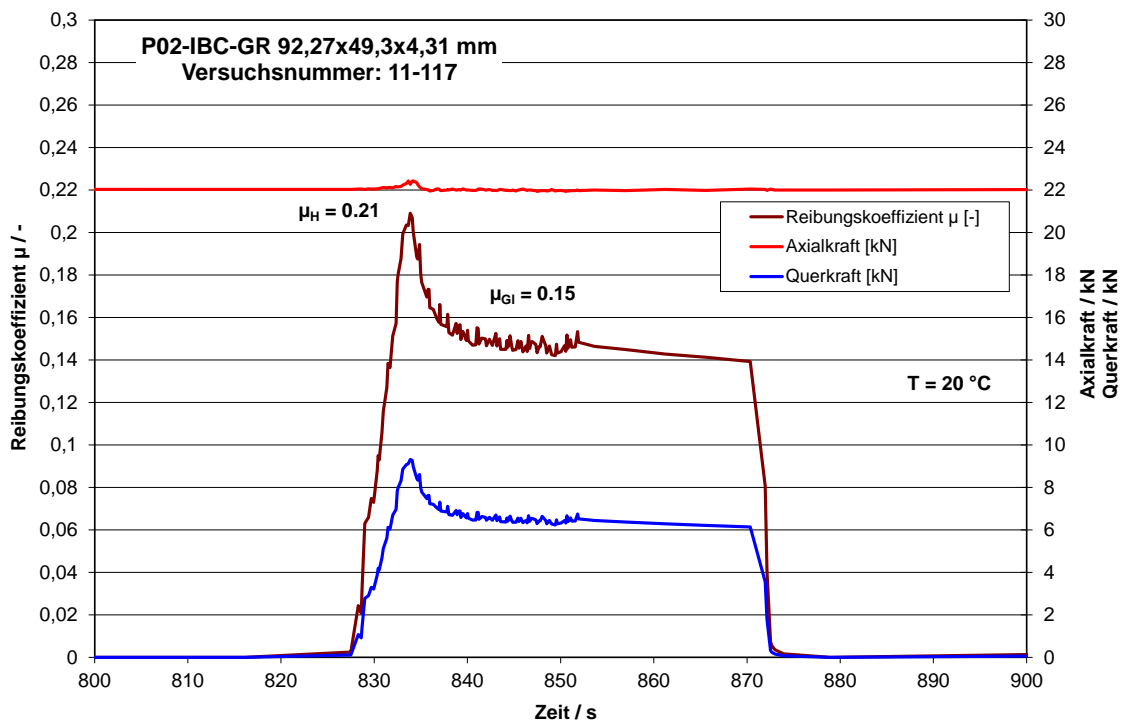
In **Bild 6.17** ist beispielhaft der zeitliche Verlauf eines Reibversuches dargestellt, tabelliert sind die aus diesen Kurven ermittelten Kennwerte in der Tabelle 6.5.



Weitere Verläufe der durchgeführten Reibversuche sind im Anhang in **Bild A.39 bis Bild A.43** zu finden.

**Tabelle 6.5: Versuchsergebnisse der Reibversuche**

Bezeichnung	Versuch	Vorverformung $Q_A$ MPa	Temperatur T °C	Flächen- pressung Q MPa	Axialkraft $F_A$ kN	Querkraft (Losbrechen) $F_{q,L}$ kN	Querkraft (Gleiten) $F_{q,Gl}$ kN	Haftreibung $\mu_H$ -	Gleitreibung $\mu_{Gl}$ -
Grafit mit Spießblecheinlage	11-117	20.0	20	5.0	22.0	9.3	6.5	0.21	0.15
Grafit mit Spießblecheinlage	12-183	20.0	300	5.0	22.7	7.4	3.9	0.16	0.09
Grafit mit Glattblecheinlagen	11-119	20.0	20	5.0	22.1	10.3	6.9	0.23	0.16
Grafit mit Glattblecheinlagen	11-123	20.0	300	5.0	22.5	10.9	4.9	0.24	0.11
Grafit mit Glattblecheinlagen und Innenbördel	11-120	20.0	20	5.0	22.2	11.1	7.5	0.25	0.17
Grafit mit Glattblecheinlagen und Innenbördel	11-126	20.0	300	5.0	22.5	13.7	10.4	0.30	0.23



**Bild 6.17: Reibversuch (RT) Grafitdichtung mit Spießblecheinlage**

Abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Dichtungen und vom Dichtungstyp ergeben sich unterschiedliche Reibwerte. Der Haftreibungsfaktor  $\mu_H$  kann dabei sehr genau bestimmt werden, beim Gleitreibungsfaktor  $\mu_{Gl}$  kann zum Teil nur ein Bereich

ermittelt werden. Bei Raumtemperatur liegen die Haftreibungskoeffizienten zwischen 0,21 und 0,25, wobei die Dichtung mit Innenbördel den höchsten Haftreibungsfaktor  $\mu_H$  aufweist. Auch der Gleitreibungsfaktor  $\mu_{GI}$  ist für diesen Dichtungstyp am höchsten, die Werte liegen aber mit 0,15 bis 0,17 sehr eng beieinander, siehe Tabelle 6.5.

Bei der Dichtung mit Innenbördel wird bei den Versuchen bei einer Temperatur von 300 °C ein höherer Haftreibungsfaktor  $\mu_H$  und ein höherer Gleitreibungsfaktor  $\mu_{GI}$  ermittelt als bei den Versuchen bei Raumtemperatur. Bei den restlichen Grafit-Flachdichtungen ist die Tendenz eher umgekehrt. Der höchste gemessene Haftreibungsfaktor  $\mu_H$  liegt für die Dichtung mit Innenbördel bei 0,3. Der niedrigste Haftreibungsfaktor wird bei der Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen mit  $\mu_H = 0,24$  gemessen. Ebenso wird der höchste Gleitreibungsfaktor bei 300 °C bei der Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen und Innenbördel gemessen, wobei dieser während des Versuchs von 0,3 auf ca. 0,2 abfällt.

**Fazit:** Der in dieser Arbeit definierte Reibversuch dient der Ermittlung der Haftreibungskoeffizienten zwischen Dichtung und der nach Norm gefertigten metallischen Oberfläche der Flanschblätter. Die Kenntnis der Haftreibung ist notwendig, um den Einfluss von quer zur Axialrichtung der Flanschverbindung angreifende Belastungen, d. h. von Scherkräften und Torsionsmomenten, auf die Funktion der Flanschverbindung zu bewerten. Der vorgeschlagene Versuchsablauf erscheint praktikabel, die Ergebnisse können reproduzierbar ermittelt werden. Zudem können die Versuche mit Hilfe eines einfachen Zusatzmoduls in der Standardprüfeinrichtung für Dichtungen durchgeführt werden.

Die bisher ermittelten Reibungskoeffizienten liegen alle über den in der Literatur zu findenden Werten. Allerdings sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich, um den Einfluss der Versuchsparameter Ausgangsflächenpressung, Restflächenpressung und Prüftemperatur zu verifizieren.

Der Haftreibungskoeffizient  $\mu_H$  soll im Weiteren als Reibungskoeffizient der Dichtung mit  $\mu_G$  bezeichnet werden.

## 6.6 Ausblasversuch

Ziel des Nachweises der Ausblassicherheit von Flanschverbindungen ist nach allgemeinem Verständnis die Verhinderung einer plötzlichen, großen Leckage bei

betrieblichen Belastungen. Der Ausblasversuch dient daher der Ermittlung des Sicherheitsabstandes der Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  von diesem spontanen Versagen einer Dichtung, was über die Flächenpressung beim Ausblasen  $Q_{BO}$  beschrieben werden kann. Ein solches Versagen tritt ein, wenn

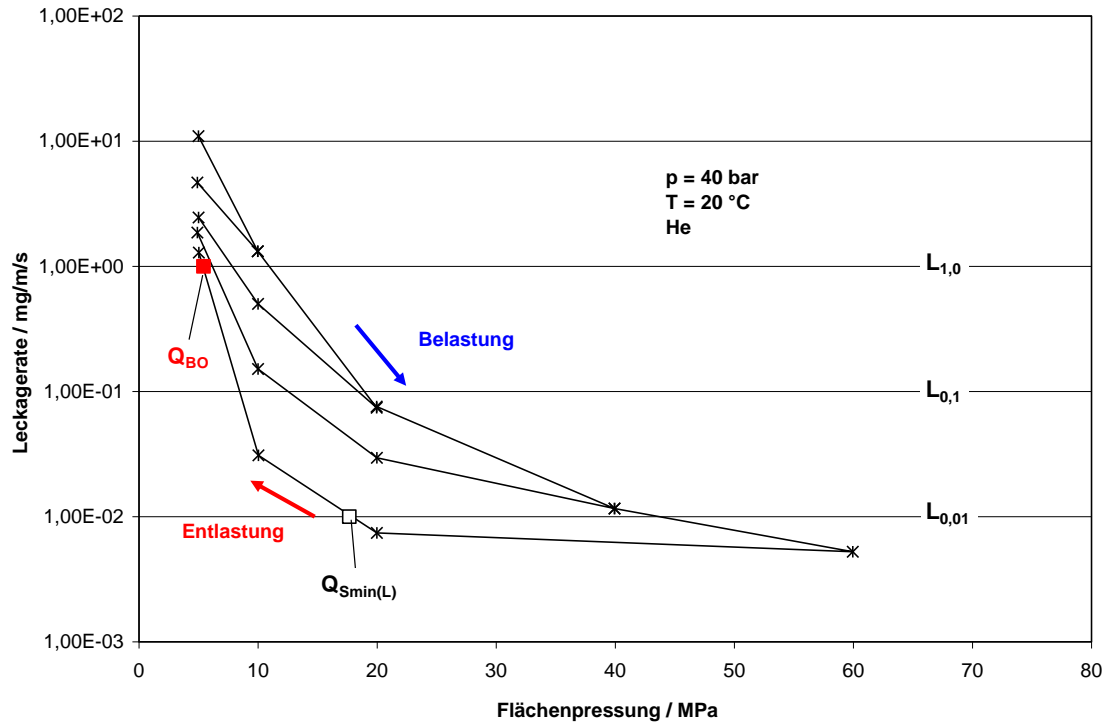
- die Dichtung aufreißt bzw. Teile der Dichtung aus der Verbindung herausgedrückt werden oder
- eine Leckage eintritt, die um mehr als 2 Größenordnungen größer ist, als es der geforderten Dichtheitsklasse L entspricht, wobei die Dichtung als Ganzes zwischen den Flanschdichtleisten verbleibt.

Ausblasversuche sind bisher noch in keinem Regelwerk genormt, lediglich in der VDI 2200 ist ein Ausblasversuch beschrieben, der aber sehr praxisfremd ist. Die im Folgenden zusammengefassten Erkenntnisse basieren auf einem an der MPA Universität Stuttgart durchgeführten Forschungsvorhaben. Basis für die Entwicklung einer Prüfprozedur und die Realisierbarkeit dieser Versuche war die Entwicklung einer Prüfeinrichtung, wie sie in Kapitel 5.5 beschrieben ist, um Dichtungen unter Temperatur mit Innendruck befüllen und die Leckagerate messen zu können.

Die Definition der Flächenpressung beim Ausblasen erfolgt über die während der Entlastung der Dichtung im Leckageversuch gemessene Leckagerate. Sobald diese das 100-fache der Dichtheitsklasse L für die Mindestflächenpressung  $Q_{Smin(L)}$  überschreitet, wird von Ausblasen gesprochen. Die Flächenpressung, bei der dieses Kriterium eintritt, wird als Flächenpressung bei Ausblasen  $Q_{BO}$  definiert, vgl. auch **Bild 6.18**.

Im "normalen" Leckageversuch zur Ermittlung der Mindestflächenpressung im Einbauzustand  $Q_{min(L)}$  und im Betriebszustand  $Q_{Smin(L)}$  ist die Bestimmung der Flächenpressung bei Ausblasen  $Q_{BO}$  nur bedingt möglich, da die Dichtung nach der Entlastung bis unter diese Flächenpressung bereits geschädigt sein kann und eine Fortsetzung des Versuchs bei der nächst höheren Flächenpressungsstufe  $Q_A$  nicht mehr sinnvoll ist. Es ist daher ein eigener Versuchsablauf zur Ermittlung der Flächenpressung bei Ausblasen  $Q_{BO}$  erforderlich, der nachfolgend erläutert werden soll.

In **Bild A.44 und A.45** im Anhang ist der zeitliche Ablauf eines Ausblasversuches (Entlastungskurve eines Leckageversuches) exemplarisch dargestellt. Zunächst wird eine Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  eingestellt, bei der auch die Prüftemperatur und anschließend der Innendruck aufgebracht werden. Ausgehend von dieser Situation



**Bild 6.18: Definition der Flächenpressung beim Ausblasen  $Q_{Bo}$**

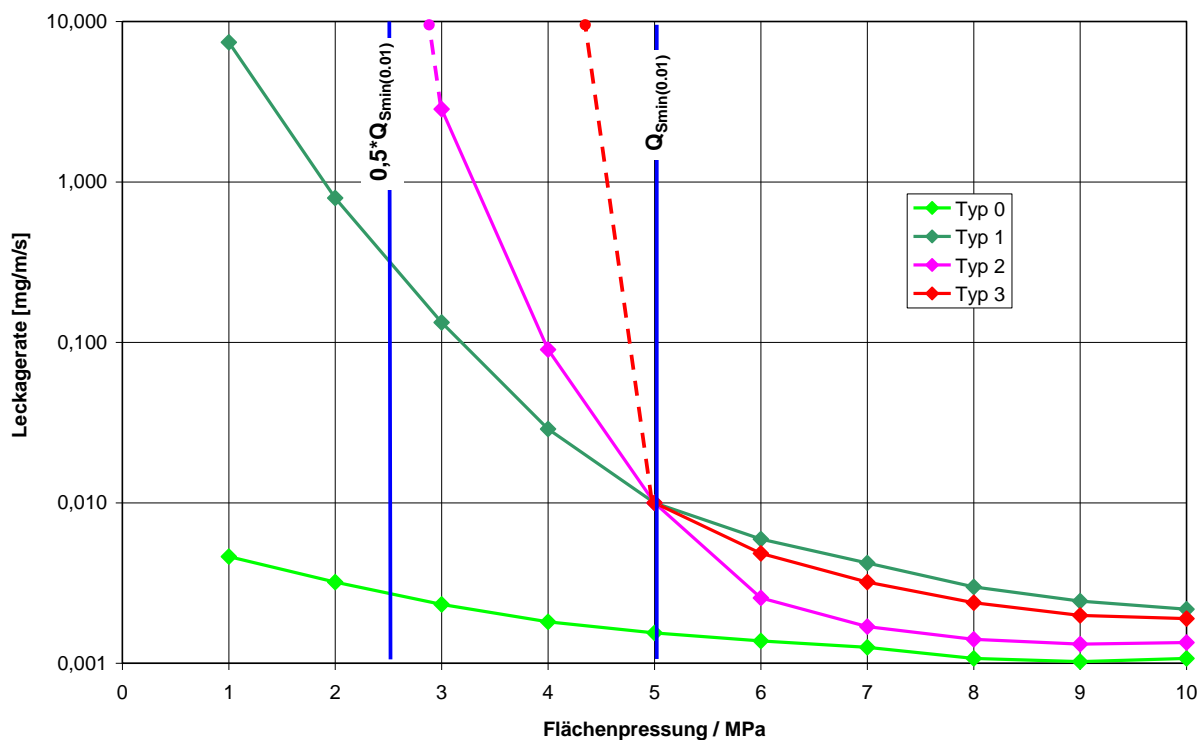
wird die Flächenpressung zur Ermittlung der Ausblassicherheit stufenweise reduziert. Bei jeder Flächenpressungsstufe wird die Leckagerate mittels der Differenzdruckmethode ermittelt.

Die Einflussgrößen auf die Ausblassicherheit von Flanschverbindungen und somit auch die zu untersuchende Versuchsparameter sind im Wesentlichen:

- Art der Dichtung (Werkstoff(e), Aufbau, Struktur),
- Höhe des Innendrucks,
- Höhe der Ausgangsflächenpressung,
- Temperatur (thermische Auslagerung),
- Betriebszeit bzw. Dauer der Innendruckbelastung,
- Medium (abhängig von der Art der Dichtung),
- geforderte Dichtheitsklasse für das abgedichtete Medium,
- Art der Flansche und Schrauben (Steifigkeit, Dichtleistenart, Oberflächenstruktur, u. a.),
- Montageverfahren (insbesondere Streuung der Schraubkraft) und
- Alterung der Dichtung.

**Fazit:** Aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens /121/, /122/ kann gefolgert werden, dass die entwickelte experimentelle Vorgehensweise zum Nachweis der Ausblassicherheit eine Untersuchung der relevanten Einflussgrößen ermöglicht. Die Prüfung der Ausblassicherheit in einer Dichtungsprüfmaschine deckt das Ausblasverhalten realer Flanschverbindungen konservativ ab, dies gilt insbesondere auch für emaillierte Bunde mit Losflanschen sowie Flanschverbindungen mit GFK-Flanschen. Die Ermittlung der Ausblassicherheit in der Prüfmaschine bei Raumtemperatur ist in allen untersuchten Fällen abdeckend für die Ausblassicherheit einer unter Temperatur ausgelagerten Flanschverbindung.

Bei Weichstoffdichtungen auf der Basis von PTFE wurden vier unterschiedliche Verhaltenstypen hinsichtlich Ausblassicherheit festgestellt, die das Gefährdungspotenzial in Form von Ausblasen charakterisieren, siehe schematische Darstellung in **Bild 6.19**.



**Bild 6.19:** Schematische Darstellung der Ausblasverhaltenstypen bei PTFE-Dichtungen /121/, /122/

- Typ 0: Die Leckagerate bleibt bei Entlastung bis herab auf die niedrigste Flächenpressungsstufe 1 MPa auf einem nahezu gleichbleibenden niedrigen Niveau unterhalb von 0,01 mg/m/s. Es gibt keinerlei Anzeichen für ein

beginnendes Ausblasen. Die übliche Auslegung, d. h. der Nachweis der Einhaltung der Mindestflächenpressung  $Q_{Smin(L)}$ , deckt auch den Aspekt "Ausblassicherheit" ab.

- Typ 1: Die Leckagerate steigt mit abnehmender Dichtungspressung stetig, gleichmäßig und in begrenztem Maße an. Das Ausblaskriterium (100-fache Erhöhung der Leckagerate) wird erst nach einer Absenkung der Dichtungspressung um mehr als 50% des Wertes für  $Q_{Smin(0,01)}$  erreicht. Ein tatsächliches Ausblasen tritt bis dahin nicht auf. Dieses Verhalten kann als "gutmütig" und "kalkulierbar" hinsichtlich Ausblassicherheit angesehen werden. Die übliche Auslegung, d. h. der Nachweis der Einhaltung der Mindestflächenpressung  $Q_{Smin(L)}$ , deckt auch den Aspekt "Ausblassicherheit" ab.
- Typ 2: Die Entlastung der Dichtung auf einen Wert oberhalb von  $0,5 \cdot Q_{Smin(0,01)}$  führt bereits zum Ausblasen der Dichtung. In diesem Fall ist der Ansatz einer höheren Mindestflächenpressung in der Auslegung, als es  $Q_{Smin(0,01)}$  entspricht, bzw. die Verwendung eines höheren Sicherheitsbeiwerts zur Gewährleistung der Ausblassicherheit erforderlich.
- Typ 3: Bei Entlastung minimal unterhalb von  $Q_{Smin(0,01)}$  tritt schlagartig Ausblasen auf. Ein hinreichender Sicherheitsabstand zur kritischen Flächenpressung in Form einer entsprechend hohen Mindestflächenpressung bei der Auslegung ist geboten.

Für die Typen 2 und 3 sollte eine Flanschverbindung mit einer höheren erforderlichen Mindestflächenpressung im Betrieb ausgelegt werden. Die im Leckageversuch ermittelte erforderliche Mindestflächenpressung im Betrieb deckt nämlich die Sicherheit gegen Ausblasen der Dichtung bei einer geringfügigen Unterschreitung des Kennwertes nicht ab. Wird ein Sicherheitsbeiwert von 2 gefordert, würde sich für die im rechnerischen Nachweis anzusetzende erforderliche Mindestflächenpressung im Betrieb folgende Beziehung ergeben:

$$Q'_{Smin(L)} = \max(Q_{Smin(L)}; 2 \cdot Q_{BO}) \quad (6.17)$$

## **7 Analytisches Verfahren für Festigkeits- und Dichtheitsnachweise**

Basis für das hier erläuterte analytische Berechnungsverfahren ist die europäische Norm EN 1591-1, die im Jahr 2001 veröffentlicht wurde und die mit einem Amendment A1 in 2009 und einem Corrigendum AC in 2011 aktualisiert wurde. Mit dieser Berechnungsmethode sind sowohl Dichtheits- als auch Festigkeitsnachweise durchführbar. Dabei wird das Verhalten des Gesamtsystems Flansche-Schrauben-Dichtung betrachtet, wobei die Parameter Innendruck, äußere Axialkraft, Biegemoment, Wärmeausdehnungsunterschiede, Einfluss der angeschlossenen Schale oder des angeschlossenen Rohres, Einbauschraubenkraft, Änderung der Schrauben- bzw. Dichtungskraft bei Verformung aller Bauteile der Verbindung und Streuung des Anziehverfahrens berücksichtigt werden.

Dem Verfahren liegt die Elastizitätsanalyse des Verhältnisses Belastung/Verformung zwischen allen Teilen der Flanschverbindung zu Grunde, wobei dies um das plastische Verhalten des Dichtungswerkstoffes (Kriech-/Relaxation) korrigiert wird. Der Festigkeitsnachweis beruht auf der Beurteilung der zulässigen Verformungen, wobei lokale Plastifizierungen toleriert werden.

Der Dichtheitsnachweis erfolgt ausschließlich über die Beurteilung der resultierenden Dichtungsflächenpressungen in jedem Belastungszustand. Hierbei werden diese Flächenpressungen mit den erforderlichen Mindestflächenpressungen für die einzuhaltende Dichtheitsklasse, die nach EN 13555 ermittelt werden, siehe auch Kapitel 6.4, verglichen.

Das Berechnungsverfahren der EN 1591-1 hat sich in den letzten Jahren in der Industrie durchgesetzt, wobei die Akzeptanz des Verfahrens mit zunehmender Anzahl an veröffentlichten Dichtungskennwerten stetig gestiegen ist. Allerdings gibt es noch einige Punkte, die in der Diskussion stehen. Hierbei handelt es sich um die folgenden Aspekte, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelt werden:

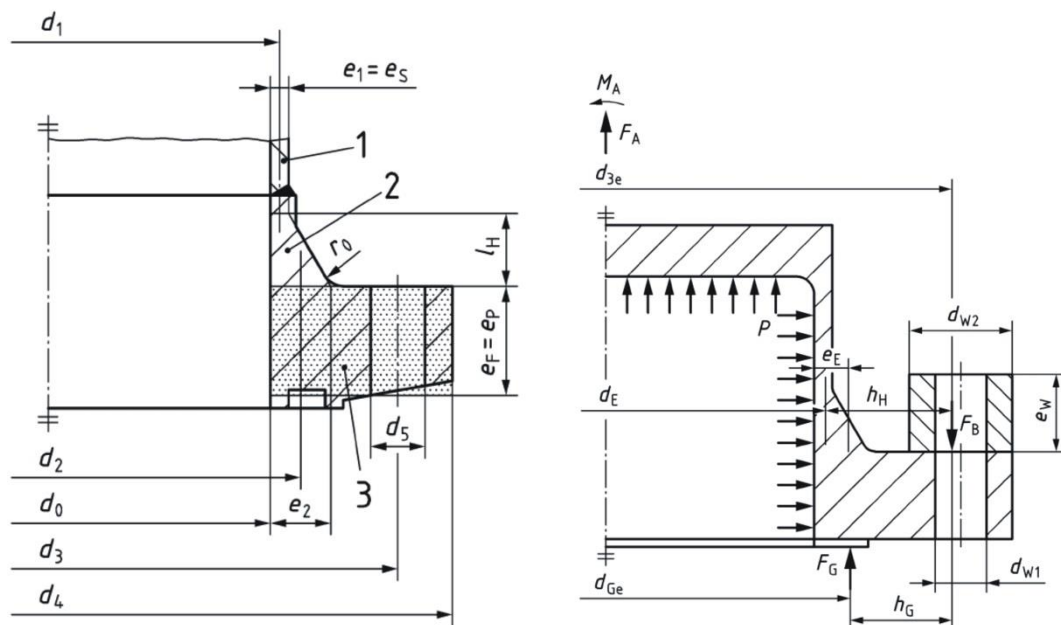
- Verformung der Dichtung bei der Montage zur realistischen Abschätzung der Dichtungshöhe im Einbauzustand,
- Kriech-/Relaxationsverhalten von Dichtungen,
- Berücksichtigung von Scherkräften und Torsionsmomenten,
- Verwendung von Dehnhülsen,
- Bestimmung der effektiven Breite der Dichtung,
- Bestimmung der Dichtungsflächenpressung für einen Dichtheitsnachweis,

- Dichtheitsnachweis unter Betrachtung der Sicherheit gegen Ausblasen und
- Festigkeitsnachweis mit Begrenzung der zulässigen lokalen Plastifizierungen.

## 7.1 Elastizitäten der Bauteile

In einem ersten Schritt werden im Berechnungsverfahren der EN 1591-1 die tatsächlichen Flanschgeometrien in einfache rechteckige Modelle, in einen Flanschring und eine zylindrische Schale, überführt. Hierzu müssen einige geometrische Parameter ermittelt werden, um die Steifigkeitswerte der Einzelbauteile bestimmen zu können. Die hier beschriebene Vorgehensweise bezieht sich auf Flanschverbindungen mit konischen Vorschweißflanschen und Flachdichtungen bzw. metallische Dichtungen mit Weichstoffauflage oder -füllung. Losflansche mit Bund oder Bördel, Blindflansche oder metallische Dichtungen (Linsendichtungen, RTJ-Dichtung) erfordern modifizierte Berechnungsalgorithmen, die aber von den hier vorgestellten Modifikationen der Berechnungsroutine unberührt bleiben.

Ein Vorschweißflansch wird zunächst in einen flächenäquivalenten Ring  $A_F$  unter Berücksichtigung der Dichtleistenform mit einem rechtwinkligen Querschnitt der Breite  $b_F$ , der Höhe  $e_F$  und dem Außendurchmesser  $d_F$  überführt, siehe **Bild 7.1**, an den eine dem Konus äquivalente Schale mit konstanter Wanddicke  $e_E$  anschließt. Für diese Geometrien werden dann die anzusetzenden Hebelarme (z. B.  $h_G$ ,  $h_H$ ) und



**Bild 7.1:** Flanschgeometrie und Hebelarme am Beispiel eines konischen Vorschweißflansches /37/

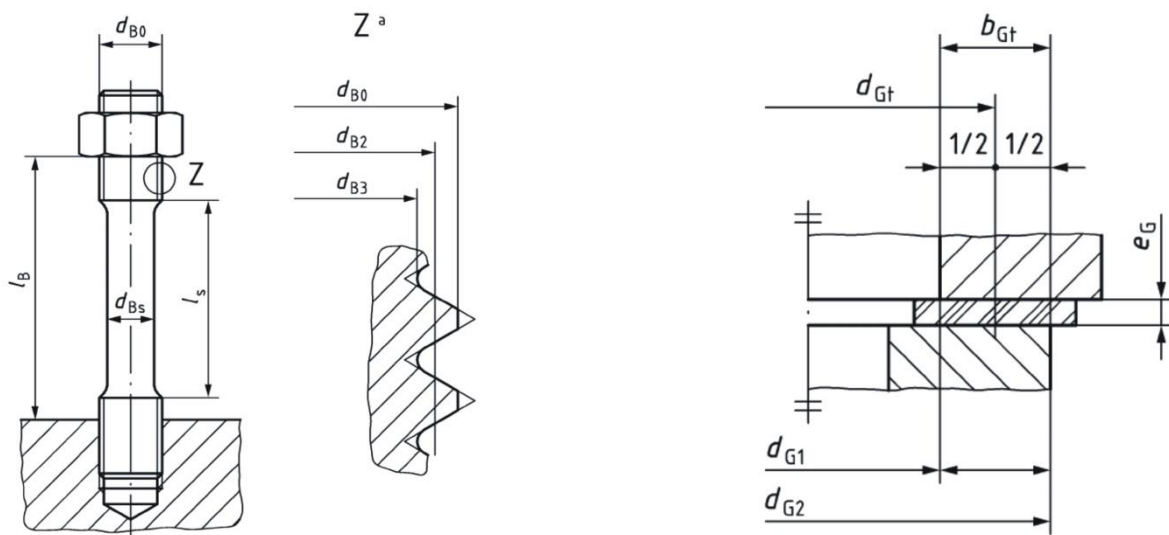


auch der Elastizitätsmodul bei Drehung des Flansches  $Z_F$  definiert. Hierzu sind verschiedene Hilfsvariablen und Korrekturfaktoren notwendig, deren Definition aus numerischen Berechnungen und unter Anwendung diverser Näherungen erfolgte. Details zu diesen Definitionen können dem Beiblatt 1 zur Norm EN 1591-1 entnommen werden /150/.

$$Z_F = \frac{3 \cdot d_F \cdot c_F}{\pi \cdot b_F \cdot e_F^3} \quad (7.1)$$

Aus verschiedenen Geometriegrößen der Schrauben wie der Klemmlänge  $l_e$ , dem Flankendurchmesser  $d_{B2}$ , dem Gewindekerndurchmesser  $d_{B3}$ , dem Nenndurchmesser  $d_{B0}$  oder der Schaftlänge  $l_s$  und dem Schaftdurchmesser  $d_{Bs}$  bei Dehnschrauben sowie der Schraubenanzahl  $n_B$  werden die effektive Querschnittsfläche  $A_B$  und der axiale Elastizitätsfaktor  $X_B$  der Schraube bestimmt, vgl. auch **Bild 7.2**.

$$X_B = \frac{4}{\pi \cdot n_B} \cdot \left( \frac{l_s}{d_{Bs}^2} + \frac{l_e}{d_{Be}^2} + \frac{0.8}{d_{B0}} \right) \quad (7.2)$$



**Bild 7.2:** Schrauben-, Gewinde- und Dichtungsgeometrie am Beispiel einer Dehnschraube und einer Flachdichtung /37/

Hierbei gilt für den effektiven Schraubendurchmesser  $d_{Be}$  folgende Beziehung:

$$d_{Be} = \frac{d_{B2} + d_{B3}}{2} \quad (7.3)$$

Als letztes wird dann noch die Elastizität der Dichtung ermittelt. Hierzu ist aber die effektiv verpresste Dichtungsbreite  $b_{Ge}$  erforderlich. Es wird nämlich unterstellt, dass die Dichtung aufgrund der Flanschblattneigung nicht über die gesamte Breite verpresst wird, was der theoretischen Dichtungsbreite  $b_{Gt}$  entsprechen würde, vgl. Bild 7.2. Dies hat Auswirkungen auf die resultierende effektive Flächenpressung und auch auf die wirkenden Hebelarme. Da die effektive Dichtungsbreite  $b_{Ge}$  zudem von der bei der Montage aufgebrauchten Dichtungskraft  $F_{G0}$  abhängig ist, kann sie nur iterativ ermittelt werden. In der Formel zur Berechnung der effektiven Breite wird der Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$  und die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  der Dichtung verwendet. Da der Ersatzelastizitätsmodul aber die Entlastung und nicht die Belastung der Dichtung charakterisiert, bei welcher sich die effektiv verpresste Dichtungsbreite einstellt, scheint dieser Ansatz technisch nicht richtig zu sein. Auch die Berücksichtigung der maximal zulässigen Flächenpressung  $Q_{Smax}$  ist fragwürdig, da die Standfestigkeit der Dichtung diesbezüglich wenig aussagekräftig ist.

Es muss bei der Bestimmung der effektiven Dichtungsbreite vielmehr das Verformungsverhalten der Dichtung betrachtet werden, denn dieses nichtlineare Verformungsverhalten in Verbindung mit der auftretenden Flanschblattneigung ruft eine unterschiedliche Flächenpressungsverteilung in radialer Richtung in der Dichtung hervor, wie dies später in Kapitel 7.3 gezeigt wird. Bei der Berechnung des axialen Elastizitätsmoduls der Dichtung  $X_G$  muss schließlich neben der theoretischen ( $b_{Gt}$ ) und der effektiven Breite der Dichtung ( $b_{Ge}$ ), der theoretischen Dichtungsfläche  $A_{Gt}$  auch die Dichtungshöhe im verspannten Zustand  $e_{G0}$  berücksichtigt werden:

$$X_G = \frac{e_{G0}}{A_{Gt}} \cdot \frac{\left( b_{Gt} + \frac{e_{G0}}{2} \right)}{\left( b_{Ge} + \frac{e_{G0}}{2} \right)} \quad (7.4)$$

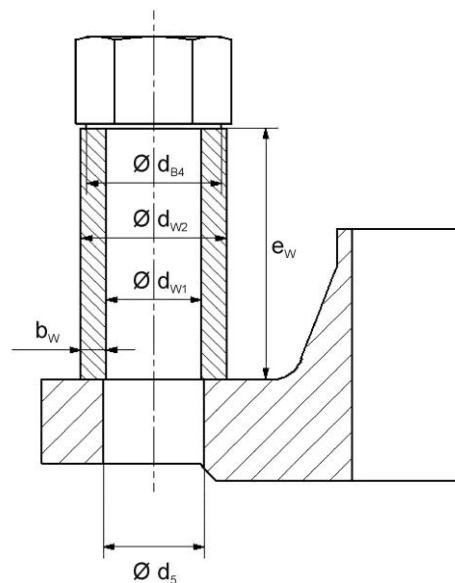
Unterlegscheiben (oder auch Dehnhülsen) werden hinsichtlich ihrer Elastizität in der Berechnung nach EN 1591-1 bisher nicht berücksichtigt. Lediglich in Bezug auf die axiale Temperaturdehnung gegenüber dem Montagezustand wird die Höhe der Bauteile zu den Flanschblattdicken addiert. Für diese Bauteile soll im folgenden Kapitel die Elastizität definiert und diese in den Berechnungsalgorithmus integriert werden.

## 7.2 Dehnhülsen

Um die Elastizität einer Flanschverbindung zu erhöhen, werden häufig Dehnhülsen unter den Muttern eingesetzt. Dadurch wird die Klemmlänge der Schrauben vergrößert, was letztendlich zu einer höheren Elastizität der Verbindung führt. Dies kann insbesondere bei hohen unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der Einzelteile einer Flanschverbindung oder bei einem Setzen der Dichtung von Vorteil sein. Die Berücksichtigung von Dehnhülsen erfolgte bisher noch in keinem Regelwerk, deshalb sollen hier die Grundlagen zusammengestellt werden.

Für Dehnhülsen mit einem Innendurchmesser  $d_{W1}$ , einem Außendurchmesser  $d_{W2}$  und einer Höhe  $e_W$ , vgl. **Bild 7.3**, kann der axiale Elastizitätsmodul  $X_W$  in Abhängigkeit der Schraubenanzahl  $n_B$  folgendermaßen ermittelt werden:

$$X_W = \frac{4 \cdot e_W}{n_B \cdot \pi \cdot (d_{W2}^2 - d_{W1}^2)} \quad (7.5)$$



**Bild 7.3:** Verwendung von Dehnhülsen

In dieser Formel wird davon ausgegangen, dass sowohl die Dehnhülse auf dem Flansch als auch die Mutter vollflächig auf der Dehnhülse aufliegt. Ist dies nicht der Fall, wird die axiale Elastizität etwas größer, was aber im Weiteren vernachlässigt werden soll.

Dieser axiale Elastizitätsmodul der Dehnhülse  $X_W$  muss im weiteren Rechengang für jeden Belastungszustand I bei der Bestimmung der axialen Nachgiebigkeit der verschraubten Flanschverbindung  $Y_{GI}$  unter Einwirkung der Dichtungskraft  $F_G$ ,  $Y_{QI}$  unter Einwirkung der Innendruckkraft  $F_Q$  und  $Y_{RI}$  unter Einwirkung der äußeren Kräfte  $F_R$  als zusätzlicher Term berücksichtigt werden. Wird gleichzeitig noch der Term  $Y_{XI}$  eingeführt, in welchem alle Terme zusammengefasst werden, die bei der Berechnung aller Nachgiebigkeiten  $Y_{GI}$ ,  $Y_{QI}$  und  $Y_{RI}$  eingehen, ergeben sich die folgenden Formeln:

$$Y_{XI} = \frac{X_B}{E_{BI}} + \frac{Z_L \cdot h_L^2}{E_{LI}} + \frac{\tilde{Z}_L \cdot \tilde{h}_L^2}{\tilde{E}_{LI}} + \frac{X_W}{E_{WI}} + \frac{\tilde{X}_W}{\tilde{E}_{WI}} \quad (7.6)$$

$$Y_{GI} = \frac{Z_F \cdot h_G^2}{E_{FI}} + \frac{\tilde{Z}_F \cdot \tilde{h}_G^2}{\tilde{E}_{FI}} + Y_{XI} + \frac{X_G}{E_{GI}} \quad (7.7)$$

$$Y_{QI} = \frac{Z_F \cdot h_G \cdot (h_H - h_P + h_Q)}{E_{FI}} + \frac{\tilde{Z}_F \cdot \tilde{h}_G \cdot (\tilde{h}_H - \tilde{h}_P + \tilde{h}_Q)}{\tilde{E}_{FI}} + Y_{XI} \quad (7.8)$$

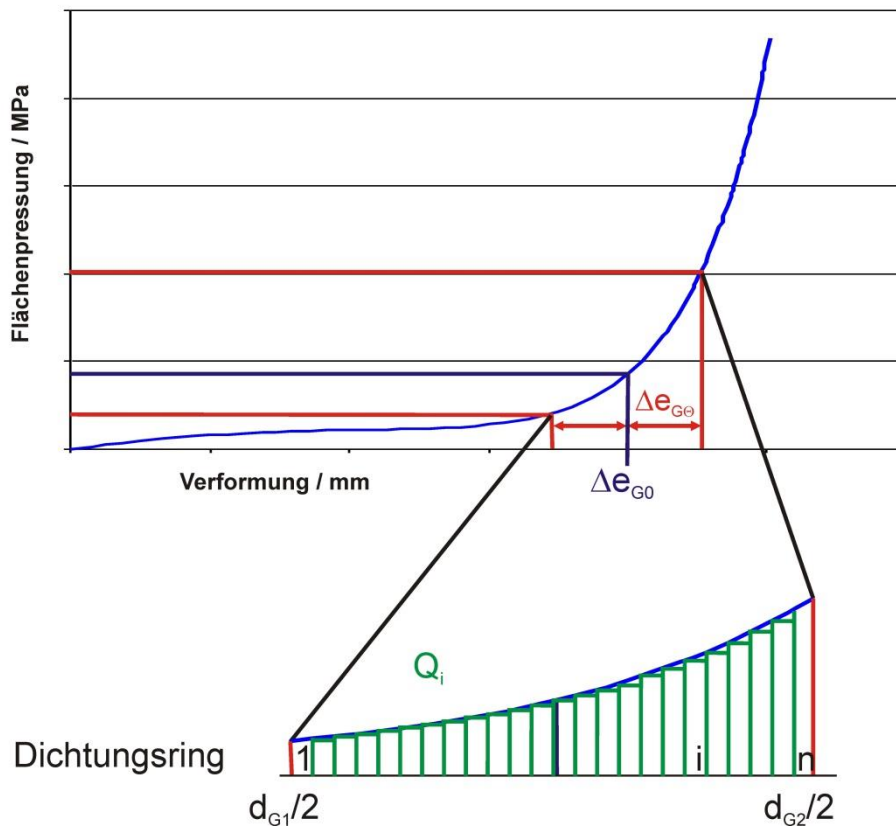
$$Y_{RI} = \frac{Z_F \cdot h_G \cdot (h_H + h_R)}{E_{FI}} + \frac{\tilde{Z}_F \cdot \tilde{h}_G \cdot (\tilde{h}_H + \tilde{h}_R)}{\tilde{E}_{FI}} + Y_{XI} \quad (7.9)$$

Wie aus diesen Formeln hervorgeht, gehen in die Berechnung der Nachgiebigkeiten die Elastizitätsmodule der Flansch-, Schrauben-, Dichtungs- und Unterlegwerkstoffe ( $E_F$ ,  $E_B$ ,  $E_G$ ,  $E_W$ ), verschiedene Hebelarme ( $h_G$ ,  $h_H$ ,  $h_L$ ,  $h_P$ ,  $h_Q$ ,  $h_R$ ) und die Elastizitäten ( $Z_F$ ,  $X_B$ ,  $X_G$ ,  $X_W$ ) ein. Der Index I kennzeichnet den Belastungszustand I, und die Terme des (zweiten) Gegenflansches sind mit einem Tilde ( $\sim$ ) markiert.

### 7.3 Effektive Breite der Dichtung

Durch die bei der Montage hervorgerufene Schiefstellung der Flansche wird die Dichtung nicht über ihre gesamte Breite gleichmäßig verpresst, vgl. **Bild 7.4**. Diesem Effekt wird in EN 1591-1 mit der effektiv wirksamen Dichtungsweite Rechnung getragen. Diese effektive Breite  $b_{Ge}$  der Dichtung muss iterativ ermittelt werden, da die verschiedenen Größen Flanschblattneigung  $\Theta_F$ , Hebelarm  $h_G$  und effektive Breite  $b_{Ge}$  gegenseitig voneinander abhängen. Zunächst muss daher für eine (geringe) Dichtungskraft  $F_{G0}$  die Verformung der Dichtung  $\Delta e_G$  und über die theoretische Breite  $b_{Gt}$  der Dichtung der Hebelarm  $h_G$  und somit die Flanschblattneigung  $\Theta_F$  berechnet werden.





**Bild 7.6: Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsweite (schematisch)**

Die erläuterten Effekte, die beim Aufbringen der Einbauschraubenkraft durch die Flanschblattrotation hervorgerufen werden, sollen im Weiteren formelmäßig beschrieben werden. Die Flanschblattneigung  $\Theta_F$  resultiert aus der Dichtungskraft  $F_{G0}$  und des zugehörigen Hebelarmes  $h_G$ , welche ein Moment am Flansch bewirken, das zur Drehung des Flansches führt:

$$\Theta_F = \frac{Z_F}{E_F} \cdot F_{G0} \cdot h_G \quad (7.10)$$

Für den Gegenflansch ergibt sich dieselbe Gleichung mit den zugehörigen Elastizitätsmodulen. Auf äußere Zusatzkräfte im Einbauzustand soll hier der Einfachheit halber verzichtet werden, ansonsten ergibt sich noch ein zusätzlicher Term mit dieser Zusatzkraft  $F_{R0}$  und den zugehörigen Hebelarmen. In Bild 7.4 ist die Flanschblattneigung und die daraus resultierende ungleichförmige Verformung der Dichtung über ihrer Breite grafisch dargestellt.

Die Verformung der Dichtung im Einbauzustand setzt sich aus der Summe der konstanten Verformung über die gesamte Dichtungsbreite  $\Delta e_{G0}$  und den aus den Flanschblattneigungen resultierenden Verformungen beider Flansche ( $\Delta e_{G\Theta i}$ ) in jedem Dichtungsabschnitt  $i$  zusammen, vgl. Bild 7.5:

$$\Delta e_{Gi} = \Delta e_{G0} + \Delta e_{G\Theta i} + \Delta e_{G\tilde{\Theta} i} \quad (7.11)$$

Die in jedem Dichtungsring  $i$  durch die Flanschblattneigung resultierende Verformung kann über einfache geometrische Beziehungen aus der theoretischen Dichtungsbreite  $b_{Gt}$ , den Flanschblattneigungen  $\Theta_F$  und der Gesamtanzahl der Dichtungsringe  $n$  berechnet werden. Somit ergibt sich aus Gl. (7.11):

$$\Delta e_{Gi} = \Delta e_{G0} + \left( \frac{i}{n} - 0.5 \right) \cdot b_{Gt} \cdot (\sin \Theta_F + \sin \tilde{\Theta}_F) \quad (7.12)$$

An Hand der Regressionsfunktion der Stauchkurve der Dichtung wird dann für jeden Dichtungsring die aus der Dichtungsverformung resultierende Flächenpressung bestimmt, vgl. Bild 7.6. Mit Hilfe der Gleichung (6.6) aus Kapitel 6.1 wird die Flächenpressung  $Q_i$  für Dichtungsring  $i$  berechnet.

$$Q_i(\Delta e_{Gi}) = \frac{A_1 \cdot \Delta e_{Gi} + A_2 \cdot \Delta e_{Gi}^2 + A_3 \cdot \Delta e_{Gi}^3}{1 + B_1 \cdot \Delta e_{Gi} + B_2 \cdot \Delta e_{Gi}^2} \quad (7.13)$$

Über diese Flächenpressungen  $Q_i$  an den Abschnittsgrenzen und die Fläche jedes Abschnittes, der über den Dichtungsinnendurchmesser  $d_{G1}$ , die theoretischen Dichtungsbreite  $b_{Gt}$  und die Gesamtanzahl der Dichtungsring  $n$  bestimmt werden kann, berechnet sich die mittlere Kraft  $F_{Gi}$ , die dann aufsummiert über die gesamte Dichtungsbreite die Dichtungskraft  $F_{G0}$  ergeben muss:

$$F_{Gi} = \frac{(Q_{i-1} + Q_i)}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left( \left( d_{G1} + 2 \cdot \frac{i}{n} \cdot b_{Gt} \right)^2 - \left( d_{G1} + 2 \cdot \frac{i-1}{n} \cdot b_{Gt} \right)^2 \right) \quad (7.14)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{Gi} \equiv F_{G0} \quad (7.15)$$

Bei der Bestimmung der Flächenpressungs- bzw. Dichtungskräfteverteilung muss die konstante Verformung der Dichtung  $\Delta e_{G0}$  in Gl. (7.12) so lange erhöht werden, bis die Gleichgewichtsbedingung in Gl. (7.15) erfüllt ist.

Im nächsten Schritt wird dann die neutrale Faser der Momente aus Dichtungskraft und Hebelarm ermittelt. Hierzu werden die Momente in den einzelnen Dichtungsringen aufsummiert und der Dichtungsring bestimmt, in welchem 50% des wirkenden Momentes erreicht ist. Der Durchmesser an dieser Stelle wird für die Neuberechnung des Hebelarmes  $h_G$  verwendet. Durch die Korrektur des Hebelarmes ändert sich aber auch die Flanschblattneigung und die Kraftverteilung muss neu berechnet werden.

Sind diese Größen mit einer hinreichenden Genauigkeit ermittelt, wird in der neutralen Faser des wirkenden Momentes der effektive Dichtungsdurchmesser  $d_{Ge}$  definiert. Daraus kann schließlich unter der Annahme, dass der Außendurchmesser der effektiven Dichtungsgeometrie identisch mit dem theoretischen Außendurchmesser der Dichtung  $d_{G2}$  ist, die effektive Dichtungsbreite  $b_{Ge}$  und die effektive Fläche der Dichtung  $A_{Ge}$  berechnet werden:

$$b_{Ge} = d_{G2} - d_{Ge} \quad (7.16)$$

$$A_{Ge} = \pi \cdot d_{Ge} \cdot b_{Ge} \quad (7.17)$$

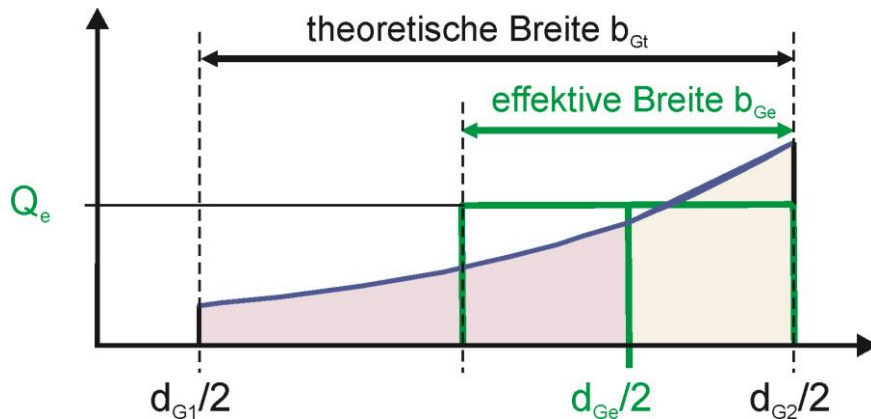
Die effektive Dichtungsflächenpressung  $Q_e$  ergibt sich aus der aufgebrachten Dichtungskraft  $F_{G0}$  und der effektiven Dichtungsfläche  $A_{Ge}$  und wird über die gesamte verpresste Dichtungsbreite als konstant angesetzt:

$$Q_e = \frac{F_{G0}}{A_{Ge}} \quad (7.18)$$

In **Bild 7.7** sind die Zusammenhänge zwischen der neutralen Faser des wirkenden Momentes, dem effektiven Dichtungsdurchmesser  $d_{Ge}$ , der effektiven Dichtungsbreite  $b_{Ge}$  und der effektiven Flächenpressung  $Q_e$  nochmals grafisch erläutert.

Mit dieser in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Vorgehensweise wird nun erstmalig das reale Verformungsverhalten der Dichtung und die daraus resultierende Flächenpressungsverteilung über die Breite der Dichtung bei der Bestimmung einer effektiv verpressten Dichtungsgeometrie berücksichtigt. Wie in Bild 7.7 aber auch zu erkennen ist, bedeutet eine im Vergleich zur theoretischen Breite kleinere effektiv verpresste Dichtungsbreite nicht zwangsläufig, dass es auf der Innenseite der Dichtung zu einem kompletten Abheben der Flanschdichtflächen von der Dichtung



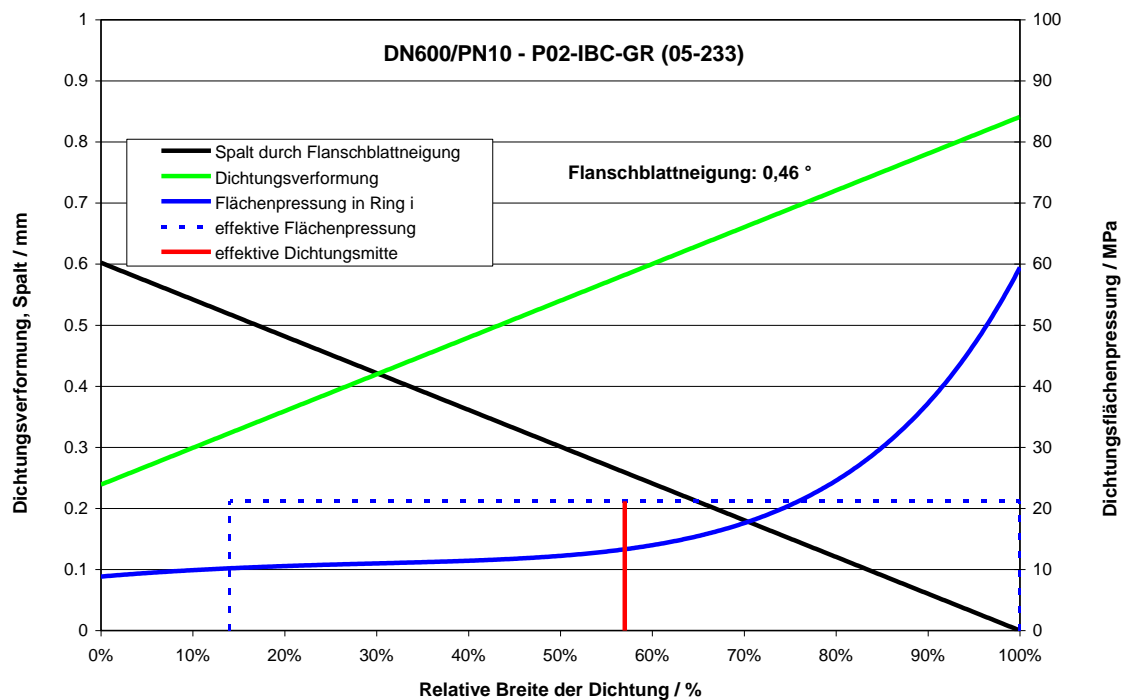


**Bild 7.7: Effektive Breite der Dichtung**

kommen muss. Dies ist aus zahlreichen FE-Analysen bekannt und stand bisher immer im Widerspruch zu der Interpretation der effektiven Breite nach EN 1591-1.

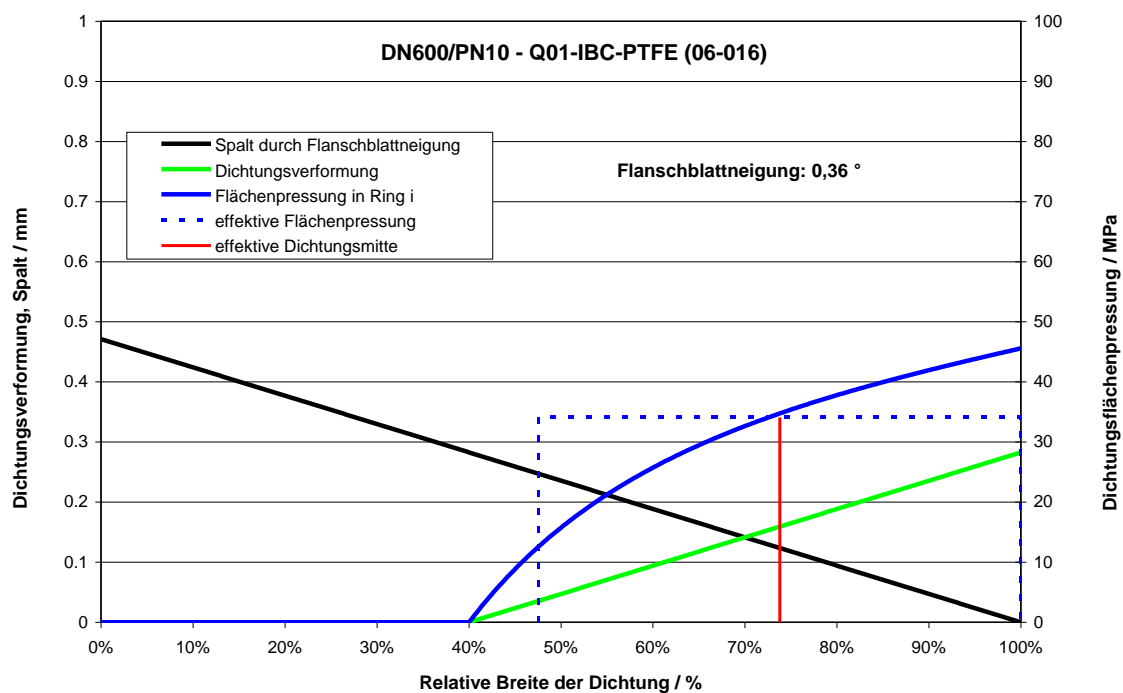
Beispielhaft soll die Bestimmung der Verformung der Dichtung im Montagezustand und der effektiven Dichtungsbreite für eine Flanschverbindung DN600/PN10 nach EN 1092-1 mit einer Grafitflachdichtung mit einer Verformungskurve entsprechend Bild 6.4 erläutert werden. Die Dichtungsverformung, die Flächenpressungsverteilung über die Breite der Dichtung sowie die resultierende effektive Geometrie der Dichtung sind in **Bild 7.8** zu sehen. Auf der Innenseite beträgt die Flächenpressung 9 MPa und steigt zum Außendurchmesser hin bis auf 60 MPa an. Die neutrale Faser des wirkenden Momentes liegt bei ca. 57% der theoretischen Dichtungsbreite. Somit ist die effektive Breite um ca. 14% kleiner als die theoretische Dichtungsbreite. Ein Abheben der Flanschdichtflächen von der Dichtung auf der Flanschinnenseite tritt allerdings nicht auf.

Da ein Abheben der Flansche auf der Dichtungsinnenseite im Allgemeinen äußerst selten vorkommt, muss der Begriff der effektiven Breite, wie er in der EN 1591-1 verwendet wird, neu definiert werden. Es handelt sich also nicht um den Teil der Dichtung, der effektiv verpresst wird, also mit den Dichtflächen in Kontakt steht, sondern durch die, im Vergleich zur theoretischen Breite reduzierte, effektive Breite wird vielmehr das Verformungsverhalten der Flansche bei der Annahme einer konstanten Flächenpressung über die gesamte Dichtungsbreite realitätsnah wiedergegeben.



**Bild 7.8: Effektive Geometrie DN600/PN10 - Grafitflachdichtung**

Dass es aber auch Ausnahmen gibt, belegt die Berechnung für dieselbe Flanschgeometrie für eine Flachdichtung aus multidirektionalem PTFE mit Bariumsulfatfüllung, siehe **Bild 7.9**. Bei dieser Dichtung kommt es aufgrund der



**Bild 7.9: Effektive Geometrie DN600/PN10 – Flachdichtung aus PTFE**

Charakteristik der Verformungskurve bei der Neigung der Flanschblätter zu einem vollständigen Abheben auf der Flanschinnenseite. Die Dichtung ist auf ca. 40% ihrer Breite nicht verpresst. Die effektive Breite ist in diesem Fall deutlich reduziert, auch die neutrale Faser der wirkenden Momente liegt mit einem Durchmesser von 665.4 mm bei ca. 74% der Dichtungsbreite. Dadurch wird auch der wirkende Hebelarm reduziert und die resultierende Flanschblattneigung ist etwas geringer als beim Einsatz der Grafitdichtung.

Wie diese Beispiele zeigen, haben die Verformungseigenschaften der Dichtungen einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtverhalten einer Flanschverbindung. Die Bestimmung der effektiven Dichtungsgeometrien für weitere Dichtungsmaterialien und auch unterschiedliche Nennweiten und Nenndrücke ist im Anhang in **Tabelle B.1** bzw. grafisch in **Bild B.1 bis Bild B.13** dargestellt. Eine Übertragung von Berechnungsergebnissen auf andere Dichtungsmaterialien ohne eine Neuberechnung mit den zugehörigen Verformungseigenschaften der Dichtungen ist daher nur bedingt möglich.

#### 7.4 Kräfte und Momente

Die in einer Berechnung von Flanschverbindungen nach EN 1591-1 betrachteten Belastungszustände werden alle mit einem Index  $I$  gekennzeichnet. Der Lastfall  $I = 0$  ist definitionsgemäß der Montagezustand, alle Folgezustände (Prüfzustand, Betriebszustände, Störfälle, usw.) werden durch einen Index  $I \geq 1$  nummeriert.

Während im Montagezustand lediglich äußere Kräfte und Momente neben der Schraubkraft wirken können, wird in den Folgezuständen durch den Mediendruck  $P_1$  eine zusätzliche Innendruckkraft  $F_{QI}$  hervorgerufen, siehe auch **Bild 7.10**. Die Angriffsfläche des Innendrucks  $P_1$  wird wie in anderen Berechnungsverfahren auch, siehe z. B. DIN 2505, bis zum mittleren (theoretischen) Dichtungsdurchmesser  $d_{Gt}$  definiert, also nicht nur bis zum Innendurchmesser der Dichtung. Somit ergibt sich folgende Innendruckkraft:

$$F_{QI} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{Gt}^2 \cdot P_1 \quad (7.19)$$

In DIN E 2505 wurde diese Kraft noch unterteilt in eine Innendruckkraft (bis zum Innendurchmesser des Flansches  $d_0$ ) und in eine Ringflächenkraft (vom Innendurchmesser des Flansches  $d_0$  bis zum mittleren Dichtungsdurchmesser  $d_{Gt}$ ),



Biegemoment  $M_{AI}$ :

$$M_{AI} = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2} \quad (7.22)$$

Torsionsmoment  $M_{TI}$ :

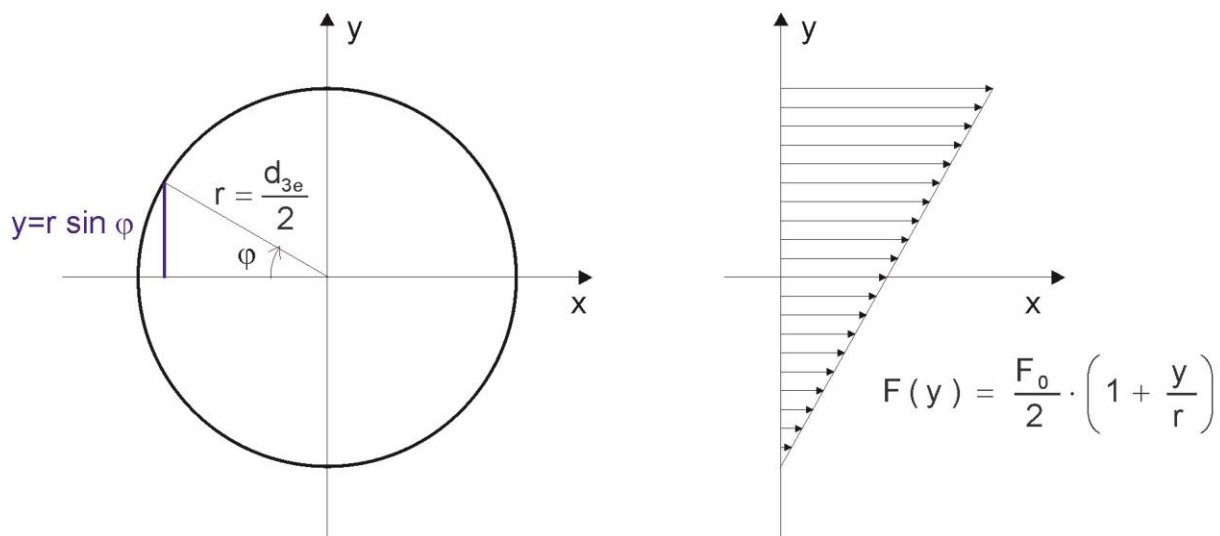
$$M_{TI} = M_Z \quad (7.23)$$

Zunächst werden diese vier äußeren Kräfte und Momente getrennt voneinander betrachtet. Zur Übertragung der Axialkraft  $F_{AI}$  muss die Schraubenkraft  $F_{BI}$  um diesen Betrag erhöht werden, damit die Dichtung durch die Zusatzkraft nicht unzulässig entlastet wird. Der Schraubenkraftanteil  $F_{BI,FA}$  zum Übertragen der Axialkraft beträgt demnach:

$$F_{BI,FA} = F_{AI} \quad (7.24)$$

Das Biegemoment muss ebenfalls direkt übertragen werden. Der hierzu erforderliche Schraubenkraftanteil  $F_{BI,MA}$  muss mindestens so groß sein, dass auf der Druckseite des wirkenden Momentes die Schraubenkraft gerade auf null abgesunken ist. Die Schraubenkraft wird als Linienkraft über dem effektiven Lochkreisumfang  $d_{3e}$  dargestellt, welcher in Gl. (8.3) neu definiert wird. Durch die Biegebeanspruchung erhält man unter Voraussetzung der Bernoulli-Hypothese eine lineare Kraftverteilung, vgl. **Bild 7.11**.

Die erforderliche Schraubenkraft  $F_{BI,MA}$  zum Übertragen des Biegemomentes  $M_{AI}$



**Bild 7.11:** Linienkraft  $F(y)$  über dem effektiven Lochkreisdurchmesser  $d_{3e}$

ergibt sich zu:

$$F_{\text{BI,MA}} = \int_0^{2\pi} \frac{F_0}{2} \cdot \left(1 + \frac{y}{r}\right) \cdot r \cdot d\varphi \quad (7.25)$$

Mit  $y = r \cdot \sin\varphi$  ergibt sich hieraus:

$$F_{\text{BI,MA}} = \int_0^{2\pi} \frac{F_0}{2} \cdot (1 + \sin\varphi) \cdot r \cdot d\varphi \quad (7.26)$$

Löst man das Integral auf, erhält man für die erforderliche Schraubenkraft  $F_{\text{BI,MA}}$  folgende Beziehung:

$$F_{\text{BI,MA}} = \frac{F_0}{2} \cdot r \cdot [\varphi - \cos\varphi]_0^{2\pi} = F_0 \cdot r \cdot \pi \quad (7.27)$$

Entsprechend lässt sich das Biegemoment  $M_{\text{AI}}$  bestimmen:

$$M_{\text{AI}} = \int_0^{2\pi} \frac{F_0}{2} \cdot (1 + \sin\varphi) \cdot r \cdot \sin\varphi \cdot r \cdot d\varphi \quad (7.28)$$

$$M_{\text{AI}} = \int_0^{2\pi} \frac{F_0}{2} \cdot (\sin\varphi + \sin^2\varphi) \cdot r^2 \cdot d\varphi \quad (7.29)$$

$$M_{\text{AI}} = \frac{F_0}{2} \cdot r^2 \cdot \left[ -\cos\varphi + \frac{1}{2}(\varphi - \sin\varphi \cdot \cos\varphi) \right]_0^{2\pi} = \frac{1}{2} \cdot F_0 \cdot r^2 \cdot \pi \quad (7.30)$$

Aus Gl. (7.27) und Gl. (7.30) und mit der Beziehung  $d_{3e} = 2 \cdot r$  ergibt sich letztendlich für die erforderliche Schraubenkraft  $F_{\text{BI,MA}}$  zum Übertragen des Biegemomentes  $M_{\text{AI}}$ :

$$F_{\text{BI,MA}} = \frac{4 \cdot M_{\text{AI}}}{d_{3e}} \quad (7.31)$$

Dieser direkten Kraftübertragung steht die Übertragung durch Reibung gegenüber. Auf diese Art werden Querkraft und Torsionsmoment abgetragen. Mit Hilfe des Reibungskoeffizienten  $\mu_G$ , wie er in Kapitel 6.5 definiert wurde, kann der zur Übertragung erforderliche axial wirkende Schraubenkraftanteil  $F_{\text{BI,FL}}$  bestimmt werden:

$$F_{\text{BI,FL}} = \frac{F_{\text{LI}}}{\mu_{\text{G}}} \quad (7.32)$$

Ähnlich verhält es sich mit dem Torsionsmoment  $M_{\text{TI}}$ , welches ebenfalls durch Reibung übertragen werden muss. Hierzu wird die erforderliche Schraubenkraft  $F_{\text{BI,MT}}$  als gleichmäßig über den Umfang der Dichtung  $d_{\text{Gt}}$  wirkende Linienkraft aufgeprägt. Durch die Integration über den Umfang erhält man somit das wirkende Torsionsmoment:

$$M_{\text{TI}} = \int_0^{2\pi} \mu_{\text{G}} \cdot \frac{F_{\text{BI,MT}}}{\pi \cdot d_{\text{Gt}}} \cdot \frac{d_{\text{Gt}}}{2} \cdot r \cdot d\varphi \quad (7.33)$$

Die Auflösung des Integrals und mit Radius  $r$  entsprechend dem halben theoretischen Dichtungsdurchmesser  $d_{\text{Gt}}$  ergibt sich für das wirkende Torsionsmoment  $M_{\text{TI}}$  und - umgestellt - für die erforderliche Schraubenkraft  $F_{\text{BI,MT}}$  zur Übertragung dieses Torsionsmomentes:

$$M_{\text{TI}} = \mu_{\text{G}} \cdot F_{\text{BI,MT}} \cdot \frac{d_{\text{Gt}}}{2} \quad (7.34)$$

$$F_{\text{BI,MT}} = \frac{2 \cdot M_{\text{TI}}}{\mu_{\text{G}} \cdot d_{\text{Gt}}} \quad (7.35)$$

Werden jetzt alle erforderlichen Schraubenkräfte  $F_{\text{BI,FA}}$ ,  $F_{\text{BI,MA}}$ ,  $F_{\text{BI,FL}}$ ,  $F_{\text{BI,MT}}$  zur Übertragung der einzelnen äußeren Kräfte und Momente sowie die Innendruckkraft  $F_{\text{QI}}$  und die Mindestdichtungskraft  $F_{\text{G}l\text{min}(L)}$  zur Einhaltung der Dichtheitsklasse  $L$  aufsummiert, ergibt sich folgende Schraubenkraft in jedem Betriebszustand:

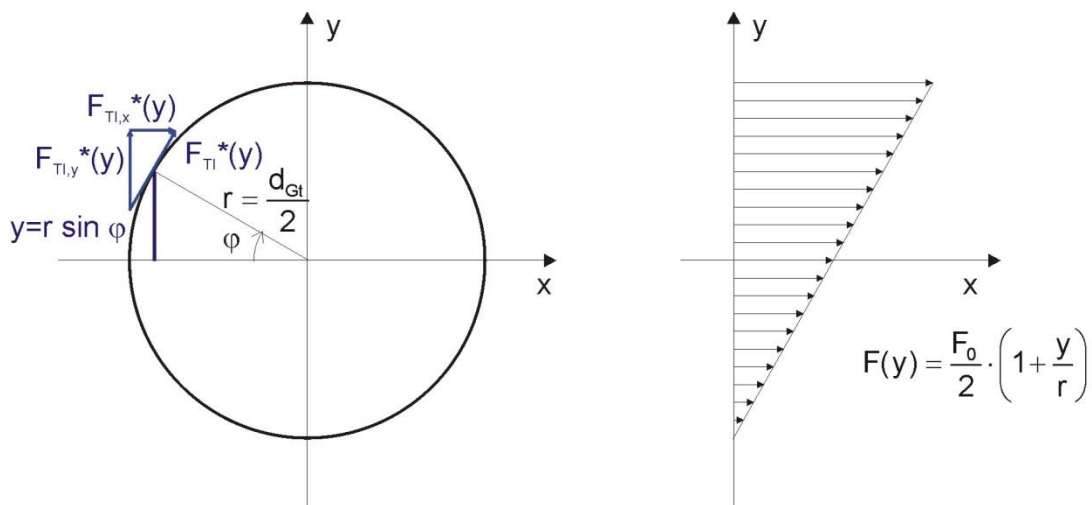
$$F_{\text{BI}} = F_{\text{QI}} + F_{\text{G}l\text{min}(L)} + F_{\text{AI}} + \frac{4 \cdot M_{\text{AI}}}{d_{3e}} + \frac{F_{\text{LI}}}{\mu_{\text{G}}} + \frac{2 \cdot M_{\text{TI}}}{\mu_{\text{G}} \cdot d_{\text{Gt}}} \quad (7.36)$$

Diese Betrachtung ist jedoch sehr konservativ, da zur Übertragung der Querkraft und des Torsionsmomentes an der Dichtung auch die Mindestdichtungskraft und die aus dem Biegemoment resultierende Axialkraft einen Beitrag leisten. Ist z. B. die Mindestdichtungskraft  $F_{\text{G}l\text{min}(L)}$  größer als die Anteile der Querkraft und des Torsionsmomentes, dann reicht diese bereits aus, um die Querkraft und das Torsionsmoment abzutragen. Andererseits ist keine zusätzliche Mindestdichtungskraft erforderlich, wenn die Anteile zum Abtragen der Querkraft und des Torsionsmomentes schon größer als diese sind. Dies bedeutet, dass in

Gl. (7.36) nicht alle drei Terme anzusetzen sind, sondern nur das Maximum von Mindestdichtungskraft und der Summe der Anteile der Querkraft und des Torsionsmomentes:

$$F_{BI} = F_{QI} + F_{AI} + \frac{4 \cdot M_{AI}}{d_{3e}} + \max\left(F_{G\text{Imin(L)}}, \frac{F_{LI}}{\mu_G} + \frac{2 \cdot M_{TI}}{\mu_G \cdot d_{Gt}}\right) \quad (7.37)$$

Die zur Übertragung des Biegemomentes  $M_{AI}$  erforderliche Schraubenkraft  $F_{BI,MA}$  kann natürlich auch zur Übertragung der Querkraft  $F_{LI}$  und des Torsionsmomentes  $M_{TI}$  ausgenutzt werden, so dass die erforderlichen Schraubenkräfte  $F_{BI,FL}$  bzw.  $F_{BI,MT}$  reduziert werden können. Hierzu wird angenommen, dass zunächst nur das Biegemoment wirkt und dadurch eine dreieckförmige Kraftverteilung in der Dichtung entsteht. Somit kann das durch Reibung abtragbare maximale Torsionsmoment  $M_{TI}^*$  berechnet werden. Damit sich die Flanschkhälften dabei aber nicht voneinander wegrehen, was zu einem Versatz der Flanschachsen zueinander führen würde, muss gleichzeitig mit einer Querkraft  $F_{LI}^*$  abgestützt werden. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhaltes dient **Bild 7.12**.



**Bild 7.12:** Bestimmung des maximal übertragbaren Torsionsmomentes

Wird die Kraft in der Dichtung wieder als Linienkraft angesetzt ergibt sich für das Biegemoment  $M_{AI}$  analog zu Gl. (7.28) bis Gl. (7.30):

$$M_{AI} = \frac{1}{2} \cdot F_0 \cdot r^2 \cdot \pi \quad (7.38)$$



Die durch die Reibwirkung hervorgerufene tangentielle Linienkraft  $F_{Tl}^*(y)$ , welche aufintegriert das abtragbare Torsionsmoment  $M_{Tl}^*$  ergibt, ist mit  $y = r \cdot \sin\varphi$  durch die folgende Beziehung definiert:

$$F_{Tl}^*(y) = \mu_G \cdot \frac{F_0}{2} \cdot (1 + \sin\varphi) \quad (7.39)$$

Diese Linienkraft kann nun in eine Komponente  $F_{Tl,x}^*(y)$  und in eine Komponente  $F_{Tl,y}^*(y)$  zerlegt werden. Die y-Komponenten heben sich paarweise auf, die x-Komponenten müssen durch eine äußere Querkraft  $F_{Ll}^*$  aufgefangen werden. Somit folgen für das übertragbare Torsionsmoment  $M_{Tl}^*$  bzw. die erforderliche Querkraft  $F_{Ll}^*$ :

$$M_{Tl}^* = \int_0^{2\pi} r \cdot \mu_G \cdot \frac{F_0}{2} \cdot (1 + \sin\varphi) \cdot r \cdot d\varphi \quad (7.40)$$

$$M_{Tl}^* = \mu_G \cdot F_0 \cdot r^2 \cdot \pi = 2 \cdot \mu_G \cdot M_{Al} \quad (7.41)$$

$$F_{Ll}^* = \int_0^{2\pi} \mu_G \cdot \frac{F_0}{2} \cdot (1 + \sin\varphi) \cdot \sin\varphi \cdot r \cdot d\varphi \quad (7.42)$$

$$F_{Ll}^* = \frac{1}{2} \cdot \mu_G \cdot F_0 \cdot r \cdot \pi = \frac{2 \cdot \mu_G \cdot M_{Al}}{d_{Gt}} \quad (7.43)$$

Das Torsionsmoment  $M_{Tl}$  kann nun um das Torsionsmoment  $M_{Tl}^*$  reduziert werden, während die Querkraft  $F_{Ll}$  um die Querkraft  $F_{Ll}^*$  erhöht werden muss.

Somit ergibt sich aus Gl. (7.37):

$$F_{Bl} = F_{Ql} + F_{Al} + \frac{4 \cdot M_{Al}}{d_{3e}} + \max\left(F_{G\min(L)}, \frac{F_{Ll} + F_{Ll}^*}{\mu_G} + \frac{2 \cdot (M_{Tl} - M_{Tl}^*)}{\mu_G \cdot d_{Gt}}\right) \quad (7.44)$$

Mit den Gl. (7.41) und (7.43) folgt für die Schraubenkraft  $F_{Bl}$ :

$$F_{Bl} = F_{Ql} + F_{Al} + \frac{4 \cdot M_{Al}}{d_{3e}} + \max\left(F_{G\min(L)}, \frac{F_{Ll}}{\mu_G} + \frac{2 \cdot M_{Tl}}{\mu_G \cdot d_{Gt}} - \frac{2 \cdot M_{Al}}{d_{Gt}}\right) \quad (7.45)$$

Diese Schraubenkraft muss mindestens in den Folgezuständen  $I \geq 1$  wirken, um

- die Mindestflächenpressung  $Q_{S\min(L)I}$  einzuhalten,

- die axiale Zusatzkraft  $F_{AI}$  zu übertragen,
- das Biegemoment  $M_{AI}$  zu übertragen,
- die Querkraft  $F_{LI}$  abzutragen und
- das Torsionsmoment  $M_{TI}$  abzutragen.

Die erforderliche Dichtungskraft  $F_{G\min}$  ergibt sich letztendlich durch die folgenden 3 Bedingungen:

- Vermeidung von Undichtigkeiten, d. h. die Einhaltung einer geforderten Dichtheitsklasse  $L$ ,
- Vermeidung des Verlusts des Kontaktes zwischen Flanschen und Schrauben bei zusätzlicher axialer Stauchung der Verbindung oder negativem Mediendruck (Unterdruck) und
- Vermeidung des Verlusts des Kontaktes zwischen der Dichtung und den Flanschdichtflächen aufgrund von Querbelastungen.

Die erforderliche Dichtungskraft  $F_{G\min}$  berechnet sich demnach zu:

$$F_{G\min} = \max \left\{ A_{Ge} \cdot Q_{S\min(L)}; - (F_{QI} + F_{RI}); \frac{F_{LI}}{\mu_G} + \frac{2 \cdot M_{TI}}{\mu_G \cdot d_{Gt}} - \frac{2 \cdot M_{AI}}{d_{Gt}} \right\} \quad (7.46)$$

## 7.5 Kriech-/Relaxationsverhalten der Dichtung

Das Kriech-/Relaxationsverhalten von Dichtungen unter Betriebsbedingungen wird bisher in der Berechnung durch den Kriech-/Relaxationsfaktor  $P_{QR}$  berücksichtigt, der in Abhängigkeit von der Ausgangsflächenpressung, der Steifigkeit der Verbindung und der Temperatur ermittelt werden musste. Durch die in Kapitel 6.3 eingeführte Definition für den Setzbetrag der Dichtung kann nun aber für jeden Belastungszustand das Setzen der Dichtung für die Nachgiebigkeit der eingesetzten Dichtung und für jede Ausgangsflächenpressung berechnet werden. Lediglich für Temperaturen, für die keine einhüllenden Setzkurven zur Verfügung stehen, muss zwischen benachbarten Temperaturstufen interpoliert werden.

Das Kriech-/Relaxationsverhalten der Dichtung wird als zusätzlicher Term bei der Betrachtung des Verspannungszustandes zwischen Montage- und Folgezustand angesetzt. Im Montagezustand 0 wird eine Verformung durch die Dichtungskraft  $F_{G0}$  und die äußere Zusatzkraft  $F_{R0}$  hervorgerufen, im Folgezustand I können zusätzlich die Innendruckkraft  $F_{QI}$ , die Wärmedehnungsunterschiede  $\Delta U_I$  und das Setzverhalten

der Dichtung  $\Delta e_{GCI}$  für die Verformung verantwortlich sein. Mit den zugehörigen Nachgiebigkeiten  $Y_{G0}$ ,  $Y_{R0}$ ,  $Y_{GI}$ ,  $Y_{QI}$  und  $Y_{RI}$ , die in Kapitel 7.2 definiert wurden, lässt sich somit folgende Gleichgewichtsbedingung aufstellen:

$$F_{G0} \cdot Y_{G0} + F_{R0} \cdot Y_{R0} = F_{GI} \cdot Y_{GI} + F_{QI} \cdot Y_{QI} + F_{RI} \cdot Y_{RI} + \Delta U_I + \Delta e_{GCI} \quad (7.47)$$

Über diese Beziehung kann nun von einer vorgegebenen Dichtungskraft im Einbauzustand  $F_{G0}$  die in den Folgezuständen unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeiten, der unterschiedlichen Wärmeausdehnungen und des Setzverhaltens der Dichtung resultierende Dichtungskraft  $F_{GI}$  und somit die zur Beurteilung des Abdichtverhaltens benötigte Dichtungsflächenpressung berechnet werden. Andererseits kann natürlich auch die erforderliche Einbauschraubenkraft  $F_{G0}$  berechnet werden, wenn die erforderliche Mindestflächenpressung im Betriebszustand  $Q_{Smin(L)}$ , die unterschiedliche Wärmeausdehnung  $\Delta U_I$  und das Setzverhalten der Dichtung  $\Delta e_{GCI}$  als Vorgaben angesetzt werden.

Das Setzen der Dichtung  $\Delta e_{GCI}$  muss entsprechend Gl. (6.14) in Abhängigkeit von der Ausgangsflächenpressung, der verbleibenden Restflächenpressung, der Nachgiebigkeit  $Y_G$  und der Dichtungsfläche ermittelt werden. Wie bereits in Kapitel 6.3 beschrieben, kann dies nur iterativ erfolgen, da sich die verschiedenen Parameter gegenseitig beeinflussen.

Zu Gl. (7.47) soll an dieser Stelle noch eine wichtige Anmerkung erfolgen, deren man sich bei der Durchführung von Berechnungen von Flanschverbindungen nach EN 1591-1 immer bewusst sein muss. Es wird immer ausgehend von jedem einzelnen Folgezustand auf den Einbauzustand zurückgerechnet, welche Montagekraft erforderlich ist, um im Folgezustand eine ausreichend hohe Flächenpressung zu haben. Eine Korrelation zwischen den Folgezuständen, also eine zeitliche Abfolge der Belastungszustände wird jedoch nicht betrachtet. Dies bedeutet in Bezug auf das Setzverhalten der Dichtung, dass eine in einem früheren Belastungszustand aufgetretene bleibende plastische Verformung nicht in zeitlich folgenden Belastungszuständen berücksichtigt wird.

Dies wäre letztendlich über obige Beziehung zwar möglich, setzt aber voraus, dass die zeitliche Abfolge der Belastungszustände bekannt ist. Damit könnte für jeden Belastungszustand I der Setzbetrag des aktuellen Zustandes mit dem aus den bisherigen Belastungszuständen verglichen und falls erforderlich erhöht werden:

$$\Delta e_{GCI} = \max(\Delta e_{GCI-1}; \Delta e_{GCI}) \quad (7.48)$$

Die Ermittlung des in Gl. (7.47) benutzten Terms  $\Delta U_I$  für die unterschiedlichen axialen Wärmeausdehnungen der Bauteile gegenüber dem Montagezustand muss wegen der zusätzlich berücksichtigten Dehnhülsen bzw. Unterlegscheiben auch angepasst werden:

$$\begin{aligned} \Delta U_I = & l_B \cdot \alpha_{BI} \cdot (T_{BI} - T_{B0}) - e_W \cdot \alpha_{WI} \cdot (T_{WI} - T_{W0}) - \tilde{e}_W \cdot \tilde{\alpha}_{WI} \cdot (\tilde{T}_{WI} - \tilde{T}_{W0}) \\ & - e_{G0} \cdot \alpha_{GI} \cdot (T_{GI} - T_{G0}) - e_{FI} \cdot \alpha_{FI} \cdot (T_{FI} - T_{F0}) - e_L \cdot \alpha_{LI} \cdot (T_{LI} - T_{L0}) \\ & - \tilde{e}_{FI} \cdot \tilde{\alpha}_{FI} \cdot (\tilde{T}_{FI} - \tilde{T}_{F0}) - \tilde{e}_L \cdot \tilde{\alpha}_{LI} \cdot (\tilde{T}_{LI} - \tilde{T}_{L0}) \end{aligned} \quad (7.49)$$

Neben den Bauteilhöhen ( $l_B$ ,  $e_W$ ,  $e_G$ ,  $e_F$ ,  $e_L$ ) und der Temperaturdifferenz zwischen den beiden betrachteten Belastungszuständen ( $T_I - T_0$ ) sind hierbei noch die Wärmeausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Bauteilwerkstoffe ( $\alpha_B$ ,  $\alpha_W$ ,  $\alpha_G$ ,  $\alpha_F$ ,  $\alpha_L$ ) von Bedeutung. Durch Kriech-/Relaxationseffekte sowie durch die unterschiedliche Flanschblattneigung in den Belastungszuständen können sich die axial wirkenden Bauteilhöhen zwar ändern, der Einfachheit halber wird aber bei der Berechnung der Wärmedehnungsunterschiede immer von gleichbleibenden Bauteilhöhen ausgegangen:

$$l_B = e_{FI} + \tilde{e}_{FI} + e_L + \tilde{e}_L + e_{G0} + e_W + \tilde{e}_W \quad (7.50)$$

## 7.6 Dichtheitsnachweis

Der Dichtheitsnachweis einer Flanschverbindung kann ausschließlich über die Beurteilung der in jedem Belastungszustand vorhandenen Dichtungsflächenpressung erfolgen. Diese Flächenpressung muss mit der Mindestflächenpressung zur Einhaltung der geforderten Dichtheitsklasse L verglichen werden. Es ist somit nur ein qualitativer Vergleich und ein Indiz dafür, dass die Dichtheitsklasse eingehalten werden kann. Eine detaillierte Berechnung der zu erwartenden Leckagerate in quantitativem Sinn ist hingegen mit dem Verfahren der EN 1591-1 nicht möglich.

Während in der ursprünglichen Fassung dieser Norm für die bei der Montage erforderliche Flächenpressung die Mindestflächenpressung im Montagezustand  $Q_{\min(L)}$  angesetzt wurde, erfolgte im Amendment A1 die Anpassung auf die Ausgangsflächenpressung  $Q_A$ , weil die Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{S\min(L)}$  von dieser zuvor aufgebrauchten Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  abhängt, vgl. Kapitel 4.6.1. Die Mindestflächenpressung im Montagezustand  $Q_{\min(L)}$  stellt lediglich die kleinste zulässige Einbaufächenpressung  $Q_A$  dar. In diesem Fall darf die

Dichtung im Betriebszustand nicht entlastet werden, da ansonsten die Dichtheitsklasse L sofort wieder verlassen wird. Daher ist die Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  gleich groß wie die Mindestflächenpressung im Montagezustand  $Q_{min(L)}$ . Dieses Abdichtverhalten gilt für alle Dichtungstypen und wurde bereits ausführlich in Kapitel 6.4 beschrieben; grafisch sind die Zusammenhänge in Bild 6.14 illustriert.

Für die im Montagezustand minimal erforderliche Dichtungskraft  $F_{G0min(L)}$  zum Einhalten der Dichtheitsklasse L ergibt sich daher unter Berücksichtigung der nach Kapitel 7.3 (Gl. (7.17)) ermittelten effektiven Dichtungsfläche  $A_{Ge}$ :

$$F_{G0min(L)} = A_{Ge} \cdot Q_A \quad (7.51)$$

Für die erforderlichen Dichtungskräfte in den Folgezuständen ist Gl. (7.46) maßgebend. Mit Hilfe dieser Formel wird für jeden Belastungszustand separat die erforderliche Dichtungskraft  $F_{Glmin(L)}$  bestimmt. Ausgehend von Gl. (7.47) kann dann für jede Dichtungskraft in einem der Folgezustände die zugehörige Dichtungskraft im Einbauzustand berechnet und die maximal erforderliche Einbaudichtungskraft  $F_{G\Delta}$  bestimmt werden:

$$F_{G\Delta} = \max_{I>0} \left( \frac{F_{Glmin(L)} \cdot Y_{GI} + F_{QI} \cdot Y_{QI} + F_{RI} \cdot Y_{RI} - F_{R0} \cdot Y_{R0} + \Delta U_I + \Delta e_{GCI}}{Y_{G0}} \right) \quad (7.52)$$

Die maximal erforderliche Dichtungskraft  $F_{G\Delta}$ , die sich aus dieser Bedingung ergibt, muss abschließend mit der Mindestdichtungskraft im Montagezustand  $F_{G0min(L)}$  nach Gl. (7.51) verglichen werden. Die größere dieser beiden Dichtungskräfte ist die erforderliche Dichtungskraft  $F_{G0req}$ , die letztendlich bei der Montage aufgebracht werden muss. Aus dem Kräftegleichgewicht kann dann noch die erforderliche Einbauschraubenkraft  $F_{B0req}$  berechnet werden, mit der gewährleistet ist, dass die geforderte Dichtheitsklasse L in jedem Belastungszustand eingehalten bleibt:

$$F_{G0req} = \max(F_{G0min(L)}; F_{G\Delta}) \quad (7.53)$$

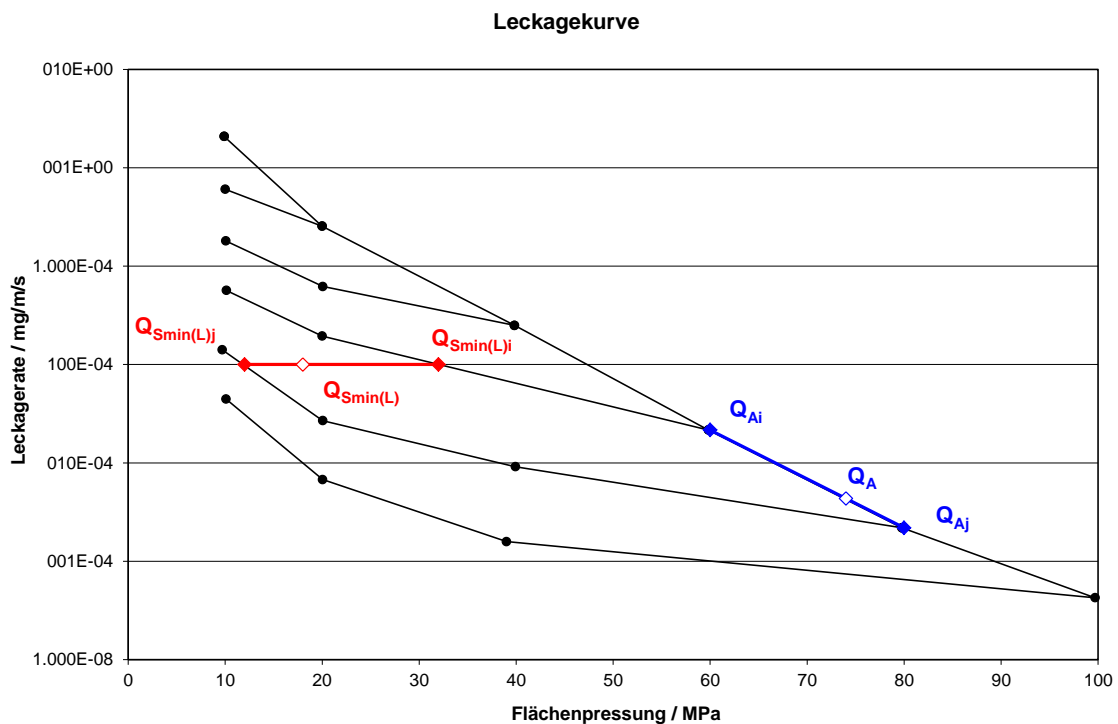
$$F_{B0req} = F_{G0req} + F_{R0} \quad (7.54)$$

Ist in Gl. (7.53) der zweite Term führend, wird bei der Montage eine höhere Einbaufächenpressung oder Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  erzeugt als dies über die Gl. (7.51) zunächst angenommen wurde. Daher müssen alle Dichtungskennwerte, die von der Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  abhängig sind, neu ermittelt werden und

die gesamte Berechnung muss nun noch einmal mit diesen aktualisierten Dichtungskennwerten wiederholt werden.

Da nicht für jede beliebige Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  Dichtungskennwerte verfügbar sind, kann auch näherungsweise zwischen zwei benachbarten Flächenpressungsstufen  $i$  und  $j$  interpoliert werden, wie dies in **Bild 7.13** beispielhaft dargestellt ist. Die Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  kann demnach über folgende Beziehung berechnet werden:

$$Q_{Smin(L)} = Q_{Smin(L)i} + \frac{(Q_{Smin(L)j} - Q_{Smin(L)i}) \cdot (Q_A - Q_{Ai})}{(Q_{Aj} - Q_{Ai})} \quad (7.55)$$



**Bild 7.13: Interpolation von Dichtungskennwerten  $Q_{Smin(L)}$**

In einem weiteren Berechnungsschritt wird dann die Ungenauigkeit beim Aufbringen der berechneten Schraubenkraft berücksichtigt. Hierbei wird zwischen einem systematischen Fehler des gewählten Anziehverfahrens  $K_S$ , dem Streuwert bezogen auf eine einzelne Schraube ( $\varepsilon_{1+}$ ,  $\varepsilon_{1-}$ ) und dem Streuwert der gesamten Belastung aller  $n_B$  Schrauben ( $\varepsilon_+$ ,  $\varepsilon_-$ ) unterschieden, wobei bei der Streuung noch zwischen positivem (+) und negativem (-) Streuwert unterschieden wird. Zwischen diesen Größen besteht folgender Zusammenhang:

$$\varepsilon_+ = K_S + \frac{(\varepsilon_{1+} - K_S)}{\sqrt{n_B}} \quad (7.56)$$

$$\varepsilon_- = K_S + \frac{(\varepsilon_{1-} - K_S)}{\sqrt{n_B}} \quad (7.57)$$

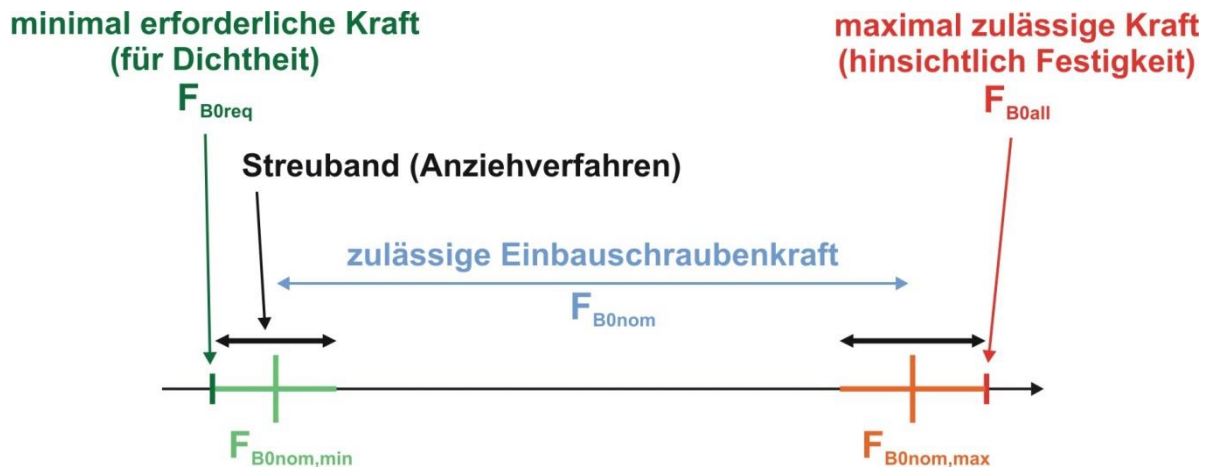
Anhaltswerte für die Streuwerte sind in Anhang C der EN 1591-1 für unterschiedliche Anziehverfahren zu finden.

Die bei der Montage aufzubringende nominelle Schraubenkraft  $F_{B0nom}$ , die zum Einhalten der geforderten Dichtheitsklasse L in allen Belastungszuständen erforderlich ist, muss wegen der zu berücksichtigenden Ungenauigkeit des Anziehverfahrens  $\varepsilon$  größer als die erforderliche Schraubenkraft  $F_{B0req}$  nach Gl. (7.54) sein:

$$F_{B0nom,min} = \frac{F_{B0req}}{1 - \varepsilon_-} \quad (7.58)$$

Wird diese Kraft als Zielwert bei der Montage vorgegeben, wird auch unter der für die Dichtheit ungünstigsten Streuung der Schraubenkraft ( $\varepsilon_-$ ) die aus den Dichtheitsanforderungen resultierende Mindestdichtungskraft  $F_{G0req}$  noch immer erreicht.

Um die Sicherheit hinsichtlich der Begrenzung der Emissionen zu erhöhen, sollte aber eine höhere Einbauschraubenkraft als diese minimal erforderliche nominelle Einbauschraubenkraft  $F_{B0nom,min}$  nach EN 1591-1 gewählt werden. Jede Erhöhung der Schrauben- und somit auch der Dichtungskraft bringt nämlich eine Verbesserung der Abdichteigenschaften der eingesetzten Dichtungen und damit auch der gesamten Flanschverbindung. In jedem Fall ist aber sicherzustellen, dass durch die aufgebrachte Schraubenkraft in keinem Bauteil eine unzulässige hohe Beanspruchung hervorgerufen wird. Die maximal zulässige Einbauschraubenkraft  $F_{B0all}$ , bei der die zulässige Spannung des schwächsten Bauteils erreicht wird, darf unter Berücksichtigung des Streubandes des Anziehverfahrens nie überschritten werden. Es kann auf diese Weise ein Bereich für die zulässige nominelle Einbauschraubenkraft  $F_{B0nom}$  bestimmt werden, der durch die minimal erforderliche Einbauschraubenkraft  $F_{B0nom,min}$  und die maximal zulässige Einbauschraubenkraft  $F_{B0nom,max}$  begrenzt wird, siehe **Bild 7.14**.



**Bild 7.14:** Ermittlung der erforderlichen bzw. zulässigen nominellen Einbauschraubenkraft zur Begrenzung von Emissionen

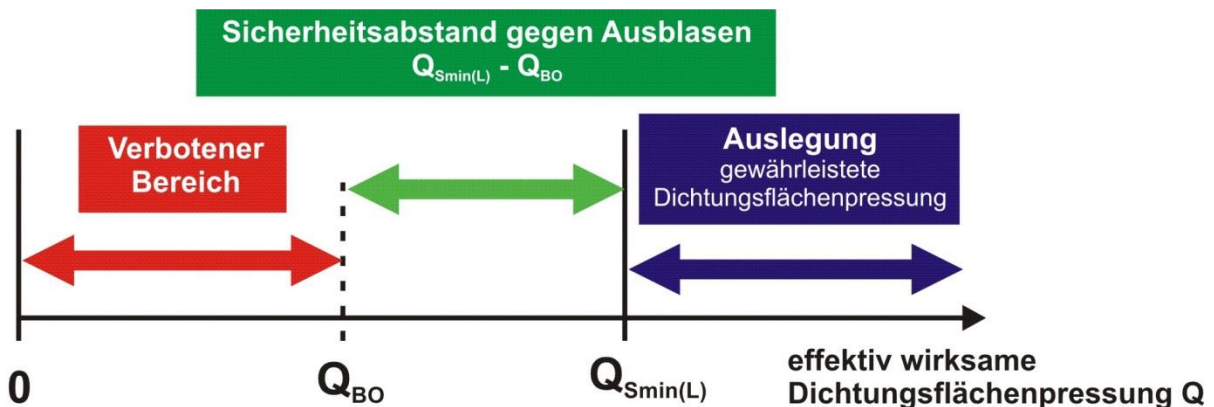
Wird aber eine höhere Einbauschraubenkraft als die nominell erforderliche gewählt, ändert sich dadurch auch die Ausgangsflächenpressung  $Q_A$  im Montagezustand, welche die Dichtungshöhe im Einbauzustand  $e_{G0}$  sowie die Dichtungskennwerte Ersatzelastizitätsmodul  $E_G$ , Mindestflächenpressung im Betriebszustand  $Q_{Smin(L)}$ , Setzbetrag der Dichtung  $\Delta e_{GC}$  und Ausblasflächenpressung  $Q_{BO}$  in den Folgezuständen beeinflusst. Es muss daher immer die gesamte Berechnung von vorne wiederholt werden, um diesen Effekt zu berücksichtigen.

## 7.7 Ausblassicherheit

Im Rahmen des Dichtheitsnachweises wird bei der Auslegung von Flanschverbindungen nachgewiesen, dass die Mindestdichtungsflächenpressung  $Q_{Smin(L)}$  in allen Betriebszuständen für die Dichtheitsklasse L nicht unterschritten wird. Ist jedoch das Ausblasverhalten der verwendeten Dichtung entsprechend den Definitionen in Kapitel 6.6 zu beachten, muss ein modifizierter Dichtheitsnachweis geführt werden, welcher bereits im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens /122/ skizziert ist.

In **Bild 7.15** sind auf der Skala der unter Berücksichtigung des Entlastungseffekts durch den Innendruck und äußere Zusatzlasten effektiv wirksamen Dichtungsflächenpressung  $Q$  die Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  und die Flächenpressung bei Ausblasen  $Q_{BO}$  eingetragen. Der Flächenpressungsbereich unterhalb  $Q_{BO}$  ist nicht zulässig, da Ausblasen zu erwarten ist.





**Bild 7.15: Sicherheit von Flanschverbindungen gegen Ausblasen**

Die Sicherheit gegen Ausblasen spiegelt sich in der Differenz zwischen  $Q_{Smin(L)}$  und  $Q_{BO}$  wider. Wird der Sicherheitsbeiwert gegen Ausblasen  $S_{BO}$  auf 1 gesetzt, wenn  $Q_{BO}$  der Hälfte der Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  entspricht und wie in /122/ vorgeschlagen, dann gilt allgemein für den Sicherheitsbeiwert  $S_{BO}$  gegen Ausblasen:

$$S_{BO} = \frac{Q_{Smin(L)}}{2 \cdot Q_{BO}} \quad (7.59)$$

Aus diesem Zusammenhang wird auch klar, dass die effektiv wirksame Dichtungsflächenpressung das Maximum aus der zweifachen Flächenpressung bei Ausblasen  $Q_{BO}$  und der Mindestflächenpressung im Betrieb  $Q_{Smin(L)}$  betragen muss. Dies kann als zusätzlicher Term in der Berechnung von Flanschverbindungen bei der Ermittlung der minimal erforderlichen Dichtungskraft in den Betriebszuständen  $F_{Gmin}$  berücksichtigt werden. Gl. (7.46) muss dann dementsprechend modifiziert werden:

$$F_{Gmin} = \max \left\{ A_{Ge} \cdot Q_{Smin(L)}; -(F_{Ql} + F_{RI}); \frac{F_{LI}}{\mu_G} + \frac{2 \cdot M_{TI}}{\mu_G \cdot d_{Gt}} - \frac{2 \cdot M_{AI}}{d_{Gt}}; 2 \cdot A_{Ge} \cdot Q_{BO} \right\} \quad (7.60)$$

## 7.8 Festigkeitsnachweis

Die auf die Flanschverbindung wirkenden Belastungen dürfen in keinem Belastungszustand in einem der Bauteile unzulässig hohe Spannungen hervorrufen. Hierzu werden Auslastungsgrade  $\Phi$  für alle Bauteile definiert, die als Maß für die Zulässigkeit der hervorgerufenen Spannungen dienen. Die Auslastungsgrade müssen immer kleiner gleich 1 sein.

Die Bestimmung der zulässigen Spannungen oder der sogenannten Nennberechnungsspannungen ist in EN 1591-1 nicht definiert. Hier wird auf die anzuwendenden komponentenspezifischen Regelwerke, wie z. B. EN 13480 für industrielle Rohrleitungen oder EN 13445 für unbefeuerte Druckbehälter, verwiesen. Dies macht das Berechnungsverfahren der EN 1591-1 universell einsetzbar.

Da die Spannungsabsicherung nicht Thema der vorliegenden Arbeit ist, wird an dieser Stelle lediglich auf die Vorgehensweise in der EN 1591-1 verwiesen. Hierin wird, ähnlich wie beim Dichtheitsnachweis, die Streuung des Anziehverfahrens auch beim Festigkeitsnachweis berücksichtigt. Wird beim Dichtheitsnachweis unterstellt, dass aufgrund der Streuung die tatsächliche Schraubenkraft auch kleiner als die nominelle Einbauschraubenkraft sein kann, wird im Festigkeitsnachweis angenommen, dass die Kraft auch höher sein kann. Die bei der Montage abzusichernde maximale Schraubenkraft  $F_{B0+}$  ist in diesem Fall wegen der zu berücksichtigenden Ungenauigkeit des Anziehverfahrens  $\varepsilon_+$  größer als die aufgebrachte nominelle Schraubenkraft  $F_{B0nom}$ . Zudem werden in den Folgezuständen ganz bewusst Überschreitungen der zulässigen Spannungen toleriert. Begründet wird dies in EN 1591-1 mit dem Umstand, dass es sich um Sekundärspannungen handeln soll, die nur lokale und keine globalen Plastifizierungen hervorrufen.

Ergänzend zu den in EN 1591-1 bereits betrachteten Flanschen, Schrauben und Dichtung sollen hier noch die Formeln zur Überprüfung der Einhaltung der zulässigen Spannungen für Dehnhülsen bzw. Unterlegscheiben eingeführt werden. Für Dehnhülsen wird unterstellt, dass sie vollflächigen Kontakt zum Flanschblatt bzw. zur Auflagefläche der Mutter haben. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung der maximalen Schraubenkraft  $F_{B0max}$  im Einbauzustand 0 bzw. der Schraubenkraft  $F_{BI}$  im Folgezustand I, dem Außen- bzw. Innendurchmesser der Hülsen ( $d_{W2}$ ,  $d_{W1}$ ) und der zulässigen Spannung des Hülsenwerkstoffes ( $f_{W0}$ ,  $f_{WI}$ ) für die dimensionslosen Auslastungsgrade der Dehnhülsen ( $\Phi_{W0}$ ,  $\Phi_{WI}$ ):

$$\Phi_{W0} = \frac{4 \cdot F_{B0max}}{\pi \cdot (d_{W2}^2 - d_{W1}^2) \cdot f_{W0}} \quad (7.61)$$

$$\Phi_{WI} = \frac{4 \cdot F_{BI}}{\pi \cdot (d_{W2}^2 - d_{W1}^2) \cdot f_{WI}} \quad (7.62)$$

## 8 Exemplarische Verifikation mit Finite Elemente Analyse

Zur Verifikation der entwickelten analytischen Berechnungsalgorithmen zur Bestimmung der effektiv verpressten Dichtungsbreite und der Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite, die im vorherigen Kapitel zusammengestellt sind, wurden Vergleichsrechnungen mit der Finite Elemente Methode unter Einsatz der Software ANSYS Workbench Version 13.0, siehe /151/ und /152/, durchgeführt. Zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit der analytischen Rechenmethode werden die Steifigkeit der Flanschverbindungen sowie die Verformungseigenschaften der Dichtungen in der FEM-Analyse gezielt variiert.

Mit der Variation der Nennweite (DN) und der Druckstufe (PN) werden hierbei die unterschiedlichen Steifigkeiten der Flanschverbindungen dargestellt. Folgende Flanschabmessungen werden betrachtet:

- DN125/PN6,
- DN350/PN25 und
- DN600/PN10.

Die Dichtungseigenschaften, und zwar die Verformung und die Rückfederung der Dichtelemente, werden für fünf verschiedene Dichtungstypen abgebildet:

- Flachdichtung aus Graphit (Abkürzung: IBC-GR),
- Flachdichtung aus faserverstärktem Werkstoff (IBC-FA),
- Flachdichtung aus PTFE mit Bariumsulfatfüllung (IBC-PTFE),
- Kammprofilichtung mit Grafitauflage (KP-GR) und
- Spiraldichtung mit Grafitfüllung (SWG-GR).

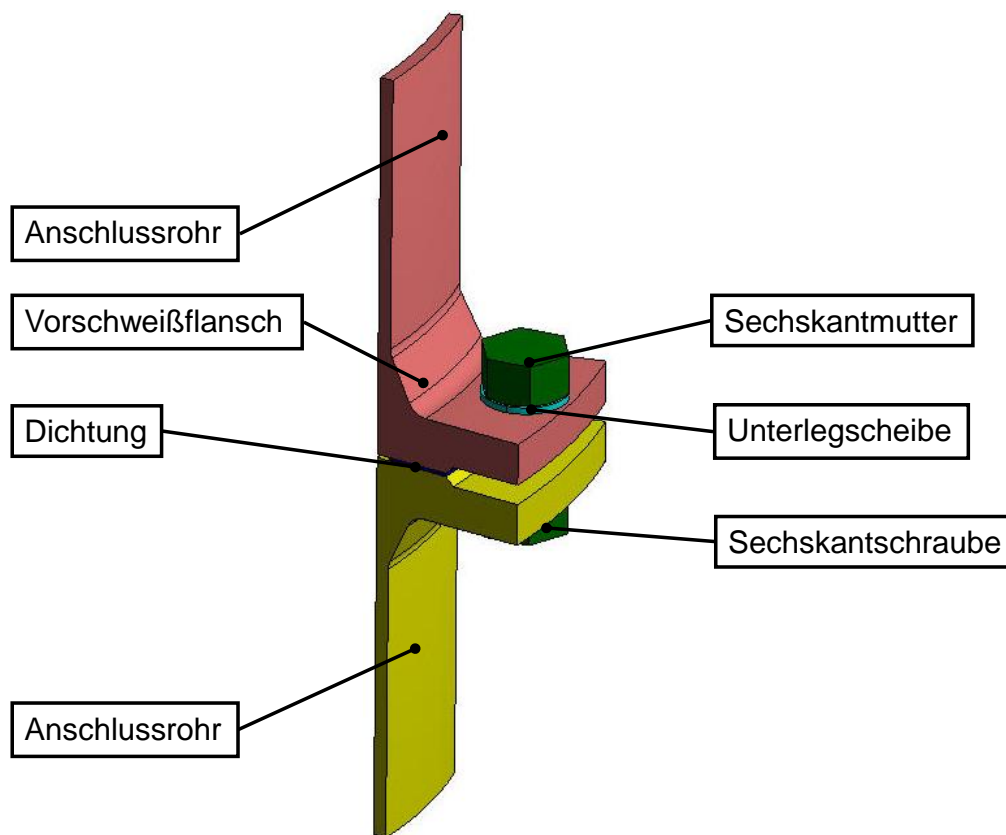
Die Ergebnisse dieser FEM-Berechnungen werden in dieser Arbeit wie folgt analysiert:

- Flanschblattneigung über der Dichtleistenbreite,
- Flanschblattneigung über dem Flanschblatt,
- effektive Dichtungsbreite und
- Flächenpressungsverteilung über der Dichtungsbreite.

Abschließend werden diese FEM-Ergebnisse mit den Berechnungsergebnissen des analytischen Berechnungsverfahrens verglichen und bewertet.

## 8.1 Modellaufbau und Elementierung

Das Finite-Elemente-Modell besteht aus dem Flanschpaar, dem Anschlussrohr, den Starrschrauben mit einem Sechskantkopf, den Sechskantmuttern und den Unterlegscheiben sowie der Dichtung. Infolge der Symmetrieeigenschaften wird das FEM-Modell als Segmentmodell mit nur einer Schraube aufgebaut. Exemplarisch ist in **Bild 8.1** der Aufbau des 1/20-Modells der Flanschverbindung DN600/PN10 zu sehen.



**Bild 8.1:** FEM-Modell DN600/PN10 mit einer Flachdichtung

Alle drei FEM-Modelle der verschiedenen Geometrien DN125/PN6, DN350/PN25 und DN600/PN10 sind identisch aufgebaut. Die Geometrien der Flansche entsprechen denen der Norm EN 1092-1, die Schraubengeometrie entspricht EN ISO 4014, und die Dichtungen wurden nach den Vorgaben der EN 1514-1 (Flachdichtungen), EN 1514-2 (Spiraldichtungen) bzw. EN 1514-6 (Kammprofilabdichtungen) modelliert. Die drei Flachdichtungen weisen eine Dichtungshöhe von 2 mm auf. Die Dichtungshöhe der Kammprofilabdichtung beträgt 5,0 mm, die der Spiraldichtung 4,8 mm.

Da ein wesentliches Ziel die Bestimmung und Bewertung der effektiven Dichtungsbreite bzw. der Dichtungsflächenpressungsverteilung über der Dichtungsbreite ist, wird die Vernetzung im Dichtungsbereich gegenüber dem restlichen Modell sehr fein gewählt. Die Elementierung und die Vernetzung sind in **Bild C.1 und C.2** im Anhang zu sehen.

Das Modell wird hauptsächlich mit strukturmechanischen Hexaederelementen vernetzt. Das 20-knotige Volumenelement SOLID186 besitzt einen quadratischen Verschiebungsansatz. Durch Knotenkondensation besteht die Möglichkeit, das Hexaederelement in ein Tetraederelement umzuwandeln. Die Tetraederelemente werden bei Bedarf durch den Vernetzungsalgorithmus automatisch generiert. Mit SOLID186 werden die beiden Flansche samt Anschlussrohr, Starrschraube, Mutter und Unterlegscheibe modelliert. Für die Dichtung wird das 16-knotige Dichtungselement INTER194 gewählt. Auch bei diesem Element ist der Verschiebungsansatz quadratisch. Mit dem Dichtungselement INTER194 kann das typische Werkstoffverhalten einer Dichtung realitätsnah beschrieben werden.

Für die Kopplung der Bauteile wird der "Oberfläche-zu-Oberfläche"-Kontakt gewählt. Dafür werden die 8-knotigen Kontaktelemente TARGE170 und CONT174 für die jeweilige Kontaktpaarung ausgewählt. Um die Rechenzeit zu reduzieren, werden für das jeweilige Kontaktpaar konsistente Netze erstellt.

Die Einbauschraubenkraft wird im Programm ANSYS mit den PRETS179-Elementen aufgebracht. Um die Veränderbarkeit der Schraubenkraft in den nachfolgenden Lastschritten zu gewährleisten, wird, nachdem die Montageschraubenkraft aufgebracht ist, für die weiteren Lastfälle die Option LOCK gewählt. Damit wird die aufgebrachte Montagekraft in den zugehörigen Verformungsweg umgerechnet, um in den weiteren Lastschritten die Änderung der Schraubenkraft berechnen zu können.

## **8.2 Kopplung der Teilmodelle**

Die Flanschverbindung besteht aus mehreren Bauteilen, die geeignet zu koppeln sind. Nachfolgend werden die einzelnen Koppelbedingungen zwischen Schraube und Flansch, zwischen Mutter und Unterlegscheibe, zwischen Unterlegscheibe und Flansch sowie zwischen Flansch und Dichtung erläutert.

In Vorberechnungen hat sich gezeigt, dass es zwischen dem Schraubenkopf und dem Flansch schon bei einem sehr geringen Reibungskoeffizienten von  $\mu = 0,05$  (Coulomb'sches Reibungsgesetz) zu keiner Relativverschiebung kommt. Auch wird in keinem Lastfall ein lokales Auseinanderklaffen zwischen dem Schraubenkopf und dem Flansch beobachtet. Um die Rechenzeit zu reduzieren wird daher zwischen dem Schraubenkopf und dem Flansch eine feste Koppelbedingung formuliert. Somit ist im Kontaktbereich weder eine Relativverschiebung noch ein Auseinanderklaffen möglich.

Auch zwischen Sechskantmutter und Unterlegscheibe sowie zwischen Unterlegscheibe und Flansch wird analog infolge der nicht vorhandenen Relativbewegung und des Klaffens eine feste Koppelbedingung definiert.

Infolge der Flanschnachgiebigkeit wird eine Schiefstellung des Flanschblattes und demzufolge auch eine ungleichmäßige Dichtungsflächenpressung bis zum lokalen Abheben des Flanschblattes von der Dichtungsoberfläche erwartet. Dies bedeutet, dass im Kontakt nur Druckkräfte übertragen werden dürfen. Auch eine Relativverschiebung und ein lokales Auseinanderklaffen müssen durch die Auswahl der Kontaktformulierung gewährleistet werden. Um diese Effekte simulieren und auswerten zu können, wird zwischen der Dichtung und dem jeweiligen Flanschpaar ein nichtlinearer Kontakt mit einem Reibungskoeffizienten nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz von  $\mu = 0,2$  definiert. Als Kontaktformulierung wird der Normal Lagrange-Ansatz gewählt. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Körperdurchdringung annähernd null beträgt.

### 8.3 Externe kinematische Randbedingungen

Das Modell wird am Ende eines Anschlussrohres starr sowie an den Schnittflächen symmetrisch gelagert, vgl. **Bild C.3** im Anhang. Das bedeutet, parallel zu den jeweiligen Symmetrieebenen kann sich die Flanschverbindung verschieben, jedoch nicht senkrecht zur Symmetrieebene. Somit ist das Modell statisch eindeutig bestimmt und benötigt keine weiteren Randbedingungen.

Über die sogenannte Rohrabklinglänge werden Effekte aus den kinematischen Randbedingungen, hier hauptsächlich durch die Symmetriebedingung am Anschlussrohr, beseitigt und haben keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis für die Berechnung der Flanschverbindung.

## 8.4 Belastungen

Für die Flanschverbindungen werden nur zwei Lastfälle bei Raumtemperatur (20 °C) betrachtet, zum einen der Lastfall Montage (Lastfall 1) und zum anderen der Lastfall Innendruck (Lastfall 2), vgl. **Tabelle 8.1**. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf dem Lastfall Montage, da der analytische Ansatz zur Bestimmung der sich einstellenden Flanschblattneigung und der effektiven Dichtungsbreite entsprechend Kapitel 7.3 im Fokus steht.

**Tabelle 8.1: Lastfälle**

	Lastfall 1 <b>Montage</b>	Lastfall 2 <b>Innendruck</b>
<b>DN125/PN6</b>	50 kN Einzelschraubkraft 400 kN Gesamtschraubkraft	0,6 MPa
<b>DN600/PN10</b>	70 kN Einzelschraubkraft 1400 kN Gesamtschraubkraft	1,0 MPa
<b>DN350/PN25</b>	105 kN Einzelschraubkraft 1680 kN Gesamtschraubkraft	2,5 MPa

Auf die Betrachtung von Temperatureffekten oder von äußeren Kräften und Momenten wird in dieser Arbeit daher bewusst verzichtet.

Im ersten Lastschritt wird die Einbauschraubkraft aufgebracht. Um die Ergebnisse besser vergleichen und bewerten zu können, wird für jede Flanschgeometrie unabhängig vom eingesetzten Dichtungsmaterial eine einheitliche Einbauschraubkraft gewählt. In einem Zwischenschritt wird die Montagekraft, wie in Kapitel 8.1 beschrieben, in einen Verformungsweg umgerechnet. Somit ist eine mögliche Veränderung der Schraubkraft in den folgenden Lastfällen gewährleistet.

Nachdem die Montagevorspannung in einen Verformungsweg umgerechnet ist, wird im Lastfall 2 der Innendruck aufgebracht. Da im Modell das Rohrende nicht verschlossen ist, kann dort kein Innendruck beaufschlagt werden. Daher wird die aus dem Innendruck resultierende Innendruckkraft als axiale Zugkraft am Rohrende aufgebracht. Die anzusetzende Zugkraft lässt sich aus dem wirkenden Innendruck  $p$  und dem Innendurchmesser des Flansches  $d_0$  ermitteln:

$$F_z = P \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \quad (8.1)$$

In **Bild C.4** im Anhang sind die aufgebrachten Lasten im Modell grafisch dargestellt.

## 8.5 Werkstoffe

Die mechanisch-technologischen Werkstoffkennwerte der Flansche, Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben sind in **Tabelle 8.2** zusammengefasst. Als Flanschwerkstoff wurde P245GH (1.0352) angesetzt, für alle anderen Bauteile wurden die Eigenschaften des Werkstoffs 25 CrMo 4+QT (1.7218) verwendet.

**Tabelle 8.2: Werkstoffe**

Bauteil	Werkstoff	RT (20 °C)					300 °C				
		R <sub>p,0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	E MPa	ν -	α 1/K	R <sub>p,0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	E MPa	ν -	α 1/K
Flansch (inklusive Anschlussrohr)	P245GH (1.0352)	220	410	212000	0.30	1,19E-5	145	340	192000	0.30	1,36E-5
Starrschraube und Sechskantmutter	25CrMo4+QT (1.7218)	440	600	212000	0.30	1,15E-5	363	548	192000	0.30	1,32E-5
Unterlegscheibe	25CrMo4+QT (1.7218)	440	600	212000	0.30	1,15E-5	363	548	192000	0.30	1,32E-5

Bei den Flansch- und Schraubenwerkstoffen wird das Materialverhalten eindeutig durch den Elastizitätsmodul E und den Querkontraktionskoeffizienten ν beschrieben. Im Temperaturlastfall wird die thermische Bauteilausdehnung über den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α bestimmt. Die 0,2%-Dehngrenze (R<sub>p0,2</sub>) und die Zugfestigkeit (R<sub>m</sub>) sind lediglich Bewertungsgrößen für die Festigkeit.

Das Materialverhalten der Dichtungen wird mit der Eingabe der jeweiligen Stauchkurve vollständig beschrieben, die entsprechend der in Kapitel 6.2 beschriebenen Vorgehensweise experimentell ermittelt wurden. In der Stauchkurve werden sowohl das Belastungs- als auch das Rückfederverhalten detailliert abgebildet.

Alle Dichtungen weisen ein stark nichtlineares elastoplastisches Materialverhalten auf. Vor allem in der Belastungskurve ist das nichtlineare Verhalten zu sehen, die Verformung der Dichtung ist nicht proportional zur Schraubenkraftzunahme. Der Ersatzelastizitätsmodul, der das Rückfederverhalten der Dichtungen beschreibt, ist abhängig von der Vorspannung. Je höher die Ausgangsflächenpressung ist, desto



geringer ist das Rückfedervermögen, d. h. die Entlastungskurven verlaufen immer steiler, wie dies im Anhang in **Bild C.5 bis Bild C.9** zu sehen ist. Mit Hilfe des Dichtungselementes INTER194 kann dieses elastoplastische Verhalten berücksichtigt werden.

Der Querkontraktionskoeffizient  $\nu$  und der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$  werden für die verschiedenen Dichtungstypen einheitlich mit  $\nu = 0,01$  bzw.  $\alpha = 10,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  angesetzt.

## 8.6 Ergebnisse

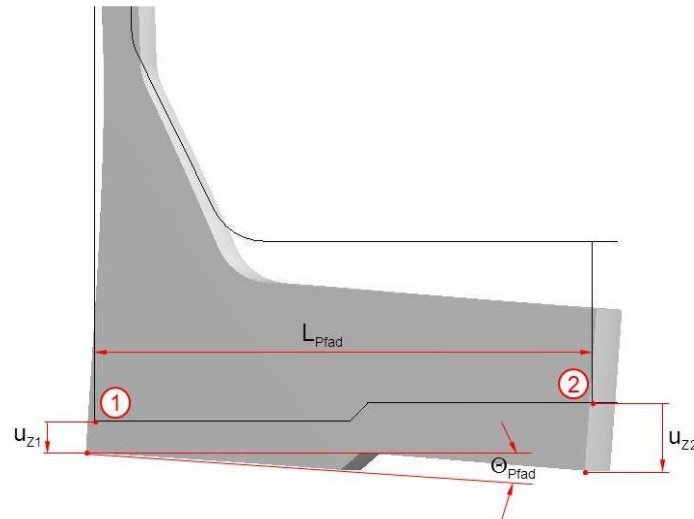
Für die Lastfälle Montage und Innendruck werden die Flanschblattneigung und die Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite in verschiedenen Pfaden für alle drei Nennweiten und für alle fünf verschiedenen Dichtungsmaterialien ausgewertet.

Die Auswertung des Neigungswinkels der Flansche erfolgt in zwei Pfaden, und zwar zum einen nur über die Breite der Dichtleiste und zum anderen über die Breite des gesamten Flanschblattes. Somit kann neben der Neigung des Flanschblattes auch eine Aussage über die Durchbiegung des Flanschblattes selbst gemacht werden. Zusätzlich werden die Pfade in zwei Schnitte gelegt, einmal in den Bereich des Schraubenloches und einmal in den Bereich zwischen den Schrauben, vgl. **Bild C.10** im Anhang. Damit kann auch eine Beurteilung der über den Umfang des Flanschblattes unterschiedlichen Flanschblattneigung erfolgen.

Der Neigungswinkel wird jeweils aus den Vertikalverschiebungen an der Innen- und Außenseite des Pfades (Punkte 1 und 2) und aus der Länge des Pfades ermittelt. In **Bild 8.2** ist der Zusammenhang zwischen der Vertikalverschiebung ( $u_{Z2} - u_{Z1}$ ), der Länge des Auswertepfades ( $L_{\text{Pfad}}$ ) und der Flanschblattneigung ( $\Theta_{\text{Pfad}}$ ) am Beispiel des Pfades über das gesamte Flanschblatt zu sehen. Der Neigungswinkel über den gewählten Pfad wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$\Theta_{\text{Pfad}} = \arcsin\left(\frac{u_{Z2} - u_{Z1}}{L_{\text{Pfad}}}\right) \quad (8.2)$$

Die für die Flanschverbindung DN 600/PN10 mit der Flachdichtung aus Grafit ermittelte Flanschblattneigung bei einer Einbauschraubenkraft von 70 kN pro Schraube beträgt maximal 0,42 °. Diese maximale Flanschblattneigung wird dabei im



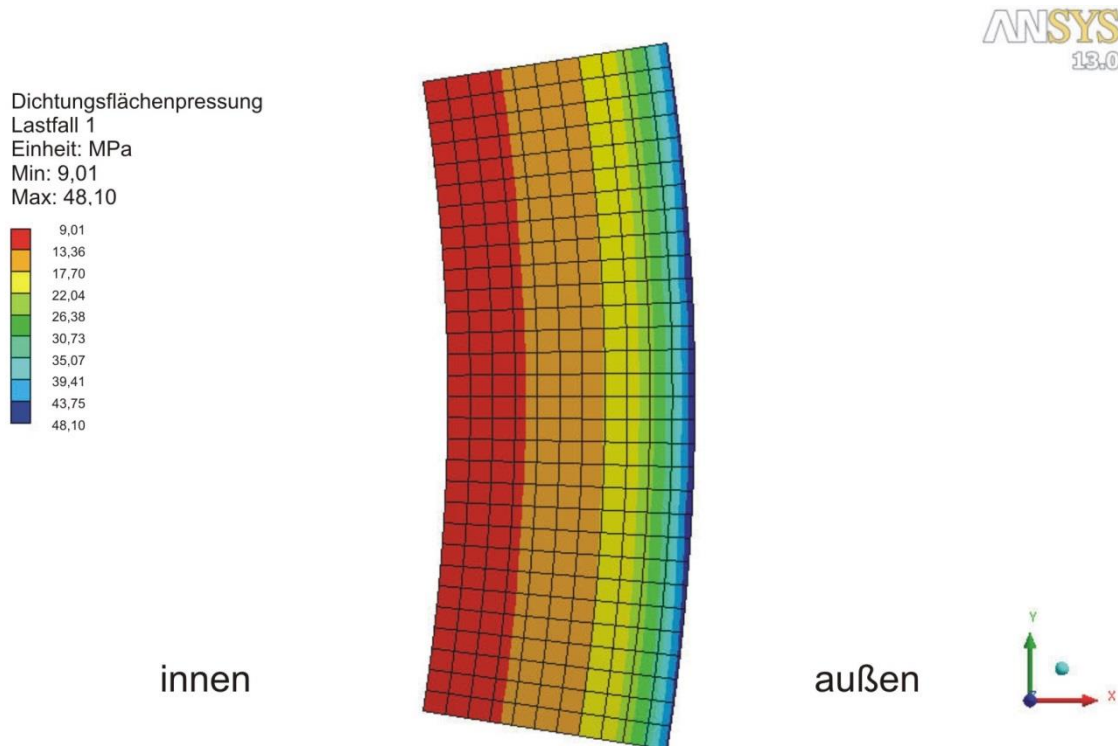
**Bild 8.2: Ermittlung der Flanschblattneigung am Beispiel des Pfades über das gesamte Flanschblatt**

Pfad durch das Schraubenloch über das gesamte Flanschblatt ermittelt. In den anderen Auswertepfaden ist die Flanschblattneigung nur unwesentlich geringer. Die minimale Neigung beträgt hierbei  $0,40^\circ$ , sie wird zwischen den Schraubenlöchern über die Dichtleiste ermittelt.

Die im Einbauzustand resultierende Dichtungsflächenpressungsverteilung bei der vorherrschenden Flanschblattneigung ist in **Bild 8.3** dargestellt. Auf der Innenseite der Dichtung beträgt die Flächenpressung ca. 9 MPa, bis zur Außenseite steigt sie auf ca. 48 MPa an. Die Dichtung ist somit über die gesamte Dichtungsbreite verpresst, der Ansatz einer effektiv verpressten Dichtungsbreite im Sinne der aktuellen EN 1591-1 erscheint daher zunächst nicht gerechtfertigt.

Vergleicht man diese Ergebnisse aus der FEM-Analyse mit der Flanschblattneigung und der Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite aus dem neuen analytischen Berechnungsansatz, vgl. Bild 7.8, so ist für die Nennweite DN600/PN10 mit einer Flachdichtung aus Grafit eine gute Übereinstimmung festzustellen. Die Flanschblattneigung beträgt analytisch  $0,46^\circ$ , die Flächenpressung an der Innenseite ca. 9 MPa und an der Außenseite ca. 59 MPa.

Für die anderen Nennweiten mit der Flachdichtung aus Grafit passen die Ergebnisse zwischen FEM und der analytischen Berechnungsmethode noch besser überein. Und auch für die anderen Dichtungstypen können sehr gute Übereinstimmungen festgestellt werden. Allerdings ist hierfür eine Modifikation des effektiven Lochkreisdurchmessers  $d_{3e}$  erforderlich, von dem aus der Hebelarm  $h_G$  ermittelt wird. Der in der aktuellen Norm verwendete Korrekturfaktor für die Krafteinleitung im



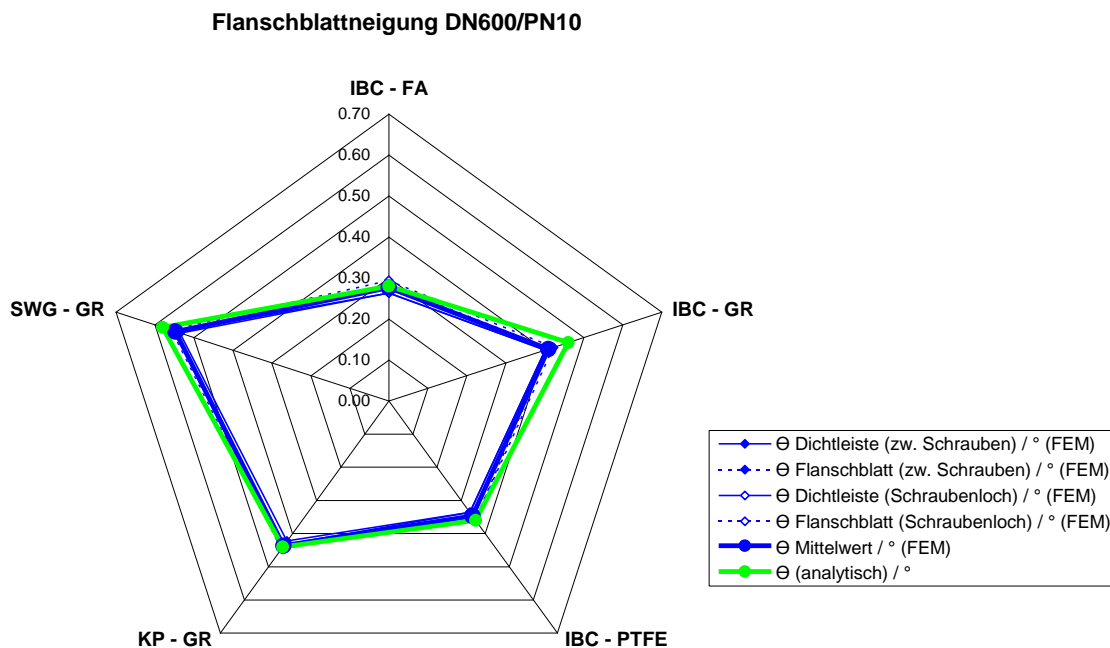
**Bild 8.3:** Dichtungsflächenpressungsverteilung DN600/PN10 Grafitdichtung (Lastfall Montage)

Lochkreis liefert in der analytischen Berechnung stets größere Flanschblattneigungen als die Finite Elemente Berechnung. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie wird der effektive Lochkreisdurchmesser  $d_{3e}$  neu definiert:

$$d_{3e} = d_3 - \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot d_5 \quad (8.3)$$

Diese Formel, in welche der Lochkreisdurchmesser  $d_3$  und der Schraubenlochdurchmesser  $d_5$  eingeht, ist mit weiteren Berechnungen anderer Nennweiten zu überprüfen und ggf. anzupassen. Aus jetziger Sicht erscheint die Formel jedoch das mechanische Verhalten der Flansche gut zu beschreiben.

In **Bild 8.4** sind die Flanschblattneigungen für die Geometrie DN600/PN10 für alle Dichtungstypen abgebildet. Die Unterschiede zwischen dem Mittelwert der in den verschiedenen Pfaden ermittelten und der analytisch bestimmten Flanschblattneigungen liegen im Mittel bei ca. 4%, wobei es sich absolut um maximal  $0,05^\circ$  handelt. Wie aus dem Diagramm ebenfalls zu erkennen ist, sind die mit FEM ermittelten Neigungswinkel in allen Pfaden vergleichbar. Dem entspricht auch die



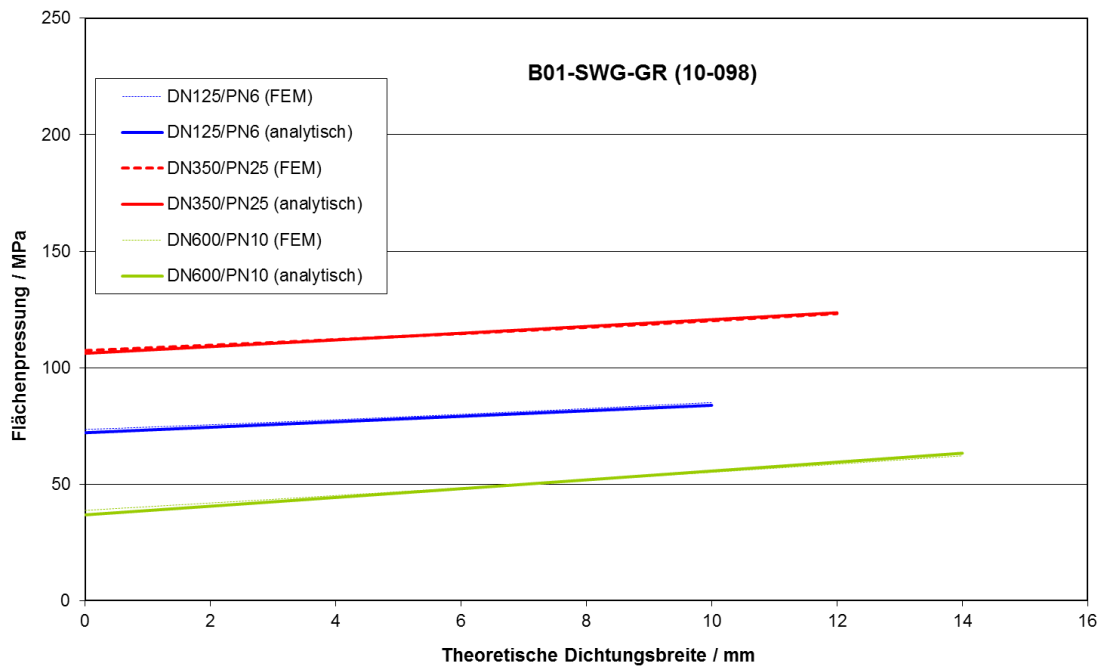
**Bild 8.4:** Flanschblattneigung der Flanschverbindungen DN600/PN10 im Lastfall Montage für die verschiedenen Dichtungstypen

Flächenpressungsverteilung, die in Bild 8.3 dargestellt ist, bei der über den Umfang nur geringe Unterschiede zu erkennen sind.

Der Vergleich der Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite zeigt ebenfalls für alle untersuchten Flanschgeometrien und Dichtungstypen eine sehr gute Übereinstimmung des analytischen Berechnungsverfahrens mit den Ergebnissen der FEM-Analyse. Beispielhaft sind im Diagramm in **Bild 8.5** für die Grafitflachdichtung die Flächenpressungsverteilungen der drei untersuchten Nennweiten zu sehen.

Zur Übersicht sind für den Lastfall Montage in **Tabelle 8.3** die Flanschblattneigungen in den verschiedenen Pfaden über der Dichtleiste und über das gesamte Flanschblatt sowie in **Tabelle 8.4** die Flächenpressungen auf der Innen- bzw. Außenseite der Dichtungen im Pfad im Bereich der Schraubenlöcher und die verpresste Dichtungsbreite sowohl für die analytische Berechnung als auch die FEM-Analyse zusammengefasst.

Daraus wird deutlich, dass auch das Abheben der Flansche von den Flachdichtungen aus Faserwerkstoff und aus PTFE auf der Dichtunginnenseite bei den Flanschverbindungen DN350/PN25 und DN600/PN10 nach beiden Verfahren



**Bild 8.5: Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite der Flachdichtung aus Grafit (IBC-GR) im Lastfall Montage**

nahezu identisch ermittelt wird, vgl. Flächenpressungen auf der Dichtungseinnenseite in Tabelle 8.4. Auch die verpresste Dichtungsbreite und die Höhe der Flächenpressung liegen in derselben Größenordnung.

**Tabelle 8.3: Flanschblattneigung im Lastfall Montage**

DN/PN	Dichtung	Neigungswinkel / °					
		analytisch	Pfad zw. Schrauben		Pfad im Schraubenloch		FEM Mittelwert
			Dichtleiste	Flanschblatt	Dichtleiste	Flanschblatt	
DN125/PN6	IBC - FA	0,28	0,25	0,28	0,26	0,32	0,28
	IBC - GR	0,34	0,29	0,33	0,30	0,36	0,32
	IBC - PTFE	0,37	0,33	0,35	0,35	0,38	0,35
	KP - GR	0,43	0,40	0,42	0,42	0,46	0,43
	SWG - GR	0,35	0,32	0,35	0,34	0,38	0,34
DN350/PN25	IBC - FA	0,20	0,19	0,21	0,18	0,21	0,20
	IBC - GR	0,29	0,26	0,28	0,25	0,28	0,27
	IBC - PTFE	0,29	0,25	0,28	0,25	0,28	0,27
	KP - GR	0,42	0,40	0,41	0,40	0,41	0,41
	SWG - GR	0,41	0,39	0,41	0,39	0,41	0,40
DN600/PN10	IBC - FA	0,28	0,26	0,28	0,26	0,29	0,28
	IBC - GR	0,46	0,40	0,41	0,40	0,42	0,41
	IBC - PTFE	0,36	0,34	0,36	0,34	0,36	0,35
	KP - GR	0,44	0,42	0,44	0,43	0,44	0,44
	SWG - GR	0,58	0,54	0,55	0,55	0,56	0,55

**Tabelle 8.4: Flächenpressungsverteilung im Lastfall Montage**

DN/PN	Dichtung	theoretische Breite / mm	verpresste Breite / mm		Flächenpressung, innen / MPa		Flächenpressung, außen / MPa	
			analytisch	FEM	analytisch	FEM	analytisch	FEM
DN125/PN6	IBC - FA	18,5	18,5	18,2	6,3	0,0	136,5	135,0
	IBC - GR	18,5	18,5	18,5	18,3	20,6	87,2	90,2
	IBC - PTFE	18,5	18,5	18,5	31,3	33,1	51,9	52,6
	KP - GR	10,0	10,0	10,0	36,7	42,1	147,0	148,1
	SWG - GR	10,0	10,0	10,0	72,1	73,5	83,9	85,1
DN350/PN25	IBC - FA	47,0	31,3	30,0	0,0	0,0	153,2	139,0
	IBC - GR	47,0	47,0	47,0	11,0	13,4	91,0	78,8
	IBC - PTFE	47,0	36,9	40,0	0,0	0,0	52,3	50,9
	KP - GR	10,0	10,0	10,0	71,3	81,8	219,5	215,2
	SWG - GR	12,0	12,0	12,0	106,2	107,4	123,6	123,2
DN600/PN10	IBC - FA	37,5	20,7	18,5	0,0	0,0	119,9	124,3
	IBC - GR	37,5	37,5	37,5	8,8	9,0	59,4	47,8
	IBC - PTFE	37,5	22,5	23,5	0,0	0,0	45,6	45,3
	KP - GR	17,0	17,0	17,0	7,5	7,9	110,3	111,9
	SWG - GR	14,0	14,0	14,0	36,9	38,8	63,3	62,2

Die Flanschblattneigungen und die Dichtungsflächenpressungsverteilungen sämtlicher Untersuchungen sind der Vollständigkeit halber im Anhang in **Bild C.11 bis Bild C.16** zusammengestellt.

Im Lastfall Innendruck wird die Flachdichtung aus Graphit der Nennweite DN600/PN10 durch die wirkende Innendruckkraft entlastet. Die Flächenpressung beträgt auf der Innenseite der Dichtung ca. 3 MPa, an der Außenseite nimmt sie auf ca. 42 MPa ab, siehe **Bild 8.6**. Die Dichtung ist somit auch in diesem Lastfall über die gesamte Dichtungsbreite verpresst. Da der Innendruck ein zusätzliches Moment hervorruft, nimmt auch die Flanschblattneigung in diesem Lastfall zu. Die Unterschiede in den einzelnen Schnitten werden aber geringer, die Flanschblattneigung beträgt zwischen 0,42 ° und 0,43 °.

Allgemein gilt für alle Nennweiten und alle Dichtungstypen, dass sich der Neigungswinkel des Flanschblattes und die verpresste Dichtungsbreite im Lastfall Innendruck im Vergleich zum Montagezustand nur selten wesentlich ändern. Die Unterschiede der in den verschiedenen Pfaden ausgewerteten Neigungswinkel wird dabei tendenziell immer geringer, vgl. **Tabelle 8.5**.

Die verpresste Dichtungsbreite wird im Lastfall Innendruck bei den untersuchten Flanschverbindungen, sofern sie sich überhaupt geändert hat, immer kleiner, daher ist es hinsichtlich der Beurteilung der Abdichteigenschaften konservativ, die im Montagezustand ermittelte effektive Dichtungsbreite auch in den Folgezuständen anzusetzen, da sich bei einer größeren Fläche immer eine kleinere

**Tabelle 8.5: Flanschblattneigung im Lastfall Innendruck**

DN/PN	Dichtung	Neigungswinkel / °					
		Mittelwert Montage	Pfad zw. Schrauben		Pfad im Schraubenloch		Mittelwert Innendruck
			Dichtleiste	Flanschblatt	Dichtleiste	Flanschblatt	
DN125/PN6	IBC - FA	0,28	0,25	0,28	0,26	0,31	0,28
	IBC - GR	0,32	0,29	0,32	0,31	0,35	0,32
	IBC - PTFE	0,35	0,32	0,34	0,34	0,37	0,34
	KP - GR	0,43	0,39	0,41	0,41	0,44	0,41
	SWG - GR	0,34	0,32	0,34	0,34	0,37	0,34
DN350/PN25	IBC - FA	0,20	0,22	0,23	0,21	0,24	0,23
	IBC - GR	0,27	0,28	0,30	0,28	0,30	0,29
	IBC - PTFE	0,27	0,27	0,29	0,27	0,29	0,28
	KP - GR	0,41	0,40	0,41	0,40	0,41	0,41
	SWG - GR	0,40	0,40	0,41	0,40	0,41	0,41
DN600/PN10	IBC - FA	0,28	0,31	0,32	0,30	0,32	0,31
	IBC - GR	0,41	0,42	0,43	0,42	0,43	0,43
	IBC - PTFE	0,35	0,35	0,37	0,36	0,37	0,36
	KP - GR	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,45
	SWG - GR	0,55	0,54	0,54	0,55	0,55	0,55

Dichtungsflächenpressung ergibt, die mit der Mindestflächenpressung im Betrieb verglichen werden muss. In **Tabelle 8.6** sind die verpressten Dichtungsbreiten im Lastfall Montage und Innendruck zur Dokumentation der beschriebenen Ergebnisse gegenübergestellt. In dieser Tabelle sind auch die maximalen Flächenpressungen auf der Außenseite und die minimalen Flächenpressungen auf der Innenseite der Dichtung für die Lastfälle Montage und Innendruck zusammengefasst.

**Tabelle 8.6: Verpresste Dichtungsbreite und Flächenpressung an den Dichtungsändern im Vergleich**

DN/PN	Dichtung	verpresste Breite / mm		Flächenpressung, innen / MPa		Flächenpressung, außen / MPa	
		Montage	Innendruck	Montage	Innendruck	Montage	Innendruck
DN125/PN6	IBC - FA	18,20	18,00	0,0	0,0	135,0	135,1
	IBC - GR	18,50	18,50	20,6	19,3	90,2	89,2
	IBC - PTFE	18,50	18,50	33,1	30,6	52,6	52,5
	KP - GR	10,00	10,00	42,1	39,7	148,1	145,8
	SWG - GR	10,00	10,00	73,5	70,2	85,1	83,3
DN350/PN25	IBC - FA	30,00	21,00	0,0	0,0	139,0	141,4
	IBC - GR	47,00	47,00	13,4	6,1	78,8	75,7
	IBC - PTFE	40,00	35,00	0,0	0,0	50,9	51,2
	KP - GR	10,00	10,00	81,8	51,7	215,2	184,4
	SWG - GR	12,00	12,00	107,4	79,0	123,2	101,7
DN600/PN10	IBC - FA	18,50	14,00	0,0	0,0	124,3	124,7
	IBC - GR	37,50	37,50	9,0	2,9	47,8	42,4
	IBC - PTFE	23,50	19,00	0,0	0,0	45,3	44,7
	KP - GR	17,00	17,00	7,9	2,4	111,9	91,4
	SWG - GR	14,00	14,00	38,8	24,4	62,2	48,2





## 9 Schlussfolgerungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden einige Weiterentwicklungen der Prüfeinrichtungen zur Ermittlung von Dichtungskennwerten realisiert, die die Genauigkeit der ermittelten Kennwerte erhöhen und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse steigern. Hierzu wurde u. a. zum einen die Eigenverformung des Prüfstandes bzw. der Prüfplatten minimiert und zum anderen werden diese über die Aufnahme von Nullkurven in Abhängigkeit von der aufgetragenen Kraft und der Prüftemperatur weitestgehend kompensiert.

Auch die konstruktiv geänderte O-Ringabdichtung zur Erzeugung des für die Helium-Massenspektrometrie erforderlichen Vakuums erhöht die Genauigkeit beim Einstellen der Dichtungsflächenpressung. Die Definition von Abbruchkriterien für das Erreichen einer konstanten Leckagerate innerhalb einer Laststufe und die Implementierung in den softwaregesteuerten Prüfprozess anstelle von konstanten zeitlichen Abbruchkriterien liefert angepasste, optimierte Messzeiten. Die Integration eines Flammenionisationsdetektors in die Prüfeinrichtung, mit welchem Leckageströme von Kohlenwasserstoffen erfasst werden können, erlaubt eine Korrelation zwischen mit den Prüfmedien Stickstoff oder Helium aufgenommenen Leckagekurven und den Leckageraten "realer" Medien.

Durch die Integration eines Moduls für die Ermittlung der Leckagerate unter erhöhter Temperatur ist nun die Möglichkeit geschaffen, die Abdichteigenschaften nicht nur bei Raumtemperatur zu ermitteln. Hierbei spielen aber weniger die Mindestflächenpressungen für die Einhaltung einer geforderten Dichtheitsklasse eine Rolle, denn hier ist bekannt, dass die bei Raumtemperatur ermittelten Kennwerte konservativ abdeckend sind, als vielmehr die Ermittlung der Ausblassicherheit von Dichtungen bei einer Entlastung durch betriebliche Belastungen.

Für die Betrachtung der Abtragbarkeit von Scherkräften und Torsionsmomenten über Reibschluss zwischen Flanschdichtflächen und Dichtung ist die Kenntnis von Reibungskoeffizienten erforderlich. Hierfür wurde ein Prüfmodul entwickelt, mit welchem diese Reibungskoeffizienten auf einfache Weise experimentell bestimmt werden können.

Zudem wurden in der Arbeit Auswertalgorithmen für die Charakterisierung der Dichtungseigenschaften hergeleitet und mit Hilfe verschiedener experimenteller Studien belegt. Insbesondere die Beschreibung der Abhängigkeiten der Kennwerte von den Prüfparametern durch gebrochene rationale Funktionen bringt in der

Anwendung bei der Berechnung von Flanschverbindungen letztendlich deutliche Vorteile, da im Prinzip für jeden beliebigen Zustand die zugehörigen Dichtungskennwerte aus diesen Näherungsfunktionen ermittelt werden können. Ebenso können die Versuchsdurchführungen teilweise vereinfacht und reduziert werden, wodurch die Kennwertermittlung deutlich effizienter erfolgen kann.

Hinsichtlich des Versagens einer Dichtung kann grundsätzlich zwischen drei verschiedenen Verhaltenstypen der Dichtungsmaterialien unterschieden werden. Für die Dichtungen mit einem eindeutigen Versagenspunkt wird die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  als die Flächenpressungsstufe unter der Versagensspannung  $Q_{crit}$  definiert werden. Liegt bei einer stetigen Stauchkurve kein Versagenspunkt vor, entspricht die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  der maximalen Lastkapazität der Prüfeinrichtung. Ebenfalls kein Versagenspunkt, aber starkes Kriechen, führen zur Definition zusätzlicher Kriterien in anderen Versuchen, an Hand derer die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  bestimmt werden kann. Zu diesen Kriterien zählen:

- Änderung des Verformungsverhaltens ab einer bestimmten Flächenpressung,
- Änderung des Rückfederungsverhaltens der Dichtung,
- Schädigungen der Dichtung nach dem Versuch (optische Beurteilung).

Die maximal zulässige Flächenpressung  $Q_{Smax}$  ist allerdings auch nur bei einem eindeutigen Versagen wirklich von Bedeutung. In den meisten Flanschverbindungen können diese hohen Flächenpressungen, die zu einer Schädigung der Dichtung führen, gar nicht aufgebracht werden. Sofern die Kriech- bzw. Relaxationseigenschaften und die Abdichteigenschaften immer bis zu der maximal zulässigen Flächenpressung bestimmt werden, kann zudem ausgeschlossen werden, dass ein zu "großzügig" angegebener  $Q_{Smax}$ -Wert zu Schwierigkeiten in der Flanschverbindung führt.

Für alle Dichtungstypen ist es möglich, ihre Verformungskurven über eine Regressionsfunktion auf Basis von gebrochen rationalen Funktionen zu beschreiben. Dasselbe gilt auch für die Abhängigkeit der E-Modulwerte von der Ausgangsflächenpressung. Dies kann in einem analytischen Berechnungsverfahren ausgenutzt werden, um für jede beliebige Einbauschraubenkraft die Verformung der Dichtung und das zugehörige Rückfederverhalten zu berechnen.

Die Bestimmung der Kriech-/Relaxationsfaktoren ist wegen der Abhängigkeit von den Randbedingungen Anfangsflächenpressung, Temperatur und Steifigkeit der

Verbindung sehr aufwändig. Es wurde aber gezeigt, dass für jede Prüftemperatur eine einhüllende Kurve für die Restflächenpressungen bestimmt werden kann. Am einfachsten können die Eckpunkte zur Bestimmung dieser Einhüllenden in reinen Kriechversuchen bei konstanter Flächenpressung ermittelt werden, was den Prüfaufwand reduziert und auch deutlich vereinfacht. Der Kriech-/Relaxationsfaktor  $P_{QR}$  in Abhängigkeit von der Temperatur, der Ausgangsflächenpressung und der Steifigkeit der Verbindung wird demnach nicht mehr benötigt. Aus den beiden einhüllenden Verformungskurven bei Raumtemperatur und bei Betriebstemperatur und der nominellen Dichtungshöhe kann das Setzen der Dichtung  $\Delta e_{GC}$  für jede Steifigkeit der Flanschverbindung berechnet werden.

In Leckageversuchen ist es erforderlich, ausreichend lange Messzeiten anzusetzen, um konstante Leckageraten zu erfassen. Ebenso muss das Messverfahren in Abhängigkeit von der zu erwartenden Leckagerate ausgewählt werden. Die Kennwerte sind für jede relevante Innendruckstufe experimentell zu ermitteln, da eine Umrechnung auf eine andere Innendruckstufe praktisch nicht möglich ist.

Eine Umrechnung der mit dem Prüfmedium Helium gemessenen Leckagerate auf andere Medien ist nur in eingeschränkten Bereichen möglich, letztendlich ist nur eine Abschätzung der Größenordnung der Leckagerate möglich. Rechnerische Dichtheitsnachweise zur Begrenzung von Emissionen sind daher immer mit Kennwerten, die mit einem Prüfgas (i. d. R. Helium) ermittelt wurden, durchzuführen. Eine direkte Übertragbarkeit auf reale Medien ist nicht möglich. Dementsprechend müssen auch die zulässigen Leckageraten bzw. die geforderten Dichtheitsklassen immer auf das Prüfgas bezogen sein.

Die in Reibversuchen zu ermittelnden Haftreibungskoeffizienten zwischen Dichtung und Flanschdichtflächen werden benötigt, um den Einfluss von quer zur Axialrichtung der Flanschverbindung angreifenden Belastungen, d. h. von Scherkräften und Torsionsmomenten, auf die Funktion der Flanschverbindung zu bewerten. Die bisher ermittelten Reibungskoeffizienten liegen alle über den in der Literatur zu findenden Werten. Allerdings sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich, um den Einfluss der Versuchsparameter Ausgangsflächenpressung, Restflächenpressung und Prüftemperatur zu verifizieren.

Auf Basis der europäischen Norm EN 1591-1 wurden im zweiten Teil der Arbeit verschiedene Weiterentwicklungen eines analytischen Berechnungsverfahrens für Flanschverbindungen aufgezeigt. Neben der Betrachtung zusätzlicher Aspekte wie z. B. der Berücksichtigung von Dehnhülsen bei der Bestimmung der

Nachgiebigkeiten oder der Wärmedehnungen, wurden auch ganz konkret die neu gewonnen Erkenntnisse aus der Dichtungsprüfung in den Berechnungsalgorithmus aufgenommen. Dies betrifft die Berücksichtigung der Verformung der Dichtung zur realistischen Abschätzung der Dichtungshöhe im Montagezustand genauso wie die modifizierte Definition des Kriech-/Relaxationsverhaltens der Dichtungen oder die Betrachtung der Abtragbarkeit von Querlasten über Reibung zwischen Dichtung und Flanschdichtflächen.

Zentraler Punkt bei den rechnerischen Nachweisen ist aber die Bestimmung der Flanschblattneigung und der daraus resultierenden effektiv verpressten Dichtungsbreite. Hierbei wird nun erstmalig das reale Verformungsverhalten der Dichtung und die daraus resultierende Flächenpressungsverteilung über die Breite der Dichtung bei der Bestimmung einer effektiv verpressten Dichtungsgeometrie berücksichtigt.

Eine im Vergleich zur theoretischen Breite kleinere effektiv verpresste Dichtungsbreite bedeutet hierbei nicht zwangsläufig, dass es auf der Innenseite der Dichtung zu einem kompletten Abheben der Flanschdichtflächen von der Dichtung kommen muss. Dies ist aus zahlreichen FE-Analysen bekannt und stand bisher immer im Widerspruch zu der Interpretation der effektiven Breite nach EN 1591-1. Der Begriff der effektiven Breite muss daher neu definiert werden. Es handelt sich also nicht um den Teil der Dichtung, der effektiv verpresst wird, der mit den Dichtflächen in Kontakt steht, sondern durch die reduzierte effektive Breite wird vielmehr das Verformungsverhalten der Flansche bei der Annahme einer konstanten Flächenpressung realitätsnah wiedergegeben.

Im Rahmen des Dichtheitsnachweises von Flanschverbindungen wird nachgewiesen, dass bei Einhaltung der Vorgaben die Mindestdichtungsflächenpressung  $Q_{Smin(L)}$  in allen Betriebszuständen für die Dichtheitsklasse L nicht unterschritten bzw. dass ein genügend großer Sicherheitsabstand zum Ausblasen der Dichtung eingehalten wird. Bei der Überprüfung der Einhaltung der Mindestflächenpressung wird sowohl die effektiv verpresste Dichtungsbreite als auch die Ungenauigkeit beim Aufbringen der berechneten Schraubkraft durch das gewählte Anziehverfahren berücksichtigt. Ebenso wird die Wechselwirkung zwischen der Ausgangsflächenpressung im Montagezustand und der Mindestflächenpressung im Betriebszustand berücksichtigt.

Steht die Begrenzung von flüchtigen Emissionen im Fokus der Berechnung von Flanschverbindungen, so dürfen im Festigkeitsnachweis keine lokalen Plastifizierungen toleriert werden, wie dies nach EN 1591-1 in begrenztem Maße

zulässig wäre. Dadurch würden nämlich undefinierte Zustände bzgl. den Schrauben- und Dichtungskräften entstehen, die eine Beurteilung der vorhandenen Flächenpressungen unmöglich machen. Dies hat zur Folge, dass nicht nur im Montagezustand, sondern auch in allen Folgezuständen die tatsächlichen Kräfte bei der Spannungsabsicherung zu Grunde zu legen sind. Während im Montagezustand die Maximalkräfte unter Berücksichtigung der Streuung des Anziehverfahrens anzusetzen sind, reicht in den Folgezuständen hierbei aber die Absicherung der nominellen Kräfte aus, da die Schraubenkraftstreuung in den Folgezuständen ausgeglichen wird.

Zur Verifikation der neuentwickelten analytischen Berechnungsalgorithmen zur Bestimmung der effektiv verpressten Dichtungsbreite und der Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite erfolgten Vergleichsrechnungen für drei verschiedene Flanschgeometrien und jeweils fünf unterschiedliche Dichtungstypen mit der Finite Elemente Methode. Für alle Nennweiten und alle Dichtungstypen passen die Flanschblattneigungen, die effektiv verpresste Dichtungsbreite und die Flächenpressungsverteilungen zwischen FEM und der analytischen Berechnungsmethode gut überein. Allerdings ist hierfür eine Modifikation des effektiven Lochkreisdurchmessers erforderlich, von dem aus der Hebelarm der wirkenden Dichtungskraft ermittelt wird. Der in der aktuellen Norm verwendete Korrekturfaktor für die Krafteinleitung im Lochkreis liefert in der analytischen Berechnung stets größere Flanschblattneigungen als die Finite Elemente Berechnung. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie wurde der effektive Lochkreisdurchmesser neu definiert. Diese Korrektur ist mit weiteren Berechnungen anderer Nennweiten zu überprüfen und ggf. anzupassen. Aus jetziger Sicht erscheint die Formel jedoch das mechanische Verhalten der Flansche gut zu beschreiben.

Allgemein gilt für alle Nennweiten und alle Dichtungstypen, dass sich der Neigungswinkel des Flanschblattes und die verpresste Dichtungsbreite im Lastfall Innendruck im Vergleich zum Montagezustand nur selten wesentlich ändert. Die verpresste Dichtungsbreite wird im Lastfall Innendruck bei den untersuchten Flanschverbindungen, sofern sie sich überhaupt geändert hat, immer kleiner, daher ist es hinsichtlich der Beurteilung der Abdichteigenschaften immer konservativ, die im Montagezustand ermittelte Dichtungsbreite auch in den Folgezuständen anzusetzen, da sich bei einer größeren Fläche immer eine kleinere Dichtungsflächenpressung ergibt, die mit der Mindestflächenpressung im Betrieb verglichen werden muss.

Auf Grund der guten Übereinstimmung der analytisch und der mit Hilfe von FEM ermittelten Flanschblattneigungen ist die Korrektur des Hebelarmes der angreifenden Dichtungskraft hin zur neutralen Faser des wirkenden Momentes ein technisch plausibler Ansatz. Die Ergebnisse bestätigen letztendlich die neue Begriffsdefinition der effektiven Breite der Dichtung, das Verformungsverhalten der Flansche bei der Annahme einer konstanten Flächenpressung realitätsnah wiederzugeben. Auch die mit den beiden Verfahren ermittelten Flächenpressungen passen sehr gut zusammen. Dies alles spricht für die neue analytische Vorgehensweise zur Ermittlung der Verformungen in den Flanschverbindungen bei der Montage.

## 10 Literaturverzeichnis

- /1/ Wagner, W.: Festigkeitsberechnungen im Apparate- und Rohrleitungsbau, 8. Auflage 2012, Vogel Fachbuch.
- /2/ DIN EN 1092-1 (2013-04): Flansche und ihre Verbindungen; Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet - Teil 1: Stahlflansche
- /3/ DIN EN 1092-2 (1997-06): Flansche und ihre Verbindungen; Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet - Teil 2: Gußeisenflansche
- /4/ DIN EN 1092-3 (2004-10): Flansche und ihre Verbindungen; Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet - Teil 3: Flansche aus Kupferlegierungen
- /5/ DIN EN 1092-4 (2002-08): Flansche und ihre Verbindungen; Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet - Teil 4: Flansche aus Aluminiumlegierungen
- /6/ DIN EN 1759-1 (2005-02): Flansche und ihre Verbindungen; Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach Class bezeichnet - Teil 1: Stahlflansche
- /7/ DIN EN 1759-3 (2004-10): Flansche und ihre Verbindungen; Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach Class bezeichnet - Teil 3: Flansche aus Kupferlegierungen
- /8/ DIN EN 1759-4 (2003-12): Flansche und ihre Verbindungen; Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach Class bezeichnet - Teil 4: Flansche aus Aluminiumlegierungen
- /9/ DIN EN 1514-1 (1997-08): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung - Teil 1: Flachdichtungen aus nichtmetallischem Werkstoff mit oder ohne Einlagen

- /10/ DIN EN 1514-2 (2005-08): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung - Teil 2: Spiraldichtungen für Stahlflansche
- /11/ DIN EN 1514-3 (1997-08): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung - Teil 3: Nichtmetallische Weichstoffdichtungen mit PTFE-Mantel
- /12/ DIN EN 1514-4 (1997-08): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung – Teil 4: Dichtungen aus Metall mit gewelltem, flachem oder gekerbtem Profil für Stahlflansche
- /13/ DIN EN 1514-6 (2004-03): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung – Teil 6: Kammprofil-dichtungen für Stahlflansche
- /14/ DIN EN 1514-7 (2004-08): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung – Teil 7: Metallummantelte Dichtungen mit Auflage für Stahlflansche
- /15/ DIN EN 1514-8 (2005-02): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung – Teil 8: Runddichtringe aus Gummi für Nutflansche
- /16/ DIN EN 12560-1 (2001-04): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit Class-Bezeichnung - Teil 1: Flachdichtungen aus nichtmetallischem Werkstoff mit oder ohne Einlagen
- /17/ DIN EN 12560-2 (2013-12): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit Class-Bezeichnung - Teil 2: Spiraldichtungen für Stahlflansche
- /18/ DIN EN 12560-3 (2001-04): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit Class-Bezeichnung - Teil 3: Nichtmetallische Weichstoffdichtungen mit PTFE-Mantel



- /19/ DIN EN 12560-4 (1997-08): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit Class-Bezeichnung – Teil 4: Dichtungen aus Metall mit gewelltem, flachem oder gekerbtem Profil für Stahlflansche
- /20/ DIN EN 12560-5 (2001-04): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit Class-Bezeichnung – Teil 5: RTJ-Dichtungen aus Metall für Stahlflansche
- /21/ DIN EN 12560-6 (2004-03): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit Class-Bezeichnung – Teil 6: Kammprofilabdichtungen für Stahlflansche
- /22/ DIN EN 12560-7 (2004-09): Flansche und ihre Verbindungen; Maße für Dichtungen für Flansche mit PN-Bezeichnung – Teil 7: Metallummantelte Dichtungen mit Auflage für Stahlflansche
- /23/ VDI 2290: Emissionsminderung, Kennwerte für dichte Flanschverbindungen, 06/2012.
- /24/ DIN 28090-1: Statische Dichtungen für Flanschverbindungen - Teil 1: Dichtungskennwerte und Prüfverfahren, 09/1995.
- /25/ DIN EN 13555: Flansche und ihre Verbindungen - Dichtungskennwerte und Prüfverfahren für die Anwendung der Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung, Deutsche Fassung 02/2005.
- /26/ KTA 3211.2: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Regeländerungsentwurfsvorschlag 04/2003.
- /27/ DIN 2505: Berechnung von Flanschverbindungen, Teil 1: Berechnung, Entwurf 04/1990.
- /28/ KTA 3201.2: Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Fassung 06/1996.

- /29/ DIN EN 1591-1: Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen, Teil 1: Berechnungsmethode, Deutsche Fassung 10/2001.
- /30/ ASME Boiler and Pressure Vessel Code - Section VIII: Rules for Constructions of Pressure Vessels, Division 1:2013.
- /31/ CODAP 2010 DIV 1 & 2 + Addendum 03/2011 + Révision 10/2012 + Logiciel BDMat (Banque de données des matériaux): Code de Construction des Appareils à Pression non soumis à l'action de la flamme
- /32/ BS PD 5500:2012+A1:2012: Specification for unfired fusion welded pressure vessels
- /33/ Herrmann, K., H.-J. Siegle, Beherrschung flüssiger und gasförmiger Emissionen – Aktivitäten und Sichtweisen der chemischen und petrochemischen Industrie, VDI-Berichte Nr. 1440, 1998.
- /34/ KTA 3201.2: Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Änderungsentwurf 11/2010.
- /35/ KTA 3211.2: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Änderungsentwurf 11/2010.
- /36/ DIN CEN/TS 1591-3: Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung, Berechnungsmethode für Flanschverbindungen mit Dichtungen im Kraftnebenschluss, Deutsche Fassung 10/2007.
- /37/ DIN EN 1591-1:2001+A1:2009+AC2011: Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung, Deutsche Fassung 08/2011.
- /38/ DIN 2505 "Feste Flansche" (Hub Flanges). DIN 2506 "Lose Flansche" (Loose Flanges), DIN 2507 "Schrauben" (Bolting). German Standard Association, 1927.

- /39/ Bach, C.: Versuche über die Widerstandsfähigkeit ebener Platten, Springer Verlag, Berlin, 1891.
- /40/ Bach, C.: Maschinenelemente, Verlag Cotta, Stuttgart, 1. Ausgabe 1891, 5. Ausgabe 1896, S. 611-617; 10. Ausgabe 1908, S. 834-844.
- /41/ Bach, C.: Elastizität und Festigkeit, Springer Verlag, Berlin, 1. Ausgabe 1889, 6. Ausgabe 1911, S. 535-578.
- /42/ Schwaigerer, S. und R. Kobitsch: Die Berechnung von Dichtungen und Flanschen, Die Technik, Bd. 2, Nr. 10, 1947.
- /43/ Schwaigerer, S. und F. Römer: Festigkeitsuntersuchungen an einem festen Flansch. VDI-Z. Band 102, Nr. 22 (1951).
- /44/ Siebel, E. und S. Schwaigerer: Die Berechnung von Flanschverbindungen für Heißdampfrohrlösungen, VGB Merkblätter, Nr. 4, 1951.
- /45/ Schwaigerer, S.: Die Berechnung der Flanschverbindungen im Behälter- und Rohrleitungsbau. VDI-Z. 96 (1954), S. 1-12.
- /46/ Haenle, S.: Beiträge zum Festigkeitsverhalten von Vorschweißflanschen. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 23 (1957), Heft 4, S. 113-134.
- /47/ DIN V 2505: Berechnung von Flanschverbindungen, Vornorm 10/1964.
- /48/ DIN E 2505: Berechnung von Flanschverbindungen, Teil 1: Berechnung, Entwurf 01/1986.
- /49/ DIN 2505: Berechnung von Flanschverbindungen, Teil 2: Dichtungskennwerte, 04/1990.
- /50/ KTA 3211.2: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Fassung 06/1992.

- /51/ Kreckel, K.: Beitrag zur Normung und Berechnung von Apparate-Flanschverbindungen. Konstruktion 13 (1961), Heft 12, S. 467-477.
- /52/ Meincke, H.: Konstruktionsgrundlagen der Vorschweißflansche. VDI-Z. 105 (1963), Nr. 13.
- /53/ Tückmantel, H. J.: Die Optimierung statischer Dichtungen, Kempchen, 1978.
- /54/ Tückmantel, H. J.: Dichtungen in verschraubten Flanschverbindungen bei höheren Temperaturen. 3R-international, Heft 5, 1979, S. 342-345.
- /55/ Tückmantel, H. J.: Kritische Analyse der genormten Dichtungsberechnung als Teil der Berechnung verschraubter Flanschverbindungen mit im Krafthauptfluss liegender Dichtung, Konstruktion 33 (1981).
- /56/ TGL 32903/13: Behälter und Apparate, Festigkeitsberechnung, Flanschverbindungen, 12/1983.
- /57/ Wölfel, J. und W. Rabisch: Berechnung und Standardisierung von Flanschverbindungen, Chemische Technik 27 (1975) Heft 8, S. 470-478.
- /58/ Wölfel, J.: Berechnung der Dichtigkeit und Festigkeit von Flanschverbindungen, Maschinenbautechnik 34 (1985) Heft 6, S 244-247.
- /59/ DIN EN 1591-2, Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen, Teil 2: Dichtungskennwerte, Deutsche Fassung 09/2008.
- /60/ Bartonicek, J. und F. Schöckle: Beitrag zur Berechnung von Flanschverbindungen, VDI-Berichte Nr. 514, 1984.
- /61/ Kockelmann, H. und J. Bartonicek: Rechnerischer Nachweis der Dichtheit von Flanschverbindungen unter Berücksichtigung der relevanten Dichtungskennwerte, Vulkan Verlag, Handbuch "Leckagen", 1993.
- /62/ Wölfel, J.: Berechnung von Flanschverbindungen auf der Basis von prEN 1591. 3R international, 34 (1995) Heft 5, Mai 1995.

- /63/ Schöckle, F., and J. Bartonicek: Demands on Calculation of Flanged Joints, 1998 ASME PVP Conference, San Diego.
- /64/ Bartonicek, J., and F. Schöckle: Users Experiences with Tightness of Flanged Joints, 1998 ASME PVP Conference, San Diego.
- /65/ Bartonicek, J., M. Schaaf und F. Schöckle: Betreiber-Erfahrungen mit dem Abdichten von Flanschverbindungen und Stopfbuchspackungen, Vulkan-Verlag, Sonderdruck Dichtungstechnik, Juni 1999.
- /66/ Kauer, R. und K. Strohmeier: Ergebnisse der europäischen Flanschberechnungsnorm prEN 1591, Vergleich mit FEM und Versuch, Technische Überwachung Bd. 41 (2000) Nr. 5, S. 24-31.
- /67/ Bartonicek, J., H. Kockelmann, K. Metzner und M. Schaaf: Stand der Regelwerke für die Auslegung von Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthaupt- und Kraftnebenschluss, 27. MPA Seminar, Oktober 2001.
- /68/ Bartonicek, J., E. Roos, H. Kockelmann, and F. Schöckle: What is the meaning of tight? 2003 ASME PVP Conference , Cleveland.
- /69/ Schaaf, M., F. Schöckle, J. Bartonicek und H. Kockelmann: Anforderungen an die rechnerische Auslegung von Flanschverbindungen mit der Dichtung im Krafthaupt- und Kraftnebenschluss, 33. MPA Seminar, Oktober 2007.
- /70/ Schaaf, M.: Dichtheits- und Festigkeitsnachweis nach EN 1591 unter Berücksichtigung der Forderungen der VDI 2290, SGL-IDT-Symposium, 24.11.2009, Frankfurt-Hoechst.
- /71/ DIN EN 13445-3: Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 3: Konstruktion, Deutsche Fassung 12/2012.
- /72/ DIN EN 13480-3: Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 3: Konstruktion und Berechnung; Deutsche Fassung 11/2012.
- /73/ Siebel, E., W. G. Hering und A. Raible: Versuche über das Verhalten von Dichtungen VDI-Forschungsheft (1934), Heft 369.

- /74/ Siebel, E.: Untersuchungen an Dichtungen und Flanschen, Mitt. VGB (1935) S. 122-126.
- /75/ Siebel, E. und A. Raible: Versuche an Dichtungen bei hohen Drücken und Temperaturen, Mitt. VGB (1936) S. 129-139.
- /76/ Raible, A.: Das Verhalten von Dichtungen, Diss. TH Stuttgart (1937).
- /77/ Siebel, E. und K. Wellinger: Untersuchungen an Weichdichtungen, Chemische Fabrik 15 (1942) S. 215-218.
- /78/ Wellinger, K. und A. Stanger: Prüfverfahren zur Feststellung des Verhaltens von Weichdichtungen, Angew. Chemie 19 (1947) S. 30-42.
- /79/ Krägeloh, E.: Untersuchungen von Hart- und Weichdichtungen, Dissertation TH Stuttgart (1954).
- /80/ Krägeloh, E.: Gasdurchlässigkeit von Dichtungen auf Asbestbasis, Gummi und Asbest - Plast. Massen 8 (1955) S. 190-192.
- /81/ Siebel, E. und E. Krägeloh: Untersuchungen an Dichtungen für Rohrleitungen, Konstruktion 7 (1955) S. 123-137, S. 187-196.
- /82/ Krägeloh, E.: Die wesentlichsten Prüfmethode für lt-Dichtungen, Gummi und Asbest - Plast. Massen 8 (1955) S. 628-636.
- /83/ Wellinger, K. und E. Krägeloh: Berechnung von Dichtungen, Gummi und Asbest - Plast. Massen 11 (1958) S. 769-773.
- /84/ Krägeloh, E.: Anforderungen an Dichtungen, Konstruktion 20 (1968) S. 206-212.
- /85/ Boon, E. F., B. B. Ester und A. Krijgsman: Über die Gasdurchlässigkeit von Dichtungen auf Asbestbasis, Gummi und Asbest-Plast. Massen 10 (1957) S. 431-436.
- /86/ Boon, E. F. und H. H. Lok: Untersuchungen an Flanschen und Dichtungen, 2. VDI 100 (1958) S. 1613-1624.

- /87/ Lok, H. H.: Untersuchungen an Dichtungen für Apparateflansche, Dissertation TH Delft 1960.
- /88/ DIN 52913: Prüfung von Asbest und Asbesterzeugnissen, Druckstandversuch an It-Dichtungsplatten (It-Platten), Ausgabe März 1957.
- /89/ Karl, E.: Dichtungen für Hochdruckbehälter, Chemie-Ing. Techn. 43 (1971), Nr. 12, S. 698-704.
- /90/ Wagner, W.: It-Dichtungen in Rohrleitungs-Flanschverbindungen Wärme, Band 82, Heft 1, S. 7-16.
- /91/ Wagner, W.: Rohrleitungen: Aufhängung, Verbindung, Dichtung, Energie 26 (1974) Nr. 2, S. 61-67.
- /92/ Teucher, S.: Die Abdichtung ruhender Bauteile. Maschinenmarkt 70 (1964), S. 27-30 und 71 (1964), S. 33-34.
- /93/ Teucher S.: Berührungsdichtungen an ruhenden Flächen. Konstruktion 20 (1968), S. 226-228.
- /94/ Trutnovsky, K.: Berührungsdichtungen an ruhenden und bewegten Maschinenteilen. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. New York 1975.
- /95/ Forschungsvorhaben AiF-Nr.: 3968: Experimentelle Untersuchungen an Apparateflanschverbindungen, Abschlussbericht, MPA Universität Stuttgart, 23.7.1981.
- /96/ Bartonicek, J., E. Krägeloh, J. Ciprian: Auswirkungen von Temperatur und Temperaturdifferenzen auf Flanschverbindungen, VGB Kraftwerkstechnik 63, Heft 12, Dezember 1983.
- /97/ Bartonicek, J.: Beitrag zur Berechnung von Flanschverbindungen unter Innendruck-, Biegemoment- und Temperaturbelastung, Dissertation Universität Stuttgart (1986).

- /98/ Bartonicek, J.: Prüfkriterien und Berechnung von Flachdichtungen, Internationale Dichtungstagung, Lenggries, 1986, Feodor Burgmann Dichtungswerke, Wolfratshausen.
- /99/ Tietze, W., S. Wilke und G. Franz: Probleme bei der Untersuchung von PTFE für Abdichtzwecke im Armaturenbau, Chem. Technik 32 (1980) 9 ff.
- /100/ Tietze, W., S. Wilke, M. Kästner und J. Kästner: Durchführung forcierter Versuche auf der Basis mathematischer Optimierungsmodelle für Dichtelemente in der chemischen Technik, VII. Int.-Dicht.-Tag. Budapest, April 1982.
- /101/ Tietze, W., S. Wilke und G. Franz: Darstellung einer Möglichkeit zur Beurteilung der Abdichtleistung auf der Grundlage dimensionsloser Kennzahlen, Wiss. Beiträge der TH Köthen (1980).
- /102/ Tietze, W. und S. Wilke: Möglichkeiten zur Berechnung von Dichtverbindungen am Beispiel der TGL 20360 unter Einbeziehung experimenteller Ergebnisse, 5. Fachtag. "App.-Konstr." TH Magdeburg, Juni 1982.
- /103/ Tietze, W. und S. Wilke: Zur Ermittlung und Darstellung des Verhaltens ruhend beanspruchter Berührungsdichtungen (MAN 803.6), Techn. Inf. Armaturen 22 (1987) S. 2 ff.
- /104/ Forschungsvorhaben AiF-Nr. 7 708: Kennwerte von Dichtungen für Flanschverbindungen, Abschlußbericht, MPA-Auftrags-Nr. 895 501 001, 11/1991.
- /105/ BRITE EURAM Project BE 5191: Asbestos-free materials for gaskets for bolted flanged connections, 1993 - 1996.
- /106/ Kockelmann, H., and Y. Birembaut: 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, 4<sup>th</sup> International Symposium on Fluid Sealing, 17.-19. September 1996, Mandelieu-La Napoule, France.



- /107/ Bartonicek, J., Y. Birembaut, H. Kockelmann, and J.-C. Vignaud: Verification of gasket factors determined in standardized tests by means of flanged joints, 4<sup>th</sup> International Symposium on Fluid Sealing, 17.-19. September 1996, Mandelieu-La Napoule, France.
- /108/ PERL, Pressure Equipment - Reduction of Leak Rate: gasket parameters measurement, research project sponsored by the European Commission and the European gasket manufacturing industry, 11/2000 - 10/2002.
- /109/ prEN 13555: Flansche und ihre Verbindungen, Dichtungskennwerte und Prüfverfahren bezogen auf die Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtungen, 02/2004.
- /110/ Bartonicek, J., M. Schaaf, and F. Schöckle: On the Effect of Temperature on Tightening Characteristics of Gaskets, 2002 ASME PVP Conference, Vancouver.
- /111/ Schaaf, M., F. Schöckle, J. Bartonicek und H. Kockelmann: Relevante Kennwerte der Dichtungen für Flanschverbindungen, 32. MPA Seminar, Stuttgart, Oktober 2006.
- /112/ Wilming, H.: Verschraubungen an Druckgeräten im Anlagenbau und VDI 2862 Blatt 3 - Anforderungen und Praxis, 5. VDI / VDE Fachtagung Automatisierte Schraubmontage, Fürth 20./21.11.2012.
- /113/ VDI 2440: Emissionsminderung - Mineralö Raffinerien, 11/2000.
- /114/ Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft), vom 24. Juli 2002, Inkrafttreten: 1. Oktober 2002.
- /115/ AiF/DECHEMA Forschungsvorhaben 13239 N (4/2002 - 12/2003): Nachweis der Hochwertigkeit von Dichtelementen nach TA Luft bzw. VDI-Richtlinie 2440; Abschlussbericht März 2004, MPA Universität Stuttgart.
- /116/ VDI 2200: Dichte Flanschverbindungen - Auswahl, Auslegung, Gestaltung und Montage von verschraubten Flanschverbindungen, 06/2007.

- /117/ Bern, A., D. Göbel, H.-P. Hecker, A. Hövel, R. Hahn und H. Kockelmann: Alternatives praxisorientiertes Prüfverfahren zum Hochwertigkeitsnachweis für Flanschverbindungen nach TA Luft, XIV. Dichtungskolloquium Steinfurt, 11. und 12. Mai 2005.
- /118/ PAS 1050-1, -2: Leitfaden zur Umsetzung der TA Luft in der chemisch-pharmazeutischen Industrie, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Teil 2: Flansche und Dichtungen, 02/2005.
- /119/ KS D 2021/50, Anhang D: Dichtungen und Packungen, 03/2000.
- /120/ KS D 2021/50, Anhang D, Rev. A: Dichtungen und Packungen, 12/2010.
- /121/ IMWF Universität Stuttgart: Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben-Nr. 14264 N, Ausblassichere Dichtungen für Flanschverbindungen mit emaillierten Flanschen und glasfaserverstärkten Kunststoffflanschen in der chemischen Industrie, Stuttgart, 06/2007.
- /122/ IMWF Universität Stuttgart: Schlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben-Nr. 15935 N, Ausblassichere Dichtungen für Flanschverbindungen mit emaillierten Flanschen und glasfaserverstärkten Kunststoffflanschen in der chemischen Industrie, Stuttgart, 04/2011.
- /123/ Schöckle, F., J. Bartonicek: Montage von Dichtverbindungen mit Überprüfung der Dichtungskräfte, Vulkan Verlag, Handbuch "Leckagen", 1993.
- /124/ Bartonicek, J., S. Wich-Schwarz, A. Hartmann, F. Schöckle: Einfluss der Montage auf die Dichtheit von Flanschverbindungen, VGB Konferenz "Kraftwerkskomponenten 1994".
- /125/ Bartonicek, J., and F. Schöckle: Tightness and accurate mounting of bolted joints, 1995 ASME PVP Conference, Honolulu, Hawaii.
- /126/ Eisele, M., M. Schaaf: Qualitätsgesicherte Montage von Flanschverbindungen, 33. MPA Seminar, Stuttgart, Oktober 2007.
- /127/ Wegweiser für eine sichere Dichtverbindung an Flanschen, Teil 1 - Leitfaden für Wartungspersonal, Ingenieure, Monteure, ESA/FSA Publikation Nr. 009/98.

- /128/ ASME PCC-1: Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly, 03/2010.
- /129/ DIN CEN/TS 1591-4: Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung; Qualifizierung der Kompetenz von Personal zur Montage von Schraubverbindungen im Geltungsbereich der Druckgeräterichtlinie, Deutsche Fassung 10/2007.
- /130/ Begrenzung der Emissionen aus Dichtverbindungen in der Anlagentechnik, 6. Workshop "Dichtverbindungen im Anlagenbau", MPA Universität Stuttgart, November 2003.
- /131/ Directive 2008/1/EC of the European Parliament and the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control, Official Journal of the European Union No. L 24, 29/01/2008, P. 008-029.
- /132/ Directive 2010/75/EC of the European Parliament and the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast), Official Journal of the European Union No. L 334, 17/12/2010, P. 017-119.
- /133/ Clean Air Act: U.S. Code Title 42 Chapter 85, §7401-7671q, 2008.
- /134/ South Coast Air Quality Management Plan, 06/2007.
- /135/ Method 21 – Determination of Volatile Organic Compound Leaks, Environmental Protection Agency
- /136/ DIN 28090-2: Statische Dichtungen für Flanschverbindungen - Teil 2: Dichtungen aus Dichtungsplatten - Qualitätssicherung, 09/1995
- /137/ DIN 28090-3: Statische Dichtungen für Flanschverbindungen - Teil 3: Dichtungen aus Dichtungsplatten - Prüfverfahren zur Ermittlung der chemischen Beständigkeit, 09/1995
- /138/ DIN EN ISO 10497: Prüfung von Armaturen - Anforderungen an die Typprüfung auf Feuersicherheit, Deutsche Fassung 11/2004

- /139/ API 607: Fire Test for Quarter-turn Valves and Valves Equipped with Nonmetallic Seats, 09/2010.
- /140/ DIN EN 1591-1 Beiblatt 1: Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung - Hintergrundinformationen, 10/2001.
- /141/ DIN 28091-1: Technische Lieferbedingungen für Dichtungsplatten - Teil 1: Dichtungswerkstoffe - Allgemeine Festlegungen, 09/1995.
- /142/ DIN 28091-2: Technische Lieferbedingungen für Dichtungsplatten - Teil 2: Dichtungswerkstoffe auf Basis von Fasern (FA) - Anforderungen und Prüfung, 09/1995.
- /143/ DIN 28091-3: Technische Lieferbedingungen für Dichtungsplatten - Teil 3: Dichtungswerkstoffe auf Basis von PTFE (TF) - Anforderungen und Prüfung, 09/1995.
- /144/ DIN 28091-4: Technische Lieferbedingungen für Dichtungsplatten - Teil 4: Dichtungswerkstoffe auf Basis von expandiertem Graphit (GR) - Anforderungen und Prüfung, 09/1995.
- /145/ DIN 52913: Prüfung von statischen Flachdichtungen für Flanschverbindungen - Druckstandversuch an Dichtungsplatten, 04/2002.
- /146/ DIN EN 14772: Flansche und ihre Verbindungen - Qualitätssicherungsprüfung und Prüfung von Dichtungen nach den Normen der Reihen EN 1514 und EN 12560, Deutsche Fassung 04/2005.
- /147/ Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media, Amsterdam, 1972.
- /148/ Bear, J., Y. Bachmat: Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media, Springer-Verlag GmbH, February 2007.
- /149/ Jackson, R.: 1977: Transport in Porous Catalysts. Elsevier Scientific Publishing Comp. Amsterdam - Oxford - New York 1977.

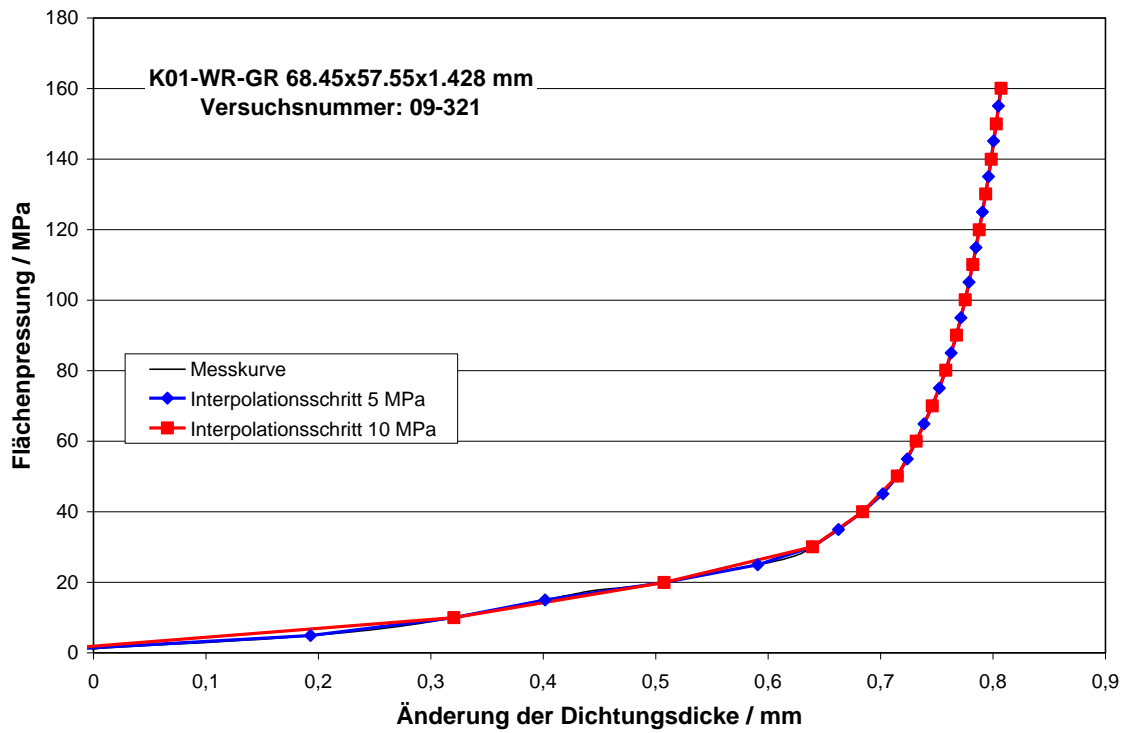
- /150/ DIN EN 1779: Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Kriterien zur Auswahl von Prüfmethode und -verfahren; Deutsche Fassung 10/1999.
- /151/ ANSYS, Inc.: ANSYS Mechanical APDL Element Reference - Release 13.0, <https://www1.ansys.com/customer>, November 2011.
- /152/ ANSYS, Inc.: ANSYS Mechanical APDL Command Reference – Release 13.0, <https://www1.ansys.com/customer>, November 2011.



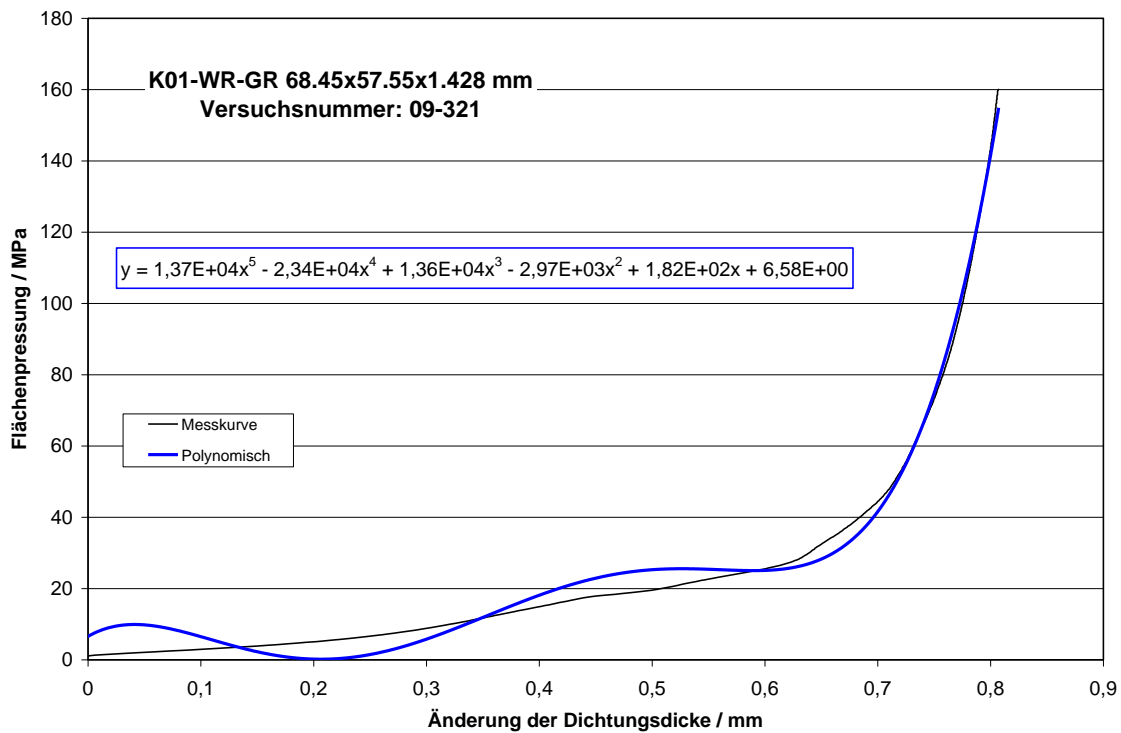
## **A Dichtungskennwerte**



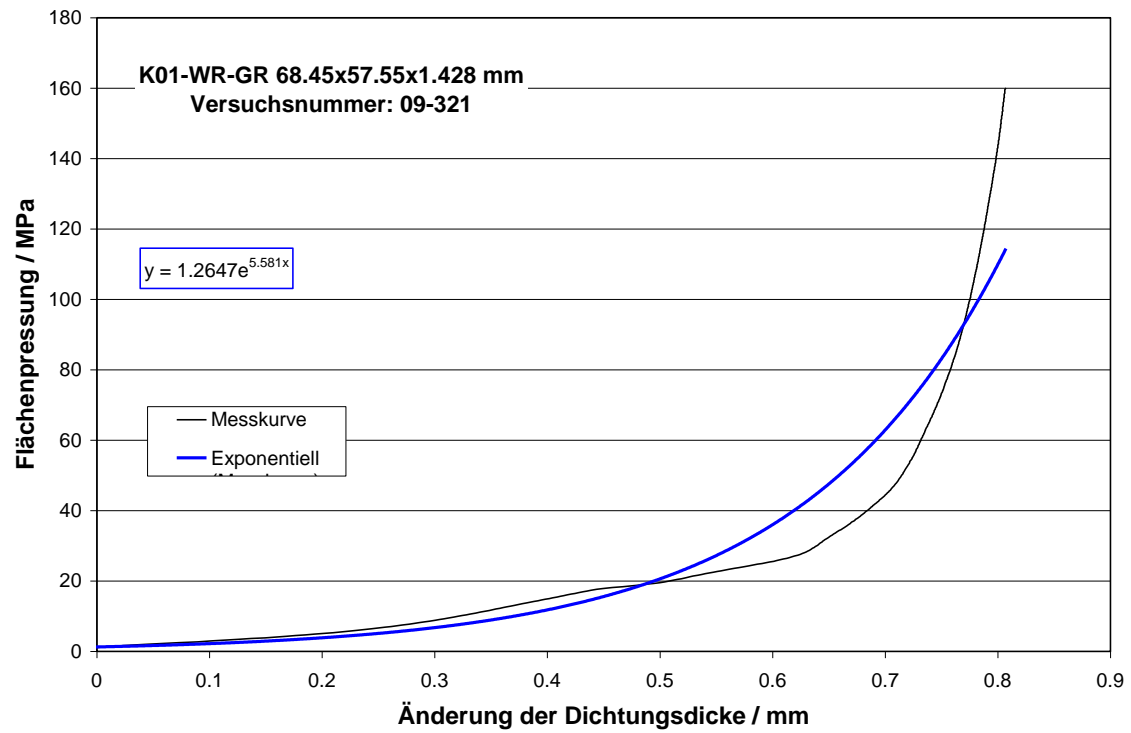




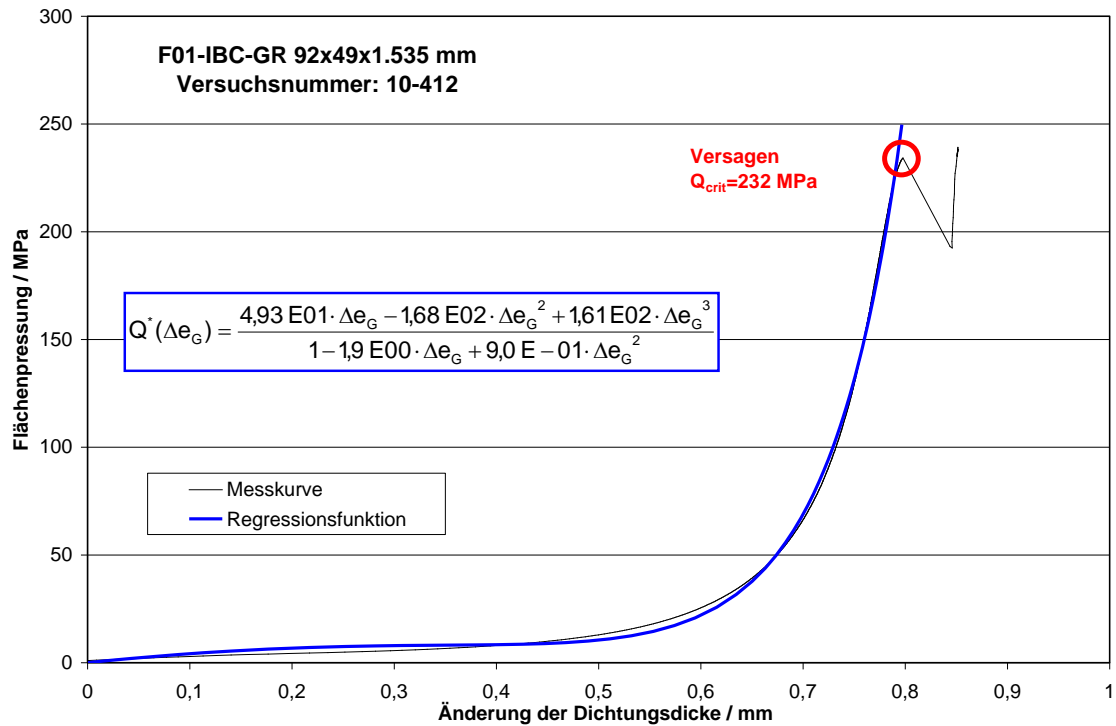
**Bild A.1: Linearisierte Stauchkurve Wellringdichtung Typ SC**



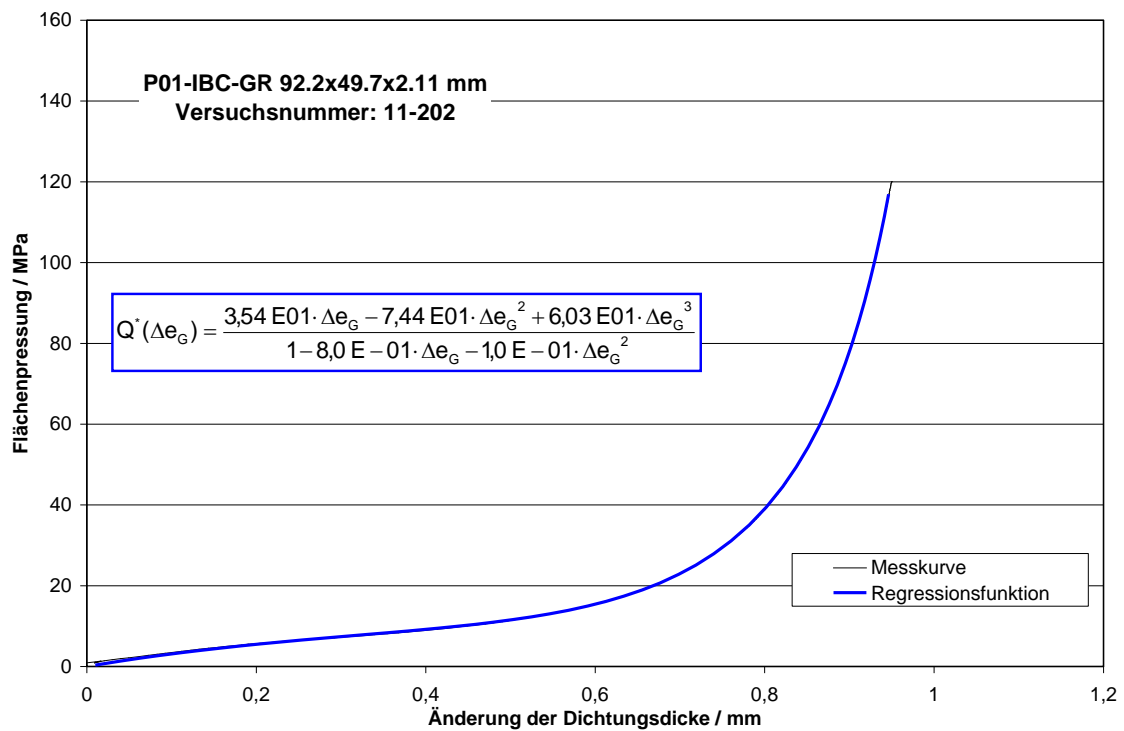
**Bild A.2: Polynomische Gleichung (5. Grades) zur Beschreibung der Stauchkurve**



**Bild A.3** Exponentielle Funktion zur Beschreibung der Stauchkurve



**Bild A.4: Stauchkurve einer Grafitdichtung mit eindeutigem Versagenspunkt**



**Bild A.5: Stauchkurve einer Grafitdichtung ohne Versagenspunkt**

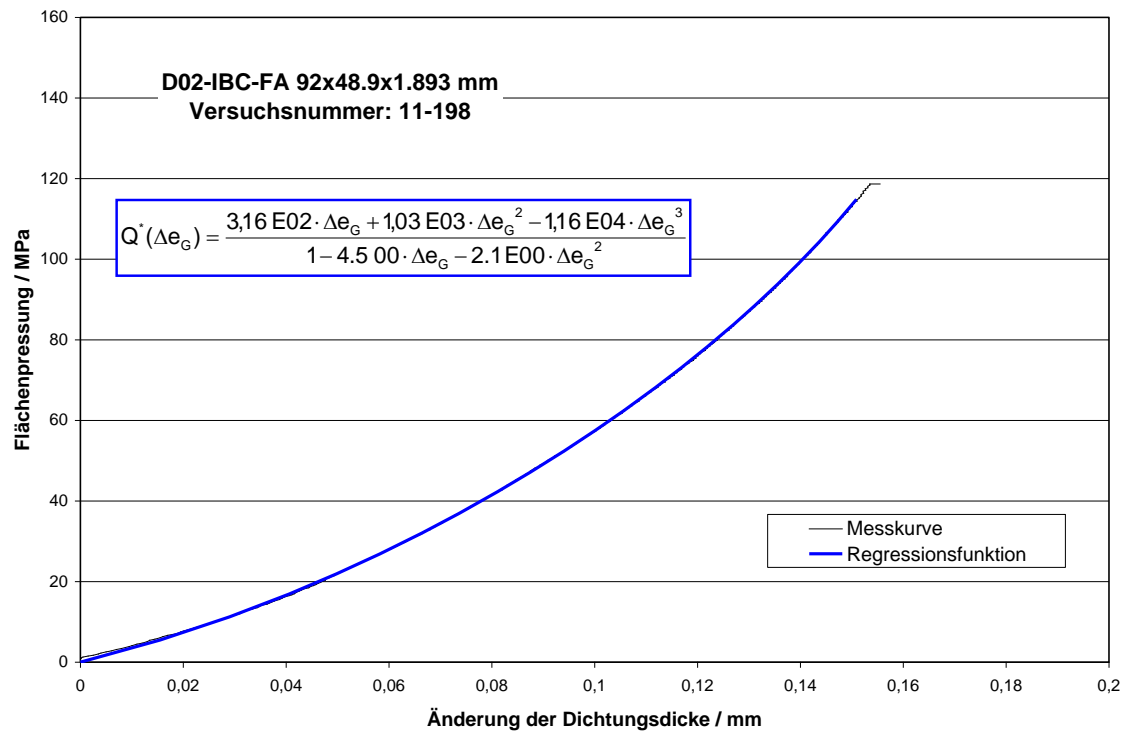


Bild A.6: Stauchkurve einer Flachdichtung auf Aramidfaserbasis

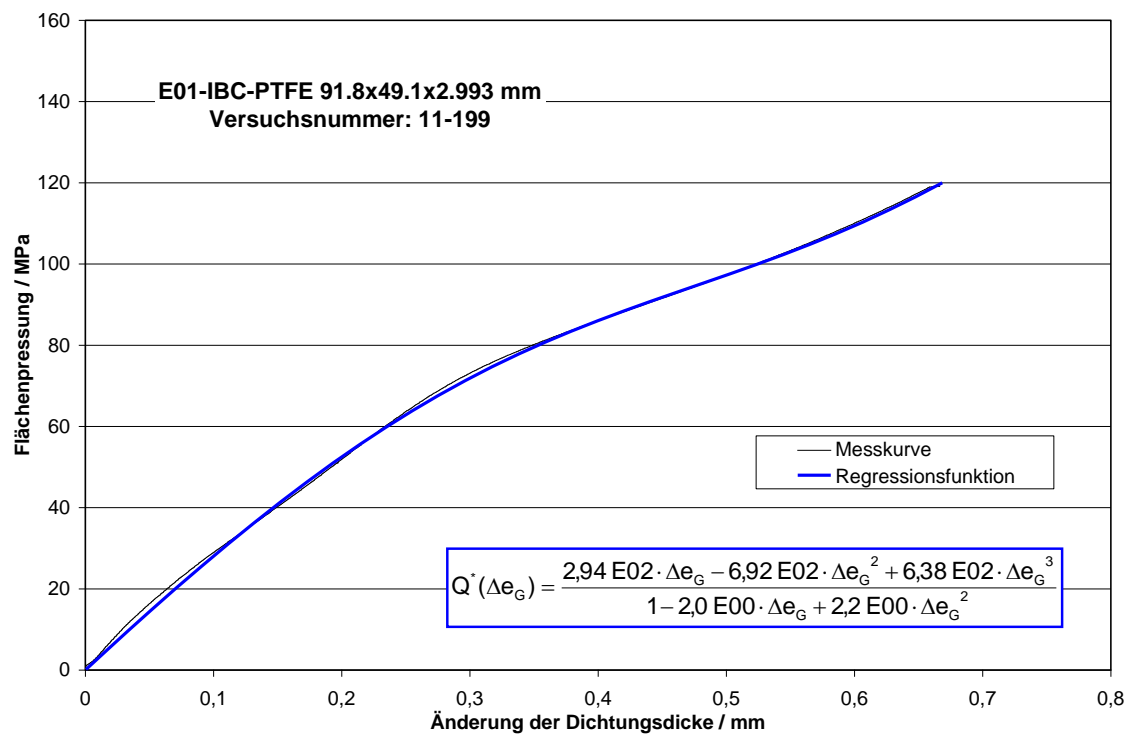


Bild A.7: Stauchkurve einer PTFE-Flachdichtung mit Silikatfüllung

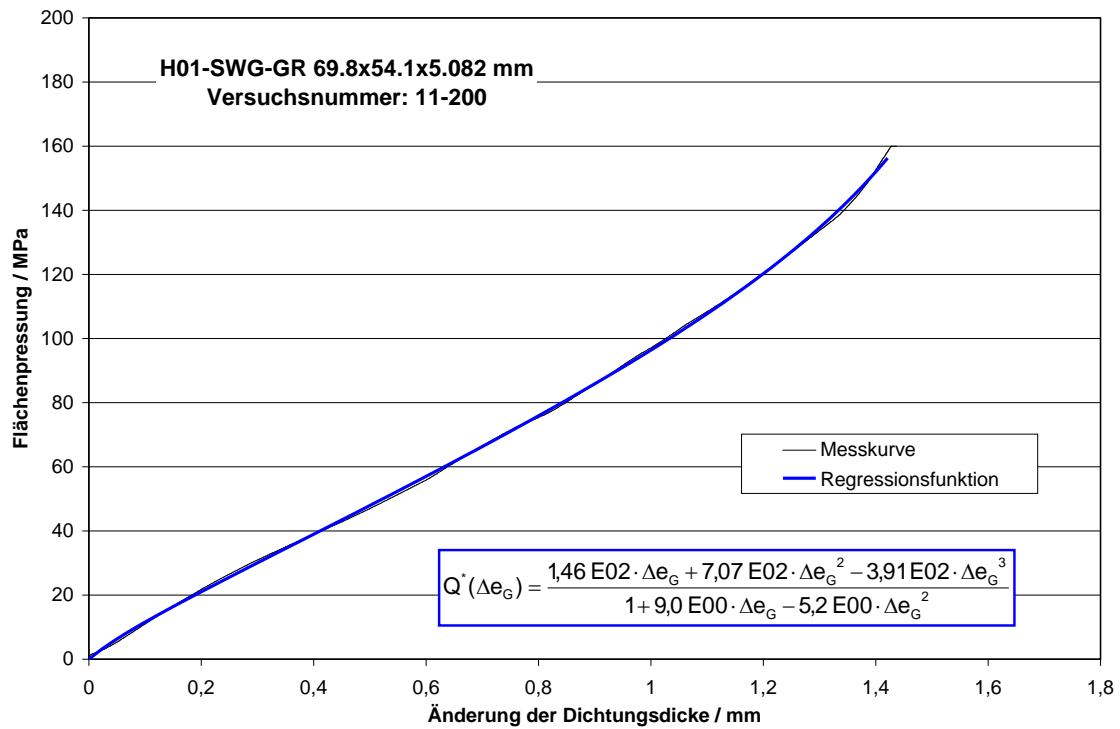


Bild A.8: Stauchkurve einer Spiraldichtung mit Grafitfüllung

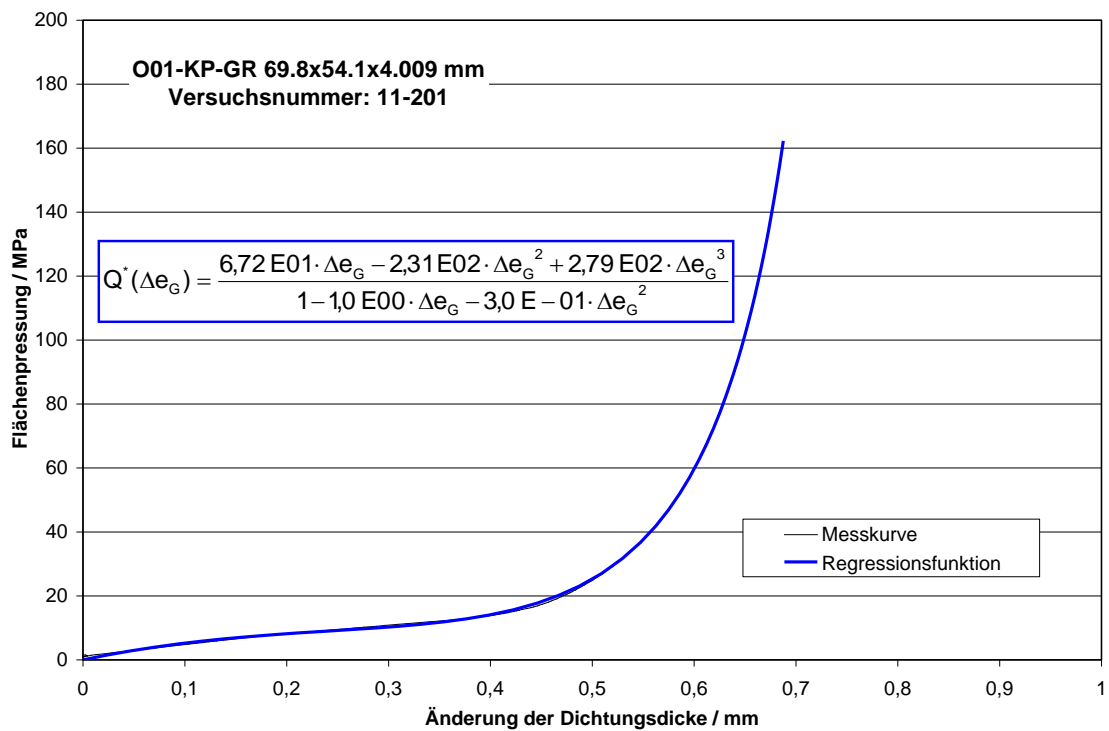
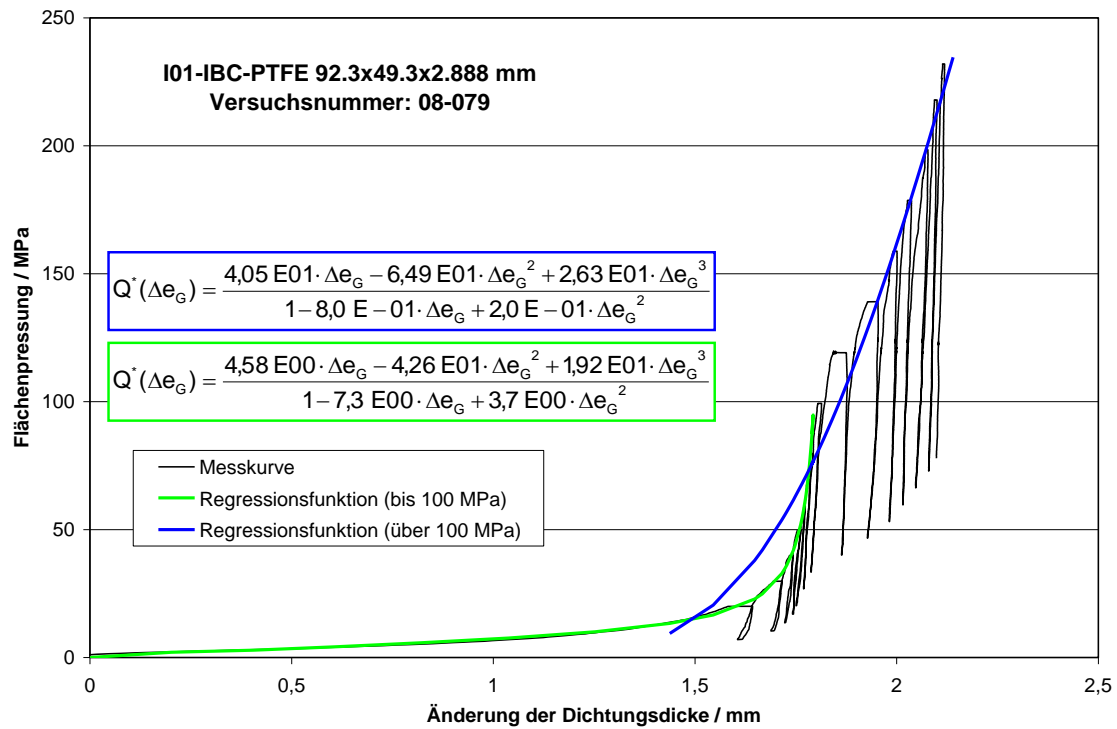
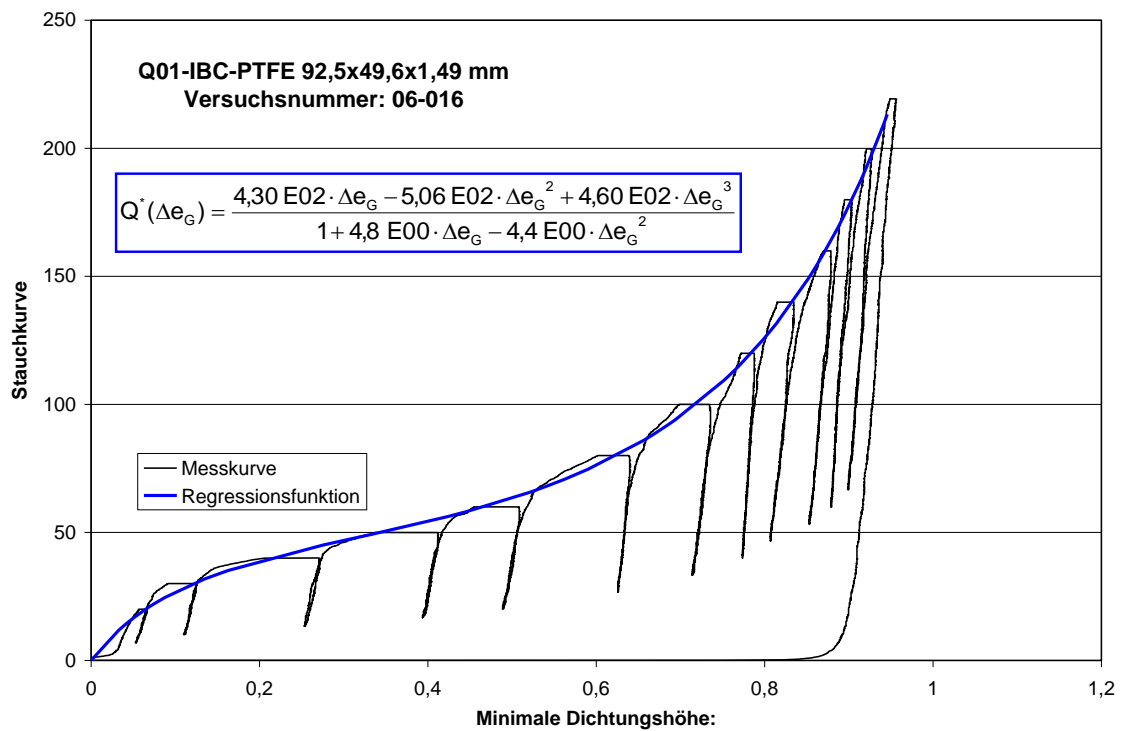


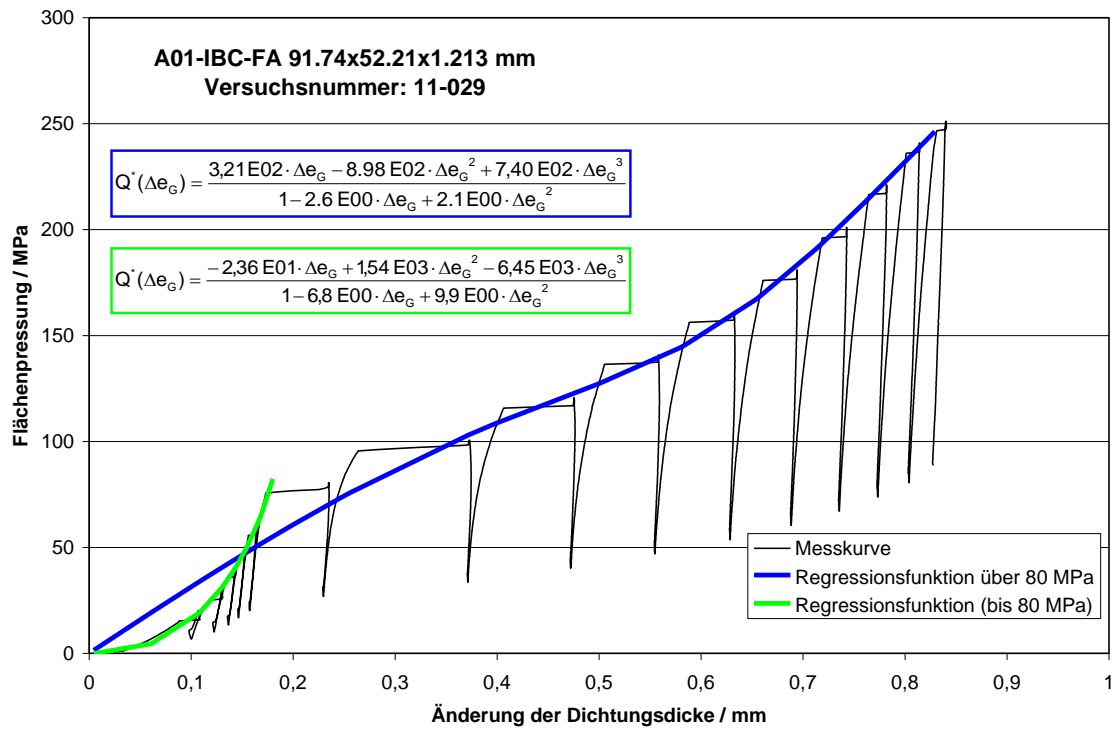
Bild A.9: Stauchkurve einer Kammprofilichtung mit Grafitauflage



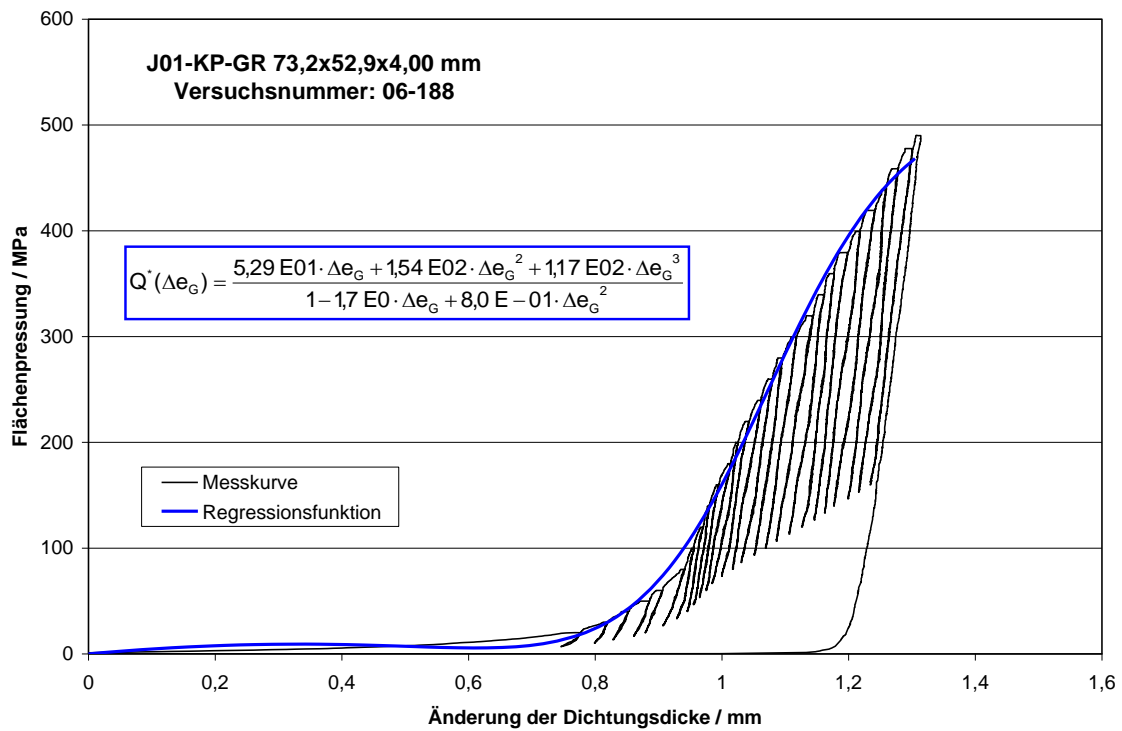
**Bild A.10: Druckstandversuch an einer Flachdichtung aus expandiertem PTFE**



**Bild A.11: Druckstandversuch an einer Flachdichtung aus multidirektionalem PTFE mit Bariumsulfatfüllung**



**Bild A.12: Druckstandversuch an einer Faserdichtung**



**Bild A.13: Druckstandversuch an einer Kammprofildichtung mit Grafitauflage**

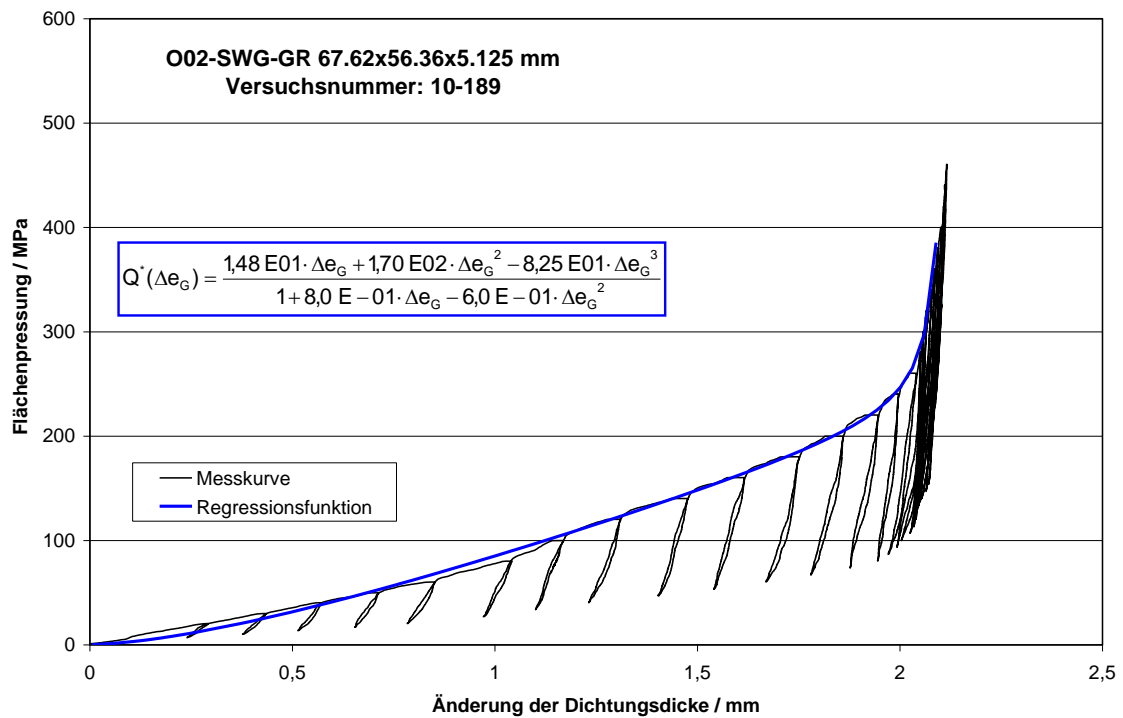


Bild A.14: Druckstandversuch an einer Spiraldichtung mit Grafitfüllung (1)

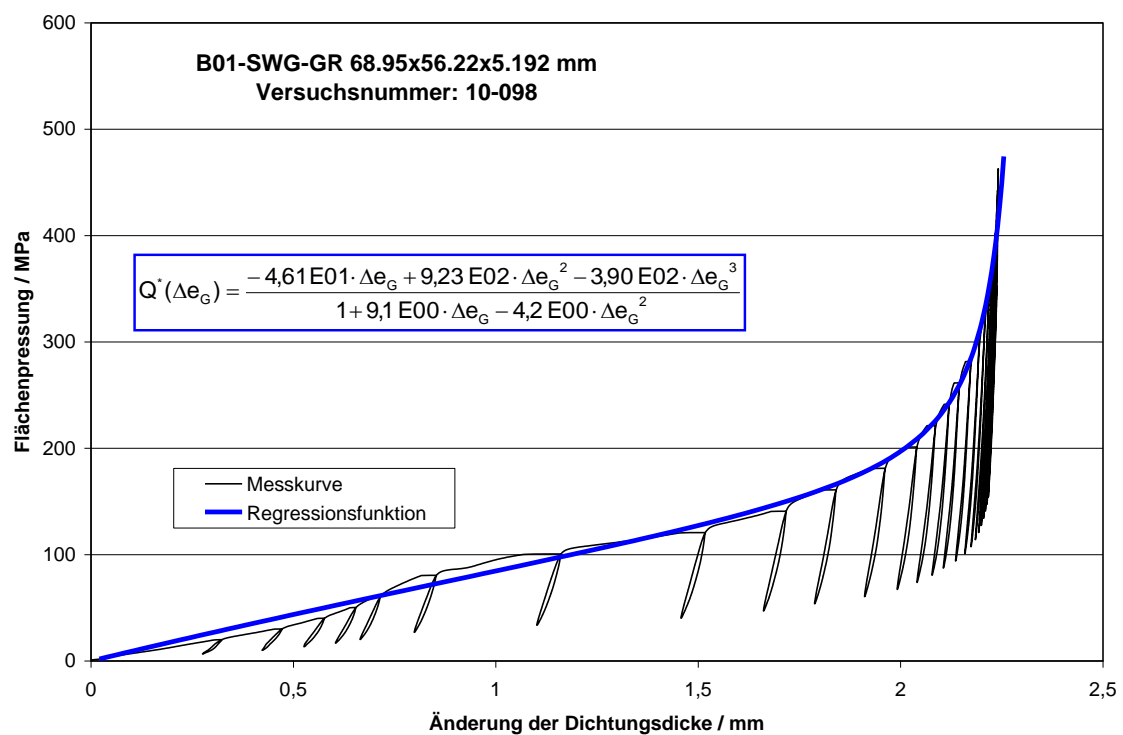
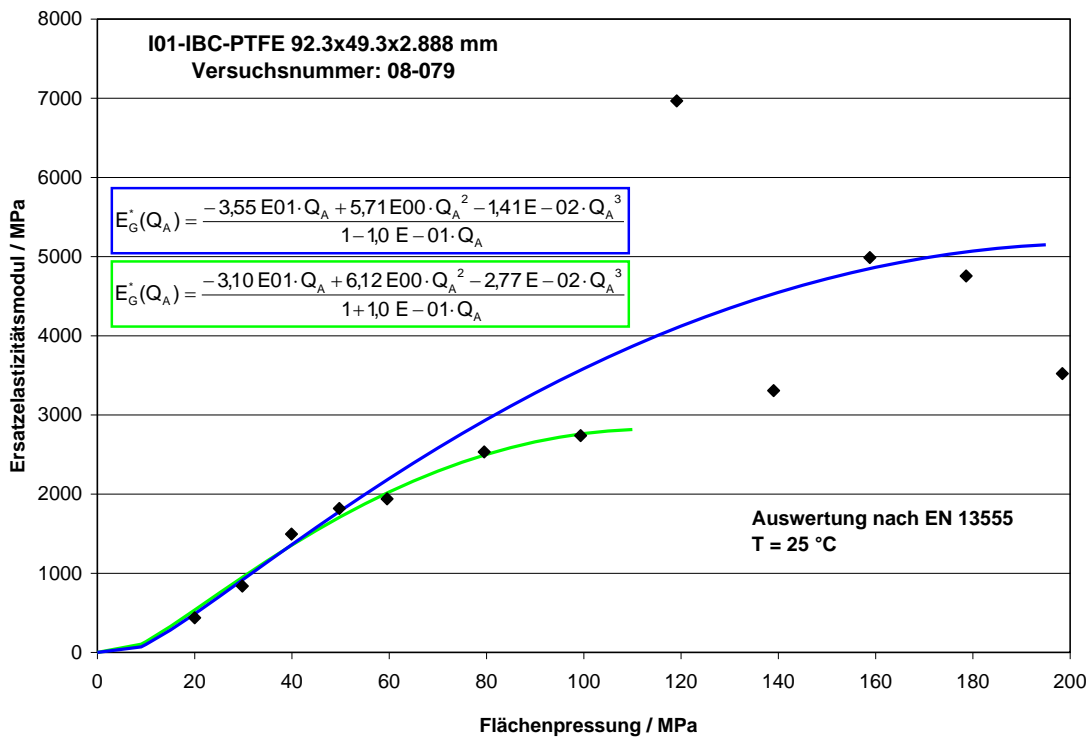
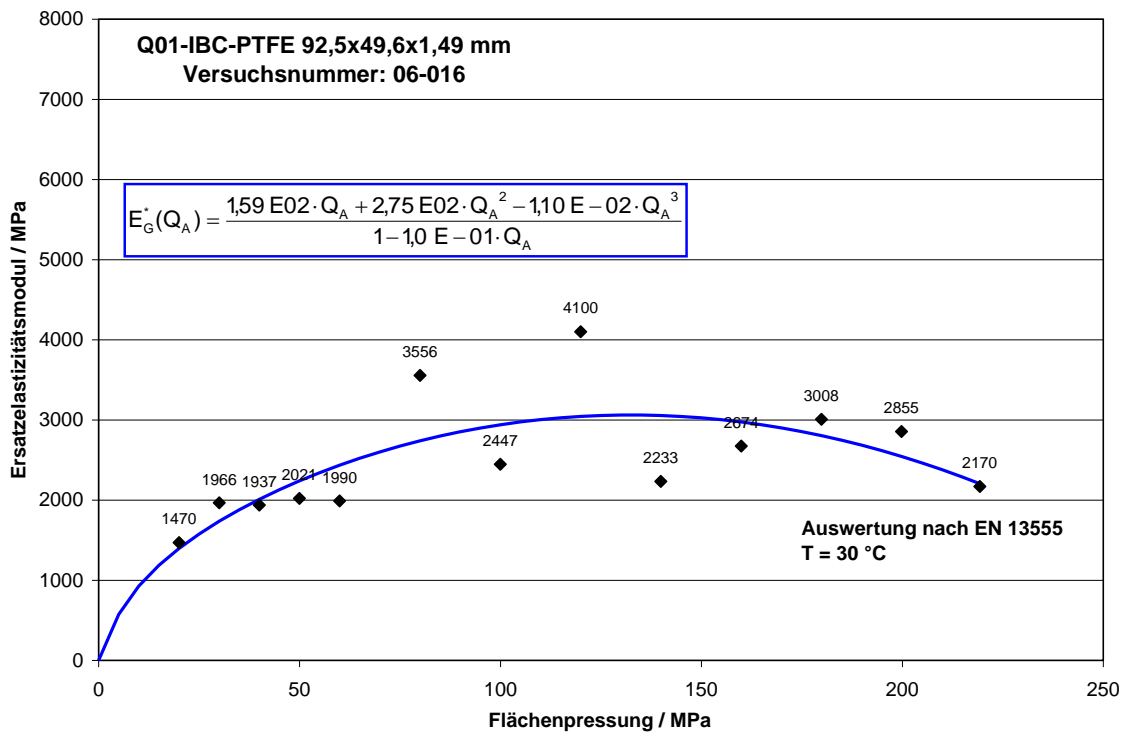


Bild A.15: Druckstandversuch an einer Spiraldichtung mit Grafitfüllung (2)

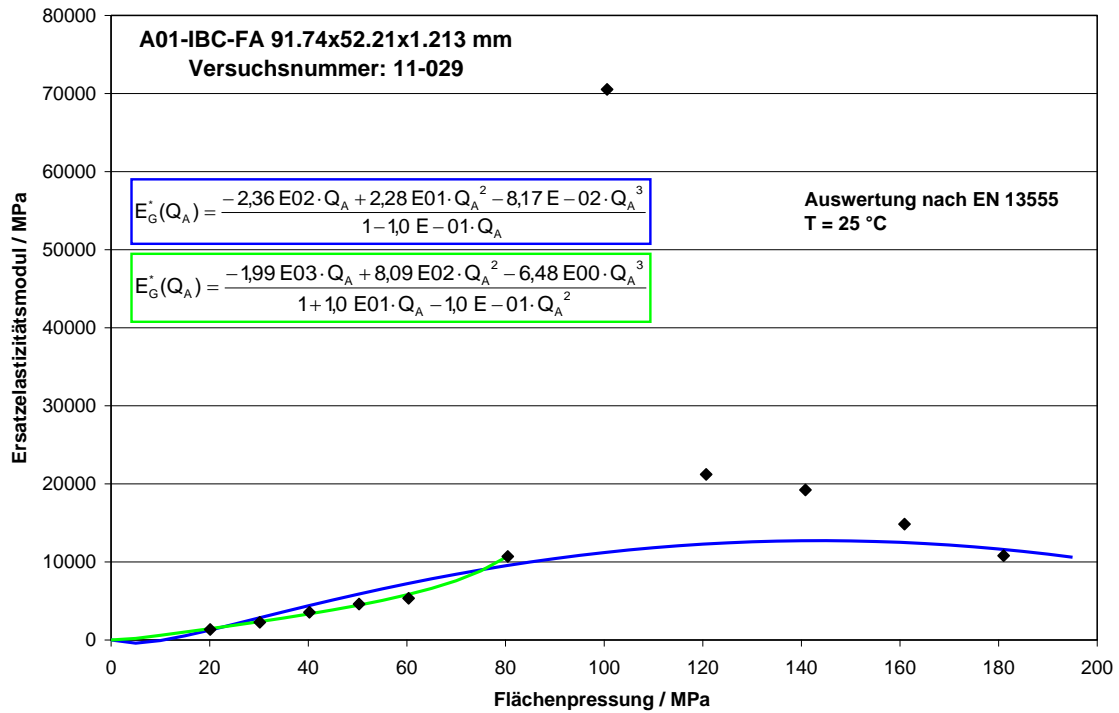




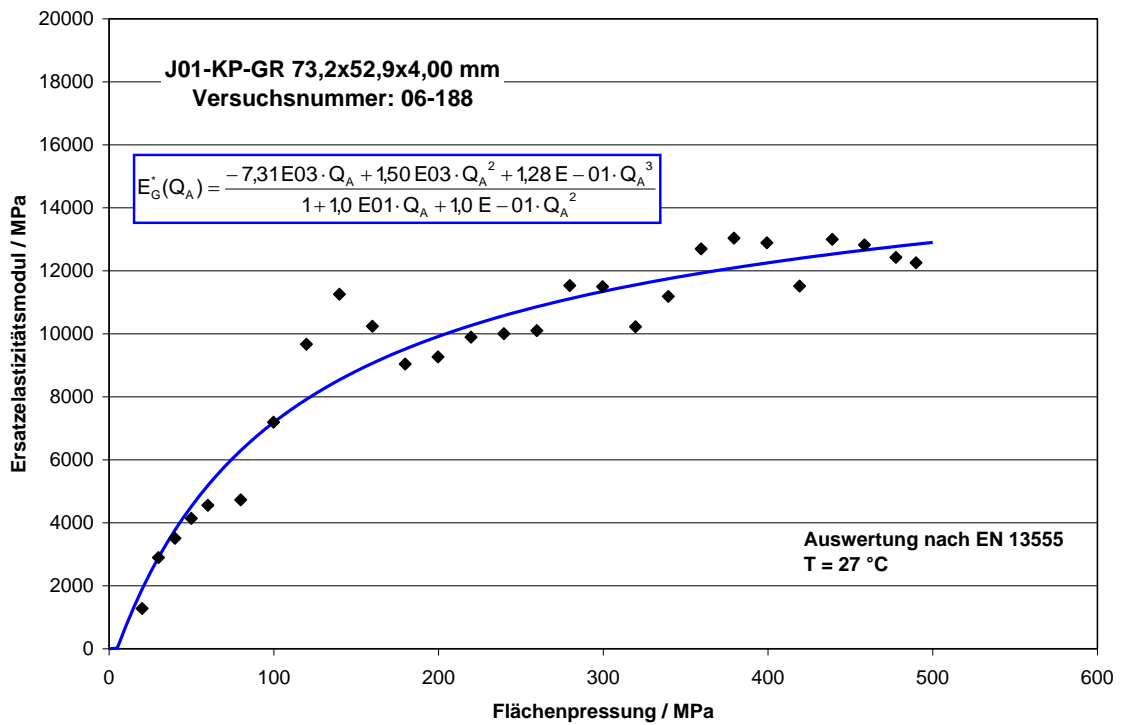
**Bild A.16: Ersatzelastizitätsmodul einer Flachdichtung aus expandiertem PTFE**



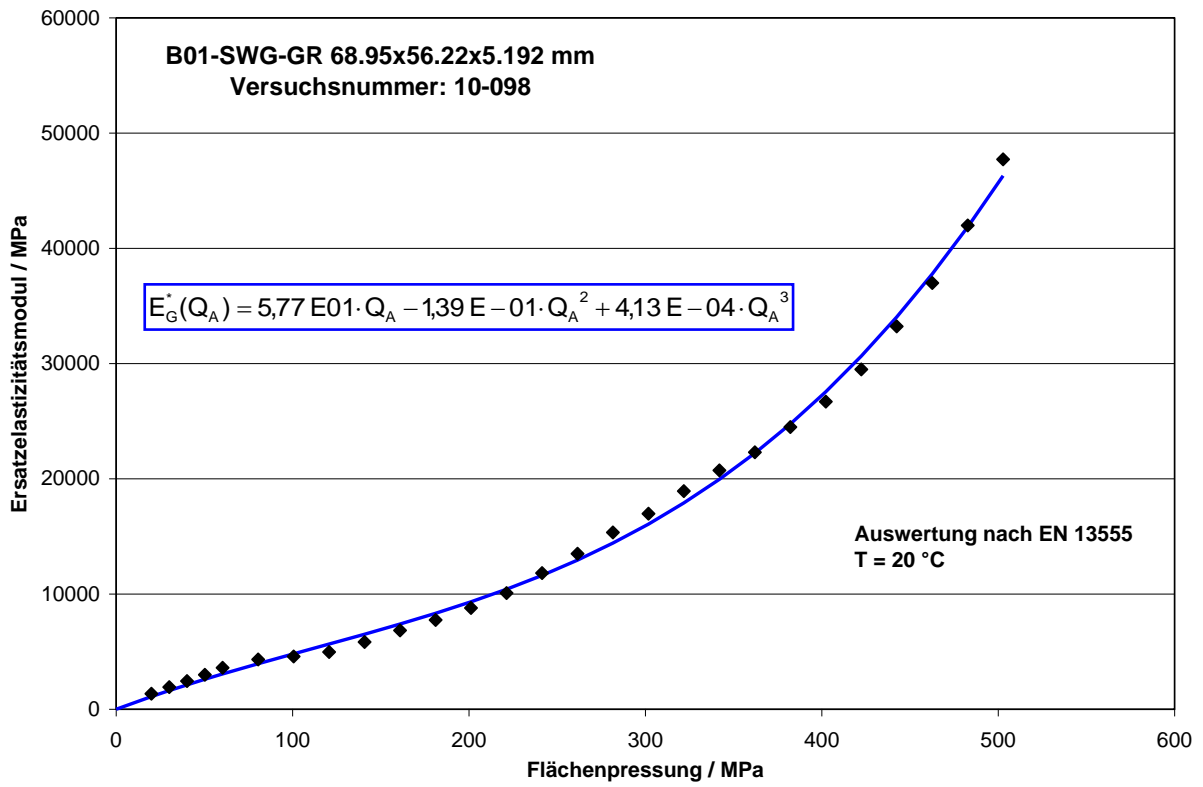
**Bild A.17: Ersatzelastizitätsmodul einer Flachdichtung aus multidirektionalem PTFE mit Bariumsulfatfüllung**



**Bild A.18: Ersatzelastizitätsmodul einer Faserdichtung**



**Bild A.19: Ersatzelastizitätsmodul einer Kammprofilichtung mit Grafitauflage**



**Bild A.20: Ersatzelastizitätsmodul einer Spiraldichtung mit Grafitfüllung**

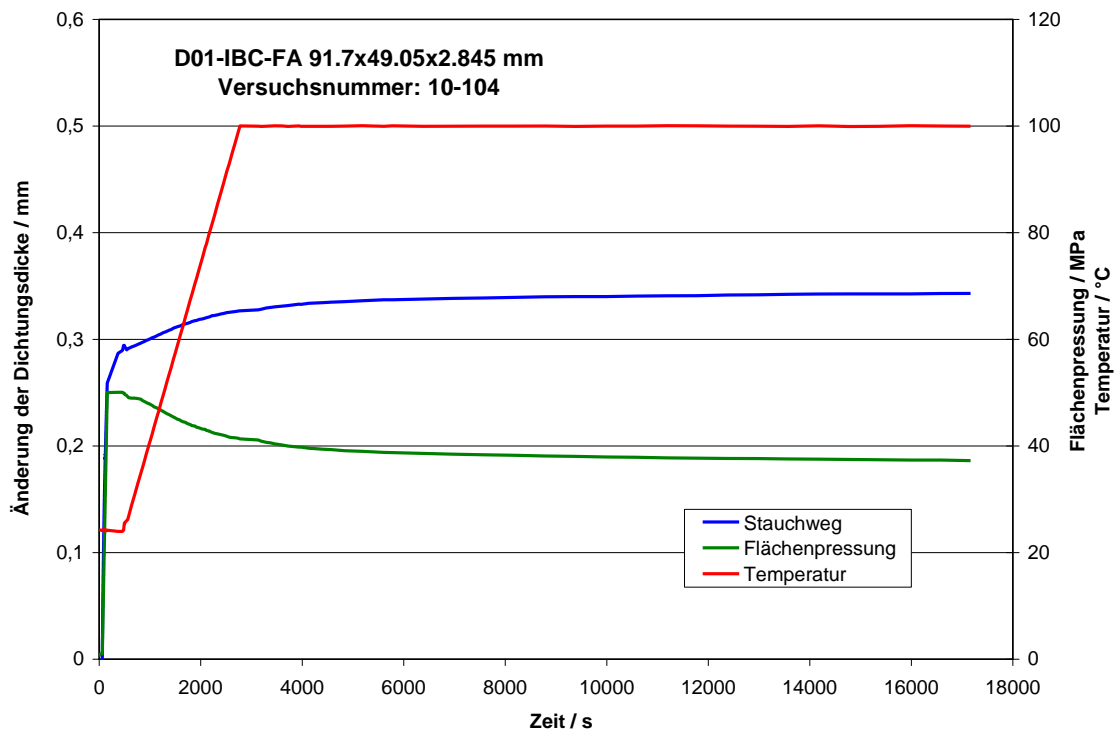


Bild A.21: Zeitlicher Verlauf Kriech-/Relaxationsversuch Faserdichtung

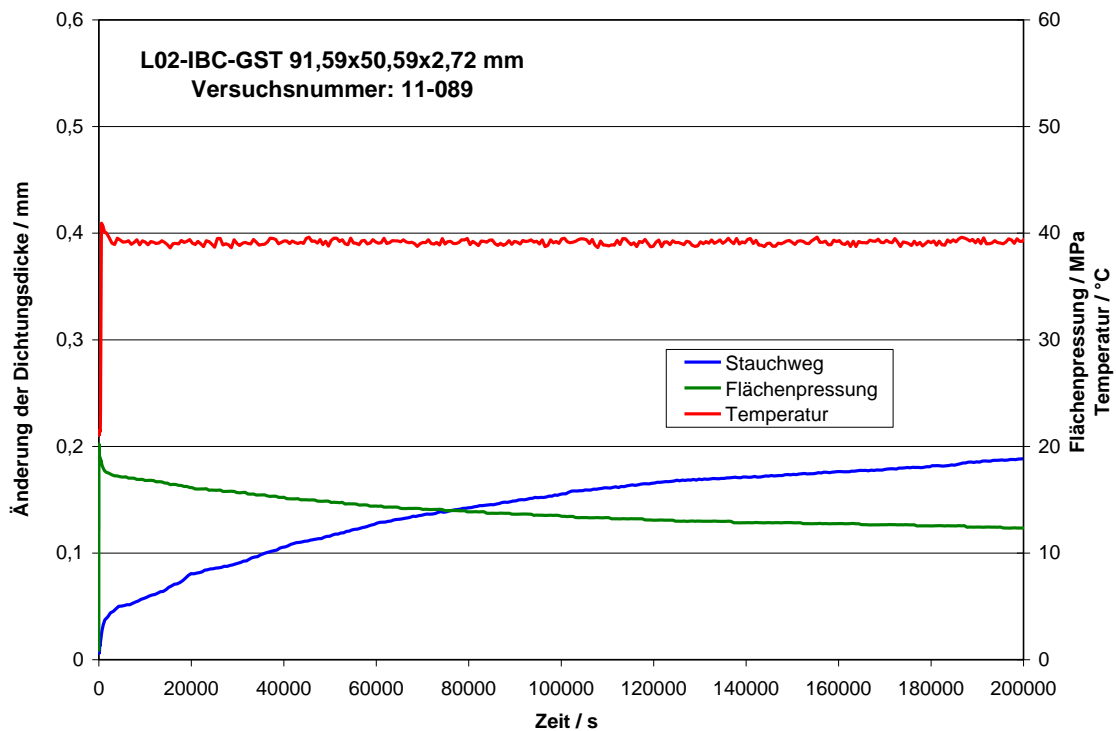


Bild A.22: Zeitlicher Verlauf Kriech-/Relaxationsversuch Gummi-Stahl-Dichtung

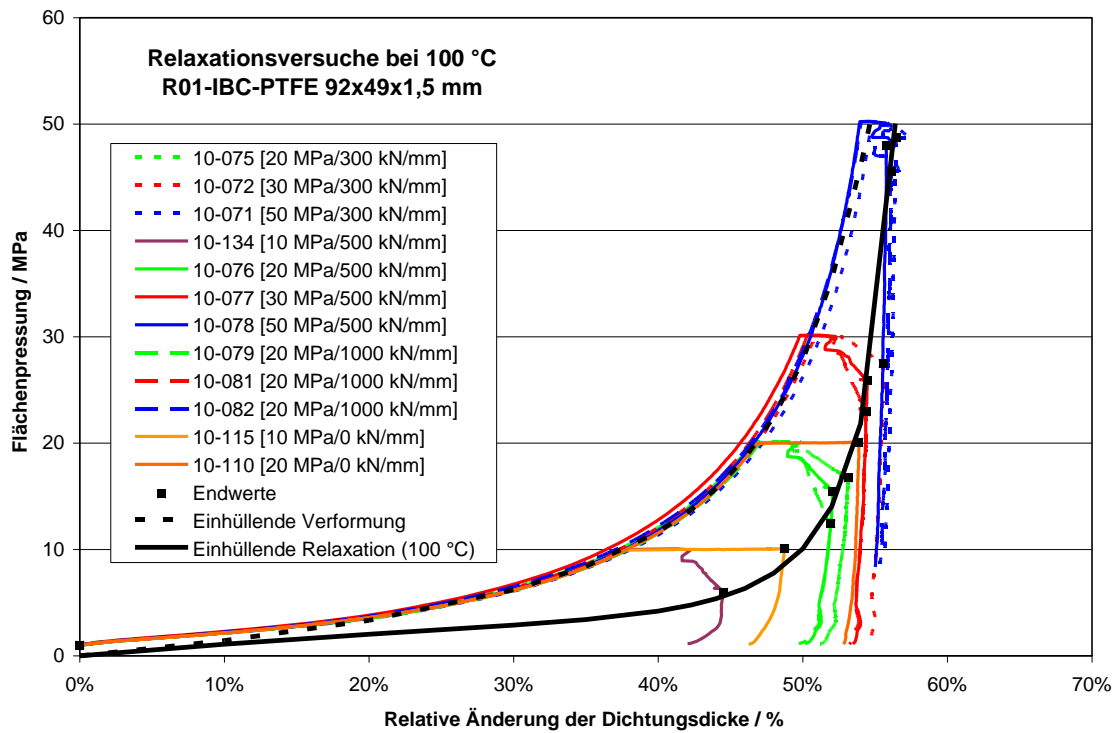


Bild A.23: Kriech-/Relaxationsversuche an einer ePTFE-Dichtung (100 °C)

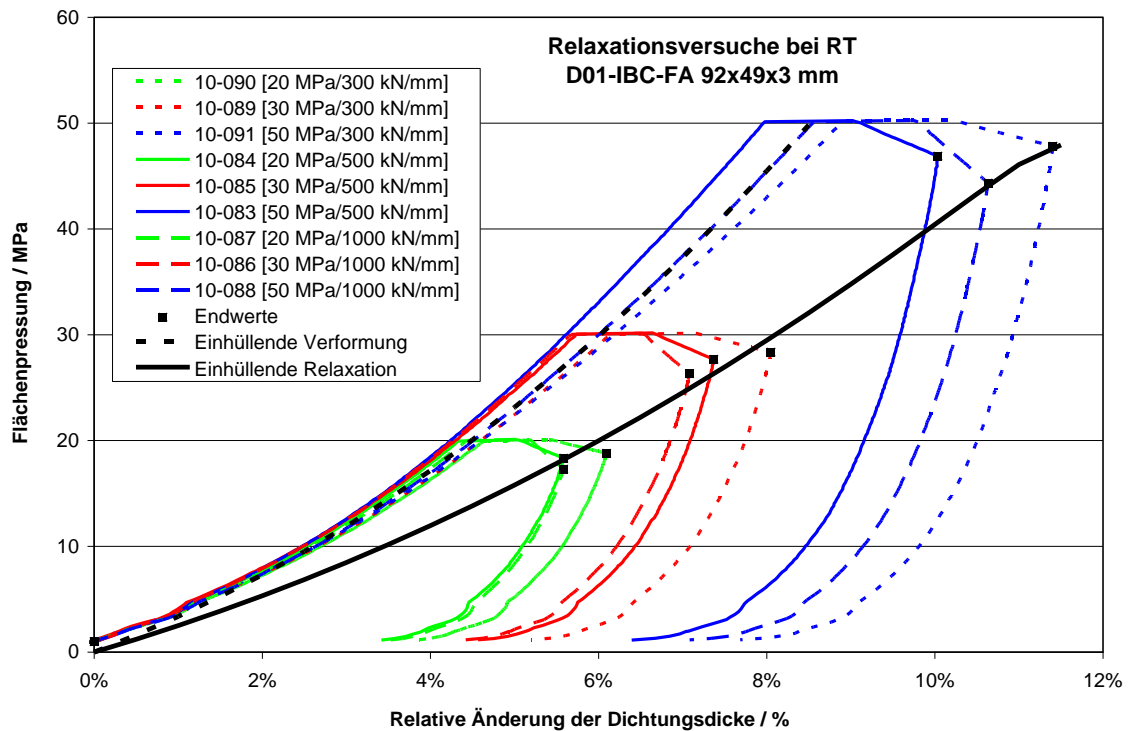
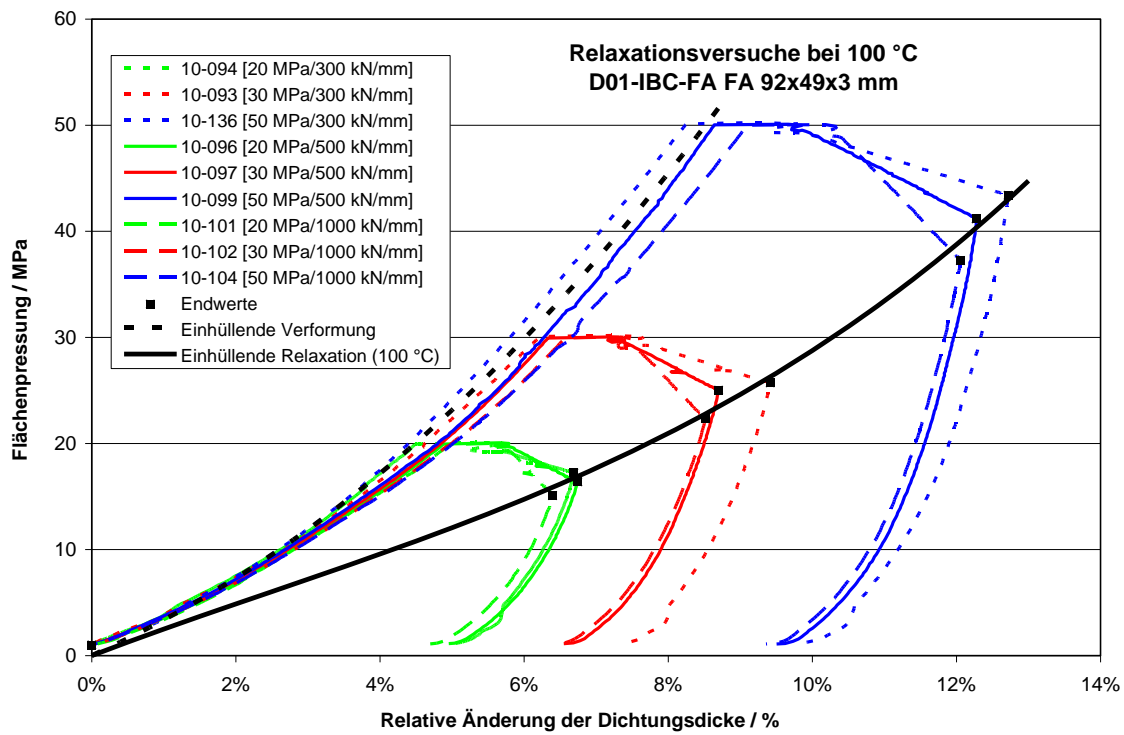
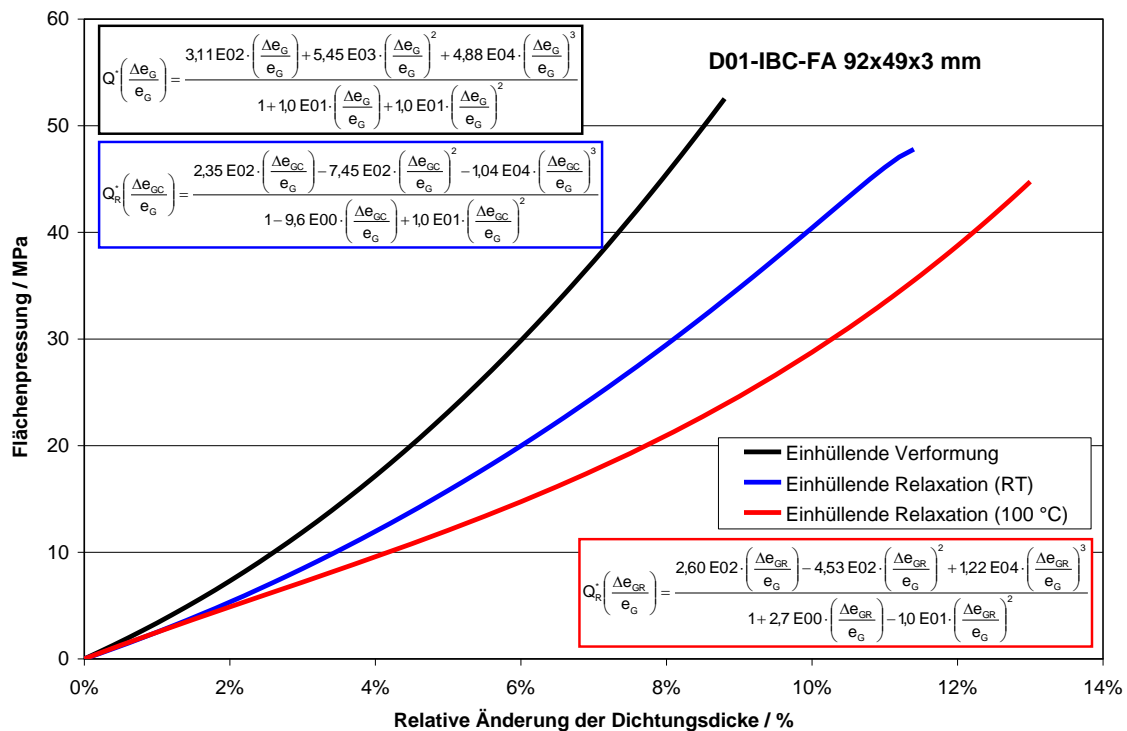


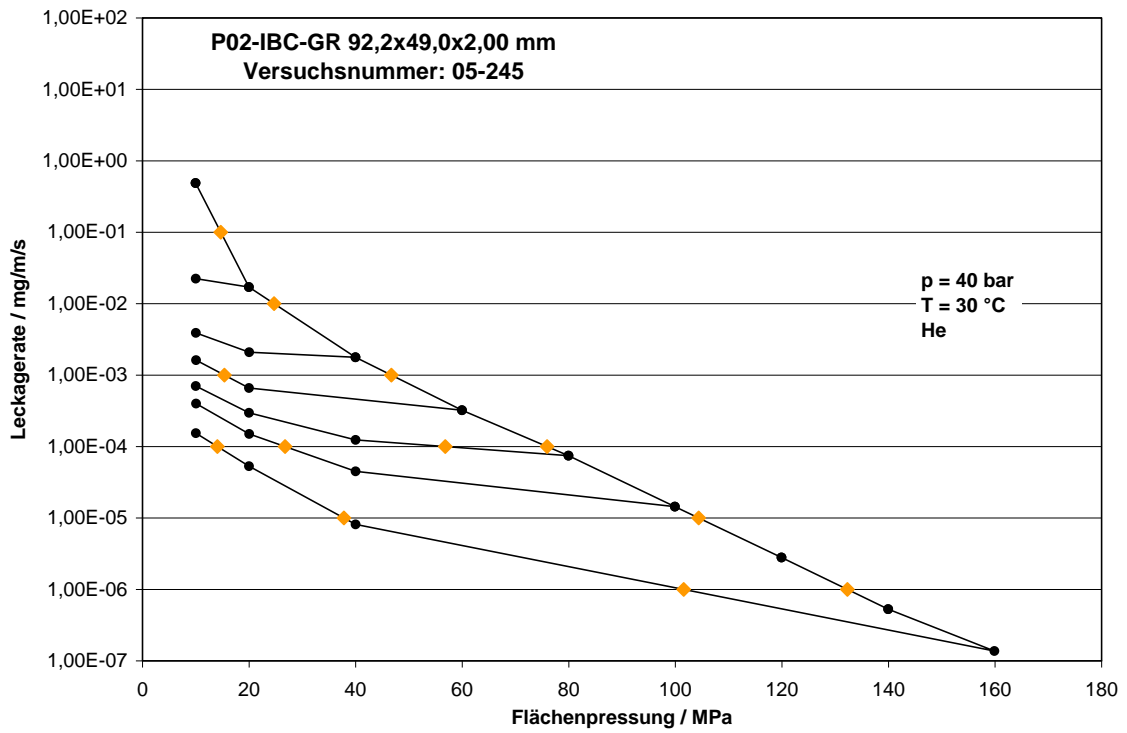
Bild A.24: Kriech-/Relaxationsversuche an einer Faserdichtung (RT)



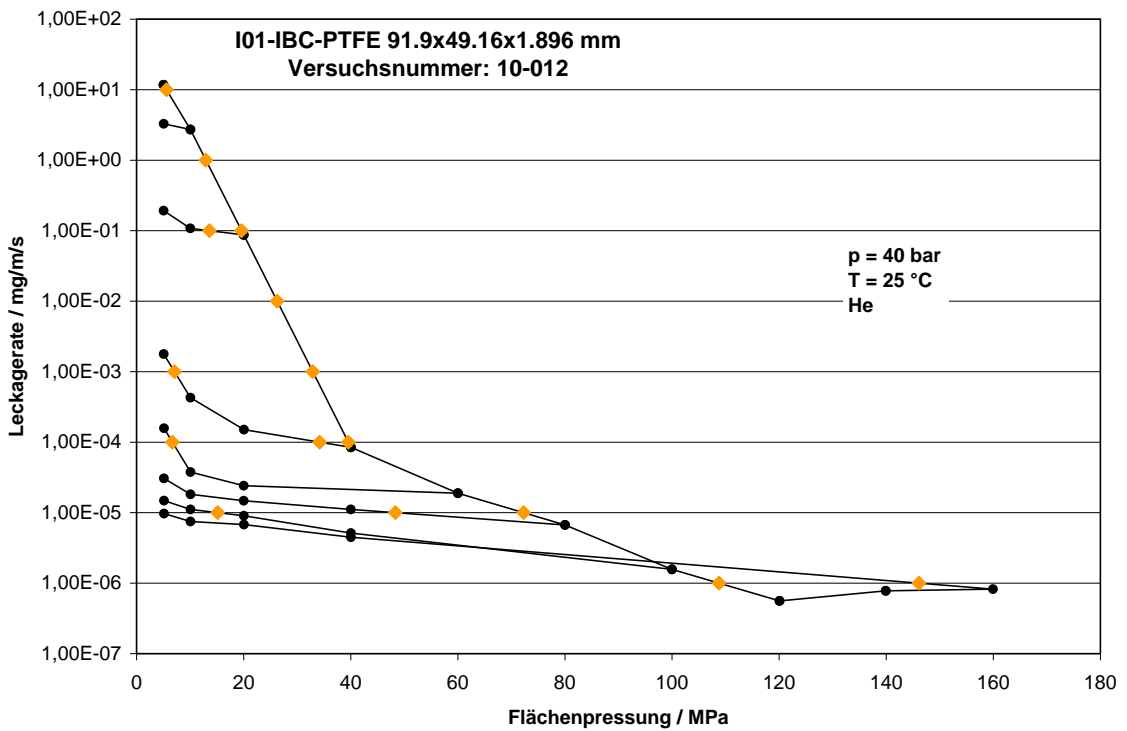
**Bild A.25: Kriech-/Relaxationsversuche an einer Faserdichtung (100 °C)**



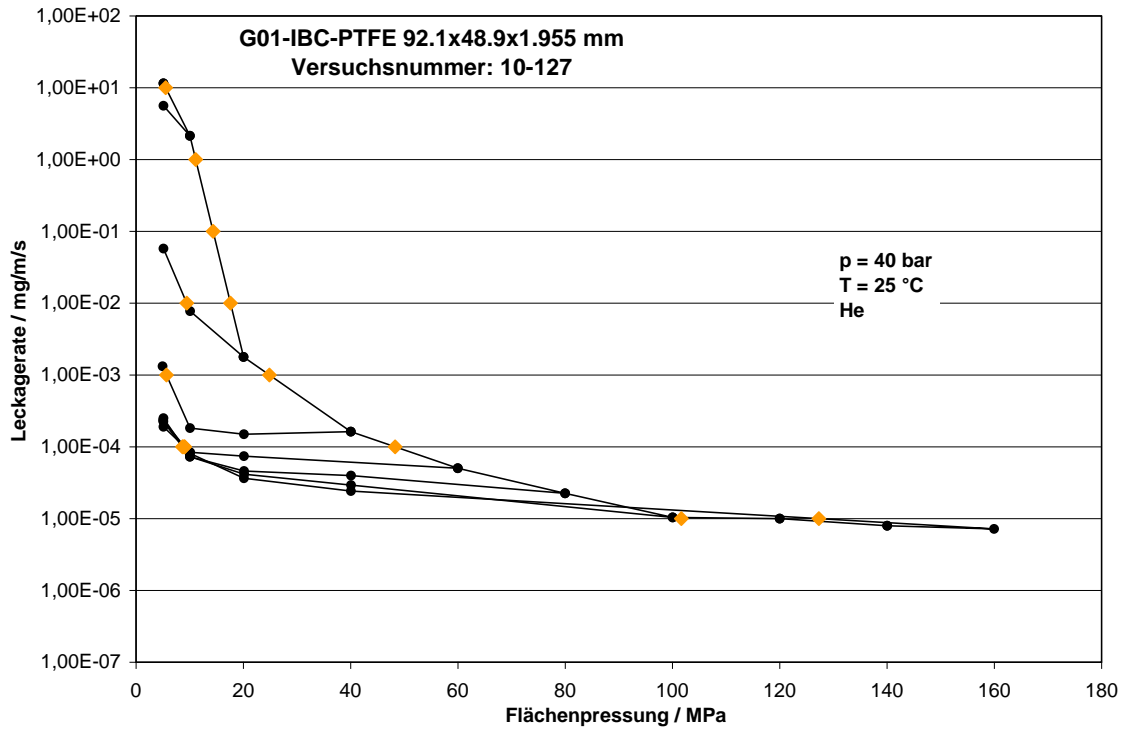
**Bild A.26: Einhüllende Verformungskurven einer Faserdichtung aus mehreren Kriech-/Relaxationsversuchen**



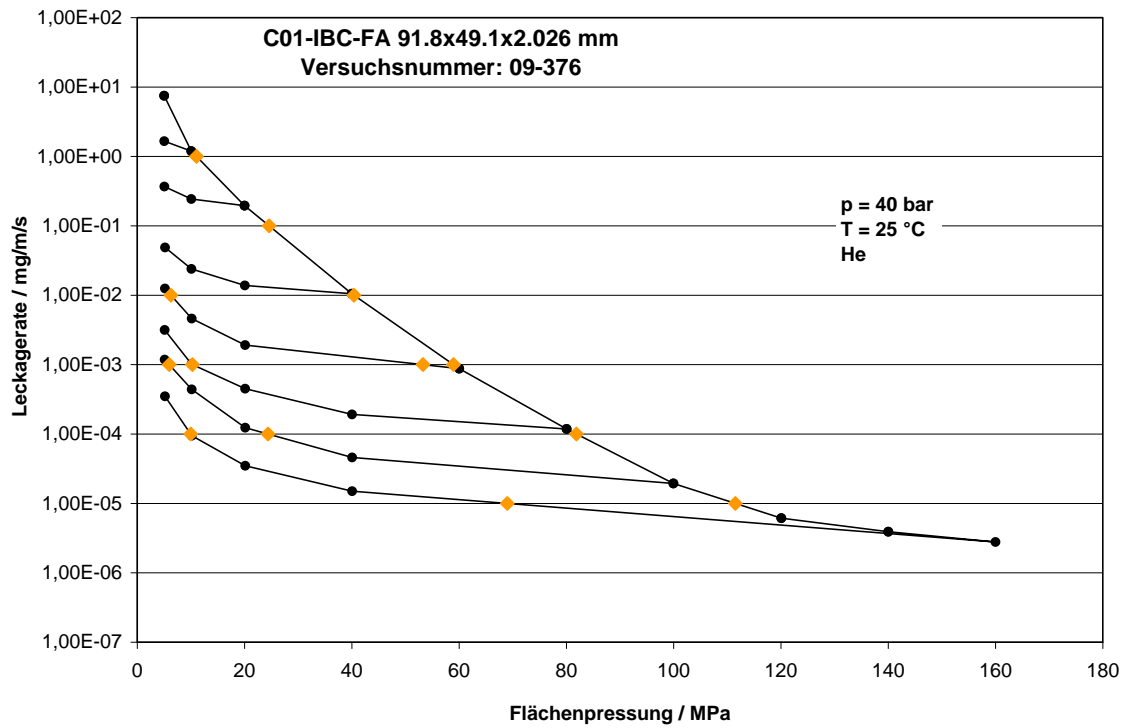
**Bild A.27: Leckagekurve einer Grafitflachdichtung mit Spießblecheinlage**



**Bild A.28: Leckagekurve einer ePTFE-Dichtung**

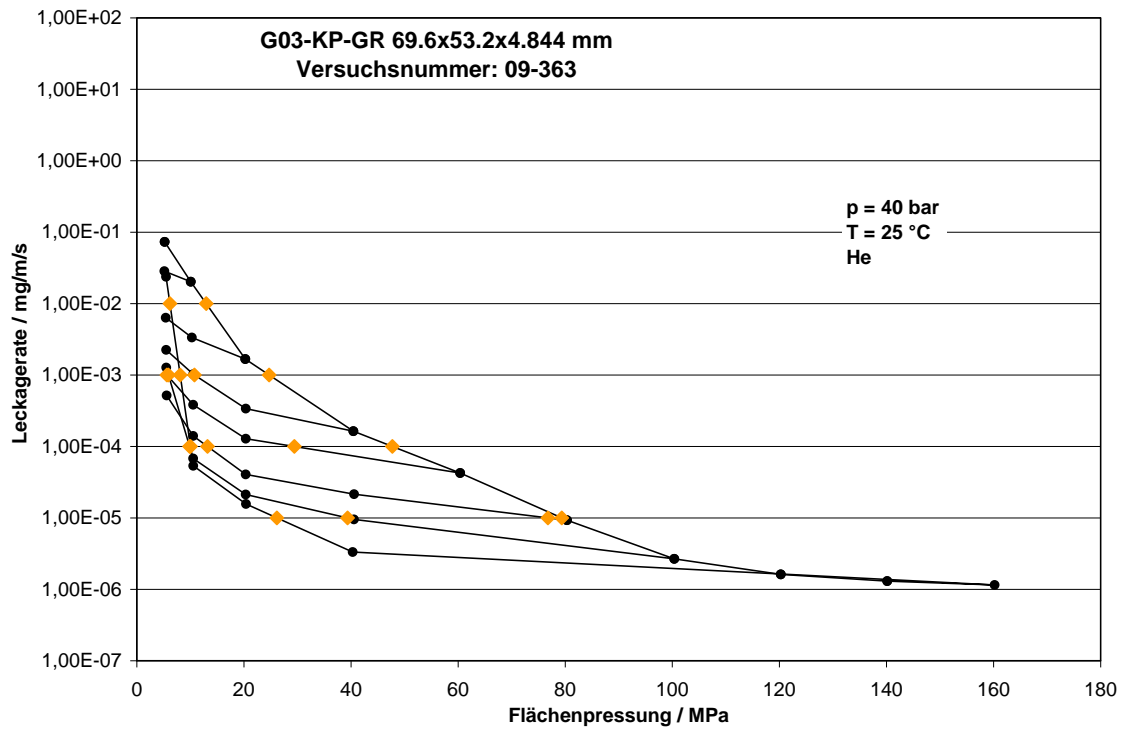


**Bild A.29: Leckagekurve einer biaxial orientierte PTFE-Dichtung mit hohlen Mikrogaskugeln**

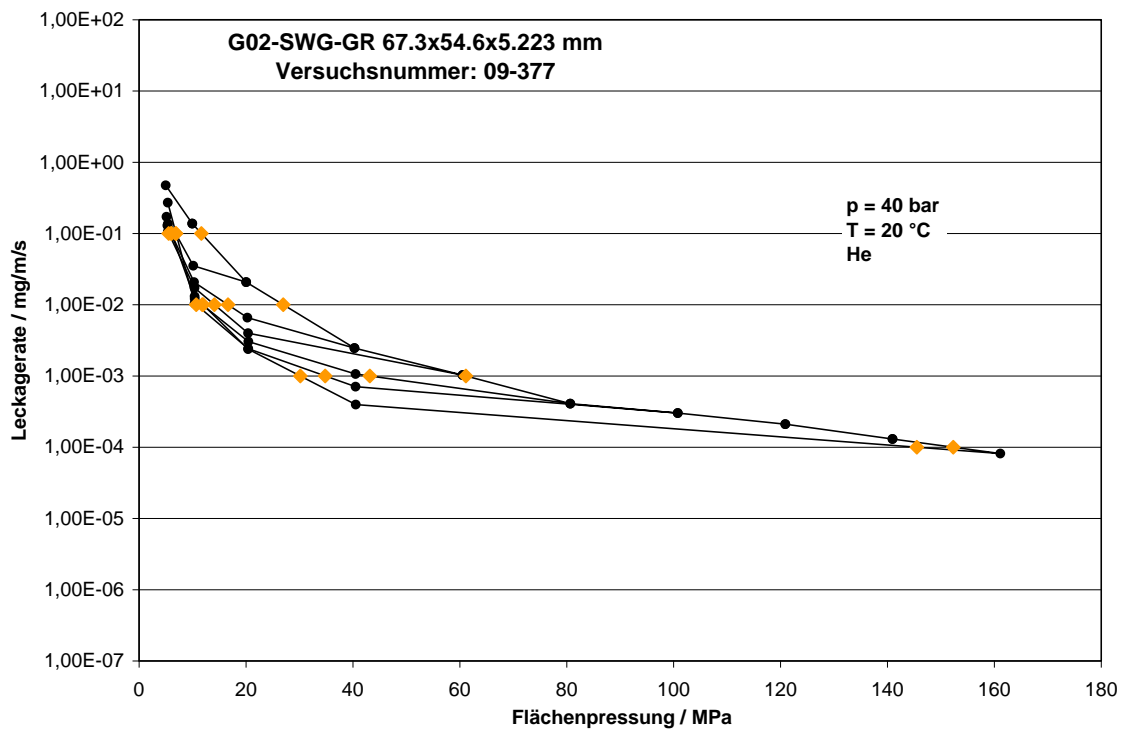


**Bild A.30: Leckagekurve einer Faserdichtung (Glasfaser, NBR)**

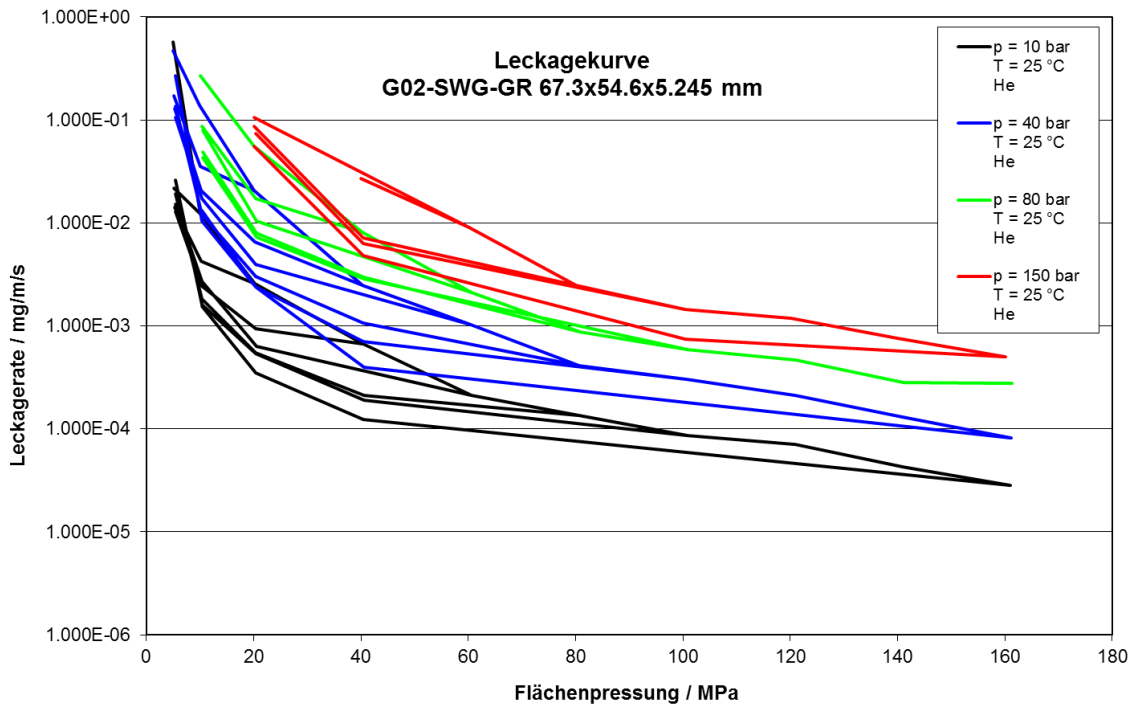




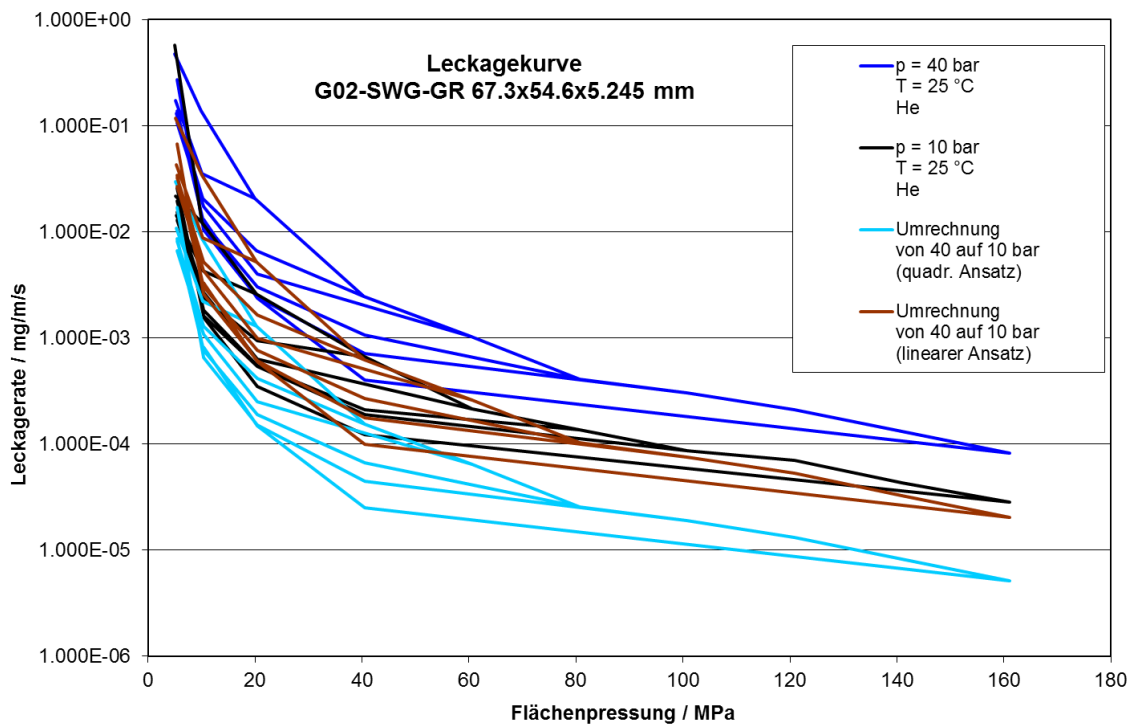
**Bild A.31: Leckagekurve einer Kammprofildichtung mit Grafitauflage**



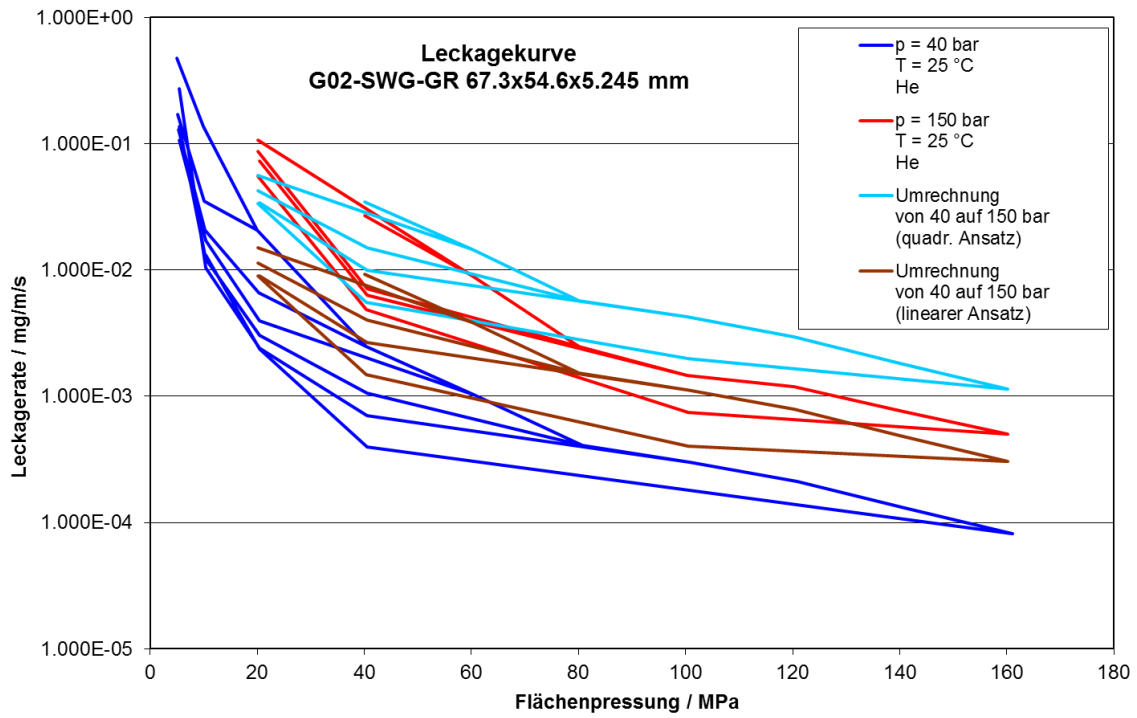
**Bild A.32: Leckagekurve einer Spiraldichtung mit Grafitfüllung**



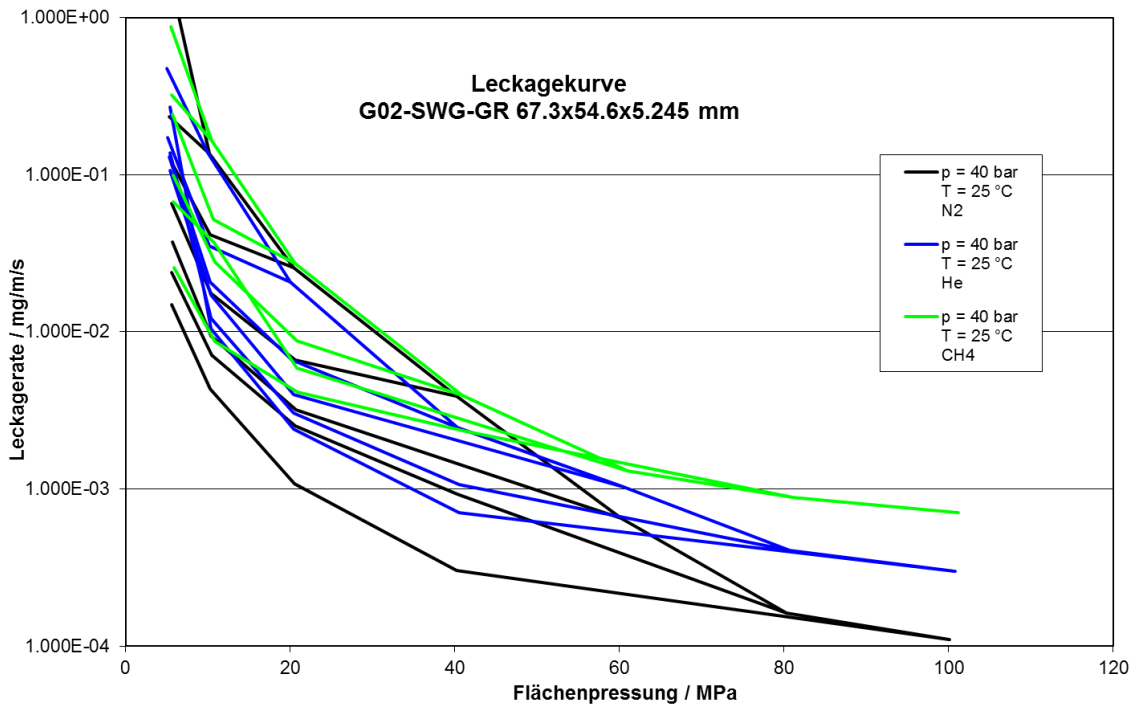
**Bild A.33: Leckageversuche an einer Spiraldichtung bei vier unterschiedlichen Innendruckstufen**



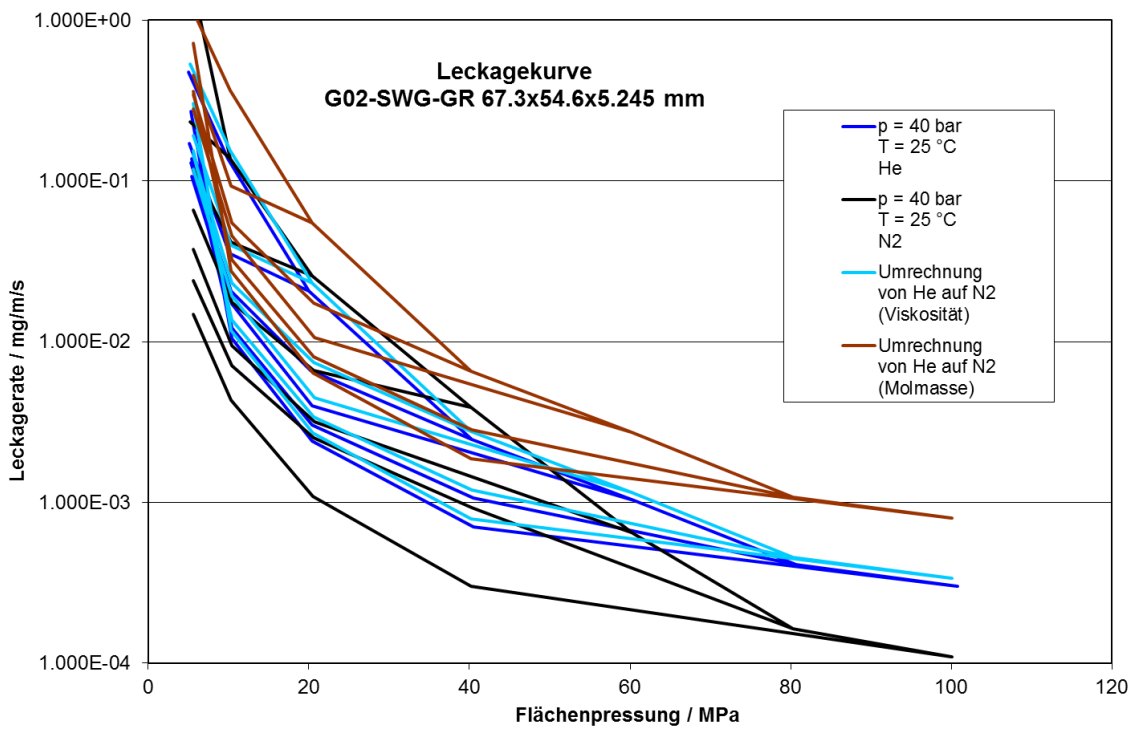
**Bild A.34: Umrechnung der Leckagerate von 40 bar auf 10 bar**



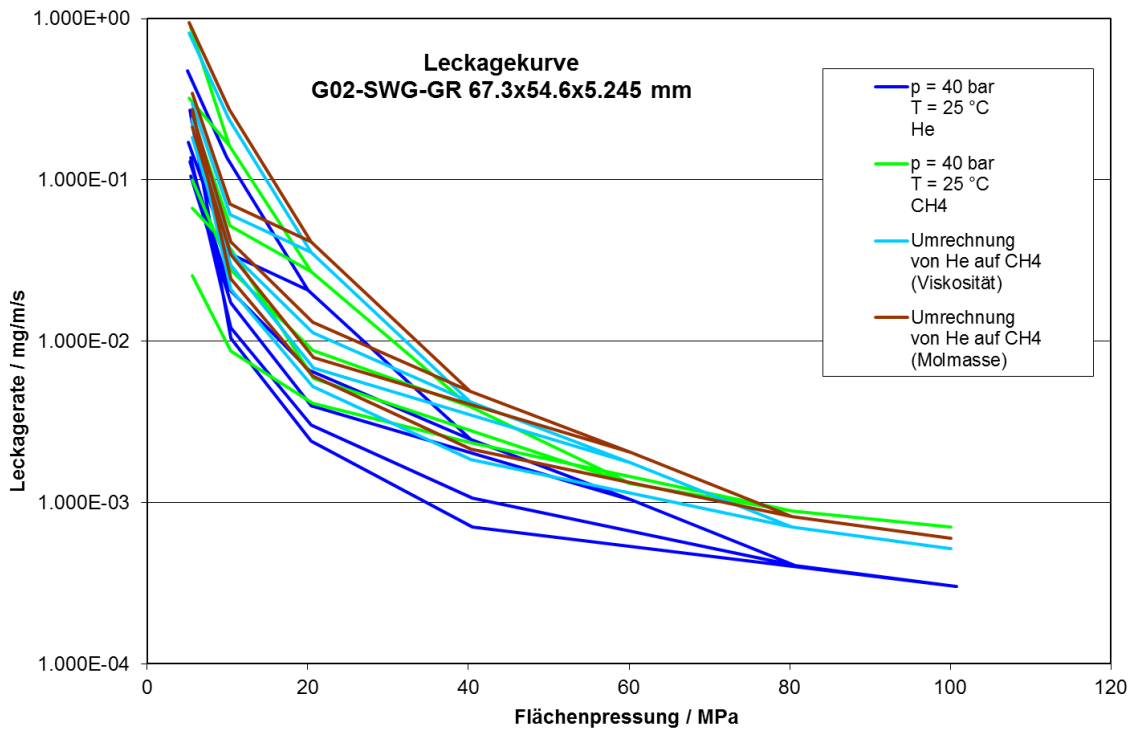
**Bild A.35: Umrechnung der Leckagerate von 40 bar auf 150 bar**



**Bild A.36: Leckageversuche an einer Spiraldichtung mit unterschiedlichen Prüfmedien**



**Bild A.37: Umrechnung der Leckagerate von Helium auf Stickstoff**



**Bild A.38: Umrechnung der Leckagerate von Helium auf Methan**

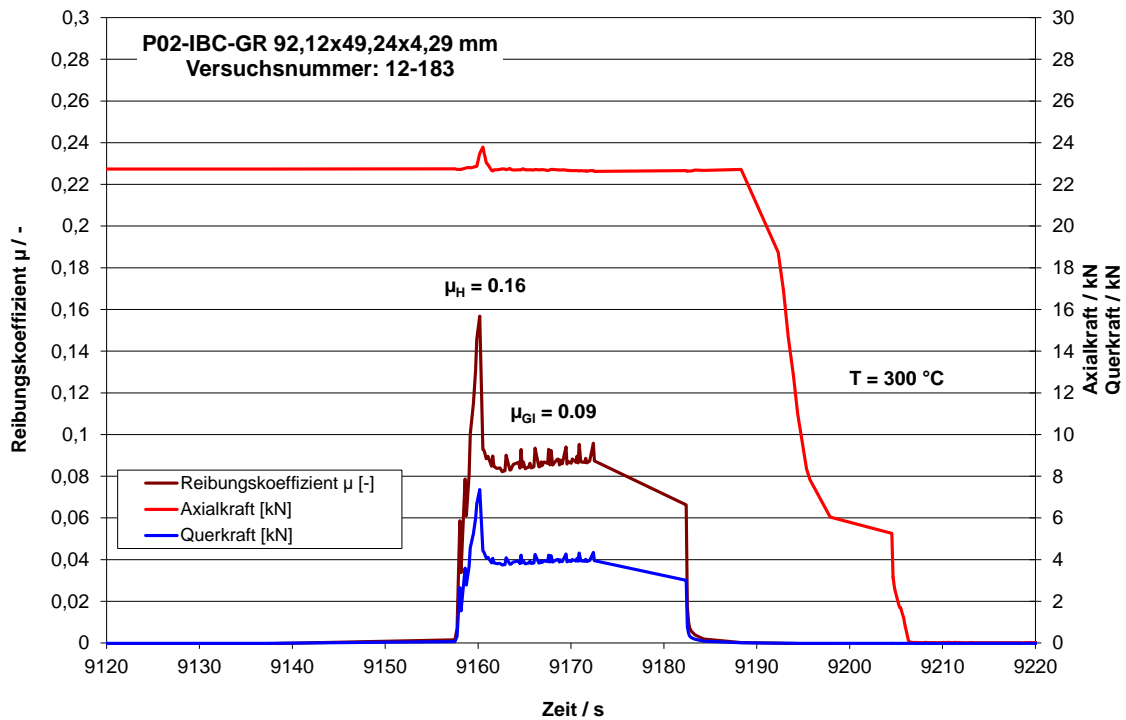


Bild A.39: Reibversuch einer Grafitdichtung mit Spießblecheinlage (300 °C)

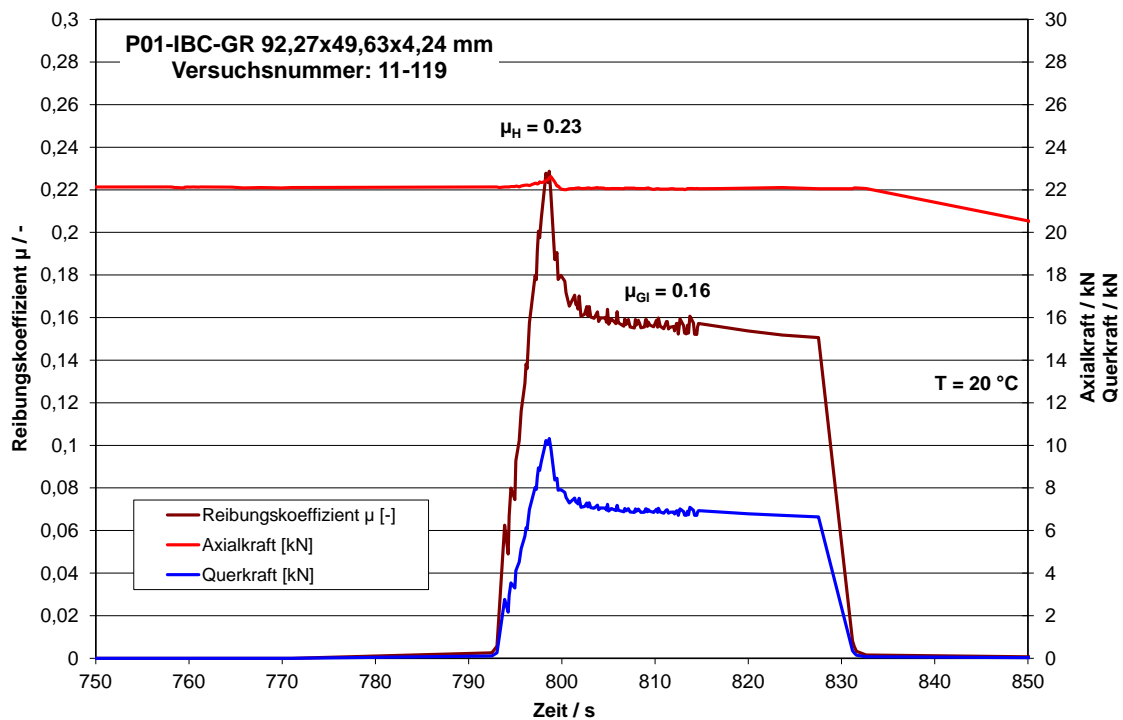
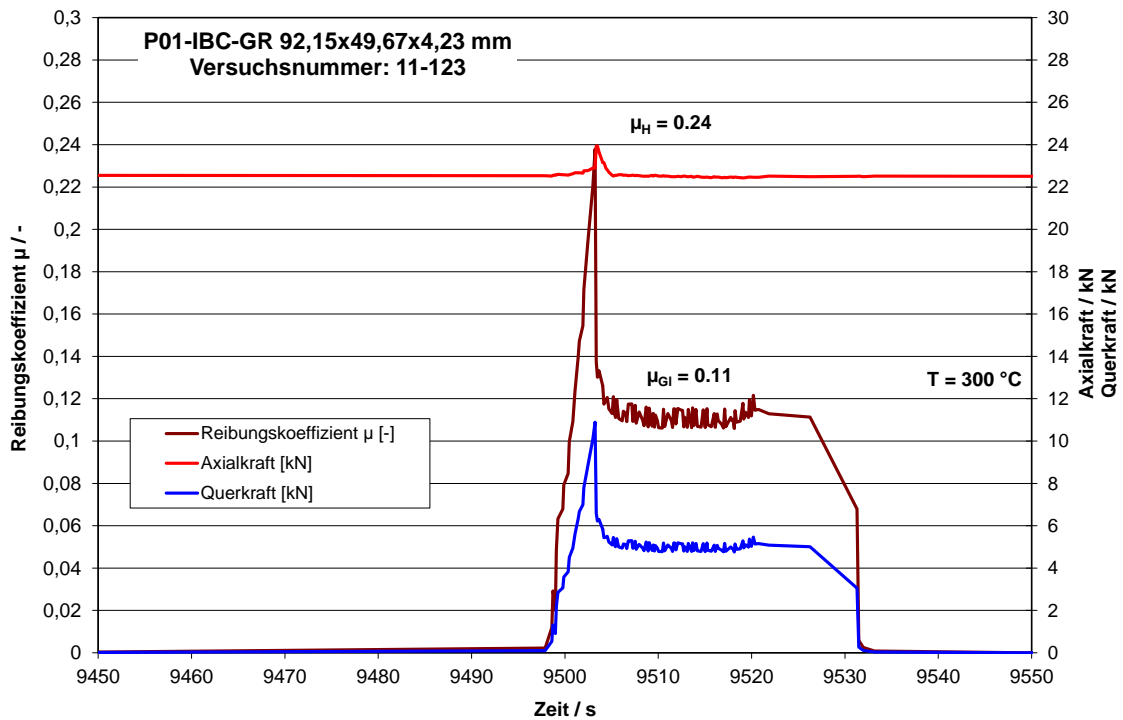
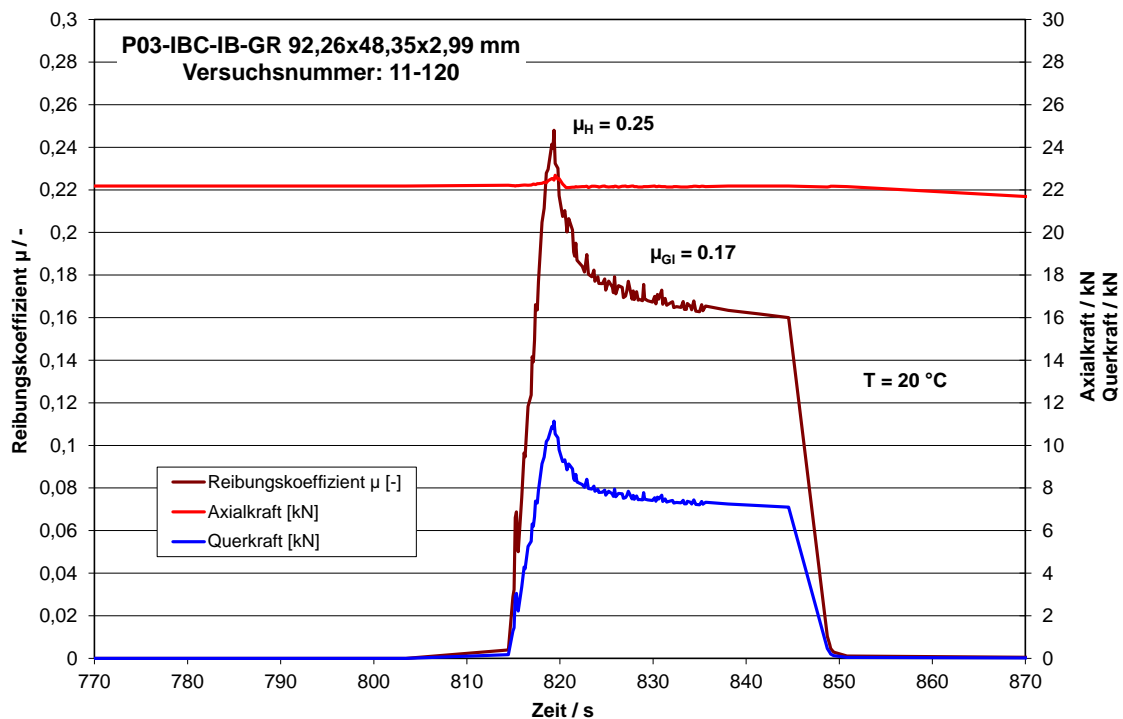
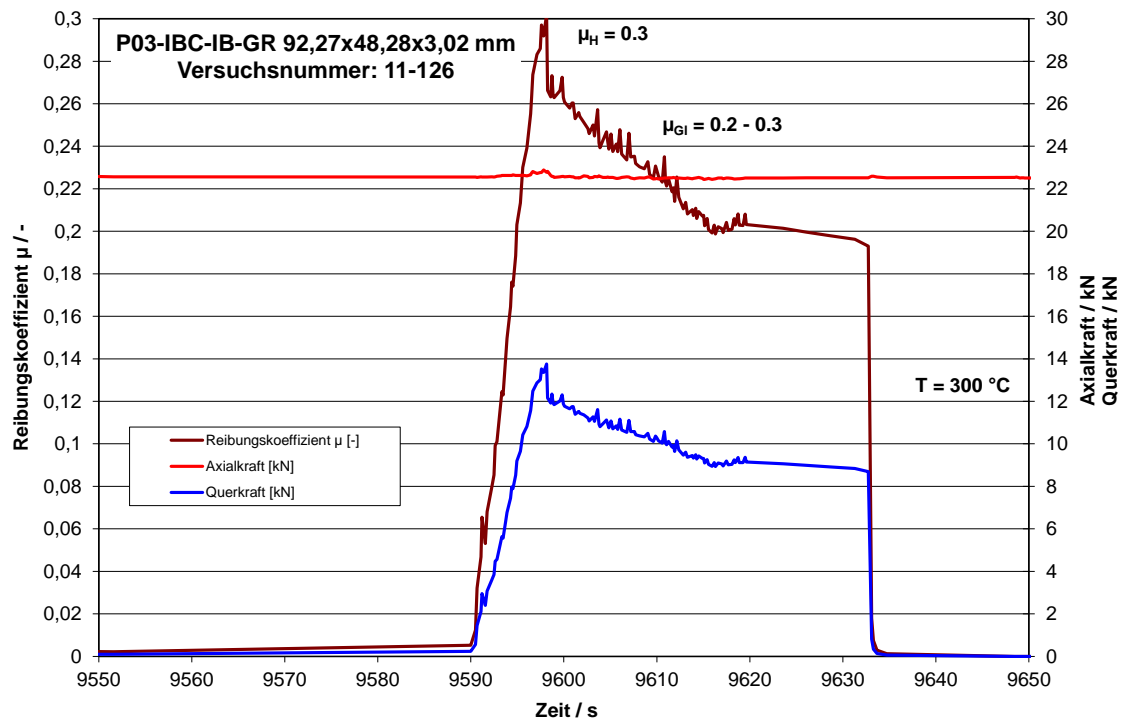


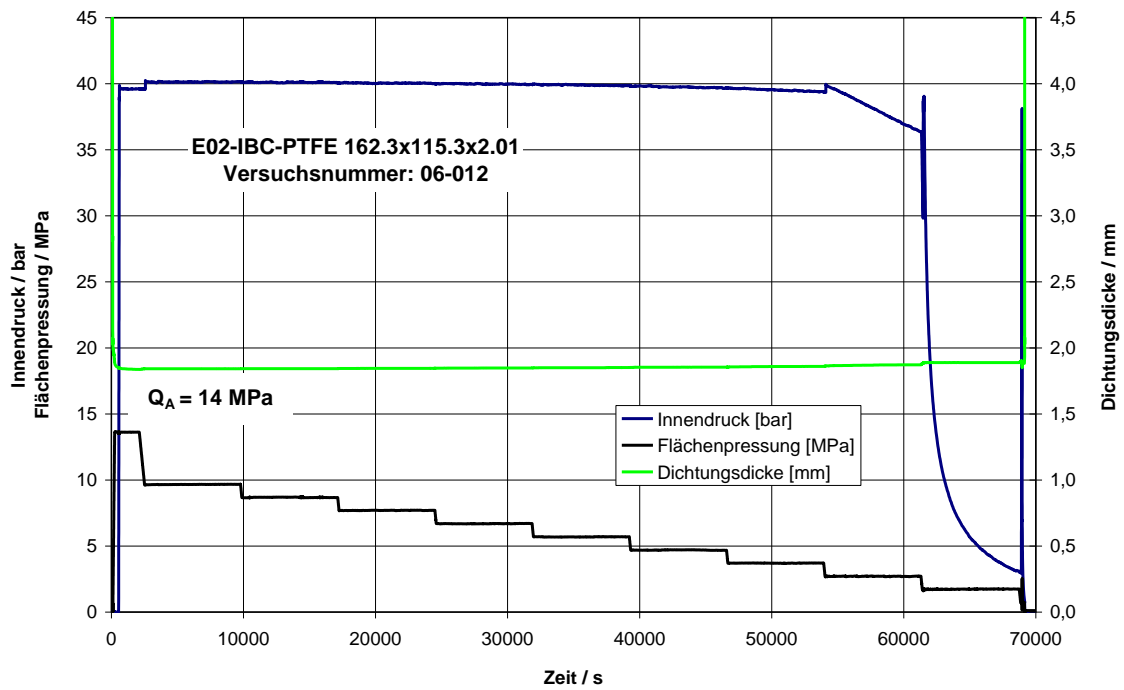
Bild A.40: Reibversuch einer Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen (RT)

**Bild A.41: Reibversuch einer Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen (300 °C)****Bild A.42: Reibversuch einer Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen und Innenbördel (RT)**

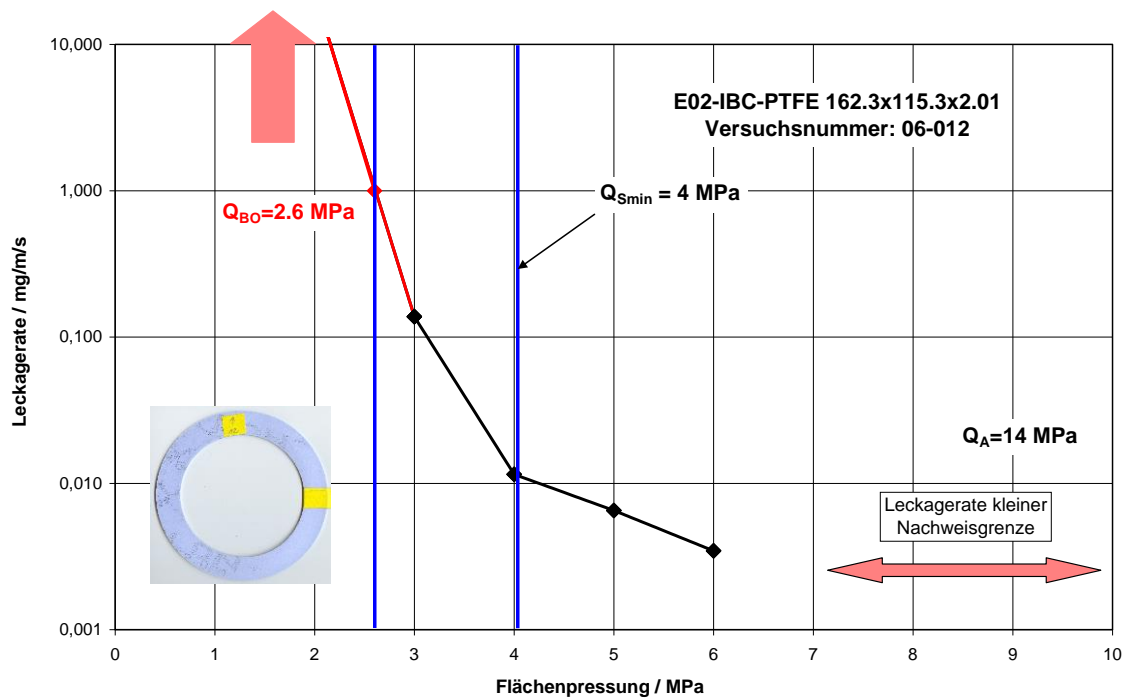


**Bild A.43: Reibversuch einer Grafitdichtung mit Glattblecheinlagen und Innenbördel (300 °C)**





**Bild A.44:** Versuchsablauf mit stufenweiser Entlastung der Flächenpressung im Ausblasversuch (PTFE-Dichtung)



**Bild A.45:** Ermittlung der Leckagerate bei stufenweiser Entlastung der Flächenpressung (PTFE-Dichtung)



## **B Analytische Verfahren zum Festigkeits- und Dichtheitsnachweis**



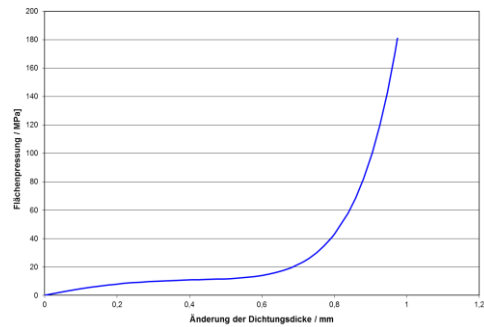
**Tabelle B.1: Bestimmung der Dichtungsverformung im Einbauzustand****Flanschverbindung DN600/PN10****Flansche**

nach EN 1092-1

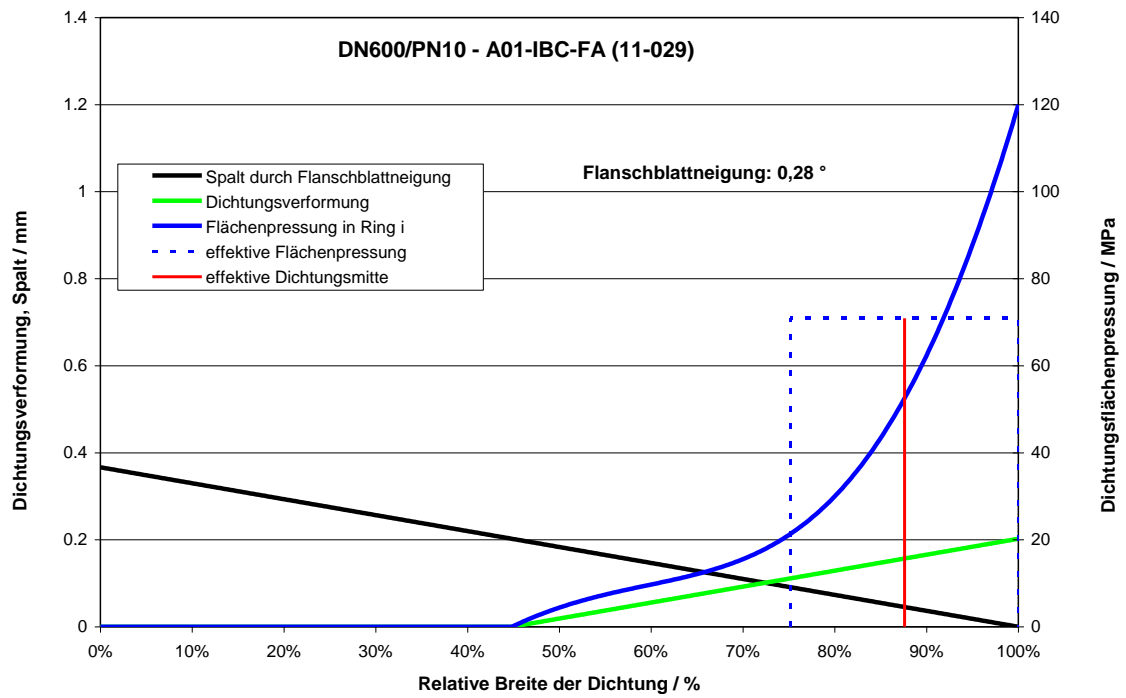
Elastizitätsmodul bei Drehung:	$Z_F$	3,92E-05	1/mm <sup>3</sup>
Elastizitätsmodul:	$E_F$	2,12E+05	MPa
Schraubenlochkreis:	$d_{3e}$	714,39	mm

**Dichtung**

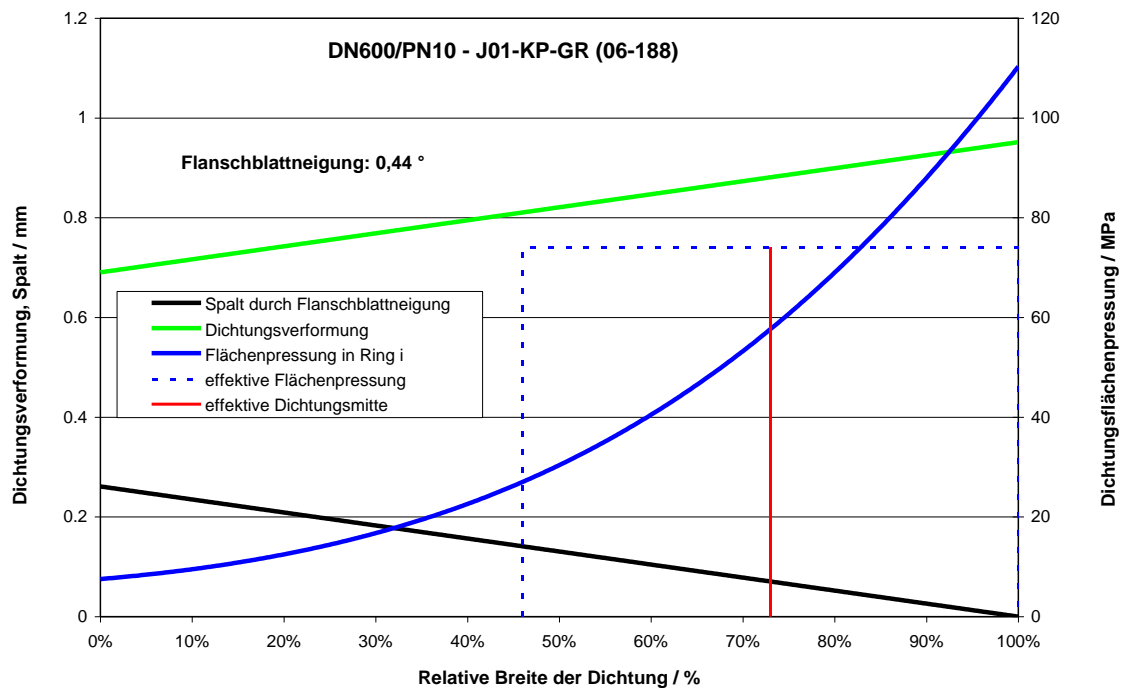
Aussendurchmesser:	$d_{G2}$	685	mm
Innendurchmesser:	$d_{G1}$	610	mm
Theoretische Breite:	$b_{Gt}$	37,5	mm
Dichtungsfläche:	$A_{Ge}$	76282	mm <sup>2</sup>
Dichtungshöhe:	$e_G$	2	mm
Dichtungswerkstoff:	P02-IBC-GR (05-233)		
Verformungsparameter	$A_1$	5,36E+01	-
	$A_2$	-1,44E+02	-
	$A_3$	1,13E+02	-
	$B_1$	-1,40E+00	-
	$B_2$	5,00E-01	-

**Ergebnisse**

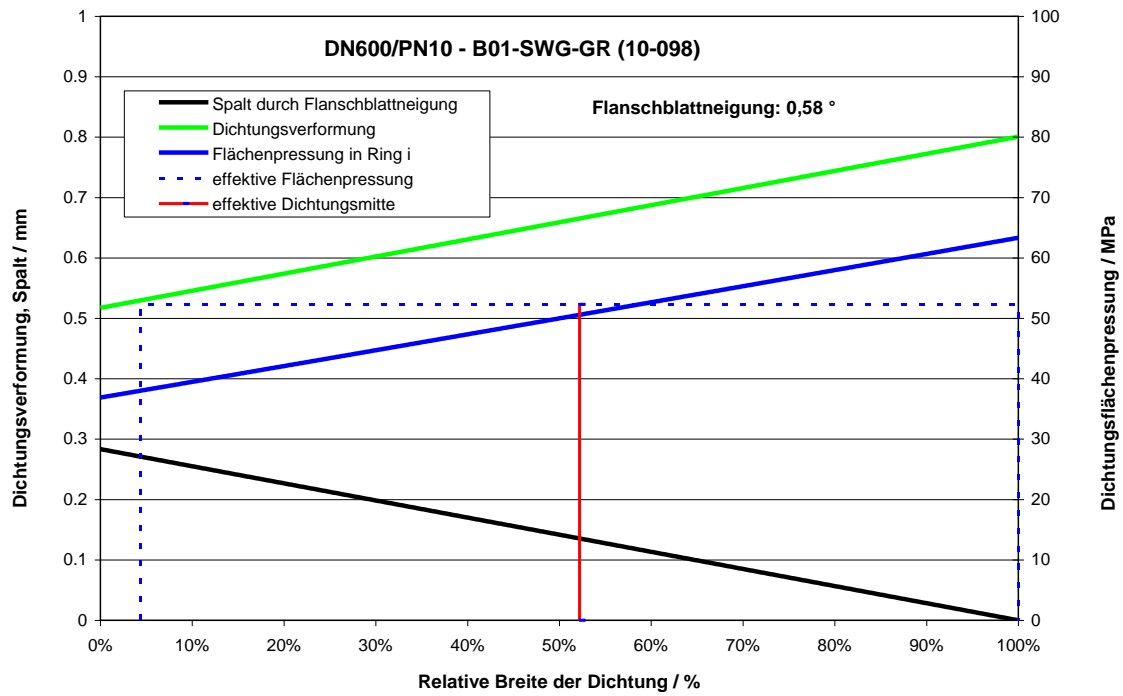
Einbaudichtungskraft:	$F_{G0}$	1400	kN
Hebelarm:	$h_G$	30,82	mm
Flanschblattneigung:	$\Theta_{F1}$	0,46	°
mittlere Dichtungshöhe:	$e_{G0}$	1,46	mm
mittlere Dichtungsverformung:	$\Delta e_{G0}$	0,54	mm
effektiver Dichtungsdurchmesser:	$d_{Ge}$	652,75	mm
effektive Flächenpressung:	$Q_{Ge}$	13,30	MPa
effektive Dichtungsbreite:	$b_{Ge}$	32,25	mm
effektive Dichtungsfläche:	$A_{Ge}$	66134	mm <sup>2</sup>



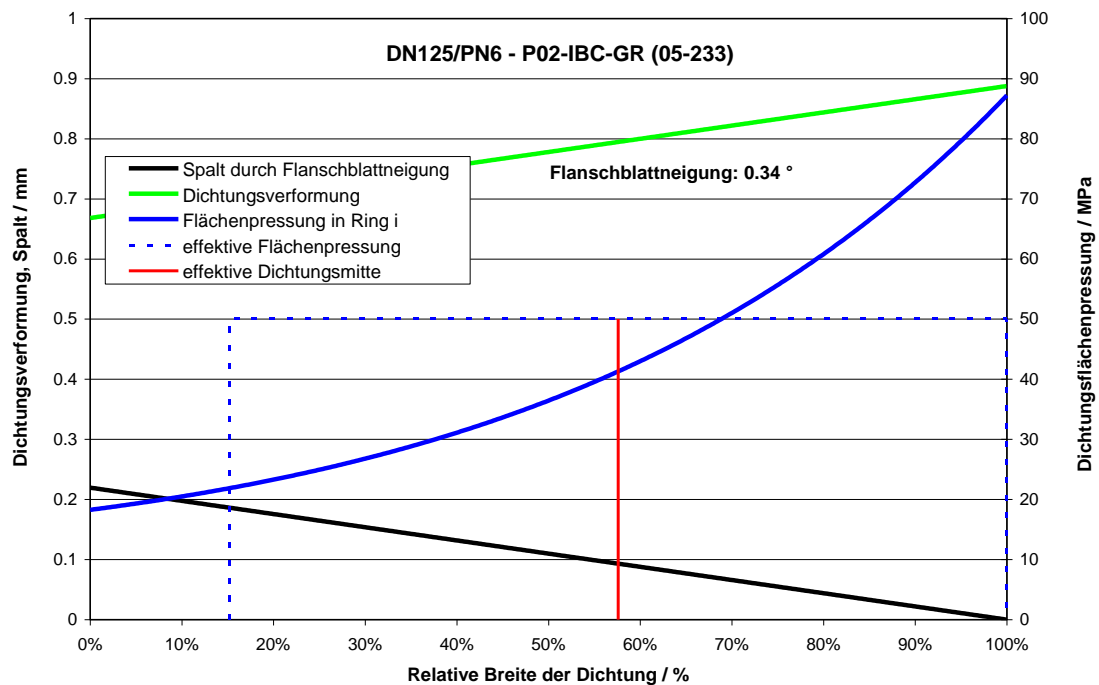
**Bild B.1: Effektive Geometrie DN600/PN10 – Faserdichtung**



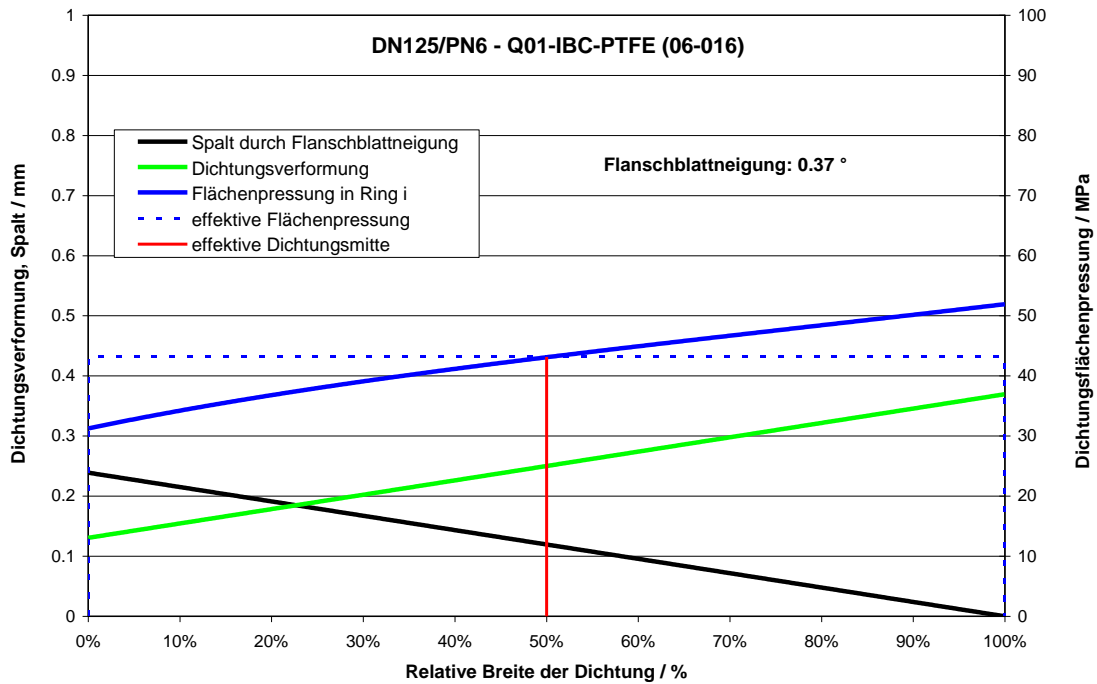
**Bild B.2: Effektive Geometrie DN600/PN10 – Kammprofildichtung mit Grafitauflage**



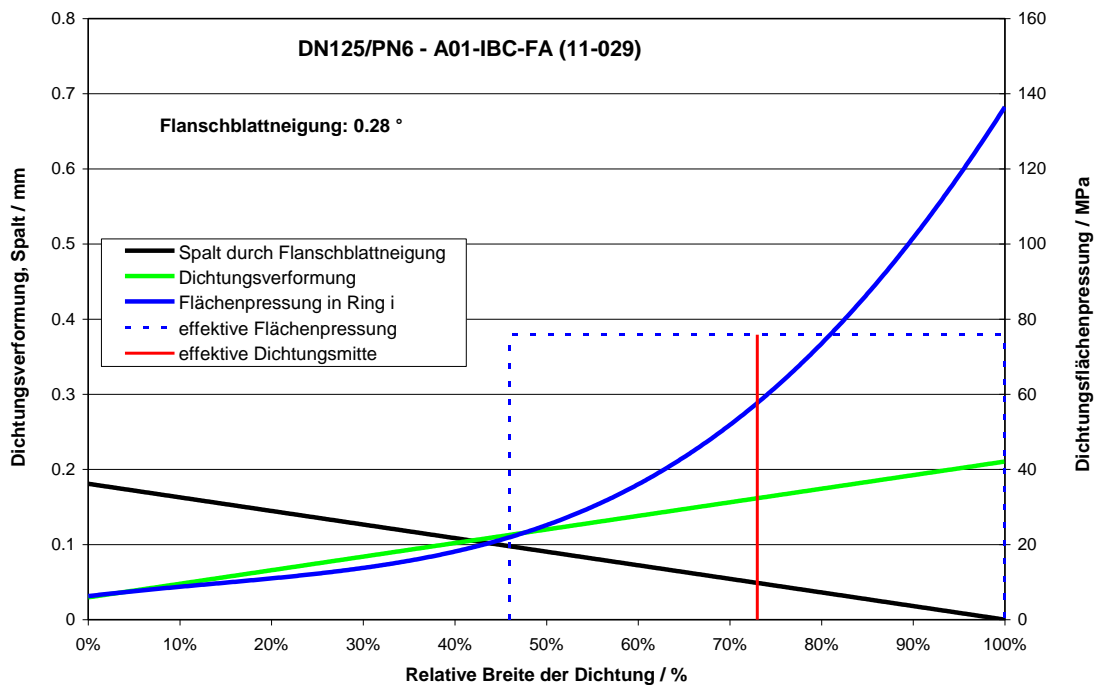
**Bild B.3: Effektive Geometrie DN600/PN10 – Spiraldichtung mit Grafitfüllung**



**Bild B.4: Effektive Geometrie DN125/PN6 – Grafitflachdichtung**

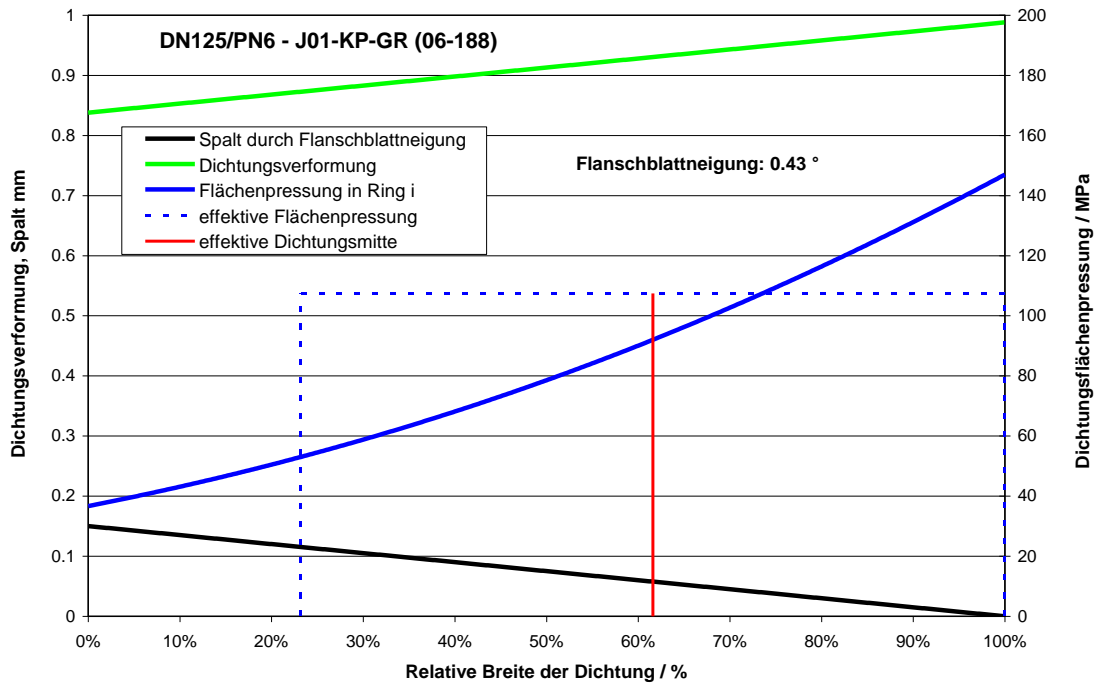


**Bild B.5: Effektive Geometrie DN125/PN6 – Flachdichtung aus PTFE**

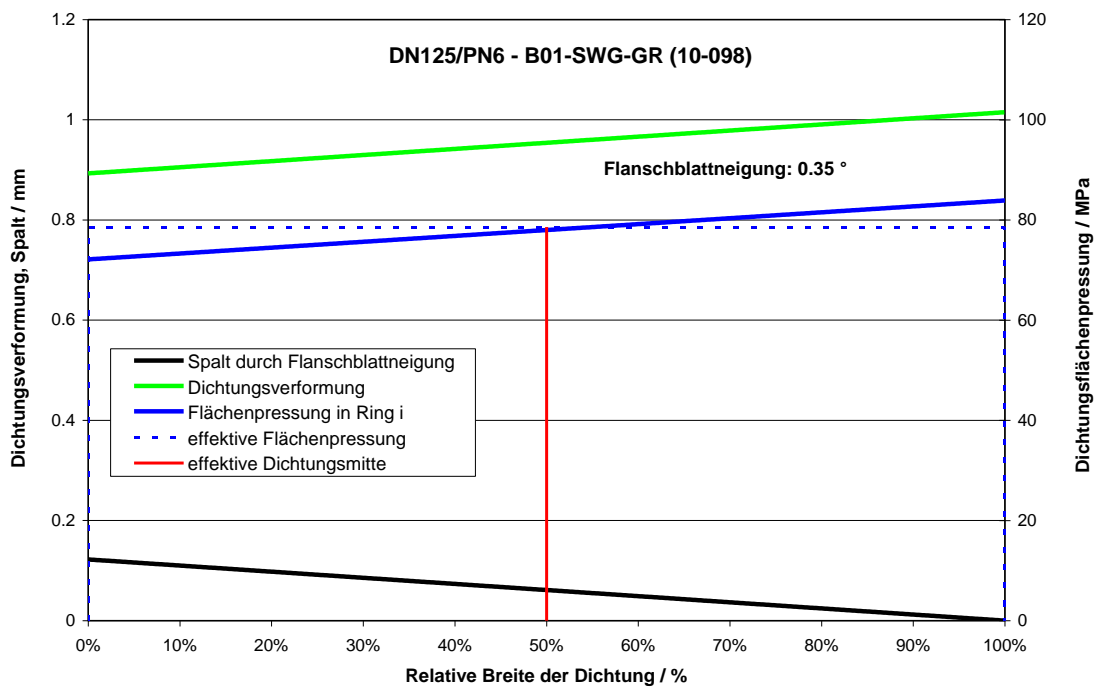


**Bild B.6: Effektive Geometrie DN125/PN6 – Faserdichtung**

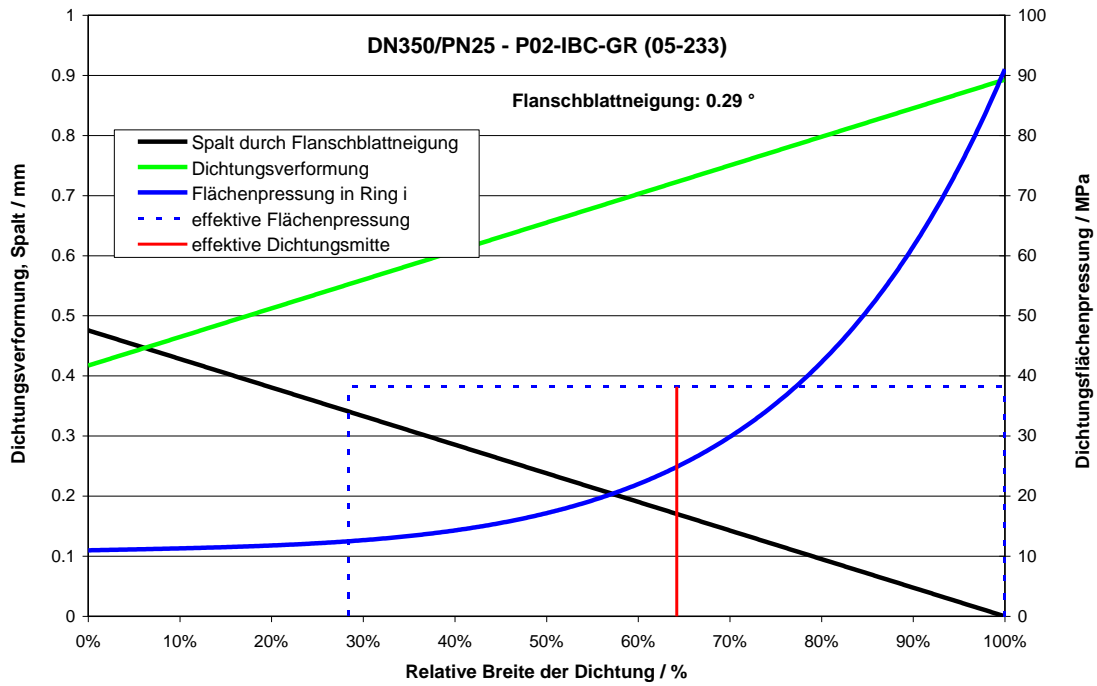




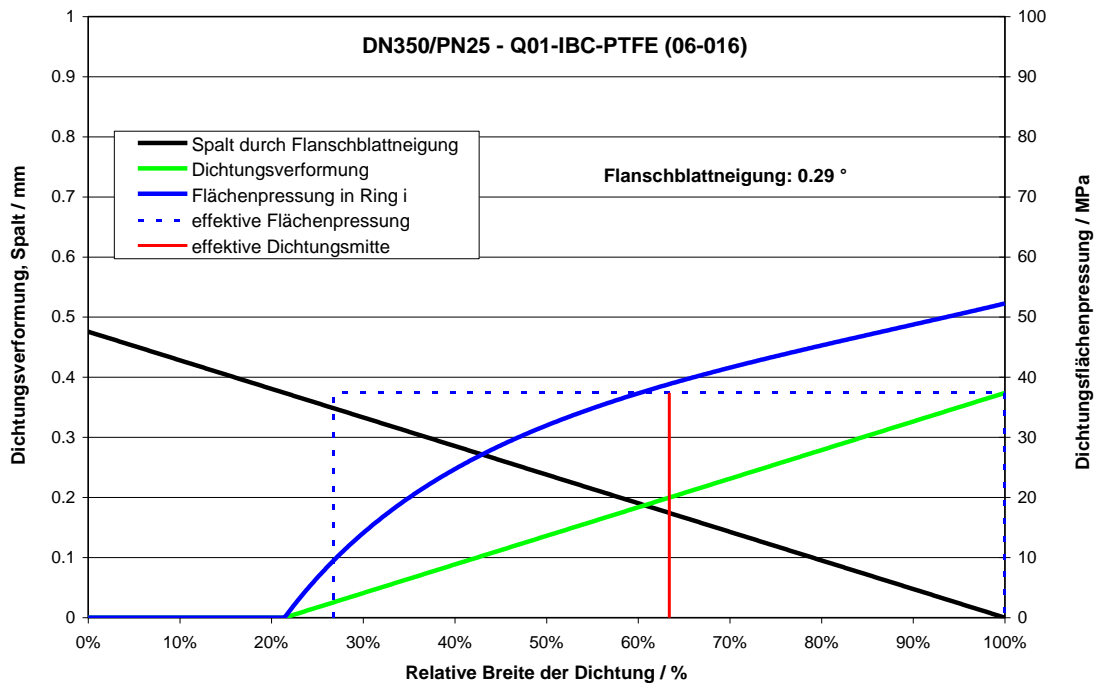
**Bild B.7: Effektive Geometrie DN125/PN6 – Kammprofildichtung mit Grafitauflage**



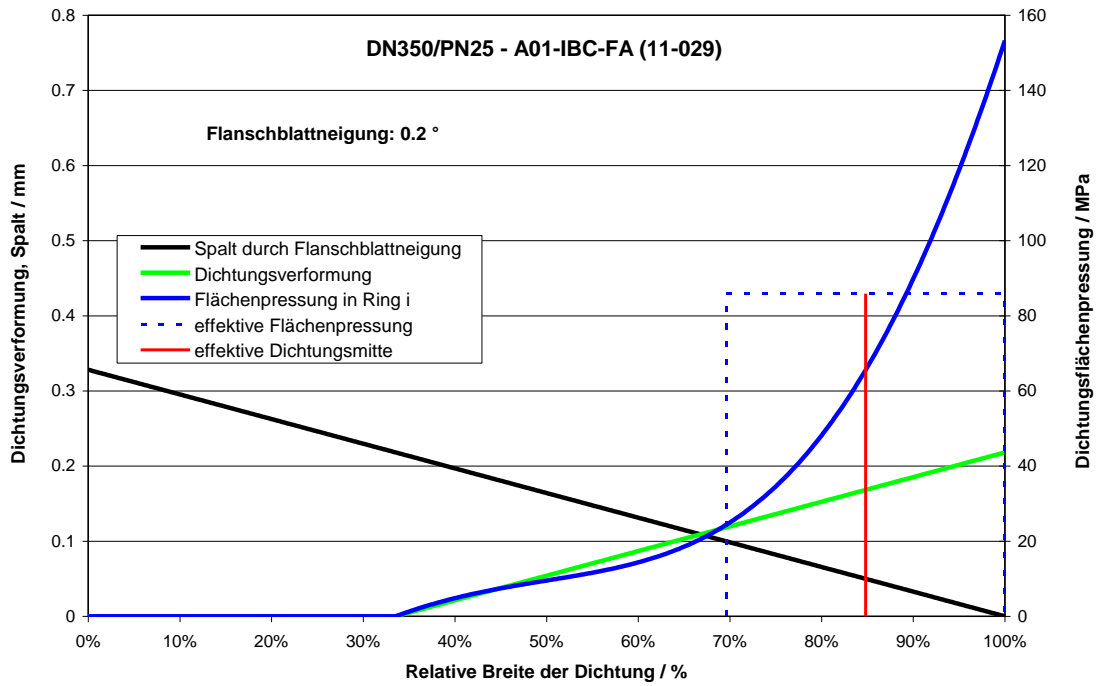
**Bild B.8: Effektive Geometrie DN125/PN6 – Spiraldichtung mit Grafitfüllung**



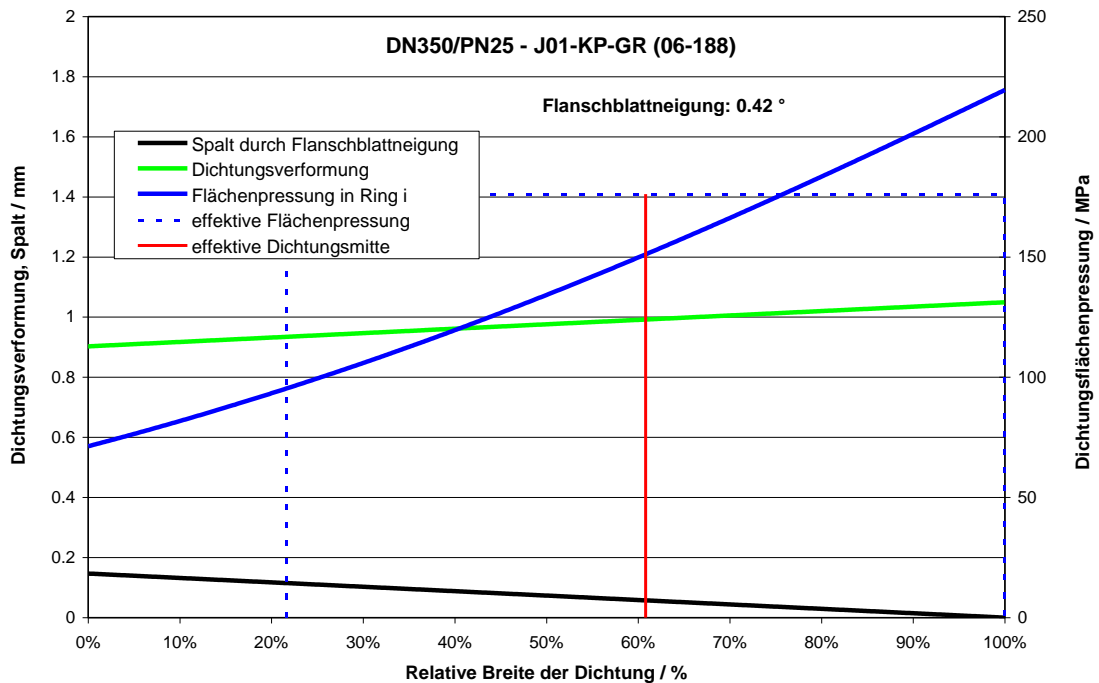
**Bild B.9: Effektive Geometrie DN350/PN25 – Grafitflachdichtung**



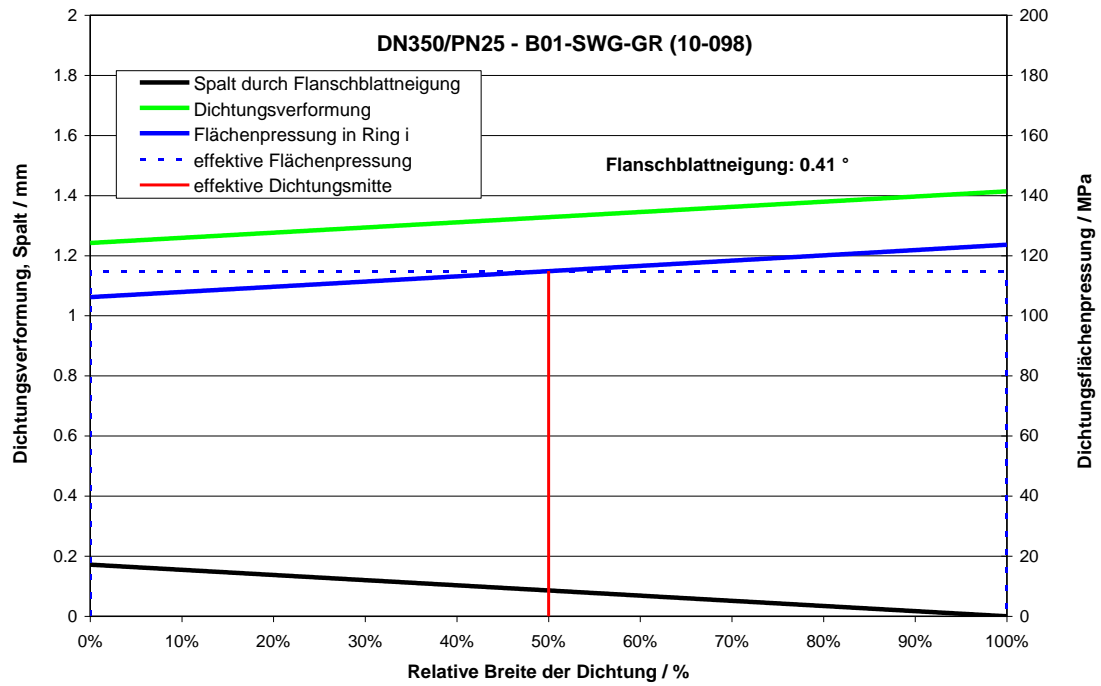
**Bild B.10: Effektive Geometrie DN350/PN25 – Flachdichtung aus PTFE**



**Bild B.11: Effektive Geometrie DN350/PN25 – Faserdichtung**



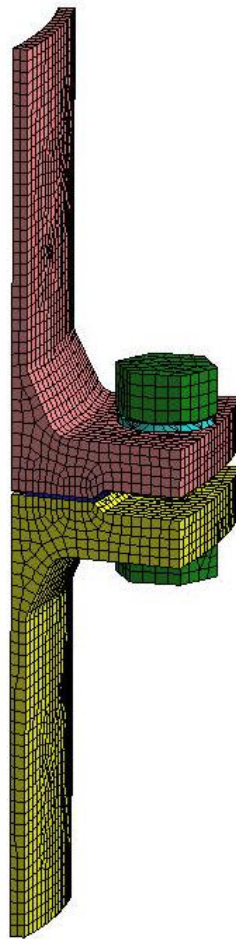
**Bild B.12: Effektive Geometrie DN350/PN25 – Kammprofildichtung mit Grafitauflage**



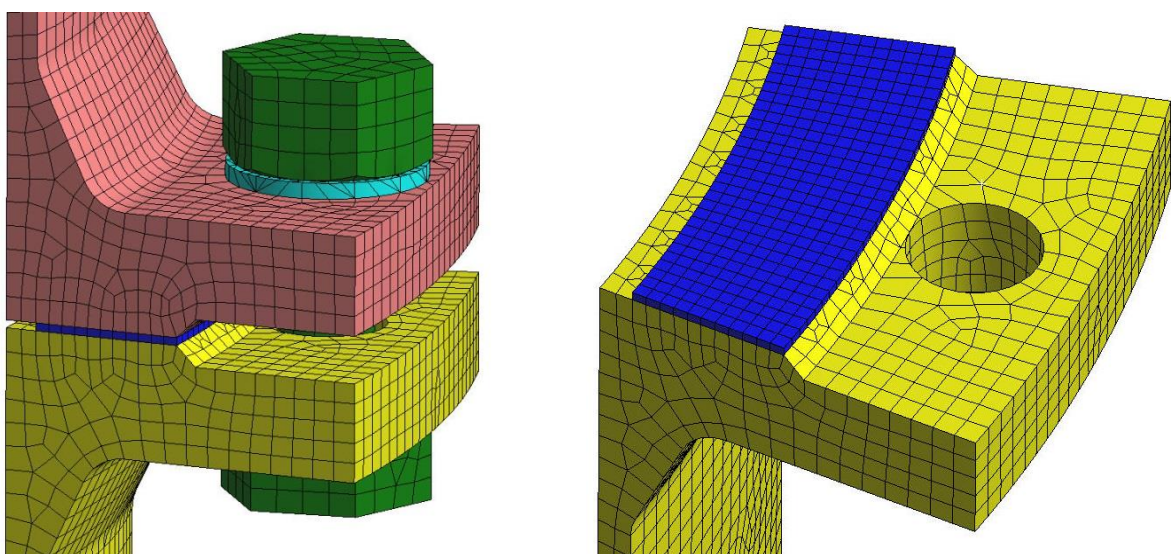
**Bild B.13: Effektive Geometrie DN350/PN25 – Spiraldichtung mit Grafitfüllung**

## **C Verifikation mit Finite Elemente**

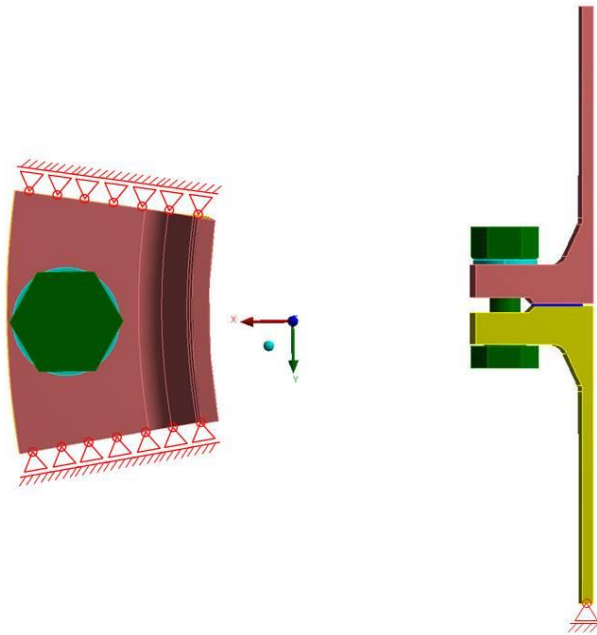




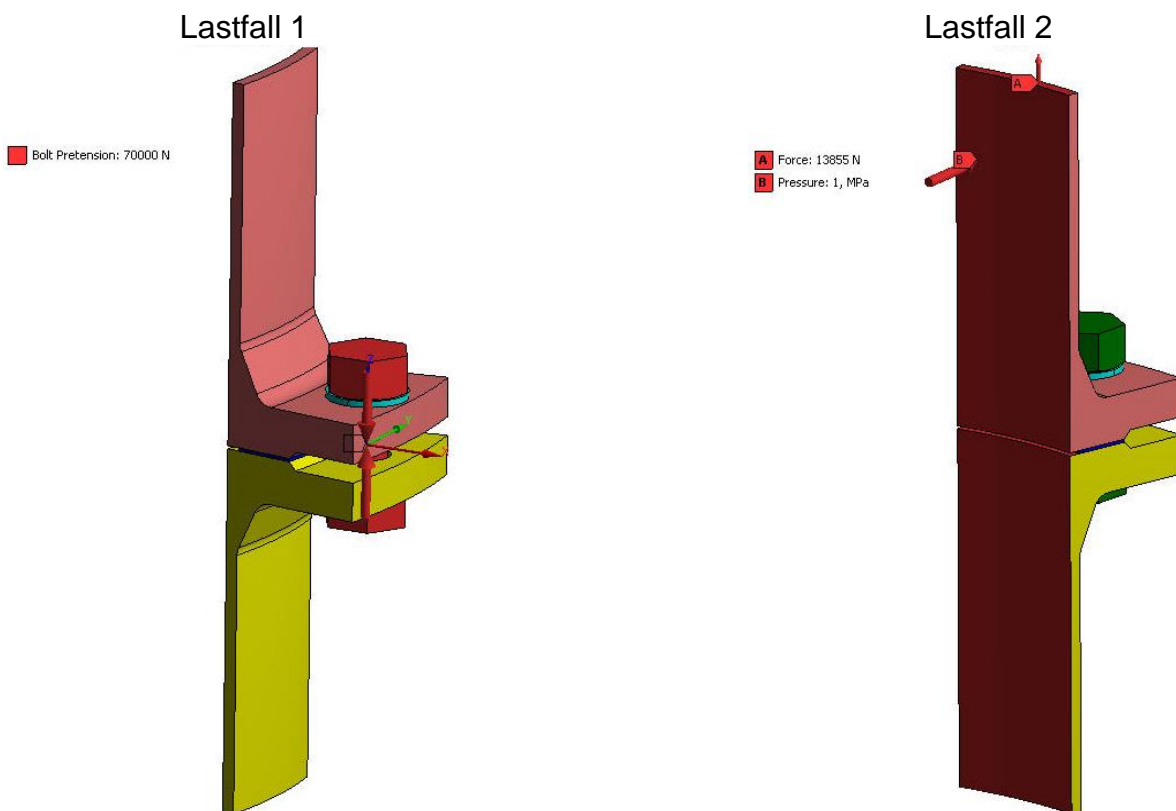
**Bild C.1: Modellelementierung DN600/PN10 mit einer Flachdichtung**



**Bild C.2: Detaillierte Ansicht der Vernetzung DN600/PN10 mit einer Flachdichtung**

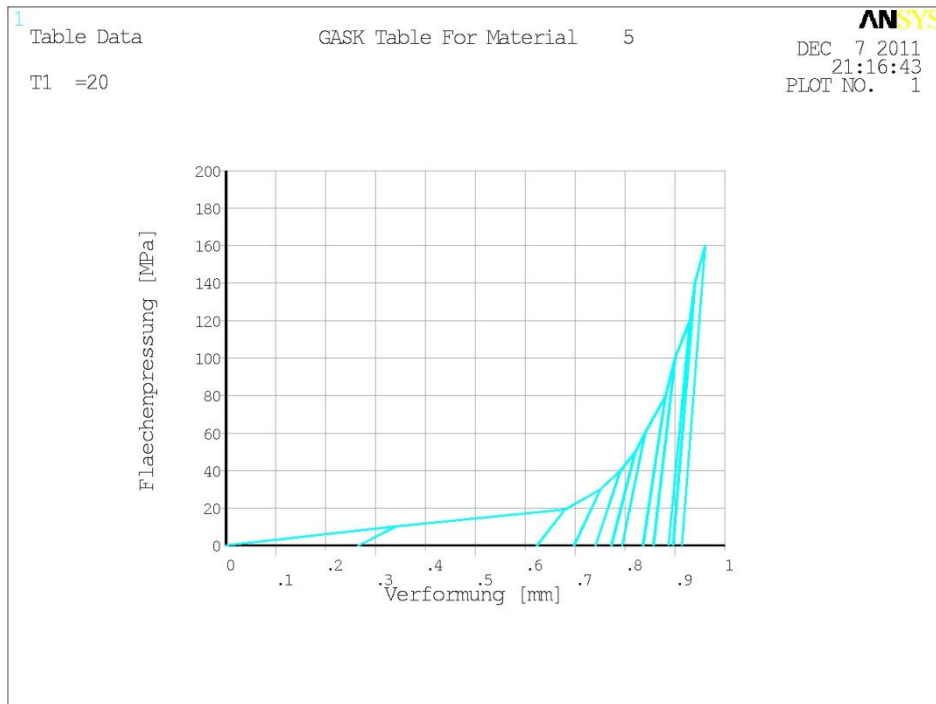


**Bild C.3: Randbedingungen des DN600/PN10-Modells**

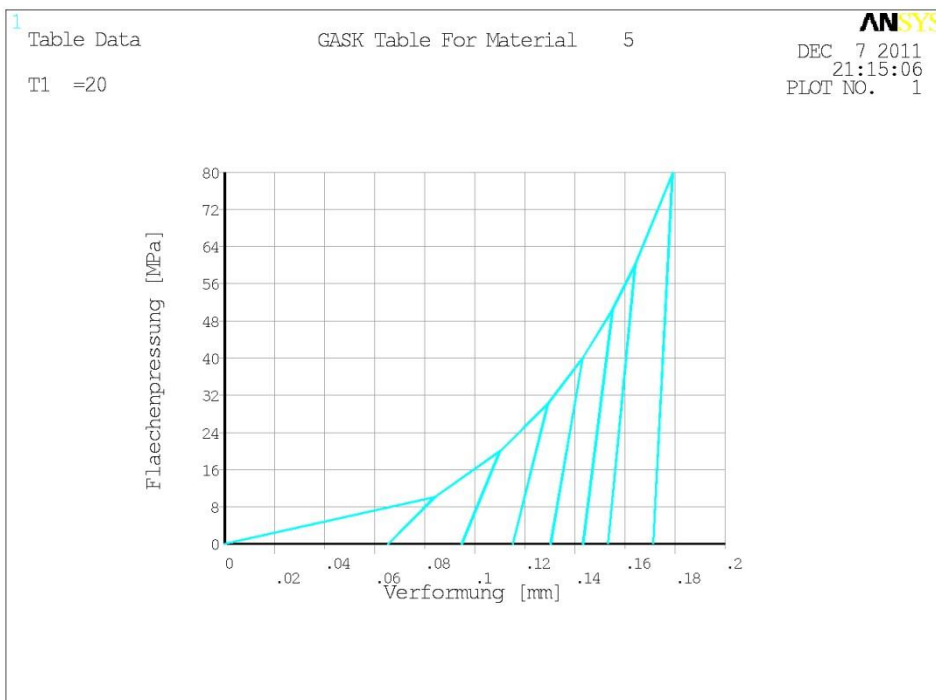


**Bild C.4: Lastfall 1: Montage mit 70 kN (DN600/PN10),  
Lastfall 2: Innendruck 10 bar, aus Innendruck resultierende axiale  
Zugkraft 13,855 kN**

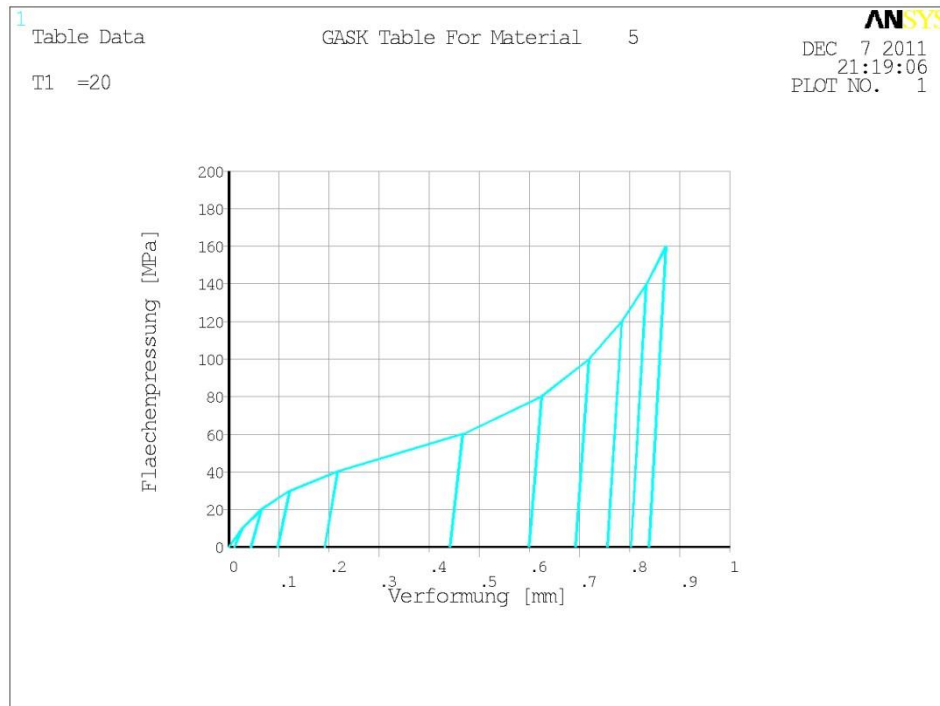




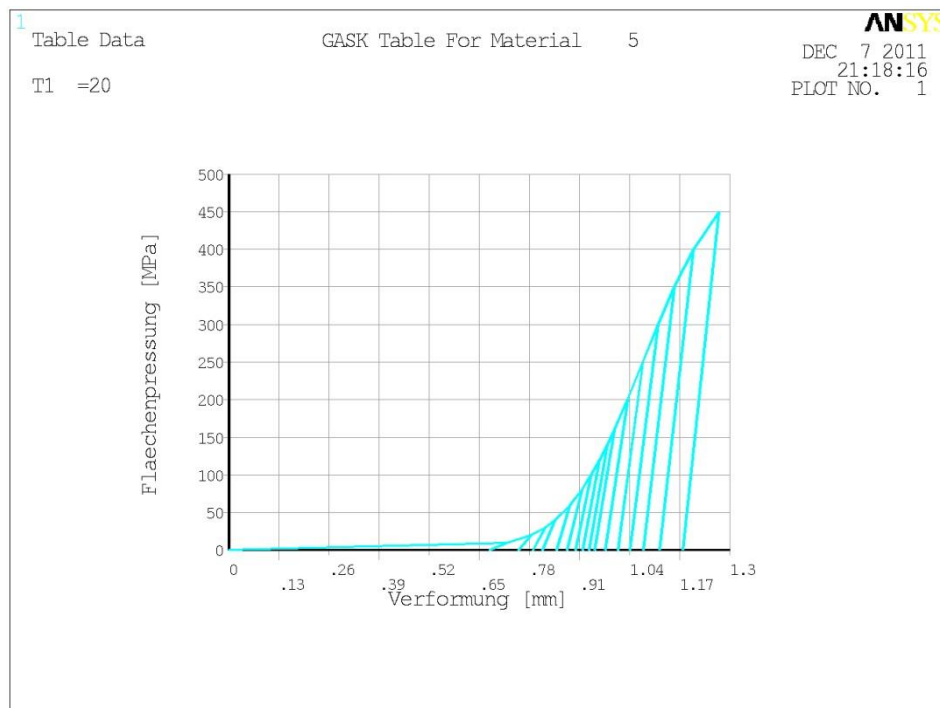
**Bild C.5: Stauchkurve der untersuchten Grafitflachdichtung (IBC-GR)**



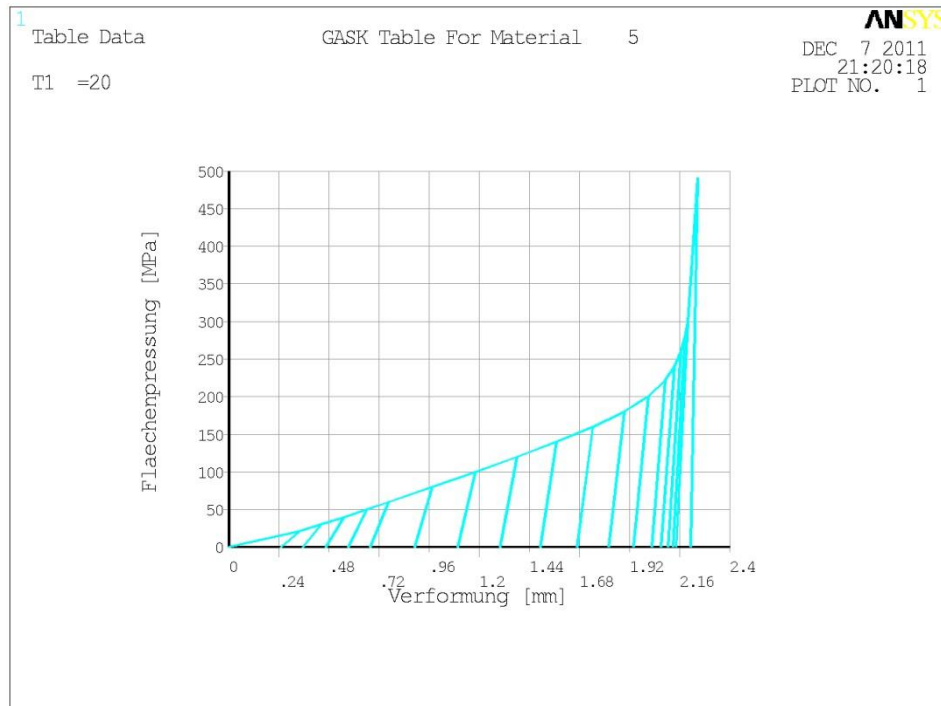
**Bild C.6: Stauchkurve der untersuchten Faserdichtung (IBC-FA)**



**Bild C.7: Stauchkurve der untersuchten PTFE-Flachdichtung (IBC-PTFE)**

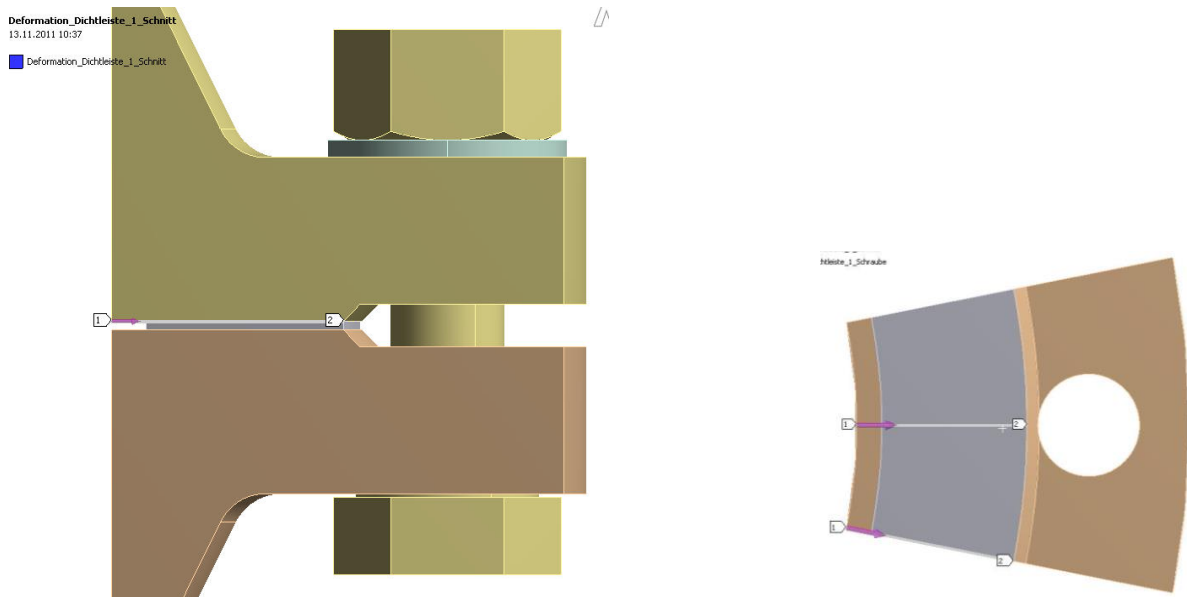


**Bild C.8: Stauchkurve der untersuchten Kammprofildichtung (KP-GR)**

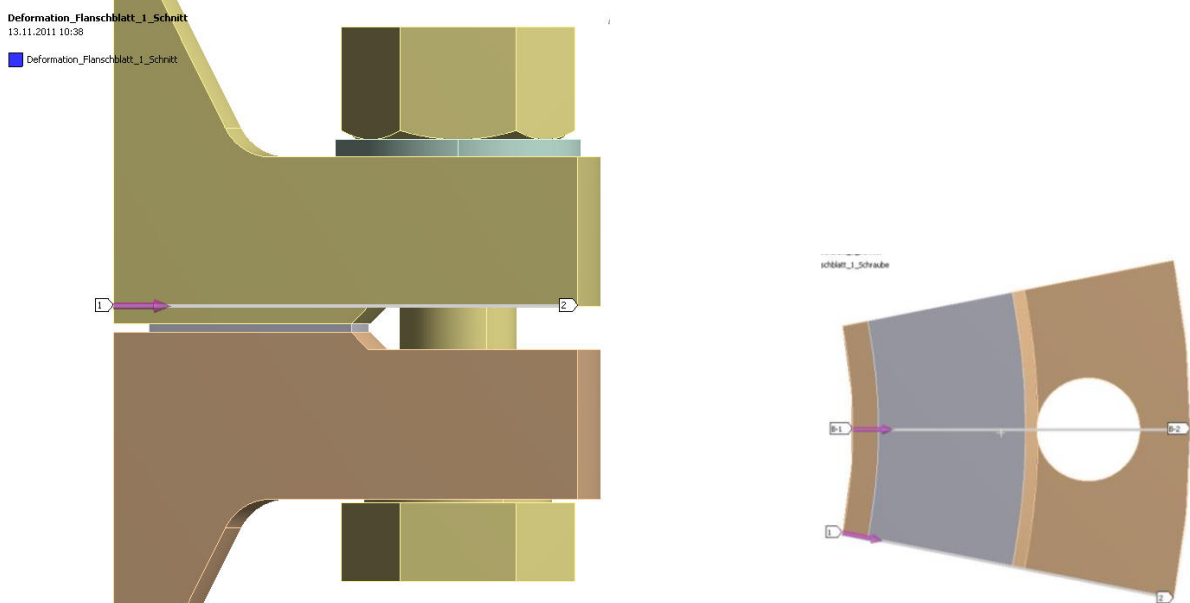


**Bild C.9: Stauchkurve der untersuchten Spiraldichtung (SWG-GR)**

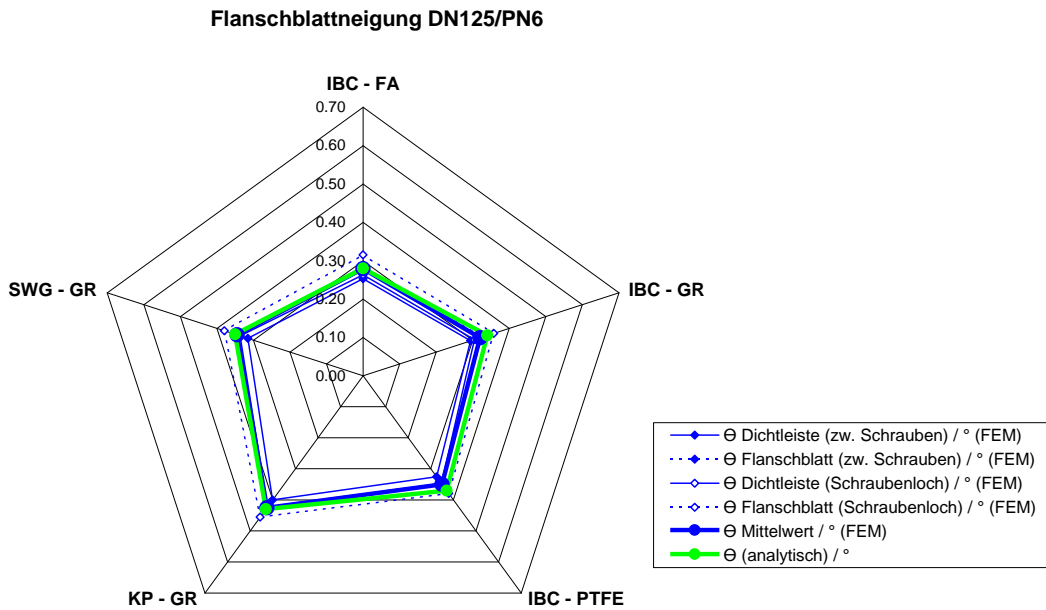
### Pfad zur Auswertung der Flanschblattneigung über die Dichtleiste



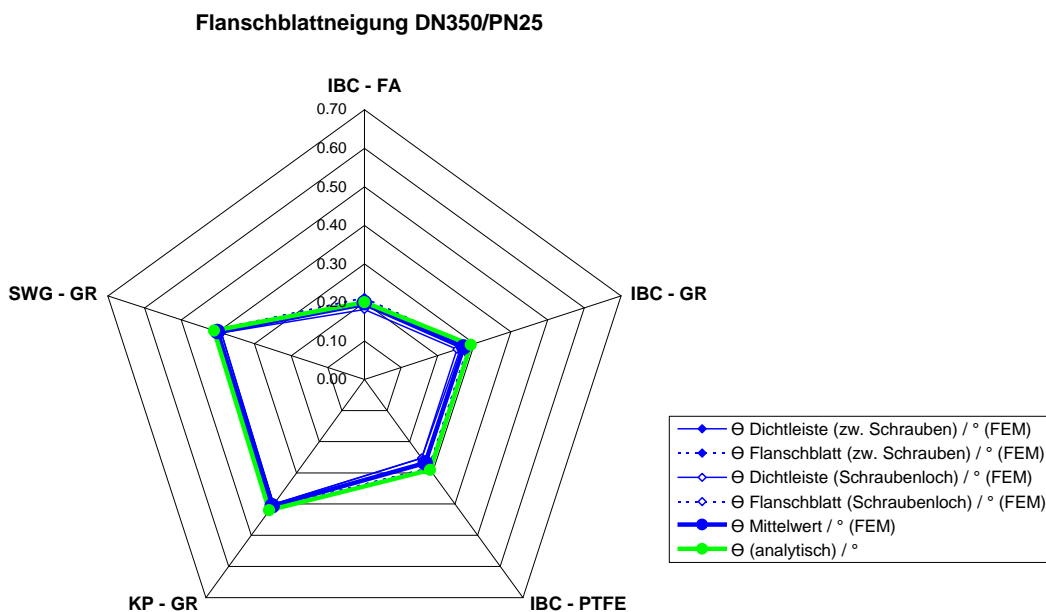
### Pfad zur Auswertung der Flanschblattneigung über das gesamte Flanschblatt



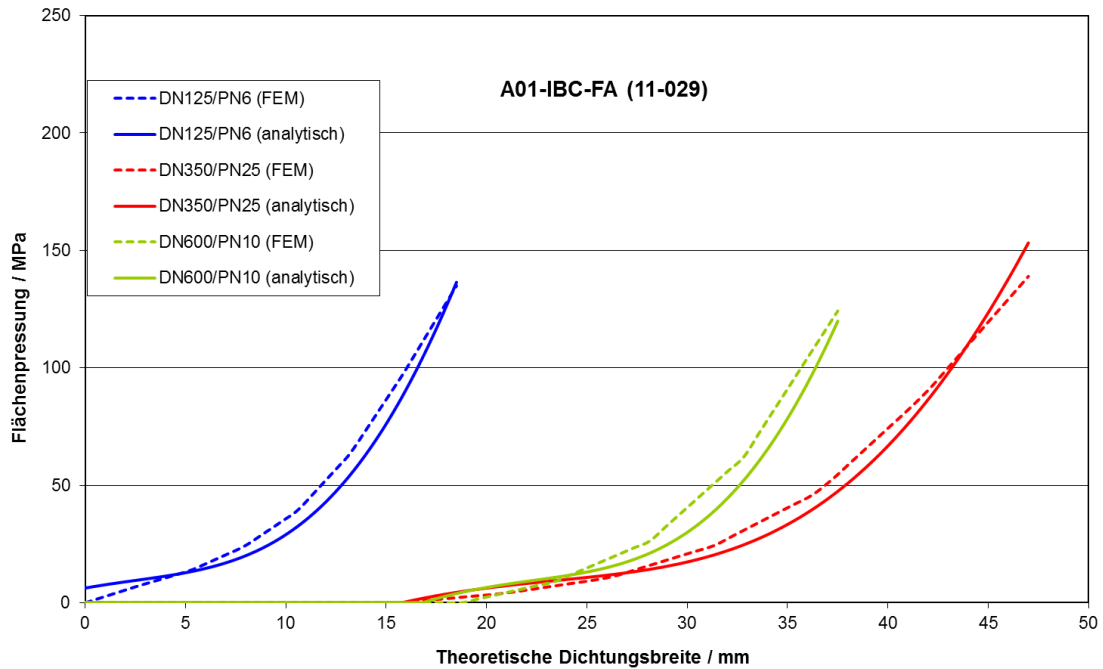
**Bild C.10:** Auswertung der Flanschblattneigung: Pfade im Bereich des Schraubenloches und im Schnitt zwischen den Schraubenlöchern über die Dichtleiste (oben) und über das gesamte Flanschblatt (unten)



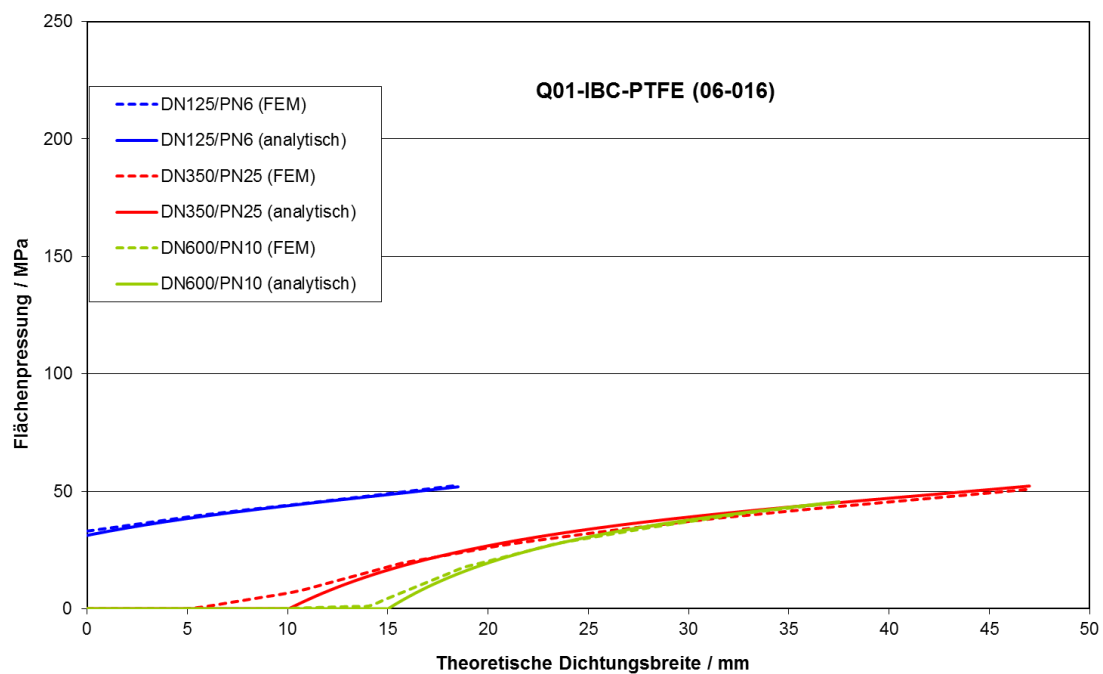
**Bild C.11: Flanschblattneigung der Flanschverbindungen DN125/PN6 im Lastfall Montage**



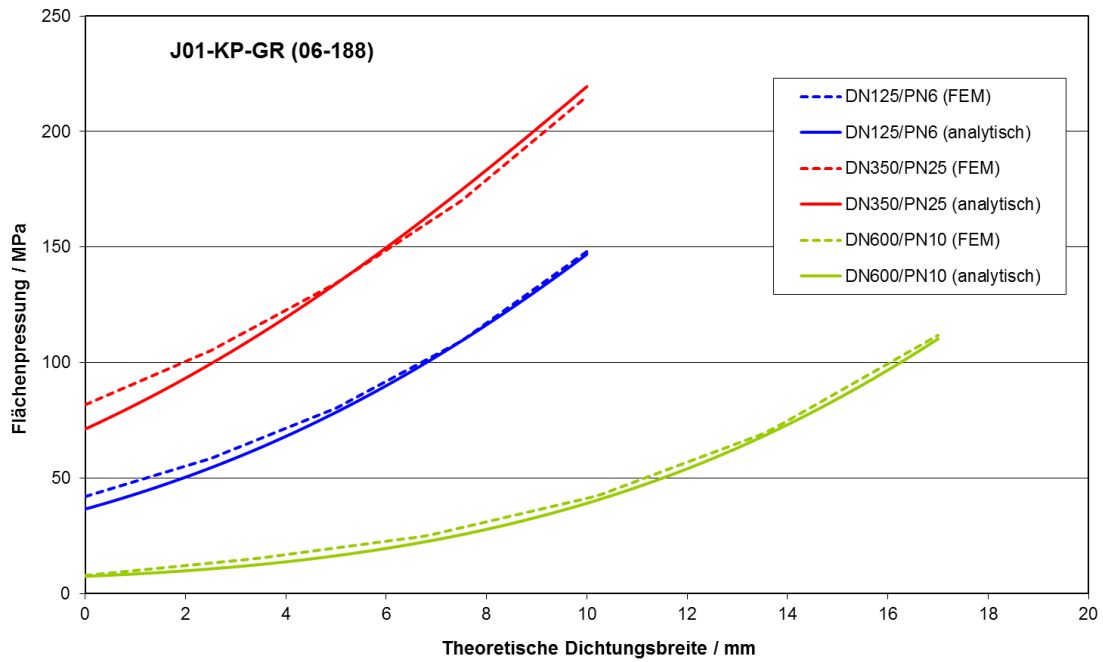
**Bild C.12: Flanschblattneigung der Flanschverbindungen DN350/PN25 im Lastfall Montage**



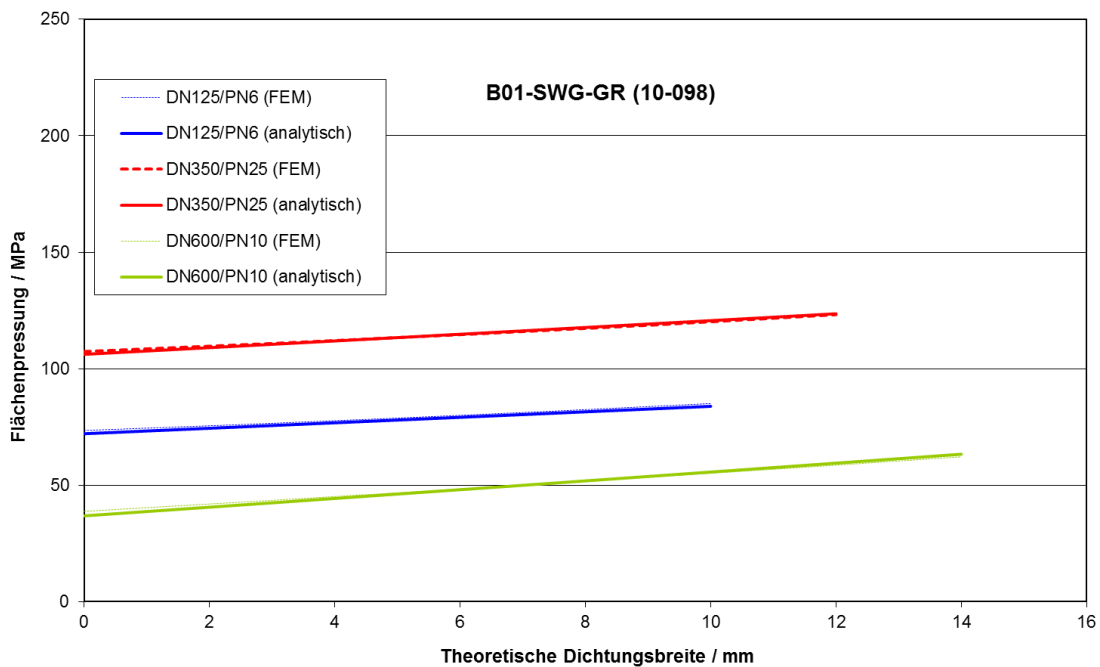
**Bild C.13:** Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite der Flachdichtung aus Faser im Lastfall Montage



**Bild C.14:** Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite der Flachdichtung aus PTFE im Lastfall Montage



**Bild C.15: Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite der Kammprofildichtung mit Grafitauflage im Lastfall Montage**



**Bild C.16: Flächenpressungsverteilung über die Dichtungsbreite der Spiraldichtung mit Grafitfüllung im Lastfall Montage**

