● Technische Information

● Flanschberechnung nach DIN EN 1591-1[1] – Sinnhaftigkeit dieser Berechnung zum Nachweis der Dichtheit

Einleitung

Die europäische Richtlinie zu Industrieemissionen 2010/75/EU [2] fordert die Vermeidung schädlicher Emissionen, es gibt ein Minimierungsgebot:
Zitat
Artikel 11
Allgemeine Prinzipien der Grundpflichten der Betreiber
Die Mitgliedstaaten treffen die erforderlichen Maßnahmen, damit die Anlage nach den folgenden Prinzipien betrieben wird:
a) es werden alle geeigneten Vorsorgemaßnahmen gegen Umweltverschmutzungen getroffen;
b) die besten verfügbaren Techniken werden angewandt;
c) es werden keine erheblichen Umweltverschmutzungen verursacht; …
Artikel 12
Genehmigungsantrag
(1) Die Mitgliedstaaten treffen die erforderlichen Maßnahmen, damit ein Genehmigungsantrag eine Beschreibung von Folgendem enthält: …
f) Art und Menge der vorhersehbaren Emissionen aus der Anlage in jedes einzelne Umweltmedium sowie Feststellung von erheblichen Auswirkungen der Emissionen auf die Umwelt;
g) vorgesehene Technologie und sonstige Techniken zur Vermeidung der Emissionen aus der Anlage oder, sofern dies nicht möglich ist, Verminderung derselben; …
Zitatende

Das Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG [3] fordert in §5 und §22 die grundsätzliche Minimierung schädlicher Emissionen. Die im Juni 2012 herausgegebene VDI 2290 [4] hat Folgen für die Betreiber von Anlagen, in denen gefährliche flüssige oder gasförmige Stoffe des Absatzes 5.2.7 der TA Luft [5] gefördert oder gelagert werden. Sie wendet sich an Betreiber von Anlagen und Apparaten, Hersteller von Flanschverbindungen, Konstrukteure, Projektingenieure. Sie stellt den Stand der Technik dar und gibt Hinweise zur Montage und Instandhaltung, die somit im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes BImSchG (§3 Abs.6) und nach der Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV (§4 und §12) anzuwenden sind. Sie besitzt nicht nur einen empfehlenden Charakter, sondern unterstützt Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden im Rahmen ihrer Tätigkeit. Sie unterstützt das Ziel des BImSchG §5 und §22 zur Minimierung schädlicher Emissionen. Sie gilt für Stahlflanschverbindungen und kann als Erkenntnisquelle für emaillierte Flansche, Flansche aus Glas, Kunststoff oder mit Kunststoffauskleidungen herangezogen werden. Erstmals sollen die Dichtverbindungen rechnerisch auf Leckage nachgewiesen werden. Folgende Anforderungen werden gestellt:

- Minimierung von Emissionen, Minimierungsgebot → Abschnitt 7, 1. und 6. Absatz
- zulässige Leckrate → Abschnitt 7, 4. Absatz

Homepage www.thomsen-bremen.de D-28211 Bremen E-Mail info@thomsen-bremen.de

- rechnerischer Nachweis der Dichtheit (z.B. nach EN 1591-1 oder Finite Elemente Methode) → Abschnitt 7, 2. Absatz
- Ausschöpfen der zulässigen Spannungen der Bauteile → Abschnitt 7, 4. Absatz
- Anziehverfahren mit Kontrolle der Schraubenkraft → Abschnitt 6, 3. Und 6. Absatz
- Verfahrensanweisungen zur Montage → Abschnitt 7, 2. Absatz
- technisch sachgerechte Durchführung der Montage durch sachkundiges Personal * → Abschnitt 7, 1. und 4. Absatz
- Verfahrensanweisung zur Dokumentation und Qualitätssicherung→ Abschnitt 6, 6. Absatz
- stichprobenartige Kontrolle nach Gefährdungsbeurteilung oder sicherheitstechnischer Bewertung → Abschnitt 6, 6. Absatz

* Das deutsche Recht, das Arbeitsschutzgesetz ArbSchG [6], die umsetzende Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV [7] kennt keinen „sachkundigen Monteur“ und verlangt einen „fachkundigen Monteur“, siehe §10, Absatz 2 und beschreibt in §2, Absatz 5 was darunter zu verstehen ist.

Das wirklich einzig Neue in der TA Luft ist der geforderte rechnerische Nachweis der Dichtheit. Alle anderen Anforderungen bestehen schon in gültigen Gesetzen, Regeln und Vorschriften.
Die Forderung nach einem rechnerischen Nachweis ist in die TA Luft vom 18. August 2021 übernommen sowie eine zulässige Höchstgrenze für schädliche Emissionen festgelegt worden. Das Festlegen der Höchstgrenze widerspricht der Forderung des BImSchG nach Minimierung schädlicher Emissionen, dem Minimierungsgebot.

Flanschverbindungen

Eine Flanschverbindung ist ein hoch komplexes Gebilde (Abb.1). Die Bauteile stehen in einer Wechselwirkung zueinander.

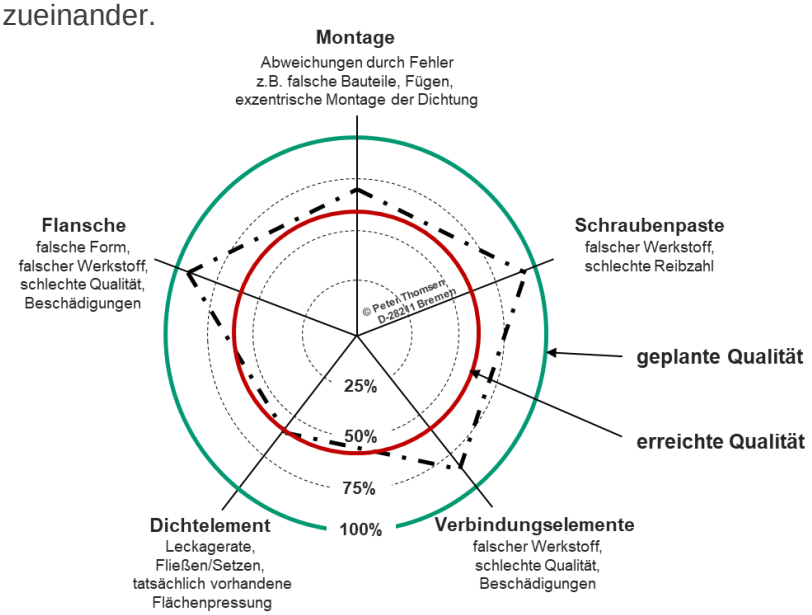


Abb.1: Darstellung der Komplexität einer Flanschverbindung
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Die niedrigste erreichte Qualität einer Komponente, hier z. B. das Dichtelement bestimmt die Gesamtqualität: „Die Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied!“

Die folgende Grafik (Abb.2) zeigt den Zusammenhang und die Verhältnisse der Bauteile am Beispiel einer Flanschverbindung DN40 PN40 mit Gewindebolzen und 2 verschiedenen Dich-

telementen. Der Zusammenhang der Leckagerate mit den Dichtelementen ist in der Grafik ebenfalls enthalten.

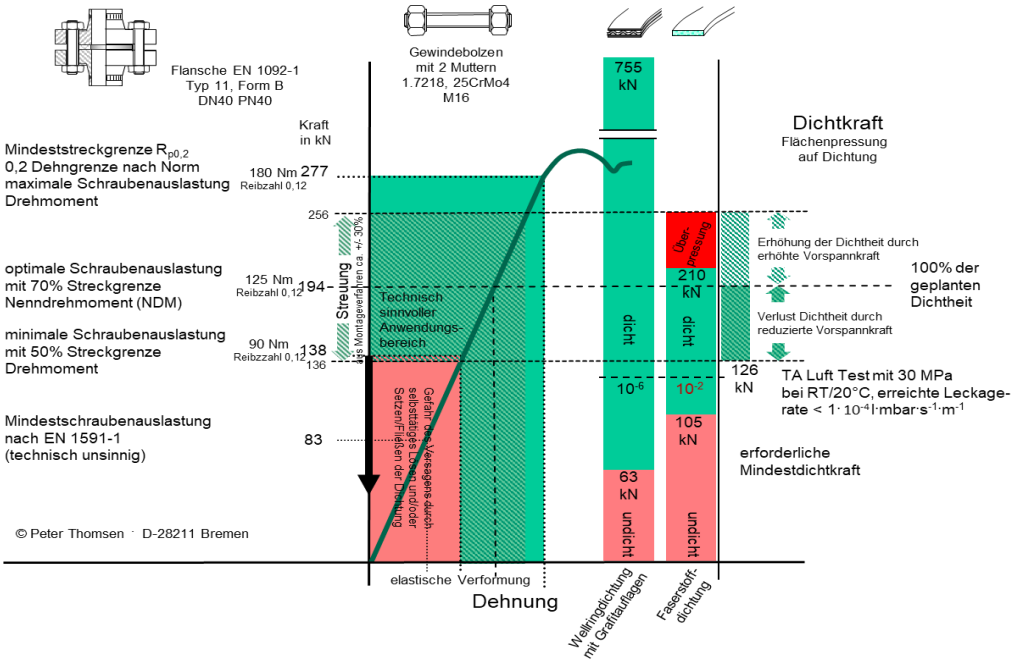
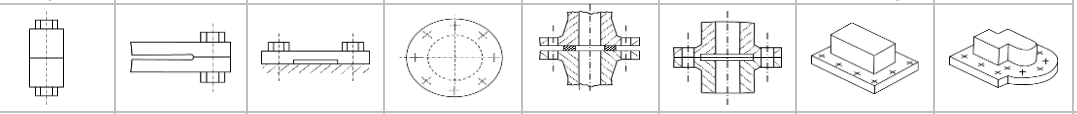
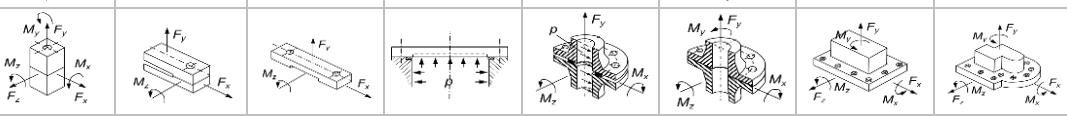


Abb.2: Betrachtung der Wirkung der Bauteile aufeinander und der erreichten Leckagerate
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Auswahl möglicher Berechnungen nach VDI 2230 - Blatt 1 [8]

VDI 2230 Blatt 1:2015-11 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, Tabelle 1. Übersicht über Schraubenverbindungen in Anlehnung an Blatt 2
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Einschraubenverbindungen		Mehrschraubenverbindungen						Schrauben-verbindungen
zentrisch oder exzentrisch		in einer Ebene	rotationssymmetrisch			symmetrisch	asymmetrisch	Schrauben-achsen
Zylinder oder prismatischer Körper	Balken	Balken	Kreisplatte	Flansch mit Dichtring	Flansch mit Flächenauflage	rechteckige Mehrschrauben-verbindung	Mehrschrauben-verbindung	
								Geometrie in Ebene
								Belastung relevante Lasten
Axialkraft F_A Querkraft F_Q Betriebsmoment M_B	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Moment in der Balkenhaupt-ebene M_z	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Moment in der Balkenhaupt-ebene M_z	Innendruck p	Axialkraft F_A (Rohrkraft) Betriebsmoment M_B Innendruck p	Axialkraft F_A Torsions-moment M_T Betriebsmoment M_B	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Torsions-moment M_T Betriebsmoment M_B	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Torsions-moment M_T Betriebsmoment M_B	Belastung Kräfte und Momente
VDI 2230		bedingt nach VDI 2230		DIN EN 1591 AD 2000-Merkblatt [1]	bedingt nach VDI 2230			Berechnung
Balkentheorie mit Zusatzbedingungen			Plattentheorie		bedingt nach Ersatzmodellen		FEM	
Finite Elemente Methode (FEM)								

[1] Das AD 2000-Regelwerk ist eine private Spezifikation und muss die grundlegenden Anforderungen der Richtlinie 2014/68/EU und der harmonisierten Normen umsetzen. Das AD-Regelwerk war eine anerkannte Regel der Technik, weil der Herausgeber die amtlich bestellte Sachverständigenorganisation gewesen ist.

Tab.1: Darstellung der Berechnungsmethoden nach VDI 2230 Blatt 1:2015-11
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Gemäß VDI 2230 können Flanschverbindungen nur nach der harmonisierten EN 1591-1 und der privaten Spezifikation der TÜVs, dem AD 2000 Merkblatt analytisch gerechnet werden. Die Norm selbst sieht einen rechnerischen Nachweis von Flanschverbindungen nach ihren Rechenkriterien nicht vor. Auch sie weist auf den Nachweis durch die numerische Berechnung nach der Finite Elemente Methode (FEM) hin.

Flanschberechnungsverfahren und ihre Einsatzgrenzen

Die folgende Tabelle (Tab.2) zeigt die Einsatzgrenzen verschiedener Berechnungsverfahren.

Flanschberechnungsverfahren und ihre Einsatzgrenzen
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Norm	Dichtung		Prüfnorm Kennwerte	Nachweis			
	Kraft-haupt-schluss KHS	Kraft-neben-schluss KNS		Festigkeit	Dichtheit	TA Luft	Verfahrens-technik
EN 1591-1	X	-	EN 13555	X	X	X [1]	-
CEN/TS 1591-3 [2]	-	X	-	X	X	X [1]	-
KTA 3211.2	X	-	DIN 28091-1	X	X	X [1]	-
	-	X	MPA/VBG [3]	X	X	X [1]	-
AD 2000-Regelwerk	X	-	Merkblatt B 7	X	X [4]	-	-
EN 13445-3 Ab. 11	X	-	-	X	-	-	-
FEA Finite Elemente Analyse	X	X	EN 13555 + erweiterte Auswertung	X	X	X	X

[1] nur in Verbindung mit Bauteileversuch nach VDI 2440 und 2200 und einer qualifizierten Montage
[2] Vornorm seit 2007
[3] VBG ist der Verband der Großkraftwerksbetreiber
[4] nur in Verbindung mit EN 1591 (Ergänzung aus Vortrag von Manfred Schaaf, AMTEC, XVII Dichtungskolloquium)

Quelle: VDI 2290:2012-06, Tabelle 1, ergänzt und aktualisiert, Stand August 2018

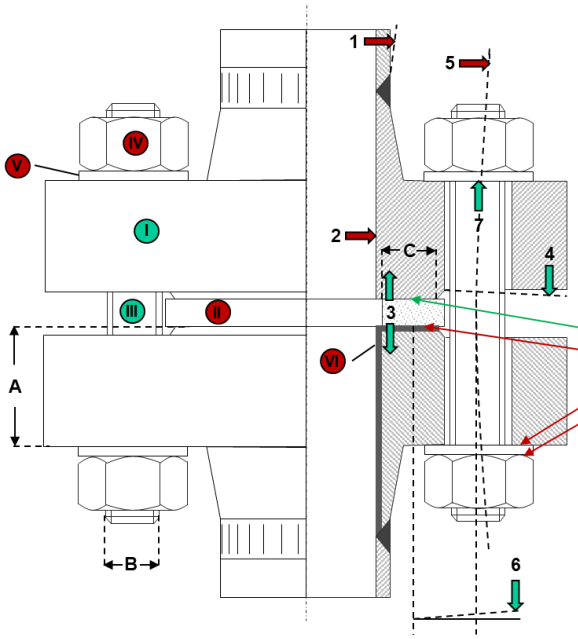
Tab.2: Flanschberechnungsverfahren und ihre Einsatzgrenzen
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Die Tabelle zeigt, dass keine analytische Berechnungsmethode die Anforderungen aus der Verfahrenstechnik berücksichtigt. Die verfahrenstechnischen Anforderungen werden nur in der Finite Elemente Analyse (FEA = FEM) betrachtet.

Flanschberechnung nach AD 2000 Regelwerk B7/B8 [9]

Die analytische Berechnung nach AD 2000-Regelwerk B7/B8 betrachtet nur einen Teil der Bauteile. Diese Berechnung ist ein Festigkeitsnachweis der Bauteile gegen die Einsatzbedingungen mit Sicherheitsfaktoren.

Die Abbildung (Abb.3) zeigt die betrachteten und die nichtbeachteten Teile. Es ist zu erkennen, dass Unterlegscheiben, Mutternauflagefläche, Plattierungen, Auskleidungen und dynamische Lasten aus Betriebsweise, wie Biegemomente oder Aufweitungen nicht oder nur bedingt betrachtet werden. Die Berechnung geht unzulässig davon aus, dass die Bauteile jeweils gleichmäßig belastet werden.



1 Flanschbiegemoment aus Druck/Temperatur	□	
2 Flanschaufweitung durch Druck/Temperatur	□	
3 Druckkraft auf System	◙	B8 [1]
4 Flanschbiegung durch Schraubenvorspannkraft	■	B8
5 Schraubenbiegung durch Flanschblattneigung	□	
6 Hebelarm für Flanschblattneigung	◙	B8 [2]
7 Schraubenvorspannkraft	■	B7
Montage	■	B7
Prüfung	■	B7
Betrieb	■	B7
A Flanschblattdicke	■	B8
B Schraubenabmessung	■	B7
C Dichtfläche	◙	B7 [3]

[1] unrealistisch Fläche mittlerer Dichtungsdurchmesser
[2] unrealistisch immer Dichtungs- zu Schraubenmitte, er müsste am Dichtungsaußenrand liegen
[3] unrealistisch unabhängig von Flanschblattneigung

Dichtheitsnachweis	□	
Kräfteverteilung gleichmäßig, unrealistisch	■	
variabel, realistisch	□	
Flächenpressung:		
Dichtung	◙	B7 [1]
Bördel, Plattierung oder Auskleidung	□	
Unterlegscheibe (falls vorhanden)	□	
Mutternauflage	□	

[1] gemittelt ohne Berücksichtigung des Hebelarmes

Rohrkräfte	◙	B7 [1]
Torsion und/oder Biegemomente	□	
Wärmeausdehnung	□	

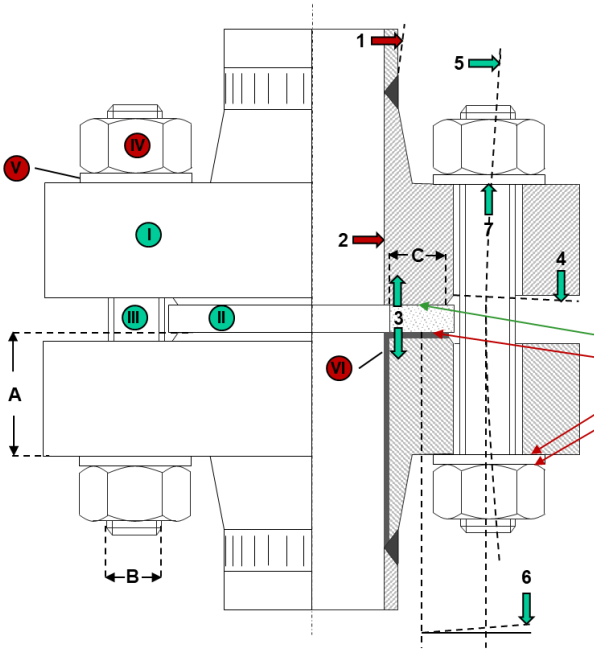
[1] unrealistischer Ansatz, keine Berücksichtigung der angeschlossenen Schale

Bauteile/Bauteilefestigkeit:		
I Flansche	■	B8
II Dichtung	◙	B7 [1]
Setzverhalten/Relaxation	□	
III Schrauben	◙	B7 [2] [3]
IV Muttern	□	B7
V U-Scheiben (falls vorhanden)	□	
VI Plattierung oder Auskleidung (falls vorhanden)	□	

[1] Festgelegte Werte abweichend von Herstellerangaben
[2] Sicherheitsfaktor? Dehnschrauben = 1,5, Vollschaftschrauben = 1,8
[3] Sonderzuschlag C5 für Betrieb nur für Vollschaftschrauben

□ nicht erfasst ◙ teilweise erfasst ■ erfasst

Abb.3: analytische Flanschberechnung nach AD 2000-Regelwerk B7/B8
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de



1 Flanschbiegemoment aus Druck/Temperatur	□
2 Flanschaufweitung durch Druck/Temperatur	□
3 Druckkraft auf System	■
4 Flanschbiegung durch Schraubenvorspannkraft	■
5 Schraubenbiegung durch Flanschblattneigung	◙
6 Hebelarm für Flanschblattneigung	◙
7 Schraubenvorspannkraft	■
Montage	■
Prüfung	■
Betrieb	■
A Flanschblattdicke	■
B Schraubenabmessung	■
C Dichtfläche	■
Dichtheitsnachweis	■
Kräfteverteilung gleichmäßig, unrealistisch	■
variabel, realistisch	□
Flächenpressung:	
Dichtung	■
Bördel, Plattierung oder Auskleidung	□
Unterlegscheibe (falls vorhanden)	□
Mutternauflage	□
Rohrkräfte	◙ [1]
Torsion und/oder Biegemomente	□
Wärmeausdehnung	□

[1] unrealistischer Ansatz, keine Berücksichtigung der angeschlossenen Schale

Bauteile/Bauteilefestigkeit:	
I Flansche	■
II Dichtung	■
Setzverhalten/Relaxation	■
III Schrauben	■
IV Muttern	□
V U-Scheiben (falls vorhanden)	□
VI Plattierung oder Auskleidung (falls vorhanden)	□

□ nicht erfasst ◙ teilweise erfasst ■ erfasst

Abb.4: analytische Flanschberechnung nach DIN EN 1591-1
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Homepage www.thomsen-bremen.de D-28211 Bremen E-Mail info@thomsen-bremen.de

Flanschberechnung nach DIN EN 1591-1

Die analytische Berechnung nach DIN EN 1591-1 betrachtet etwas mehr als die Berechnung nach AD 2000-Regelwerk.

Die Abbildung (Abb.4) zeigt die betrachteten und die nichtbeachteten Teile. Es ist zu erkennen, dass Unterlegscheiben, Mutternauflagefläche, Plattierungen, Auskleidungen und dynamische Lasten aus Betriebsweise, wie Biegemomente oder Aufweitungen nicht oder nur bedingt betrachtet werden. Die Berechnung geht unzulässig davon aus, dass die Bauteile jeweils gleichmäßig belastet werden.

Die Kennwerte für die Dichtungen werden nach DIN EN 13555 [10] mit planparallelen Dichtflächen ermittelt. Man sollte sich die Frage erstellen, ob diese Vorgehensweise für Flanschverbindungen sinnvoll ist.

Eine Eigenart des Marktes ist es auch Apparateflansche mit dieser Methode zu rechnen, obwohl sich die Norm im Abschnitt 1, Anwendungsbereich dafür nicht zuständig erklärt. Für verschiedene Flanschsituationen, bei Verwendung metallischer Dichtungen, zu weicher nicht formstabiler Flansche, Dichtungen in unelastischen Werkstoffen, die starke Verformungen zulassen erklärt sich die Norm für übermäßig konservativ. Sie stellt die Norm fest, dass z.B. die erforderliche Schraubenkraft zu hoch, der zulässige Mediendruck zu gering, die erforderliche Flanschblattstärke zu groß usw., sein kann.

Besonders auffällig ist, dass die Bauart und Bauweise mit der angewendeten Berechnung oft nicht übereinstimmen. In der folgenden Abbildung (Abb.5) sieht man rechts den tatsächlich gebauten Behälter und links das in der Berechnung angewendete Model. Die Abweichungen sind aufgelistet.

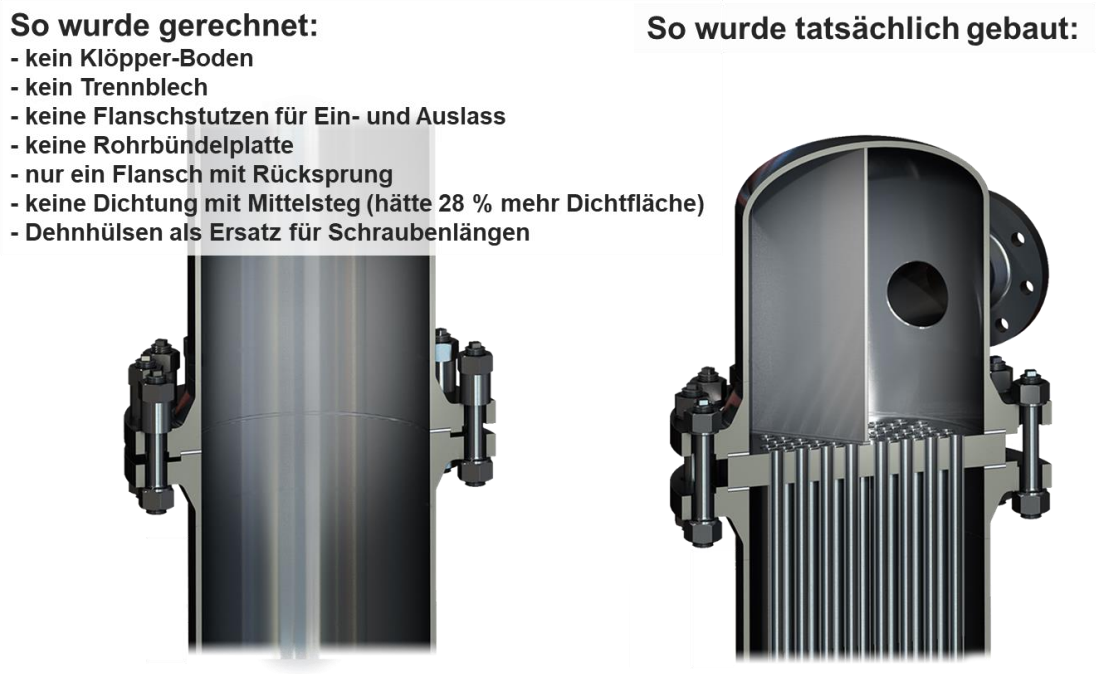


Abb.5: die Abbildung zeigt rechts den tatsächlich gebauten Behälter und links die Form, die der Berechnung zu Grunde gelegt wurde

© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Die Verwendung derartiger Berechnungen ist kritisch und nicht zulässig.

Finite Elemente Methode (FEM) bzw. Finite Elemente Analyse (FEA)

Nur eine Simulation nach der numerischen Berechnungsmethode stellt das Verhalten der Flanschverbindung so dar wie es ist. Die folgende Abbildung (Abb.6) zeigt, dass alles Berücksichtigt wird. Hiermit werden die Aussagen der ersten Kapitel bestätigt.

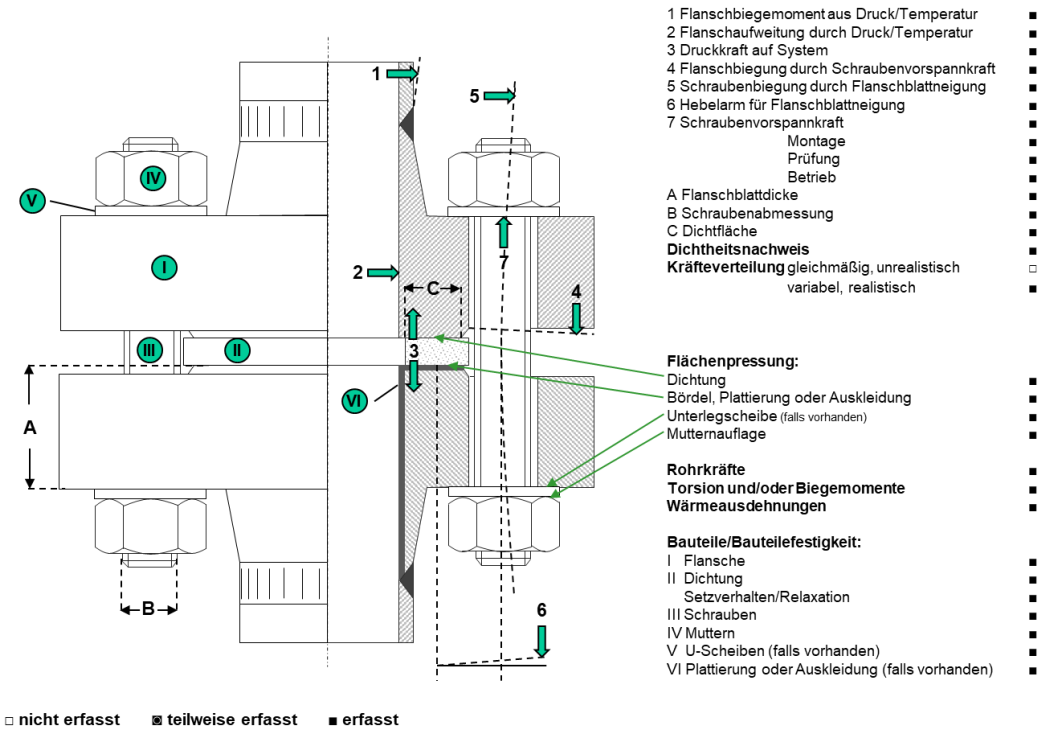


Abb.6: die numerische Berechnungsmethode, bzw. Simulation betrachte alles in und an der Flanschverbindung
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Flanschverformung unter Druck und Temperatur

Um einmal zu sehen, was unter Betriebsbedingungen in einer Flanschverbindung passiert, zeigt die nächste Abbildung (Abb.7) welchen Einfluss Druck und Temperatur auf das Flanschsystem ausüben.

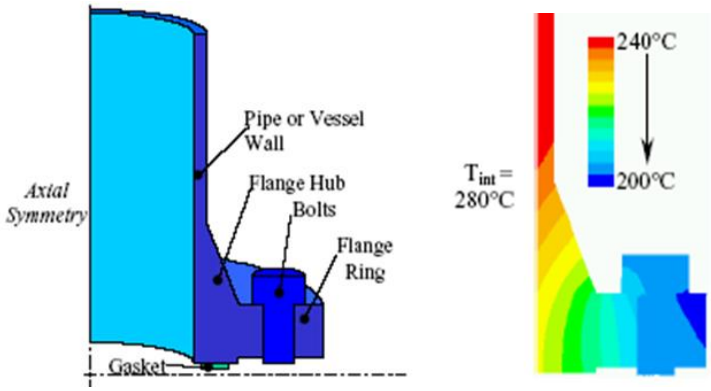


Abb.7: Flanschverformung unter Temperatur
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Diese Informationen kommen aus der PVP2005-71340, Casestudy of Temperature-Analysis in a 48“ Diameter Heat Exchanger Flange.

Die Flanschbiegung durch die Schrauben muss größer sein als das Biegen des Flansches durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung, sonst kippt der Flansch weiter und die Schrauben werden entlastet. Aus der gleichen Studie kommet die folgende Abbildung (Abb.8).

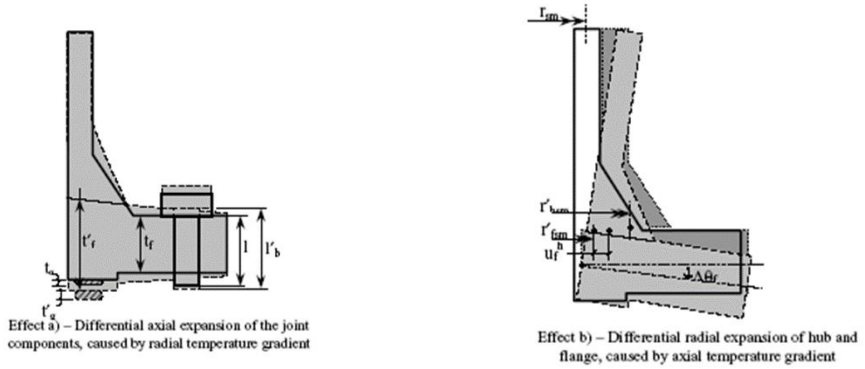


Abb.8: axiale (links) und radiale (rechts) Flanschverformung unter Temperatur
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Ist der Flansch nicht ausreichend vorgespannt, wirkt der Innendruck ähnlich.

Nur die Finite Elemente Simulation ist in der Lage, dieses Verhalten und seine beträchtlichen Auswirkungen auf das Flanschsystem und seine Bauteile nachzuweisen.

Setzverhalten verschiedener Dichtelemente

Die üblicherweise verwendeten Flachdichtungen zeigen ein Setzverhalten, welches in seiner Ausprägung in den analytischen Berechnungsmethoden nicht berücksichtigt wird (Abb.9).

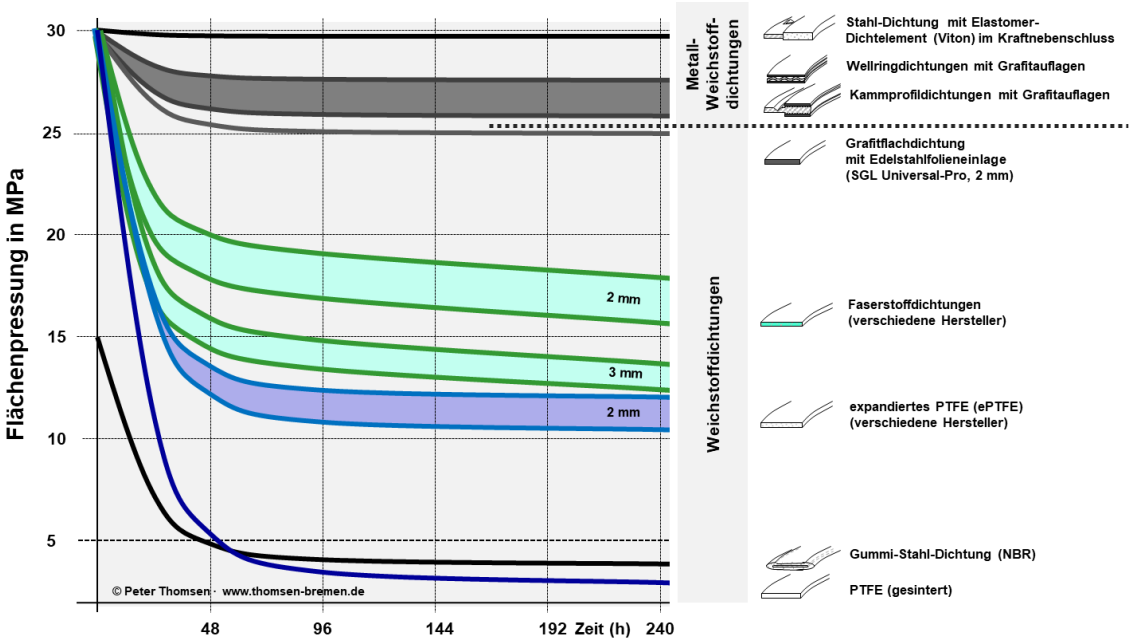


Abb.9: Setzverhalten verschiedener Dichtungen
5 Temperaturzyklen a 48 Stunden mit 150 °C (Gummidichtungen 70°C) / Montageflächenpressung 30 MPa (GST NBR 15 MPa)
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Zusammenfassung

Zunächst muss festgestellt werden, dass die Festlegung der Leckageklasse gemäß TA Luft mit 0,01 mg s^{-1} m^{-1} wohl eher der Tatsache geschuldet ist, dass möglichst alle Dichtungen diese auch erreichen. Die Minimierung schädlicher Emissionen, wie in der Richtlinie 2010/75/EU (IE-RL) und dem BImSchG gefordert ist somit scheinbar wohl nicht geplant. Das Vorgehen ohne die Anwendung vom Stand der Technik ist kritisch zu sehen, weil es sich um einen Verstoß gegen EU-Richtlinien und nationale Gesetze handelt.
Des Weiteren müsste das Ergebnis der Berechnung eine mit diesen Bauteilen erreichbare niedrige Leckageklasse aufzeigen. Der Anwender müsste die Berechnungen mit diversen Dichtungen durchführen und diejenige mit der niedrigsten Leckrate einsetzen. Alternativ und besser wäre die grundsätzliche Verwendung des „dichtesten Dichtelements“. Die folgende Grafik (Abb.10) gibt hierzu eine grundsätzliche Übersicht.

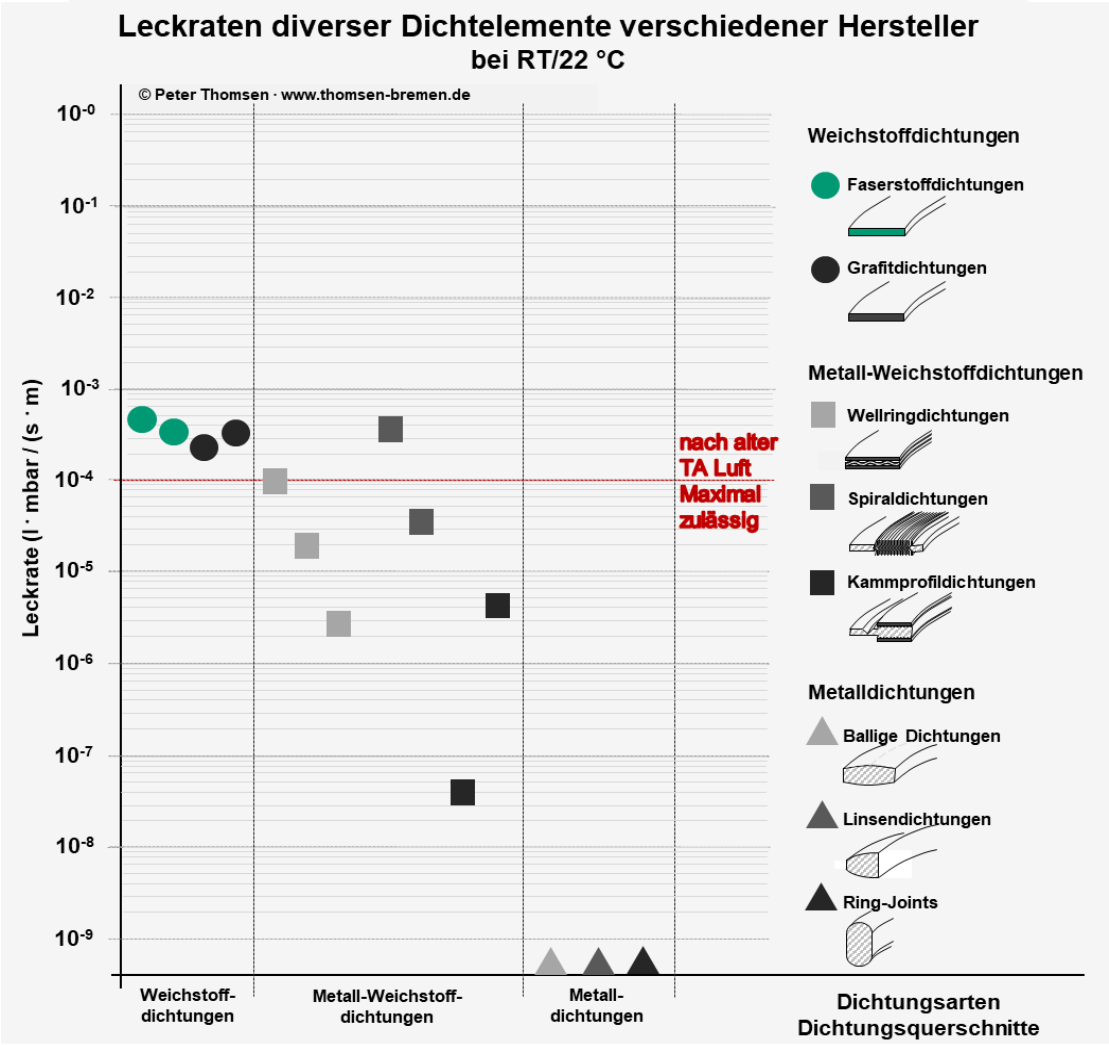


Abb.10: Vergleich der Leckraten verschiedener Dichtelemente
Quelle.: gasketdata.org und Ergänzungen
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Bei der Auswahl des Dichtelements sind Eignung bei Alterung und externem Brand zwingend, weil sowohl in der Richtlinie 2014/68/EU (DGRL) [11], als auch im ArbSchG und der BetrSichV mit der TRBS 2141 [12], gefordert.

Flanschverbindungen mit Dichtungen im Krafthaupt- und Kraftnebenschluss sind für eine analytische Berechnung zu komplex. Für andere als runde Flansche ohne Einbauten, gibt es für Flansche mit Einbauten (z.B. Trennbleche in Wärmetauschern), quadratische oder rechteckige, ggfs. sogar asymmetrische Flansche keinen genormten analytischen Ansatz für eine Berechnung.

Hinweis:
Bereits im Jahr 2000 hat der TÜV Süddeutschland im Heft Nr. 5 der Zeitschrift zur Technischen Überwachung [13] eine vergleichende Untersuchung der analytischen und numerischen Berechnungen mit Werten aus einem Prüfstand erstellt. Nur die Berechnungen nach der Finite Elemente Methode, hier FEM 3D, haben mit den gemessenen Werten an den Flanschen mit den dynamischen Belastungen übereingestimmt. Nur mit der FEM können die tatsächlichen Anforderungen an eine Flanschverbindung realistisch sinnvoll simuliert werden.

Die Differenzen der analytischen und numerischen Berechnungsarten, besonders auch die Abweichungen der analytischen Berechnungen von der Realität, sind so groß, dass weitere, ergebnisoffene Untersuchungen zur Überprüfung einer sinnvollen Anwendung der DIN EN 1591-1 gemacht werden müssen.

Die Ausführungen machen klar, dass eine Berechnung der Dichtheit der Flanschverbindungen über eine analytische Berechnung in der jetzt angewendeten Form nicht zielführend sein kann. In allen anderen technischen Bereichen ist die Anwendung der FEM / FEA üblich. Anderen Staaten wenden sie bereits seit vielen Jahren an.

Ohne tatsächlich etwas für den Umwelt- und Arbeitsschutz zu erreichen, kostet die bisher geübte Praxis die Industrie und am Ende den Staat viele Millionen, wenn nicht einige Milliarden €.

Weitere interessante Informationen zu verschiedenen Themen finden Sie auf der Homepage www.thomsen-bremen.de.

Zur technischen Beratung stehe ich Ihnen selbstverständlich gerne auch kurzfristig persönlich zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen aus Bremen
Peter Thomsen

Haftungsausschluss:
Die Inhalte der Regeln sind zum Teil zitiert, zum Teil in den Worten der Regeln wiedergegeben, die Anmerkungen und Auslegungen beruhen auf langjähriger Erfahrung, dienen der Entscheidungshilfe und begründen keinen Anspruch auf Gewährleistung.

© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de Stand 19.09.2022

Inhaltsverzeichnis

[1] DIN EN 1591-1:2014-04, Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung - Teil 1: Berechnung

[2] Richtlinie zu Industrieemissionen 2010/75/EU (IE-RL) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)

[3] Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG, Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, Ausfertigungsdatum: 15.03.1974

[4] VDI 2290:2012-06, Emissionsminderung - Kennwerte für dichte Flanschverbindungen

[5] TA Luft, Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), vom 18. August 2021

[6] Arbeitsschutzgesetz ArbSchG, Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit, vom 07.08.1996, Stand vom 18.3.2022

[7] Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV, Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln, Ausfertigungsdatum: 03.02.2015

[8] VDI 2230 - Blatt 1:2015-11, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen

[9] AD 2000-Regelwerk Merkblätter B7/B8, Regelwerk des TÜV, Berechnung von Flanschverbindungen

[10] DIN EN 13555:2021-04, Flansche und ihre Verbindungen - Dichtungskennwerte und Prüfverfahren für die Anwendung der Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtungen

[11] Richtlinie 2014/68/EU (DGRL) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt (Neufassung) Text von Bedeutung für den EWR, ersetzt Richtlinie 97/23/EG

[12] TRBS 2141, Technische Regeln für Betriebssicherheit Gefährdungen durch Dampf und Druck, Ausgabe: März 2019

[13] TÜV Süddeutschland, Zeitschrift zur Technischen Überwachung, im Heft Nr. 5, Ergebnisse der europäischen Flanschberechnungsnorm prEN 1591 im Vergleich mit FEM und Versuch, Dr.-Ing. Robert Kauer, TÜV-Süd und Prof. Dr.-Ing. Klaus Strohmeier, TU-München