

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 200 44 322
UBA-FB 000346



**Ermittlung und
Verminderung diffuser
flüssiger und gasförmiger
Emissionen in der
chemischen und
petrochemischen Industrie**

von

Dr. rer. nat. Karl-Erich Köppke

Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität
Witten/Herdecke

in Zusammenarbeit mit

Dr.-Ing. C. Cuhls

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Fachbereich Ingenieurwissenschaften Institut für Umwelttechnik

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei

Vorauszahlung von 10,00 €

durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in dem Bericht geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 2.3
Dr. Steffi Richter

Berlin, September 2002

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 000346	2.	3.
4. Titel des Berichts Ermittlung und Verminderung diffuser flüssiger und gasförmiger Emissionen in der chemischen und petrochemischen Industrie		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Dr. Köppke, Karl-Erich Dr. Cuhls, Carsten		8. Abschlussdatum März 2002
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke gGmbH Alfred-Herrhausen-Str. 44 58455 Witten		9. Veröffentlichungsdatum
		10. UFOPLAN – Nr. 200 44 322
		11. Seitenzahl 191
		12. Literaturangaben ca. 65
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1 14193 Berlin		13. Tabellen u. Diagramme 29
		14. Abbildungen 59
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Im Rahmen der Bemühungen für einen verbesserten Klimaschutz gewinnen VOC-Emissionen aus sogenannten „diffusen Quellen“ zunehmend an Bedeutung. Mit dem hiermit vorgelegten Forschungsbericht wird in Deutschland erstmals eine umfangreiche Darstellung ➤ der konstruktiven Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung diffuser Emissionen, ➤ der Vorgehensweise zur sachgerechten Montage, ➤ der technischen Möglichkeiten der Leckageerkennung sowie ➤ der verschiedenen Methoden zur Abschätzung der Gesamtemissionen aus chemischen und petrochemischen Produktionsanlagen vorgelegt. Durch eigene Untersuchungen an verschiedenen Anlagen der chemischen Industrie wurden die verschiedenen Messtechniken zur Leckageerkennung sowie die Methoden zur Abschätzung der Geamtemissionen aus diffusen Quellen überprüft und die jeweiligen Grenzen aufgezeigt.		
17. Schlagwörter diffuse Emissionen, VOC, Schnüffelmethode, Einpackmethode, Flansche, Ventile, hermetische Pumpen, Methode 21 der EPA, VDI-Richtlinie 2440		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 000346	2.	3.
4. Report Title Detection and Reduction of Diffuse Liquid and Gas Emissions in Chemical and Petrochemical Industries		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Dr. Köppke, Karl-Erich Dr. Cuhls, Carsten		8. Report Date March 2002
6. Performing Organization (Name, Address) Institute for Environmental Engineering and Management at the University of Witten/Herdecke Alfred-Herrhausen-Str. 44 58455 Witten		9. Publication Date
		10. UFOPLAN – Ref. No. 200 44 322
		11. No. of Pages 191
		12. No. of References ca. 65
7. Sponsor (Name, Address) Federal Environmental Agency Bismarckplatz 1 14193 Berlin		13. No. of Tables, Diagr. 29
		14. No. of Figures 59
15. Supplementary Notes		
16. Abstract In order to improve environmental protection, VOC emissions from diffuse sources are of growing importance. For the first time in Germany the present research report gives a detailed presentation of: ➤ constructive measures for the avoidance and reduction of diffuse emissions, ➤ adequate assembling procedures for equipments and installations, ➤ technical possibilities of leak detection and ➤ different methods for the estimation of total emissions from chemical and petrochemical production plants. On the basis of own investigations and monitoring measures taken at various plants of chemical and petrochemical industries different measuring techniques for leak detection as well as methods for the estimation of total emissions from diffuse sources are analysed and their limits are described.		
17. Keywords Diffuse emissions, VOC emissions, sniffle method, wrapping method, flanges, hermetic pumps, method 21 of EPA, VDI guidance 2440		
18. Price	19.	20.

Vorwort

Mit der Vergabe des Forschungsvorhabens „Ermittlung und Verminderung diffuser flüssiger und gasförmiger Emissionen in der chemischen und petrochemischen Industrie“ an das Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke hat das Umweltbundesamt sich einem Umweltproblem zugewandt, dem bislang in Deutschland nur im Zusammenhang mit Geruchsemissionen und Arbeitsschutzmaßnahmen Beachtung geschenkt wurde.

Mit dem vorgelegten Forschungsbericht wird nunmehr ein erster Versuch unternommen, die Gesamtheit der diffusen Emissionen umfassend und detailliert darzustellen. Ausgehend von der Erläuterung der in der Literatur gebräuchlichen, z.T. sehr unterschiedlichen Begriffsdefinitionen und Bilanzgrenzen werden

- die konstruktiven Lösungen zur Emissionsminderung oder Emissionsfassung aus diffusen Quellen,
- die Maßnahmen zur sachgerechten Montage,
- die messtechnischen Möglichkeiten zur Leckageerkennung sowie
- die Abschätzungsverfahren zur Ermittlung der Gesamtemissionen aus chemischen und petrochemischen Produktionsanlagen

vorge stellt. Darüber hinaus wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Untersuchungen an einer Praxisanlage zur Leckageerkennung und Abschätzung der Gesamtemissionen nach den verschiedenen Methoden der EPA und des VDI durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Die messtechnischen Untersuchungen an einer Aromatanlage wurden federführend vom Institut für Umwelttechnik der Martin-Luther-Universität Halle/Wittenberg unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Köser durchgeführt. Der besondere Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. K. Ohme, der die Messungen unter z. T. schwierigen Bedingungen durchgeführt hat, sowie Herrn Dr.-Ing. C. Cuhls, der mit seinen Beiträgen und Hinweisen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Nicht zuletzt sei an dieser Stelle die Unterstützung durch die Mitarbeiter des Umweltbundesamtes, Herrn Dr. W. Drechsler, Frau Dr. St. Richter sowie Herrn Dipl.-Ing. B.

Krause erwähnt, die mit konkreten Vorschlägen, aber auch kritischen Anmerkungen die Arbeiten an diesem Bericht begleitet haben.

Abschließend möchte ich mich bei zahlreichen Mitarbeitern namhafter Unternehmen der chemischen Industrie für ihre hilfreichen Diskussionen und Hinweise bedanken.

Neben der Darstellung der Gesamtproblematik war es Aufgabe, mit eigenen Vorschlägen die Diskussion zur Verminderung und Vermeidung von diffusen Emissionen voranzutreiben. Dass über diese Vorschläge in den Fachkreisen kontrovers diskutiert werden wird, ist zu erwarten und auch gewollt. Hierbei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass der Untersuchungsbericht sich um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Erfordernissen zum Klimaschutz einerseits und der Praktikabilität von Maßnahmen andererseits bemüht.



Dr. rer.nat. K.-E. Köppke

Kapitel 1	Vorbemerkung	1
Kapitel 2	Übersicht über nationale und internationale Regelwerke	6
2.1	Europa	7
2.2	Deutschland	10
2.3	Regelungen in weiteren Nationalstaaten.....	15
Kapitel 3	Definitionen und Zuordnungen.....	20
Kapitel 4	Methodisches Vorgehen	31
Kapitel 5	Konstruktionstechnische Maßnahmen zur Emissionsvermeidung und -verminderung	33
5.1	Allgemeine rechtliche Rahmenbedingungen	33
5.2	Verfahren zur Dichtheitsprüfung im Labor.....	34
5.3	Inventarliste potenzieller Quellen diffuser Emissionen in Chemieanlagen	38
5.4	Flanschverbindungen	39
5.4.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	39
5.4.2	Konstruktion von Flanschverbindungen	40
5.4.3	Werkstoffe und Konstruktion von Dichtelementen	43
5.4.4	Ursachen von Emissionen aus Flanschverbindungen	53
5.4.4.1	Flanschform	53
5.4.4.2	Dichtungsmaterial	54
5.4.4.3	Dichtungsbreite	56
5.4.4.4	Bauform der Dichtung	57

5.4.4.5	Einfluss von Druck und Temperatur.....	59
5.4.4.6	Einfluss des Betriebsmediums	62
5.4.5	Doppeldichtungssysteme mit Leckageüberwachung von Flanschverbindungen.....	64
5.4.6	Stand der Technik von Flanschverbindungen	66
5.5	Dichtsysteme für Wellen und Spindeln	70
5.5.1	Stopfbuchspackungen	72
5.5.2	Gleitringdichtungen	75
5.5.3	Magnetkupplungen	76
5.6	Pumpen	76
5.6.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	76
5.6.2	Bauarten hermetischer Pumpen	77
5.6.2.1	Pumpen mit Magnetkupplung	79
5.6.2.2	Spaltrohrmotorpumpen	81
5.6.2.3	Membranpumpen.....	82
5.7	Ventile.....	84
5.7.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	84
5.7.2	Konstruktion emissionsarmer Ventile.....	85
5.7.2.1	Faltenbalgventile.....	85
5.7.2.2	Ventile mit Emissionskontrollmöglichkeit	86
5.7.2.3	Vorspannsystem zum Ausgleich temperaturbedingter Dimensionsänderung von Stopfbuchsen	87
5.7.3	Fassung von Emissionen.....	90
5.7.4	Stand der Technik von Ventilkonstruktionen	90
5.8	Rührwerke	91
5.8.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	91
5.8.2	Konstruktion von Rührwerksdichtungen.....	92
5.8.3	Stand der Technik von Rührwerksdichtungen	93
5.9	Kompressoren	94
5.10	Entleerungsstellen	94
5.11	Probenahmestellen	94
5.12	Gebäude	95
5.12.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	95
5.12.2	Untersuchungen über Abluftemissionen aus Gebäuden.....	95

5.12.2.1	Messergebnisse bei der Herstellung von festem Polyester	97
5.12.2.2	Messergebnisse bei der Herstellung von flüssigem Polyester	99
5.12.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus den Untersuchungsergebnissen	101
Kapitel 6	Montage von lösbaren Verbindungen	103
6.1	Grundelemente einer ordnungsgemäßen Montage	103
6.1.1	Auswahl von Flanschform, Dichtungsmaterial, Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben	107
6.1.2	Vorbereitungen für den Einbau	107
6.1.3	Oberflächenbehandlung	108
6.1.4	Montage	108
6.1.5	Anziehen der Dichtverbindung	109
6.2	Überprüfung der Qualität der Montage	109
6.3	Einfluss von Montagefehlern und Unfällen auf die Leckagerate	111
6.3.1	Unzureichende Flächenpressung	111
6.3.2	Überschreitung der zulässigen Flächenpressung	111
6.3.3	Verzug der Rohrleitungen	113
6.3.4	Versagen der Dichtung aufgrund des Flansches	114
Kapitel 7	Überwachung der Dichtheit lösbarer Verbindungen	115
7.1	Überblick über rechtliche Grundlagen	115
7.1.1	Deutschland	115
7.1.2	USA	116
7.1.3	Europa	121
7.2	Vorliegende Untersuchungsergebnisse	122
7.2.1	Messmethodik	122
7.2.2	Messergebnisse verschiedener Untersuchungen	124
7.2.3	Einsatzgrenzen der Schnüffelmethode	127
7.3	Verfahren zur Detektion von Leckagen	131

7.3.1	Photooptische Detektionsverfahren	131
7.3.2	Tracergasverfahren.....	133
7.3.3	Membranschlauch-Technik (LEOS).....	133
7.3.4	Faseroptische Temperaturmessung	135
7.3.5	Impulsreflexionstechnik.....	137
7.4	Derzeitiger Stand der Überwachung und Verminderung flüchtiger Emissionen in Praxisanlagen	138
7.4.1	Anlagenüberwachung mit der Schnüffelmethode.....	138
7.4.2	Anlagenüberwachung durch integrale Messverfahren	138
7.4.3	Kombination von integralen Messverfahren mit der Schnüffelmethode zur lokalen Leckagedetektion.....	139
7.4.4	Weitere Methoden der Leckageerkennung	140
7.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Leckageerkennung und Empfehlungen.....	142
Kapitel 8	Abschätzung der flüchtigen Gesamtemissionen	151
8.1	Vorbemerkung	151
8.2	Abschätzmethoden.....	153
8.2.1	Methode 21 der EPA.....	156
8.2.1.1	Ermittlung mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren	157
8.2.1.2	Ermittlung durch Einteilung in Überprüfungsbereiche	159
8.2.1.3	Ermittlung nach der EPA-Korrelationsmethode.....	160
8.2.2	Ermittlung nach der VDI-Richtlinie 2440	162
8.3	Einflussfaktoren auf die Schnüffelmethode	164
8.4	Untersuchungen in einer Aromatanlage	166
8.4.1	Untersuchungsergebnisse der Schnüffelmethode	166
8.4.2	Abschätzung nach EPA und VDI	169
8.4.2.1	Ermittlung nach EPA mit mittleren Emissionsfaktoren	170
8.4.2.2	Ermittlung nach VDI-Richtlinie 2440	171
8.4.2.3	Ermittlung nach EPA durch Einteilung in Überprüfungsbereiche	173
8.4.2.4	Ermittlung nach EPA-Korrelationsmethode.....	177
8.4.3	Untersuchungsergebnisse der Einpackversuche	178

8.4.3.1	Durchführung der Untersuchungen.....	178
8.4.3.2	Leckagebestimmung von Flanschen.....	181
8.4.4	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Ermittlung diffuser Gesamtemissionen und Empfehlungen	184
Kapitel 9	Schlussbetrachtung.....	191

1 Vorbemerkung

In den letzten Jahren konzentrierten sich die meisten Aktivitäten in der chemischen und petrochemischen Industrie auf die Minderungen von Emissionen aus fassbaren Quellen durch geeignete Abluft-, Abwasser- und Abfallbehandlungsverfahren. Dabei wurden in den vergangenen Jahrzehnten beeindruckende Fortschritte erreicht. Emissionen aus Flanschverbindungen, Ventilen, Pumpen usw. wurden dagegen meist im Zusammenhang mit Geruchsemissionen oder aus Arbeitsschutzgründen betrachtet. Daher wurden schon früh emissionsarme Armaturen entwickelt, die die Sicherheit der Mitarbeiter am Arbeitsplatz erhöhen und umweltschädigende Einwirkungen auf Wasser, Luft und Boden verhindern. Die Verminderung von Emissionen ist im Wesentlichen von folgenden drei Faktoren abhängig:

1. Technische Randbedingungen mit geeigneter Wahl der Dichtelemente
2. Montage der lösbaren Verbindungen
3. Wartung und Kontrolle der Dichtelemente

Diese Faktoren spielen für die Verminderung von Emissionen und die Betriebssicherheit solcher Anlagen eine entscheidende Rolle. Obwohl die Emissionen der einzelnen Rohrleitungs- und Apparatekomponenten gering sind, führt die große Anzahl von z. B. Flanschen und Ventilen zu mengenmäßig vermutlich nicht zu vernachlässigenden Emissionsmassenströmen. Generell sind Zahlenangaben über VOC-Emissionen mit großer Vorsicht zu betrachten, weil die Bilanzgrenzen bei diesen Angaben oftmals sehr unterschiedlich sind und somit keine Vergleichbarkeit gegeben ist. Bei der Bilanzgrenze muss klar ausgewiesen werden, ob z. B. Sicherheitsventile, Fackeln und Tanklager in die Bilanzierung mit eingeschlossen sind oder ob diese separat erfasst werden. Auch ist zu beachten, ob Methan bei der Bilanzierung berücksichtigt wurde.

Darüber hinaus ist bei Zahlenangaben zu berücksichtigen, nach welcher Methode die Ermittlung der VOC-Emissionen aus diffusen Quellen vorgenommen wurde. Wie im Rahmen dieses Berichtes noch gezeigt wird, ergeben sich durch die verschiedenen Abschätzungsmethoden, die in Kapitel 8 eingehend vorgestellt werden, große Unterschiede im Ergebnis, wobei davon auszugehen ist, dass keines der bekannten

Abschätzungsverfahren die tatsächlichen Verhältnisse abbilden kann. Sie sind daher als Näherungsverfahren zu interpretieren.

So wurden beispielsweise Untersuchungen bei der BASF an verschiedenen lösbaren Verbindungen vorgenommen und auf den gesamten Standort Ludwigshafen hochgerechnet. Als Ergebnis dieser Hochrechnung ergab sich, dass der Anteil der Emissionen aus Flanschen, Ventilen, Pumpen usw. bezogen auf die Gesamtemissionen bei nur 1 - 2 % liegt. Etwas anders sehen die Relationen jedoch aus, wenn nur die organischen Stoffe betrachtet werden. **Abbildung 1.1** zeigt, dass mit zunehmenden Emissionsminderungsmaßnahmen im Bereich der fassbaren Emissionen der Anteil der Emissionen aus lösbaren Apparateverbindungen im Jahre 1996 auf 17 % angestiegen ist.

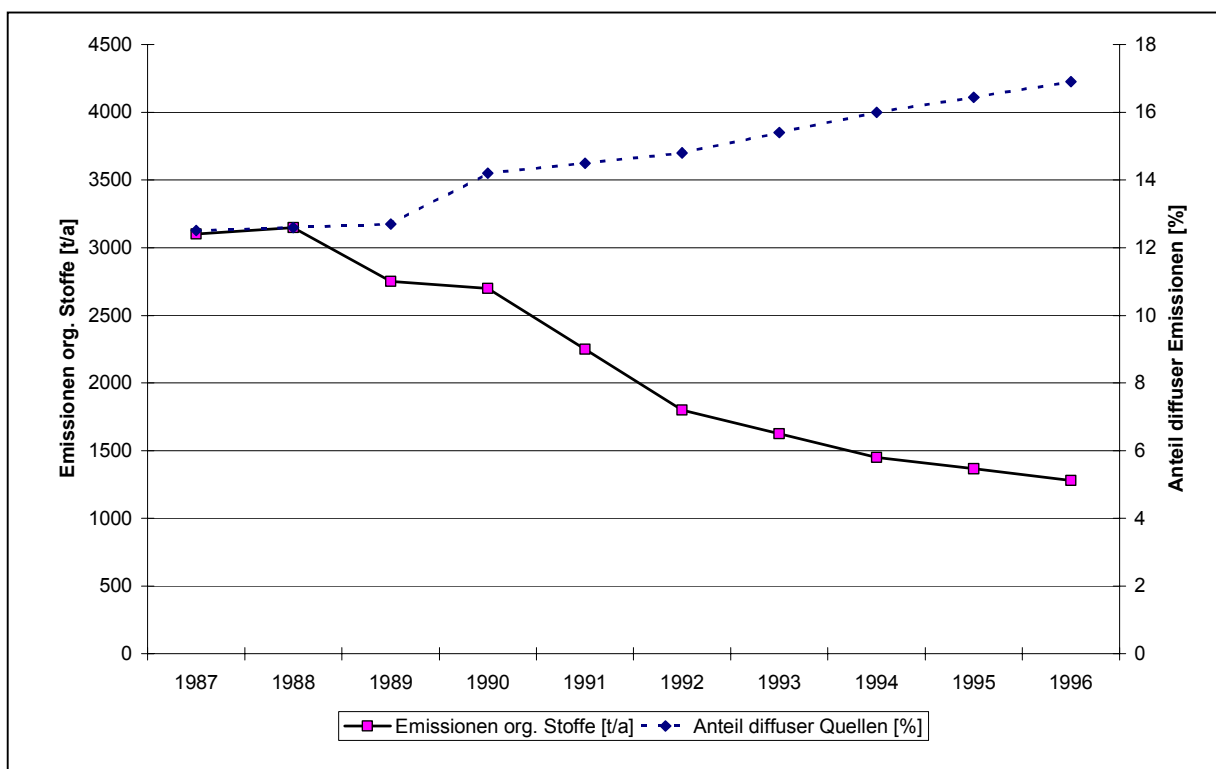


Abbildung 1.1: Emissionen an organischen Stoffen mit Anteil der diffusen Quellen bei der BASF ¹⁾

¹⁾ Hermann, K.; Siegle, H.-J.: Beherrschung flüssiger und gasförmiger Emissionen – Aktivitäten und Sichtweisen der chemischen und petrochemischen Industrie. VDI-Bericht 1440, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998

Bei diesen Angaben muss berücksichtigt werden, dass selbstverständlich nur ein geringer Bruchteil der Verbindungen vermessen wurde. Die Vermessung aller lös-
baren Verbindungen im Gesamtwerk Ludwigshafen ist aufgrund der Summe der lös-
baren Verbindungen praktisch gar nicht möglich. Deshalb sind die Angaben, die sich
aus der Hochrechnung ergaben, nur als grobe Anhaltspunkte zu werten. Ähnliches
gilt auch für die jeweiligen Anteile der verschiedenen Armaturen an den Gesamt-
emissionen, wie sie von der BASF wie folgt angegeben werden (**Abbildung 1.2**).

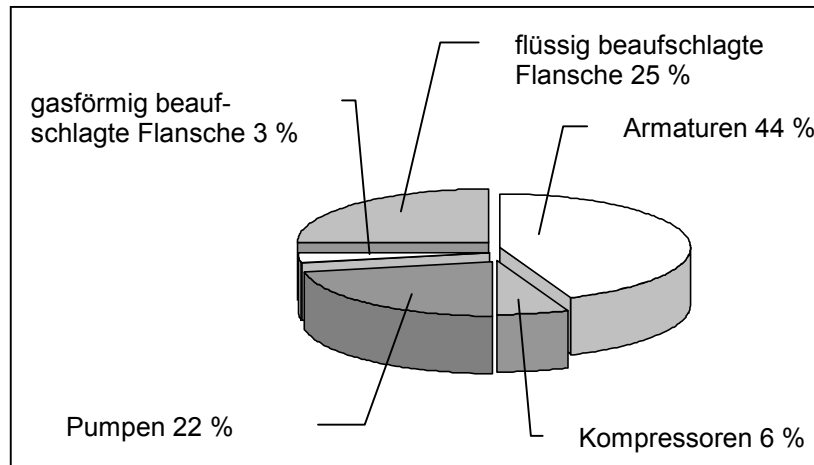


Abbildung 1.2: Anteil der Quellen an den diffusen Emissionen

Mit 44 % sind danach die Armaturen die Hauptquellen diffuser Emissionen. Mit 25 bzw. 28 % folgen Flanschverbindungen. In einer amerikanischen Untersuchung wurde eine andere Gewichtung festgestellt, die in **Abbildung 1.3** dargestellt ist.

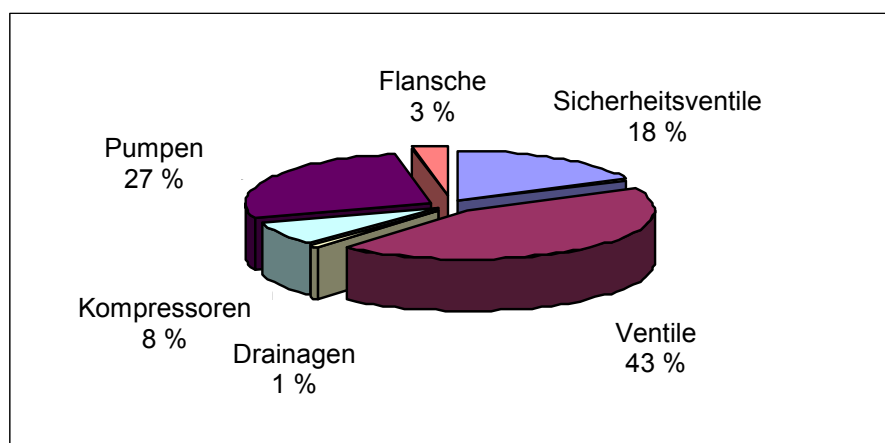


Abbildung 1.3: Anteil der Quellen an diffusen Emissionen nach einer amerikani-
schen Untersuchung ¹⁾

¹⁾ Bello, C.E.; Siegel, I.H.: Why Valves Leak? A Search for the Cause of Fugative Emissions. Environmental Progress Vol. 16, No. 1, 1997

Die Abbildungen 1.2 und 1.3 geben auch hier wiederum nur Hinweise für die Bedeutung der einzelnen Anlagenteile. Danach haben Ventile bzw. Armaturen in beiden Untersuchungen etwa die gleiche Gewichtung. Die Autoren kommen bezüglich der Bedeutung der Flansche jedoch zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, was im Einzelnen auf eine unterschiedliche Anzahl der verschiedenen Emissionsquellen sowie möglicherweise auf unterschiedliche Messtechniken zurückzuführen ist. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass Maßnahmen zur Emissionsminderung an allen Quellen gleichermaßen ansetzen sollten.

Schwerpunkt dieses Forschungsberichtes sind leicht flüchtige organische Verbindungen, die als VOC (**V**olatile **O**rganic **C**ompounds) zusammengefasst werden. VOC-Emissionen sind für die Umwelt wegen ihres Potenzials für das Auslösen von photochemischen Reaktionen, die zur Ozonbildung beitragen, von Bedeutung. Daher ist für die nationale und internationale Umweltpolitik die Verminderung von VOC-Emissionen von herausragender Bedeutung. Hierbei bildet in Deutschland das Vorsorgeprinzip die Grundlage staatlichen Handelns.¹⁾ Dieses findet ihren Ausdruck im Bundesimmissionsschutz-Gesetz (BImSchG), in dem festgelegt ist, dass bestimmte Industrieanlagen so gebaut und betrieben werden müssen, dass die Einflüsse auf die Umwelt auf ein Minimum beschränkt bleiben.

Speziell zur Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung von organischen Lösemitteln wurde die 31. BImSchV verabschiedet.²⁾ Sie setzt die europäische Richtlinie 1999/13/EG in deutsches Recht um. Mit den Bereichen „Herstellung von Anstrich- und Beschichtungsstoffen“, „Umwandlung von Kautschuk“ und „Arzneimittelherstellung“ wurden auch Teilbereiche der chemischen Industrie geregelt. Für die petrochemische Industrie enthält die 31. BImSchV noch keine Vorgaben. Mit der 20. (Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen beim Umfüllen und Lagern von Ottokraftstoffen) und 21. BImSchV (Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen) hat der

¹⁾ Drechsler, W.: Legal Requirements for the Reduction of Fugative Emissions in Germany. VDI-Berichte 1440, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998

²⁾ Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2001 Teil I Nr. 44, 24.8.2001

Gesetzgeber weitere Bereiche zur Verminderung von Kohlenwasserstoffemissionen geregelt.

Ein weiterer Ansatz zur Begrenzung diffuser Emissionen wurde mit dem Kabinettsbeschluss zur Novellierung der TA-Luft vom 12.12.2001 vorgelegt. Darin wird der Einsatz hochwertiger Dichtelemente gefordert. Der Nachweis zur Unterschreitung einer spezifischen Leckrate von 10^{-4} hPa•l/m•s bei Flanschverbindungen und Ventilen ($T < 250$ °C) ist an einem Prototypen nach einem vorgegeben Prüfverfahren zu erbringen. Für Abdichtungen von Spindeldurchführungen von Absperr- oder Regelorganen werden bei Prozesstemperaturen > 250 °C noch spezifische Leckageraten von 10^{-2} hPa•l/s•m akzeptiert.

Mit der Vergabe des Forschungsvorhabens „Ermittlung und Verminderung diffuser flüssiger und gasförmiger Emissionen in der chemischen und petrochemischen Industrie“ an das Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke verfolgt das Umweltbundesamt das Ziel der Quantifizierung sowie die Erarbeitung eines Konzeptes zur Minderung von diffusen Emissionen aus chemischen und petrochemischen Produktionsanlagen. Dabei sollen sowohl technische als auch organisatorische Maßnahmen vorgeschlagen werden. Im Einzelnen verfolgt das Umweltbundesamt mit diesem Forschungsvorhaben folgende Ziele:

1. Entwicklung von Methoden, mit denen:
 - a) die diffusen Emissionen für eine Anlage quantitativ abgeschätzt und
 - b) die Quellen mit überdurchschnittlicher Emissionsrate identifiziert werden können.
2. Erarbeitung einer Datenbasis zur Einschätzung der Ausgangslage diffuser Emissionen
3. Entwicklung eines Konzeptes organisatorischer Maßnahmen zur Emissionsminderung und –vorbeugung, z.B. Festlegung geeigneter Inspektions- und Wartungsintervalle und –routinen.
4. Darlegung von Empfehlungen für beispielhaft konstruktive, technische Maßnahmen zur Optimierung von Anlagenelementen mit überdurchschnittlicher Emissionsrate.

2 Übersicht über nationale und internationale Regelwerke

Regelwerke zur Vermeidung und Verminderung existieren schon seit mehr als 20 Jahren in den USA. Auch in Deutschland sind zahlreiche Gesetzeswerke und Normen entwickelt worden, wobei der Ursprung sicherlich mehr im Bereich des Arbeitsschutzes gelegen hat. Aufgrund der Smog-Situation, insbesondere in Kalifornien, wurden in den USA schon früh strengste Anforderungen an die Apparateauswahl festgeschrieben. Die nationale amerikanische Umweltbehörde EPA entwickelte in den vergangenen Jahren verschiedene Berechnungsmethoden zur Abschätzung flüchtiger Emissionen aus chemischen und petrochemischen Anlagen, die fortlaufend verfeinert wurden. Mangels Alternativen wurden diese Verfahren von zahlreichen Gremien der Europäischen Kommission und einigen nationalen Behörden aufgenommen und repräsentieren den gegenwärtigen Stand der Diskussionen, was in den verschiedenen Arbeitspapieren der EU zum Ausdruck kommt.

Erst mit der Vorlage der VDI-Richtlinie 2440 im Dezember 2000 wurde europaweit eine erste nationale Berechnungsmethode zur Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen von Raffinerien vorgelegt, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens an einem konkreten Beispiel der chemischen Industrie überprüft und den Ergebnissen der verschiedenen Methoden der EPA gegenübergestellt wird.

Neben der Entwicklung von Berechnungsmethoden zur Abschätzung flüchtiger Emissionen wird weltweit nach geeigneten Leckage-Überwachungssystemen und -methoden geforscht. Unter der Bezeichnung „Leak Detection and Repair“ (LDAR) wurden und werden Methoden zur Erkennung und Reparatur von Leckagen entwickelt, wobei die Praxistauglichkeit sowie das Kosten-Nutzen-Verhältnis bislang nur ansatzweise beachtet wurden.

Nachfolgend werden in Form einer Übersicht zentrale Regelwerke und Normen bedeutender Institutionen in Europa und in Deutschland sowie einzelne Normen vorgestellt. Auf die Inhalte der verschiedenen Regelwerke und Normen wird in verschiedenen Abschnitten dieses Berichtes noch im Einzelnen eingegangen.

2.1 Europa

Rat der Europäischen Union "Richtlinie 1999/13/EG des Rates vom 11.03.1999 über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen, die bei bestimmten Tätigkeiten und in bestimmten Anlagen bei der Verwendung organischer Lösungsmittel entstehen."
Amtsblatt Nr. 085, vom 29.03.1999, S 001 - 0022

„Zweck dieser Richtlinie ist es, die direkten und indirekten Auswirkungen der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in die Umwelt, hauptsächlich in die Luft, und die möglichen Risiken für die menschliche Gesundheit dadurch zu vermeiden oder zu verringern, dass für die in Anhang I aufgeführten Tätigkeiten, bei denen die in Anhang II A genannten Schwellenwerte für den Lösungsmittelverbrauch überschritten werden, Maßnahmen und Verfahren vorgeschrieben werden.“

In dieser Richtlinie der Europäischen Gemeinschaft werden erstmals Gesamtemissionen beschrieben und für bestimmte Tätigkeiten begrenzt. Sie gilt nicht für die petrochemische Industrie. Unter Gesamtemissionen ist demnach die Summe der flüchtigen Emissionen und der Emissionen in Abgasen zu verstehen. Die diffusen Emissionen sind wiederum alle nicht in Abgasen enthaltenen Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in die Luft, den Boden oder das Wasser sowie Lösungsmittel, die in einem Produkt enthalten sind. Hierzu zählen die nicht erfassten Emissionen, die durch Fenster, Türen, Entlüftungsschächte und andere Öffnungen in die Umwelt gelangen. Allerdings werden keine Grenzwerte angegeben.

EIPPCB¹⁾ "Draft Reference Document on the Best Available Techniques (BAT) in the Large Volume Organic Chemical Industry"
European Commission, Sevilla December 2000

¹⁾ European IPPC Bureau (Integrated Pollution Prevention and Control)

In dieser umfangreichen Darstellung des Standes der Technik in der organischen Großchemieindustrie werden an verschiedenen Stellen Hinweise zur Verminderung diffuser Emissionen gegeben. Eine zusammenfassende Darstellung der Gesamtproblematik wird in Annex II: „Leaking Losses“ vorgestellt. Als Quellen flüchtiger Emissionen werden Flansche, Ventile, Pumpen, Kompressoren, open-ended lines und Probenahmestellen genannt. Im Gegensatz zur Auffassung der Industrie werden auch Sicherheitsventile als Quellen flüchtiger Emissionen genannt (vgl. Kapitel 3).

Erste Hinweise zur Auswahl bestimmter Armaturen werden ebenso gegeben wie zur Lokalisierung und Überwachung potentieller Emissionsquellen. Zur Abschätzung diffuser Gesamtemissionen wird auf die Methoden der amerikanischen Umweltbehörde EPA verwiesen, die in Kapitel 8 dieses Berichtes näher vorgestellt und an einem Beispiel praktisch überprüft werden.

Hinweise auf die Vermeidung und Verminderung von Emissionen aus diffusen Quellen enthalten auch das jüngst vorgelegten BREF „Mineral Oil and Gas Refineries“ vom Dezember 2001. Der Bereich der Lagerung von flüssigen und gasförmigen Stoffen wird im BREF „Storage“ behandelt.

IMPEL¹⁾ „Diffuse VOC Emissions Estimation Methods , Reduction Measures, Licensing and Enforcement Practice“, Dezember 2000

Zur Implementierung von Regularien zur Vermeidung und Verminderung von diffusen Emissionen hat IMPEL Network eine umfangreiche Darstellung vorgelegt. Sie umfasst u.a. eine Zusammenstellung verschiedener Messmethoden zur Identifizierung flüchtiger Emissionen sowie eine Darstellung der US-amerikanischen Methoden zur Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen. Darüber

¹⁾ European Union Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law, Dezember 2000

hinaus wird eine Art Handlungsanweisung gegeben, wie Emissionen aus diffusen Quellen vermieden bzw. vermindert werden können.

CEN¹⁾ CEN/TC 138 Working Group 6 befasst sich mit der Standardisierung von Leckagebewertungsverfahren. Folgende europäische Normen liegen vor:

EN 1779	Dichtheitsprüfung: Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und -verfahren
EN 1330-8	Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Begriffe für die Dichtheitsprüfung
EN 1518	Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Charakterisierung von massenspektrometrischen Leckdetektoren (angelehnt an ISO 3530)
EN 1593	Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Blasenprüfverfahren
EN 13184	Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung – Druckänderungsverfahren
EN 13185	Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung – Prüfgasverfahren
prEN 13192	Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Kalibrierung von Referenzlecks für Gase
prEN 13625	Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung – Anleitung zur Auswahl von Dichtheitsprüfgeräten

CEN/TC 264 Working Group 17 befasst sich mit den allgemeinen Prinzipien der Überwachung von Produktionsanlagen.²⁾ Zur Bestimmung der Gesamtemissionsrate flüchtiger Verbindungen verweist die WG 17 auf das Protokoll zur Abschätzung von Leckageraten herausgegeben von der amerikanischen Umweltbehörde EPA.

¹⁾ Normungsgremium der EU an dem sich die nationalen Normungsinstitutionen orientieren.

²⁾ CEN/TC 264/WG 17 N 28: Working Paper on General Principles of Monitoring, September 2001

CEFIC¹⁾ *"Control of Fugitive Emissions Generated by Leaks in Closed Equipments and Piping"*

CEFIC N° 202, 21.02.2001

Dieses Regelwerk gibt einen Überblick über die besten zur Verfügung stehenden Techniken zur Leckage-Kontrolle flüchtiger Verbindungen in chemischen und petrochemischen Anlagen. Dieses Dokument wird in die BREF-Erstellung über die Large Volume Organic Chemical Industry integriert.

Die Betrachtungen sind begrenzt auf die diffusen Emissionen, die in Rohrsystemen und in Armaturen von chemischen und petrochemischen Installationen auftreten. Im Einzelnen sind dies Gasleckagen bei Ventilen, Flanschen, Sicherheitsventilen, Pumpen- und Kompressor-Dichtungen, Probenahmestellen, Mannlöcher und andere Emissionsquellen.

2.2 Deutschland

In Deutschland gibt es zahlreiche Regelwerke, die Aussagen und Anforderungen über die Dichtheit von Anlagen enthalten. Eine Auflistung der wichtigsten Regelwerke gibt die **Tabelle 2.2.1** wieder. Konkrete Grenzwerte wurden für den Umgang mit Gefahrstoffen am Arbeitsplatz mit den MAK-, TRK- und BAT-Werten vom Gesetzgeber festgelegt.

¹⁾ Europäischer Rat der chemischen Industrie (Conseil Européen de l'Industrie Chimique/European Chemical Industry Council)

Tabelle 2.2.1: Regelwerke zur Dichtheit von Produktionsanlagen

Bundesimmissionsschutzgesetz		TA-Luft, 20., 21., 31. BImSchV
Gefahrstoffverordnung	§ 17	Allgemeine Schutzpflichten
	§ 18	Überwachungspflicht
	§ 19	Rangfolge der Schutzmaßnahmen
Druckbehälterverordnung	TRB 600	Dichtigkeit in Bezug auf die Lagerung von Gasen
Unfallverhütungsvorschriften Gase	§ 12	Dichtheit von Anlagen
	§ 19	Dichtheitsüberwachung
VBG 113	§ 13	Technische und organisatorische Schutzmaßnahmen (bei krebserzeugenden Stoffen)
Wasserhaushaltsgesetz	§ 1a	Gundsatzanforderungen
	§ 19g	Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
VawS	§ 4	Anforderungen an bestimmte Anlagen

Konkrete zulässige Maximalkonzentrationen für bestimmte Stoffe am Arbeitsplatz ergeben sich aus der Gefahrstoffverordnung mit den Maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK), den Technischen Richtkonzentrationen (TRK) sowie den Biologischen Arbeitsplatztoleranzwerten (BAT). Aussagen bzw. Anforderungen für Emissionen direkt aus lösbaren Verbindungen, wie Flansche, Wellendichtungen usw., liegen zum Teil für Bauartprüfungen, nicht jedoch zur Überwachung im laufenden Betrieb vor. Hier steht die Erstellung eines Regelwerkes vergleichsweise noch am Anfang. Anforderungen zur Begrenzung von Emissionen aus lösbaren Verbindungen finden sich in folgenden Regelwerken:

TA-Luft: Die Emissionen luftverunreinigender Stoffe sind entsprechend der TA-Luft für verschiedene Stoffgruppen risikoproportional zu begrenzen, wobei Maximale Emissionskonzentrationen in Abhängigkeit von deren Wirkparametern festgelegt sind. Unabhängig von der Anlagenart (Emissionsentstehung) sind für organische Stoffe drei stoffbezogene Emissionskonzentrationen festgelegt worden. Darüber hinaus gilt für krebserzeugende Stoffe neben ebenfalls drei Maximalen Emissionskonzentrationen das Minimierungsgebot.

Allen Emissionsbegrenzungen ist gemeinsam, dass die höchstzulässigen Massenkonzentrationen jeweils nur ab einem bestimmten Massenstrom gelten.

Für flüchtige Emissionen allerdings lassen sich keine Emissionsbegrenzungen als Massenkonzentrationen im Abgas festlegen. Der Grund dafür ist, dass flüchtige Emissionen nur bei Emissionsquellen ohne definierte Abgasvolumenströme auftreten und damit im Gegensatz zu den aus gefassten Quellen austretenden Emissionen stehen. Es werden daher für diffuse Emissionen, abweichend von dem üblichen Vorgehen, die emissionsbegrenzenden Anforderungen in der Regel durch bauliche und betriebliche Maßnahmen festgelegt.

Für gasförmige Emissionen beim Verarbeiten, Fördern und Umfüllen von flüssigen organischen Stoffen, sind die Anforderungen an die dafür erforderlichen Bauteile wie Pumpen, Verdichter, Flansche und Absperrorgane in 5.2.6.1 bis 5.2.6.7 in Verbindung mit 5.4.9.2 der TA-Luft rechtlich verankert.¹⁾ Es sind aber keine Überwachungsanforderungen oder Begrenzungen im Sinne von Überwachungswerten festgelegt.

Die genannten Anforderungen in 5.2.6.1 bis 5.2.6.7 der TA-Luft gelten für gasförmige Emissionen beim Verarbeiten, Fördern, Umfüllen oder Lagern von flüssigen organischen Stoffen, die

- a) bei einer Temperatur von 293,15 K einen Dampfdruck von 13 hPa oder mehr haben,
- b) einen Massengehalt von mehr als 1 vom Hundert an Stoffen nach Nummer 5.2.5 Klasse I, Nummer 5.2.7.1.1 Klasse II oder III oder Nummer 5.2.7.1.3 enthalten,
- c) einen Massengehalt von mehr als 10 mg je kg an Stoffen nach Nummer 5.2.7.1.1 Klasse I oder Nummer 5.2.7.1.2 enthalten oder

¹⁾ TA-Luft: Kabinettsbeschluss vom 12. Dezember 2001

d) Stoffe nach Nummer 5.2.7.2 enthalten.

Die Stoffe der Nummer 5.2.5 Klasse I sind in Anhang 4 der TA Luft aufgelistet und als **Anhang 1** diesem Bericht beigelegt. Bei den Stoffen der Nummer 5.2.7.1.1 handelt es sich um krebserzeugende, bei Nummer 5.2.7.1.2 um erbgutverändernde und bei Nummer 5.2.7.1.3 um reproduktionstoxische Stoffe.

20. BImSchV Für den Betrieb von ortsfesten und ortsveränderlichen Anlagen, die mit Ottokraftstoffen befüllt oder aus denen Ottokraftstoffe entnommen werden, werden Gaspandelsysteme vorgeschrieben. Wo dies nicht möglich ist, wird die Fassung der bei der Befüllung verdrängten Abgase vorgeschrieben, die anschließend einer Abgasreinigungsanlage zuzuführen sind.
21. BImSchV Die Verordnung gilt speziell für die Errichtung und den Betrieb von Tankstellen. Wichtigster Punkt zur Verminderung von Kohlenwasserstoffemissionen ist die Einrichtung eines Gasrückführsystems nach dem Stand der Technik.
31. BImSchV Speziell zur Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung von organischen Lösemitteln wurde die 31. BImSchV verabschiedet.¹⁾ Sie setzt die europäische Richtlinie 1999/13/EG in deutsches Recht um und nennt je nach Gewerbebetrieb Emissionsgrenzwerte für gefasste Abgase, für Gesamtemissionen und für diffuse Emissionen. Im Einzelnen sind folgende Bereiche geregelt:

1. Reproduktion von Text oder von Bildern
2. Reinigung der Oberflächen von Materialien oder Produkten

¹⁾ Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2001 Teil I Nr. 44, 24.8.2001

3. Textilreinigung
4. Serienbeschichtung von Kraftfahrzeugen, Fahrerhäusern, Nutzfahrzeugen, Bussen oder Schienenfahrzeugen
5. Fahrzeugreparaturalackierung
6. Beschichten von Bandblech
7. Beschichten von Wickeldraht
8. Beschichten von sonstigen Metall- oder Kunststoffoberflächen
9. Beschichten von Textil-, Gewebe- oder Folien- oder Papieroberflächen
10. Beschichtung von Leder
11. Holzimprägnierung
12. Laminierung von Holz oder Kunststoffen
13. Klebebeschichtung
14. Herstellung von Schuhen
15. Herstellung von Anstrich- oder Beschichtungsstoffen sowie Herstellung von Bautenschutz- oder Holzschutzmitteln, Klebstoffen oder Druckfarben
16. Umwandlung von Kautschuk
17. Extraktion von Pflanzenöl oder tierischem Fett sowie Raffination von Pflanzenöl
18. Herstellung von Arzneimitteln

Der Bereich der chemischen und petrochemischen Industrie ist darin jedoch noch nicht geregelt.

VDI „Emissionsminderung Mineralölraffinerien“ VDI-Richtlinie 2440, vom November 2000

Die VDI-Richtlinie 2440 stellt eine erste umfassende Gesamtdarstellung zur Verminderung und Vermeidung von Emissionen aus Raffinerien dar. Neben zahlreichen bautechnischen Hinweisen wird mit dieser Richtlinie auch eine Berechnungsmethode zur Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen vorgelegt. Sie basiert allein auf dem angelegten Verzeichnis aller lösbaren Verbindungen,

den Armaturentypen und ihren zugehörigen Emissionsfaktoren. Ergänzende Messungen sind nicht vorgesehen. Darüber hinaus ist im Anhang A eine Prüfmethode mit Helium beschrieben, um die spezifische Leckagerate von Ventilen an einem Prototypen zu bestimmen.

Darüber hinaus liegen weitere VDI-Richtlinien für die Konstruktion und Auswahl einzelner Bauteile vor.

DIN
DECHEMA

Für die Auswahl von Dichtungselementen, Werkstoffen, Prüfverfahren zur Dichtheitsprüfung von Bauteilen usw. wurden zahlreiche Normen vorgelegt, die an dieser Stelle nicht alle aufgelistet werden können. Die wichtigsten Normen werden wegen der besseren Übersichtlichkeit in den einzelnen Kapitel dieses Berichtes genannt. Dies gilt ebenso für Informationsblätter der DECHEMA.¹⁾

2.3 Regelungen in weiteren Nationalstaaten

Regelwerke existieren in den wenigsten Staaten der Europäischen Union. Branchenbezogen sind die Anforderungen für Raffinerien allgemein am weitesten entwickelt.

Belgien

In Belgien werden verschiedene Methoden zur Abschätzung diffuser Emissionen verwendet, weil keine nationale Richtlinie existiert. Die meist verwendete Methode ist die Abschätzung ohne Messungen mit durchschnittlichen Emissionsraten, die in Kapitel 8 näher vorgestellt wird. Mehr und mehr werden auch Messungen analog den amerikanischen EPA-Methoden im Rahmen von verschiedenen Studien durchgeführt. Zur täglichen Überwachungspraxis gehören Messungen zur Identifikation von Leckagen jedoch nicht.

¹⁾ Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, Dechema e. V., Frankfurt/Main

Dänemark	Ähnlich wie in Belgien existiert keine allgemein gültige Vorschrift zur Abschätzung der flüchtigen Emissionen. Zur Begrenzung flüchtiger Verbindungen werden Grenzkonzentrationen für die Umgebung einer Anlage festgelegt. Zur Überwachung von flüchtigen Emissionen wird ein optisches Verfahren eingesetzt, das die Durchschnittskonzentrationen bestimmter Einzelstoffe messen kann. Hierzu gehören z. B. Benzol, Kohlenwasserstoffe, Xylol, Toluol und Naphthalin. Zusammen mit einem Windmessgerät wird diese Methode eingesetzt, um Konzentrationsänderungen in der Umgebung zu detektieren. Ein plötzliches Ansteigen bestimmter Schadstoffkonzentrationen kann mit Hilfe des Produktionsplans korreliert werden, so dass die Ursachen der Emissionen eingegrenzt werden können.
Niederlande	In den Niederlanden wurde 1994 ein VOC-Programm zwischen den Umweltbehörden und einzelnen Unternehmen beschlossen, das die Verminderung der VOC-Emissionen bis zum Jahr 2000 um 50% bezogen auf die Emissionssituation von 1980 vorsah. Bis zum Jahr 2010 soll eine Reduzierung um 80 % erreicht werden. Mit dem VOC-Programm wurde auch eine Berechnungsmethode nach EPA festgeschrieben, die für die Genehmigung neuer Anlagen Folgewirkungen haben kann. Durch die strenge Festlegung von VOC-Verminderung und festgelegter Methode zur Abschätzung von VOC-Emissionen ist eine möglichst genaue Analyse der Situation erforderlich. Dies bedeutet, dass die einmal abgeschätzten Emissionen nachkalkuliert und mit den festgelegten Zielen des VOC-Minderungsprogramms verglichen werden müssen.
Schweden	Eine allgemein gültige Richtlinie zur Verminderung flüchtiger Emissionen existiert nicht. Anforderungen werden im Rahmen der einzelnen Genehmigungsbescheide festgelegt. Das Unternehmen hat im Rahmen des Genehmigungsverfahrens darzustellen, wie flüchtige Emissionen auf ein Minimum begrenzt werden. Hierzu gehören u.a. die Auswahl von Ventilen und anderen Armaturen, ein

Programm zur Leckerkennung (Raffinerien) sowie die Emissionsüberwachung durch ein optisches Überwachungssystem.

UK Richtlinien werden im Vereinigten Königreich in der Publikationsreihe „Chief Inspector`s Guidance Note“ für verschiedene industrielle Prozesse dargelegt. Für Erdölraffinerien gelten z. B. folgende Anforderungen:

- Programm zur Erkennung und Überwachung von Leckagen mit Hilfe von transportablen Überwachungsgeräten,
- Doppeldichtungssystem für Tanks (floating roof tanks)
- Vorschriften zur Auswahl von Pumpen, Ventilen etc.

USA In den USA wurde im Jahre 1990 der Clean Air Act novelliert und schließt seitdem die Begrenzung flüchtiger Emissionen mit ein. Das Gesetz fordert z. B. die Unterschreitung einer Konzentration von 500 ppm an der Spindelabdichtung von Ventilen. Ferner listet das Gesetz 189 gefährliche Stoffe auf, die zu überwachen sind. 149 Verbindungen zählen zu den VOC, die mit Hilfe eines VOC-Messgerätes detektiert werden können.

Neben den konkreten Vorschriften zur Überwachung von bestehenden Anlagen wurden von der amerikanischen Umweltbehörde EPA mehrere Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen vorgelegt. Für eine Reihe von Verfahren in der petrochemischen Industrie hat die EPA durchschnittliche Emissionsfaktoren (in kg/h) bestimmt. Darüber hinaus hat die EPA Methoden zur Abschätzung der diffusen Emissionen einer chemischen Produktionsanlage entwickelt, auf die in Kapitel 8 noch detailliert eingegangen wird. Einige Regelwerke, die auch im Rahmen dieses Berichtes bedeutsam sind, werden im Folgenden kurz vorgestellt:

EPA	"LDAR (Leak Detection and Repair)" Hierbei handelt es sich um ein Regelwerk zur Begrenzung der diffusen Emissionen von Anlagenkomponenten wie Flansche, Pumpen und Ventile. Diese Komponenten sind regelmäßig mit tragbaren Analysatoren auf Leckagen zu überprüfen. Lecks oberhalb eines vorgegebenen Grenzwertes sind innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens zu reparieren. "Protocol for Equipment Leak Emission Estimates" EPA-453 / R-95-017, Washington /USA, 1995 Technischer Leitfaden der EPA zur Abschätzung diffuser Emissionen. Methode 21 Hier werden von der EPA verschiedene Methoden zur Abschätzung von Emissionen aus diffusen Quellen vorgestellt. Hierbei handelt es sich Einzelnen um folgende Verfahren: ➤ Abschätzung mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren ➤ Abschätzung durch Einteilung in Überprüfungsbereiche ➤ Abschätzung nach der EPA-Korrelationsmethode ➤ Abschätzung durch eine anlagenspezifische Korrelation
API ¹⁾ :	<i>"Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotary Pumps"</i> API Standard 682, October 1994. <i>"Emission Factors for Oil and Gas Production Operations"</i> API Publication 4615, 1995
CMA ²⁾ :	"Guidance for Estimating Fugitive Emissions " CMA-Anleitungen mit eigenen Erhebungen zu durchschnittlichen Emissionsfaktoren für die Bedingungen der chemischen Industrie. Folgende Parameter bestimmen nach den CMA Erhebungen zufolge die Quellstärke der diffusen Quellen:

¹⁾ American Petroleum Institute

²⁾ Chemical Manufacturers Association

-
- Aggregatzustand der fluiden Phase (Gas oder Flüssigkeit)
 - Stoffeigenschaften der fluiden Phase
 - Druck, Temperatur
 - kontinuierliche oder diskontinuierliche Prozessführung
 - Korrosivität der Flüssigkeit
 - Alter der Komponente
 - Wartungszyklus
 - Ventiltyp
 - Art der Dichtung, Einbau
 - Flansch: Art und Dichtung, Verschraubungstechnik
 - Pumpendichtung und Pumpenkolbengeschwindigkeit
 - Kompressordichtungsart
 - Abmessungen/Größe der Komponenten

3 Definitionen und Zuordnungen

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sind zunächst einige Begriffe zu erläutern, die in Deutschland im Vergleich zu denen der Europäischen Kommission und anderen Staaten, wie z. B. den USA, zum Teil unterschiedlich definiert sind:

Volatile Organic Compounds (VOC) Die Europäische Kommission definiert im Rahmen der Beschreibung der Best Available Technique (BAT), dass die Substanzen, die zu den VOC zu zählen sind, bei 20 °C einen Dampfdruck von größer als 0,3 kPa haben.¹⁾ In der 31. BImSchV vom 21.8.2001 werden flüchtige organische Verbindungen wie folgt definiert:²⁾

„...eine organische Verbindung, die bei 293,15 K einen Dampfdruck von 0,01 kPa oder mehr hat oder unter den jeweiligen Verwendungsbedingungen eine entsprechende Flüchtigkeit aufweist. Der Kreosotanteil, der bei 293,15 K diesen Dampfdruck übersteigt, gilt als flüchtige organische Verbindung.“

Die TA-Luft definiert nicht direkt was VOC sind.³⁾ Sie legt nur fest, ab welchen physikalischen Randbedingungen und für welche Stoffklasse bestimmte Anforderungen der TA-Luft anzuwenden sind.

VOC/TOC In der nationalen und internationalen Fachliteratur werden häufig die Summenparameter TOC und VOC zur Beschreibung des gleichen Sachverhalts verwendet. Der Unterschied

¹⁾ Europäische Kommission: Draft Reference Document on the Best Available Technique in the Large Volume Organic Chemical Industry, Dez. 2000

²⁾ 31. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung von Lösemitteln in bestimmten Anlagen. Bundesgesetzblatt 2001, Teil I, Nr. 44 vom 24.8.2001

³⁾ Kabinettsbeschluss vom 12. Dezember 2001

zwischen beiden Parametern besteht darin, dass der TOC Methan immer einschließt, der VOC meist jedoch nicht. Zur Vermeidung eines Missverständnisses wird immer häufiger das Kürzel NMVOC verwendet.

Darüber hinaus kürzt der Buchstabe C einmal den Begriff „Carbon“ (TOC) und einmal den Begriff „Compound“ (VOC) ab. So bezieht sich der Parameter VOC auf die Summe der organischen Stoffe, der Parameter TOC auf die Summe des organisch gebundenen Kohlenstoffs.

diffuse Emissionen Eine Begriffsdefinition, was unter „diffusen Quellen“ bzw. „diffusen Emissionen“ zu verstehen ist, liegt im deutschen Recht noch nicht vor. Die Europäische Kommission dagegen unterscheidet in ihrem Arbeitspapier über die allgemeinen Prinzipien der Überwachung der Arbeitsgruppe 17 der CEN/TC 264 zwischen „fugative emissions“ und „diffuse emissions“, was im deutschen Sprachgebrauch noch nicht der Fall ist.⁴⁾ Unter „fugative emissions“ versteht die Kommission solche Emissionen, die aus eigentlich geschlossenen Systemen stammen, wie z. B. Leckagen aus Armaturen oder Verluste aus Speicherbehältern für Gase und Flüssigkeiten.

Diffuse Emissionen sind dagegen Emissionen, die durch direkten Kontakt flüchtiger oder staubiger Verbindungen mit der Umgebung unter normalen Prozessbedingungen entstehen. Dies sind z. B. Verluste, die mit dem Kühlwasser oder dem Abfall ausgetragen werden. Das Arbeitspapier der CEN nennt als weitere Beispiele für diffuse Emissionen das Öffnen von Filtern oder Behältern, Diffusionen durch eine offene Oberfläche, flüchtige Verbindungen aus Kanalssystemen usw.

⁴⁾ CEN/TC 264/WG 17 N 28: Working Paper on General Principles of Monitoring, September 2001

Die Unterscheidung zwischen „fugative“ und „diffuse emissions“ erfolgt somit durch die beabsichtigte bzw. nicht beabsichtigte apparative Umschließung von Verbindungen. Beide Arten von Emissionen werden von den „channelled emissions“ abgegrenzt. Hierbei handelt es sich um die gefassten und in einer Rohrleitung abgeleiteten Emissionen. Die hier kurz erläuterten Begriffsdefinitionen werden von der Europäischen Kommission selbst nicht konsequent durchgehalten. Sie sind auch bislang nicht von der deutschen Gesetzgebung übernommen worden, wie die Begriffsdefinition in der 31. BImSchV zeigt:

Diffuse Emissionen sind danach „alle nicht in gefassten Abgasen einer Anlage enthaltenen Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen einschließlich der Emissionen, die durch Fenster, Türen, Entlüftungsschächte oder ähnliche Öffnungen in die Umwelt gelangen sowie die flüchtigen organischen Verbindungen, die in einem von der Anlage hergestellten Produkt enthalten sind, soweit im Anhang III nichts anderes festgelegt ist.“

Aufgrund der von der EU abweichenden Definition in der deutschen Gesetzgebung ist die strikte begriffliche Abgrenzung von diffusen und flüchtigen bzw. fugativen Emissionen auch im Rahmen dieses Berichtes nicht immer konsequent durchzuhalten. Gegenstand dieses Berichtes sind nach der Definition der CEN „fugative emissions“. In der aktuellen Diskussion deutet sich an, dass „fugative emissions“ mit „fugativen“ und nicht mit „flüchtigen“ Emissionen übersetzt wird. Der Begriff „flüchtig“ (englisch: volatile) ist z.B. durch die Definition des VOC belegt. Der VOC umfasst Einzelstoffe, die ab bestimmten physikalischen Bedingungen gasförmig sind. Der Begriff „fugativ“ beschreibt dagegen den Sachverhalt des Austritts eines Stoffes aus einem System, wie z.B. einer Rohrleitung, in die Atmosphäre.

diffuse Quellen Es bestehen bei der Definition der diffusen Quellen erhebliche Auffassungsunterschiede, welche Apparaturen Verursacher diffuser Emissionen sein können. Die Industrie versteht unter diffusen Emissionen ausschließlich solche Emissionen, die aus unvermeidbaren Leckagen von Armaturen, Flanschen und Pumpen stammen. Sicherheitsventile und Fackeln werden – anders als in den USA – nicht zu den diffusen Quellen gezählt.¹⁾

Dichtheit Der Begriff „dicht“ bedeutet im Sprachgebrauch, dass ein Stoff aus seiner Umschließung nicht austreten kann, wie z.B. bei Schweißverbindungen. Bei lösbaren Verbindungen ist eine absolute Dichtheit technisch nicht erreichbar, weil kleine Moleküle durch die Zwischenräume dringen, die ihnen große zusammengelagerte Moleküle übriglassen. Daher steht mehr die Frage der Prüfbarkeit der technischen Dichtheit im Vordergrund der Überlegungen. Hierzu gibt das Dechema Informationsblatt ZfP1 von 10/1990 folgende Definition:

Ein Prüfobjekt ist technisch dicht, wenn mit dem gewählten Prüfverfahren und der erforderlichen Prüfempfindlichkeit bzw. der dem Verfahren entsprechenden Nachweisempfindlichkeit das Durchtreten des Prüfmediums von einem Raum in den anderen oder nach außen nicht nachgewiesen werden kann.

Im Abschnitt 5.2 des Beiblattes zu den Technischen Regeln für Druckbehälter (TRB) ist die Dichtheit ähnlich definiert:

Technisch dicht sind alle Anlagenteile, wenn bei einer für den Anwendungsfall geeigneten Dichtheitsprüfung oder Dichtheitsüberwachung bzw. -kontrolle, z.B. mit schaubildenden Mitteln,

¹⁾ Hermann, K.; Siegle, H.-J.: Beherrschung flüssiger und gasförmiger Emissionen – Aktivitäten und Sichtweisen der chemischen und petrochemischen Industrie. VDI-Bericht 1440, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998

mit Lecksuch- oder -anzeigegeräten, eine unzulässige Undichtigkeit nicht festgestellt wird.

Dichtheitsbarrieren In Chemieanlagen können im Wesentlichen zwei materielle Arten von Barrieren unterschieden werden, die für das sichere Umschließen und Auffangen von Stoffen sorgen. Die 1. Barriere besteht aus den Apparaten, Behältern und Rohrleitungen. Die einzelnen Komponenten sind in einer Anlage dabei über Dichtelemente verbunden. Zu der 2. Barriere sind nach dem Wasserrecht „Dichtflächen“ zu zählen, die nach § 19g des WHG für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vorgeschrieben sind, damit eine Verunreinigung der Gewässer nicht zu besorgen ist.

Gegenstand dieses Berichtes ist ausschließlich die 1. Dichtheitsbarriere, wobei hierbei Apparate und Rohrleitungen grundsätzlich von den Dichtelementen zu unterscheiden sind. Denn das Hauptfügeverfahren im chemischen Apparatebau ist das Schweißen. Daher kommt den Schweißnähten eine besondere Bedeutung zu. Von den Schweißverbindungen sind Verbindungen durch „Dichtelemente“ zu unterscheiden. Dabei handelt es sich um lösbare Verbindungen wie Flansche, Stopfbuchsen von Armaturen (Schieber, Ventile, Regelarmaturen) und Wellenabdichtungen von Pumpen, Rührwerken und Kompressoren. Dieser Forschungsbericht beschäftigt sich mit den lösbaren Verbindungen.

Im Rahmen der Diskussion über die Bewertung von fugativen Emissionen mit Hilfe von Prüf- und Überwachungswerten müssen die angewandten Messverfahren und Prüfmethoden mit den daraus resultierenden Ergebnissen unterschieden werden in:

- Verfahren zur Bestimmung der Leckagerate
- Verfahren zur Überwachung von Bauteilen in Industrieanlagen durch Konzentrationsmessungen

Von der Zielrichtung hängt direkt die Wahl des Messverfahrens ab. Weiter müssen der Aufwand für das jeweilige Messverfahren sowie deren Nachweisgrenze berücksichtigt werden. Ohne auf die einzelnen messtechnischen Methoden, die in Kapitel 5 bzw 8 eingehend beschrieben werden, an dieser Stelle näher einzugehen, müssen die Zielrichtung der Messungen, die anzuwendenden Messtechniken sowie die daraus resultierenden Messergebnisse bzw. Einheiten voneinander abgegrenzt werden. Die Durchsicht der verschiedenen Messergebnisse unterschiedlicher Untersuchungen hat gezeigt, dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den meisten Fällen nur eingeschränkt gegeben ist. Für die Ableitung verallgemeinerbarer Schlussfolgerungen aus Einzeluntersuchungen ist jedoch eine möglichst einheitliche Methodik sowie die Darstellung in vergleichbaren Einheiten unbedingte Voraussetzung. Für den Einstieg in diese Problematik werden die folgenden Begriffe mit ihren Einheiten kurz erläutert.

Leckagerate	Die TA-Luft fordert für Absperr- und Regelorgane den Nachweis der Dichtheit einer Spindeldurchführung in einem in der DIN 2440 näher beschriebenen Prüfverfahren. Nach DIN 2440 müssen dabei in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen festgelegte „spezifische Leckageraten“ unterschritten werden,
$\text{hPa}\cdot\text{l}/\text{m}\cdot\text{s}$	die als Druckverlust pro Sekunde bei gegebenen Volumen und gegebener Dichtlänge in $\text{hPa}\cdot\text{l}/\text{m}\cdot\text{s}$ ($=\text{mbar}\cdot\text{l}/\text{m}\cdot\text{s}$) angegeben sind.
$\text{mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$	Wird der gemessene Druckverlust im Prüfverfahren nicht auf die Dichtungslänge bezogen, wird von der „Leckagerate“ in $\text{mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$ gesprochen. Weil sich die Druckverlustbestimmung nicht für den laufenden Betrieb einer Anlage eignet, wird sie nur in Prüflabors eingesetzt.

Für die Bestimmung der „spezifischen Leckagerate“ z.B. an Flanschen im laufenden Betrieb wurde u.a. die sogenannte „Einpackmethode“ entwickelt. Bei dieser Prüfung wird das Bauteil hermetisch gegenüber der Umwelt abgeschlossen. Durch den entstehenden Prüfraum wird ein definierter Gasstrom geleitet, der im Falle einer Leckage mit dem Prüfmedium am Ausgang beladen ist. Mit Hilfe eines FID wird anschließend der Kohlenstoffgehalt gemessen und die Leckagerate in $\text{mg/m}\cdot\text{s}$ bestimmt. Diese Angabe in mg ist letztlich erforderlich, um den Gesamtverlust einer Anlage in kg/a zu berechnen.

Sofern die Flanschverbindungen vermessen wurden, ist eine Umrechnung von $\text{hPa}\cdot\text{l/m}\cdot\text{s}$ bzw. $\text{mbar}\cdot\text{l/s}$ in $\text{mg/m}\cdot\text{s}$ unter der Annahme des idealen Gasgesetzes möglich (vgl. Umrechnungstabellen in **Anhang 1**). Leckageraten von Ventilen und anderen Bauteilen werden häufig in kg/h angegeben.

Konzentrationen

ppm

Weil, wie schon kurz angedeutet wurde, Differenzdruckmessungen in der Praxis nicht anwendbar sind und die Einpackmethode ein sehr aufwendiges Verfahren darstellt, wird zur Leckerkennung häufig die Schnüffelmethode eingesetzt. Hierbei wird die Kohlenstoffkonzentration in ppm mit Hilfe eines tragbaren FID an ausgewählten Stellen einer Flanschverbindung oder eines Ventils bestimmt. Die Schüffelmethode eignet sich nicht zur Bestimmung der Leckagerate, sondern ausschließlich zur Leckerkennung und Bewertung.

Diese Zusammenhänge sind in der **Tabelle 3.1** noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3.1: Anwendungsgebiete und Ziele der verschiedenen Messverfahren

Messverfahren	Aufwand	Anwendungsgebiet und Ziel	Einheit
Differenzdruck-Methode	hoch	Bestimmung der Leckagerate in Laboranlagen	Flansche: hPa•l/m•s Flansche/Ventile: mbar•l/s
Einpack-Methode	sehr hoch	Bestimmung der Leckagerate in Praxis- und ggf. Laboranlagen	Flansche: mg/m•s Ventile: kg/h
Schnüffel-Methode	gering	Bestimmung der Schadstoffkonzentration in Praxisanlagen	alle Bauteile: ppm

Die Verfahren zur Ermittlung von Leckageraten bzw. zur Messung von Konzentrationen sind damit keinesfalls vollständig. Die drei genannten Verfahren sind aber derzeit am weitesten verbreitet und dienen in diesem Zusammenhang nur als Beispiel zur Zuordnung von Zielrichtung der Messung, der Messmethode selbst und der resultierenden Einheiten.

Bei der Bestimmung der Leckageraten mit Hilfe der Einpackmethode ergibt sich durch unterschiedliche Bezugsgrößen ein weiteres Problem, das beim Vergleich der verschiedenen Untersuchungsergebnisse zu beachten ist. Die meist eingesetzten Flammenionisationsdetektoren werden i.d.R. zunächst mit Methan, in einigen Fällen auch mit Propan kalibriert. Gemessen werden anschließend Kohlenstoffkonzentrationen, die auf das verwendete Kalibriergas bezogen sind, sogenannte Methan- oder Propanäquivalente. Den Anlagenbetreiber interessieren aber nicht die Äquivalente, sondern die Einzelstoffe, die in seiner Anlage hergestellt bzw. umgesetzt werden. Deshalb werden die Äquivalente mit Hilfe gerätespezifischer Responsefaktoren auf die gewünschte Komponente bezogen. So wurden z. B. in einer von den europäischen EDC/VCM-Herstellern unterstützten Studie die FID-Messergebnisse auf VCM-Leckageraten umgerechnet. In einer Untersuchung in einer Raffinerie wurden mit Hilfe der Einpackmethode die Leckageraten an Flanschverbindungen gemessen. Dabei wurden die Messergebnisse auf Propan, Dekan, Oktadekan und Benzol bezogen. Die Ergebnisse sind auszugsweise in **Tabelle 3.2** zusammengefasst.¹⁾

¹⁾ Die vollständigen Ergebnisse mit den geometrischen und physikalischen Randbedingungen sind in Anhang 2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2: Leckageraten an Flanschen in einer Raffinerie

Mess- stelle	Medium	Mess- wert (ppm)	Null- messung (ppm)	Leckageraten mg/s•m			
				Propan	Dekan	Oktadekan	Benzol
1	Flüssiggas	25,7	0,4	1,63E-03	1,58E-03	1,57E-03	1,44E-03
2	Flüssiggas	24,2	2,8	1,38E-03	1,33E-03	1,32E-03	1,22E-03
3	Flüssiggas	28,3	0,8	1,77E-03	1,71E-03	1,70E-03	1,57E-03
4	Flüssiggas	77	6,2	4,23E-03	4,10E-03	4,07E-03	3,75E-03
5	Flüssiggas	20,1	5,3	1,33E-03	1,28E-03	1,28E-03	1,17E-03
6	Flüssiggas	26	5,7	1,82E-03	1,76E-03	1,75E-03	1,61E-03
7	Flüssiggas	19,1	2,8	1,46E-03	1,41E-03	1,40E-03	1,29E-03
8	Flüssiggas	97	2,3	8,48E-03	8,21E-03	8,16E-03	7,52E-03
9	Flüssiggas	19,3	2,2	1,87E-03	1,81E-03	1,80E-03	1,66E-03
10	Flüssiggas	20	2	1,97E-03	1,90E-03	1,89E-03	1,74E-03
11	SDK	5,4	2,8	1,30E-04	1,26E-04	1,26E-04	1,16E-04
12	Rohöl	4,2	3,8	1,98E-05	1,92E-05	1,90E-05	1,75E-05
13	SDK	3,8	3,2	3,01E-05	2,92E-05	2,90E-05	2,67E-05
14	Top-Rückstand	5,5	2,4	8,93E-04	8,64E-04	8,59E-04	7,91E-04
15	Benzin (OZR)	6	3,5	1,03E-04	9,96E-05	9,90E-05	9,12E-05
16	Benzin (OZR)	9,7	2,3	1,79E-03	1,73E-03	1,72E-03	1,58E-03
17	LDK	8,9	2,3	1,19E-03	1,15E-03	1,14E-03	1,05E-03
18	LDK	4,7	2,8	2,08E-04	2,01E-04	2,00E-04	1,84E-04
19	LDK	5,1	2,9	5,31E-04	5,14E-04	5,11E-04	4,71E-04
20	leichte KW	4,6	4,5	1,09E-05	1,06E-05	1,05E-05	9,68E-06
21	Leichtbenzin	21,4	5,3	1,76E-03	1,70E-03	1,69E-03	1,56E-03
22	Leichtbenzin	13,6	4,1	1,43E-03	1,39E-03	1,38E-03	1,27E-03
23	Leichtbenzin	15,9	3,6	1,34E-03	1,30E-03	1,29E-03	1,19E-03
24	Kerosin	6,2	5,3	9,83E-05	9,52E-05	9,46E-05	8,71E-05
25	Verschiedene KW	3,2	3,1	1,29E-05	1,25E-05	1,24E-05	1,14E-05
26	Verschiedene KW	3,4	3,3	1,29E-05	1,25E-05	1,24E-05	1,14E-05
27	Top-Rückstand	4	3,3	3,46E-05	3,35E-05	3,33E-05	3,07E-05
28	Vakuum- Rückstand	4,3	4,2	5,53E-06	5,35E-06	5,32E-06	4,90E-06
29	Leichtbenzin	107,9	6,1	1,54E-02	1,49E-02	1,48E-02	1,36E-02
30	Leichtbenzin	21,1	4,7	1,79E-03	1,73E-03	1,72E-03	1,59E-03

Wie zu erkennen ist, sind die Unterschiede bei den Leckageraten in mg/m•s hervorgerufen durch die verschiedenen Bezugskomponenten sehr gering und somit vernachlässigbar. Anders sieht es jedoch aus, wenn die Leckageraten von mg/m•s mit Hilfe des idealen Gasgesetzes in mbar•l/s umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt hierbei durch folgende Gleichung:

$Y = \frac{M \cdot f}{R \cdot T \cdot \pi \cdot D} \cdot X$	D = mittlerer Dichtungsdurchmesser	m
	f = Umrechnungsfaktor (= 100)	mg•Pa•m ³ /g•mbar•l
	M = Molmasse	g/mol
	R = allg. Gaskonstante (8,314)	J/mol •K
	T = Temperatur des Gases	K
	X = Leckagerate	mbar•l/s
Y = Leckagerate	mg/m•s	

Neben der mittleren Dichtungslänge sind bei der Umrechnung auch die physikalischen Randbedingungen, wie Druck und Temperatur, zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Umrechnungen sind in **Tabelle 3.3** dargestellt. Der Vergleich der Leckageraten in mbar•l/s zeigt nunmehr, dass der Unterschied in den Einzelmessungen aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgrößen bis zu einer Zehnerpotenz betragen kann.

Tabelle 3.3: Emissionen in mbar•l/s

Mess- stelle	Medium	Mess- wert (ppm)	Null- messung (ppm)	Leckageraten mbar•l/s			
				Propan	Dekan	Oktadekan	Benzol
1	Flüssiggas	25,7	0,4	1,12E-03	3,35E-04	1,86E-04	5,58E-04
2	Flüssiggas	24,2	2,8	9,43E-04	2,83E-04	1,57E-04	4,72E-04
3	Flüssiggas	28,3	0,8	1,21E-03	3,64E-04	2,02E-04	6,06E-04
4	Flüssiggas	77	6,2	2,90E-03	8,70E-04	4,83E-04	1,45E-03
5	Flüssiggas	20,1	5,3	6,52E-04	1,96E-04	1,09E-04	3,26E-04
6	Flüssiggas	26	5,7	8,95E-04	2,68E-04	1,49E-04	4,47E-04
7	Flüssiggas	19,1	2,8	7,18E-04	2,16E-04	1,20E-04	3,59E-04
8	Flüssiggas	97	2,3	4,17E-03	1,25E-03	6,96E-04	2,09E-03
9	Flüssiggas	19,3	2,2	7,54E-04	2,26E-04	1,26E-04	3,77E-04
10	Flüssiggas	20	2	7,93E-04	2,38E-04	1,32E-04	3,97E-04
11	SDK	5,4	2,8	1,15E-04	3,44E-05	1,91E-05	5,73E-05
12	Rohöl	4,2	3,8	1,76E-05	5,29E-06	2,94E-06	8,82E-06
13	SDK	3,8	3,2	2,64E-05	7,93E-06	4,41E-06	1,32E-05
14	Top-Rückstand	5,5	2,4	1,37E-04	4,10E-05	2,28E-05	6,83E-05
15	Benzin (OZR)	6	3,5	1,10E-04	3,31E-05	1,84E-05	5,51E-05
16	Benzin (OZR)	9,7	2,3	3,26E-04	9,79E-05	5,44E-05	1,63E-04
17	LDK	8,9	2,3	2,91E-04	8,73E-05	4,85E-05	1,45E-04
18	LDK	4,7	2,8	8,37E-05	2,51E-05	1,40E-05	4,19E-05
19	LDK	5,1	2,9	9,70E-05	2,91E-05	1,62E-05	4,85E-05
20	leichte KW	4,6	4,5	4,41E-06	1,32E-06	7,35E-07	2,20E-06
21	Leichtbenzin	21,4	5,3	7,10E-04	2,13E-04	1,18E-04	3,55E-04
22	Leichtbenzin	13,6	4,1	4,19E-04	1,26E-04	6,98E-05	2,09E-04
23	Leichtbenzin	15,9	3,6	5,42E-04	1,63E-04	9,04E-05	2,71E-04
24	Kerosin	6,2	5,3	3,97E-05	1,19E-05	6,61E-06	1,98E-05
25	verschiedene KW	3,2	3,1	4,41E-06	1,32E-06	7,35E-07	2,20E-06
26	verschiedene KW	3,4	3,3	4,41E-06	1,32E-06	7,35E-07	2,20E-06
27	Top-Rückstand	4	3,3	3,09E-05	9,26E-06	5,14E-06	1,54E-05
28	Vakuum- Rückstand	4,3	4,2	4,41E-06	1,32E-06	7,35E-07	2,20E-06
29	Leichtbenzin	107,9	6,1	4,49E-03	1,35E-03	7,48E-04	2,24E-03
30	Leichtbenzin	21,1	4,7	7,23E-04	2,17E-04	1,20E-04	3,61E-04

4 Methodisches Vorgehen

Die Möglichkeiten zur Verminderung von diffusen Emissionen aus Flanschen, Ventilen, Pumpen usw. umfassen aus Sicht des Anlagenplaners bzw. -betreibers folgende drei Hauptansatzpunkte:

- Anlagenplanung
- Montage
- Wartung der lösbaren Verbindungen

Im Stadium der Anlagenplanung gilt zunächst der einfache Grundsatz, auf Dichtungsstellen so weit wie möglich zu verzichten, also Rohre nicht zu flanschen sondern zu verschweißen. Größere Bedeutung kommt aber der Auswahl geeigneter Bautypen von Armaturen und den Dichtungsmaterialien zu. Weil hier viele Randbedingungen wie Standfestigkeit, Wartungsmöglichkeiten, eingesetzte Stoffe, Kosten usw. einen Einfluss haben, gibt es kein starres Regelwerk für den planenden Ingenieur.

Wie die Untersuchungen mehrerer Forschungsvorhaben gezeigt haben, ist der Einfluss der Montage der Armaturen auf ihr jeweiliges Emissionsverhalten von herausragender Bedeutung. In der Praxis ist der korrekte Einbau von Armaturen oftmals dadurch erschwert, weil in Folge der Asbestersatzmaßnahmen die Bauarten der Flanschabdichtungen vielfältiger geworden sind und beim Einbau auf bestimmte Besonderheiten geachtet werden muss.

Weitaus einfacher gestaltet sich die Wartung im laufenden Betrieb, weil diese problemlos in ohnehin erforderliche Wartungs- und Kontrollpläne zu integrieren ist und die Betriebe diese Aufgabe schon im Interesse ihrer eigenen Mannschaft wahrnehmen.

Der Gesetzgeber hat aus Gründen des vorsorgenden Umweltschutzes die Aufgabe, die Pflichten der Anlagenbetreiber so zu gestalten, dass Reglementierungen zu einer nachhaltigen Verbesserung der Gesamtsituation führen, wobei die Praktikabilität einer Vorschrift die entscheidende Größe für ihre Wirksamkeit darstellt. Grundsätzlich

können folgende Bereiche reglementiert werden, wobei für einige Bereiche auch schon seit Jahren Richtlinien, z. B. vom VDI, oder als DIN existieren:

1. Richtlinien für die Bauartzulassung
2. Rahmenrichtlinien für die Montage von lösbaren Verbindungen
3. Rahmenrichtlinien zur Erkennung und Reparatur von überhöhten Leckagen
4. Begrenzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen

Diese vier Eingriffsmöglichkeiten sind Gegenstand dieses Forschungsberichtes. Es werden die vorhandenen Regelungen, bautechnische Möglichkeiten, Messmethoden, Erkenntnisstand, betriebliche Vorschriften sowie Berechnungsmethoden vorgestellt und erläutert. Die Darstellungen werden durch Beispiele verdeutlicht und Schlussfolgerungen, z.B. durch konkrete Messungen, so weit wie möglich belegt.

In Kapitel 5 werden die bautechnischen Möglichkeiten zur Begrenzung von Emissionen aus diffusen Quellen vorgestellt. Kapitel 6 befasst sich mit der Montage von lösbaren Verbindungen. Kapitel 7 geht auf die Erkennung von Leckagen und deren Beseitigung im Betrieb ein. Kapitel 8 beschreibt die Möglichkeiten zur Messung und Berechnung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen.

5 Konstruktionstechnische Maßnahmen zur Emissionsvermeidung und -verminderung

5.1 Allgemeine rechtliche Rahmenbedingungen

Die TA-Luft legt in Kapitel 5.2.6 für „gasförmige Emissionen beim Verarbeiten, Fördern, Umfüllen oder Lagern von flüssigen organischen Stoffen“ aus Pumpen, Verdichtern, Flanschverbindungen, Absperrorganen, Probenahmestellen sowie für das Umfüllen und Lagern zahlreiche Anforderungen fest, die die Emissionen aus diesen Quellen vermindern sollen. Vorausgesetzt, es handelt sich um leichtflüchtige Stoffe, die krebserzeugend, erbgutverändernd, reproduktionstoxisch oder in Anhang 4 der TA-Luft aufgeführt sind und bestimmte Massenkonzentrationen überschreiten (vgl. Kapitel 2). Darüber hinaus gibt es zahlreiche Regelungen und Hinweise, die sich inhaltlich jedoch nicht von der TA-Luft unterscheiden. Zu nennen wären in diesem Zusammenhang die VDI-Richtlinie 2440 „Emissionsminderung – Mineralölindustrie“.

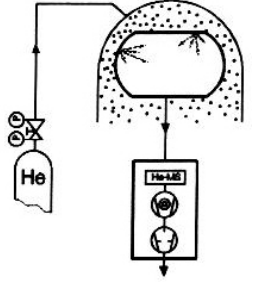
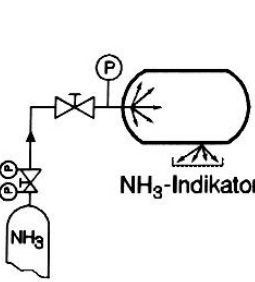
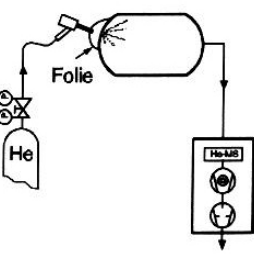
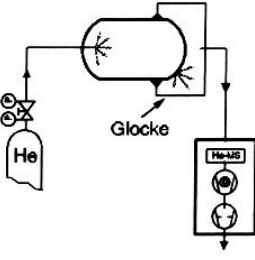
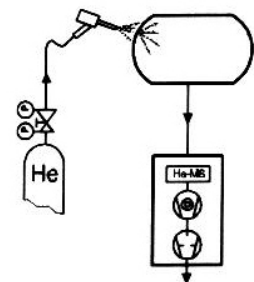
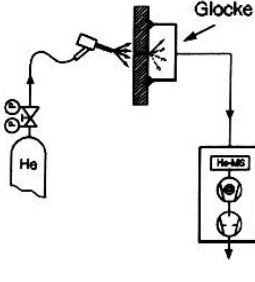
Voraussetzung für die Zulassung von Dichtelementen in Flanschen und Ventilen ist der Nachweis einer ausreichenden Dichtheit des Bauteils. Der Novellierungsentwurf zur TA-Luft (Kabinettsbeschluss) schreibt in Kapitel 5.2.6.3 und 5.2.6.4 vor, dass die Dichtigkeit für Flanschverbindungen und Ventile in einem Testverfahren nach VDI-Richtlinie 2440 zu überprüfen ist. Üblicherweise werden die Druckabfallmethode nach DIN 28090-2 und der Heliumlecktest (Anhang A der DIN 2440) zur Dichtheitsprüfung eingesetzt. Der Nachweis wird an einem repräsentativen Prüfling durch den Hersteller bzw. durch eine vom Hersteller beauftragte Prüfstelle erbracht. Alternativ wird häufig die Spülgasmethode eingesetzt.¹⁾ Die europäische Norm DIN EN 1779 „Dichtheitsprüfung: Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und Verfahren“ beschreibt zahlreiche Prüfverfahren.

¹⁾ Entwurf ISO 15848 „Industrial Valve Fugitive Emissions Measurement, Testing and Qualification Procedures“, Stand 2002

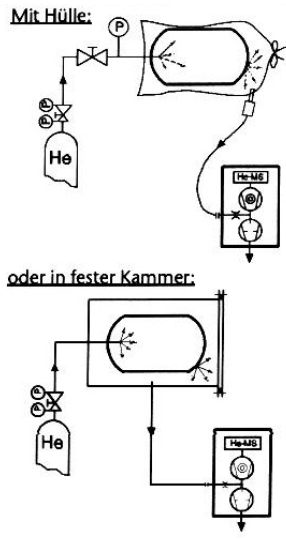
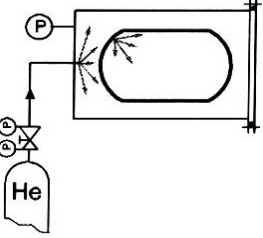
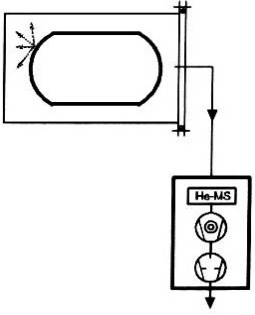
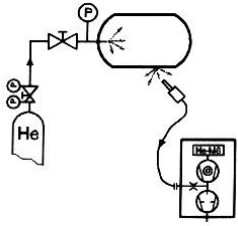
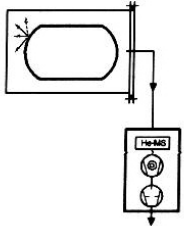
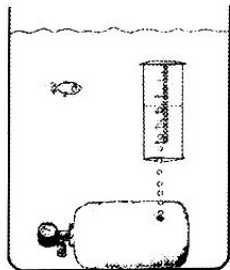
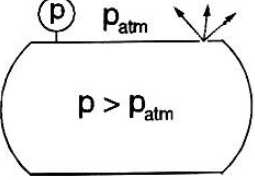
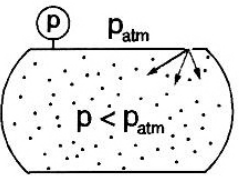
5.2 Verfahren zur Dichtheitsprüfung im Labor

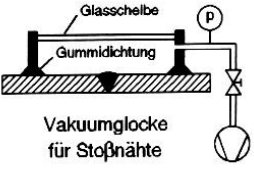
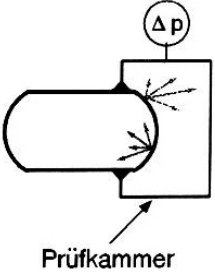
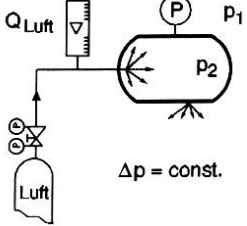
Mit der europäischen Norm DIN EN 1779 „Dichtheitsprüfung: Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und Verfahren“, die im Oktober 1999 verabschiedet wurde, wird erstmals eine systematische Einteilung der Dichtheitsprüfverfahren vorgenommen. Außerdem wird auf die wichtigsten Einflussfaktoren und Bedingungen bei der Durchführung einer Dichtheitsprüfung eingegangen. Damit soll dem Anwender die Auswahl eines geeigneten Prüfverfahrens erleichtert werden. In **Tabelle 5.2.1** sind die Dichtheitsprüfungen nach DIN EN 1779 zusammengefasst¹⁾, wobei festzustellen ist, dass die Norm nicht zwischen Prüfungen im Labor und in der Praxis unterscheidet. Der jeweilige bevorzugte Anwendungsbereich wurde von den Autoren ergänzt.

Tabelle 5.2.1: Dichtheitsprüfungen nach DIN EN 1779

A 1 Vakuumverfahren (integral) $q_{Lmin}: 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Helium) geeignet für Labor		B 1 chem. Detektion mit Ammoniak $q_{Lmin}: 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Ammoniak) geeignet für Labor und Praxis	
A 2 Vakuumverfahren (partiell) $q_{Lmin}: 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Helium) geeignet für Labor und Praxis		B 2.1 Vakuumglocke (Nutzung des Prüfdrucks im Objekt) $q_{Lmin}: 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Helium) geeignet für Labor	
A 3 Vakuumverfahren (lokal) $q_{Lmin}: 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Helium) geeignet für Labor		B 2.2 Vakuumglocke (Einsatz einer Prüfpistole) $q_{Lmin}: 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Helium) geeignet für Labor und Praxis	

¹⁾ Schröder, G.: Neue Norm zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Lecksuche und Dichtheitsprüfung. ZfP-Zeitung 74, April 2001

B 3 Überdruckverfahren (Sammeln des aus- tretenden Prüfgases) $q_{Lmin}: 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Helium) geeignet für Labor		B 5 Drucklagerungs- prüfung $q_{Lmin}: 10^{-9}-10^{-6}$ $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (meist mit Helium) geeignet für Labor	<u>Schritt 1:</u>  <u>Schritt 2:</u> 
B 4 Schnüffelpprüfung $q_{Lmin}: 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Helium) geeignet für Labor und Praxis		B 6 umschlossene Objekte $q_{Lmin}: 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (meist mit Helium) geeignet für Labor	
C 1 Blasennachweis (Eintauchen) $q_{Lmin}: 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (meist mit Luft) geeignet für Labor		D 1 Überdruckverfahren $q_{Lmin}: 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (meist mit Luft) geeignet für Labor und Praxis	
C 2 Blasennachweis (Auftragen von Flüssigkeit) $q_{Lmin}: 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ geeignet für Labor und Praxis		D 2 Druckanstiegsprüfung (lokal) $q_{Lmin}: 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (mit Luft) geeignet für Labor	

C 3 Blasennachweis (mit Vakuumglocke) $q_{Lmin}: 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (meist Luft) geeignet für Labor und Praxis		D 3 Druckänderungstest $q_{Lmin}: 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (meist Luft) geeignet für Labor	
		D 4 Strömungsmessung $q_{Lmin}: 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ geeignet für Labor und Praxis	

In Deutschland haben sich für Laborprüfungen an Prototypen, wie oben schon erwähnt wurde, das Druckanstiegs/-abfallverfahren bzw. der Heliumlecktest (Anhang A der DIN 2440) durchgesetzt. Beim Druckanstiegsverfahren wird in dem zu prüfenden Bauteil ein Vakuum angelegt und der Druck gemessen. Steigt dieser mit der Zeit an, können zwei Ursachen für den Anstieg unterschieden werden:¹⁾

Druckanstieg durch eine Leckage:

Die zu detektierende Leckage verursacht einen nahezu linearen Anstieg des Drucks, so dass bei genügender Anlaufzeit aus der Steigung des Gesamtdrucks über die Zeit die Leckagerate in (mbar*l/s) bestimmt werden kann.

Druckanstieg durch Gasabgabe der Behälterwände:

Die Abgabe der an den Behälterwänden adsorbierten Gasmoleküle sorgt zunächst für einen linearen Anstieg des Druckes. Danach bleibt der Druck auf einem annähernd konstanten Wert.

Um die tatsächliche Leckagerate zu bestimmen, muss somit in einer zweiten Messung das Bauteil hermetisch abgedichtet werden. Nach Anlegen des Unterdrucks wird dann erneut der Druckanstieg beobachtet. In diesem Fall erhöht sich der

¹⁾ Bathen, D.; Hummelt, C.; Meisel, J.: Emissionen an Flanschverbindungen. Vulkan-Verlag, 2000

Druck ausschließlich durch die Abgabe von Gasmolekülen von den Behälterwänden. Der tatsächliche Druckanstieg aufgrund einer Leckage kann anschließend durch die Bildung der Differenz von Gesamtdruckanstieg und Druckanstieg durch Gasabgabe berechnet werden (**Abbildung 5.2.1**).

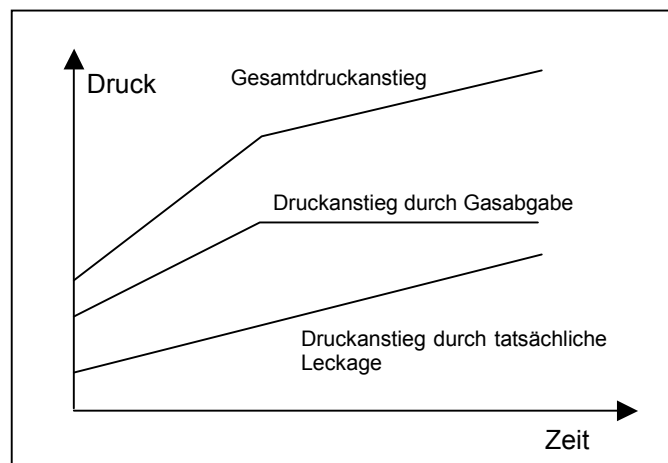


Abbildung 5.2.1: Druckeffekte im idealen Fall

Die Schwierigkeit des Verfahrens besteht darin, dass bei einer zu frühen Messung die Steigung des Druckanstiegs, der durch die Gesamtemissionen verursacht wird, nicht der Steigung des Druckanstiegs durch das zu detektierende Leck entspricht. Die auf Basis der gemessenen Werte berechneten Leckageraten sind dann zu hoch, weil ein Teil der Gasabgabe der Behälterwände als Leckstrom berücksichtigt wird. Aufgrund der niedrigen Kosten hat sich das Verfahren trotz der beschriebenen Schwächen als Standard durchgesetzt.

Alternativ zu den Druckanstiegsverfahren können auch Druckabfallmethoden eingesetzt werden. Hierbei wird ein gekapselter Raum mit einem Überdruck beaufschlagt und aus dem Druckabfall analog zu den oben beschriebenen Verfahren auf die Leckagerate geschlossen.

Der Heliumlecktest wird bevorzugt für die Prüfung von Wellenabdichtungen in Ventilen eingesetzt. Hierzu muss der Prüfling zwischen der Spindel-Wellenabdichtung und einer Zusatzabdichtung über einen Anschluss für den Helium-Leckdetektor verfügen. Der Druckraum wird mit Helium bis zum zulässigen Betriebsdruck beaufschlagt und bis zur zulässigen Betriebstemperatur aufgeheizt oder gekühlt. Bei

den jeweiligen Betriebsbedingungen werden Spindel- bzw. Wellenbewegungen in einer repräsentativen Anzahl durchgeführt. Die Leckagerate wird mit Hilfe des Helium-Leckdetektors bestimmt.

5.3 Inventarliste potenzieller Quellen diffuser Emissionen in Chemieanlagen

Unabhängig von den Emissionsraten einzelner Anlagenkomponenten, wie Flansche, Ventile usw., ist die Anzahl der Komponenten mitentscheidend für ihren Anteil an der Gesamtemission aus diffusen Quellen. Darüber hinaus bestimmt die Anzahl auch die Praktikabilität von Maßnahmen zur Kontrolle und Verminderung von Emissionen. Um eine Vorstellung über die Verhältnisse zu entwickeln, ist in Tabelle 5.3.1 eine Inventarliste einer modernen chemischen Produktionsanlage wiedergegeben.

Tabelle 5.3.1: Inventar einer chemischen Produktionsanlage

Inventar	Anzahl
Kompressor	1
Pumpen	59
Ventile/Regler	738
Sicherheitsventile	50
Flansche	3.291
Entleerungsstellen	108

Die Anzahl der jeweiligen Komponenten wird sich je nach Anlagentyp ändern, dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die grundsätzliche Bedeutung der Flansche aufgrund ihrer hohen Anzahl erhalten bleibt, wie durch verschiedene Studien belegt wird. An zweiter Stelle rangieren meist Regelventile. Pumpen und Kompressoren sind bezüglich ihrer Anzahl dagegen meist von untergeordneter Bedeutung.

5.4 Flanschverbindungen

5.4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die TA-Luft schreibt für Flanschverbindungen die Einhaltung einer spezifischen Leckagerate von 10^{-4} hPa•l/m•s vor, die in der VDI-Richtlinie 2440 vorgegeben ist. Die VDI-Richtlinie 2440 vom November 2000 fordert, Flanschverbindungen nur dann einzusetzen, wenn sie aus Verfahrens-, Sicherheits- oder Instandhaltungsgründen notwendig sind. Diese können dann mit Dichtleiste, Nut und Feder oder Vor- und Rücksprung ausgeführt werden. Eine besonders wirksame Maßnahme zur Emissionsminderung ist die Verwendung von Flanschverbindungen mit hochwertigen Dichtsystemen wie Metall- und Schweißdichtungen sowie Dichtsystemen, die in einem Nachweisverfahren folgende Anforderungen erfüllen:

- Die konstruktive Ausführung des Dichtsystems lässt eine bestimmungsgemäße Funktion unter den Betriebsbedingungen auf Dauer erwarten.
- Für die Dichtungsauswahl und Auslegung der Flanschverbindungen sind Dichtungskennwerte nach DIN 28090-1 bzw. DIN EN 1591-2 zu Grunde zu legen.
- Durch erstmalige Prüfung ist die Einhaltung einer spezifischen Leckagerate von $< 10^{-4}$ hPa•l/m•s (= mbar•l/m•s) mittels Heliummassenspektroskopie bei einer Flächenpressung von 30 MPa (= 30 N/mm²) nachzuweisen.
- Andere validierte Prüfverfahren, wie z. B. die Druckabfallmethode nach DIN 28090-2 sowie die Spülgasmethode (FID-Methode) sind zulässig. Hierbei ist auf die oben genannte Einheit umzurechnen.
- Vor der Leckagemessung ist die Dichtung bei maximaler Betriebstemperatur im montierten Zustand an Luft zu lagern.

Die Ermittlung von Leckageraten an realen Flanschverbindungen für Dichtungen im Krafthauptschluss beruhen im Wesentlichen auf Versuchen nach DIN 28090-2 bzw.

zukünftig in Europa nach der EN 13555. Die Leckagerate nach DIN 28090-2 wird nach der Druckabfallmethode mit dem Prüfmedium Stickstoff bei einem Prüfdruck von 40 bar ermittelt. Als Prüfling wird eine Dichtung nach DIN 2690 – DN 40/PN 40 verwendet. Mit dieser Messmethode können spezifische Leckageraten von $< 10^{-4}$ hPa•l/m•s nicht bestimmt werden. Daher verwenden die meisten Hersteller neben der Druckabfallmethode auch die Heliummassenspektroskopie, so dass Messwerte für das Prüfverfahren der DIN 28090-2 wie auch Leckageraten für den Bereich der Anforderungen nach der VDI-Richtlinie 2440 vorliegen.

Derzeit wird an der Erstellung der VDI-Richtlinie 2200 „Dichte Flanschverbindungen“ gearbeitet, die das Ziel hat, die Prüfverfahren für Flachdichtungen sowohl für die VDI-Richtlinie 2440 als auch für die TA-Luft zu beschreiben. Die Richtlinie soll im Jahre 2002 erscheinen.

5.4.2 Konstruktion von Flanschverbindungen

Die Aufgabe einer Dichtung bzw. eines Dichtungssystems besteht in der Regel darin, einen ungewollten Stofffluss zwischen zwei funktionsmäßig voneinander getrennten Räumen einer Maschine oder Anlage zu verhindern bzw. zu vermindern, wobei heraus gestellt werden muss, dass die Bedeutung des Leckverhaltens für das Betriebspersonal und die Umwelt mit der Gefährlichkeit des Betriebsmediums ansteigt.

Flansche werden als vorherrschende Verbindungsform von Rohrleitungsabschnitten, Behälterteilen (zylindrischer Mantel, Deckel, Boden, Rohrleitungsstutzen) und Armaturen in Rohrleitungen eingesetzt. Die eingesetzten Dichtungen werden mit Hilfe von Schrauben zwischen den Flanschoberflächen zusammengepresst. In Abhängigkeit vom verwendeten Flanschtyp und des Dichtwerkstoffes passt sich die meist weichere Dichtung den Flanschoberflächen an und verschließt vorhandene Unebenheiten. Eine mögliche Leckage lässt sich unter Beachtung der übrigen Betriebsparameter durch die Größe der Flächenpressung beeinflussen. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die Druckdifferenz zwischen den funktionsmäßig voneinander getrennten Räumen sowie die Rauigkeit der metallischen Flanschoberflächen. Obwohl das Dichtverhalten von zahlreichen Parametern abhängt, lassen sich dennoch mit der

erforderlichen sowie der zulässigen Flächenpressung zwei Parameter herausarbeiten, die für das Verhalten der Dichtung insbesondere bei Weichdichtungen besonders wichtig sind (**Abbildung 5.4.2.1**).¹⁾

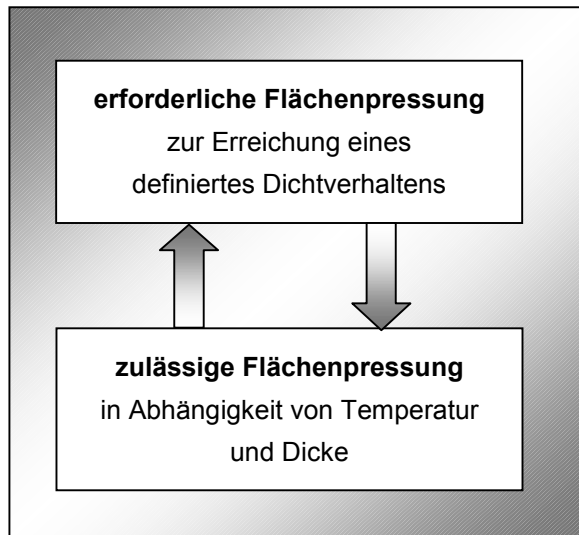


Abbildung 5.4.2.1: Zusammenspiel von erforderlicher und zulässiger Flächenpressung

Diese beiden für die Dichtungsauslegung wichtigsten Kenngrößen sind von den unterschiedlichsten Randbedingungen abhängig. So ist die zulässige Flächenpressung u. a. eine Funktion der Parameter Temperatur und Dichtungsdicke. Die erforderliche Flächenpressung hängt vom Grad der gewünschten Dichtheit, dem Betriebsmedium, dem Dichtungswerkstoff sowie vom Innendruck ab.

Zur Zeit ergibt sich etwa folgende Häufigkeit der Flanschformen, die in **Abbildung 5.4.2.2** dargestellt sind:

- 80 % Flanschform C und D
- 15 % Flanschform N/F
- 4 % Flanschform E
- 1 % Flanschform L

¹⁾ Rödel. R.: Neue Wege in der Dichtungstechnik. Seminar im Haus der Technik am 7.12.2000, Essen

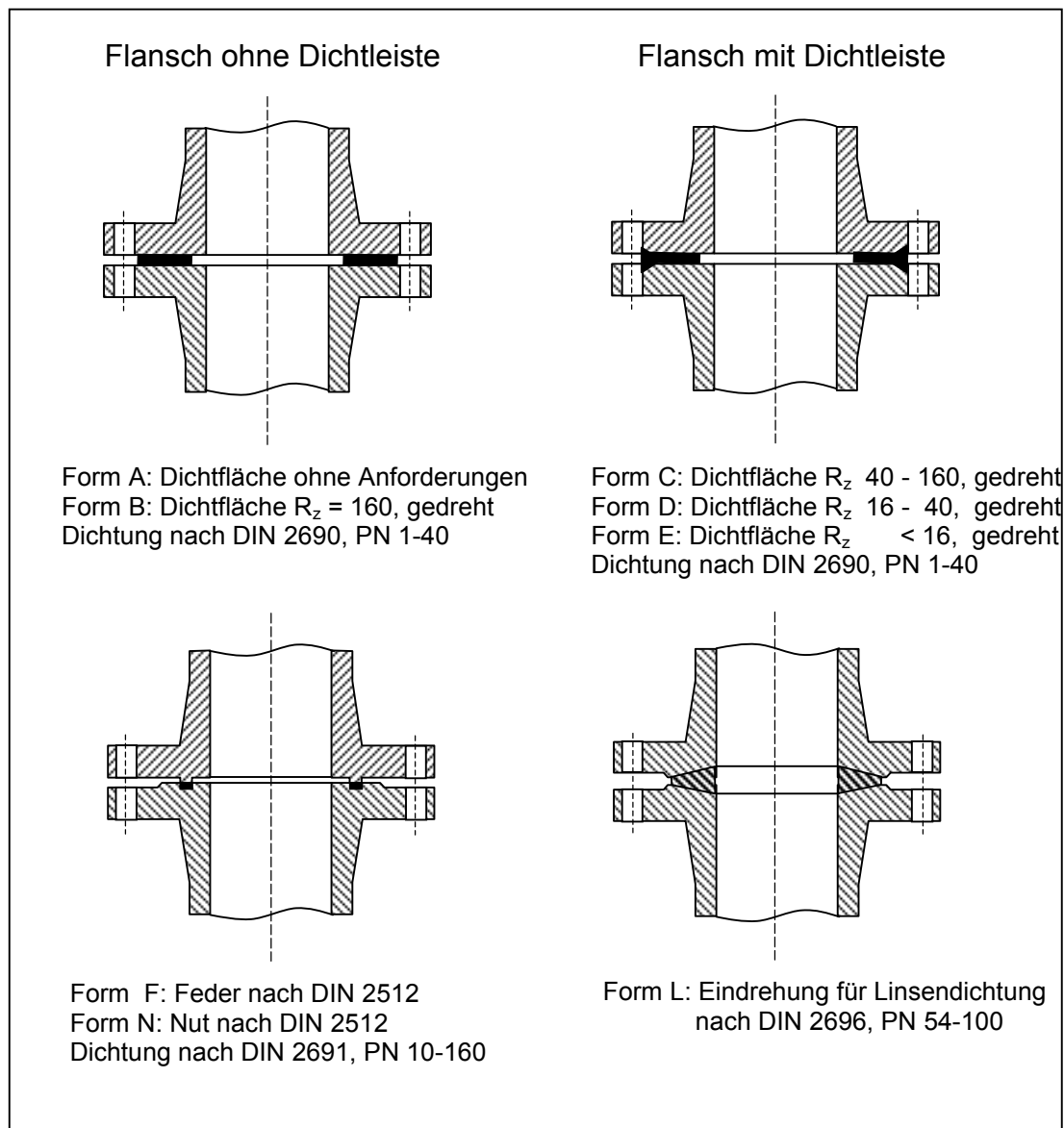


Abbildung 5.4.2.2: Bezeichnung von Flanschen nach DIN 2526

Die Flanschformen, die es nach DIN 2526 darüber hinaus gibt, werden im Rahmen dieser Darstellung vernachlässigt, weil mit den skizzierten 4 Flanschformen fast alle der in der Industrie verwendeten Flansche erfasst werden.

5.4.3 Werkstoffe und Konstruktion von Dichtelementen

Bei der Herstellung von Dichtungen für Flanschverbindungen konnten bis zum Verbot von Asbestwerkstoffen IT-Dichtungen (Gummi-Asbest-Dichtungen) mit ihren weitestgehend bewährten technischen Eigenschaften eingesetzt werden. Die zur Verfügung stehenden Materialien für metallische Flanschverbindungen lassen sich in fünf Kategorien gliedern:

- Graphitdichtungen
- PTFE-Dichtungen
- Faserdichtungen
- Metaldichtungen
- Metall/Weichstoffdichtungen

Dichtungen für Kunststoff-Flanschverbindungen lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- PTFE-Dichtungen
- Elastomer- bzw. Gummi-Stahl-Dichtungen

Bei der Auswahl sind eine Reihe von Kriterien zu berücksichtigen. Zum einen muss der Werkstoff gegen das abzudichtende Medium beständig sein, wobei auch der Betriebsdruck und die Betriebstemperatur sowie eventuell auftretende Wechselbelastungen zu berücksichtigen sind. Die Art der Dichtung ist so zu wählen, dass immer ein sicherer Betrieb gewährleistet und die Leckagerate möglichst niedrig ist. Die Einbausituation (Flanschart, Oberflächenbeschaffenheit der Dichtleiste etc.) sowie die zur Verfügung stehenden Schraubenkräfte sind ebenfalls bei der Auswahl zu betrachten.

Zum anderen sollte die Gesamtzahl der in der Anlage verwendeten Dichtungstypen möglichst niedrig sein, um so Verwechslungsgefahren zu reduzieren und die Lagerhaltung zu vereinfachen.

Graphit hat sich als Standardwerkstoff im Anlagenbau durchgesetzt. Es ist bis ca. 450 °C temperaturstabil. Die Druckfestigkeit kann durch konstruktive Maßnahmen gesteigert werden. So sind gebördelte Graphit-Spießblech-Dichtungen bis ca. 100 bar belastbar. Negativ sind das abrupte Versagen bei Überschreitung der zulässigen Flächenpressung und die hohe Bruch- und Kratzempfindlichkeit zu bewerten. Zur Reduzierung der Bruch- und Kratzempfindlichkeit können Oberflächen z. B. imprägniert werden. Das Graphit kann in einigen Bereichen vorverdichtet werden. Zudem ist der Einsatz von Blecheinlagen möglich. Als zusätzliches Problem erweisen sich oxidierende Medien, da diese den Graphit angreifen und zu massiven Undichtigkeiten führen können. Zum Schutz des Graphits werden daher häufig Innen- und Außenbördel aus Metall, meist aus Edelstahl, z. B. 1.4571, eingesetzt. Folgende Vorteile bieten Graphitdichtungen:

- Temperaturbeständigkeit bis 450 ° C (bei reinem Sauerstoff bis 300 °C)
- gute chemische Beständigkeit
- nicht brennbar
- gute mechanische Eigenschaften
- hohe Flexibilität
- alterungsbeständig, nicht versprödend
- gesundheitlich unbedenklich
- strahlungsbeständig
- großer Bereich zwischen minimaler und maximaler Flächenpressung
- universell einsetzbar
- niedrige Leckraten

Als nachteilig bei Graphitdichtungen erweisen sich:

- Bruchneigungen von Reingraphitdichtungen
- Unbeständigkeit gegen starke Oxidationsmittel

Graphitdichtungen sind in unterschiedlichen Varianten erhältlich. So gibt es gestanzte Dichtungen oder Plattenmaterial aus unverstärktem Reingraphit. Graphit ist erhältlich in Nuklearqualität mit einem Graphitanteil von 99,8 % und in Chemiequalität mit einem Graphitgehalt von 98 %. Die Chemiequalität ist in den meisten Fällen auch für den Einsatz in Chemieanlagen ausreichend. Die Notwendigkeit zur Verwendung der Nuklearqualität sollte sorgfältig überprüft werden, da die Preisdifferenz zur Chemiequalität nicht unerheblich ist. Um die Stabilität zu erhöhen, besteht die Möglichkeit, Graphit zu imprägnieren.

Weiterhin gibt es gestanzte Dichtungen oder Plattenmaterial aus Graphit mit einer glatten oder genadelten Blecheinlage (Spießblech/ Klettblech). Standardmäßig besteht die Einlage aus Edelstahl, z. B. 1.4401. Spießblechverstärktes Material kann deutlich höher belastet werden als reine Graphitdichtungen.

Auch metallische Profile, wie z. B. Kammprofile oder Wellringe, werden mit Graphit belegt, Spiraldichtungen werden mit Graphit gefüllt.

PTFE PTFE-Dichtungen bieten schon bei geringen Flächenpressungen eine relativ hohe Gasdichtigkeit. Gleichzeitig sind sie wegen ihrer Resistenz gegenüber aggressiven und toxischen Medien (außer gasförmigen Fluorverbindungen und flüssigen Alkalimetallen) fast universell einsetzbar. Das schon bei niedrigen Temperaturen einsetzende Fließverhalten wird derzeit durch neue modernere Herstellungsverfahren optimiert.¹⁾ Die Vorteile von PTFE-Dichtungen sind:

¹⁾ Gore & Associates GmbH: Dichtungstechnik. Putzbrunn, 1998

- gute chemische Beständigkeit (Ausnahme: geschmolzenes Natrium und elementares Fluor)
- gute mechanische Eigenschaften
- hohe Flexibilität
- einfache Handhabung
- alterungsbeständig und gesundheitsunbedenklich

Als Nachteile sind zu nennen:

- maximale Einsatzgrenze nur ca. 200 – 230 °C (Flachdichtungen)
- hoher Anschaffungspreis
- Fließneigung des Materials

PTFE-Dichtungen gibt es als Plattenmaterial oder als gestanzte Dichtungen aus gefülltem PTFE oder reinem, vorgereckten PTFE. Für besonders empfindliche Flansche, wie z. B. Emaille-Flansche, werden PTFE-ummantelte Dichtungen mit einem Kern bestehend aus einer Weichstoffeinlage mit oder ohne Wellring angeboten. Diese Dichtungen haben eine hohe Kompressionsfähigkeit zur sicheren Abdichtung ohne Gefährdung des emaillierten Flansches.

Faserstoff- dichtungen	Als Fasern werden u. a. Glasfasern, Aramidfasern, Keramikfasern, PTFE-Fasern und Kohlenstofffasern verwendet.
---------------------------	---

Vorteile dieser Dichtungen sind:

- günstiger Anschaffungspreis
- problemlose Lagerung und Handhabung
- Zuschnitt in gewünschten Abmessungen direkt vom Anwender möglich

Im Gegensatz zu Asbestfasern handelt es sich bei synthetischen Fasern um Hohlfasern. Der Vorteil von Hohlfasern ist, dass das elastomere Bindemittel in die Hohlräume eindringen kann und somit

chemische und mechanische Eigenschaften des Materials positiv beeinflusst. Nachteilig bei synthetischen Fasern sind:

- geringe Temperaturbeständigkeit
- niedrige chemische Eigenschaften

Faserstoffdichtungen sind erhältlich als Plattenmaterial und gestanzte Dichtungen, als gestanzte Dichtungen mit metallischer Inneneinfassung sowie als Plattenmaterial/gestanzte Dichtungen mit Metalleinlage. Dichtungen auf Aramidfaserbasis bestehen aus speziell aufgeschlossenen Aramidfasern, anorganischen Füllstoffen und ca. 30 % Elastomeren als Bindemittel. Das Dichtungsmaterial wird auf computergesteuerten Kalandern unter hohem Druck und hoher Temperatur in Plattenform ausgewalzt.

Metall- dichtungen	Flachdichtungen aus Metall können aus allen gebräuchlichen Eisen- und Nichteisenmetallen gefertigt werden. Um ein Fließen unter Last oder sogar eine Zerstörung der Dichtung zu vermeiden, sind schmale Flachdichtungen eventuell zu kammern, wie es z. B. bei Flanschen mit Nut und Feder der Fall ist. Weiterhin ist es erforderlich, dass man die Dichteigenschaften härterer Metalle durch galvanische Überzüge mit weicheren Metallen verbessert. Bewährt haben sich: Eisen, Stahl sowie Stahllegierungen mit Überzügen von Kupfer, Nickel, Silber und Zinn.
-----------------------	---

Metall/ Weichstoff- dichtungen	Spiraldichtungen sind Hochdruckdichtungen für den Einsatz bei hohem Druck und hoher Temperatur, insbesondere auch bei großen Temperaturschwankungen. Die Auswahl des Füllstoffes bzw. des Stahlwickelbandes ist abhängig vom Medium und der Temperatur. Als Spiralwickelmaterial eignen sich alle üblichen Eisen- und Nichteisenmetalle. Als Füllstoffe werden überwiegend PTFE, Graphit und Keramik verwendet. Das spezielle Sickenprofil der Spirale bietet die notwendige Rückfederung für eine sichere Abdichtung.
--------------------------------------	--

Kammprofildichtungen werden insbesondere dort eingesetzt, wo hohe Drücke und Temperaturen und damit hohe Schraubenkräfte zu beherrschen sind. Der metallische Träger kann aus allen gebräuchlichen Eisen- und Nichteisenmetallen gefertigt werden.

Zur Abdichtung der Flansche haben sich in der Praxis kammprofilierte Dichtungen mit Auflagen aus Graphit oder PTFE bewährt. Die eigentliche Aufgabe der relativ weichen Auflagen ist aber nicht der Schutz der Flansche, sondern die Abdichtung bei kleinen Mindestpressungen. In den mit Auflagenwerkstoff gefüllten Tälern des kammprofilierten Trägers wird ein dreiachsiger Spannungszustand erzeugt. Die Belastbarkeit geht bis zur Festigkeitsgrenze des Dichtungs- bzw. Flanschwerkstoffes. Die Standfestigkeit dieser Kombination ist dadurch wesentlich höher als bei reinen Graphit- oder PTFE-Dichtungen.

Gummi-Stahl-Dichtungen werden dort eingesetzt, wo die sichere Abdichtung von Luft, Wasser, Säuren und Laugen bei geringen Kräften bei relativ niedrigen Temperaturen gefordert wird. Die Dichtungen stellen keine allzu großen Anforderungen an die Flanschoberfläche und die Ausrichtung der Rohrleitung. Sie sind gut geeignet für die Abdichtung von Kunststoffflanschen.

Ihr Einsatz ist begrenzt durch:

- maximale Einsatztemperatur des Elastomers von 100 bis 150 °C, (je nach verwendetem Elastomerwerkstoff)
- chemische Beständigkeit des Elastomers
- maximale Flächenpressung von ca. 10 N/mm²

Abbildung 5.4.3.1 zeigt eine Übersicht mit den wichtigsten Auswahlkriterien für die genannten Dichtungstypen, so wie sie die DOW in Stade definiert.¹⁾ Da es sich hier

¹⁾ Borchers, K.: Flachdichtungen in Chemieanlagen. Dichtungsdichtung Heft 1, Mai 2001

um unternehmensspezifische Festlegungen handelt, können die Kriterien in anderen Unternehmen hiervon abweichend festgelegt werden.

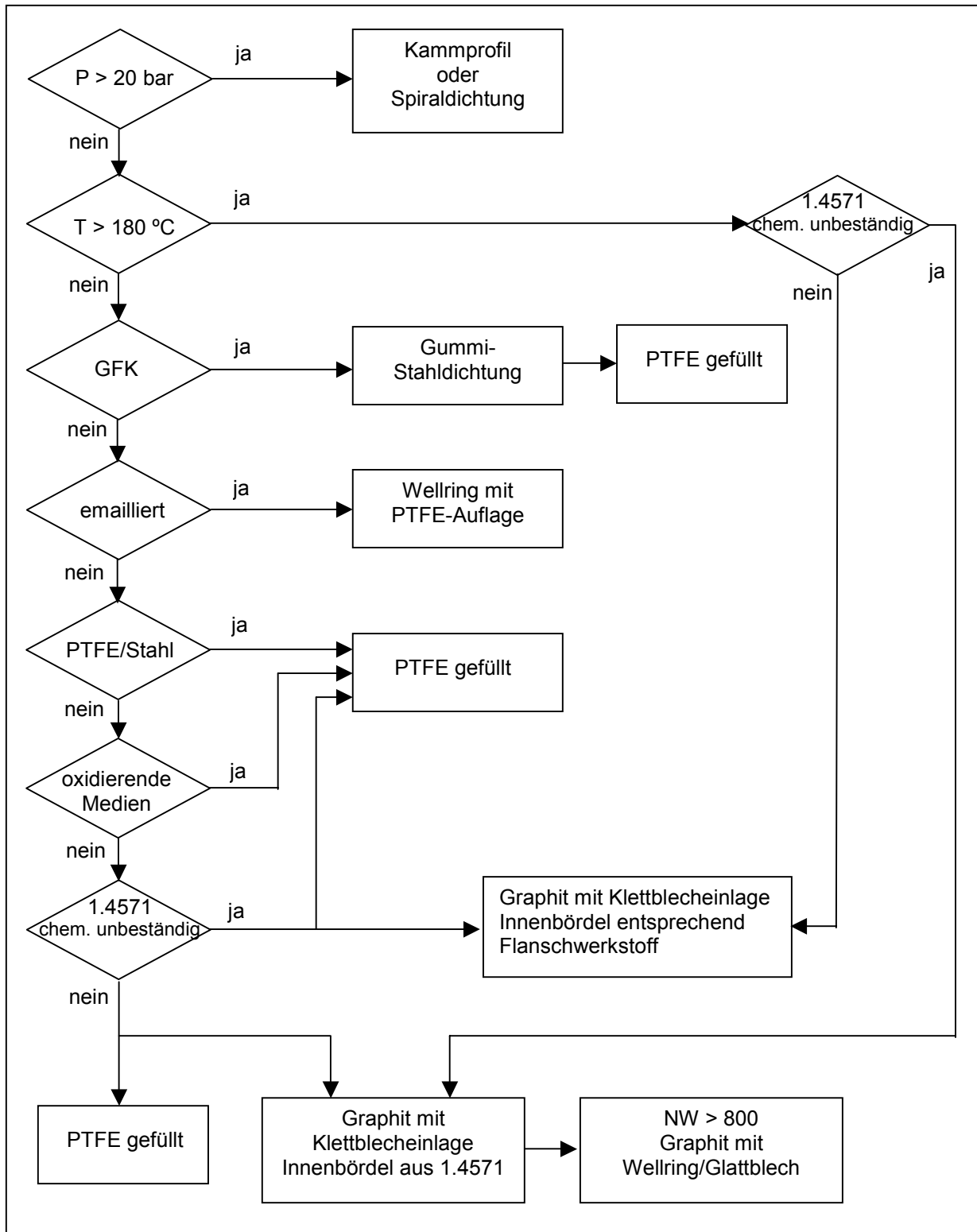
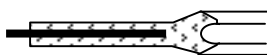


Abbildung 5.4.3.1: Auswahlkriterien für Flachdichtungen bei der DOW, Stadel

Aus den beschriebenen Dichtungen wurden z. B. für das DOW Werk Stade die in **Tabelle 5.4.3.1** aufgeführten Varianten ausgewählt.

Tabelle 5.4.3.1: Auswahlbeispiel für Dichtungselemente

Anwendungsbereich	Profil	Typ	Werkstoff
$P \leq 10 \text{ bar}$ $T \leq 150 \text{ °C}$ Versorgungsleitungen, temporäre Einsätze		Faserdichtung	Aramidfaser mit Nitrilkautschukbinder
$P < 20 \text{ bar}$ $T \leq 550 \text{ °C}$ (Ausnahme stark oxid. Medien)	 	Graphit/ Klettblech Innenbördel	Auflage mit Graphit 98 % Träger: 1.4401 Innenbördel: 1.4571
$P > 20 \text{ bar}$ $T < 550 \text{ °C}$ (Ausnahme stark oxid. Medien)		Kammprofil	Auflage Graphit 98 % Träger 1.4571
$P \leq 20 \text{ bar}$ $T \leq 200 \text{ °C}$		PTFE	PTFE gefüllt PTFE gereckt
$P \leq 20 \text{ bar}$ $T \leq 100 \text{ °C}$ GFK-Rohrleitungen	 	PTFE Gummi-Stahl	PTFE gefüllt (weich) EPDM mit HDPE-Stützung

Als Standarddichtung wird eine Graphitdichtung mit Kettblechverstärkung aus 1.4401 und einem Innenbördel aus 1.4571 eingesetzt. Diese Dichtungsvariante ist gegenüber der Mehrzahl der verwendeten Medien beständig, kann für ANSI-Flansche bis 20 bar eingesetzt werden und bereitet keine Probleme bei der Montage.¹⁾ Als preisgünstige Dichtung für den Einsatz in Versorgungsleitungen (Luft, Wasser, Stickstoff etc.) und für temporäre Einsätze wird eine Aramiddichtung verwendet.

Für Flanschsysteme, die Drücke über 20 bar abdichten müssen, kommt eine Kammprofilabdichtung zum Einsatz. Standardmäßig wird hierbei eine Graphitaufgabe ver-

¹⁾ Nach TRB 610 gilt die unverstärkte Weichstoffdichtung bis 25 bar in Verbindung mit ebener Dichtleiste als ausblasierend.

wendet, in einzelnen Fällen, in denen stark oxidierende Medien, wie z. B. konzentrierte Schwefelsäure, konzentrierte Salpetersäure, Nitrier- und Chlorsäure, Brom, Chlordioxid oder Schwefeltrioxid abgedichtet werden müssen, wird das Kammprofil mit einer PTFE-Auflage belegt. Da bei Kammprofildichtungen die Dichtfläche in der Regel kleiner ist, können mit gleichen Schraubenkräften höhere Flächenpressungen und somit höhere Dichtigkeiten erzielt werden. Sie stellen aber höhere Anforderungen an die Flanschgüte und erfordern eine genauere Montage. Wie neuere Untersuchungen zeigen, reagieren sie auf Montagefehler empfindlicher als normale Flachdichtungen.¹⁾

Für Flanschsysteme bis 20 bar (nach TRB 610: 25 bar) mit stark oxidierenden Medien bzw. Medien, die das Trägermaterial der Standardgraphitdichtung angreifen würden, wird eine gefüllte PTFE-Dichtung eingesetzt.

In glasfaserverstärkten Kunststoffrohrleitungen und -apparaten (GFK) werden abhängig vom abzudichtenden Medium, den Betriebsparametern und der Flanschbeschaffenheit entweder Gummi-Stahl-Dichtungen oder relativ weiche PTFE-Dichtungen montiert.

Neben den am Beispiel des DOW Werkes Stade dargestellten Dichtelementen werden weitere Bauformen angeboten, wovon ein Teil in **Abbildung 5.4.3.2** dargestellt ist.²⁾

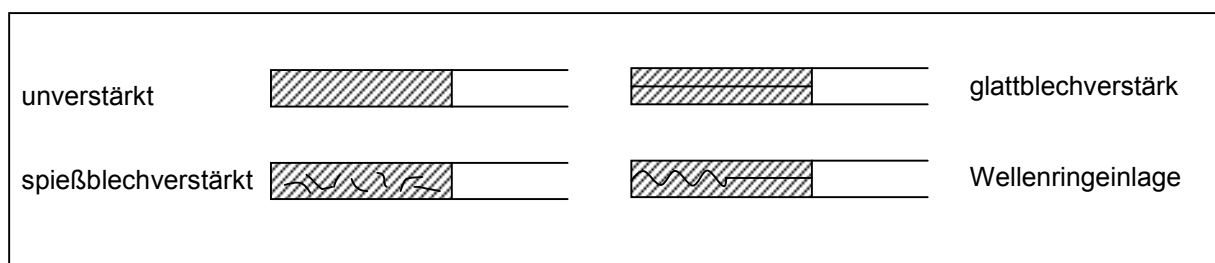


Abbildung 5.4.3.2: Weitere Dichtelementbauformen

¹⁾ Kanschik, K., Schmidt-Traub, H.: Verhalten von Flanschverbindungen unter Störfallbedingungen. Untersuchungsbericht für das LUA NRW, Dortmund 1995

²⁾ Jungebauer, D.: Entwicklung eines Modell zur Berechnung der Emissionen von Flanschverbindungen mit Flachdichtungen. Diplomarbeit Universität Dortmund, 1994

Um die mechanische Stabilität zu erhöhen, werden die Dichtungen häufig mit Metall-einlagen in verschiedenen Formen (Glattblech, Spießblech usw.) verstärkt. Neben diesen kurz dargestellten Grundformen werden zunehmend auch Kombinations-lösungen angeboten. Für spezielle Anwendungen werden metallarmierte Dichtungen eingesetzt, bei denen Weichstoffe und meist hochlegierte Stähle zu beispielsweise Spiraldichtungen oder Kammprofildichtungen kombiniert werden.

Aufgrund der verschiedensten Einsatzbedingungen und Betriebsparameter gibt es nicht die „universelle bzw. ideale Dichtung“, so dass bei der Auswahl einer geeigneten Abdichtlösung für den betrieblichen Einsatz alle relevanten Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Hierzu ist es oftmals sinnvoll bzw. unerlässlich, die Funktionsfähigkeit der konstruktiven Lösungsvariante durch möglichst betriebsnahe experimentelle Untersuchungen zu überprüfen.

Derartige Messungen zur Bestimmung der Leckageraten wurden bereits vielfach durchgeführt und publiziert.¹⁾ Um die Messergebnisse richtig analysieren und einordnen zu können, ist die Kenntnis der Randbedingungen, unter denen die Messungen jeweils durchgeführt wurden, erforderlich.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Einflüsse der wesentlichen Randbedingungen auf die Leckagerate dargestellt und erläutert. Es wird deutlich, dass die Messergebnisse insbesondere

- von der Art der Flanschverbindung (wie Flanschform, Dichtungsmaterial, Breite und Bauform der Dichtung),
- von der Art des Einbaus (Flächenpressung und Montage),
- von den Betriebsparametern (Rohrinnendruck und Temperatur) sowie
- vom Betriebsmedium selbst

beeinflusst werden.

¹⁾ Bathen, D.; Hummelt, C.; Meisel, J.: Emissionen an Flanschverbindungen. Vulkan-Verlag, 2000

5.4.4 Ursachen von Emissionen aus Flanschverbindungen

Die Leckagerate einer Flanschverbindung wird durch geometrische und material-spezifische Faktoren, wie die Form des Flansches, die Breite und Bauform der Dichtung sowie das Dichtungsmaterial, bestimmt. Die nachfolgenden Darstellungen verschiedener Untersuchungsergebnisse sollen nur die Ursachen erläutern, die zu Emissionen führen. Sie stellen keine Ergebnisse aus Bauartprüfungen dar. Deshalb können die gemessenen Leckageraten auch nicht ohne Weiteres mit zugelassenen Dichtungselementen oder gar mit Leckageraten aus Praxisanlagen verglichen werden.

5.4.4.1 Flanschform

Abbildung 5.4.4.1.1 zeigt die Versuchsergebnisse verschiedener Flanschformen, die ausschließlich an Flanschen der Nennweite DN 80 ermittelt wurden. Angewandt wurde hierbei das Vakuumverfahren mit Helium als Prüfmedium bei einem Druck von 1 bar in der Manschette. Während des Versuchsverlaufes wurden die einzelnen Flansch-Dichtungs-Kombinationen mit unterschiedlichen Flächenpressungen beaufschlagt.

Bei gleicher Flächenpressung weisen die kammprofilierten Dichtungen in der Flanschform C um etwa ein bis zwei Zehnerpotenzen höhere Leckageraten auf als die in der Flanschform E. Grund hierfür ist die geringere Rautiefe der Dichtfläche der Form E ($< 16 \mu\text{m}$) gegenüber der Form C ($< 160 \mu\text{m}$), die eine kleinere Spaltströmung zwischen Dichtung und Dichtleiste und somit eine niedrigere Leckagerate bewirkt.

Bei den Flanschen der Form E wurden Dichtungen unterschiedlicher Hersteller untersucht, die bei gleicher Flächenpressung deutliche Unterschiede in der Leckagerate aufweisen.

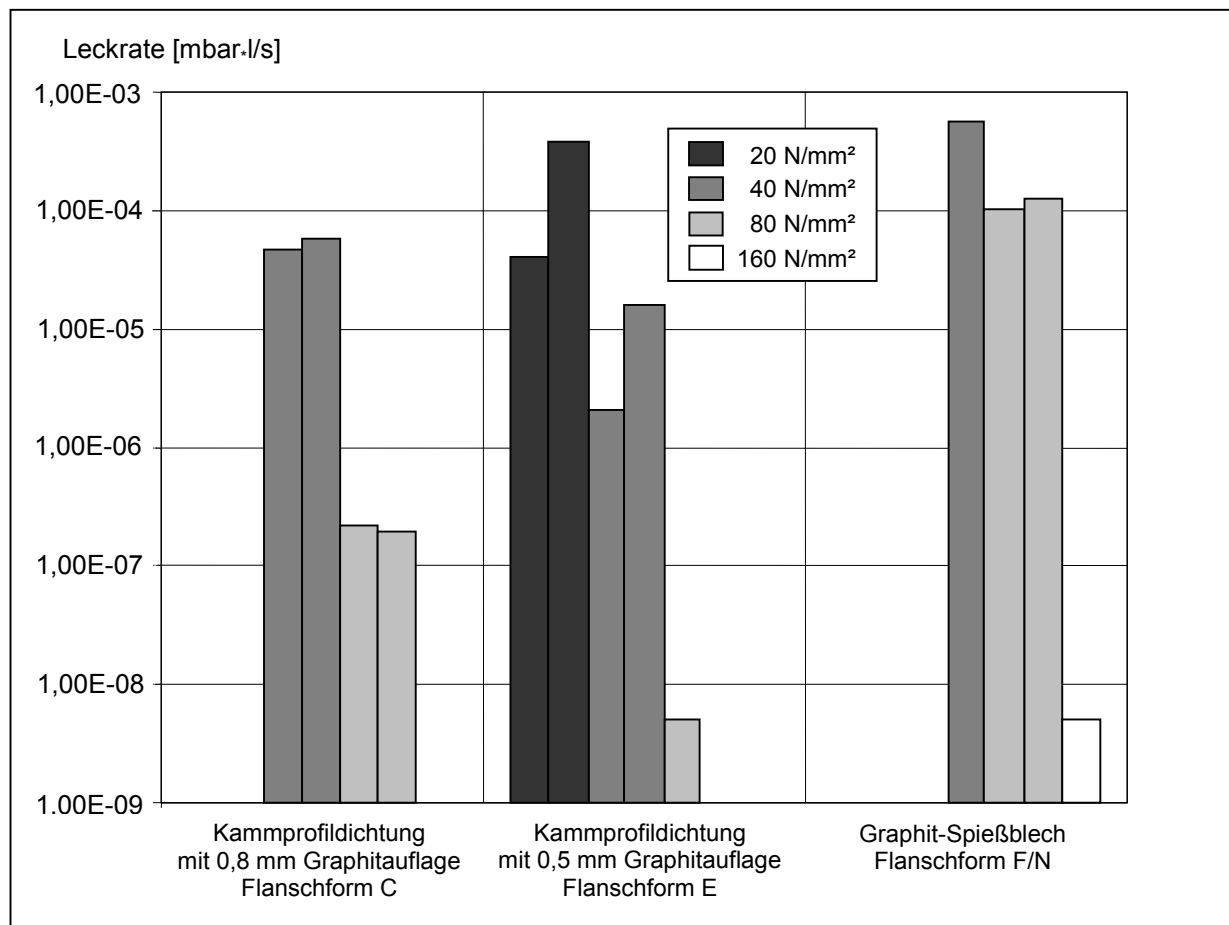


Abbildung 5.4.4.1.1: Abhängigkeit der Leckagerate von der Flanschform¹⁾

Bei der Graphit-Spießblech-Dichtung in der Flanschform F/N (Feder-Nut) zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Leckagerate von der angewandten Flächenpressung.

5.4.4.2 Dichtungsmaterial

Einen Vergleich der Leckageraten unterschiedlicher Dichtungswerkstoffe nach Warmlagerung zeigt **Abbildung 5.4.4.2.1**. Untersucht wurden Weichstoffdichtungen auf Basis von elastomergebundenen Fasern, thermisch modifiziertem PTFE und Graphit sowie eine IT-300 Dichtung.

¹⁾ Bathen, D.; Hummelt, C.; Meisel, J.: Emissionen an Flanschverbindungen. Vulkan-Verlag, Essen, 2000

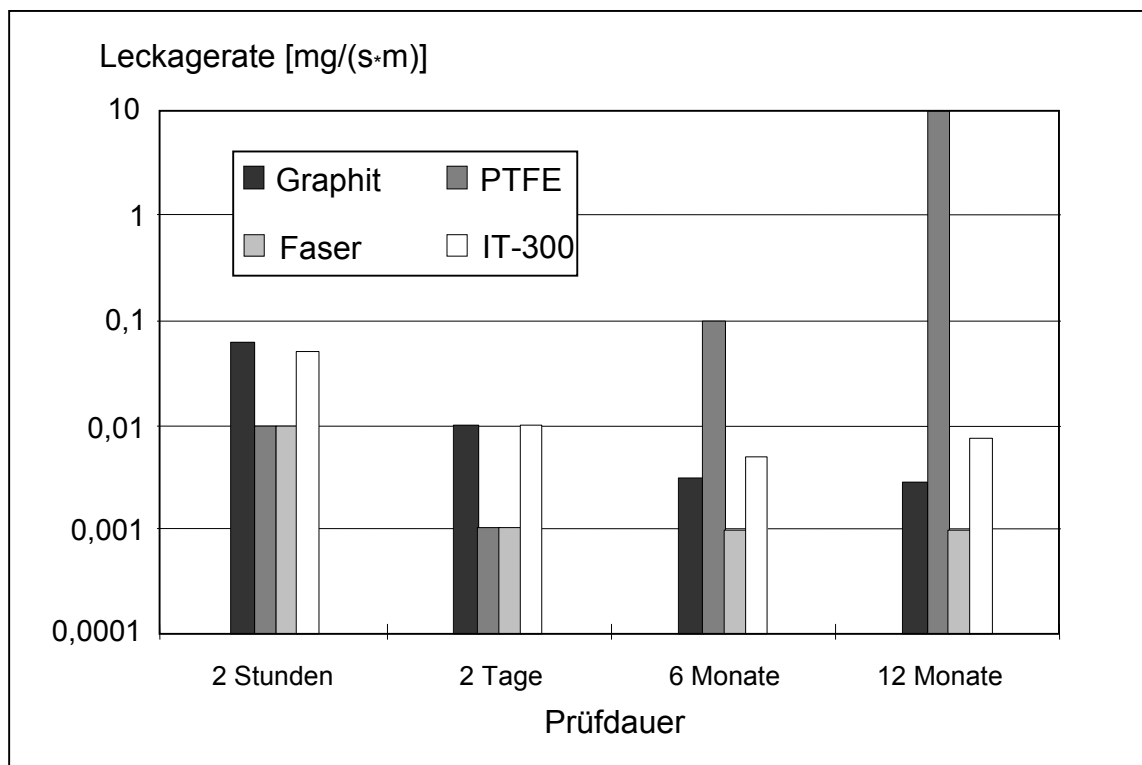


Abbildung 5.4.4.2.1: Leckageraten verschiedener Dichtungsmaterialien nach Warmlagerung bei 150 °C ¹⁾

Durch die Warmlagerung bei einer Temperatur von 150 °C konnte der Einfluss einer thermischen Belastung ermittelt werden. Als Prüfmedium wurde Luft unter atmosphärischem Druck eingesetzt. Angewandt wurde die Druckabfallmethode bei einer Temperatur von konstant 30 °C. Auf ein Nachziehen der Schrauben wurde während der gesamten Versuchsdauer verzichtet.

Bei allen untersuchten Materialien liegen die Leckageraten zu Versuchsbeginn in der gleichen Größenordnung. Bei den Materialien Graphit, elastomergebundene Fasern und IT-300 bleiben die ermittelten Werte während der gesamten Versuchsdauer von 12 Monaten niedrig, während die Leckagerate des PTFE-Materials zwischen dem 2. und 6. Monat deutlich ansteigt und nach weiterer Warmlagerung stetig zunimmt. Die Leckageraten oberhalb von 10 mg/(s·m) entsprechen einem Volumenstrom von etwa 100 ml/min, wobei bei diesem Wert nicht mehr von technischer Dichtheit gesprochen

¹⁾ Römmler, M.: Prüfverfahren zur Untersuchung der Mediendurchlässigkeit von Flanschverbindungen mit Weichstoffmaterialien in Anlehnung an DIN-E 18090. IX. Internationales Dichtungskolloquium, FH Münster, 26.04.1995

werden kann. Der hohe Anstieg der Leckageraten des PTFE-Materials resultiert aus dem starken Abfall der Flächenpressung infolge der Kriechneigung des Werkstoffes.

5.4.4.3 Dichtungsbreite

Wie **Abbildung 5.4.4.3.1** verdeutlicht, wird die Leckagerate neben dem eingesetzten Dichtungsmaterial ebenfalls von der Breite der Dichtung beeinflusst.

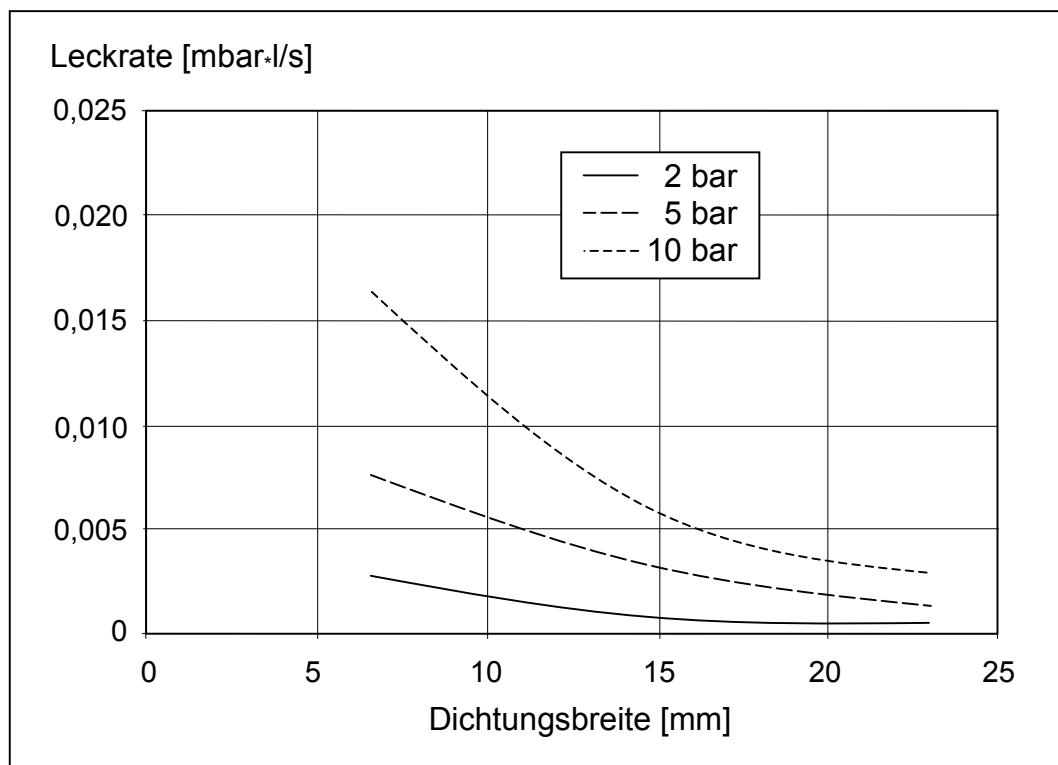


Abbildung 5.4.4.3.1: Leckagerate von Graphit-Spießblech-Dichtungen bei Variation der Dichtungsbreite

Untersuchungen an Graphit-Spießblech-Dichtungen mit einer Dicke von 2 mm zeigen, dass die Leckageraten mit zunehmender Dichtungsbreite abnehmen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass sich die unterschiedlichen Druckstufen vor allem auf die Leckageraten bei geringen Dichtungsbreiten auswirken. Mit zunehmender Dichtungsbreite fällt die Erhöhung der Leckagerate durch steigenden Druck nicht mehr so signifikant aus.

5.4.4.4 Bauform der Dichtung

Die Einflüsse der unterschiedlichen Dichtungsarten zeigt **Abbildung 5.4.4.4.1**. Die Daten beruhen auf einer Prüfung gemäß DIN 3535, wobei Stickstoff als Prüfmedium bei einem Druck von 40 bar diente.

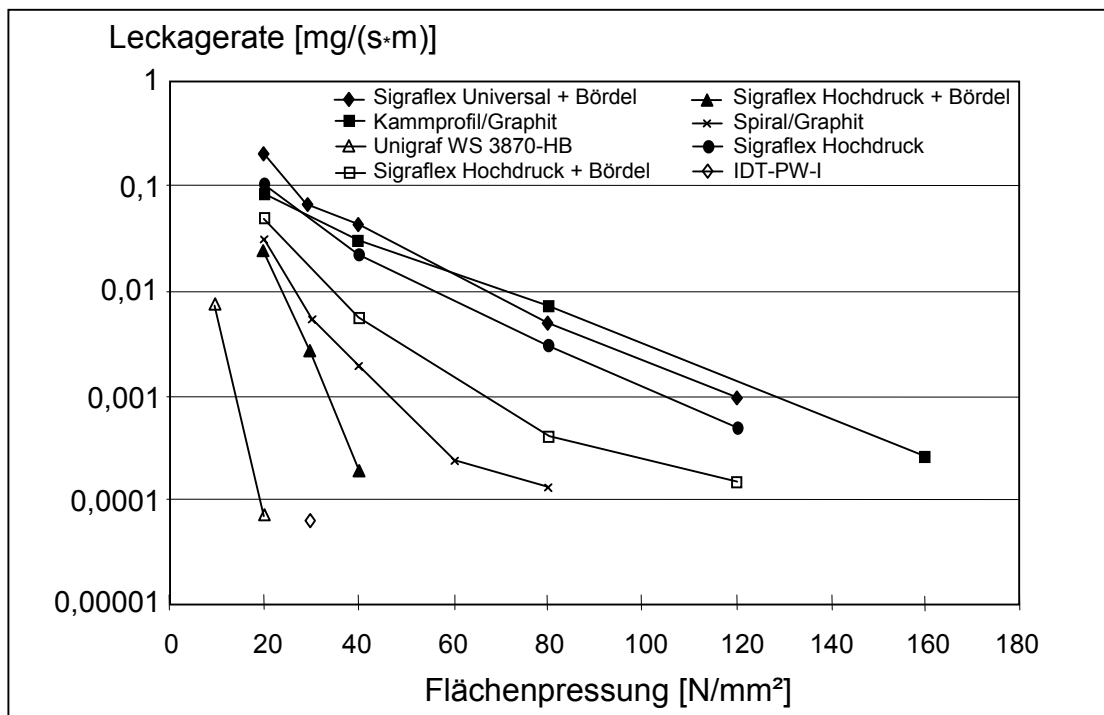


Abbildung 5.4.4.4.1: Vergleich verschiedener Dichtsysteme¹⁾

Die untersuchten Dichtungsvarianten lassen sich wie folgt charakterisieren:

➤ **Sigraflex-Hochdruck**

Sandwich-Dichtung aus wechselweise kleberfrei miteinander verbundenen Schichten aus expandiertem Graphit und Edelstahlfolien.

➤ **Sigraflex-Hochdruck + Bördel**

Gleicher Dichtungstyp wie Sigraflex-Hochdruck, der zusätzlich mit einem Innenbördel aus Edelstahl ausgestattet ist. Untersucht wurden Dichtungen mit und ohne vorverdichteten Zentrierrand.

¹⁾ Lojewski, J.: Dichtungsklassen im internationalen Vergleich – Zuordnung von Dichtungssystemen. XI. Internationales Dichtungskolloquium, Vulkan-Verlag, Essen, 1999

- Sigraflex-Universal + Bördel
Graphit-Dichtung mit einer Einlage aus Spießblech und einem Innenbördel aus Edelstahl.
- Spiral / Graphit
Spiralwicklung aus einem Metall- und einem sehr viel weicheren Dichtungsband (Reingraphit).
- Kammprofil/Graphit
Der Kern dieser Dichtung besteht aus einem massiven Edelstahlträger, der in radialer Richtung eine gezackte Oberfläche aufweist (Kammprofil). Die äußeren Dichtflächen bestehen aus einer Graphit-Auflage.
- Unigraf WS 3870-HB
Diese Dichtung besteht aus flexiblem Graphit mit Edelstahleinlage, der beidseitig zunächst mit einer 0,05 mm starken Edelstahlfolie und anschließend mit einer 0,05 mm dünnen, homogenen PTFE-Folie (Hostaflon TFM) abgedeckt wird. Zusätzlich verfügt die Dichtung über einen Innenbördel aus Edelstahl und einen vorverdichteten Zentrierrand.
- IDT-PW-I
Mit PTFE / TFM umhüllte Dichtung mit einem eingelegten Edelstahlwellring.

Beim Vergleich der Messwerte der Sigraflex Hochdruck-Dichtung mit und ohne Innenbördel zeigt sich, dass der Bördel eine Abnahme der Leckagerate bis zu einer Zehnerpotenz bewirkt. Während bei der Dichtung ohne Innenbördel die Diffusion über den gesamten Dichtungsquerschnitt erfolgen kann, schottet der Bördel den Dichtungsquerschnitt komplett ab. Eine Diffusion ist somit zunächst nur zwischen Bördel und Dichtleiste möglich, bevor das Medium in die Graphitschicht eindringen kann. Die Diffusion kann anschließend nur im Grenzbereich zwischen Dichtung und Dichtleiste sowie der äußeren Graphitschicht stattfinden, da die Edelstahlfolien eine Diffusion des Mediums in den inneren Bereich der Dichtung verhindern.

Bei der Sigraflex-Universal-Dichtung ist die axiale Diffusion des Mediums in das Dichtungsmaterial hinter dem Bördel möglich. Die Diffusion erfolgt dann über den gesamten Dichtungsquerschnitt, weshalb die Leckageraten dieser Dichtung in der gleichen Größenordnung wie bei der Sigraflex-Hochdruck-Dichtung ohne Bördel liegen.

Der Einfluss eines vorverdichteten Zentrierrandes wurde anhand der Sigraflex-Hochdruck-Dichtungen mit Bördel untersucht. Hierbei zeigt sich, dass die Leckageraten der Dichtung mit Vorverdichtung über eine Zehnerpotenz unterhalb der Messwerte ohne Verdichtung liegen. Dies ist aufgrund der höheren Anfangsflächenpressung auf die nicht vorverdichtete, innenliegende Dichtfläche zu begründen, durch die sich die Dichtung gut an die Oberfläche der Dichtleiste anpasst und somit die Spaltströmung zwischen Dichtung und Dichtleiste auf ein Minimum reduziert.

Bei geringen Flächenpressungen wurden bei der Verbunddichtung Unigraf WS 3870-HB die niedrigsten Leckageraten gemessen, was sich anhand des Aufbaus der Dichtung erklären lässt. Der Graphitkern der Dichtung passt sich gut an die Flanschwelligkeiten und -verzüge an, und das gasdichte PTFE gleicht zusätzlich die Mikrounebenheiten der Flanschdichtleiste aus. Die PTFE-Folie verhindert darüber hinaus eine Diffusion des Mediums in den Graphitkern.

Die Spiral- und die Kammprofilichtung sind nicht ohne weiteres mit den übrigen Dichtungen vergleichbar, da sie aufgrund ihrer geringeren Dichtfläche mit wesentlich höheren Flächenpressungen montiert werden.

5.4.4.5 Einfluss von Druck und Temperatur

Neben den Einflüssen auf die Leckagerate von Flanschverbindungen, die sich aus deren Geometrie ergeben, sind betriebsbedingte Faktoren von wesentlicher Bedeutung. Hierzu zählen vor allem Druck und Temperatur.

Leckagen finden in erster Näherung aufgrund von Diffusionsprozessen statt. Da die treibende Kraft für die Diffusion der Konzentrationsunterschied ist, erfolgt der Stoff-

transport durch die Dichtung in Richtung des abnehmenden Partialdruckgefälles. Der Partialdruck des zu untersuchenden Mediums ist mit Ausnahme der Luftbestandteile, wie Stickstoff, Sauerstoff etc., außerhalb der Rohrleitung gegenüber dem Innendruck i. d. R. zu vernachlässigen. Somit ergeben sich als Grenzfälle eine lineare (Knudsen-diffusion) bzw. eine quadratische (laminare Diffusion) Abhängigkeit der Leckagerate vom Innendruck in der Rohrleitung, was auch die Ergebnisse verschiedener experimenteller Untersuchungen bezüglich der Innendruckabhängigkeit der Leckagerate zeigen.^{1) 2)}

Der Einfluss der Temperatur auf die Leckagerate von Flanschverbindungen ergibt sich zum Einen aus der temperaturabhängigen Viskosität des abzudichtenden Mediums und zum Anderen aus der temperaturbedingten Veränderung der Dichtungsstruktur vieler Dichtungswerkstoffe, wie z. B. das Setzen unter Druckbeanspruchung (Kriechen) und das Aushärten der Dichtung.

Hinsichtlich des Setzens der Dichtung unter Temperatureinfluss kam TIETZE (1998) zu dem Ergebnis, dass die Leckagerate unter erhöhter Temperatur erheblich geringer als bei Raumtemperatur ist, was auf ein Setzen der Dichtung und das Schließen der Hohlräume unter Temperatureinwirkung zurückgeführt wird.³⁾

Auch das temperaturbedingte Kriechverhalten von Dichtungen wurde überprüft, indem das Langzeitverhalten von Dichtungen aus flexiblem Graphit, PTFE und Faser-Kautschuk mit Stickstoff unter 40 bar bei 200 °C untersucht wurde. Die ermittelten Leckageraten sowie die Flächenpressungsverläufe sind in der **Abbildung 5.4.4.5.1** dargestellt.

¹⁾ Kämpkes, W.: Einflüsse der Dichtungsgeometrie auf die Gasleckage an Rohrleitungsflanschverbindungen mit IT-Flachdichtungen. Dissertation, Universität Dortmund, 1982

²⁾ Kockelmann, H.: Leckageraten von Dichtungen für Flanschverbindungen: Einflussgrößen, Anforderungen, messtechnische Erfassung und leckagenbezogene Dichtungskennwerte. Chem.Ing.Techn. 68 (1996) 3, S. 219 – 227

³⁾ Tietze, W.: Handbuch Dichtungspraxis. Vulkan-Verlag, Essen, 1998

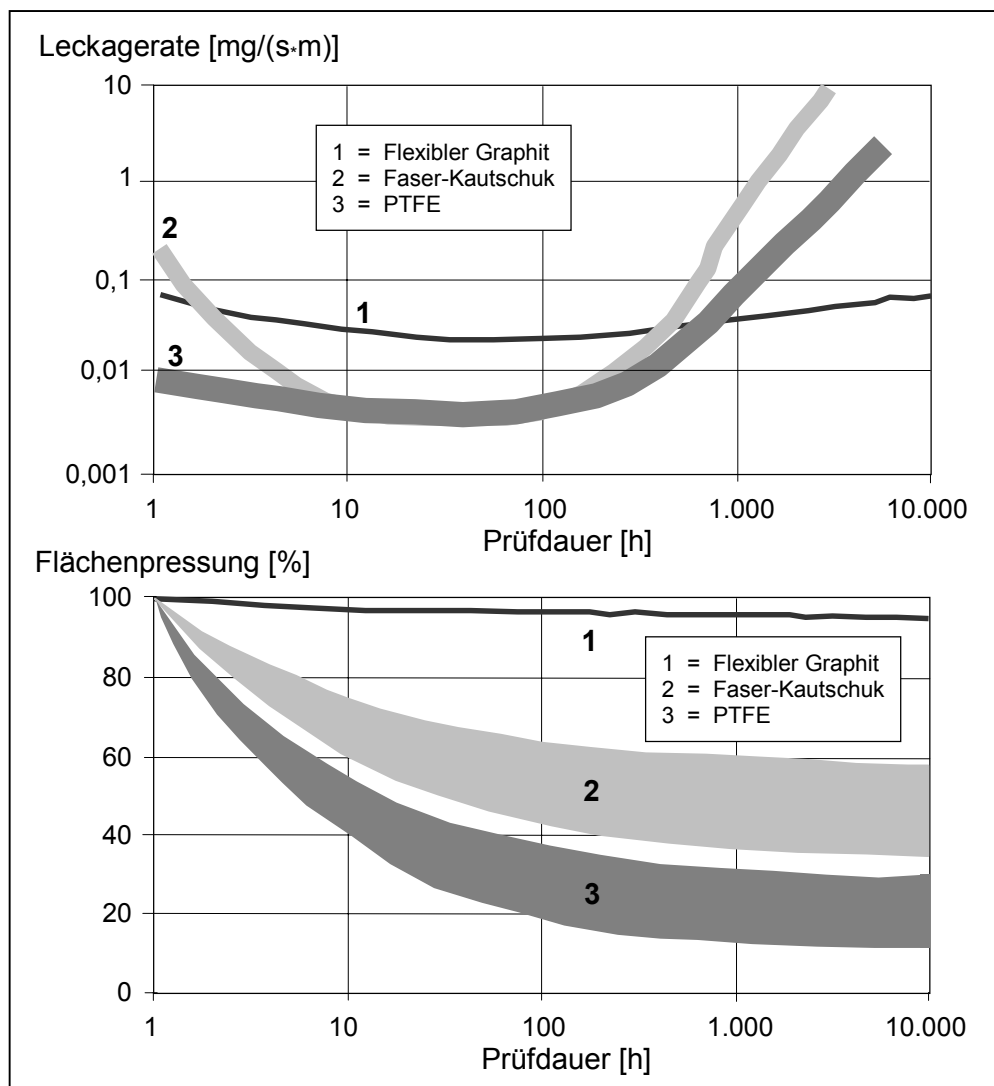


Abbildung 5.4.4.5.1: Leckageverhalten und Flächenpressungsverläufe im Prüf-flansch bei 200 °C nach DIN 28090-2 ¹⁾

Beim Graphit bleibt die Leckagerate ebenso wie die Flächenpressung über den gesamten Versuchszeitraum näherungsweise konstant. Beim PTFE und beim Faser-Kautschuk steigen die Leckageraten ab der 100. Stunde stark an, während die Flächenpressung bei diesen Materialien deutlich abfällt. Die Leckageratenerhöhung

¹⁾ Tietze, W.: Handbuch Dichtungspraxis. Vulkan-Verlag, Essen, 1998

dieser Dichtungen ist darauf zurückzuführen, dass die Kriechneigung der Materialien bei erhöhten Temperaturen höher ist als bei Graphit.^{1) 2)}

5.4.4.6 Einfluss des Betriebsmediums

Die reziprok proportionale Beziehung zwischen Leckagerate und Viskosität des abzudichtenden Mediums zeigt **Abbildung 5.4.4.6.1**

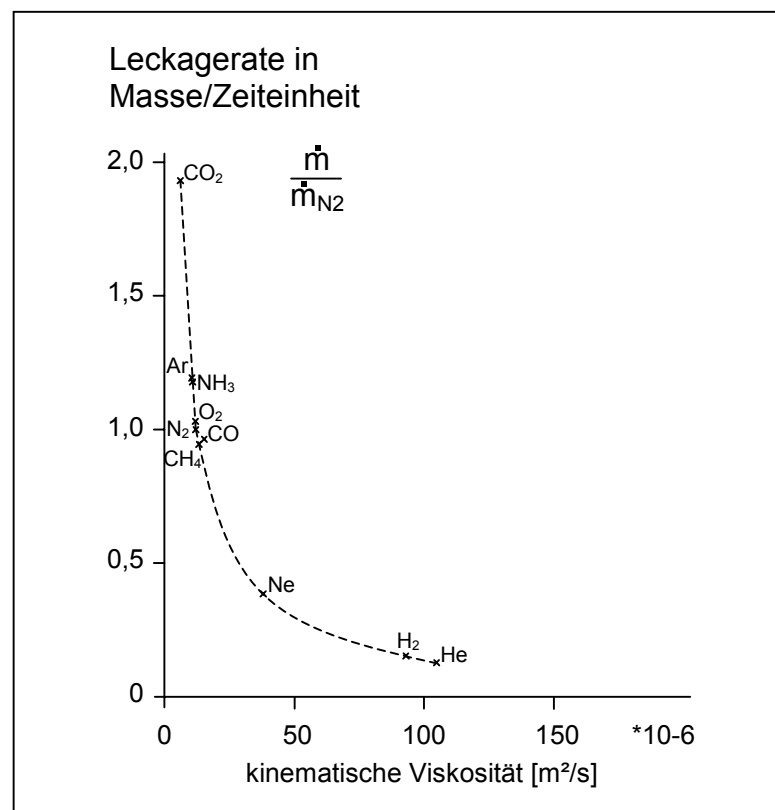


Abbildung 5.4.4.6.1: Einfluss der kinematischen Viskosität auf die Leckagerate²⁾

¹⁾ Römmler, M.: Prüfverfahren zur Untersuchung der Mediendurchlässigkeit von Flanschverbindungen mit Weichstoffmaterialien in Anlehnung an DIN-E 18090. IX. Internationales Dichtungskolloquium, FH Münster, 26.04.1995

²⁾ Kockelmann, H.: Leckageraten von Dichtungen für Flanschverbindungen: Einflussgrößen, Anforderungen, messtechnische Erfassung und leckagenbezogene Dichtungskennwerte. Chem.Ing.Techn. 68 (1996) 3, S. 219 – 227

Die in Abbildung 5.4.4.6.1 dargestellte reziproke Proportionalität zwischen der Leckagerate und der Viskosität des abdichtenden Mediums wird in verschiedenen Untersuchungen für einige Gase, wie Argon, Wasserstoff, Stickstoff und Helium, sowie Flüssigkeiten, wie Cyclohexan, n-Heptan und Diethylether, bestätigt.^{1) 2)} Den Einfluss der Molekülgröße und der Struktur von linearen Kohlenwasserstoffen auf die Leckagerate zeigt **Abbildung 5.4.4.6.2**.

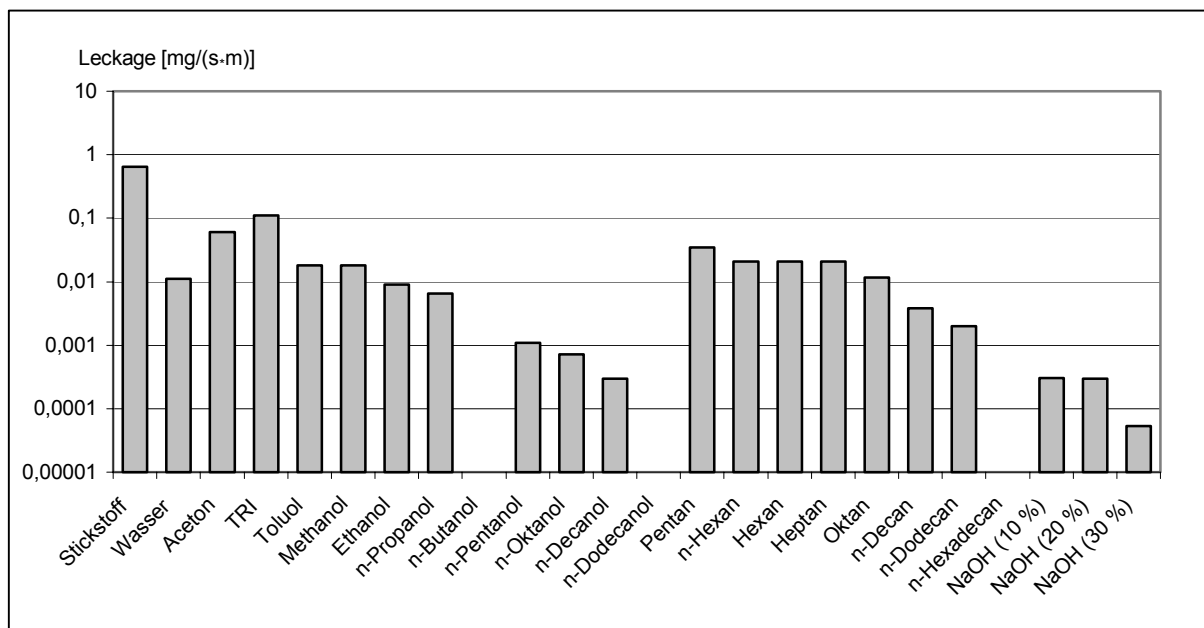


Abbildung 5.4.4.6.2: Leckagerate verschiedener Substanzen bei Innendrucküberlagerung³⁾

Anhand den Versuchsergebnissen mit einer Dichtung aus flexiblem Graphit bei Raumtemperatur ist zu erkennen, dass sowohl bei den Alkoholen als auch bei den Alkanen die Leckagerate mit zunehmendem Molekulargewicht abnimmt. Insgesamt liegt die Leckagerate der Alkane etwas über der der Alkohole mit vergleichbarem Molekulargewicht.

¹⁾ Bierl, A.: Untersuchung der Leckraten von Gummi-Asbest-Dichtungen in Flanschverbindungen. Dissertation, Universität Bochum, 1978

²⁾ Gusko, A.; Kockelmann, H.: VIII. Internationales Dichtungskolloquium, TH Köthen, 21.03.1993

³⁾ Römmeler, M.: Prüfverfahren zur Untersuchung der Mediendurchlässigkeit von Flanschverbindungen mit Weichstoffmaterialien in Anlehnung an DIN-E 18090. IX. Internationales Dichtungskolloquium, FH Münster, 26.04.1995

5.4.5 Doppeldichtungssysteme mit Leakageüberwachung von Flanschverbindungen

Hohe Anforderungen an die Dichtheit von Flanschverbindungen werden an Anlagen und Rohrleitungen gestellt, in denen karzinogene, toxische oder wassergefährdende Stoffe gehandhabt werden. Für derartige Anwendungsfälle wurde ein Doppeldichtungssystem mit Absaugung des Zwischenraums entwickelt. Dabei wird eine Dichtung im Krafthauptschluß (KHS) mit einer Dichtung im Kraftnebenschluß (KNS) kombiniert. Aufgrund dieses speziellen Aufbaus haben sich die Dichtungen KHS/KNS als zuverlässiges Dichtsystem bei doppelwandigen Apparaten oder Behältern sowie bei Doppelmantelrohren und Flanschen mit Zwischenabsaugung bewährt. Bei doppelwandigen Systemen mit Dichtungen KHS/KNS ist der Raum zwischen den beiden Wänden als Begleitheizung und -kühlung oder zur Überwachung auftretender Leckage nutzbar, wie die **Abbildung 5.4.5.1** zeigt.

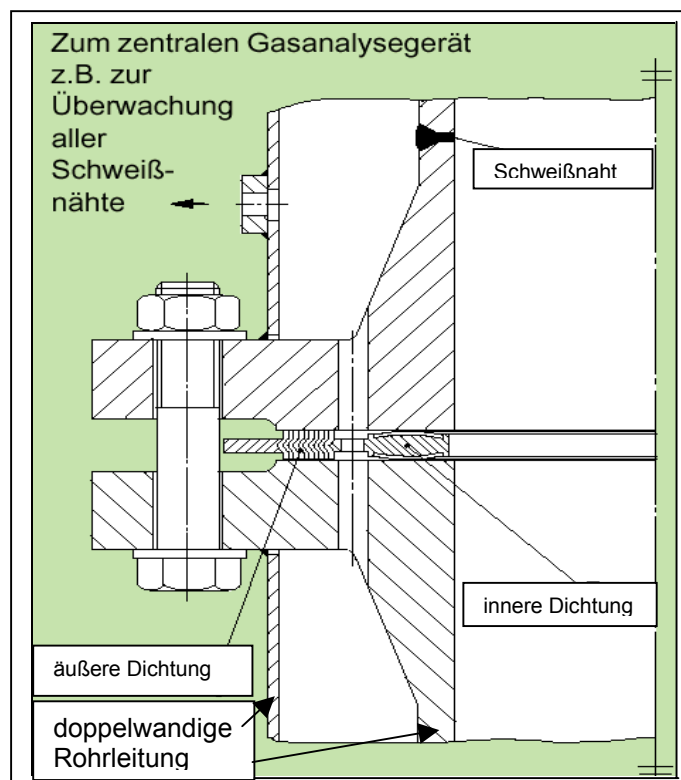


Abbildung 5.4.5.1: Doppeldichtungssystem zur Überwachung der Dichtheit bei doppelwandigen Rohrleitungen

Durch eine Absaugung oder Spülung z. B. mit Stickstoff lassen sich die Dichtheit der inneren und äußeren Dichtung sowie die der Schweißnähte ständig kontrollieren. In

der Praxis wurde z. B. für eine 2" Dichtung KHS/KNS an der inneren Dichtung eine Leckrate kleiner 10^{-5} mbar·l/s für Dichtungen mit Graphit und kleiner 10^{-8} mbar·l/s für Dichtungen mit PTFE gemessen.

Bei einwandigen Systemen kann durch eine Zwischenabsaugung im Flansch die innere und äußere Dichtung überwacht werden. Das Prinzip der Zwischenabsaugung zeigt **Abbildung 5.4.5.2**.

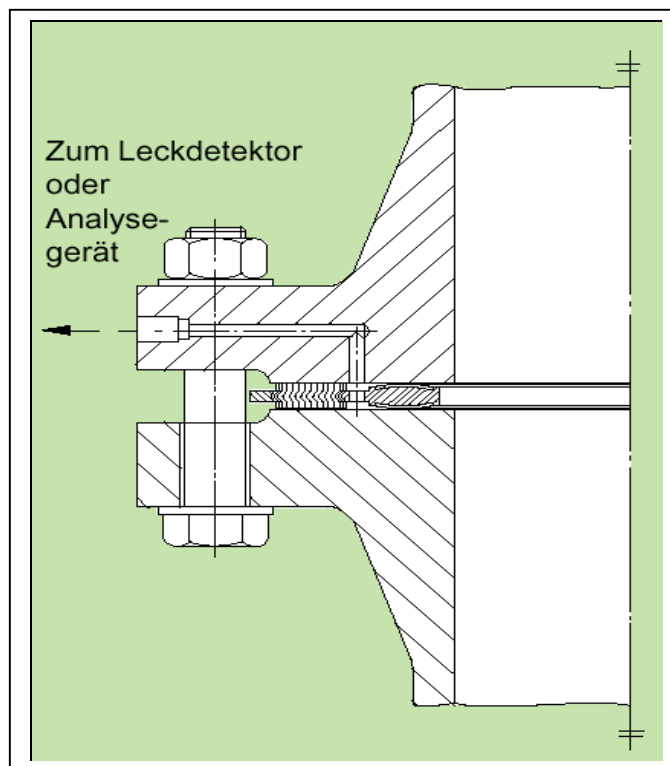


Abbildung 5.4.5.2: Doppeldichtungssystem zur Überwachung der Dichtheit an einer einwandigen Rohrleitung

Bei handelsüblichen Flanschen und Variation der Dichtungsdicke kann entsprechend der **Abbildung 5.4.5.3** die Zwischenabsaugung durch die Dichtung selbst erfolgen.

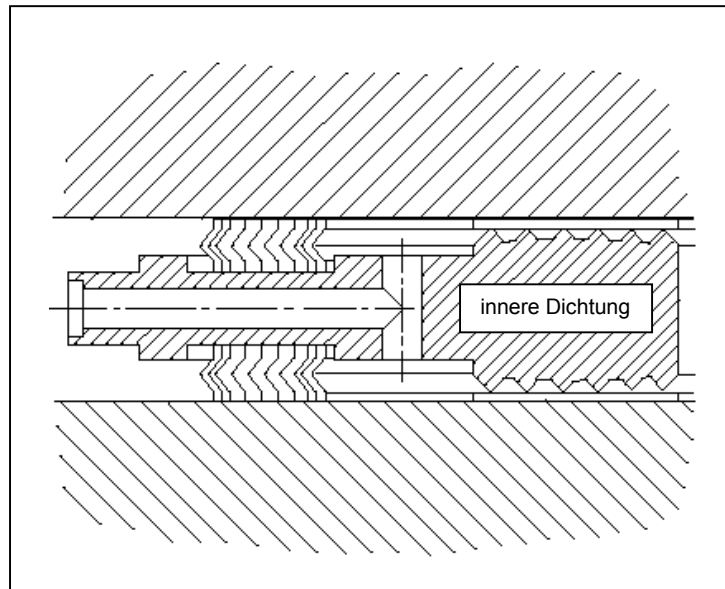


Abbildung 5.4.5.3 die Zwischenabsaugung durch die Dichtung

5.4.6 Stand der Technik von Flanschverbindungen

Die von der TA-Luft geforderte Prüfung nach VDI-Richtlinie 2440 schreibt für die Bauart eine spezifische Leckagerate von $< 10^{-4}$ hPa•l/m•s bei einem nach DIN 28090-2 festgelegten Prüfdruck von 40 bar Stickstoff vor. Der Leckagewert muss bei einer vorgegebenen nach DIN 28091 Teil 2 bis 4 definierten Flächenpressung von 30 MPa (= 30 N/mm²) erreicht werden. In den **Abbildungen 5.4.6.1 bis 5.4.6.3** sind Ergebnisse von Untersuchungen zur Bestimmung der Leckagerate verschiedener Dichtelemente dargestellt. Sie wurden bei einem bar mit Hilfe des Heliumlecktests ermittelt und zeigen, dass Kammprofil- oder Wellringdichtungen mit PTFE-oder Graphitauflage die Leckageanforderungen der TA-Luft schon bei Flächenpressungen von 30 N/mm² erfüllen.¹⁾

¹⁾ Hochwertige Dichtungssystem. Informationen der Fa. Kempchen & Co. GmbH, Oberhausen, Sept. 2001

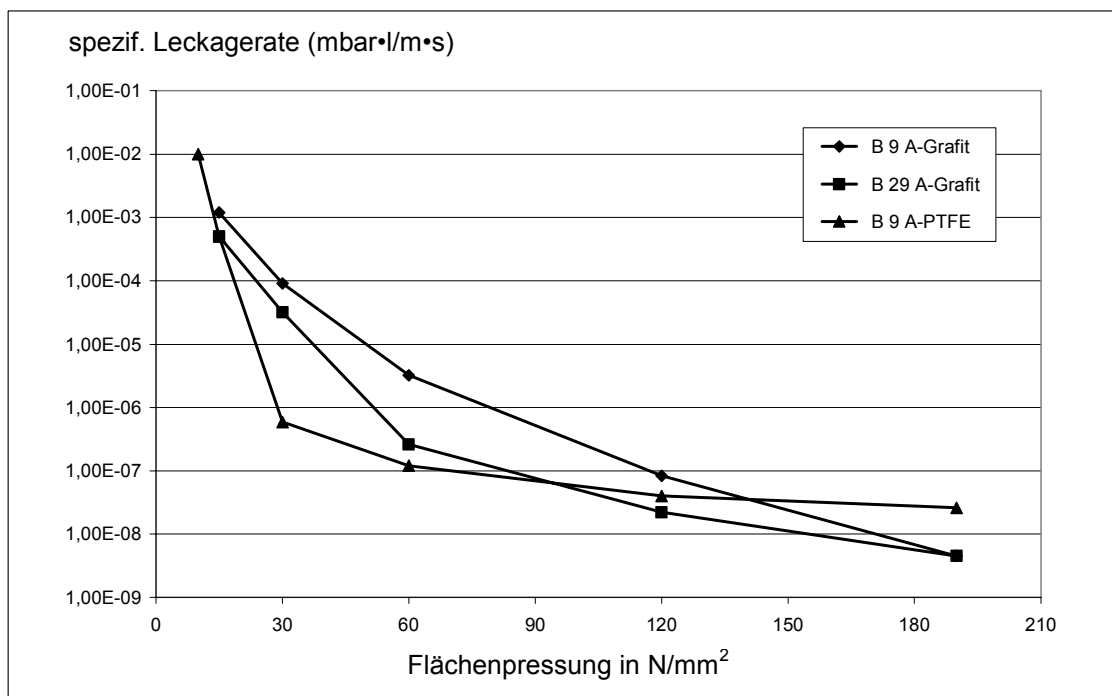


Abbildung 5.4.6.1: Leckageraten von Kammprofildichtungen

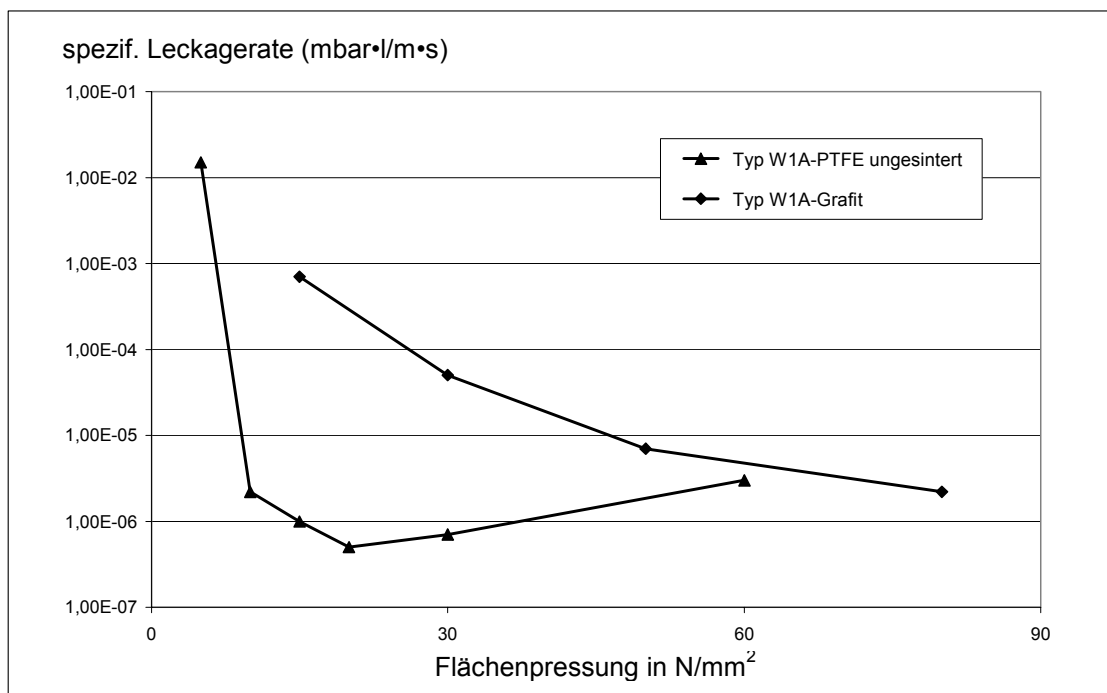


Abbildung 5.4.6.2: Leckageraten von Wellenringdichtungen

Gummi-Stahl-Dichtungen erreichen die geforderten Leckagewerte bei wesentlich geringeren Flächenpressungen. Jedoch ist die geforderte Flächenpressung von 30 N/mm² nicht realistisch, weil der Werkstoff bei diesem Wert bereits überlastet ist.

Weichstoffflachdichtungen aus z. B. Graphit und Spiraldichtungen mit Graphit- oder PTFE-Füllung können bei der vorgegebenen Flächenpressung und dem anstehenden Druck von 40 bar formal die Anforderung nach einer Leckagerate von $< 10^{-4}$ mbar•l/m•s nicht erfüllen (**Abbildung 5.4.6.3**). Dennoch sind sie schon seit Jahren mit wesentlich höheren Flächenpressungen im Einsatz, wobei die geforderte Leckagerate durch die schmalere Dichtflächen problemlos unterschritten wird. Deshalb ist zu überlegen, ob Dichtungen, die den Nachweis bei höheren Flächenpressungen erbringen, nicht auch als hochwertig einzustufen sind, zumal Metalledichtungen, die weitaus höhere Flächenpressungen erfordern, grundsätzlich immer zugelassen sind.

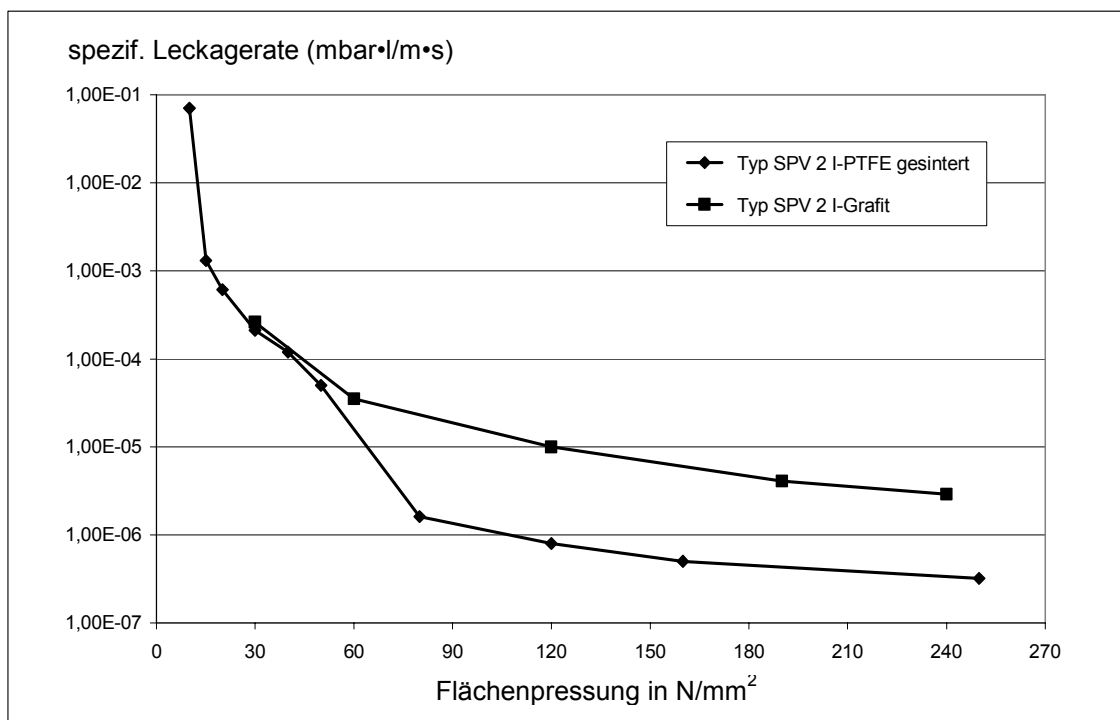


Abbildung 5.4.6.3: Leckageraten von Spiraldichtungen

Die novellierte Technische Regel Druckbehälter (TRB 600)¹⁾ geht im Gegensatz zur TA-Luft konkret auf die Dichtsysteme von lösbaren Verbindungen ein, die die Dichtheit durch ihre Konstruktion gewährleisten. Im Einzelnen werden folgende Dichtungssysteme genannt:

¹⁾ Technische Regel Druckbehälter vom 2.12.1999, BArbBl. 3/2000, S. 66

- Schweißlippendichtungen
- Flansche mit Nut und Feder (vgl. Abbildungen 5.3.2.1, Form F/N)
- Flansche mit Vor- und Rücksprung
- Flansche mit V-Nuten und V-Nutdichtungen (vgl. Abbildung 5.3.2.1, Form L)
- Flansche mit glatter Dichtleiste und besonderen Dichtungen, z. B.
 - Weichstoffdichtungen bis 25 bar (z. B. Aramid, PTFE)
 - metallrandgefasste Dichtungen (vgl. Abbildung 5.3.2.2, Innenbördel)
 - metallummantelte Dichtungen bei rechnerischer Nachprüfung einer ausreichenden Streckgrenze
- metallische dichtende Verbindungen (ausgenommen Schneid- und Klemmringverbindungen in Leitungen > DN 32)
- NPT-Gewinde (National Pipe Taper Thread, kegeliges Rohrgewinde) oder andere konische Rohrgewinde mit Abdichtung im Gewinde bis DN 50, soweit sie nicht thermischen Belastungen ($\Delta t > 100\text{ °C}$) ausgesetzt sind.

5.5 Dichtsysteme für Wellen und Spindeln

Pumpen, Ventile und Rührer sind drei Aggregate, in denen je nach Bauart eine rotierende Welle gegen ein statisches Gehäuse abgedichtet werden muss, um flüssige oder gasförmige Emissionen zu vermeiden. Zunächst können folgende prinzipielle Wellendichtungssysteme unterschieden werden:

- | | |
|--------------------------|---|
| Stopfbuchs-
packung: | Die Stopfbuchspackung besteht in der Regel aus mehreren Einzelringen, die mit Zusatzstoffen, wie Schmiermitteln und Imprägniermitteln versehen sein können. Die geflochtenen Ringe werden über eine Welle in eine Aussparung, die Stopfbuchse, eingelegt. Durch Anziehen der Stopfbuchsbrille werden die Ringe axial verpresst, wodurch sie sich radial ausdehnen und die Abdichtung der Welle gegenüber dem Gehäuse bewirkt wird. Stopfbuchspackungen zeichnen sich durch niedrige Anschaffungskosten und durch eine einfache Montage aus. Sie müssen in regelmäßigen Abständen kontrolliert werden. |
| Gleitring-
dichtungen | Die funktionstragenden Teile dieses Dichtungstyps sind der Gleitring, der Gegenring und eine Feder. Durch die Feder werden die Gleitflächen des Gleit- und Gegenringes aneinander gepresst und damit der Innenraum gegenüber der Umgebung abgedichtet. Da die axial gleitenden Dichtflächen mit einer Flüssigkeit geschmiert bzw. gekühlt werden müssen, lässt es sich in der Regel nicht vermeiden, dass durch die Wellendichtung Produkt oder eine Sperrflüssigkeit zur Atmosphäreseite gelangen. |
| Magnet-
kupplungen | Bei der Magnetkupplung ist die Antriebswelle an einem Ende unterbrochen. Sie wird an diesem Ende von einem Spalttopf umschlossen und nach außen abgedichtet. Die Übertragung des Drehmomentes erfolgt durch ein Magnetfeld. |

Darüber hinaus gibt es weitere Möglichkeiten, Wellen weitgehend abzudichten. Die drei genannten Systeme sind jedoch stark verbreitet und stellen somit die wichtigsten Abdichtungssysteme für rotierende Wellen dar. Der Einsatz der einzelnen Systeme ist u. a. von der Konstruktion der Bauteile, den physikalischen Betriebsbedingungen und den Eigenschaften der Betriebsmedien abhängig, so dass sie daher nicht beliebig austauschbar sind. Die jeweiligen Anwendungsgrenzen sind in **Tabelle 5.5.1** zusammengefasst, wobei diese im Falle bestimmter Sonderanfertigungen deutlich verschoben sein können.

Tabelle 5.5.1: Anwendungsbeispiele verschiedener Wellenabdichtungssysteme¹⁾

		Stopfbuchspackung	Gleitringdichtung	Magnetkupplung
Temperatur		-200 bis + 500 °C	-100 bis +450 °C	-100 bis +450 °C
Druck		1 bis 40 bar	Vakuum bis 450 bar	Vakuum bis 40 bar
max. Gleitgeschw./ Umdrehung		40 m/s	> 100 m/s	3600 1/min
Drehmoment		unbegrenzt	unbegrenzt	315 Nm
Medium	flüssig	√	√	√
	gasförmig	√	√	-
	breiig	√	-	-
	abrasiv	√	-	-
Plötzliches Versagen		-	√	√
Große Wellendurchmesser		√	-	-

Aus den dargestellten Anwendungsgrenzen ergeben sich für die einzelnen Dichtungssysteme typische Anwendungsgebiete. So werden für Ventile meist Stopfbuchsen eingesetzt, während Gleitringdichtungen meist in Pumpen und Rührern verwendet werden. Magnetkupplungen können nur für flüssige Medien bis zu einem Drehmoment von 315 Nm eingesetzt werden. Viskose Flüssigkeiten, die höhere

¹⁾ Deininger, J. et al.: Auswahlkriterien für Wellendichtungen unter Berücksichtigung von flüssiger und gasförmiger Leckage. VDI-Berichte 1440, Düsseldorf, 1998

Drehmomente erfordern, können von Pumpen mit Magnetkupplungen nicht gefördert werden. Auch ist der Druckbereich von Magnetkupplungen im Vergleich zu den Gleitringdichtungen deutlich eingeschränkt.

Während der Ausfall von Gleitringdichtungen und Magnetkupplungen meist auf ihre mechanische Beanspruchung zurückzuführen ist, ist eine fehlerhafte Installation meist Ausfallursache bei Stopfbuchspackungen.^{1) 2)}

5.5.1 Stopfbuchspackungen

Stopfbuchspackungen erfordern eine bestimmte Leckagemenge, um die durch Reibung erzeugte Wärmemenge abzuführen. Die Leckage kann prinzipiell zwischen Welle und Packung, Gehäuse und Packung oder durch die Packung erfolgen. Eine Vorausberechnung der Leckagerate von Stopfbuchspackungen ist wegen der Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter bis heute nicht gelungen. Die vorhandenen Angaben zur Leckage stellen meist nur sehr grobe Abschätzungen dar, die den Verhältnissen in der Praxis meist nicht gerecht werden.

Trotz der stark gestiegenen Verwendung von Gleitringdichtungen in Rotationspumpen und Mischern gibt es eine Vielzahl von Anwendungen, wo aufgrund von Wellenschlag oder abrasiven Medien nur Stopfbuchspackungen verwendet werden können. In Bezug auf den Anschaffungspreis und den Montagekosten haben Packungen einen hohen Kostenvorteil im Vergleich zu anderen Systemen. In unterschiedlichen Veröffentlichungen werden Leckageraten von Gleitringdichtungen als 200- bis 1.000-fach kleiner beschrieben als Stopfbuchspackungen. Aber die Entwicklung von neuen Garnen und Imprägnierungsbestandteilen hat die Leckageraten und die Standzeiten moderner Stopfbuchspackungen um ein Vielfaches verbessert. Gleitringdichtungen haben Vorteile bzgl. der Leckageraten bei hohen Wellendrehzahlen. Für Geschwindigkeiten bis 10 m/s können auch hochwertige Packungen sehr niedrige Leckageraten erreichen.

¹⁾ Fa. Durametallic Corporation: Archive Fugative Emissions Compliance with Dura Seal Designs – Chemical and Pharmaceutical Plant Experience. Technical Data 1992

²⁾ Aenis, J.: Kreiselumpen mit Magnetkupplungen. Pumpen + Kompressoren, Nr. 1, 1995

Die Verminderung der Leckagerate wurde durch folgende Verbesserungen erreicht:

- Entwicklung neuer Packungsgarne und Flechtstrukturen
- Verbesserung von Imprägnierungen und Schmiermitteln

Es wurden Fasern aus Aramid, PTFE, Kohlenstoff und Graphit entwickelt, die nach den verschiedenen in **Abbildung 5.5.1.1** dargestellten Strukturen z. T. miteinander verflochten werden.

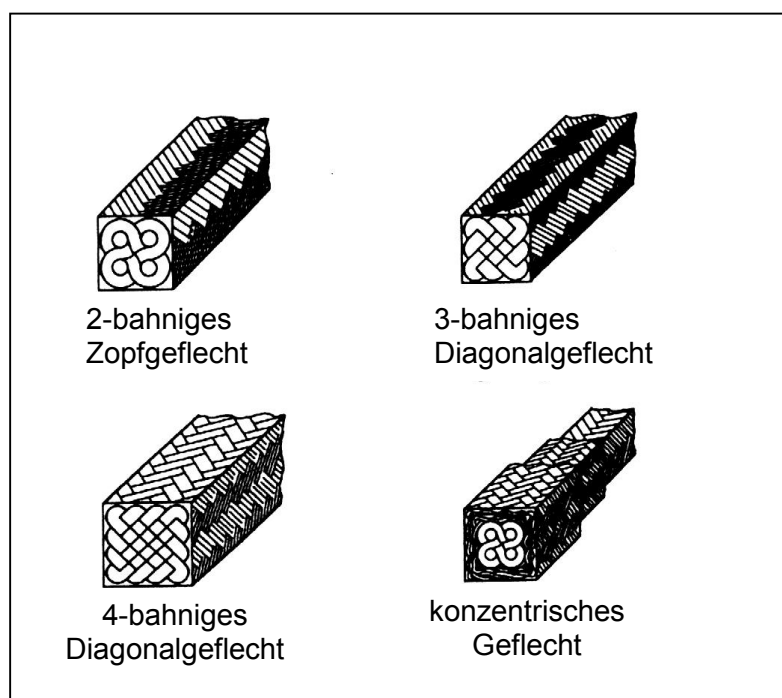


Abbildung 5.5.1.1: Flechtstrukturen¹⁾

Die Imprägnierung macht die Packung undurchdringlich für das abzudichtende Medium und schützt die Packungsgarne vor chemischem Angriff durch aggressive Medien. Die Hauptimprägnierungsbestandteile in modernen Packungen sind PTFE, Graphit und Glimmer.

¹⁾ Vogel, R.: Reduzierung von Emissionen mit Hilfe von Stopfbuchpackungen in Kreiselpumpen- und Mischeranwendungen. VDI-Berichte 1440, Düsseldorf, 1998

Die Leckageraten der modernen geflochtenen Stopfbuchspackungen wurden auf einem Pumpenprüfstand bestimmt und einer Packung mit normaler PTFE/Graphit-Imprägnierung gegenübergestellt (**Abbildung 5.5.1.2**).

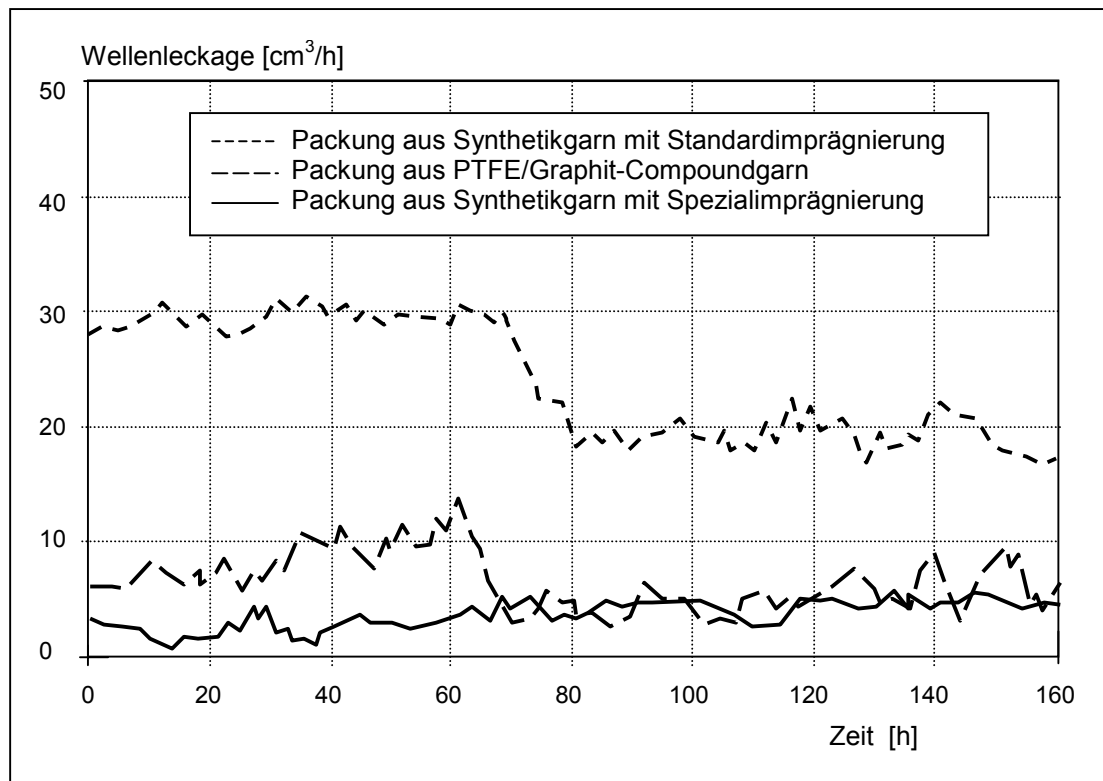


Abbildung 5.5.1.2: Leckageraten verschiedener Stopfbuchspackungen auf dem Pumpenprüfstand

Wie die Ergebnisse zeigen, konnte für die geflochtene Packung aus Synthetikgarn mit Spezialimprägnierung eine durchschnittliche Leckage von 3,4 cm³/h erreicht werden. Im Vergleich hierzu betrug die Leckagerate mit einer ähnlichen Packung mit einer normalen PTFE/Graphit-Imprägnierung durchschnittlich 23,2 cm³/h. Des weiteren wurde eine PTFE/Graphit-Compoundpackung getestet. Ebenso wie die Packung mit normaler Imprägnierung musste sie nach 60 Stunden nachgespannt werden. Danach erreichte sie ebenso gute Werte wie die Packung aus Synthetikgarn mit Spezialimprägnierung.

5.5.2 Gleitringdichtungen

Zwischen dem Gleitring und dem Gegenring bildet sich infolge der Druckdifferenz eine Spaltströmung aus. Auch hier dient die Strömung der Abfuhr der entstehenden Reibungswärme. Die Berechnung der Leckage setzt die Kenntnis des Schmierzustandes, der Form des sich auszubildenden Spalts und der Spaltweite voraus. Zur Ermittlung dieser Größen wurde ein iteratives Berechnungsverfahren entwickelt, das die Grundlage für die überwiegende Anzahl an Berechnungsformeln, die von Herstellern bereitgestellt werden, bildet. **Abbildung 5.5.2.1** zeigt den Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden am Beispiel des Mediums Wasser.

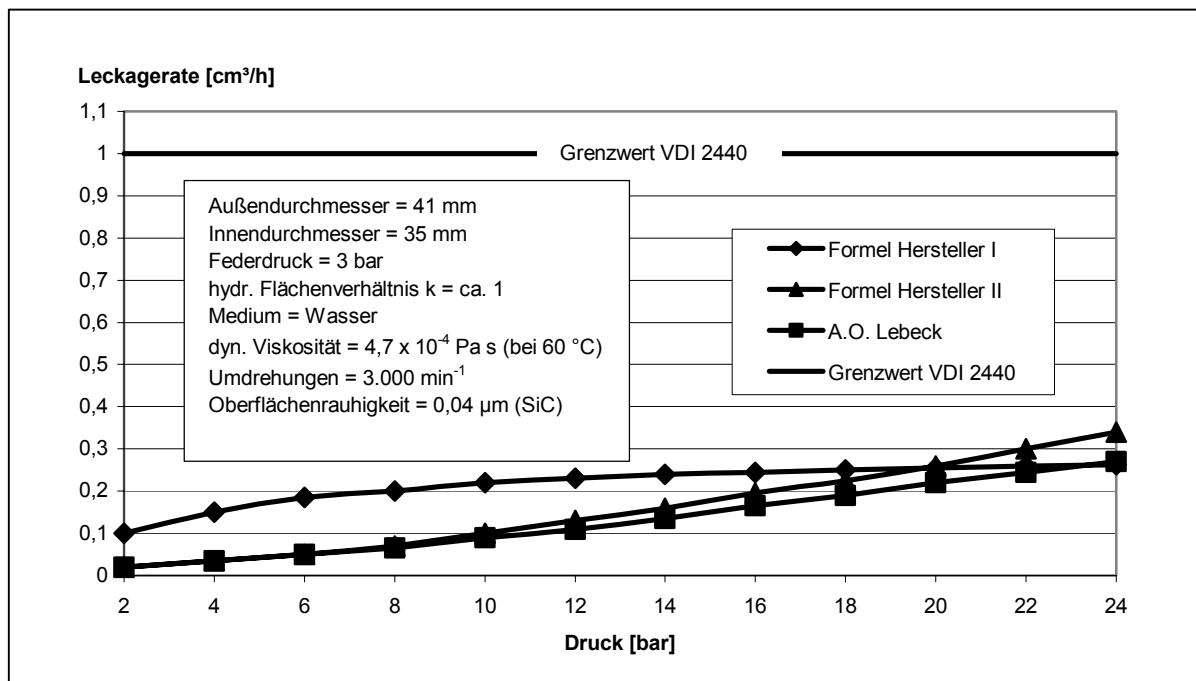


Abbildung 5.5.2.1: Leckagemengen für eine Gleitringdichtung

Bei allen Berechnungsverfahren wird bei einem Druck von 25 bar eine Leckagerate von $0,4 \text{ cm}^3/\text{h}$ nicht überschritten. Zum Vergleich liegt der Grenzwert nach VDI-Richtlinie 2440 für petrochemische Anlagen bei $1 \text{ cm}^3/\text{h}$.

Bei toxischen Stoffen werden in der Regel doppelt wirkende Gleitringdichtungen eingesetzt. Der Raum zwischen den beiden Dichtungen wird von einer Flüssigkeit durchströmt, die als Sperrmedium wirkt, die Reibungswärme abführt und die Gleit-

flächen der Dichtungen schmiert. Der Sperrdruck wird von einem besonderen Sperrsystem erzeugt und muss stets höher sein als der Druck der Betriebsflüssigkeit hinter der produktseitigen Flüssigkeit, damit die Dichtungskombination im Betrieb dicht ist.¹⁾

5.5.3 Magnetkupplungen

Magnetkupplungen können im technischen Sinne als hermetisch dicht angesehen werden. Ihr System wird in Zusammenhang mit verschiedenen Pumpenkonstruktionen in Kapitel 5.6.2.1 näher beschrieben. Die Entscheidung zugunsten von Magnetkupplungen wird wesentlich durch die Kosten bestimmt. In **Tabelle 5.5.3.1** sind Richtwerte für die Anschaffungskosten zusammengefasst. Zusätzlich enthält die Aufstellung die Kosten für eine doppelte Gleitringdichtung mit den dazugehörigen Zusatzeinrichtungen.

Tabelle: 5.5.3.1: Anschaffung verschiedener Dichtungssysteme ²⁾

Stopfbuchs- packung	Gleitring- dichtung	Magnet- Kupplung	doppelte Gleitringdichtung mit Zusatzeinrichtungen
€ 7,5	€ 500	€ 2.150	€ 1.800

5.6 Pumpen

5.6.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die TA-Luft fordert in Kapitel 5.2.6.1 für bestimmte Stoffgruppen und Konzentrationen den Einsatz technisch dichter Pumpen, wie Spaltrohrmotorpumpen, Pumpen mit Magnetkupplung, Pumpen mit Mehrfach-Gleitringdichtungen und atmosphärenseitig

¹⁾ Faragallah, W.H.: Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen und Flüssigkeitsring-Verdichter in Prozesssystemen. 3R international, 30 (1991), Heft 5, S. 225 - 230

²⁾ Deininger, J.et al.: Auswahlkriterien für Wellendichtungen unter Berücksichtigung von flüssiger und gasförmiger Leckage. VDI-Berichte 1440, Düsseldorf, 1998

trockenlaufender Dichtung, Membranpumpen oder Faltenbalgpumpen. Bestehende Pumpen dürfen bis zum Ersatz durch neuere Pumpen weiterbetrieben werden, sofern sie keine gefährlichen Stoffe fördern und einen bestimmten Massegehalt dieser Stoffe unterschreiten.

5.6.2 Bauarten hermetischer Pumpen

In der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie sind hermetische Pumpen heute in den vielfältigsten Anwendungsfällen bereits weit verbreitet. Am Anfang deren Entwicklung wurden leckfreie Pumpen überwiegend zur Erfüllung von Umweltschutzvorschriften und Sicherheitsanforderungen eingesetzt und waren somit neben hochwertigen vor allem kritischen und umweltbelastenden Fördermedien vorbehalten.¹⁾ Aufgrund der technischen Weiterentwicklung wurden mittlerweile viele weitere Anwendungsgebiete erschlossen, in denen bislang hauptsächlich konventionelle Kreislaspumpen mit Wellendichtungen zum Einsatz kamen. Neben dem Schwerpunkt der Emissionsvermeidung erfolgen die Entscheidungen bei der Pumpenauswahl zunehmend im Hinblick auf die Minimierung der Lebenszykluskosten, die unter gewissen Randbedingungen bei hermetischen Pumpen trotz der meist höheren erforderlichen Investitionen oftmals geringer als bei konventionellen Pumpen sind.

Pumpen mit konventionellen Wellenabdichtungen weisen häufig hohe Leckagemassenströme auf. Da meist nicht sehr viele Pumpen in Anlagen betrieben werden, ist ihr Gesamtbeitrag vergleichsweise gering. Für die Förderung von Flüssigkeiten in der Verfahrenstechnik, insbesondere in der chemischen Industrie, wird verstärkt die Forderung erhoben, ohne jegliche Leckrate auszukommen und somit stoffliche Emissionen – vor allem die als gefährlich eingestuft – zu vermeiden. Hieraus resultieren hohe Ansprüche an die Dichtheit der Wellendichtungen, die in der Regel nur von der doppelten Gleitringdichtung oder den leckfreien Pumpen zu erfüllen sind. Die Entwicklung leckfreier Pumpen wurde stark vorangetrieben, so dass heute wellendichtungslose Pumpen, sogenannte hermetische Pumpen, in wachsendem Umfang zum Einsatz kommen.

¹⁾ Pilz, V.: Integrierte Sicherheit bei verfahrenstechnischen Anlagen. Umwelt, Bd. 19 (1989), Nr. 5

Von Bedeutung unter den leakagefreien Pumpen sind gemäß dem heutigen Stand der Technik die Spaltrohrmotorpumpen und die Magnetkupplungspumpen (Pumpen mit permanentmagnetischer Zentralkupplung). Sie finden in fast allen Bereichen der chemischen Produktion, zur Förderung der chemischen Produkte, in Wärmeträgeranlagen und auch für Medien, bei denen niedrige Prozesstemperaturen notwendig sind, Anwendung. Auch oszillierende Pumpen, wie beispielsweise Membranpumpen, bei denen die elastische Membran die Verdrängerwirkung übernimmt und die gleitende Kolbenabdichtung ersetzt, können als leckfrei eingestuft werden. Leckfreie Pumpenausführungen eignen sich besonders, wenn bezüglich des Fördermediums Eigenschaften, wie z. B. Abrasion, Korrosion, Toxizität, Geruchsbelästigung oder Belagbildung, zu beachten oder wenn hohe Hygieneanforderungen zu berücksichtigen sind.

Hermetische Pumpen sind dadurch gekennzeichnet, dass deren Arbeitsraum nach außen hin dauernd durch dichte Wände abgetrennt ist, wodurch ein Austreten stofflicher Emissionen in die Atmosphäre unterbunden wird. Wichtiges Merkmal ist das Fehlen dynamischer, von der Förderflüssigkeit berührter und druckbeaufschlagter Dichtungen, wodurch in der Regel die Problemstellen für Leckagen umgangen werden. Der mediumberührte Arbeitsraum von Kreisel- oder Verdrängerpumpen mit Spaltrohrmotor- und Spaltrohrmagnetantrieben (Magnetkupplung) sowie von Membran-, Schlauch- und Faltenbalgpumpen wird durch eine funktionale Wand in Form des Spaltrohres bzw. der Membran mit statischer Dichtung nach außen leckfrei dicht abgetrennt.

Hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes ist neben dem Explosions- und Trockenlaufschutz sowie der Temperatur- und Schwingungsüberwachung die rechtzeitige Signalisierung von Störungen der Dichtheit, beispielsweise durch Brüche oder Risse, von Bedeutung. Als Stand der Technik hat sich hierbei das Prinzip der Doppelbarriere herausentwickelt.

Das Doppelmembranprinzip wird bei Membranpumpen durch Sandwichmembranen (PTFE oder Metall) realisiert. Die Undichtigkeit einer Membran kann durch die entstehende Leckströmung in einen Sensorraum anhand der Messung eines Druckanstieges festgestellt werden.

Spaltrohrmotorantriebe besitzen prinzipiell auch zwei Barrieren, weil der Statorraum hinter dem Spaltrohr nach außen hermetisch dicht ist. Bei Spaltrohrbruch sind jedoch oftmals weitere Schäden die Folge, so dass mittlerweile Sandwich-Spaltröhre entwickelt wurden, deren Zwischenraum mittels Drucksensor überwacht wird.

Bei der Magnetkupplung kann eine Überwachung über die Abdichtkapsel hinter dem Spalttopf erfolgen, da aus Kostengründen meist auf einen Sandwichspalttopf verzichtet wird. Allerdings sollte bei der Forderung zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen auch bedacht werden, dass Magnetkupplungspumpen aufgrund des technischen Standards hinsichtlich des Betriebsverhaltens und der Verfügbarkeit Pumpen mit doppelter Gleitringdichtung einschließlich Sperrdrucksystem bereits weit übertreffen.¹⁾

Da leckfreie Kreisel- und Verdrängerpumpen in der Regel höhere Investitionen erfordern, muss deren Wirtschaftlichkeit im Einzelfall überprüft werden. Zudem kommt, dass alle leckfreien rotierenden Antriebe mit Spaltrohrmotor bzw. Magnetkupplung zwangsläufig zusätzliche elektrische und hydraulische Wirkungsgradverluste erleiden, so dass der Pumpenwirkungsgrad geringer wird. Vorteile leckfreier Pumpen können sich gegenüber dynamischen Dichtungen mit Gleitring durch z. T. erheblich verringerte Lebenszykluskosten bei erhöhter Zuverlässigkeit ergeben.

5.6.2.1 Pumpen mit Magnetkupplung

Die Magnetkupplung besteht im Wesentlichen aus den Bauteilen Außenmagnetring, Spalttopf und Innenmagnetring (**Abbildung 5.6.2.1.1**). Der Außenmagnetring ist mit der äußeren Motorwelle verbunden und überträgt das Drehmoment des Motors über das magnetische Feld auf den Innenmagnetring, der auf der Pumpenwelle befestigt ist. Ein zwischen dem Außen- und Innenmagnetring angeordneter Spalttopf aus einem nicht magnetisierbaren Werkstoff, wie z. B. Hastelloy, Keramik oder Kunststoff, schließt den Innenraum der Pumpe statisch dichtend ab.

¹⁾ Landowski, R.: Eigenschaften und Auslegungskriterien von Magnetkupplungen. Aus: „Leckfreie Pumpen, Verdichter und Vakuumpumpen“ von Gerhard Vetter (Hrsg.), Seiten 13 – 34, Vulkan-Verlag Essen, 1998

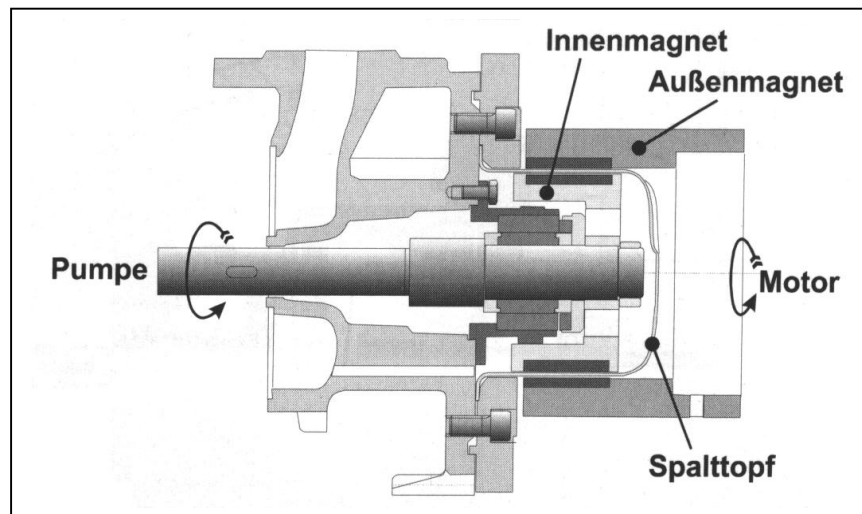


Abbildung 5.6.2.1.1: Prinzipieller Aufbau einer Magnetkupplung

Im Gegensatz zur Spaltrohrmotorpumpe sind bei der Magnetkupplung somit Motorwelle und Pumpenwelle nicht miteinander verbunden. Permanent magnetische Antriebe arbeiten ohne Schlupf, d. h. Motor- und Pumpendrehzahl sind gleich.

Viele Pumpenbaureihen mit konventioneller Wellendichtung lassen sich mittlerweile mit einer Magnetkupplung ausrüsten, da gleiche hydraulische Bauteile (Lauf­rad und Gehäuse) bei den hermetischen und den konventionellen Pumpen verwendet und Anschlussmaße gleichgehalten werden. Hierdurch wird im Bedarfsfall ein rasches Umrüsten an bestehende Anlagen ermöglicht. Die damit verbundene Reduzierung der Bevorratung von Ersatzteilen führt zu Kosteneinsparungen.

Hinsichtlich des Wirkungsgrades entfallen bei der Magnetkupplung im Vergleich zu einer konventionellen Pumpe zwar Reibleistung und Spülstrom der Wellendichtung und ggf. auch die Verluste der externen Lagerung mit elastischer Kupplung, neu hinzuzurechnen sind jedoch die vergleichbaren Verluste der Gleitlagerung und der Magnetkupplung sowie bei der Verwendung eines elektrisch leitenden Spalttopfes insbesondere die Wirbelstromverluste. Insgesamt ist der Wirkungsgrad der Magnetkupplung – abhängig vom Werkstoff und der erforderlichen Wandstärke des Spalttopfes – etwas geringer als der von Gleitringdichtungspumpen. Darüber hinaus nimmt der Wirkungsgrad des Aggregats mit steigender Drehzahl ab.

Eine Betrachtung der Investitionen inkl. Montagekosten zeigt, dass die Kreiselpumpe mit Magnetkupplung bei Förderströmen bis 200 m³/h deutlich kostengünstiger als eine Kreiselpumpe mit doppelt wirkender Gleitringdichtung ist. Auch ein Vergleich der Lebenszykluskosten (Kosten, die während der Nutzungsdauer des Aggregats anfallen) zeigt ebenfalls eindeutige Vorteile zugunsten der Kreiselpumpe mit Magnetkupplung.¹⁾

Für die sichere und wirtschaftliche Förderung von korrosiven, abrasiven und toxischen Fördermedien werden zunehmend leckfreie Magnetkupplungspumpen in Kunststofftechnik auf dem Markt angeboten, was insbesondere für die chemische und pharmazeutische Industrie von gesteigertem Interesse ist.

5.6.2.2 Spaltrohrmotorpumpen

Kennzeichnend für die Spaltrohrmotorpumpe sind die integrierte Bauweise von Motor und Pumpe und die Abdichtung des flüssigkeitsberührten Pumpenarbeitsraumes über das motorseitige Spaltrohr (vgl. **Abbildung 5.6.2.2.1**).

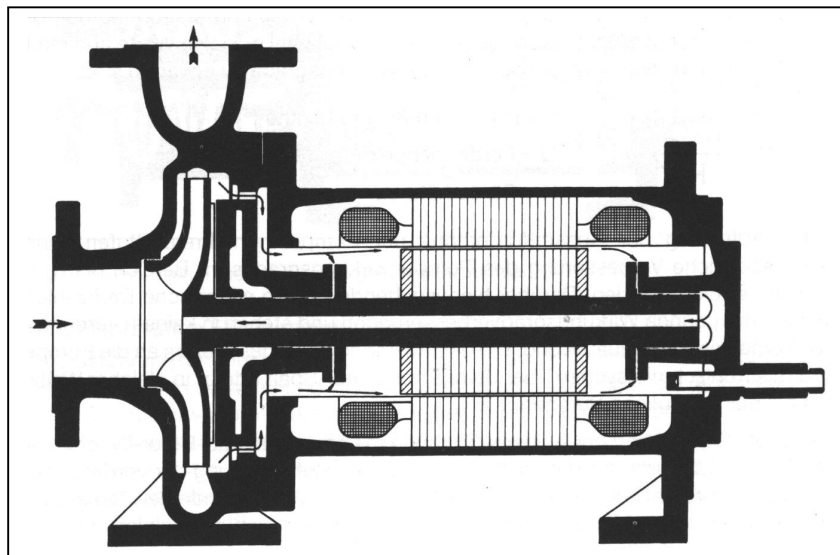


Abbildung 5.6.2.2.1: Spaltrohrmotorpumpe mit Normalhydraulik

¹⁾ Knorr, M.: Stopfbuchslose Kreisel- und Verdrängerpumpen mit Magnetkupplungen. Aus: „Leckfreie Pumpen, Verdichter und Vakuumpumpen“ von Gerhard Vetter (Hrsg.), Seiten 35 – 59, Vulkan-Verlag Essen, 1998

Das Antriebsmoment wird direkt über das elektromagnetische Feld auf die gemeinsame Motor- und Pumpenwelle übertragen. Die erforderliche mediumberührte Rotorlagerung ist gegenüber abrasiven Inhaltsstoffen in der Flüssigkeit empfindlich bzw. ungeeignet.

Das Spaltrohr nimmt am Fördervorgang nicht teil, sondern es hemmt diesen eher durch zusätzliche hydraulische und elektrische Verluste, ersetzt aber die gleitende Wellendichtung, wodurch der Arbeitsraum hermetisch abgedichtet wird. Auf dem Spaltrohr wirkt der volle Differenzdruck, so dass trotz des Bestrebens nach möglichst geringen Spaltabmessungen eine gewisse Steifigkeit bzw. Dicke erforderlich ist.

Spaltrohrantriebe sind in der Regel nicht trockenlauffähig, so dass eine Trockenlaufüberwachung bzw. -sicherung erforderlich ist. Die Abführung von Motor- und Wirbelstromerwärmung erfordert Kühlmaßnahmen, beispielweise kann hierzu ein Teilstrom des Fördermediums im Bypass zur Kühlung genutzt werden. Ebenso wie Magnetkupplungspumpen erreichen Spaltrohrmotorpumpen generell einen etwas geringeren Wirkungsgrad als Gleitringdichtungspumpen, was durch den Einsatz nichtmetallischer Spaltrohre etwas gemildert werden kann. Wie die Magnetkupplungen zeichnen sich Spaltrohrmotorpumpen im kleineren Leistungsbereich bis etwa 20 kW im Vergleich zu Gleitringdichtungspumpen oft durch geringere Lebenszykluskosten aus.

5.6.2.3 Membranpumpen

Weitere hermetische Pumpen neben den Magnetkupplungs- und Spaltrohrmotorpumpen sind die leckfreien oszillierenden Verdrängerpumpen, wie z. B. die Membranpumpen (**Abbildung 5.6.2.3.1**). Bei diesen Pumpen übernimmt eine elastische Trennwand (Membran, Faltenbalg oder Schlauch) die Verdrängerwirkung und ersetzt die gleitende Kolbenabdichtung. Das mechanische hydraulische bzw. pneumatische Betätigungssystem liegt außerhalb der vom Fördermedium berührten Zone. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Membranwerkstoffe ist die Anwendungsgrenze bis auf maximal 200 °C beschränkt.

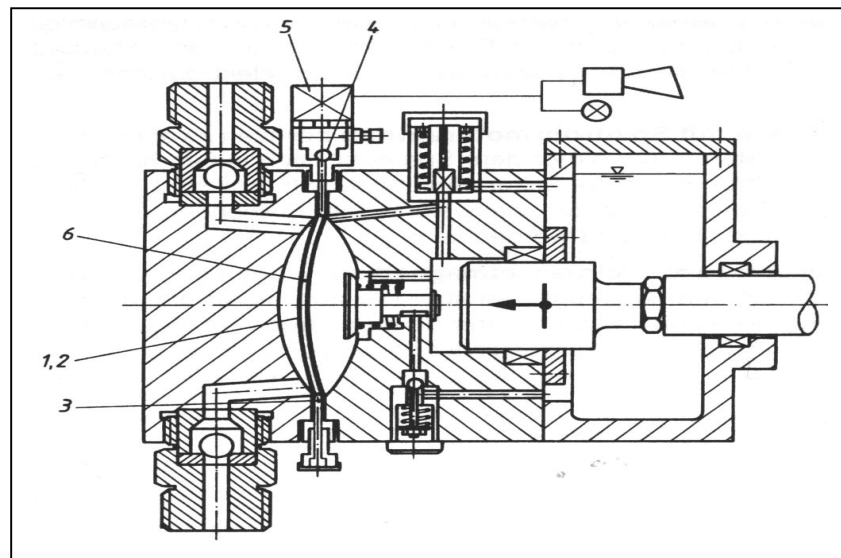


Abbildung 5.6.2.3.1: Membranpumpe (hier mit Sandwichmembran)

Die Membran als Trennwand zwischen dem Betätigungssystem und dem Pumpenarbeitsraum bewirkt sowohl Leckfreiheit als auch die Vermeidung von Dichtungsverschleiß und Wartungsaufwand an flüssigkeitsberührten Kolbenabdichtungen. Hierdurch eignen sich Membranpumpen insbesondere für abrasive Suspensionen und Schlämme sowie für schlecht schmierende Medien. Bei Kolbenmembranpumpen kann der Förderdruck durch den hydraulischen Membranantrieb fast beliebig gesteigert werden. Verglichen mit konventionellen Kolbenpumpen weisen leckfreie Membranpumpen hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften keine Nachteile auf, sondern haben zumeist einen besseren Wirkungsgrad, weil die Reibung der Kolbenabdichtung verringert oder vermieden wird, und sind zudem trockenlauffähig.

Der Leistungsbereich von Membranpumpen reicht von wenigen Watt bis ca. 1 MW. Für Dosierungsaufgaben, insbesondere im kleinen Leistungsbereich, dominieren Membrandosierpumpen. Darüber hinaus werden zur leckfreien Dosierung kleinerer Dosierströme noch Schlauch- und Zahnradpumpen eingesetzt, deren Anwendung jedoch hauptsächlich auf den Bereich von Laboratorien und Technikumsanlagen beschränkt ist. Bei Hochdruck-Membranpumpen nehmen die Investitionen mit zunehmender Leistung gegenüber Kolbenpumpen deutlich zu, so dass deren Wirtschaftlichkeit nur bei deutlich günstigeren Betriebs-, Wartungs- bzw. Umweltschutzkosten gegeben ist.

5.7 Ventile

5.7.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Ventile sind eine nicht zu vernachlässigende Quelle für diffuse Emissionen aus Anlagen und können wesentlich die Gesamtemissionen aus diffusen Quellen bestimmen. Zur Abdichtung von Spindeldurchführungen fordert die neue TA-Luft (Kabinettsbeschluss) in Kapitel 5.2.6.4 für bestimmte gefährliche Stoffe und Stoffgruppen den Einsatz von hochwertig metallisch abgedichteten Faltenbalgventilen mit nachgeschalteter Sicherheitsstopfbuchse oder eines gleichwertigen Dichtsystems. Der Nachweis einer gleichwertigen Dichtung hat nach VDI-Richtlinie 2440 zu erfolgen. Sie definiert in Kapitel 3.3.1.3 für Absperr- und Regelorgane folgende Anforderungen an eine gleichwertig anzusehende Dichtheit:

- Die konstruktive Ausführung des Dichtsystems lässt eine bestimmungsgemäße Funktion unter den Betriebsbedingungen auf Dauer erwarten.
- Die Einhaltung der spezifischen Leckrate von 10^{-4} mbar•l/m•s bei Temperaturen am Dichtsystem kleiner 250 °C bzw. von 10^{-2} mbar•l/m•s bei Temperaturen am Dichtsystem von größer oder gleich 250 °C wird durch einmalige Prüfung nachgewiesen.

Zum Nachweis der spezifischen Leckagerate des Dichtsystems werden Messungen unter Verwendung eines inerten Prüfgases bei Drücken, Temperaturen und Spindel- bzw. Wellenbewegungen, die die Betriebsbedingungen abdecken, nach Erreichen des stationären Zustandes durchgeführt. Üblicherweise werden die Druckabfallmethode nach DIN 28090-2 und der Heliumlecktest (Anhang A der DIN 2440) zur Dichtheitsprüfung eingesetzt. Das Prüfmedium Helium stellt das zweitkleinste Atom im Periodensystem der Elemente dar. Alle anderen Medien sind vom Aufbau größer. Somit wird die mit dem Betriebsmedium erreichte Leckagerate immer unter den mit Helium ermittelten Werten liegen.

5.7.2 Konstruktion emissionsarmer Ventile

Ventile können z. B. nach ihrer Funktion eingeteilt werden. So haben Absperrventile die Aufgabe der Sicherstellung eines vollständigen Verschlusses einer Leitung. Regelventile zur Einstellung von Durchflüssen und Drücken öffnen und schließen sich während der Betriebes häufig. Sie sind i. d. R. daher anfälliger für Leckagen als Absperrventile. Bei ihnen kommt der Effekt des Abriebs der Packung bzw. Riefenbildung im Schaft des Ventils zum Tragen. Es ist daher unbedingt notwendig, hochwertiges Packungsmaterial zu verwenden.

Sicherheitsventile haben die Aufgabe, bei Überschreitung eines vorgegebenen Betriebsdrucks eine Entspannung der Anlage in die Umgebung zu gewährleisten. Emissionen aus Sicherheitsventilen können daher signifikant sein.

5.7.2.1 Faltenbalgventile

In diesem Kapitel können selbstverständlich nicht alle Bautypen und Materialien von Ventilen dargestellt werden. Das hier dargestellte Faltenbalgventil soll stellvertretend die bautechnischen Möglichkeiten technisch dichter Ventilsysteme illustrieren. Faltenbalgventile (**Abbildung 5.7.2.1.1**) sind im Chemieanlagenbau schon seit Jahren weit verbreitet und werden vor dem Hintergrund der Begrenzung diffuser Emissionen aus Ventilen sicherlich noch an Bedeutung gewinnen.

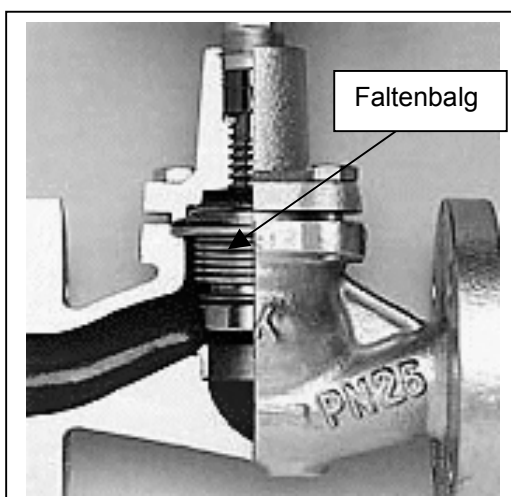


Abbildung 5.7.2.1.1: Schnitt durch ein Faltenbalgventil

Faltenbalgventile sind standardmäßig metallisch dichtende Absperrarmaturen. Beim Schließen des Ventils wird der Kegel auf den Gehäusesitz gepresst, er sperrt somit den Ventildurchgang ab. Die Abdichtung zur Umgebung wird durch einen Faltenbalg, z. B. aus rostfreiem Stahl, sichergestellt. Als zusätzliche Sicherheit wird darüberliegend eine Notstopfbuchse angebracht, die bei einem Ausfall des Faltenbalgs die Dichtfunktion übernimmt. Faltenbalgventile können mit einem Spezialkegel für austauschbare Weichdichtungen geliefert werden. Für Regelaufgaben werden Faltenbalgventile meist mit einem Kegel ausgerüstet.

Mit Faltenbalgventilen lassen sich Leckageraten von 10^{-7} bis 10^{-8} mbar•l/s erreichen, wobei die Nachweisgrenze der üblicherweise eingesetzten Messverfahren erreicht wird. Die Funktion von Faltenbalgventilen hängt stark von der Zahl der Schaltspiele ab. Erfahrungsgemäß steigt die Gefahr des Membranbruchs ab etwa 10.000 Schaltspielen. Ist eine Membran zerstört, wird schlagartig die Notstopfbuchse belastet. Weil sie vorher jedoch unbelastet war, besteht die Gefahr einer im Vergleich zu dauerhaft beanspruchten Stopfbuchsen erhöhten Leckagerate. Der Austausch einer undichten Membran ist zudem aufwendiger als der einer Stopfbuchse.

Faltenbälge sind nicht für alle Ventilkonstruktionen ohne weiteres einsetzbar. Überall dort, wo 90 ° Winkel berücksichtigt werden müssen, wie z. B. bei Ventilkappen, ist der technische Aufwand für eine geeignete Konstruktion mit Faltenbalg so groß, dass die Kosten für derartige Systeme unverträglich sind.

5.7.2.2 Ventile mit Emissionskontrollmöglichkeit

Ähnlich wie bei den Flanschverbindungen in Kapitel 5.4.4. können Ventile mit einer Emissionskontrolle ausgerüstet werden. Diese Forderung wird vom Anlagenbetreiber immer dann gestellt, wenn mit besonders kritischen Stoffen gearbeitet wird. **Abbildung 5.7.2.2.1** zeigt einen Kugelhahn, bei dem die laufende Überwachung an mehreren Stellen möglich ist.

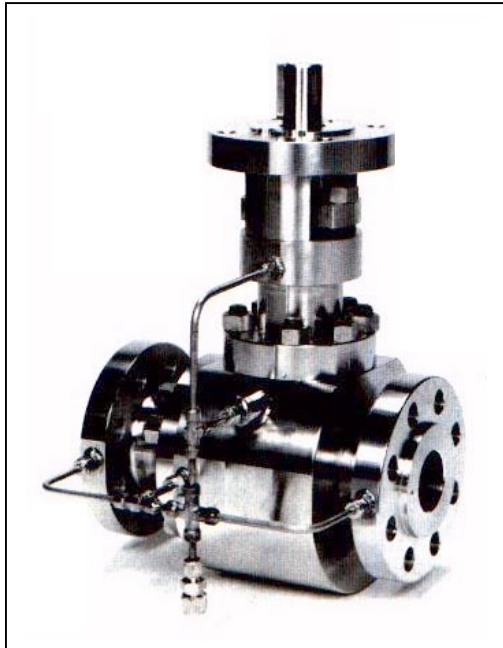


Abbildung 5.7.2.2.1: Kugelhahn mit Anschlüssen zur Leckageüberwachung

Bei dem dargestellten Kugelhahn sind alle Abdichtungen nach außen doppelt ausgeführt. Hierdurch werden Leckageraten von 10^{-8} mbar•l/s erreicht (Heliumlecktest bei 3 bar) Zwischen der inneren und äußeren Dichtung ist der Anschluss zur Leckageüberwachung angebracht.

5.7.2.3 Vorspannsystem zum Ausgleich temperaturbedingter Dimensionsänderung von Stopfbuchsen

Der übliche Dichtungstyp beruht auf Ventilstopfbuchsen. Während prinzipiell für jede Packung, sofern sie nur fest genug gespannt wird, beim erstmaligen Prüfen der Armatur auf einem Prüfstand die geforderte Dichtheit nachgewiesen werden kann, besteht der Sinn der aufgeführten Prüfprogramme darin, die Dichtheit über eine bestimmte Lebensdauer – als Richtwert mindestens 3 Jahre – quasi unter Betriebsbedingungen zu simulieren. Durch Lastwechsel, auf die Packung übertragene Schwingungen und Druckstöße sowie Temperaturwechselbeanspruchungen kommt es generell bei jeder Packung zu Setzungserscheinungen, was in einer Volumenverringerung zum Ausdruck kommt. Der damit verbundene Abfall der Dichtpressung kann durch den Einsatz von Federpaketen ausgeglichen werden. Ein solches Vorspannsystem ist in **Abbildung 5.7.2.3.1** dargestellt.¹⁾

¹⁾ Fortsyth, I.: 10 Jahre Erfahrung mit Ventil Live Loading und dem Einfluß auf die Verringerung von flüchtigen Emissionen. VDI-Berichte 1440, Düsseldorf, 1998

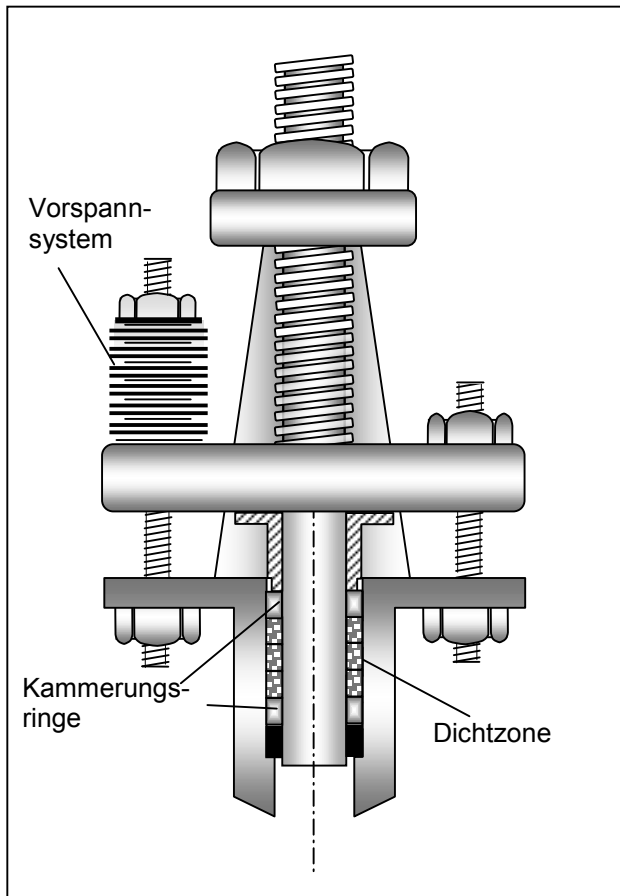


Abbildung 5.7.2.3.1: Ventil mit Vorspannsystem

Die Packung einer nach TA-Luft zertifizierten Armatur besteht zwingend aus einer Dichtzone und aus einer vor- und nachgeschalteten Kammerung. Wenn auf die Kammerung verzichtet wird, neigt die Packung zur Spaltextrusion und verringert dadurch und durch einen uneingeschränkten Spindelaustrag relativ schnell ihr Volumen, so dass die Mindestdichtpressung nicht mehr gegeben ist. Sofern es sich bei der Dichtzone um Graphit handelt, sollte die Reinheit über 99,8 % betragen. Die Verunreinigungen im Graphit sind im Allgemeinen Fluoride und Chloride, die die interkristalline Korrosion an der Spindel beschleunigen. Als Kammerungsring hat sich ein mehrlagig metallverstärkter Stopfbuchtring bewährt, der in einem Werkzeug vorgepresst ist.

Mit zunehmender Vorspannkraft steigt die Ventilschaftreibung, die wiederum die notwendige Stellgliedkräfte und die Regelgenauigkeit beeinflusst. Es muss ein Kompromiss zwischen der Leckage und dem Regelverhalten (Blockierverhalten) eines Ventils gefunden werden. Das Fressen des Ventilschafts und durch einge-

schlossene Partikel bedingte Riefenbildung müssen weitgehend ausgeschlossen werden. Zur Beurteilung der Leistung einer Ventildichtungspackung müssen sowohl die Leckagewerte als auch das Reibungsverhalten betrachtet werden. Gealterte Ventilstopfbuchsen weisen Oberflächen mit Kratzern und Grübchen auf, die schwieriger als glatte Oberflächen abgedichtet werden können.

Die an einem Federelement anliegenden Temperaturen sollten 50 – 100 °C unterhalb der zulässigen Temperaturen liegen, weil auch schon im Bereich der zulässigen Temperaturen temperaturabhängige Setzungserscheinungen der Federelemente auftreten. Damit kommt der Auswahl der Federwerkstoffe eine funktionsbestimmende Bedeutung zu. Der gewählte Federweg sollte bei ca. 75 % der Planlage der Feder liegen, um Setzungserscheinungen durch Überlastung zu vermeiden. **Tabelle 5.7.2.3.1** gibt eine Übersicht über eine Auswahl von Federwerkstoffen, mit denen sämtliche Anwendungsfälle realisiert werden können.

Tabelle 5.7.2.3.1: Zulässige Einsatzbereiche befederter Dichtsysteme

Werkstoff	WSt.-Nummer	Temperaturbereich in °C	Anwendung
50CrV4	1.8159 DIN 17222	- 50 bis + 200	Standardbefederung außerhalb von Isolierungen und für nicht umhauste Federsäulen
X12CrNi17 X35CrMo17	1.4310 DIN 17224 1.4122 SEW 400	-200 bis +200 - 50 bis +400	preiswerte Chemie- und Tieftemperaturvariante sowie für umhauste Federsäulen
X22CrMoV12.1	1.4923 DIN 17240	-50 bis +500	preiswerte Variante für Hochtemperatureinsatz
Inconel X750	2.4669	-200 bis +600	Hochtemperatureinsatz
Nimonic 90	2.4632	-200 bis +700	für extremen Hochtemperatureinsatz (z.B. Turbinen)

5.7.3 Fassung von Emissionen

Die Fassung von Emissionen aus Ventilen ist wegen der meist großen Zahl nicht möglich und auch wenig sinnvoll. Die Zahl der Sicherheitsventile, die einen beachtlichen Teil der diffusen Emissionen ausmachen können, ist jedoch i. d. R. überschaubar (vgl. Kapitel 5.3), so dass ein Anschluss an ein Gasfassungssystem möglich sein sollte. In der Praxis sind solche Systeme insbesondere dort installiert, wo mit hohen Drücken gearbeitet wird, wie z. B. bei der Harnstoffsynthese.

In zahlreichen neueren Anlagen der chemischen Industrie wird mittlerweile die Abluft aus Sicherheitsventilen gefasst und kontrolliert abgeleitet. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn es im Ventil aufgrund des Entspannungsvorgangs und der damit verbundenen Temperaturabsenkung zu Auskristallisierungen kommt. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass das Sicherheitsventil nach der Druckentspannung nicht mehr vollständig schließt, so dass die Leckagerate dauerhaft ansteigt.

Die Fassung von Emissionen aus Sicherheitsventilen bedeutet letztlich, dass diese Emissionen nicht mehr den diffusen Quellen zugeordnet wird, sondern die Abluft entsprechend den Anforderungen der TA-Luft, z. B. in einem Fackelsystem, zu behandeln ist.

5.7.4 Stand der Technik von Ventilkonstruktionen

Nach Auskunft von verschiedenen Ventilherstellern ist die Einhaltung der Anforderungen gemäß der TA-Luft bzw. der VDI-Richtlinie 2440 mit Stopfbuchspackungen problemlos möglich. Die geforderten spezifischen Leckageraten werden in den meisten Fällen sogar um eine Zehnerpotenz unterschritten. Bei besonders kritischen Stoffen werden doppelte Dichtungssysteme mit kontinuierlicher Leckageüberwachung schon heute eingesetzt. Es ist zu überlegen, ob beim Umgang mit gefährlichen Stoffen derartige Dichtungssysteme mit Leckageüberwachung grundsätzlich vorgeschrieben werden sollten.

Besondere Anforderungen werden insbesondere im Bereich der Mineralölwirtschaft sowie in der Petrochemie an die Sicherheit von Ventilen gestellt. So müssen diese

Armaturen den Fire-Safe-Bestimmungen nach API 607 (1985) sowie BS 6755, Teil 2 (1987) entsprechen. Dies bedeutet, dass die Armaturen bei einem Störfall (Brandfall) noch eine entsprechende Dichtheit im Durchgang aufweisen müssen. Wird im Brandfall durch starke Hitzeentwicklung das eigentliche Dichtungsmaterial zerstört, übernimmt ein eingelegter Metallring die Dichtfunktion. Er sorgt dafür, dass unter diesen Bedingungen eine ausreichende Dichtung aufrecht erhalten bleibt.¹⁾

Stand der Technik ist es, in neueren Anlagen Emissionen aus Sicherheitsventilen in einem Entsorgungssystem abzuleiten. Hierzu gibt es Vorschriften in der TRB 600. Es erscheint sinnvoll, diese Vorgehensweise der chemischen Industrie vom Gesetzgeber aufzugreifen und zu regeln. Dabei sollten angemessene Übergangsfristen für Altanlagen berücksichtigt werden.

5.8 Rührwerke

5.8.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Direkte Anforderungen für die Dichtungssysteme an Rührwerken stellt die TA-Luft nicht. Die Konstruktion der oft modular aufgebauten Rührwerksdichtungen orientiert sich in ihren Abmessungen und Anwendungsfenstern sowohl für Stahlbehälter als auch für emaillierte Behälter bevorzugt an den in **Tabelle 5.8.1.1** zusammengefassten Normen:

Tabelle 5.8.1.1: Normen zur Konstruktion von Rührwerksdichtungen

Rührbehälter	DIN 28 136
Rührwerksflansche	DIN 28 137
Montageflansche	DIN 28 141
Gleitringdichtungen für Rührerwellen	DIN 28 138
Wellenende für Rührer aus unlegiertem und nichtrostendem Stahl	DIN 28 154
Wellenende für Rührer, Stahl emailliert	DIN 28 159

¹⁾ Oppinger, P.: Absperrklappen für den Einsatz in der chemischen Industrie. Industriearmaturen 1995

5.8.2 Konstruktion von Rührwerksdichtungen

Viele Rührwerksdichtungen sind noch heute modifizierte Pumpendichtungen. Das Problem dieser Dichtungssysteme liegt darin, dass die Wellenauslenkung der Rührwerke wesentlich höher ist als die von Pumpen. Daher ist die Dichtheit dieser Systeme bei Rührwerkswellen beschränkt. Die z. T. hohen Anforderungen spezieller Produktionsbereiche in der chemischen, pharmazeutischen und Lebensmittelindustrie werden damit nicht erfüllt. Die strengen Anforderungen resultieren meist aus der Forderung einer hohen Produktreinheit sowie bei biologischen Prozessen aus der Notwendigkeit steriler Produktionsbedingungen. Gerade bei den letztgenannten Prozessen führen schon die geringsten Verunreinigungen zu Fehlchargen. Daher werden Rührwerksdichtungen bevorzugt als flüssigkeitsgesperzte Doppeldichtungen ausgeführt, wie sie exemplarisch in **Abbildung 5.8.2.1** dargestellt ist.

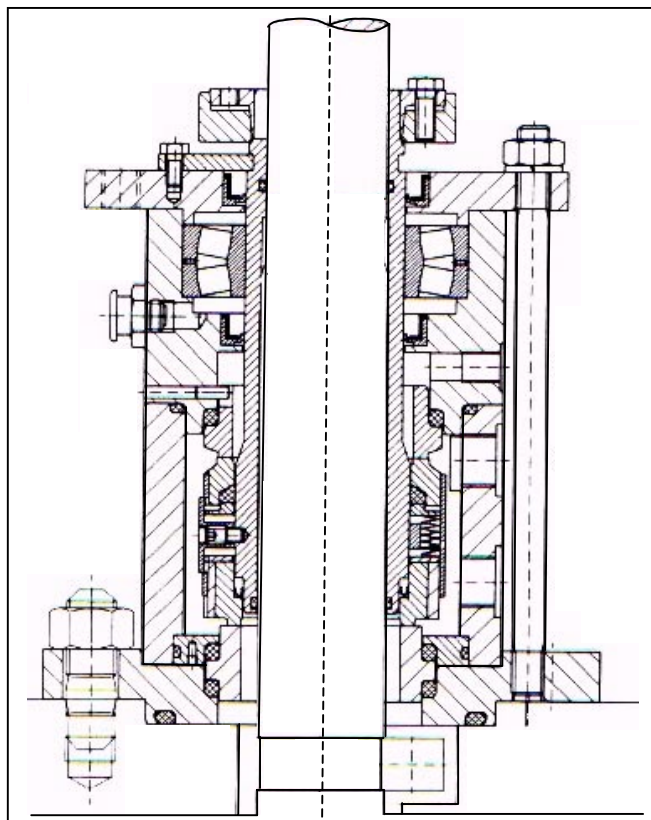


Abbildung 5.8.2.1: Flüssigkeitsgesperzte Rührwerksdichtung

Die überwiegend eingesetzten flüssigkeitsgesperrten Rührwerks-Doppelgleitringdichtungen arbeiten mit einer hohen Betriebssicherheit. Es besteht bisweilen jedoch die Gefahr, dass Leckverluste der Sperrflüssigkeit die Produktqualität negativ beeinflussen können. Dies bedeutet, dass Leckverluste nicht von Innen nach Außen und damit in die Umwelt gelangen, sondern Sperrflüssigkeit von Außen in das Produkt gelangt. Daher kommen seit einigen Jahren neben diesen flüssigkeitsgesperrten Dichtungen auch sogenannte gasgesperrte, trocken laufende Doppel-Rührwerksdichtungen zum Einsatz. In **Abbildung 5.8.2.2** ist das Zirkulationssystem eines flüssigkeitsgesperrten Wellenabdichtungssystems dargestellt:

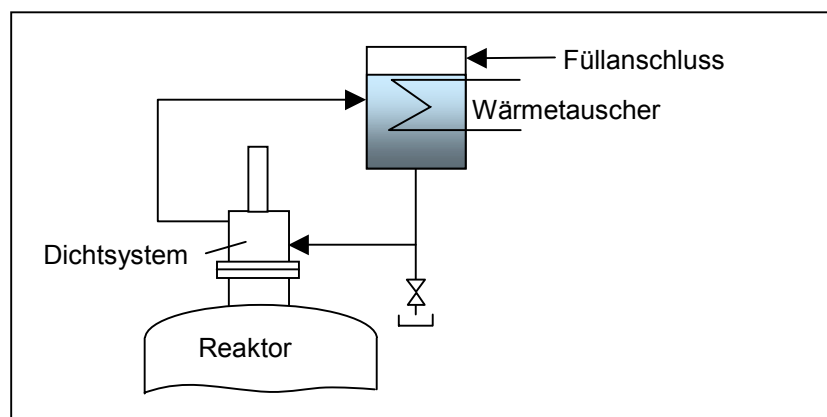


Abbildung 5.8.2.2: Druckloses System zur Zirkulation der Sperrflüssigkeit

Die Sperrflüssigkeiten sollen sauber, feststofffrei, dünnflüssig, produktverträglich und temperaturstabil sein sowie auf Gleitringdichtungen nicht korrosiv wirken. Als Sperrmedium werden überwiegend Öle und Wasser verwendet.

5.8.3 Stand der Technik von Rührwerksdichtungen

Obwohl keine direkten Anforderungen, ähnlich denen für Pumpen oder Ventilen in der TA-Luft formuliert sind, werden in zahlreichen Fällen hochwertige Dichtungssysteme wegen der Forderung nach Produktreinheit bzw. sterilen Betriebsbedingungen eingesetzt. Hierbei erfüllen sowohl flüssigkeitsgesperrte als auch gasgesperrte Rührwerksdichtungen die Anforderungen der völligen Emissionsfreiheit. Unter dem Gesichtspunkt der Verringerung und Vermeidung von VOC-Emissionen erscheinen Hinweise, z. B. in der TA-Luft oder in anderen Regelwerken, auf die Kon-

struktion von Rührwerksdichtsystemen durchaus sinnvoll. Bevorzugt sollten flüssigkeits- oder gasgesperrte Doppeldichtungssysteme eingesetzt werden.

5.9 Kompressoren

Für Kompressoren gilt im Grunde die gleiche Problematik wie für Pumpen. Leckageraten von großen Kompressoren können unter Umständen sehr bedeutsam sein. Zusätzlich zu den Lösungen des Emissionsproblems bei Pumpen gibt es für Kompressoren eine weitere Möglichkeit. In einigen Fällen ist es möglich, die Emissionen eines Kompressors aufzufangen und diese einem System mit geringerem Druck oder einem Fackelsystem zuzuführen.

5.10 Entleerungsstellen

Die sogenannten „Open End Lines“ (OELs) sind die Entleerungsstellen von Behältern, Rohrleitungen und anderen Ausrüstungsteilen der Anlage. Ihnen ist ein Ventil vorgeschaltet, welches normalerweise geschlossen ist. Wenn diese Ventile nicht kontrolliert werden, können sie im Einzelfall hohe Emissionen verursachen. Es ist Stand der Technik, dass die Ventile, die nicht für den Arbeitsprozess verwendet werden, mit einer Kappe, einem Endflansch oder einem Stöpsel versehen werden. Sind diese aber für den Arbeitsprozess nötig, sollten sie mit zwei hintereinander ausgeführten Absperrventilen ausgerüstet sein.

5.11 Probenahmestellen

Emissionen an Probenahmestellen fallen nur sporadisch an. Sie sind von besonderer Relevanz für den Arbeitsschutz, insbesondere in geschlossenen Räumen. Probenahmestellen sollten so weit wie möglich mit Rückführsystemen für den Vorlauf ausgerüstet sein. Eine direkte Rückführung des Vorlaufs in den Prozess sollte überall dort vorgesehen werden, wo die Druckverhältnisse dies zulassen.¹⁾

¹⁾ VDI-Richtlinie 2440, Nov. 2000

5.12 Gebäude

5.12.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Wie in Kapitel 2 schon angedeutet wurde, zählen nach der 31. BImSchV auch Emissionen flüchtiger, organischer Verbindungen aus Gebäuden zu den diffusen Emissionen. Die TA-Luft nennt die Emissionen aus Gebäuden nicht direkt, sondern begrenzt die Emissionen bestimmter Stoffklassen unabhängig von deren Herkunft.

5.12.2 Untersuchungen über Abluftemissionen aus Gebäuden

In der Literatur sowie in den aktuellen Diskussionen über diffuse Emissionen wird die Gebäudeabluft bislang kaum berücksichtigt. Um die Relevanz dieser Abluft zu überprüfen, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Untersuchungen in zwei Produktionsbetrieben durchgeführt, die beide Polyester erzeugen und in ihrer jeweiligen Produktionsweise sehr ähnlich sind.

Die Produktionsanlagen sind in beiden Fällen über mehrere Etagen in ihrem jeweiligen Gebäude untergebracht. Die Produkte werden chargenweise innerhalb einer Betriebszeit hergestellt, die vom Befüllen der Behälter mit den Rohstoffen (Chargierung) über die Reaktion(en) bis zum Austrag/Abfüllen des Produktes (Sack- oder Faßabfüllung) reicht. Dazwischen liegen die Reinigung und Wartung sowie der Stillstand der Anlage. Da sich dieser Zyklus immer wiederholt, treten diffuse Emissionen aus Behältern, Flanschen, Ventilen usw. quasi periodisch auf.

Der für die Untersuchungen entscheidende Unterschied zwischen den beiden Betrieben bestand darin, dass im Gebäude 1 Granulat, also ein Festprodukt, hergestellt, im Gebäude 2 jedoch ein flüssiges Produkt synthetisiert wird. Zur Produktion des Flüssigproduktes ist im Gegensatz zum Granulat der Einsatz von organischen Lösemitteln erforderlich.

Für die Messungen wurden nicht die Einzelarmaturen untersucht, sondern die Emissionsmassenströme aus der Summe aller Quellen während eines Herstellungszyklusses. Dazu wurde in den zwei Gebäuden, in denen sich die Produktionsanlagen befanden, durch die Ventilatoren gezielt ein Unterdruck erzeugt, der es gestattete, die diffusen Emissionen weitgehend zu erfassen (**Abbildung 5.12.2.1** und **5.12.2.2**). Die Bestimmung der Emissionsmassenströme erfolgte durch Messung der Kohlenwasserstoffe (Bernath Atomic FID 3005/3006, kalibriert mit Propan) und der Volumenströme (Staurohr, Flügelradanemometer).

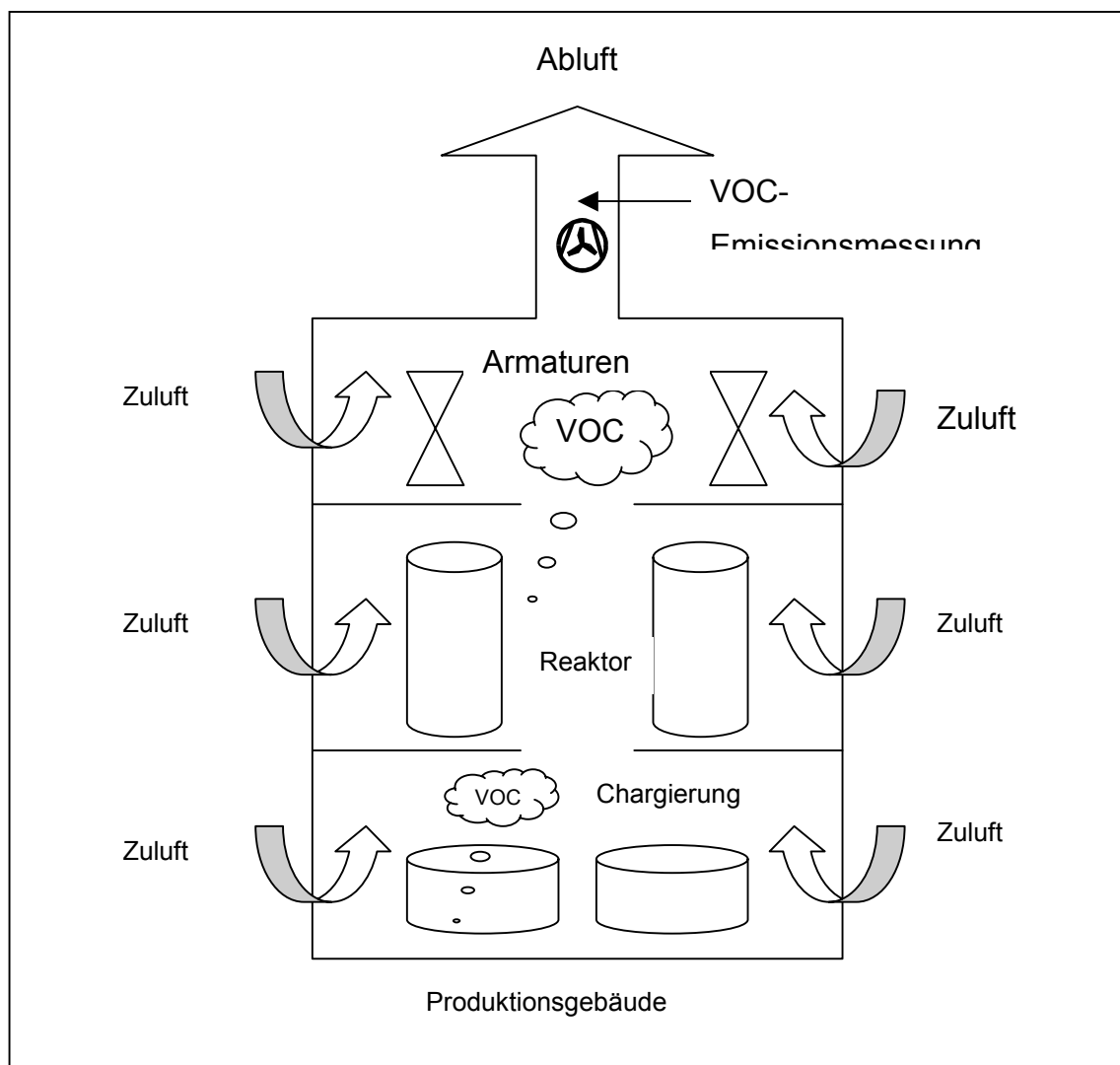


Abbildung 5.12.2.1: Summarische Erfassung der diffusen Emissionen aus einem chemischen Produktionsgebäude mit diskontinuierlicher Fahrweise

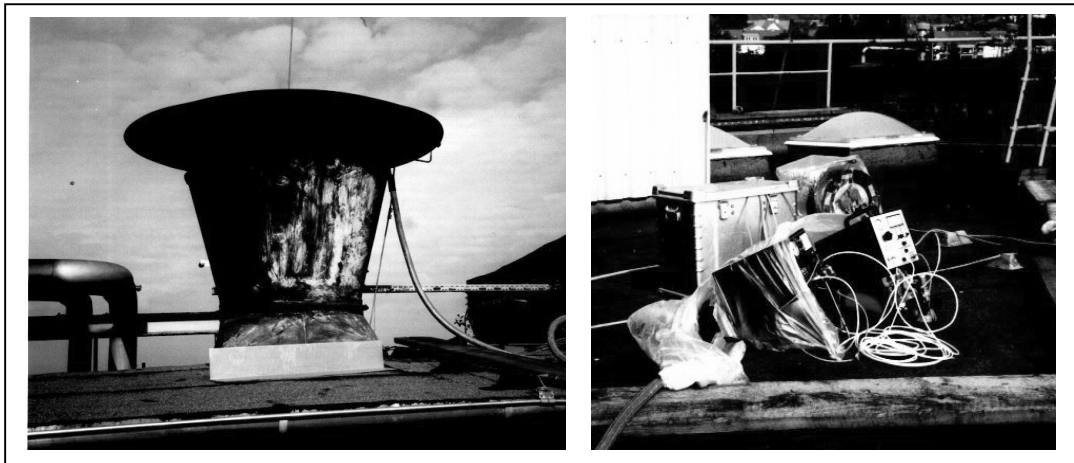


Abbildung 5.12.2.2.: Abluftmessungen an einem Abluftventilator

5.12.2.1 Messergebnisse bei der Herstellung von festem Polyester

Es wurden 8.000 kg eines festen Polyestergranulates während der Untersuchungen hergestellt. Der Produktzyklus lief über mehrere Produktionsstufen (Auskochen, Befüllen, Reaktion und Schmelzeaustrag) über 16 Stunden ab. Der zeitliche Verlauf der Kohlenstoff-Konzentration in der Abluft des Gebäudes 1 ist in **Abbildung 5.12.2.1.1** dargestellt. Wie zu erkennen ist, treten in diesem Beispiel zwischen 19:00 und 22:00 Uhr mehrere Peaks auf. Sie stammen von einer Produktumfüllung einer vorangegangenen Charge von einem in einen anderen Behälter sowie vom Austrag des heißen Produktes. Danach treten insgesamt nur unbedeutende Belastungen der Abluft auf.

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, lassen sich mit den derartigen Messungen genau die Auswirkungen der einzelnen Produktionsschritte nachvollziehen. Jeder Peak weist auf einen bestimmten Betriebspunkt der Anlage hin, der zusammen mit den Aufzeichnungen im Betriebstagebuch ein recht genaues Bild der Produktion ergibt.

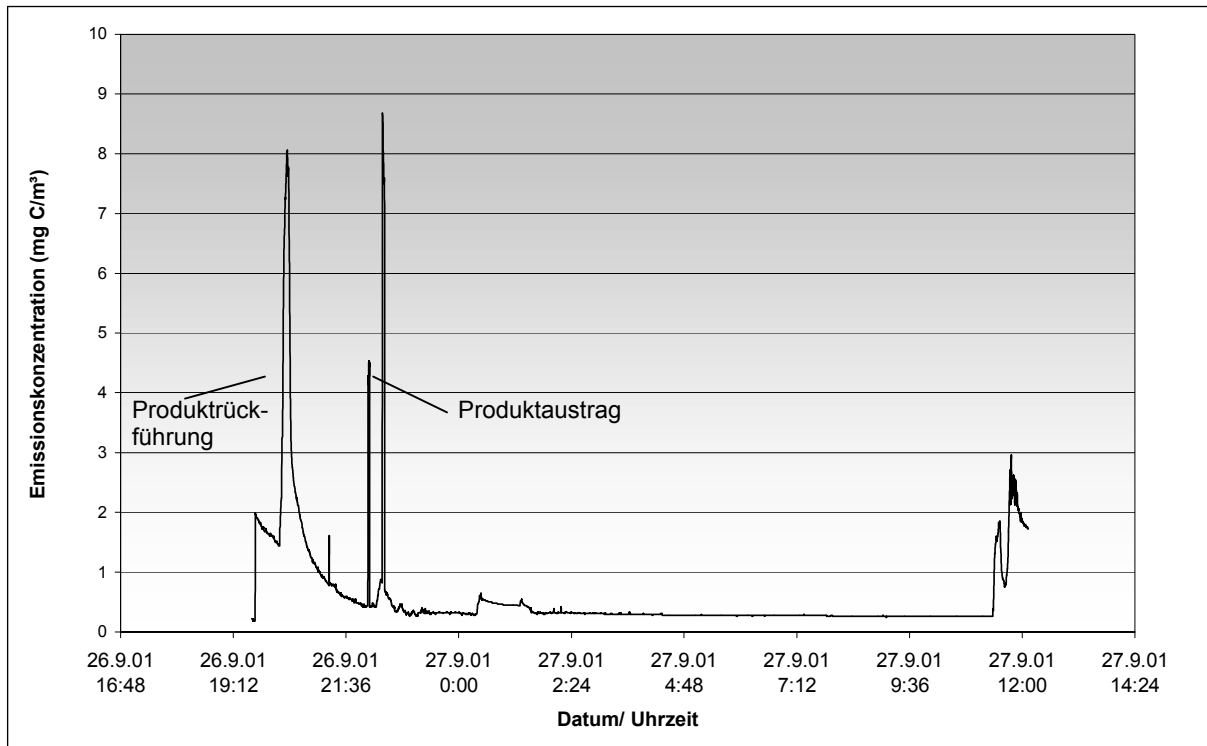


Abbildung 5.12.2.1.1: Abluftkonzentrationen in einem Betrieb zur Herstellung von PE-Granulat

Insgesamt befanden sich die gemessenen Konzentration in der Abluft des Produktionsgebäudes in der Nähe der Hintergrundkonzentration am Standort, lediglich Spitzenwerte erreichten 9 mg C/m^3 . Die Zeit der Messung erstreckte sich über 16,5 h. Während dieser Zeit gelangten insgesamt ca. 10 g C/h in die Atmosphäre. Dieser Massenstrom liegt weit unterhalb der Emissionsbegrenzungen der TA Luft. In Nr. 3.1.7 der TA Luft (1986) beginnen Emissionsbegrenzungen für organische Stoffe oberhalb der Massenstromgrenzen für Stoffe der Klasse I bei $0,1 \text{ kg/h}$, für Stoffe der Klasse II bei 2 kg/h und für Stoffe der Klasse III bei 3 kg/h . Im Kabinettsbeschluss für die Fortschreibung der TA Luft ist in Nr. 5.2.5 die Obergrenze für den Massenstrom organischer Stoffe auf $0,5 \text{ kg/h}$ gesenkt worden (Stoffe der Klasse I: $0,1 \text{ kg/h}$). Aus der zeitlichen Auflösung ergaben sich die höchsten Emissionen beim Produktaustrag ($\max. 9 \text{ mg C/m}^3$). Die VOC-Emissionen resultieren aus den Stoffen, die als Nebenprodukte, wie z. B. Methanol, bei der Reaktion entstehen. Unter den eingesetzten Rohstoffen befinden sich keine VOC.

Bezogen auf einen kompletten Produktionszyklus von der Chargierung bis zur Produktabfüllung (ohne der Rohstofflagerung in Tanks) resultierten ca. 170 g C in Form diffuser Emissionen. Die Hintergrundbelastung der Zuluft betrug 5,6 g C/h bzw. 92 g C. Dies bedeutet, dass 54 % der gemessenen VOC-Emissionen sich bereits in der Zuluft zum Gebäude befanden. Die Netto-Emission von ca. 80 g C liegt in einer Größenordnung von nur 0,001% der im Prozess erzeugten Produktmenge.

5.12.2.2 Messergebnisse bei der Herstellung von flüssigem Polyester

Die zweite Bilanzierung wurde bei der Produktion von flüssigem Polyester durchgeführt. Das Verfahrensschema des Herstellungsprozesses ist in **Abbildung 5.12.2.2.1** dargestellt.

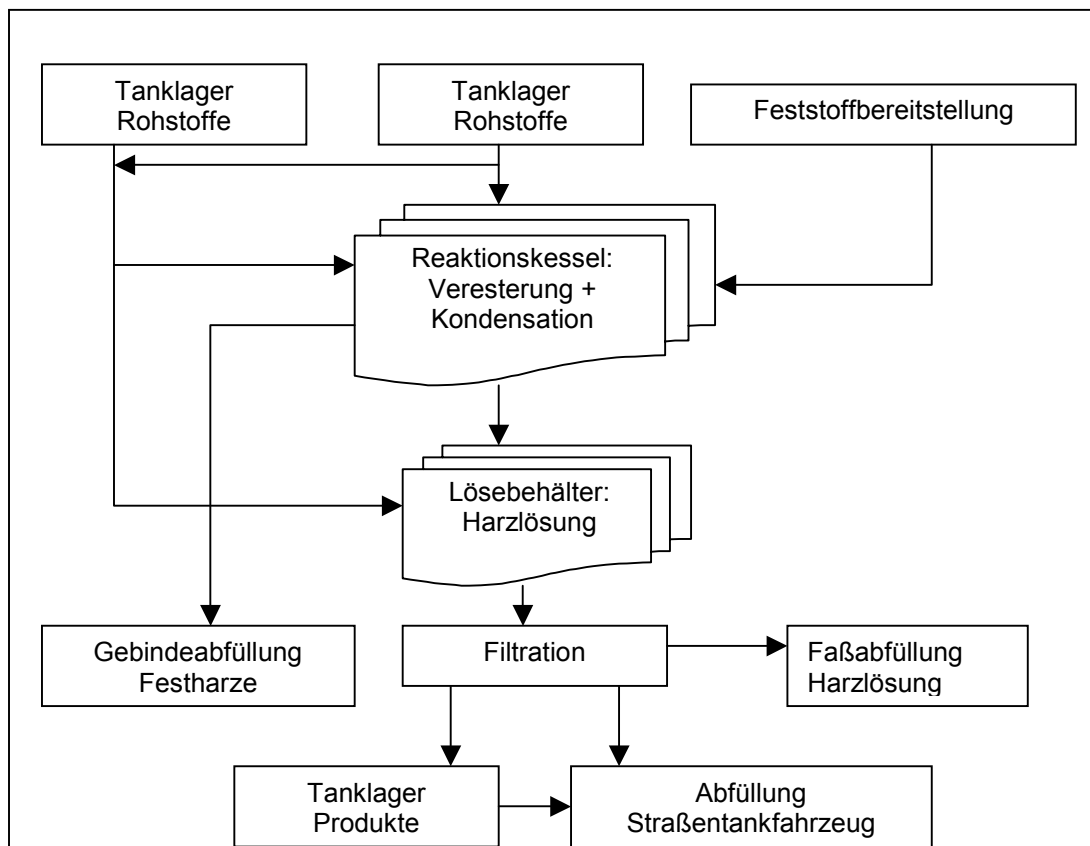


Abbildung 5.12.2.2.1: Herstellungsschema für flüssiges Polyester

Während der Messungen wurden zwei verschiedene Produkte hergestellt, deren Menge und Zusammensetzung wie folgt lautete:

Produktmenge 6.800 kg: 60% Festharz, 40% Lösungsmittel 1

Produktmenge 6.400 kg: 70% Festharz, 30% Lösungsmittel 2

Die Lösungsmittel 1 und 2 bestehen zu 40 % bzw. 90 % aus Alkylaromaten. Sie werden daher in die Klasse II nach Nr. 3.1.7 TA Luft eingestuft. Demnach gilt die Emissionsbegrenzung nach Nr. 3.1.7 der TA Luft für organische Stoffe der Klasse II, d.h. eine Massenkonzentration von 100 mg/m^3 darf bei einem Massenstrom von $\geq 2 \text{ kg/h}$ nicht überschritten werden. Im Kabinettsbeschluss für die Fortschreibung der TA Luft (Stand: 12.12.2001) ist in Nr. 5.2.5 die Obergrenze für den Massenstrom organischer Stoffe auf $0,5 \text{ kg/h}$ gesenkt worden. Beide Begrenzungen liegen ebenfalls weit oberhalb der tatsächlich emittierten Emissionsfrachten, wie folgende Messung (**Abbildung 5.12.2.2.2**). exemplarisch belegt.

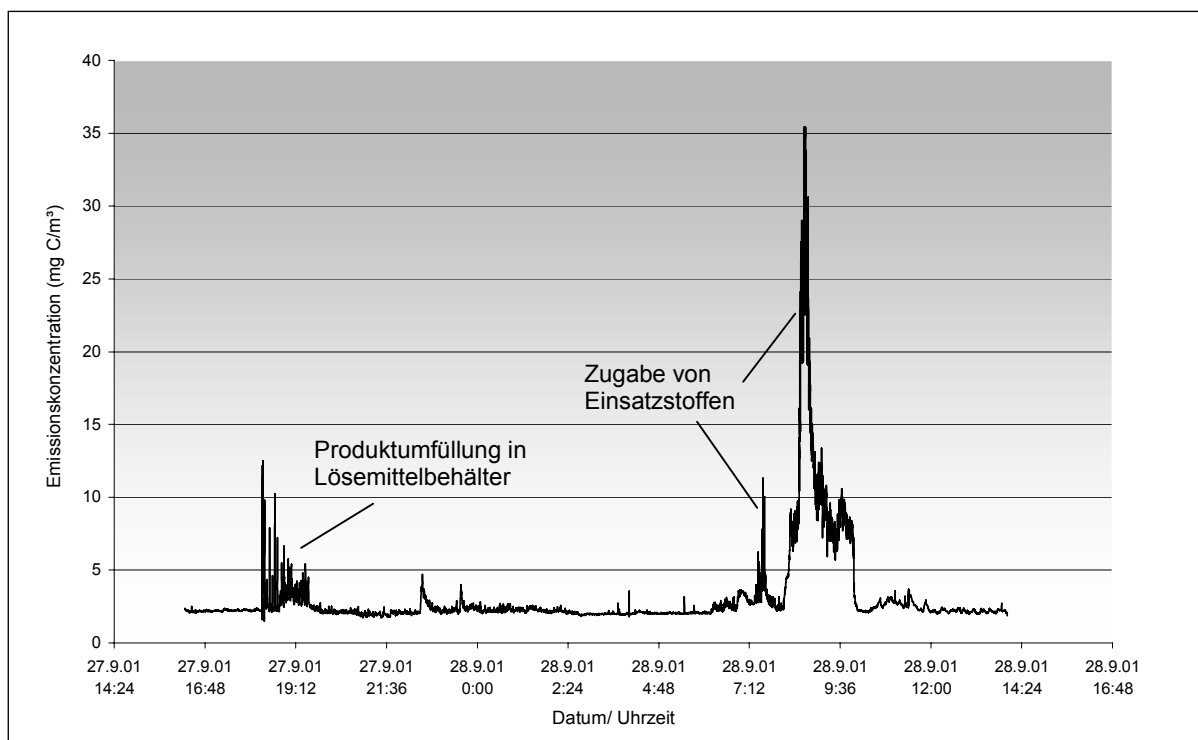


Abbildung 5.12.2.2.2: Abluftkonzentrationen in einem Betrieb zur Herstellung von flüssigem Polyester

Die Emissionsmessungen zeigen einen ähnlichen Verlauf wie im Beispiel 1, sind jedoch in ihrem Ergebnis etwa um den Faktor 5 größer. Ursache für den Peak am 27.09.01 in der Zeit von 18:00 – 19:30 Uhr ist das Umfüllen eines Produktes in den Rückführtrichter eines Behälters, in dem Lösemittel vorgelegt war. Der größere Peak am 28.09 zwischen 7:30 und 9:30 ist durch die Zugabe von festen Einsatzstoffen entstanden. In beiden Fällen werden die Deckel des jeweiligen Reaktors geöffnet und die Verbindungen eingefüllt. In diesem Augenblick entweichen bei den hohen Reaktionstemperaturen leichtflüchtige Komponenten, wozu auch das eingesetzte Lösungsmittel zählt. Eine Chargierungsstation, wie z.B. eine Zellradschleuse, für die festen Stoffe ist nicht vorhanden.

Auffällig am Emissionsverlauf ist bereits die deutlich erhöhte Hintergrundbelastung, die sich auch beim Betreten des Gebäudes in Form von Geruch wahrnehmen ließ. Der Luftwechsel lag bei etwa 11 h^{-1} .

Über den Messzeitraum von 21,75 Stunden wurden insgesamt 1,2 kg C emittiert. Daraus resultierte ein Emissionsmassenstrom von durchschnittlich 57 g C/h. Die Spitzenwerte führten zu Halbstundenmittelwerten von ca. 300 g C/h. Die Summe diffuser Emissionen lagen bezogen auf die Produktmengen bei 0,01 %. Ausgenommen bei dieser Bilanz sind die Emissionen aus dem Tanklager und die Emissionen bei der Fassabfüllung.

5.12.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus den Untersuchungsergebnissen

Die Ergebnisse der Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Emissionen zur Herstellung von festem Polyester ohne Einsatz von Lösungsmittel betrug nur 0,001% der im Prozess erzeugten Produktmenge.
2. Die Emissionen zur Herstellung von flüssigem Polyester mit Einsatz von Lösungsmittel betrug 0,01% der im Prozess erzeugten Produktmenge und

sind somit um eine Zehnerpotenz höher als die Emissionen ohne Lösungsmiteleinsatz.

3. Mit Hilfe der Abluftmessungen sowie des Betriebstagesbuches lassen sich genaue Rückschlüsse auf die Betriebsweisen und Ursachen von Emissionen ziehen.

Im konkreten Fall wurde durch die Messungen erkannt, dass in einem Behälter, in dem zuvor pulverförmige Einsatzstoffe mit Lösungsmittel gelöst wurden, nach dem Entleeren immer noch flüchtige Komponenten verbleiben. Wird der Behälter für die neue Charge geöffnet, um erneut pulverförmige Einsatzstoffe zu lösen, entweicht ein Teil der gasförmigen Stoffe in die Atmosphäre, was durch die Messungen nachgewiesen wurde. Vom Unternehmen wurden daher für die Dosierung von pulverförmigen Einsatzstoffen weitgehend geschlossene Chargiersysteme mit einer Zellradschleuse eingerichtet. Seitdem wurden die VOC-Emissionen erheblich vermindert.

4. Die dargestellte Untersuchungsmethodik ist einfach und zeigt einen Weg, mit dem die tatsächlichen Emissionen aus diffusen Quellen für Produktionsanlagen in Gebäuden gemessen werden können. Es handelt sich hierbei um eine Messung der Gesamtemissionen und nicht um eine Hochrechnung bzw. Abschätzung, wie dies bei den Methoden der EPA sowie des VDI der Fall ist. Diese Tatsache wird im Kapitel 8, in dem die verschiedenen Methoden der EPA sowie des VDI zur Ermittlung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen dargestellt und bewertet werden, wieder aufgegriffen. Es sei an dieser Stelle schon vorweggenommen, dass für eingebaute Anlagen die vorgestellten Messungen der Gebäudeabluft eine Alternative zu den vergleichsweise aufwendigen Abschätzungsmethoden darstellen.

6 Montage von lösbaren Verbindungen

Messungen in Praxisanlagen haben gezeigt, dass verschiedene Aggregate überdurchschnittliche Leckageraten aufweisen, obwohl mit der Bauart der Dichtungen und mit dem verwendeten Material ein wesentlich besseres Emissionsverhalten erreicht werden müsste. Eine immer wieder genannte Ursache ist die fehlerhafte Montage der lösbaren Verbindungen. Es liegen verschiedene Berichte vor, in denen die Folgen einer fehlerhaften Montage beschrieben werden.

6.1 Grundelemente einer ordnungsgemäßen Montage

Damit eine Dichtung den vorgesehenen Zweck erfüllt, ist die korrekte Montage der Dichtverbindung von wesentlicher Bedeutung. Neben dem Zustand aller beteiligten Komponenten, wie z. B. Oberflächengüte, Härte, Gleitfähigkeit der Oberflächen, Verwendung von geeichten Werkzeugen, Zugänglichkeit von Schrauben und Umgebungsbedingungen, hängt eine korrekte Montage von mehreren Variablen ab, die nachfolgend kurz angesprochen werden. Hierbei hat sich vor allem eine gewisse Beständigkeit von Vorteil erwiesen, d. h. bisherige Vorgehensweisen, die sich in der Praxis bewährt haben, sollten nicht geändert, sondern beibehalten werden.

Montagewerkzeug

Die zum Anziehen benötigten Werkzeuge, wie z. B. Drehmomentschlüssel, hydraulisch betriebene oder andere Spannwerkzeuge, müssen regelmäßig geeicht werden. Zur Messung der Anzugsbedingungen werden u. a. Mikrometerschrauben oder Ultraschallmessgeräte eingesetzt. Sofern möglich, ist der Einsatz der gleichen Werkzeuge in der gleichen Art und Weise sinnvoll.

Reinigung

Um eine gute Dichtfunktion zu gewährleisten, müssen alle kraftübertragenden Oberflächen gesäubert werden. Dies ist vor allem bei der Ersatzmontage zu beachten, da nach dem Entfernen der alten Dichtung die Dichtflächen des Flansches häufig mit

den Resten der alten Dichtung verunreinigt sind. Zur Reinigung der Oberflächen der Flanschverbindung eignen sich z. B. Drahtbürsten mit Edelstahlborsten oder Messingschaber.

Sichtprüfung

Anhand einer Sichtprüfung ist sicherzustellen, dass alle belasteten Oberflächen im wesentlichen unbeschädigt sind, da selbst die perfektteste Dichtung einen beschädigten oder verzogenen Flansch nicht abdichten kann. Die Flanschoberflächen sind auf Schäden, wie z. B. radialen Riefen und Verzug, zu überprüfen. Des weiteren müssen sie ausreichend eben und parallel zueinander ausgerichtet sein. Die Verbindungselemente, Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben dürfen keine Schäden, wie Grate oder Risse, aufweisen. Fehlerhafte Teile sind durch fehlerfreie zu ersetzen.

Schmierung

Ohne geeignetes Schmiermittel werden allein bis zu 50 % des Anzugmomentes für das Überwinden der Reibung aufgewendet. Dies bedeutet, dass im Falle ungeschmierter Schrauben dasselbe aufgewendete Anzugsmoment zu sehr unterschiedlichen Belastungen bei jeder einzelnen Schraube führen kann. Daher ist eine Schmierung immer dann erforderlich, wenn das Anzugsmoment der Schrauben als Kontrolle zur Dichtungsbelastung verwendet wird. Bei der Auswahl des Schmiermittels sind dessen Schmierfähigkeit, Verträglichkeit sowie mögliche Einsatztemperatur zu berücksichtigen.

Anziehen der Schrauben

Eine wesentliche Bedeutung bei der Montage kommt der Einbaupressung der Dichtung zu. Diese muss niedrig genug sein, um die Dichtung nicht zu beschädigen und hoch genug, um eine Leckage in der Dichtung zu vermeiden. Die Kräfte, die auf den Flansch einwirken, sind präzise zu kontrollieren, was den Einsatz von geeichten Werkzeugen (z. B. Drehmomentschlüssel) erfordert. Die Reihenfolge, mit der die Schraubenbolzen oder Schrauben angezogen werden, hat einen wesentlichen Ein-

fluss auf die Kraftverteilung, die auf die Dichtung wirkt. Unsachgemäßes Anziehen kann zu nicht fluchtenden Flanschen führen.

Eine zunehmende Flächenpressung bewirkt zunächst eine Abnahme der Leckage-rate.^{1) 2)} Die Abnahme des Leckstromes erfolgt tendenziell exponentiell, da eine weitere Verengung der Kapillaren von der bereits erreichten Packungsdichte abhängt. Daher ist zu erwarten, dass mit zunehmender Flächenpressung die Abnahme umso kleiner wird, je weiter der Pressvorgang fortgeschritten ist.³⁾

Abbildung 6.1.1 fasst die wesentlichen Einflüsse sowie wichtige Empfehlungen zur Gewährleistung der guten Funktion einer Dichtverbindung zusammen. Wie aus Abbildung 6.1.1 ersichtlich ist, sind in der Praxis bei den Montage- und Wartungsarbeiten von Rohrleitungs- und Anlagenanschlüssen, die auf Flansche und Dichtungen basieren, eine Reihe von möglichen Problemfelder zu beachten bzw. zu berücksichtigen. Nachfolgend werden in Form einer Checkliste die wichtigsten Empfehlungen für die Montage einer sicheren Dichtverbindung zusammengefasst:⁴⁾

¹⁾ Bierl, A.: Untersuchung der Leckraten von Gummi-Asbest-Dichtungen in Flanschverbindungen. Dissertation, Universität Bochum, 1978

²⁾ Hummelt, C.: Messung und Berechnung der Emissionen an Flanschverbindungen mit PTFE- und Graphitdichtungen. Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1999

³⁾ Tückmantel, H.J.: Die Berechnung statischer Dichtverbindungen unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Leckmenge auf der Basis einer neuen Dichtungstheorie. Konstruktion 40 (1988), S. 116-120

⁴⁾ Wegweiser für eine sichere Dichtverbindung an Flanschen - Leitfaden für Wartungspersonal, Ingenieure, Monteure. ESA / FSA – Publikation Nr. 009 / 98, Mai 2000

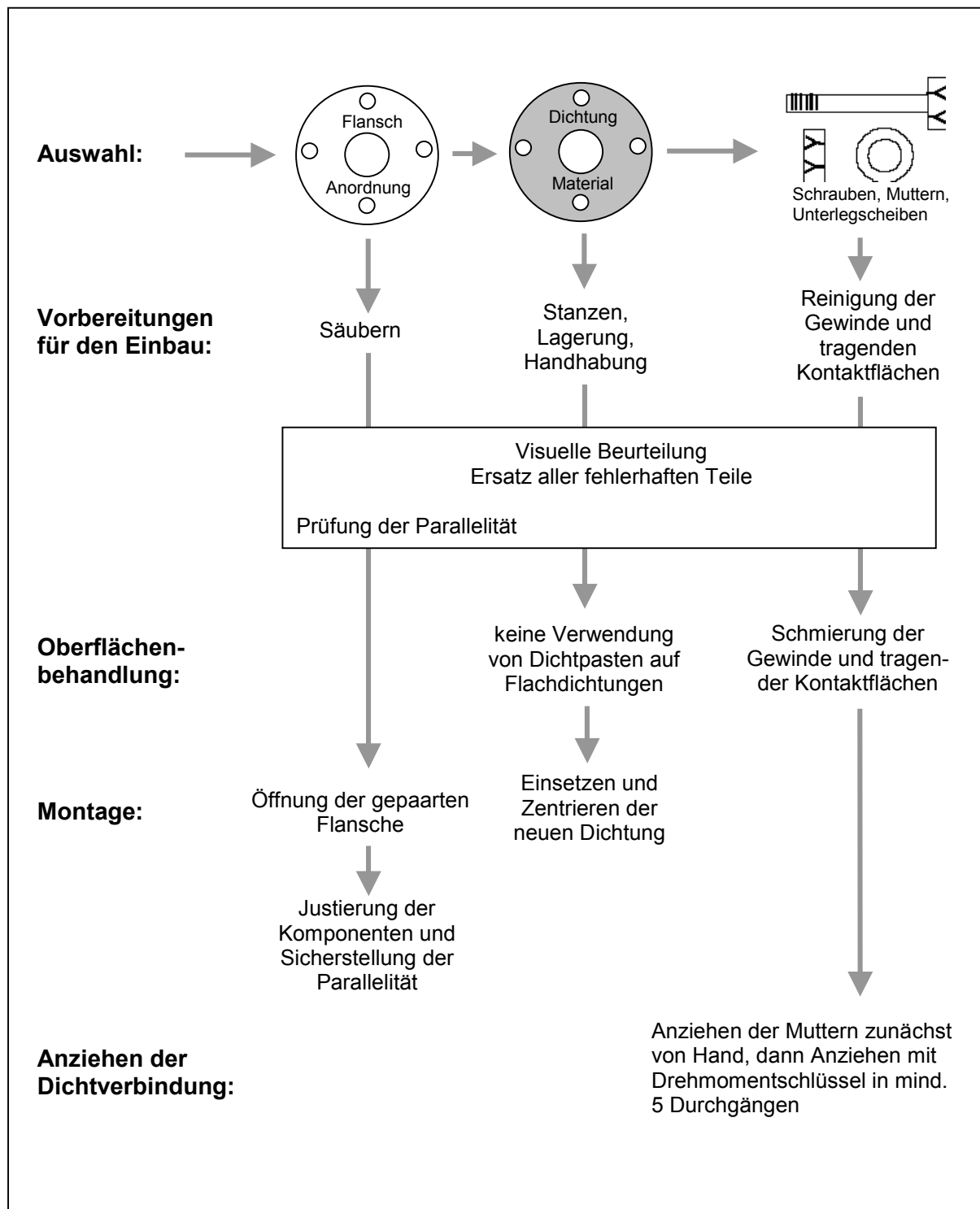


Abbildung 6.1.1: Einflüsse und Empfehlungen zur Gewährleistung der guten Funktion einer Flanschverbindung

6.1.1 Auswahl von Flanschform, Dichtungsmaterial, Schrauben, Muttern u. Unterlegscheiben

- Auswahl der richtigen Komponenten passend für die Anwendung.
- Auswahl des richtigen Dichtungsmaterials unter Berücksichtigung der Flanschoberflächenrauigkeit.
- Beachtung der richtigen Größe der Dichtung.
- Die Dichtung sollte so dünn wie möglich sein.
- Die Schraubenlöcher sollten leicht größer als der Schraubendurchmesser sein.
- Der Innendurchmesser der Dichtung sollte nicht kleiner sein als der Innendurchmesser der Rohrverbindung.
- Einsatz von Schrauben mit ausreichender Dehnfestigkeit.
- Einsatz von Schrauben mit demselben Elastizitätsmodul.
- Sicherstellen, dass keine Korrosion an den Schrauben auftreten kann.
- Schrauben nicht mehrmals verwenden.
- Einsatz von Muttern, deren zugelassene Prüflast 20 % größer ist als die Bruchfestigkeit der Schrauben.
- Grundsätzlicher Einsatz von Unterlegscheiben.
- Unterlegscheiben und Muttern sollten aus dem gleichen Material sein.

6.1.2 Vorbereitungen für den Einbau

- Lagerung der Dichtungen in kühlen und trockenen Plätzen ohne direkte Sonneneinstrahlung und abseits von Wasser, Öl und Chemikalien.
- Plattenmaterial sollte flachliegend gelagert werden.
- Dichtungen sollten nicht hängend gelagert werden. Auch Spiralringdichtungen mit großem Durchmesser sollten horizontal gelagert werden.
- Dichtungen sollten sauber gehalten werden und frei von mechanischen Beschädigungen sein (Lagerung in einem verschlossenen Plastikbeutel oder in der Verpackung).
- Dichtungen müssen sorgfältig transportiert werden, idealerweise mit Schutzhülle.
- Kein Einsatz von verbogenen, geknickten oder beschädigten Dichtungen.

- Der Transport von metallischen und semi-metallischen Dichtungen mit großem Durchmesser sollte auf ihrer Montageplatte zum Installationsort erfolgen.
- Dichtungen nicht mehrfach verwenden.
- Fehlerhafte Teile sind durch fehlerfreie auszutauschen.

6.1.3 Oberflächenbehandlung

- Schmierung der Gewinde der Schraubenelemente und aller Kontaktflächen (Unterseite der Schraubenköpfe, der Muttern, der Unterlegscheiben).
- Anwendung des Schmiermittels auf einheitliche Weise als eine dünne, gleichmäßige Oberflächenbeschichtung.
- Das Schmiermittel darf weder Flansch noch Dichtungsflächen verunreinigen.

6.1.4 Montage

- Sorgfältiger Einsatz der neuen Dichtung zwischen die beiden Flanschflächen, um eine Beschädigung der Dichtungsoberflächen zu vermeiden.
- Spiralringdichtungen mit großem Durchmesser sind mit Hilfe von Montagerahmen zu montieren.
- Zentrieren der Dichtung auf dem Flansch.
- Zur Befestigung der Dichtung auf dem Flansch ist kein Klebeband zu benutzen.
- Dichtungspasten oder Trennmittel sollten nicht eingesetzt werden.
- Alle Dichtungskomponenten sind zu justieren und auf akzeptable Passung zu untersuchen.
- Beim Zusammenziehen der Flansche ist darauf zu achten, dass die Dichtung nicht verklemmt oder auf andere Weise beschädigt wird.

6.1.5 Anziehen der Dichtverbindung

- Benutzung eines geeichten kontrollierenden Anzugswerkzeuges, wie z. B. Drehmomentschlüssel
- Anziehen der Schrauben bzw. Muttern immer in kreuzweiser Methode in mindestens fünf Durchgängen:
 1. Durchgang: Lockeres, gleichmäßiges Anziehen der Schrauben von Hand.
 2. Durchgang: Anziehen der Schrauben unter Benutzung eines Drehmomentschlüssels bis maximal 30 % des vollen Anzugmomentes und Prüfung, ob der Flansch gleichmäßig auf der Dichtung lastet.
 3. Durchgang: Anziehen bis auf maximal 60 % des vollen Anzugmomentes.
 4. Durchgang: Anziehen bis zum vollen Anzugmoment.
 5. Durchgang: Anziehen mit nochmals vollem Anzugsmoment, diesmal aber nicht in kreuzweiser Methode sondern reihum im Uhrzeigersinn.

6.2 Überprüfung der Qualität der Montage

Die Qualität der Montage von Flanschverbindungen wurde am Beispiel eines Betriebes der chemischen Industrie untersucht. Die gemessenen Leckageraten der im Betrieb montierten Flanschverbindungen sind in **Abbildung 6.2.1** dargestellt. Diesen Ergebnissen sind die unter definierten Bedingungen durchgeführten Untersuchungen im Labor gegenübergestellt, wobei es sich hier um arithmetische Mittelwerte aus mehreren Messreihen handelt. Alle im Betrieb montierte Flanschverbindungen weisen eine Leckagerate von unter 10^{-4} mbar·l/s auf und erfüllen somit die Bedingungen für hochwertige Flanschverbindungen. Die vor den Messungen durchgeführte Überprüfung der im Betrieb montierten Flanschverbindungen zeigte, dass 1 - 2 % der Schrauben nicht oder nur unzureichend angezogen waren. Nach erfolgter Nachbesserung dieser Montagefehler wurden die Leckageraten mit der Vakuummethode an Flanschen der Nennweite DN 80 mit Helium als Testgas bei 1 bar ermittelt. Die untersuchten Dichtungen sind in **Tabelle 6.2.1** aufgeführt.

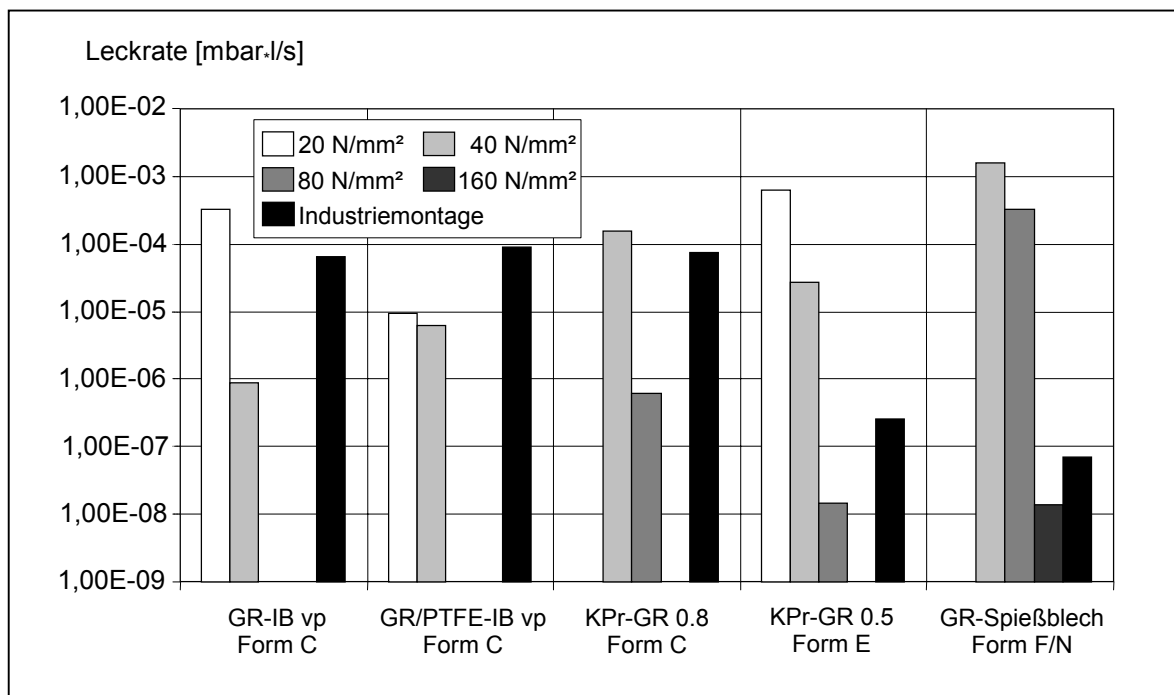


Abbildung 6.2.1: Vergleich der Montage von Flanschverbindungen im Betrieb und im Labor¹⁾

Tabelle 6.2.1: Daten der verwendeten Dichtungen

Dichtungstyp	Graphit mit Metall und Innenbördel	Graphit mit Metall, PTFE-Auflage und Innenbördel	Kammprofil	Kammprofil	Graphit mit Spießblech
Flanschform	Form C	Form C	Form C	Form E	Form F/N
Kurz-Bezeichnung	GR-IB vp	GR/PTFE-IB vp	KPr-GR 0.8	KPr-GR 0.5	GR-Spießblech
Durchmesser außen [mm]	143	143	121	121	120
innen [mm]	91,5	91,5	95	95	107
Dicke [mm]	2	2	5,6	5	2
Bemerkung	vorgepresst bis 115 mm	vorgepresst bis 115 mm	Teilung 1 mm Dicke 4 mm + beidseitig 0,8 mm Graphit	Teilung 1 mm Dicke 4 mm + beidseitig 0,5 mm Graphit	

¹⁾ Hummelt, C.: Messung und Berechnung der Emissionen an Flanschverbindungen mit PTFE- und Graphitdichtungen. Diplomarbeit, Universität Dortmund, 1999

6.3 Einfluss von Montagefehlern und Unfällen auf die Leckagerate

Eine erhöhte Leckagerate kann dann eintreten, wenn eine Komponente des Systems Flansch/Schraubelemente/Dichtung nicht richtig funktioniert. Normalerweise ist eine Leckage der Dichtverbindung anfangs praktisch nicht nachweisbar und vergrößert sich allmählich mit der Zeit oder aber es kann ein plötzliches, drastisches Versagen eintreten. Häufig wird dies beobachtet, wenn einzelne Verbindungselemente ihre Aufgabe nicht richtig erfüllen. Dies tritt gewöhnlich ein, wenn sie zuwenig Presskraft bewirken oder in selteneren Fällen wenn sie zuviel Presskraft ausüben. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden einige häufig vorkommende Fehlermöglichkeiten aufgezählt.

6.3.1 Unzureichende Flächenpressung

Verbindungselemente, die unzureichend angezogen sind, verursachen die meisten normalen Dichtstellenversagen. Sie können folgende Ursachen haben:

- Falscher Einbau
- Versagen der Verbindungselemente
- Selbstlösung der Schraubelemente
- Ermüden bzw. zeitabhängige Relaxation

6.3.2 Überschreitung der zulässigen Flächenpressung

In den vorangegangenen Ausführungen wurde der Zusammenhang dargestellt, dass mit zunehmender Flächenpressung eine Abnahme der Leckagerate verbunden ist. Allerdings ist hierbei jedoch bzgl. der aufgetragenen Flächenpressung die kritische Grenze des jeweils eingesetzten Dichtungstyps zu beachten, um Beschädigungen der Dichtung zu vermeiden.

Überschreitungen der zulässigen Flächenpressungen treten vor allem dann auf, wenn alle Flansche ohne Rücksicht auf die jeweils eingesetzte Dichtung montiert und mit gleicher Schraubenkraft beaufschlagt werden. Insbesondere bei schmalen Dichtungen können diese bei Überschreitung der zulässigen Flächenpressung mechanisch zerstört werden. Darüber hinaus wird die Spannungsrisskorrosion gefördert, und es tritt eine erhöhte Materialermüdung ein. Der Montagefehler macht sich häufig nicht sofort bemerkbar, da zunächst keine höheren Leckageraten auftreten. Erst mit dem allmählichen Absinken der Flächenpressung kann sich die plastisch verformte Dichtung nicht mehr optimal an die Dichtflächen des Flansches anpassen, was sich mit höheren Emissionen bemerkbar macht.

Ein zu festes Anziehen der Verbindungselemente kann neben der Zerstörung der Dichtung auch zu einem Versagen der eingesetzten Schrauben führen, wenn die angewendete Kraft die maximale Belastbarkeit der Schraube übersteigt. Typische Gründe hierfür sind:

- Die Schrauben entsprechen nicht den Konstruktionsspezifikationen (Bruch während des Zusammenbaues oder bei erhöhter Temperatur)
- Überbeanspruchung während der Montage
- Korrosion
- Spannungsrisskorrosion
- Materialermüdung

Durch das schlagartige Versagen einer Schraube kann eine deutliche Verschlechterung des Emissionsverhaltens von Flanschverbindungen um mehrere Zehnerpotenzen hervorgerufen werden.¹⁾

¹⁾ Bathen, D.; Hummelt, C.; Meisel, J.: Emissionen an Flanschverbindungen. Vulkan-Verlag, Essen, 2000

Die Auswirkungen der Überschreitung der zulässigen Flächenpressung wird am Beispiel eines Versuches mit Graphit-Spießblech-Dichtungen in Feder-Nut-Flanschen deutlich.¹⁾ Hierbei wurden die in der Industrie montierten Dichtungen mit Flächenpressungen von mehr als 100 N/mm² der zulässigen Flächenpressung für die verwendeten Dichtungen beaufschlagt. Mit steigender Flächenpressung ist eine annähernd lineare Abnahme der Dichtungsdicke verbunden und auch schon unterhalb der kritischen Grenze von 100 N/mm² beginnen die untersuchten Dichtungen zu fließen. Die ermittelten Leckageraten gaben zunächst keinen Hinweis auf eine Beschädigung der Dichtungen. Erst nach deren Ausbau aus dem Flanschsystem zeigte sich, dass dieser Dichtungstyp bei Flächenpressungen über 100 N/mm² praktisch vollständig zerstört wird.

6.3.3 Verzug der Rohrleitungen

Kanschik, 1995, untersuchte im Laborversuch das Verhalten von Flanschverbindungen bei Verzug der Rohrleitungen, was durch Aufbringen einer Auslenkkraft von 4.000 N simuliert wurde.²⁾ Die Messungen erfolgten nach der Ringspaltmethode an einem Flansch mit der Nennweite DN 65. Eingesetzt wurden eine Faserdichtung, eine Graphit-Spießblech-Dichtung und eine PTFE-Dichtung.

Beim Einsatz der PTFE-Dichtung wurden mit und ohne der Auslenkkraft keine Emissionen erfasst, da die Leckageraten offensichtlich unter der Nachweisgrenze der Ringspaltmethode lagen.

Sowohl bei der Graphit-Spießblech-Dichtung als auch bei der Faserdichtung führte bei korrekter Montage der Dichtungen die Auslenkkraft zu einer Verminderung der Leckageraten. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Aufbringen der Auslenkkraft in bestimmten Zonen der Dichtung zu einer Kompaktierung des Dichtungsmaterials führt, so dass die Diffusion gehemmt wird. Allerdings ist damit zu

¹⁾ Bathen, D.; Hummelt, C.; Meisel, J.: Emissionen an Flanschverbindungen. Vulkan-Verlag, Essen, 2000

²⁾ Kanschik, K.; Schmidt-Traub, H.: Verhalten von Flanschverbindungen unter Störfallbedingungen. Untersuchungsbericht LUA NRW, Dortmund, 1995

rechnen, dass bei weiterer Erhöhung der Auslenkkraft die Dichtung schlagartig versagt.

6.3.4 Versagen der Dichtung aufgrund des Flansches

Ein Dichtungsversagen aufgrund der Flansche ist sehr ungewöhnlich, tritt in der Praxis aber bisweilen dennoch auf durch z. B.:

- beschädigte Flanschoberflächen
- deformierte Flansche
- nicht parallele Flanschflächen
- Korrosion
- nicht gereinigte Flanschflächen vor dem Zusammenbau

7 Überwachung der Dichtheit lösbarer Verbindungen

Die Überwachung der Dichtheit von lösbaren Verbindungen wird in der Fachliteratur meist in Verbindung mit der Ermittlung der Gesamtemissionen aus den diffusen Quellen dargestellt. Tatsächlich basieren die meisten Methoden der EPA auf konkreten Messungen, die in den verschiedenen Anlagen durchzuführen sind. Sie werden mit der Schnüffelmethode und z. T. mit der Einpackmethode durchgeführt. Einzig die auf Emissionsfaktoren aufbauenden Methoden der EPA und des VDI kommen dagegen ohne Messungen aus.

Obwohl die einzelnen Abschätzungsmethoden erst im Kapitel 8 detailliert vorgestellt werden, greifen zumindest einige unmittelbar in die Durchführung der Dichtheitsüberwachung ein. Die Verquickung von messtechnischer Überwachung und Ermittlung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen führt bisweilen zu nicht klar abgegrenzten Darstellungen. So ist beispielsweise in Annex II: “Leacking Losses” des BREFs der IPPC über die “Large Volume Organic Chemical Industry” vom Dezember 2000 nachzulesen: *Based on the measurements and calculations, the „leaking“ equipment must be repaired.* Eine einzelne Leckage aus z. B. einem Flansch kann nur messtechnisch, nicht jedoch auf Basis einer Berechnung lokalisiert werden.

Im Rahmen dieses Berichtes wird – so weit wie möglich – eine strikte Trennung von Wartungsroutinen und Messmethoden einerseits sowie den Methoden zur Ermittlung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen andererseits vorgenommen.

7.1 Überblick über rechtliche Grundlagen

7.1.1 Deutschland

Die Überprüfung der Dichtheit der Ausrüstungsteile einer Anlage nach dem Einbau ist z. B. durch die Druckbehälter-Verordnung (DruckbehV) vorgeschrieben. In dieser sind eine Dichtheitsprüfung vor Inbetriebnahme sowie wiederkehrende Prüfungen festgelegt. Wiederkehrende Prüfungen bestehen aus inneren Prüfungen und Druck-

prüfungen. Innere Prüfungen müssen alle fünf Jahre, Druckprüfungen alle zehn Jahre, äußere Prüfungen alle zwei Jahre durchgeführt werden. Die Aufsichtsbehörde kann diese Fristen im Einzelfall

- verlängern, soweit die Sicherheit auf andere Weise gewährleistet ist, oder
- verkürzen, soweit es der Schutz der Beschäftigten oder Dritter erfordert.

Bei diesen Druckprüfungen werden nur eindeutig defekte Dichtungen bzw. lösbare Verbindungen erkannt und repariert. Diese Druckprüfungen werden im Kaltzustand der Anlage durchgeführt. Es werden Medien wie Wasser oder Stickstoff als Prüfmedium verwendet. Leckagen aus einzelnen diffusen Quellen werden auf diese Art nicht erfasst. Betriebliche Einflüsse auf die Dichtheit (Stoffeigenschaften, Betriebstemperaturen usw.) bleiben dabei unberücksichtigt.

In Deutschland resultieren die meisten Überwachungsrouتين aus der Überprüfung der arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen. So werden z. B. die MAK-Werte laufend überprüft. Allein aus diesen Messungen ergibt sich für deutsche Anlagen ein hohes „Überwachungsniveau“, obwohl keine Wartungsrouتين vorgeschrieben sind, die gezielt der Leckageerkennung dienen.

7.1.2 USA

In den USA werden Kontrollprogramme zur Feststellung, Bewertung und Begrenzung von diffusen Emissionen durchgeführt, die von den jeweiligen Behörden vorgeschrieben werden. Diese Programme, die als LDAR-Programme (**LEAK DETECTION AND REPAIR PROGRAM**) bezeichnet werden, erfordern vom Betreiber einer Anlage die Durchführung von Messungen aller relevanten lösbaren Verbindungen meist mit Hilfe der Schnüffelmethode. Sie basieren auf der EPA-Methode 21 und werden vierteljährlich bis jährlich durchgeführt.¹⁾ Es existieren unterschiedliche Grenzwerte für die erlaubte, gemessene Konzentration an dem entsprechenden Bauteil. Diese sind hinsichtlich der Gefährlichkeit der verarbeiteten, geförderten oder umzufüllenden

¹⁾ IMPEL: Diffuse VOC Emissions, Dezember 2000

Stoffe aufgeschlüsselt. Überschreitet der Messwert einer solchen lösbaren Verbindung diesen Grenzwert, sind Instandhaltungsmaßnahmen dafür einzuleiten. Kann dies nicht während des laufenden Betriebes der Anlage geschehen, so sind zusätzliche Emissionsminderungsmaßnahmen zu treffen. Eine Reparatur ist dann zum nächstmöglichen Zeitpunkt durchzuführen. Nach der Reparatur ist durch wiederholte Messung eine Verringerung der Leckage nachzuweisen (vgl. Abb. 7.5.2). Die Überschreitung der Grenzkonzentration an mehreren Ausrüstungsteilen der Anlage ist ebenfalls auf eine Mindestanzahl begrenzt. Wird an mehr als den maximal zulässigen Ausrüstungsteilen eine Überschreitung festgestellt und ist dies nicht im laufenden Betrieb zu beheben, muss die Produktion unterbrochen werden, um die defekten Dichtungen auszutauschen. Die Anforderungen sind allerdings von Bundesstaat zu Bundesstaat unterschiedlich.

In den **Tabellen 7.1.2.1 bis 7.1.2.3** sind als Beispiel die Forderungen der EPA zur Durchführung von LDAR-Programmen für Benzolanlagen zusammengestellt. Für Benzolanlagen gilt zunächst die NESHAP-Richtlinie (**N**ational **E**mission **S**tandard for **H**azardous **A**ir **P**ollutants)¹⁾. Zusätzlich gilt für Benzolanlagen eine weitere Richtlinie, falls die von der Anlage erzeugten Emissionen größer als 10 t/a eines einzelnen Stoffes sind oder die gesamten VOC-Emissionen 25 t/a überschreiten. Es handelt sich dabei um die verschärften Forderungen der HON-Richtlinie (**H**azardous **O**rganic **N**ational Emission Standards). In den **Tabellen 7.1.2.1 bis 7.1.2.3** werden wichtige Auszüge aus den beiden Richtlinien präsentiert, die von einer Fülle von zusätzlichen Regelungen begleitet sind.

¹⁾ Inspection Manual: Federal Equipment Leak Regulations for the Chemical Manufacturing Industry; Volume II; 40 CFR part 61, Subpart J; EPA/305/b-98/011; 1998

Tabelle 7.1.2.1: EPA-Forderungen für Ventile in Benzolanlagen bei gasförmigen und leichtflüssigen Medien

	HON	NESHAP										
Messprogramm	In Phase I und Phase II: vierteljährliche Überprüfung jedes Ventils In Phase III: Überprüfungsintervall ist abhängig vom Prozentsatz der Ventile mit einer Leckage <table><tr><td><u>Ventile mit Leck</u></td><td><u>Überprüfung</u></td></tr><tr><td>≥ 2 %</td><td>monatlich</td></tr><tr><td>< 2 %</td><td>vierteljährlich</td></tr><tr><td><1 %</td><td>halbjährlich</td></tr><tr><td>0,5 %</td><td>jährlich</td></tr></table> Phase I beginnt am Tag des Inkrafttretens der Vorschrift Phase II beginnt spätestens 1 Jahr nach Inkrafttreten der Vorschrift Phase III beginnt spätestens 2 ½ Jahre nach Inkrafttreten der Vorschrift	<u>Ventile mit Leck</u>	<u>Überprüfung</u>	≥ 2 %	monatlich	< 2 %	vierteljährlich	<1 %	halbjährlich	0,5 %	jährlich	monatliche Überprüfung wird an zwei aufeinander folgenden Monaten keine Leckage festgestellt ⇒ vierteljährliche Überprüfung
<u>Ventile mit Leck</u>	<u>Überprüfung</u>											
≥ 2 %	monatlich											
< 2 %	vierteljährlich											
<1 %	halbjährlich											
0,5 %	jährlich											
Leckagegrenzwert	Phase I 10.000 ppm Phase II 500 ppm Phase III 500 ppm	10.000 ppm										
Reparatur	so schnell wie möglich, nicht länger als 15 Kalendertage nach Detektion	so schnell wie möglich, nicht länger als 15 Kalendertage nach Detektion										
nicht vermessende Ventile	zu Ventile mit Unterdruck, Vakuumarbeitsweise	Ventile mit Unterdruck, Vakuumarbeitsweise										
	Ventile mit weniger als 300 Betriebsstunden im Jahr schwer zugängliche Ventile, Messungen sind durchzuführen wenn Möglichkeit dazu besteht, 1 mal jährlich	schwer zugängliche Ventile , Messungen sind durchzuführen wenn Möglichkeit dazu besteht, 1 mal jährlich										

Tabelle 7.1.2.2: EPA-Forderungen für Pumpen in Benzolanlagen für leichtflüssigen Medien

	HON	NESHAP
Messprogramm	monatliche Überprüfung wöchentliche Sichtprüfung In Phase III: Besitzen 10 % der Pumpen oder 3 Pumpen einer Betriebseinheit eine Leckage, ist ein Qualitätssicherungsplan durchzuführen. Phase I beginnt am Tag des Inkrafttretens der Vorschrift Phase II beginnt spätestens 1 Jahr nach Inkrafttreten der Vorschrift Phase III beginnt spätestens 2 ½ Jahre nach Inkrafttreten der Vorschrift	monatliche Überprüfung wöchentliche Sichtprüfung
Leckagegrenzwert	Phase I 10.000 ppm Phase II 5.000 ppm Phase III 1.000 ppm	10.000 ppm
Reparatur	So schnell wie möglich, nicht länger als 15 Kalendertage nach Detektion Phase III für Pumpen mit einem Leckagegrenzwert von 1.000 ppm ist Reparatur ist erst ab Leckage von 2.000 ppm erforderlich.	so schnell wie möglich, nicht länger als 15 Kalendertage nach Detektion
nicht zu vermessende Pumpen	durch Konstruktion emissionsfreie Pumpen Pumpen mit weniger als 300 Betriebsstunden im Jahr Betriebseinheiten mit mehr als 90 % an emissionsfreien Pumpen sind von der monatlichen Überprüfung ausgeschlossen.	durch ihre Konstruktion emissionsfrei gestaltete Pumpen

Tabelle 7.1.2.3: EPA-Forderungen für Flansche; gasförmige und leichtflüssige Medien

	HON	NESHAP
Messprogramm	Anfangsüberprüfung: Überprüfung aller Flansche innerhalb eines Jahres Weitere Überprüfungen: abhängig von Anteil der Flansche mit Leckage <u>Turnus</u> <u>Anteil v. F. mit Leckage</u> jährlich, wenn 0,5 % einmal alle 2 Jahre, wenn < 0,5 % bleibt einmal alle 4 Jahre, wenn < 0,5 % während einer 2 jährigen Überwachungszeit einmal alle 2 Jahre, wenn 0,5 % bis <1 % während einer 4 jährigen Überwachungszeit jährlich wenn > 1,0 % während einer 4 jährigen Überwachungszeit Die zu vermessenden Flansche sollten prozentual auf die Dauer des Überprüfungsintervalls aufgeteilt werden. Beispielsweise bei 2 jährigen Rhythmus 50 % der Flansche im ersten Jahr, im zweiten den Rest	5-tägige Überprüfung, falls ein potentiell Leck durch Sichtprüfung oder andere Methoden gefunden wurde
Leckagegrenzwert	500 ppm	10.000 ppm
Reparatur	so schnell wie möglich, nicht länger als 15 Kalendertage nach Detektion Überprüfung nach Reparatur mind. einmal in den ersten 3 Monaten danach. Wenn nicht sofort repariert werden kann, dann spätestens beim nächsten planmäßigen Shut Down.	so schnell wie möglich, nicht länger als 15 Kalendertage nach Detektion
nicht zu vermessende Flansche	Flansche mit Unterdruck, Vakuumarbeitsweise Flansche mit weniger als 300 Betriebsstunden im Jahr Wenn Arbeitsschutzmaßnahmen nicht eingehalten werden können, weil ohne Hilfsmittel keine Messungen durchgeführt werden können.	Flansche mit Unterdruck, Vakuumarbeitsweise

Ohne alle Einzelheiten näher zu beleuchten, ist insgesamt festzustellen, dass der Aufwand zur Wartung der Anlagen sehr hoch ist. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass die Anforderungen an die Überwachung mit dem Ziel einer Anreizwirkung variabel geregelt wurden.

7.1.3 Europa

In Europa werden von verschiedenen Institutionen ebenfalls erste Techniken und Programme zur Begrenzung diffuser Emissionen vorgeschlagen, die jedoch meist mangels Alternativen von den amerikanischen Methoden abgeleitet sind. In diesen Vorschlägen schwimmt, wie oben schon angedeutet wurde, meist das Ziel der konkreten an der Praktikabilität orientierten Leckageerkennung und -verringern.

In den Niederlande gilt in Anlehnung an die Richtlinien der EPA für gefährliche Stoffe, dass, wenn eine Konzentration mit Hilfe der Schnüffelmethode im FID oder PID von 500 ppm angezeigt wird, eine Leckage vorliegt und entsprechend eingegriffen werden muss. Bei Stoffen, die nicht einer der genannten Gruppen zugeordnet werden kann, gilt ein Eingreifwert von 1.000 ppm. Mit Hilfe eines anlagenspezifischen Kontrollprogramms werden die technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Minimierung flüchtiger Emissionen festgelegt. Kernstück des Programms ist die zeitliche Festlegung von Messroutinen mit Wiederholungsmessungen bei einmal detektierten Leckagen. Hinzu kommt der Austausch von älteren Komponenten durch Armaturen mit geringeren Emissionen.

Der europäische Diskussionsstand kann wie folgt zusammengefasst werden: Ausgehend von der Schnüffelmethode soll ein „Eingreifwert“ vorgegeben werden, um den Austausch einer Armatur anzuzeigen. Bei der Festlegung eines solchen Eingreifwertes sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- Häufigkeit der durchzuführenden Messungen
- Kosten für solche Messungen
- Höhe der zu erwartenden Reduzierung der Emissionen

Unbestritten ist allgemein, dass Reduzierungen von diffusen Emissionen möglich sind. Dies gilt insbesondere für Altanlagen, die noch nicht mit neuer Technik ausgestattet sind.

7.2 Vorliegende Untersuchungsergebnisse

7.2.1 Messmethodik

Im Rahmen verschiedener Untersuchungsprogramme wurden unterschiedliche Anlagen, wie z. B. Raffinerien, chemische Anlagen, bezüglich diffuser Emissionen aus Flanschverbindungen, Ventilen usw. untersucht. Die Messungen wurden mit Hilfe eines tragbaren FID oder PID durchgeführt. Hierbei wurden die verschiedenen lösbaren Verbindungen mit Hilfe der sogenannten Schnüffelmethode abgetastet.

Es ist eine einfache Methode zur Erfassung von diffusen Emissionen, die auf der Ermittlung der VOC-Konzentration im Nahbereich der lösbaren Verbindungen basiert. Dabei wird eine Messsonde entlang der möglichen Leckagestellen bewegt. Nach Möglichkeit sollte die Messsonde nicht weiter als 1 mm von der Oberfläche der Dichtung entfernt sein und nicht schneller als 20 mm/s entlang der Dichtungsfläche bewegt werden. In **Abbildung 7.2.1.1** sind die Messstellen zur Ermittlung der diffusen Emissionen für Flansche und Ventile dargestellt.

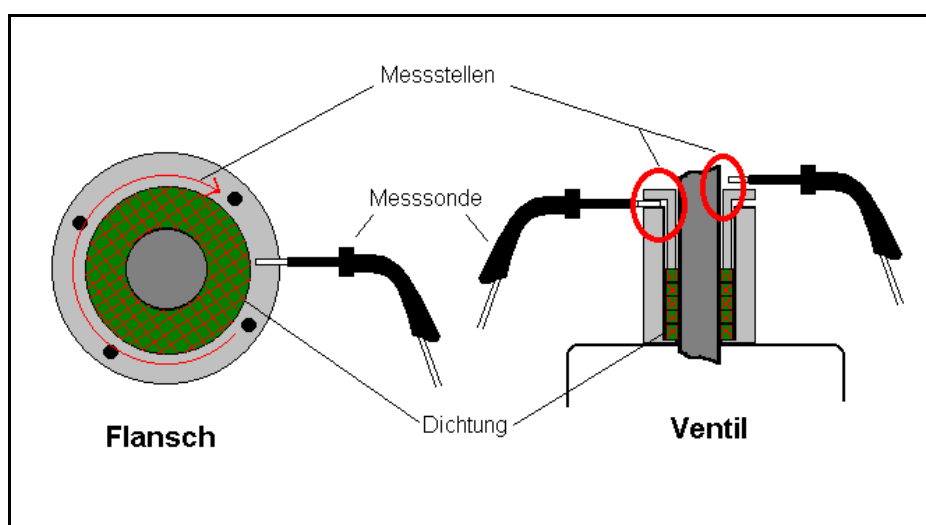


Abbildung 7.2.1.1: Messstellen der Schnüffelmethode bei Flanschen und Ventilen

Die **Abbildungen 7.2.1.2 bis 7.2.1.4** zeigen die Anwendung der Schnüffelmethode während des laufenden Betriebes. Das Verfahren hat das Ziel, undichte Stellen an den Dichtungen ausfindig zu machen. Die Höhe der gemessenen Konzentration ermöglicht Aussagen über die Größe der vorliegenden Undichtigkeit. Eine direkte Ermittlung der Leckagerate ist mit dieser Methode nicht möglich.

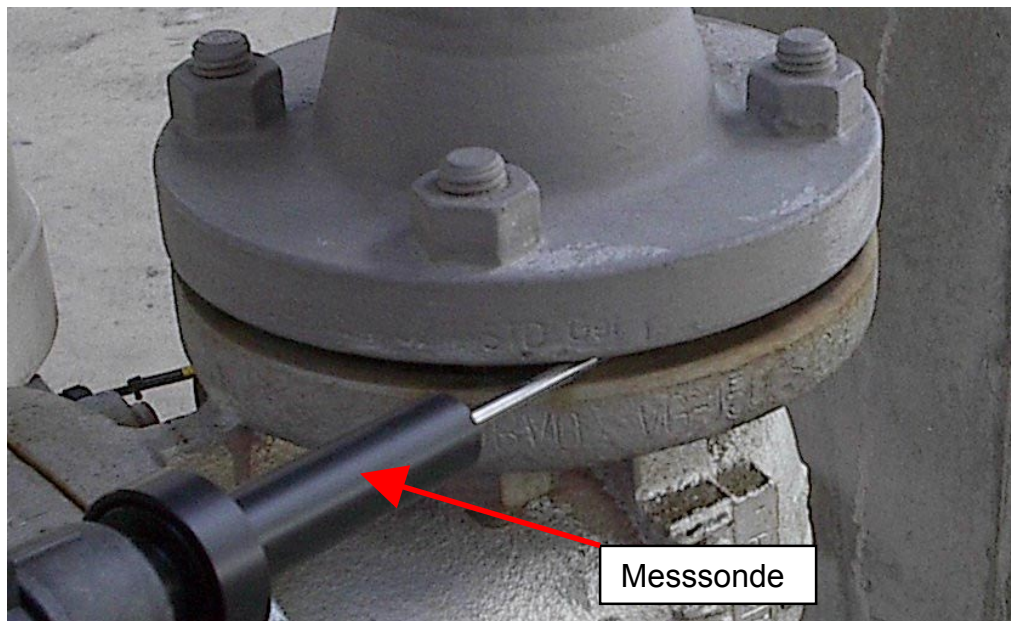


Abbildung 7.2.1.2: Einsatz der Schnüffelmethode an einem Flansch

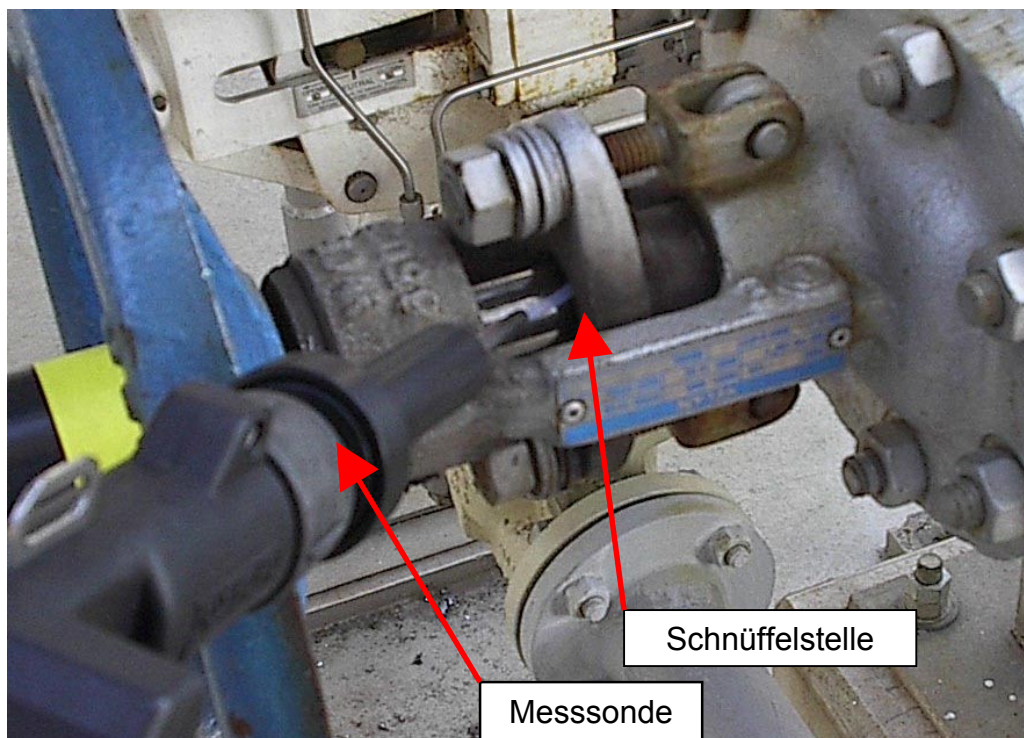


Abbildung 7.2.1.3: Einsatz der Schnüffelmethode direkt an der Spindel eines Ventils

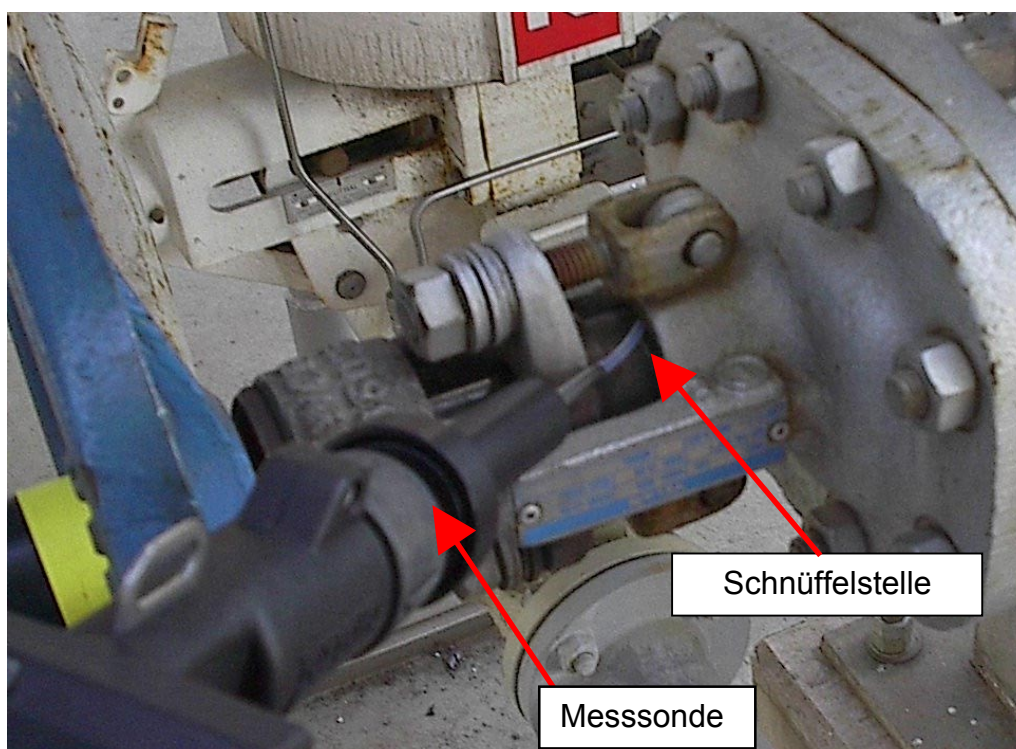


Abbildung 7.2.1.4: Einsatz der Schnüffelmethode direkt an der Brille eines Ventils

Bei der Durchführung der Schnüffelmessungen ist zu beachten, dass verschiedene Einflussfaktoren zu Messfehlern bzw. Ungenauigkeiten führen können. So erfasst die Messsonde, mit der die Probeluft angesaugt wird, nur einen Teil der entweichenden Leckagemenge. Mit zunehmender Entfernung von der Leckagestelle verringert sich die Konzentration aufgrund des Verdünnungseffektes. Bei Messungen im Freien erhöht der Wind die Verdünnung der Probenluft. In Räumen und Gebäuden haben Anlagenumströmungen durch Zugluft den gleichen Effekt. Unterschiedliche Absauggeschwindigkeiten der Messgeräte haben ebenfalls Auswirkungen auf die gemessene Konzentration.

7.2.2 Messergebnisse verschiedener Untersuchungen

In Rahmen einer umfangreichen Studie, die in insgesamt 7 Raffinerien durchgeführt wurde, wurden Flansche, Ventile usw. mit der Schnüffelmethode untersucht.¹⁾ Die Ergebnisse sind in **Abbildung 7.2.2.1** zusammengefasst. Die Abzisse ist in mehrere

¹⁾ API Publications 310, November 1997 (API American Petroleum Institute)

Konzentrationsbereiche eingeteilt. Die Ordinate weist den prozentualen Anteil aller untersuchten Stellen sowie den Anteil an der Gesamtemission aus.

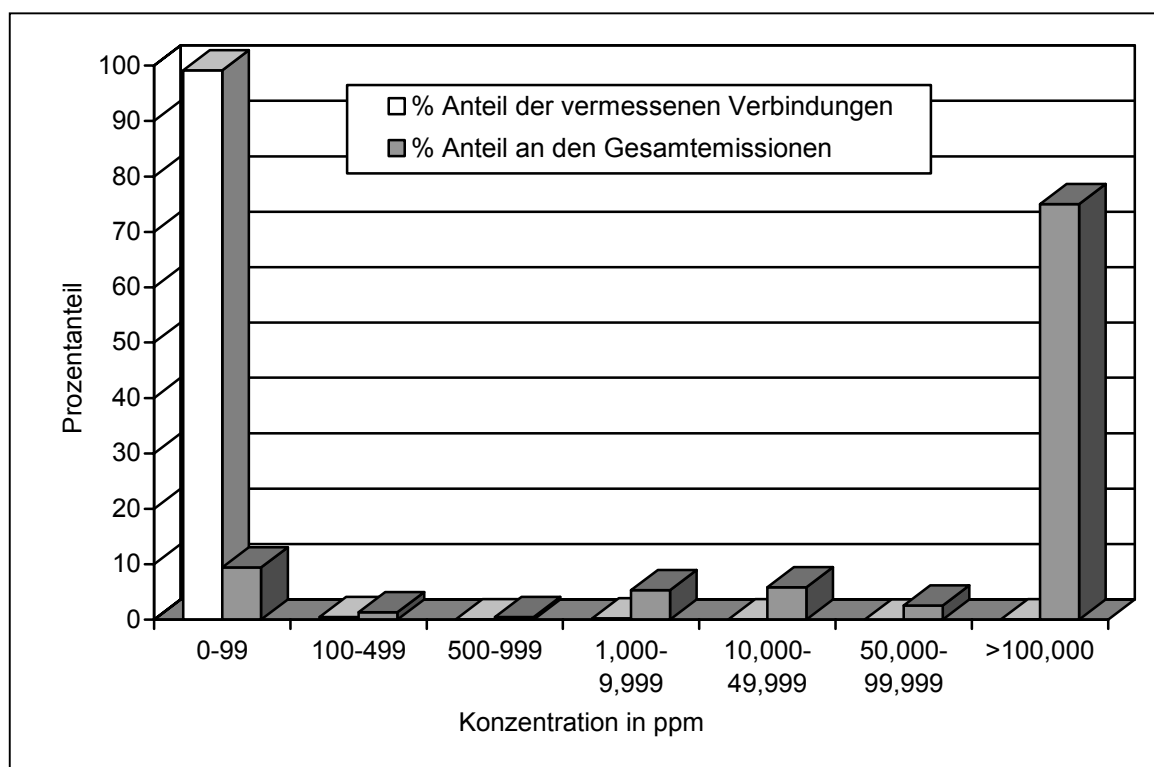


Abbildung 7.2.2.1: Verteilung flüchtiger Emissionen in 7 Raffinerien

Werden alle Quellen mit Konzentrationen über 10.000 ppm als sogenannten „high leakers“ definiert, zeigt sich nach Abbildung 7.2.2.1, dass nur 0,13 % aller untersuchten Quellen ca. 84 % der Gesamtemissionen verursachen. Dieses Ergebnis wird, wie in Kapitel 8 noch detailliert gezeigt wird, von den im Rahmen dieses Forschungsvorhaben durchgeführten Messungen an einer Anlage der chemischen Industrie tendenziell bestätigt. **Abbildung 7.2.2.2** zeigt das für diesen Zusammenhang wichtige Ergebnis der eigenen Untersuchungen.

Auch hier wird deutlich, dass der größte Teil der diffusen Gesamtemissionen nur von wenigen Ausrüstungsteilen erzeugt wird. Damit diese wenigen für den Hauptanteil der diffusen VOC Emissionen verantwortlichen Verbindungen identifiziert werden können, müssen möglichst alle Ausrüstungsteile vermessen werden.

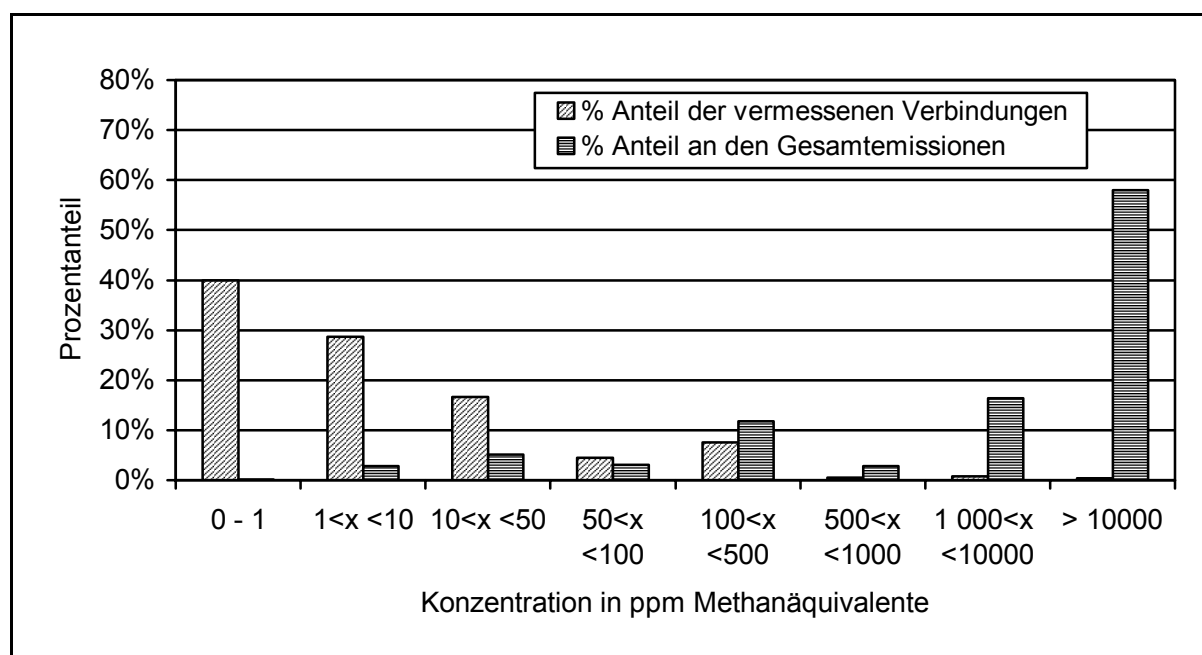


Abbildung 7.2.2.2: Prozentuale Verteilung der diffusen Emissionen der vermessenen Ausrüstung in einer Anlage der petrochemischen Industrie

Im Rahmen einer umfangreichen Studie vom Juni 1999, die im Auftrage des European Council of Vinyl Manufacturers erstellt wurde, wurden in 11 EDC/VCM-Anlagen insgesamt über 20.752 Messungen an Ventilen, Flanschen, Pumpen, Kompressoren und Rührern durchgeführt. Sogenannte „high leakers“, die Konzentrationen über 10.000 ppm aufwiesen, wurden in unter 0,6 % der untersuchten Fälle detektiert. Konzentrationen über 1.000 ppm wurde in weniger als 1,3 % aller untersuchten Fälle detektiert. Diese Ausrüstungsteile sind für mehr als 77 % der Emissionsfracht verantwortlich.

Es zeigte sich, dass u.a. die Pumpen im Wesentlichen für die überdurchschnittlich hohen Konzentrationen verantwortlich waren. Würde man Pumpen, die bekanntermaßen hohe Leckageraten aufweisen können, aus der Zusammenstellung herausrechnen, läge der Anteil der „high leakers“ noch deutlich niedriger.

Zusammengefasst kann davon ausgegangen werden, dass in der Regel die meisten lösbaren Verbindungen technisch dicht sind. Nur wenige Quellen verursachen überdurchschnittliche Emissionen und sollten daher ausgetauscht oder repariert werden.

7.2.3 Einsatzgrenzen der Schnüffelmethode

Die Schnüffelmethode wird allgemein als die praktikabelste Messmethode zur Erkennung von Leckagen in Raffinerien und Anlagen der chemischen Industrie angesehen. Dies wird i.d.R. mit der einfachen Handhabung des Messgerätes (FID oder PID) begründet. Dabei werden in manchen Darstellungen die Grenzen der Einsetzbarkeit dieses Messverfahrens nicht deutlich herausgearbeitet. Wie die eigenen Untersuchungen gezeigt haben, sind folgende Probleme beim Einsatz der Schnüffelmethode zu beachten:

- Erreichbarkeit und Zugänglichkeit der einzelnen Ausrüstungselemente

Zahlreiche Flansche und Ventile sind nicht ohne Hilfsmittel wie Gerüste oder Hebebühnen zu erreichen und können daher nicht ohne Weiteres vermessen werden. In diesem Zusammenhang sind z. B. die Ausrüstungselemente an Kolonnenköpfen zu nennen, die in der organischen Chemie in großer Zahl anzutreffen sind. Für die im Rahmen dieses Forschungsberichtes untersuchte Aromatanlage liegt dieser Anteil nicht erreichbarer Ausrüstungsteile bei ca. 10 %. Wie Nachforschungen in anderen Anlagen ergeben haben, kann dieser Anteil bei Freiluftanlagen durchaus auf 15 bis 20 % ansteigen.

- Isolierungen

Je nach den klimatischen Verhältnissen des Standortes der Anlage und der Art der Prozessmedien ist in Freianlagen ein Teil der Ausrüstungselemente mit Isolierungen versehen, die nicht ohne weiteres zu demontieren sind. Diese Isolierungen verhindern somit den direkten Zugriff auf die zu vermessenden Ausrüstungsteile. In der untersuchten Aromatanlage sind etwa 65 % der Flansche und 60 % der Ventile isoliert. Die Schnüffelmessungen sind mit erheblichen Vor- und Nacharbeiten verbunden, die keineswegs unterschätzt werden dürfen. Es ist davon auszugehen, dass die überwiegende Anzahl der Rohrleitungen und Ventile der meisten Freianlagen der chemischen und petrochemischen Industrie in Deutschland isoliert sind.

- Witterungsbedingungen

Bei Anlagen, die im Freien stehen, spielen die Wetterverhältnisse ebenfalls eine große Rolle. An Tagen mit Regen, starkem Wind oder Temperaturen unter 0°C können keine Messungen durchgeführt werden. Diese Wetterverhältnisse führen zu nicht repräsentativen Schnüffelmesswerten bzw. zu Schwierigkeiten beim Betrieb der Messgeräte.

Aus diesen praktischen Einschränkungen ergeben sich für Messungen mit dem FID oder PID nach der Schnüffelmethode folgende Schlussfolgerungen:

1. Ein Teil der Freiluftanlage kann wegen der Höhe von z. B. Kolonnen nur in Ausnahmefällen erreicht werden. Für eine fortlaufende Überwachung scheiden diese nur schwer erreichbaren Flansche und Ventile praktisch aus.
2. Weil an kalten Tagen, bei Regenwetter oder starkem Wind aus messtechnischen Gründen eine Überprüfung der lösbaren Verbindungen von Freiluftanlagen nicht möglich ist, reduziert sich die Zahl der Messtage erheblich.¹⁾ Dies bedeutet für die Praxis, dass quasi Messkampagnen durchzuführen wären, was personell und apparativ entsprechend aufwendig wäre. Die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse sind, wie die eigenen Erfahrungen bei der Durchführung der Messungen in der Aromatanlage gezeigt haben, nicht zu vernachlässigen. Vor diesem Hintergrund sind amerikanische LDAR-Programme, insbesondere diejenigen, die in Kalifornien durchgesetzt wurden, für deutsche Verhältnisse kritisch zu bewerten.
3. Unter dem letztgenannten Gesichtspunkt gewinnen die vorbereitenden Arbeiten zur Demontage von Isolierungen noch an Bedeutung. Es ist davon auszugehen, dass der Aufwand zur Demontage und Wiederherstellung der Isolierungen weitaus höher ist als der eigentliche messtechnische Aufwand.

¹⁾ Die Sensibilität der Messungen mit Hilfe der Schnüffelmethode wird mit ihren Auswirkungen im Rahmen der verschiedenen Abschätzungsmethoden zur Ermittlung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen in Kapitel 8.3.2.3 noch eingehend dargestellt.

Zur Beantwortung der Frage nach dem Aufwand existieren verschiedene Ansätze, um die Kosten der Überwachung von diffusen Emissionen abzuschätzen. So erforderte die Emissionsmessung in einer Vinylchlorid-Anlage, die über ca. 6.000 Flansche verfügt, einen Aufwand von einem Mannjahr.¹⁾ Andere Autoren gehen von 1 bis 3 Dollar pro vermessener Dichtung aus.²⁾ Für die im Rahmen dieses Forschungsberichtes durchgeführten Untersuchungen wurden die in **Tabelle 7.2.3.1** zusammengestellten Flansche und Ventile mit Hilfe eines tragbaren FID überprüft.

Tabelle 7.2.3.1: Verzeichnis der untersuchten Quellen

Typ	Gesamt- zahl	vermessen Anzahl	Prozentsatz
Flansche	3.300	280	9 %
Ventile mit gasförmigen Medium	70	15	21 %
Ventile mit leichtflüssigen Medium	680	85	13 %

Anmerkung: Bei der untersuchten Anlage handelte es sich um eine neue Produktionsanlage, die ausschließlich mit hermetischen Pumpen ausgerüstet ist. Daher wurden keine Messungen an den Pumpen durchgeführt.

Der Aufwand für die Untersuchungen betrug etwa 1½ Mannmonate, wobei die Messungen nur an Stellen vorgenommen wurden, die nicht isoliert waren. Für die gesamte Anlage müssten unter Berücksichtigung der erworbenen Routine mindestens 4 Mannmonate veranschlagt werden. Unter der Annahme, dass für einen Mannmonat ca. 4.500 € angesetzt werden können, ergeben sich Kosten pro vermessener Verbindung von 4,4 €. Zum Vergleich geht der Kostenansatz von IMPEL Network von einem Kostenansatz von 3 €/Messtelle aus und liegt damit etwas niedriger als der eigene. Bei diesen Kostenangaben ist der Aufwand für die Demontage und an-

¹⁾ Hermann, K.; Siegle, H.-J.: Beherrschung flüssiger und gasförmiger Emissionen – Aktivitäten und Sichtweisen der chemischen und petrochemischen Industrie. VDI-Bericht 1440, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998

²⁾ Kittleman, T.A.: Sensorüberwachung oder Einsacken zur Kontrolle und Überwachung von Leckagen. VDI-Bericht 1440, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998, S. 367 – 382

schließende Wiederherstellung der Isolierung nicht enthalten. Es ist davon auszugehen, dass der spezifische Kostenansatz in diesem Falle noch deutlich höher läge.

Allein die BASF verfügt auf ihrem Gelände in Ludwigshafen über ca. 350 Produktionsstätten, die sich bezüglich der Anzahl der Flansche und Ventile mit der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Aromatanlage vergleichen lassen. Die Kosten der BASF würden sich somit bei einer jährlichen Messung aller Verbindungen bei spezifischen Kosten von 3 bzw. 4,4 €/Messstelle, also ohne Montagekosten, zwischen 4,3 und 6,5 Mio. € belaufen.

Andererseits kann diesen Kostenangaben entgegengehalten werden, dass mit einem Überwachungsprogramm, die sogenannten „high leakers“ erkannt und abgestellt werden können. Auf diese Weise können Einsatzstoff- bzw. Produktverluste minimiert werden, was einen auch monetär bewertbaren Nutzen ergibt, der entsprechend in einer Kosten-Nutzen-Analyse zu berücksichtigen wäre. Gegebenenfalls ergeben sich weitere Vorteile, wie z. B. durch eine höhere Arbeitsplatzsicherheit.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die bislang vorliegenden Untersuchungen nahezu ausschließlich in Zusammenhang mit geförderten Studien erarbeitet wurden. Ob der für die Studien erforderliche personelle und finanzielle Aufwand auf die tägliche Untersuchungsroutine von Betrieben übertragen werden kann, sollte kritisch hinterfragt und diskutiert werden.

In jedem Fall erscheint es sinnvoll, alternative Methoden zur Überwachung von Anlagen verstärkt in die Diskussionen über die Erkennung und Verminderung flüchtiger Emissionen einzubringen. In den folgenden Kapiteln werden neuere Methoden zur Anlagenüberwachung vorgestellt, die sich im Einzelfall in der Praxis schon bewährt haben. Gleichwohl besteht bei den meisten neueren Verfahren gerade für die Anwendung in Produktionsanlagen noch ein Forschungsbedarf, um diese als Stand der Technik definieren zu können.

7.3 Verfahren zur Detektion von Leckagen

Bei den schon unter Kapitel 5.2 dargestellten Verfahren zur Detektion von Leckagen ist zwischen integralen und lokalen Untersuchungsmethoden zu unterscheiden. Bei den integralen Verfahren werden bestimmte Teilbereiche einer Anlage oder auch ganze Produktionsanlagen beobachtet. Potenzielle Einzelquellen werden mit diesen Verfahren jedoch nicht geprüft. Dies ist bei den lokalen Verfahren, wie z. B. der Schnüffelmethode, jedoch der Fall. Mit diesen Methoden lassen sich Leckagen detektieren und somit reparieren. Wie oben schon dargestellt wurde, ist der personelle und damit finanzielle Aufwand jedoch nicht zu verachlässigen. Daher nehmen integrale Verfahren zumindest für die Eingrenzung potenzieller Emissionsquellen an Bedeutung zu.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Überwachung. Während mit der Schnüffelmethode beispielsweise nur kurzzeitig z. B. ein Ventil überprüft wird und somit oftmals Betriebszustände, die die Dichtungen besonders belasten, nicht erfasst werden, sind andere Messsysteme in der Lage, kontinuierlich eine Anlage zu überwachen. In den folgenden Abschnitten werden neuere Systeme vorgestellt, die kontinuierliche Emissionen aus Anlagen detektieren können.

7.3.1 Photooptische Detektionsverfahren

Mit Hilfe photooptischer Detektionsverfahren kann die Atmosphäre im Bereich von Produktionsanlagen kontrolliert werden. Eine interessante Möglichkeit, großflächig auftretende Schadstoffkonzentrationen zu messen, bietet die Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR-Spektroskopie).¹⁾ Mit Hilfe der FTIR-Spektroskopie können ganze Produktionsanlagen oder auch nur Teilbereiche überwacht werden. Hierzu wird ein breitbandiger Infrarotstrahler in einer bestimmten Entfernung zur Anlage (z. B. 10 – 100 m) installiert.

¹⁾ Gärtner, A.;Hölscher, N.: Überwachung diffuser Emissionen mit FTIR-Fernmessverfahren, Chemie Technik, 29. Jahrgang (2000), Nr. 3, S. 62 - 65

Auf der anderen Seite der Anlage ist das Empfangsgerät, ein Spektrometer, das die vom Infrarotstrahler ausgesendeten und auf der Wegstrecke veränderten Signale empfängt (**Abbildung 7.3.1.1**). Die Veränderung der emittierten Strahlung resultiert aus der teilweisen Absorption durch Moleküle innerhalb der Messstrecke. Diese Veränderung wird im Spektrometer registriert. Die Auswertung erfolgt anschließend mit Hilfe eines Computers. Hierbei werden die erhaltenen Konzentrationswerte über die Wegstrecke gemittelt. Daher ist das Verfahren auch nicht in der Lage, mögliche Konzentrationspeaks auf der Messstrecke zu erkennen. Eine genaue Lokalisierung von Emissionsquellen ist daher eindimensional nicht möglich. Dennoch kann das Verfahren dazu dienen, kritische Anlagenbereiche zu erkennen.

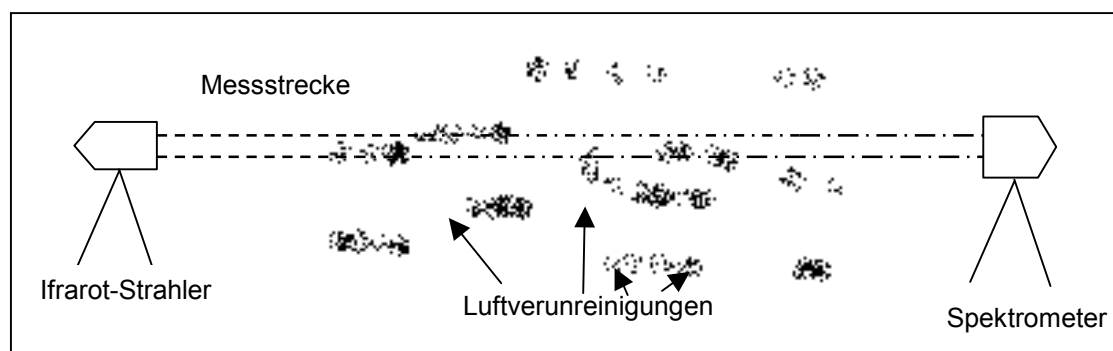


Abbildung 7.3.1.1: Messungen mit einem optischen Messgerät

Vorteilhaft bei dieser Art der Emissionsmessung ist, dass mehrere Einzelstoffe gleichzeitig detektiert werden können. Weiterhin sind online-Messungen möglich, deren Ergebnisse schon nach wenigen Minuten verfügbar sind. Deshalb werden FTIR-Messgeräte auch zur Überwachung petrochemischer Anlagen, wie z. B. Raffinerien, eingesetzt, um sehr frühzeitig Veränderungen gegenüber dem „normalen“ Betriebszustand einer Anlage zu erkennen. Analog den Abluftmessungen in einem Gebäude ist eine Zuordnung von emittierten Stoffen zu einzelnen Produktionsvorgängen denkbar (vgl. Abbildung 5.12.2.2.2). Auch in Deutschland findet die FTIR-Fernmesstechnik vorzugsweise für Immissionsprognosen im Rahmen von Genehmigungsverfahren in wachsendem Maße Anwendung. Hierzu werden die ermittelten Konzentrationen mit Ausbreitungsrechnungen kombiniert. Eine entsprechende VDI-Richtlinie 4211, Blatt 1 liegt seit 1998 als Entwurf vor.

Der Einsatz von FTIR-Fernmessgeräten wird insbesondere in den USA und Dänemark praktiziert. Die meisten Geräte sind für den Feldeinsatz konstruiert und mobil einsetzbar¹⁾.

7.3.2 Tracergasverfahren

Das *Tracergasverfahren* vergleicht die gemessenen Außenluftkonzentrationen mit der Konzentration des Tracergases einer synthetischen Emissionsquelle. Das Tracergas, häufig SF₆, ersetzt das meteorologische Modell. Aus dem Verhältnis der VOC- und Tracergas-Konzentration und der bekannten Tracerquellstärke wird die VOC-Quellstärke direkt berechnet. Bei diesem Verfahren ist es wichtig, dass die beiden Quellen weitestgehend ähnlich sind. Durch Messung des Konzentrationsverhältnisses an verschiedenen Stellen windabwärts der Anlage kann überprüft werden, inwiefern dies zutrifft. Üblicherweise wird in einem Bereich von 100 – 300 m windabwärts der Emissionsquelle gemessen. Die Absorptionspfadlängen liegen zwischen 25 und 200 m. Die Tracergasquelle kann zur Simulation der diffusen Emissionssituation auch in Form von mehreren Gaszylindern über die Anlage verteilt angeordnet werden. Die Windverhältnisse sollten während der Messung stabil sein. Beim Vorliegen von günstigen Randbedingungen sind Messzeiten von maximal 10 min für die Ermittlung der diffusen Gesamtemission einer Anlage ausreichend. Neben der VOC-Ermittlung können mit diesem Verfahren auch die Emissionen von Einzelstoffen bestimmt werden.

Für die Bestimmung der Außenluftkonzentration werden auch Verfahren der Laserlichtabsorption nach dem „Offenen-Pfad-Prinzip“ herangezogen.

7.3.3 Membranschlauch-Technik (LEOS)

LEOS (Leakage-Erkennungs- und -Ortungssystem) der Fa. Siemens/Framatome ANP (Erlangen) ist in **Abbildung 7.3.3.1** dargestellt. Es basiert auf der Membran-

¹⁾ Anbieter sind z.B. die Firmen Midac Corporation, ETG, AIL Systems, Radian International

schlauch-Technik und der Nutzung der physikalischen Gesetze der Gasdiffusion. Der verwendete Kunststoff-Membranschlauch besitzt eine hohe Diffusionsfähigkeit und weist eine hohe Dauerbeständigkeit auf. Das System überwacht in einstellbaren, periodischen Abständen auf potenziell austretendes Leckmedium. Die Empfindlichkeit kann den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden. Sie beträgt max. 1 l/h.

Im Falle eines Lecks diffundiert ein Teil der Leckage aufgrund des Konzentrationsgefälles in das Schlauchinnere. Nach einiger Zeit ist im Schlauch ein getreues Abbild der ihn umgebenden Substanzen, und zwar unabhängig davon, ob der Schlauch in Luft, Wasser oder im Erdreich verlegt ist. Die im Sensorschlauch vorliegende Konzentrationsverteilung wird dadurch sichtbar gemacht, dass mit Hilfe einer Pumpe die Luftsäule im Sensorschlauch mit konstanter Geschwindigkeit an einer Detektoreinheit vorbei geschoben wird, der den so gemessenen Pegel als Funktion der Zeit aufzeichnet. Jede gegenüber einer Referenzmessung (Hintergrundbelastung) erhöhte Gaskonzentration wird somit als „Leckagepeak“ sichtbar.

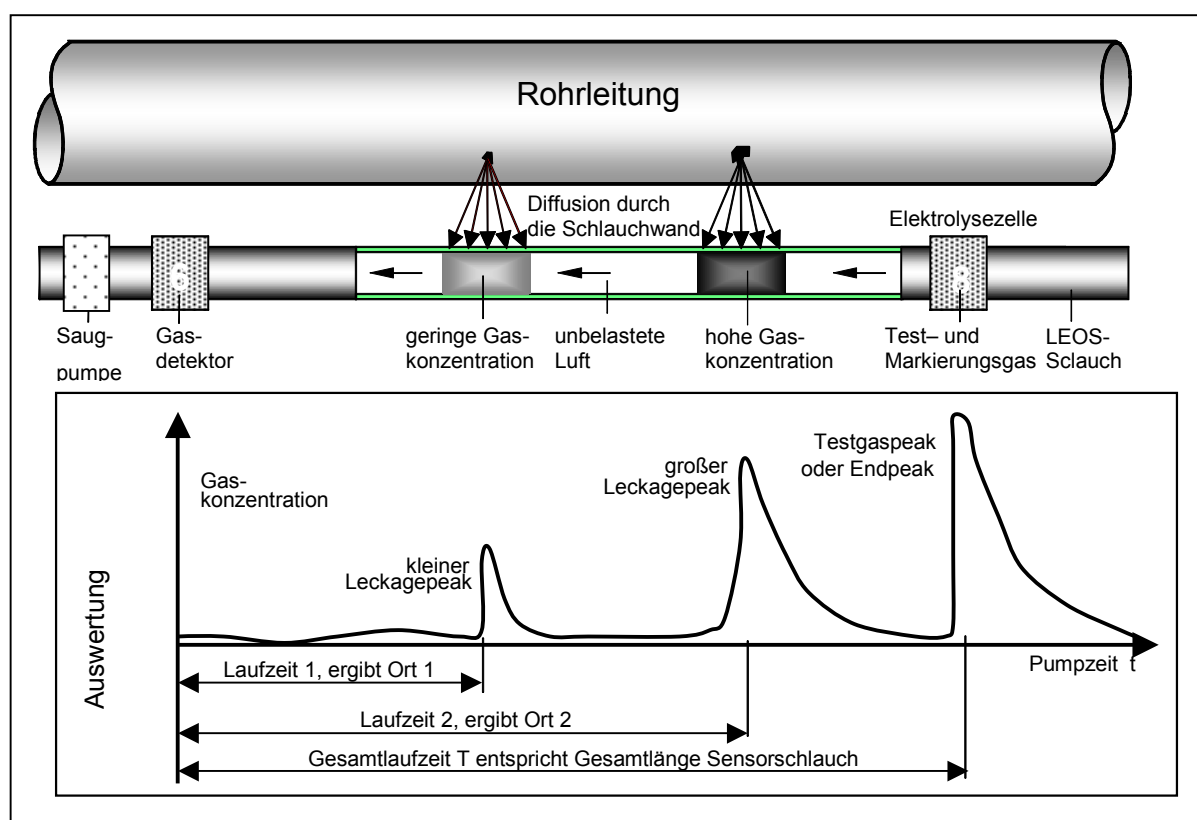


Abbildung 7.3.3.1: Funktionsprinzip des LEOS, Membranschlauch-Technik

Die Höhe der Anzeige informiert über die Größe der Leckage. Am Ende der Überwachungsstrecke wird mittels einer Elektrolysezelle vor jedem Pumpvorgang ein bestimmtes Volumen an Testgas zugeführt. Dieses Gas wird zusammen mit der Luft durch die gesamte Sensorschlauchstrecke transportiert. Beim Durchlaufen der Detektoreinheit (z.B. FID) erzeugt das Testgas einen Markierungspunkt, den sogenannten Endpeak. Aus dem Verhältnis zwischen der Laufzeit des Leckagepeaks und der des Endpeaks kann die Leckagestelle metergenau geortet werden. Es sind Rohrlängen von bis zu 20 km überwachbar. Das Verfahren wird bislang nur zur Überwachung von Pipelines und Tankstellen eingesetzt.

7.3.4 Faseroptische Temperaturmessung

Bei der faseroptischen Temperaturmesstechnik¹⁾ wird die Temperaturabhängigkeit bestimmter optischer Eigenschaften von Lichtwellenleitern zur Bestimmung der Temperatur entlang eines Lichtwellenleiters genutzt. Dazu werden kurze Laserlichtimpulse in die Lichtwellenleiter des Sensorkabels eingekoppelt. Ein geringer Teil des Laserlichts wird zurückgestreut. Neben der eingestrahlten Wellenlänge enthält das Rückstreuungsspektrum je ein sogenanntes Stokes- und Anti-Stokes-Band (Raman-Effekt), die in ihrer Wellenlänge jeweils zu geringeren bzw. größeren Wellenlängen hin verschoben sind. Während die Intensität des Stokes-Bandes annähernd temperaturunabhängig ist, zeigt das Anti-Stokes-Band eine eindeutige Temperaturabhängigkeit.

¹⁾ Informationsschrift der Fa. GESO Jena

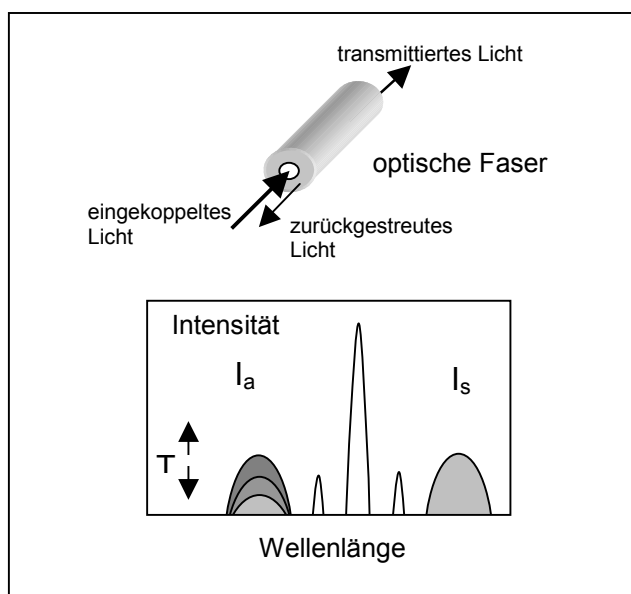


Abbildung 7.3.4.1: Faseroptische Temperaturmessung

Durch Bildung des Quotienten der beiden Intensitäten kann in eindeutiger Weise die Temperatur des Lichtwellenleiterabschnitts, in dem das Licht zurückgestreut wurde, berechnet werden. Das Auswertgerät verknüpft die Intensitätsmessung mit einer Laufzeitmessung des Lichts im Lichtwellenleiter und liefert auf diese Weise die Temperaturen sämtlicher Längenabschnitte.

Das Standardsensorkabel ist elektrisch völlig passiv und kann somit auch in explosionsgeschützter Umgebung sowie in elektromagnetischen Feldern als Temperatursensor zum Einsatz kommen. Erfahrungen aus der Telekommunikationstechnik zeigen, dass die Lebensdauer der Sensorkabel ca. 30 Jahre beträgt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das Kabel an später nicht mehr zugänglichen Stellen eingesetzt werden kann.

Die Leckageerkennung kann indirekt über Temperaturmessung der unmittelbaren Umgebungsluft erfolgen. Ob die Empfindlichkeit in allen Fällen ausreicht, muss im Einzelfall bestimmt werden. Anwendungsfälle zur Emissionsüberwachung sind derzeit nicht bekannt.

7.3.5 Impulsreflexionstechnik

Die Fa. SZE hagenuk bietet eine Messtechnik zur kontinuierlichen Leckageerkennung an, die auf dem Prinzip der Impulsreflexion basiert. Verwendet werden sogenannte TDR-Sensorkabel (Time Domain Reflectometry). Durch Benetzung mit Flüssigkeiten ändern die Sensorkabel ihre Impedanz. Diese Änderung wird mit Hilfe der Impulsechomesstechnik registriert und geortet.

Das LeaCom-System der Fa. SZE hagenuk (Klausdorf bei Kiel) ist ein vollautomatisches Leckerkennungs- und Ortungssystem auf der Basis selektiver, spezieller Sensorkabel und Auswertgeräte. Das System arbeitet ähnlich einem Radarsystem, indem es kurze elektrische Impulse geringer Energie auf ein Sensorkabel aussendet. Auf dem Sensorkabel entstehen aufgrund der Kabeleigenschaften Reflexionen, die in der Auswerteinheit gemessen, digitalisiert und abgespeichert werden. Vor dem Beginn der Überwachung wird ein Echobild der Sensorkabel aufgenommen. Die Reflexion der Impulse auf dem Sensorkabel werden als sogenanntes Urbild in einem Speicher abgelegt. Man kann sich diesen Vorgang als ein elektronisches "Gesundbild" der installierten Kabelkonfiguration vorstellen. Dadurch können installationsbedingte Verschmutzungen der Kabel oder unbeabsichtigte Baufeuchten mit eingemessen werden und führen zu keinem Fehlalarm.

Befindet sich die Einheit in der automatischen Überwachungsmode, werden die aktuellen Echobilder mit der Referenzliste (Urbild) im Speicher verglichen. Eine mögliche Leckage durchfeuchtet das Sensorkabel, und es wird eine Abweichung der Echobilder hervorrufen. Diese Veränderung wird vom System sofort erkannt und löst unverzüglich einen Alarm aus. Dieser wird optisch und akustisch angezeigt und kann gleichzeitig an eine Zentrale weitergemeldet werden.

7.4 Derzeitiger Stand der Überwachung und Verminderung flüchtiger Emissionen in Praxisanlagen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln schon dargestellt wurde, kristallisieren sich drei Ansätze zur Erkennung von Leckagen heraus:

1. Überwachung der Anlage mit Hilfe der Schnüffelmethode nach dem Vorbild der amerikanischen Vorgehensweise
2. Überwachung der Anlagen durch integrale Messverfahren (z.B. FTIR)
3. Kombination von integralen Messverfahren mit der Schnüffelmethode zur lokalen Leckagedetektion

7.4.1 Anlagenüberwachung mit der Schnüffelmethode (Methode 21 der EPA)

Die Praxis der Begrenzung und Überwachung diffuser Emissionen ist in den USA wesentlich älter als in Europa. Im Jahre 1983 wurden in Kalifornien die ersten Vorschriften zur Beschränkung der Emissionen aus Pumpen erlassen. Es wurden VOC-Konzentrationen von maximal 10.000 ppm in der Luft in unmittelbarer Umgebung der Dichtungen gefordert. Diese Emissionsgrenze wurde später von der EPA als bundesweite Norm übernommen. In der Zwischenzeit wurden die Vorschriften verschärft. Zum Beispiel für Raffinerien beträgt der Grenzwert für Pumpen 500 ppm. Die Überwachungsintervalle wurden auf einen Monat festgelegt.¹⁾

7.4.2 Anlagenüberwachung durch integrale Messverfahren

Integrale Verfahren werden zum Beispiel in Dänemark und Schweden, wie in Kapitel 2.3 schon kurz dargestellt wurde, erfolgreich eingesetzt. In der Regel werden optische Verfahren an der Anlagengrenze positioniert, mit denen bestimmte Einzelstoffe detektiert werden können. Mit Hilfe der Detektion der emittierten Stoffe können in

¹⁾ Dierssen, G.E.: Erzielung der Konformität mit den San Francisco Bay Area Emissionsvorschriften in Ölraffinerien. VDI-Bericht 1440, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998, S. 383 - 391

Verbindung mit den verschiedenen anlagentechnischen Daten, wie z. B. Rohrleitungen mit darin enthaltenen Medien, sowie den Produktionsdaten Emissionsquellen eingegrenzt werden.

Ein weiteres integrales Messverfahren wäre auch die kontinuierliche Messung der Gebäudeabluft, wie sie in Kapitel 5.12 vorgestellt wurde. Analog den photooptischen Verfahren ist es mit dieser Methode jedoch nicht möglich, einzelne Anlagenteile bezüglich ihrer Emissionen zu bewerten. Mit Hilfe der Abluftmessung von geschlossenen Produktionsanlagen ist es jedoch möglich, Veränderungen bzgl. des Emissionsverhalten sehr frühzeitig zu erkennen und Maßnahmen zur genauen Leckageerkennung einzuleiten. Auf diese Weise kann zumindest für eingehauste Anlagen der Aufwand zur Leckageerkennung auf ein Minimum reduziert werden.

7.4.3 Kombination von integralen Messverfahren mit der Schnüffelmethode zur lokalen Leckagedetektion

Die Kombination von integralem Messverfahren und Schnüffelmethode wird konkret im Zusammenhang mit der Überwachung von EDC/VCM-Anlagen vorgeschlagen. Die Empfehlungen zur Überwachung von EDC/VCM-Anlagen können in drei Punkte zusammengefasst werden:¹⁾

1. Kontinuierliche Analyse von EDC und VCM in der Umgebungsluft der Produktionsanlage durch online-Geräte an z. B. 10 – 20 Messpunkten
2. Einzelüberprüfung von potenziellen Emissionsquellen mit Hilfe von tragbaren Geräten (z. B. Schnüffelmethode)
3. ggf. Einzelanalysen z. B. durch Aktivkohleprüfröhrchen

¹⁾ EIPPCB: Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemical Industry, Dezember 2000

Ähnliche Vorgehensweisen sind auch in anderen Werken anzutreffen, die ebenfalls mit toxischen Verbindungen umgehen. Dies gilt z. B. für die Herstellung von Acrylnitril und HCN, für die 2 bzw. 10 ppm als Grenzwerte in der unmittelbaren Umgebungsluft festgelegt wurden. Die Herstellung beider Verbindungen unterscheidet sich jedoch von anderen Produktionsverfahren, weil in der Regel bei erniedrigten Drücken synthetisiert wird. Daher sind die niedrigen Grenzwerte auch nicht auf andere Produktionen übertragbar, weil dort z. B. bei höheren Drücken gearbeitet wird.

Die Bestimmung des Emissionsmassenstroms aus diffusen Quellen wird aufgrund des Aufwandes nicht zwingend vorgeschrieben. Sie kann jedoch eine nützliche Information über die aktuelle Höhe des Emissionsmassenstroms im Vergleich zu anderen Quellen sein.

7.4.4 Weitere Methoden der Leckageerkennung

Neben den oben beschriebenen messtechnisch aufwendigen Verfahren zur Leckageerkennung haben sich in der Praxis zwei weitere Verfahren bewährt. Ungewöhnlich, aber in einigen Fällen praktiziert, ist die Begehung mit Hunden, die für diese Aufgabe trainiert wurden. Diese Methode erscheint aus Tierschutzgründen jedoch problematisch.

Eine interessantere und schon seit Jahrzehnten praktizierte Methode ist dagegen das Umkleben von z. B. Flanschverbindungen mit reaktiven Farbbändern.¹⁾ Diese einfache Methode wird beispielweise in der Produktion von Flusssäure eingesetzt. Das zunächst rote Klebeband verfärbt sich im Falle einer Leckage schwarz, so dass die Fehlstelle schnell erkannt und repariert werden kann (**Abbildung 7.4.4.1**).

Neben der Leckageerkennung dient das Band auch gleichzeitig der Dokumentierung des Datums der letzten Wartung der Verbindung, so dass auch vor Ort eine ständige

¹⁾ IMPEL: Diffuse VOC Emissions, Dezember 2000

Kontrolle über die Wartungsintervalle möglich ist.¹⁾ Mittlerweile sind auch VOC-sensitive Farbbänder entwickelt worden.

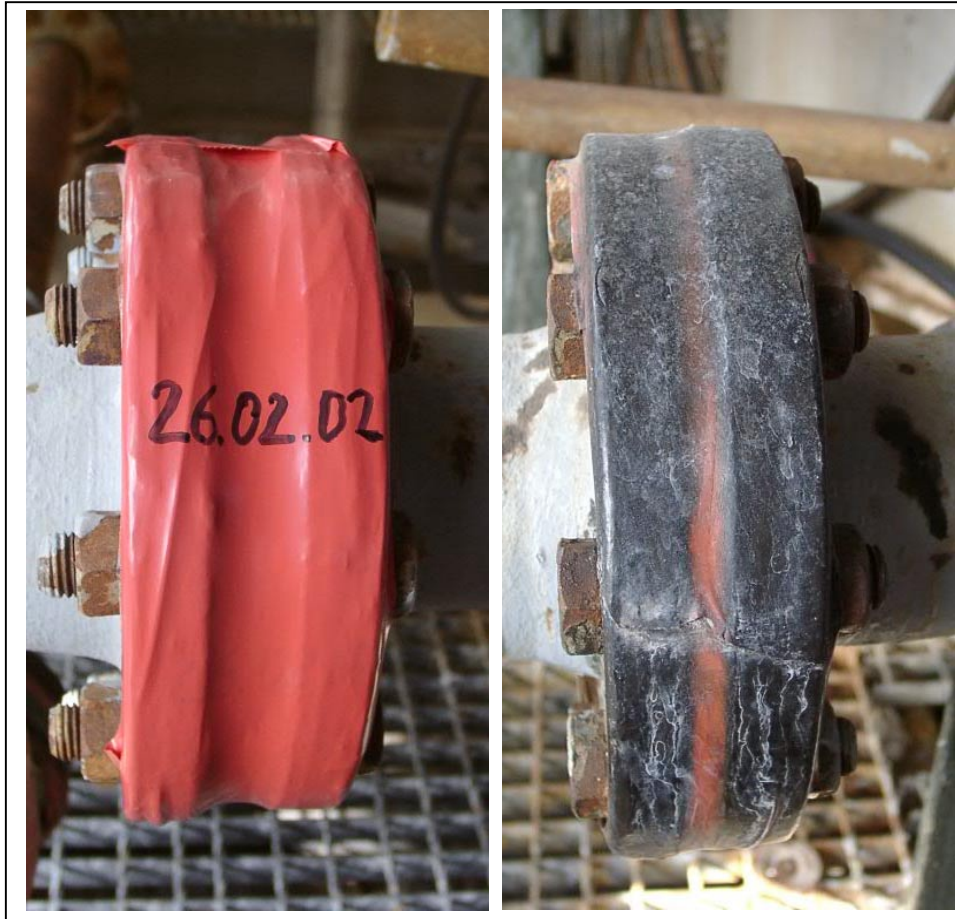


Abbildung 7.4.4.1: Leckageerkennung mit Hilfe eines Farbbandes

Weil die Farbbänder aufgrund der Langzeitfassung der Emissionen schon geringste Leckageraten anzeigen, kann mit Hilfe der Schnüffelmethode der betroffene Flansch gezielt überprüft werden. Eine Kombination von Farbbändern und Schnüffelmethode würde den Aufwand zur Kontrolle einer Produktionsanlage erheblich vermindern. Zweifelsfrei ist die Verfärbungsmethode eines der kostengünstigsten und praktikabelsten Verfahren zur Leckageerkennung. Es ist zu prüfen, ob und wie weit mit diesem Verfahren eine Großzahl der Anwendungsfälle abgedeckt werden kann. Es erscheint durchaus lohnenswert, die Entwicklung dieser Farbbänder weiter voranzutreiben.

¹⁾ Persönliche Mitteilung der Fa. Fluorchemie Stulln GmbH

7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Leckageerkennung und Empfehlungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen und Gespräche, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Es sollte zunächst zwischen sogenannten LDAR-Programmen einerseits und Verfahren zur Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen andererseits unterschieden werden, damit die Wahl des Messverfahrens oder die Methodenauswahl zur Ermittlung der diffusen Gesamtemissionen flexibler gehandhabt werden kann.
2. Wie die meisten vorliegenden Untersuchungen zeigen, wird die Gesamthöhe der Emissionen aus diffusen Quellen überproportional durch wenige lösbare Verbindungen bestimmt. Dies wird von den Untersuchungen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, bestätigt.
3. Bei der Durchführung von LDAR-Programmen wird meist von der Schnüffelmethode als einzige Methode zur Detektion von Leckagen an Flanschverbindungen, Ventilen usw. ausgegangen. Die Schnüffelmethode ist stark von der Wahl des Gerätes, der Sorgfalt des Personals sowie im Falle von Freiluftanlagen von den klimatischen Faktoren, wie z. B. der Windgeschwindigkeit und der Außentemperatur, sowie vom Standort abhängig.
4. Der Aufwand zur Durchführung der Schnüffelmethode hängt von der Zahl sowie von der Zugänglichkeit der zu untersuchenden Dichtungen ab. Ein Teil der lösbaren Verbindungen wird sich wegen der Unzugänglichkeit einer routinemäßigen Überwachung ganz entziehen. Darüber hinaus muss der Aufwand zur Demontage und Wiederherstellung von Isolierungen bei der Anwendung der Schnüffelmethode zur laufenden Überwachung von Produktionsanlagen berücksichtigt werden.
5. Neben der Schnüffelmethode gibt es z. B. mit farbig reagierenden Klebebändern durchaus praktikable und kostengünstige Alternativen, die u. U. sehr

viel präziser schon geringste Leckagen anzeigen. Zudem sind sie weitgehend unabhängig von Witterungseinflüssen sowie von anderen subjektiven Faktoren. Möglicherweise ist für die Verbesserung der Farbbänder noch ein Entwicklungsbedarf erforderlich, um die Anwendbarkeit besonders unter dem Gesichtspunkt der Temperaturbeständigkeit bei möglichst vielen Prozessen zu ermöglichen. Grundsätzlich ist eine Kombination aus Farbbändern und Schnüffelmethode denkbar.

6. Andere jedoch sehr viel aufwendigere, kontinuierliche Messverfahren, wie z.B. das LEOS-Verfahren der Fa. Siemens, sind ebenfalls in der Lage, die Leckagen aus einzelnen lösbaren Verbindungen anzuzeigen und sogar quantitativ zu bestimmen. Das Verfahren ermöglicht es sogar, erdverlegte und isolierte Rohrleitungen zu kontrollieren. Bei der Diskussion über die Möglichkeiten zur Leckagedetektion ergeben sich gerade durch die neueren Verfahren sehr interessante Ansätze.

Denkbar ist, z. B. die Isolierungen, die bei der Schnüffelmethode hinderlich sind, als weiteres System zur Kapselung von Rohrleitungen zu nutzen. Es erscheint möglich, in die Isolierung einen pervorierten Schlauch zu verlegen und diesen an eine kontinuierliche Absaugung anzuschließen, so dass analog zur Deponiegasfassung im Abfallbereich Emissionen in die Atmosphäre vermieden werden (**Abbildung 7.5.1**).

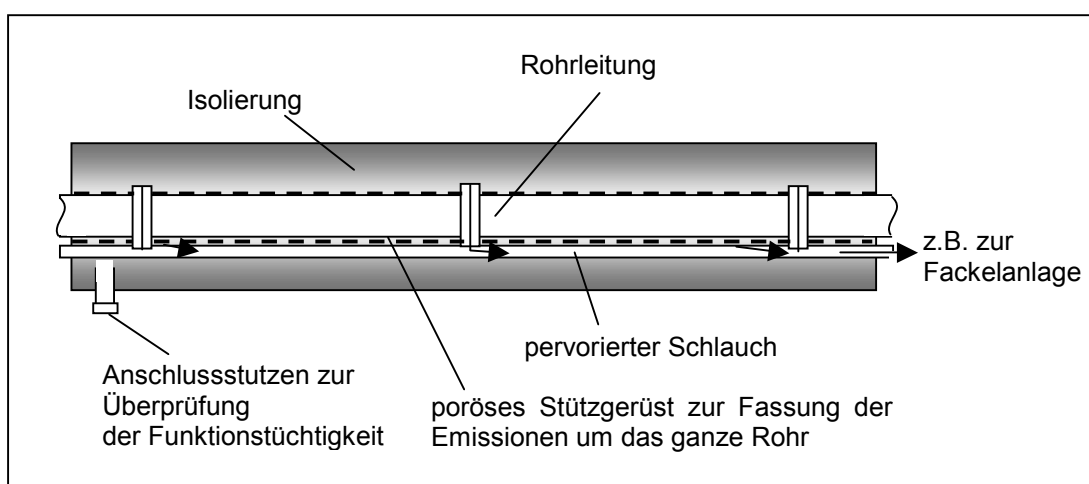


Abbildung 7.5.1: Vorschlag für Absaugsystem von isolierten Rohrleitungen

Damit mögliche Emissionen auch von einem einseitig verlegten Schlauch erfasst werden, müsste die Rohrleitung mit einem Stützgerüst ummantelt werden. Solche flexiblen Stützgerüste werden in der Membrantechnik zur Wasser- und Abwasserbehandlung, z. B. in Wickelmodulen, schon seit Jahrzehnten eingesetzt. Durch die kontinuierliche Absaugung entsteht ein geringer Unterdruck im pervorierten Schlauch, so dass die möglichen diffusen Austritte aus den Flanschverbindungen gefasst und abgeleitet werden können. Diese Überlegung könnte z. B. bei langen Rohrleitungen (Rohrbrücken) ein sinnvoller Lösungsweg sein. In diesem Fall wäre nur die Funktionstüchtigkeit des Schlauches mit Hilfe einer Unterdruckmessung von Zeit zu Zeit zu überprüfen. Auf diese Weise könnten Rohrleitungen mit zahlreichen Flanschen mit Hilfe eines einzigen Schlauchs überwacht werden. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob dieser Vorschlag tatsächlich für die Praxis anwendbar und bezüglich der Kosten vertretbar ist.

7. Integrale Verfahren, die eine Anlage oder Teilanlage betrachten, sind nur in Kombination mit örtlich wirkenden Methoden einsetzbar, um Leckagen zu erkennen. Ihr Vorteil liegt vor allem darin, dass eine online-Messung möglich wird und der Aufwand zur örtlichen Überwachung durch z. B. die Schnüffelmethode erheblich vermindert werden kann.

Aus den hier zusammengefassten Untersuchungsergebnissen wird ein erster Vorschlag zur Implementierung eines LDAR-Programms unterbreitet, der jedoch im Vergleich zu dem derzeitigen Diskussionstand auf europäischer Ebene einige neue Überlegungen enthält:

1. Definition

Anforderungen zur VOC-Emissionsbegrenzung sollten sich bezüglich des Anwendungsbereiches an der Definition der TA-Luft orientieren und für Stoffe gelten, die beim Verarbeiten, Fördern, Umfüllen oder Lagern bei einer Temperatur von 293,15 K einen Dampfdruck von 13 hPa oder mehr haben.

2. Anwendungsbereich

2.1 Bagatellgrenze

Es erscheint sinnvoll, eine Bagatellgrenze im Rahmen der Festlegung des Gültigkeitsbereiches einzuführen. Diese könnte z.B. bei 10 t Produktmenge/Tag liegen. Ein weiterer Vorschlag wäre z. B. die Grenze bei 1.000 t Produkt/Jahr festzulegen.

2.2 Stoffbezogener Anwendungsbereich

Zur Begrenzung des messtechnischen Aufwandes zur Leckageerkennung sollte je nach Gefährlichkeit und photochemischem Ozonbildungspotenzial (POCP) des geförderten Mediums unterschieden werden. Beispielsweise ist es im Rahmen der VOC-Begrenzung nicht erforderlich, diejenigen Leitungen messtechnisch zu überprüfen, die Dampf, Stickstoff, Druckluft oder andere unschädliche Verbindungen beinhalten. In Anlehnung an die TA-Luft (Kabinettsbeschluss) sollten die Anforderungen z. B. bei Stoffen gelten, die

- einen Massengehalt von mehr als 1 vom Hundert an Stoffen nach Nummer 5.2.5 Klasse I, Nummer 5.2.7.1.1 Klasse II oder III oder Nummer 5.2.7.1.3 enthalten,
- einen Massengehalt von mehr als 10 mg je kg an Stoffen nach Nummer 5.2.7.1.1 Klasse I oder Nummer 5.2.7.1.2 enthalten oder
- Stoffe nach Nummer 5.2.7.2 enthalten.

Die Stoffe der Nummer 5.2.5 Klasse I sind in Anhang 4 der TA Luft aufgelistet. Bei den Stoffen der Nummer 5.2.7.1.1 handelt es sich um krebs-erzeugende, bei Nummer 5.2.7.1.2 um erbgutverändernde und bei Nummer 5.2.7.1.3 um reproduktionstoxische Stoffe.

Es ist sicherlich auch möglich, eine andere Stoffliste festzulegen, die sich z.B. an der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) oder der Technischen Richtlinie für Gefahrstoffe (TRGS) orientieren könnte. Denkbar ist auch ein

Modell, das auf die Wirkung von Verbindungen oder Gemischen abgestellt ist. Grundlage hierfür wären z. B. die R-Sätze der Gefahrstoffverordnung.

Unabhängig von der Wahl der Stoffliste erscheint es in jedem Fall sinnvoll, einen stoffbezogenen Anwendungsbereich zu definieren, um die erforderlichen Maßnahmen zur Leckageerkennung auf die problematischen Stoffe zu konzentrieren.

2.3 Physikalischer Anwendungsbereich

Eine Differenzierung nach den jeweiligen Druckverhältnissen innerhalb einer Produktionsanlage erscheint ebenfalls sinnvoll. Überall dort, wo mit Unterdruck gearbeitet wird, können flüchtige Stoffe nicht über diffuse Quellen in die Atmosphäre gelangen. Konkret handelt es sich hierbei um die Vakuumleitungen von Wasserringpumpen, Dampfstrahlern oder anderen unterdruckerzeugenden Aggregaten.

In den Bereichen, in denen ein Unterdruck angelegt ist, könnten Anforderungen an die Überwachung von lösbaren Verbindungen entfallen. Mit dieser Regelung haben die Unternehmen sogar die Möglichkeit, im Einzelfall durch Produktionsumstellungen diffuse Emissionen zu vermeiden.

3. Festlegung von sogenannten Mindestanforderungen

Grundsätzlich sollten örtliche Leckageerkennungsverfahren zur Detektion von Leckagen eingesetzt werden. Weil in Europa derzeit die Schnüffelmethode in Anlehnung an die EPA-Vorschriften favorisiert wird, sollte zur Festlegung einer „Mindestanforderung“ auch von diesem Messverfahren zunächst ausgegangen werden. Damit entzieht sich eine nationale Regelung auch nicht den möglichen europäischen Vorgaben.

In der gegenwärtigen Diskussion zeichnet sich die Tendenz ab, einen sogenannten „Eingreifwert“ zu definieren. Dieser könnte unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse, die in den Abbildungen 7.2.2.1

und 7.2.2.2 dargestellt sind, bei 10.000 ppm liegen. Ab dieser Grenzkonzentration beginnt der Bereich der sogenannten „high leakers“, die im Wesentlichen für die diffusen Emissionen verantwortlich sind. Je nach Gefährlichkeit des Stoffes könnte der Eingreifwert auch niedriger als 10.000 ppm liegen. Aufbauend auf den Vorschriften der EPA ist das Grundmuster zur Überwachung von Anlagenkomponenten in **Abbildung 7.5.2** dargestellt.

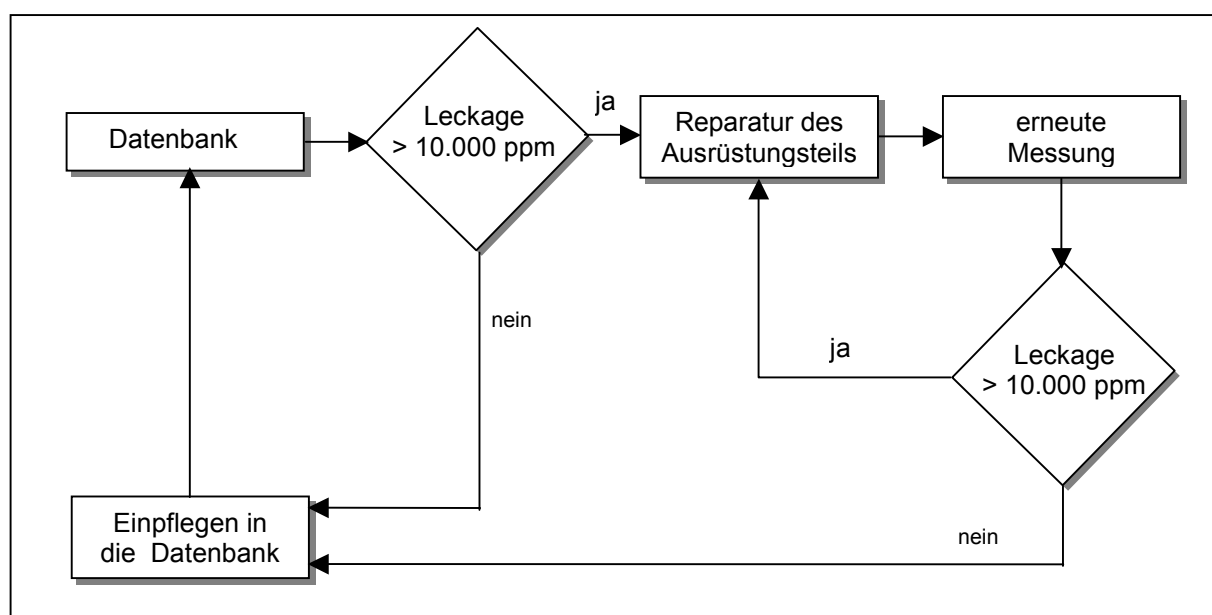


Abbildung 7.5.2: Durchführung eines LDAR – Programmes

Das System der Überwachung sollte eine Anreizwirkung beinhalten. Diese könnte vom Grundsatz her wie folgt aufgebaut sein:

Eine Anlage ist z.B. einmal im Jahr mit Hilfe der Schnüffelmethode möglichst komplett zu vermessen. Erkannte Leckagen werden in diesem Zeitraum oder, wenn dies nicht möglich ist, zumindest bei der nächsten regulären Wartung behoben. An den reparierten Verbindungen wird entsprechend der Vorgehensweise in Abbildung 7.4.2 erneut gemessen und ggf. repariert. Im darauf folgenden Jahr wird die Anlage erneut vermessen. Sollten in weniger als 0,5 % aller Fälle Emissionen über 10.000 ppm detektiert werden, ist eine weitere Untersuchung mit der Schnüffelmethode erst nach Ablauf von 3 Jahren durchzuführen.

Die im oben genannten Beispiel genannten Fristen sollen nur die mögliche prinzipielle Vorgehensweise eines Überwachungsprogramms mit Anreizwirkung aufzeigen. Entscheidend bei der Fristenfestlegung ist die Frage nach der Praktikabilität und nach dem Aufwand. Hierüber wird in Fachkreisen derzeit intensiv und kontrovers diskutiert. Sicherlich muss davon ausgegangen werden, dass ein Teil der Anlage wegen der Unzugänglichkeit einzelner Verbindungen nicht überprüft werden kann. Im oben dargestellten Fall der Aromatanlage sind dies etwa 10 % der Flansche und Ventile. Welche Anlagenteile messtechnisch zu überprüfen sind, sollte für jede Anlage individuell unter dem Gesichtspunkt der Zugänglichkeit zwischen zuständiger Behörde und Anlagenbetreiber geregelt werden.

4. Ersatz der Mindestanforderungen bei Einrichtung einer kontinuierlichen Maßnahme

Bei der Schnüffelmethode erfolgt die eigentliche Messwertaufnahme unabhängig von der Überprüfungshäufigkeit immer nur für wenige Sekunden oder ggf. Minuten (Momentaufnahme). Ob zum Zeitpunkt der Messung gerade ein kritischer Betriebspunkt erreicht wird, ist vor allem bei diskontinuierlichen Produktionsverfahren kaum zu beurteilen. Daher muss es als technischer Fortschritt angesehen werden, wenn Verfahren zur Überprüfung von lösbaren Verbindungen eingesetzt werden, die im günstigsten Fall eine kontinuierliche Überwachung ermöglichen.

Beabsichtigt ein Unternehmen, ein geeignetes Verfahren einzusetzen, das eine nahezu fortlaufende Überprüfung der lösbaren Verbindungen ermöglicht, sollten in diesem Falle die unter Punkt 3 skizzierten Mindestanforderungen entfallen. Der Eignungsnachweis des verwendeten Verfahrens zur örtlichen Leckageerkennung sollte von den Unternehmen bzw. den Herstellerfirmen der Überwachungsverfahren für den jeweiligen Einsatzfall erbracht werden. Die Festschreibung der Schnüffelmethode als Verfahren der Wahl zur Leckageerkennung wird nicht empfohlen, weil sich andere Verfahren, wie z.B. das LEOS-System oder bestimmte Farbbänder, im Einzelfall als praktikabler und sicherer erweisen könnten.

Der Wegfall der Mindestanforderungen sollte auch dann erfolgen, wenn bautechnische Maßnahmen ergriffen werden, die eine kontinuierliche Fassung diffuser Emissionen ermöglichen (vgl. Abbildung 7.5.1). In diesem Fall ist nur das Fassungssystem regelmäßig zu überprüfen. In diesem Zusammenhang ist auch die Fassung der Gebäudeabluft von eingehausten Produktionsanlagen zu erwähnen.

Dem zur Diskussion gestellten Vorschlag zur Kontrolle der lösbaren Verbindungen lagen folgende Überlegungen zugrunde:

1. Vor dem Hintergrund der Bildung bodennaher Ozonschichten müssen VOC-Emissionen auch aus diffusen Quellen vermindert werden. Dies zeigen die zahlreichen Aktivitäten vor allem auf europäischer Ebene.
2. Der europäischen Diskussion über die Implementierung von LDAR-Programmen auf Basis der Schnüffelmethode kann sich auch dieser Vorschlag trotz des damit verbundenen Aufwandes und der eingeschränkten Praktikabilität nicht gänzlich entziehen.
3. Da auch in Fachkreisen die Problematik der Schnüffelmethode bekannt ist, sollten auch Alternativen zur Schnüffelmethode zugelassen werden, wenn ihre Eignung nachgewiesen wurde. Die Eignung sollte sich an dem technischen Fortschritt orientieren, der sich z. B. mit der kontinuierlichen Überwachungsmöglichkeit lösbarer Verbindungen eindeutig nachweisen lässt. Der Fortschritt definiert sich nicht an der Entwicklung aufwendiger Messsysteme, sondern ausschließlich an der fortlaufenden Überprüfung lösbarer Verbindungen. Unter diesem Gesichtspunkt müssen auch die VOC-sensitiven Farbbänder als technischer Fortschritt bewertet werden.

Zum technischen Fortschritt zählen auch Maßnahmen, mit denen diffuse Emissionen gefasst und behandelt werden. Formal handelt es sich dann nicht mehr um diffuse Emissionen.

4. Die Einschränkung des Anwendungsbereiches durch Bagatellgrenze, stoffbezogene und physikalische Differenzierung dient der Fokussierung auf die tatsächlich zu betrachtenden Anlagenteile einer Produktionsanlage.
5. Der zur Diskussion gestellte Vorschlag basiert im Wesentlichen auf mess- und anwendungstechnischen Gesichtspunkten. Gleichwohl darf vor dem Hintergrund, dass nur sehr wenige Quellen den Großteil der diffusen Emissionen verursachen, der Aufwand zur Erkennung dieser „high leakers“ nicht vernachlässigt werden. So versucht der oben vorgestellte Vorschlag auch dem Aspekt der Kosten-Nutzen-Effizienz Rechnung zu tragen.

Dies drückt sich vor allem in dem Punkte 4 des Vorschlages aus, wo alternative Untersuchungsverfahren zugelassen werden sollen. Gleichzeitig wurde im Rahmen des gesamten Berichtes versucht, neue Wege zur Leckageerkennung aufzuzeigen, selbst wenn diese im Einzelfall noch weiter entwickelt werden müssen. Die Erläuterungen der Farbbänder und der konstruktive Vorschlag zur Nutzung der Isolierung von Rohrleitungen zur Fassung und Ableitung von diffusen Emissionen sind Beispiele, die durchaus geeignet sind, dem Kosten-Nutzen-Aspekt Rechnung zu tragen. Unter diesem Gesichtspunkt ist auch die Fassung und Ableitung der Gebäudeabluft von eingehausten Produktionsanlagen zu bewerten.

Der hier vorgestellte Vorschlag wird, wenn er in die Fachgremien eingebracht wird, sicherlich eine intensive und kontrovers geführte Diskussion auslösen. Dies wird vor allem deshalb erwartet, weil dieser Vorschlag über die bisher bekannten Ansätze der LDAR-Programme der EPA sowie der EU-Kommission hinausgeht. Die Öffnung hin zu Alternativen zur Schnüffelmethode und der damit verbundenen Flexibilisierung eines LDAR-Programms fordert die Kreativität der Unternehmen und bietet somit die Chance, effektiv und kostengünstig die VOC-Emissionen aus diffusen Quellen zu erkennen und zu vermindern.

8 Abschätzung der flüchtigen Gesamtemissionen

8.1 Vorbemerkung

Mit der Entscheidung der Kommission (2000/479/EG) über den Aufbau eines europäischen Schadstoffemissionsregisters (EPER) gemäß Artikel 15 (3) der Richtlinie 96/61/EG des Rates über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung konkretisierte die Europäische Kommission die Anforderungen an das Europäische Emissionsregister (EPER):¹⁾

- Die Mitgliedsstaaten berichten der Kommission über die Emissionen in die Luft und in das Wasser aus einzelnen Betriebseinrichtungen.
- Zu berichten sind die Emissionen bestimmter Schadstoffe (insgesamt 50 Schadstoffe, davon 37 für Luftemissionen und 26 für Wasseremissionen), die über vorgegebenen Schwellenwerten liegen (Anhang A1).
- Das Berichtsformat für die Mitgliedsstaaten ist im Anhang A2 der EPER-Entscheidung festgelegt. Die Emissionsfrachten sind für die Abgabe in die Luft sowie in das Abwasser in gemessene, berechnete und geschätzte Daten zu differenzieren. Die Abwasserfrachten von Direkt- und Indirekteinleitern sind separat auszuweisen.
- Der erste Bericht ist im Juni 2003 vorzulegen und soll Angaben über Emissionen im Jahr 2001 (bzw. wahlweise 2000 oder 2002) enthalten. Jeder Mitgliedsstaat muss zudem einen zusammenfassenden nationalen Übersichtsbericht erstellen.
- Die Europäische Kommission wird die Emissionsdaten über das Internet der Öffentlichkeit zugänglich machen.

¹⁾ Guidance Document for EPER Implementation According to Article 3 of Commission Decision of 17 July 2000 (2000/479/EC), European Commission, Directorate-General for Environment, 95 pp, November 2000, ISBN 92-894-0279-2

Vor dem Hintergrund diffuser VOC-Emissionen sind in der Liste der Schadstoffe (Anhang A1) folgende Parameter und Schwellenwerte relevant:

- Methan (CH₄) 100.000 kg/a
- VOC_{methanfrei} (NMVOC) 100.000 kg/a
- Benzol 1.000 kg/a

Im Anhang A3 des EPER werden alle berichtspflichtigen Emittenten nach Kategorien entsprechend der IPPC-Richtlinie aufgeführt, darunter auch Raffinerien sowie die chemische Industrie. Im Anhang 4 des EPER werden den einzelnen berichtspflichtigen Emittenten spezifische Luftschadstoffe aus der 37 Einzelparameter umfassenden Stoffliste zugewiesen. Für die Branchen 1.2 (Raffinerien) und 4.1 (chemische Industrie) sind dies zwischen 18 und 29 Parameter, wobei aus der Gruppe der VOC immer NMVOC und Benzol verpflichtend sind, nicht jedoch Methan. Methan ist lediglich für Verbrennungsanlagen (> 50 MW), Kohleöfen, Deponien sowie Intensivtierhaltung ein berichtspflichtiger Parameter.

In Anhang 3 des Guidance Document for EPER Implementation befinden sich Methodenvorschläge zur Bestimmung der verschiedenen Parameter. Für den Summenparameter NMVOC wird das FID-Verfahren genannt (Richtlinie EN 12619 vom Sept. 1999), mit dem die TOC-Konzentration bestimmt wird. Um den Gehalt an NMVOC zu erhalten, muss vom TOC oder VOC die Konzentration an Methan abgezogen werden. Die FID-Hersteller haben dieses zum Teil bereits berücksichtigt und Geräte entwickelt, die eine Kombination von FID mit Konverter oder Katalysator vorsehen und darüber eine Korrektur des TOC um den Methananteil vornehmen. Diese Geräte zeigen TOC, Methan-C, und TOC_{methanfrei} an.

Dabei ist zu beachten, dass das FID-Verfahren mit Propan kalibriert wird (Nr. 5.2.4 der EN 12619) und dass Methan und Propan unterschiedliche Responsefaktoren besitzen. Da z.B. die Daten aus der Schnüffelmethode der EPA mit einem Methankalibrierten FID erhoben wurden, sind die Ergebnisse mit einem propankalibrierten FID nicht ohne Weiteres vergleichbar. Zur Bestimmung von Emissionsfaktoren oder Quellstärken ist es daher immer notwendig, auf den emittierenden organischen Stoff (z.B. Benzol) bzw. organischen Stoffmix zu kalibrieren. Stationäre FID-Meßgeräte

z.B. an Kaminen werden mit Propan-Prüfgasen kalibriert, die Ergebnisse der VOC- oder TOC-Konzentration sind somit zunächst ppm-Propanäquivalente und die Angabe des TOC erfolgt in mg C/m³. Auch hier ist es möglich, mittels Responsefaktoren die Konzentrationen diskreter VOC (z.B. Benzol) zu berechnen.

8.2 Abschätzmethoden

Mit Hilfe verschiedener Verfahren lassen sich mit unterschiedlicher Genauigkeit die diffusen Gesamtemissionen einer Chemieanlage oder Raffinerie abschätzen, wobei die tatsächliche Gesamtemission mit keiner Methode ermittelt werden kann. Es handelt sich somit um Verfahren zur möglichst weitgehenden Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse. Allgemein wird davon ausgegangen, dass mit steigendem messtechnischen Aufwand eine höhere Genauigkeit erreicht werden kann.

In der Literatur werden verschiedene Methoden zur Ermittlung der flüchtigen Emissionen vorgeschlagen, die in **Abbildung 8.2.1** zusammengestellt sind. Die wichtigsten Methodenvorschläge sind von der United States Environmental Protection Agency (EPA) und dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) entwickelt worden. Alle Methoden für die Ermittlung der flüchtigen Gesamtemissionen einer Anlage stützen sich auf ein Verzeichnis der lösbaren Verbindungen und Bauteile der Anlage. EPA und VDI verwenden Emissionsfaktoren, die deutliche Unterschiede aufweisen, von verschiedenen Größen abhängig sind und somit zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Methoden zur Abschätzung der flüchtigen Gesamtemissionen zunächst vorgestellt. Für den Vergleich der verschiedenen Abschätzungsmethoden wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine große Anzahl von Flanschen und Ventilen in einer Armonatenanlage mit Hilfe der Schnüffel- und der Einpackmethode untersucht. Sie dienen als Grundlage für die Ermittlung der diffusen Gesamtemissionen. Die Ergebnisse werden anschließend vorgestellt und kritisch diskutiert. **Abbildung 8.2.1** gibt einen Überblick über die vorhandenen Abschätzungsverfahren.

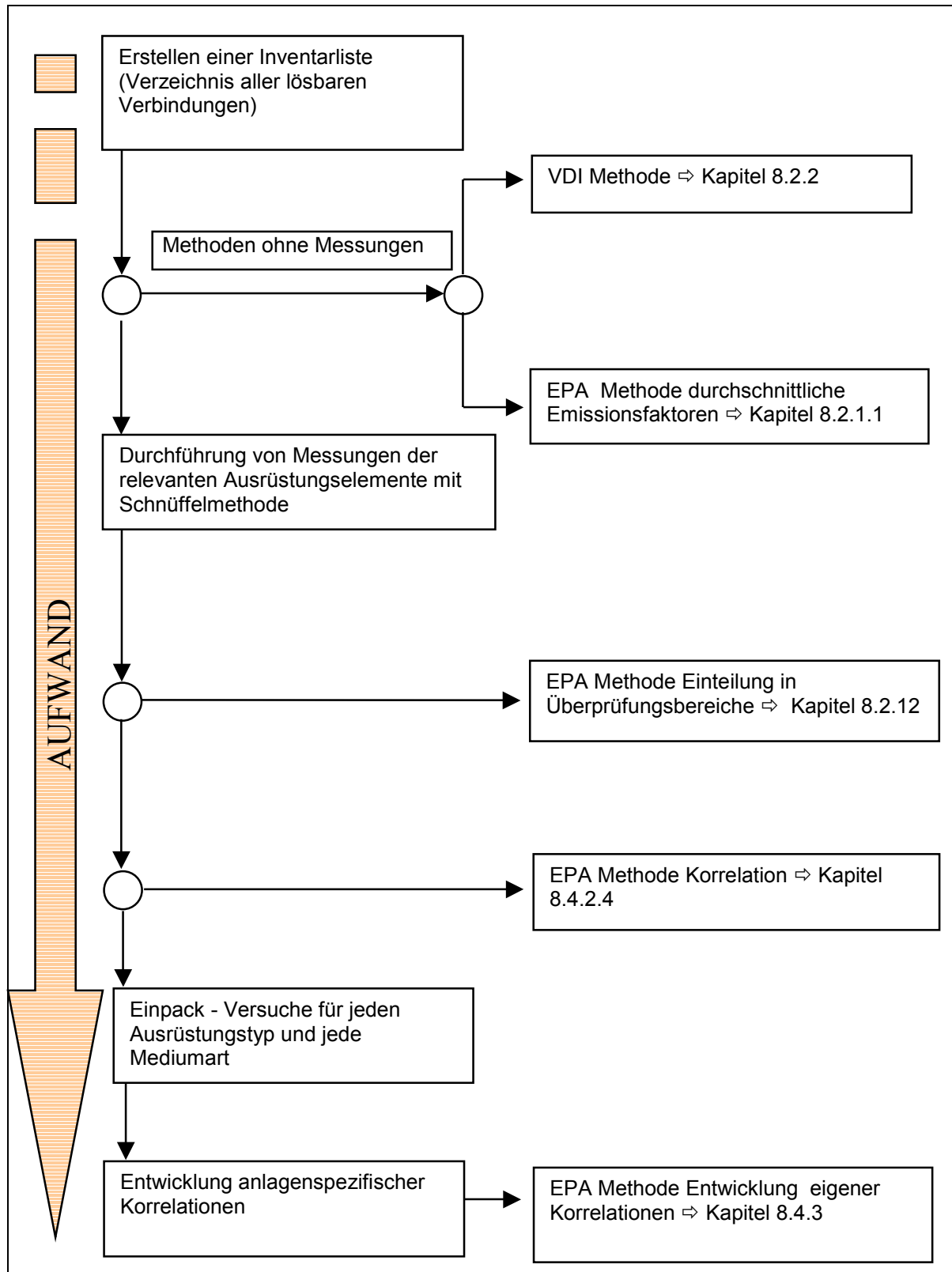


Abbildung 8.2.1: Überblick der Methoden zur Ermittlung von flüchtigen VOC-Emissionen

Die Verfahren zur Abschätzung der flüchtigen Emissionen unterscheiden sich vor allem dadurch, dass die meisten Methoden der EPA einen erheblichen messtechnischen Aufwand erfordern. Die VDI-Methode, die für Raffinerien entwickelt wurde, basiert die Abschätzung allein auf dem angelegten Verzeichnis aller lösbaren Verbindungen, den Armaturentypen und ihren zugehörigen Emissionsfaktoren.

Im Allgemeinen werden flüchtige Emissionen abgeschätzt, indem für einen bestimmten Ausrüstungstyp, der eine potentielle Quelle für Emissionen darstellt, die Anzahl und der spezifische Emissionsfaktor ermittelt und diese miteinander multipliziert werden. Anschließend werden die Emissionen der verschiedenen Armaturentypen zusammengefasst und mit den Betriebsstunden multipliziert. Auf diese Weise wird die flüchtige Gesamtemission einer Anlage ermittelt.

Die anzuwendenden Gleichungen lauten:

$$TE = \sum_i (N_i \cdot EF_i) \cdot WT_i \quad (1)$$

$$E_i = N_i \cdot EF_i \quad (2)$$

TE	Gesamtemission der Anlage in kg/a
WT _i	Betriebsstunden für Ausrüstungsteil in h/a
E _i	Gesamtemission aller Ausrüstungsteile eines Armaturentyps in kg/h
N _i	Anzahl des Armaturentyps einer Anlage
EF _i	spezifischer Emissionsfaktor für Armaturentyp in kg/h

Folgende Armaturentypen sind zu betrachten:

- Pumpen
- Kompressoren
- Sicherheits- / Druckentlastungsventile
- Flansche
- Ventile
- Probenahmestellen
- Blindflansche

Diese verschiedenen Armaturentypen besitzen unterschiedliche Emissionsfaktoren, die im Rahmen von Studien ermittelt und veröffentlicht wurden. Ausschlusskriterien für Armaturen bestehen, wenn sie z. B. durch ihre Bauart, Betriebsart oder andere zusätzliche Maßnahmen wie Kapselung oder geschweißte Flansche emissionsfrei ausgeführt sind.

8.2.1 Methode 21 der EPA

Die EPA schlägt insgesamt vier Näherungen zur Ermittlung der flüchtigen Emissionen vor, die jeweils mit unterschiedlichem Aufwand durchzuführen sind und eine Verfeinerung (von a nach d) der Genauigkeit zur Ermittlung der flüchtigen VOC-Emissionen darstellen sollen:

- a) Ermittlung mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren
- b) Ermittlung durch Einteilung in Messbereichsintervalle
- c) Ermittlung mit durchschnittlichen EPA-Korrelationsfaktoren
- d) Ermittlung mit anlagenspezifischen Korrelationsfaktoren.

Für die verschiedenen Ausrüstungsteile werden abhängig von dem Aggregatzustand des geförderten oder zu verarbeitenden Stoffes unter Prozessbedingungen verschiedene Emissionsfaktoren angegeben. Es wird dabei in drei Kategorien unterteilt:

- | | | |
|-----------------|---|---|
| ➤ gasförmig | ⇒ | alle unter Prozessbedingungen gasförmigen Stoffe |
| ➤ leichtflüssig | ⇒ | Stoffe mit einem Dampfdruck ≥ 3 kPa bei 20°C |
| ➤ schwerflüssig | ⇒ | Stoffe mit einem Dampfdruck < 3 kPa bei 20°C |

Von der EPA werden diese Emissionsfaktoren für verschiedene Industrieanlagen bereitgestellt.¹⁾ Sie wurden aus zahlreichen Einzelmessungen in Praxisanlagen, die nach der Einpackmethode während des laufenden Betriebes gemessen wurden, gemittelt. Es wird unterschieden in Raffinerien, Anlagen der organischen Chemie, Lager- und Verladeeinrichtungen. Die Daten für Lager- und Verladeeinrichtungen

¹⁾ Protocol for Equipment Leak Emission Estimates; EPA-453/R-95-017; Nov. 95; EPA

sind zur Zeit noch nicht vollständig. Dafür sind die Emissionsfaktoren für Raffinerien und Anlagen der organischen Chemie schon seit den 80er Jahren entwickelt worden und einer ständigen Weiterentwicklung unterworfen. Im Allgemeinen sind die Emissionsfaktoren für Raffinerien höher als die Emissionsfaktoren für Anlagen der organischen Chemie.

8.2.1.1 Ermittlung mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren

Bei dieser einfachen Methode zur Ermittlung flüchtiger Emissionen werden die von der EPA entwickelten durchschnittlichen Emissionsfaktoren in Kombination mit folgenden anlagenspezifischen Daten verwendet:

- Anzahl von Armaturen/Ausrüstungsteilen jeden Typs der Anlage (Ventile, Flansche, Pumpen etc.)
- Zustand des Mediums, welches die Armatur durchströmt (gasförmig, leicht flüssig, schwer flüssig)
- VOC-Massenanteil (auch bei Gemischen) des geförderten Medium und Betriebsstunden.

Es werden von der EPA für verschiedene Industriebereiche spezifische Emissionsfaktoren angegeben, wie z. B. für die organische Chemie, Raffinerien, Verladeanlagen, Öl- und Gasproduktionsanlagen. Diese ergeben eine Abschätzung über die VOC-Emissionsraten, wogegen die Emissionsfaktoren von Raffinerien eine Abschätzung über die NMVOC-Emissionsraten liefern. Der Unterschied besteht darin, ob Methan in die Abschätzung mit einbezogen wird oder nicht. International ist die Einbeziehung von Methan noch nicht einheitlich geregelt.

Der Massenanteil der flüchtigen Verbindungen innerhalb der Anlagenteile und Rohrleitungen spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Lösbare Verbindungen und Ausrüstungsteile, die von einem Medium mit höheren VOC-Konzentrationen durchflossen werden, tendieren auch zu höheren Emissionen.¹⁾ Wenn diese Methode ein-

¹⁾ Handbook; Control Techniques for Fugitive VOC Emissions from Chemical Process Facilities; EPA/625/R-93/005; March 1994; EPA

gesetzt wird, sollten die Ausrüstungsteile in „Medienströme“ mit gleichen Massenanteilen zusammengefasst werden.

Folgende Gleichung sollte für die Abschätzung der Emissionen genutzt werden:

$$E_{TOC,i} = F_{A,i} \cdot WF_{TOC,i} \cdot N_i \quad (3)$$

E_{TOC} Emissionsrate aller Kohlenstoffverbindungen aller Ausrüstungsteile eines Typs i im gleichen Medienstrom in kg/h

Für Raffinerien gilt: Der Emissionsfaktor „ F_A “ muss für alle organischen Verbindungen im Medienstrom angepasst werden, weil die Faktoren für Raffinerien nicht für methanhaltige Massenströme gelten. Diese Anpassung sollte nur bis zu einem Massenanteil von 0,1 von Methan durchgeführt werden, auch wenn der Methananteil größer als 0,1 ist.

$$F_A = F_{AR} \cdot \frac{WF_{TOC}}{WF_{TOC} - WF_{Methan}} \quad (4)$$

$F_{A,i}$	durchschnittlicher Emissionsfaktor eines Ausrüstungsteils des Typs i in (kg/h/Quelle)
F_{AR}	durchschnittlicher Emissionsfaktor eines Ausrüstungsteils eines Typs für Raffinerien (kg/h/Quelle)
$WF_{TOC,i}$	durchschnittlicher Massenanteil der Kohlenstoffverbindungen des Medienstroms der Ausrüstungsteile vom Typ i durchströmt
WF_{Methan}	durchschnittlicher Massenanteil von Methan im Medienstrom
N_i	Anzahl der Ausrüstungsteile des gleichen Typs i im Medienstrom

Die Emissionsfaktoren der Industrieanlagen der organischen Chemie (SOCMI)¹⁾ sind in **Anhang 2** aufgeführt. Die für Raffinerien und andere chemische Anlagen geltenden Emissionsfaktoren sind im Protocol for Equipment Leak Emission Estimates der EPA aufgelistet. Die Anpassung der Emissionsfaktoren für Raffinerien ist notwendig, weil bei der Entwicklung dieser Faktoren Methan herausgerechnet wurde.

¹⁾ Synthetic Organic Compound Manufacturing Industry

8.2.1.2 Ermittlung durch Einteilung in Überprüfungsbereiche

Diese Ermittlungsmethode wird häufig als Zweibereichsmethode, unter dem Namen „Leck/kein Leck“-Abschätzung, eingesetzt. Sie bedeutet eine Verfeinerung gegenüber der Ermittlung mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren. Durch die Einbeziehung von Schnüffelmessungen erfolgt eine bessere Anpassung. Dazu wurde eine Leckagegrenze festgelegt, die 10.000 ppm Methanäquivalente beträgt. Bei der Anwendung dieser Methode wird davon ausgegangen, dass Ausrüstungsteile, an denen die Messwerte der Konzentration größer 10.000 ppm festgestellt wurden, eine wesentlich höhere Leckagerate besitzen als Anlagenkomponenten mit Konzentrationen unter 10.000 ppm.

Es gibt die Möglichkeit, durch Unterteilung in drei Bereiche die Genauigkeit dieser Ermittlungsmethode zu erhöhen. Üblich sind die drei Bereiche 0 - 1.000 ppm, 1.000 - 10.000 ppm und über 10.000 ppm. Es werden von der EPA für jeden Bereich Emissionsfaktoren vorgeschlagen, die wie im Fall der Leck/kein Leck-Methode zu verwenden sind.

Für die verschiedenen Industriezweige gibt es spezifische Emissionsfaktoren, wobei auch hier darauf hingewiesen sei, dass die Emissionsfaktoren für Raffinerien Ergebnisse liefern, die Methan nicht einbeziehen.

Die Ermittlung mittels der Einteilung in Bereiche ist in ähnlicher Weise anzuwenden wie die Abschätzung mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren. Die Anzahl der Ausrüstungsteile gleichen Typs werden mit dem entsprechenden Emissionsfaktor multipliziert. Aus allen Gesamtemissionen der einzelnen Ausrüstungstypen multipliziert mit den Betriebsstunden setzt sich die Gesamtemission der Anlage zusammen. Nach folgender Gleichung können die diffusen Emissionen der Ausrüstungstypen abgeschätzt werden:

$$E_{\text{TOC},i} = (F_{\text{G},i} \cdot N_{\text{G},i}) + (F_{\text{L},i} \cdot N_{\text{L},i}) \quad (5)$$

$E_{\text{TOC},i}$	Emissionsrate der Kohlenstoffverbindungen für jeweiligen Ausrüstungstyp i in (kg/h) organischen Kohlenstoff
$F_{G,i}$	Emissionsfaktor für Quellen mit einer gemessenen Konzentration größer oder gleich 10.000 ppm Methanäquivalente (kg/h/Quelle)
$F_{GR,i}$	Emissionsfaktor für Quellen mit einer gemessenen Konzentration größer oder gleich 10.000 ppm Methanäquivalente (kg/h/Quelle) für Raffinerien

Für Raffinerien gilt: Der Emissionsfaktor „ F_G “ muss für alle organischen Verbindungen im Medienstrom angepasst werden, weil die Faktoren für Raffinerien nicht für methanhaltige Massenströme gelten. Diese Anpassung sollte nur bis zu einem Massenanteil von 0,1 von Methan durchgeführt werden, auch wenn der Methananteil größer als 0,1 ist.

$$F_G = F_{GR} \cdot \frac{WP_{\text{TOC}}}{WP_{\text{TOC}} - WP_{\text{Methan}}} \quad (6)$$

WP_{TOC}	Masseanteil an Kohlenstoffverbindungen im Stoffstrom
WP_{Methan}	Masseanteil an Methan im Stoffstrom
$N_{G,i}$	Anzahl der Ausrüstungsteile eines Typs i mit einer gemessenen Konzentration größer oder gleich 10 000 ppm Methanäquivalente (kg/h/Quelle)
$F_{L,i}$	Emissionsfaktor für Quellen mit einer vermessenen Konzentration kleiner 10.000 ppm Methanäquivalente (kg/h/Quelle)
N_L	Anzahl der Ausrüstungsteile eines Typs i mit einer gemessenen Konzentration kleiner 10.000 ppm Methanäquivalente (kg/h/Quelle)

Die zu verwendenden Emissionsfaktoren der SOCM I sind in **Anhang 3** aufgeführt. Die für Raffinerien und andere chemische Anlagen geltenden Emissionsfaktoren sind dem EPA-Handbuch: Control Techniques for Fugitive VOC Emissions from Chemical Process Facilities; EPA/625/R-93/005; März 1994 zu entnehmen.

8.2.1.3 Ermittlung nach der EPA-Korrelationsmethode

Diese Methode bietet eine zusätzliche Verfeinerung bei der Ermittlung der flüchtigen Emissionen. Durch die Bereitstellung einer Gleichung für die Vorhersage von VOC-

Emissionsraten als Funktion der Konzentrationsmesswerte, die mit Hilfe der Schnüffelmethode ermittelt wurden, wird jede potentielle Quelle individuell bewertet. Entsprechende Korrelationsfaktoren werden von der EPA angegeben. Folgende Gleichung dient zur Berechnung der Leckageraten einzelner Ausrüstungsteile:

$$E_{TOC,i} = A_i \cdot \text{Messwert}^{B_i} \quad (7)$$

$E_{TOC,i}$	Leckagerate eines Ausrüstungstyps i in kg/h organischen Kohlenstoff
$A_i; B_i$	konstante Werte für den jeweiligen Ausrüstungstyp, abhängig von Medienzustand (gasförmig, leichtflüssig, schwerflüssig)
Messwert	der Messwert ist i.d.R. in ppm FID Methanäquivalenten einzusetzen. Der Responsefaktor für die nachzuweisende Substanz sollte beachtet werden.

Die zu verwendenden Korrelationen der SOCM I sind in **Anhang 4** aufgeführt. Die für Raffinerien und andere chemische Anlagen geltenden Emissionsfaktoren sind dem EPA-Handbuch: Control Techniques for Fugitive VOC Emissions from Chemical Process Facilities; EPA/625/R-93/005; März 1994, zu entnehmen.

Eine Anpassung der Messwerte muss erfolgen, wenn Substanzen nachgewiesen werden sollen, die einen Responsefaktor größer 3 besitzen (FID-/PID-Responsefaktor). Ansonsten werden Schnüffelkonzentrationsmesswerte eingesetzt, die in Methanäquivalenten angegeben sind. Diese Vereinfachung wurde getroffen, da nicht für jedes Ausrüstungsteil die genaue Zusammensetzung des abzudichtenden Stoffgemisches bekannt ist.

Diese Ermittlungsmethode sollte bevorzugt verwendet werden, wenn aktuelle Messwerte von Ausrüstungsteilen verfügbar sind. Die Korrelationen können genutzt werden, um die Emissionen abzuschätzen in einem Wertebereich ab 0 ppm bzw. ab Nachweisgrenze des verwendeten Messgerätes bis zum höchsten gemessenen Wert eines Ausrüstungsteils. Für Messwerte mit 0 ppm werden Null-Emissionsraten eingesetzt; für Messwerte, die oberhalb der größten zu messenden Konzentration des verwendeten Messgerätes liegen, sind Maximum-Emissionsraten zu verwenden.

Die Null-Emissionsleckrate ist eine VOC-Emissionsrate, die für Ausrüstungsteile mit einem Messwert von 0 ppm gilt. Dies gilt für jeden Messwert, der kleiner oder gleich der Hintergrundkonzentration der Umgebung ist. Mathematisch ergibt die Korrelation für einen Messwert von 0 ppm auch eine Emissionsrate von 0 kg/h. Festgestellt wurde aber, dass Ausrüstungsteile, bei denen durch Messungen mit der Schnüffelmethode ein Messwert von 0 ppm gemessen wurde, trotzdem Emissionen besitzen. Es wurden daher durch die EPA speziell von Ausrüstungsteilen mit Null-Emissionen Daten gesammelt und zusammengefasst, um eine Null-Emissionsleckrate zu bestimmen.

Die Maximum-Emissionsrate ist eine VOC-Emissionsrate, die für Ausrüstungsteile mit einem Messwert außerhalb des Messbereichs eines Messgerätes liegt. Im Falle, dass der maximale Messwert des Messgerätes 10.000 ppm beträgt, sollte eine Verdünnungssonde eingesetzt werden, um den Messbereich auf 100.000 ppm zu erweitern. Somit kann man die Korrelation für die Messwerte zwischen 10.000 und 100.000 ppm zur Bestimmung der Emissionen verwenden. Für beide Fälle sind Emissionsraten für Ausrüstungsteile mit Messwerten außerhalb des Messbereichs für 10.000 und 100.000 ppm angegeben.

Die Werte für die Null-Emissionsrate und für die Maximum-Emissionsrate der SOCMI sind in Anhang 4, Tabelle 2 aufgeführt.

8.2.2 Ermittlung nach der VDI Richtlinie 2440

Die VDI Richtlinie 2440 wurde entwickelt, um die Emissionen einer Raffinerie zu mindern. Dabei wird auf alle Emissionsquellen einer solchen Anlage eingegangen. Als Teilgebiet werden auch Aussagen zu infrastrukturellen Einrichtungen und Nebenanlagen getroffen. Den verschiedenen Armaturentypen werden durchschnittliche Emissionsfaktoren zugeordnet. Anders als bei den Emissionsfaktoren der EPA sind diese von dem mittleren Dichtungsumfang abhängig. Das bedeutet, dass nicht nur Anzahl, sondern auch die Abmessungen der Dichtungen bekannt sein müssen, um eine Ermittlung der diffusen Emissionen vornehmen zu können. Es wird im Gegensatz zu der EPA-Methode nicht unterschieden, welchen Aggregatzustand das von

der Dichtung gefasste Medium hat. Es werden Faktoren angegeben die teilweise nach der Bauart der einzelnen Armaturen/Ausrüstungstypen differenziert werden. Für hochwertige Dichtungen, wie z. B. Ring-Joint-Dichtungen, Spießblech mit Innenbördel usw. werden niedrigere Emissionsfaktoren angesetzt als bei einfacheren Dichtungen. Dies erscheint vor allem deshalb sinnvoll, weil primär das verwendete Dichtungssystem für die Höhe der potentiellen Leckage verantwortlich ist.

Für folgende Armaturen können die Emissionsfaktoren dem **Anhang 5** entnommen werden:

- Pumpen
- Kompressoren
- Absperr- und Regelorgane (Ventile)
- und Flansche.

Die diffusen Emissionen werden nach VDI als Summe der Emissionen der einzelnen Dichtelemente berechnet. Messungen für eine Bewertung der tatsächlichen Emissionen sind nicht vorgesehen. Aus den Rohrleitungs- und Instrumentierungsdiagrammen ist ein Verzeichnis aller Dichtelemente zu erstellen. Die jeweilige Anzahl wird dann mit den entsprechenden Emissionsfaktoren und mittleren Dichtungslängen multipliziert. Folgende Gleichung ist für die Ermittlung zu verwenden:

$$E_{TOC,x} = F_x \cdot ASC_x \cdot N_x \quad (8)$$

$E_{TOC,x}$	Emissionsrate der Kohlenstoffverbindungen für den jeweiligen Ausrüstungstyp x in mg/s
F_x	Emissionsfaktor eines Ausrüstungsteils eines Typs x in mg/(s·m)
ASC_x	mittlerer wirksamer Dichtungsumfang in m
N_x	Anzahl der Ausrüstungsteile des gleichen Typs x im Medienstrom

Beachtet werden sollte, dass die hier angegebenen Emissionsfaktoren auf den mittleren Dichtungsumfang bezogen werden und in mg/(s·m) angegeben werden. Um die Leckageraten der einzelnen Armaturen/Ausrüstungsteile mit den Leckageraten der EPA vergleichen zu können, ist einfach ein Umrechnungsfaktor hinzuzufügen. Für

Flansche und Ventile beträgt dieser Faktor = 0,0036. Auf diese Weise erhält man eine Leckagerate in der Einheit kg/h für den jeweiligen Ausrüstungstyp mit dem entsprechenden Dichtungsumfang.

Emissionsfaktoren für Kappen und Blindflansche werden nicht angegeben, da vorausgesetzt wird, dass diese dichtgesetzt wurden und somit keine Emissionen hervorrufen. Armaturen, die ein Zertifikat besitzen, dass sie den Anforderungen der TA Luft genügen, wird ein geringerer Emissionsfaktor zugeordnet als nicht geprüften Bauteilen.¹⁾

8.3 Einflussfaktoren auf die Schnüffelmethode

Bei der Anwendung der Schnüffelmethode werden tragbare VOC-Analysatoren, die nach dem FID- oder PID-Messprinzip arbeiten, eingesetzt. Es ist eine der einfachsten Methoden zur Bewertung von diffusen Emissionen, die auf der Ermittlung der VOC-Konzentration im Nahbereich der lösbaren Verbindungen basiert. Die Bedeutung der Schnüffelmethode liegt in erster Linie in der präzisen Leckageortung der maximalen Emission am Ausrüstungselement. Die Bestimmung der Konzentrationen an lösbaren Verbindungen ist, wie unter Kapitel 7 schon erläutert wurde, vom Abstand sowie von der Abtastgeschwindigkeit abhängig. Darüber hinaus ist der Einfluss der Responsefaktoren zu beachten.

Die verwendeten Messgeräte sind mit einem Standardgas bekannter Konzentration zu kalibrieren. Auf andere Gase als die des Standards reagiert das Messgerät mehr oder weniger empfindlich. Um die wahre Konzentration zu ermitteln, müssen substanzspezifische Responsefaktoren benutzt werden. Die meisten Hersteller der FID und PID-Geräte geben in der Betriebsanleitung Responsefaktoren für gängige Substanzen an. Dieser Faktor sollte auf jeden Fall vor dem Einsatz überprüft werden, da es gerätespezifische Abweichungen geben kann. Ist kein Responsefaktor ange-

¹⁾ Emissionsminderung Mineralölraffinerien; VDI 2440; November 2000; VDI

geben, muss er im Labor ermittelt werden. Der Responsefaktor ist definiert durch folgende Gleichung:

$$RF = \frac{\text{tatsächliche Konzentration (ppmv)}}{\text{gemessene Konzentration (ppmv)}} \quad (9)$$

Ein Responsefaktor von 1,0 bedeutet, dass der Anzeigewert des Messgerätes identisch mit der tatsächlichen Konzentration der chemischen Komponente ist. Responsefaktoren unter 1,0 bedeuten, das Messgerät reagiert empfindlicher auf die Substanz und zeigt deshalb einen größeren Wert als die tatsächliche Konzentration an. Ein Responsefaktor der größer als 1,0 ist bedeutet, dass der Anzeigewert geringer als die tatsächliche Konzentration ist. Je höher der Responsefaktor eines Stoffes ist, um so weniger effektiv kann er durch das Messgerät detektiert werden. Für die Methode 21 der EPA, sind nur Messgeräte mit Responsefaktoren kleiner 10 zugelassen.

Bei der Verwendung von Messgeräten, die einen Responsefaktor größer 3 für die nachzuweisenden Stoffe oder Stoffgemische besitzen, muss eine Korrektur der Messwerte mittels des Responsefaktors erfolgen. Wird keine Anpassung durchgeführt, ist der Anzeigewert deutlich zu klein, und die Berechnung der Gesamtemissionen ergibt ein zu niedriges Ergebnis.

Ist der Responsefaktor kleiner 1, ist das Ergebnis ohne Anpassung der Messwerte zu hoch. Besonders macht sich dies bei der EPA-Korrelationsmethode bemerkbar. Bei der Vielzahl von unterschiedlichen Stoffgemischen, die in einer Chemieranlage vorkommen können, wird oft infolge des hohen Aufwandes auf eine Anpassung des Responsefaktors verzichtet, da dies für jede Komponente eines Stoffgemisches und die verschiedenen Zusammensetzungen erfolgen müsste. Wie diese Anpassung zu erfolgen hat, wird in Kapitel 2.4.2 des EPA Dokumentes EPA 453/R-95-017 [1] erläutert.

Responsefaktoren sind gerätespezifisch und deshalb nicht von Gerät zu Gerät übertragbar. Sie gelten meist nur für das Gerätemodell eines Herstellers und nicht für alle FID oder PID gleich.

8.4 Untersuchungen in einer Aromatanlage

8.4.1 Untersuchungsergebnisse der Schnüffelmethode

Aus einem R&I Schema einer Aromatanlage, aus einer Rohrleitungsliste sowie aus einer vom Betreiber selbst erarbeiteten Liste der Apparate, Sicherheitsventile und MSR-Technik wurde ein Verzeichnis aller vorkommenden Armaturen und Ausrüstungskomponenten der Anlage erstellt. Soweit direkt zugänglich, wurden die zugehörigen Werte für Druck, Temperatur, Stoffstromzusammensetzung und Dichtungstyp ergänzt. Die Prüfung aller Bauteile ergab, dass aufgrund der Bauart zahlreiche Aggregate nicht bei der Betrachtung berücksichtigt werden mussten. Beispielsweise waren ausschließlich hermetische Pumpen installiert. Auch die Sicherheitsventile waren alle an ein Fackelsystem angeschlossen. Somit blieben die in **Tabelle 8.4.1.1** aufgelisteten Anlagenteile, von denen angenommen werden konnte, dass Emissionen messbar sein würden.

Tabelle 8.4.1.1 Anzahl der vorhandenen Ausrüstungsteile mit dem Potential zu diffusen Emissionen an einer Beispielanlage

Typ	Aggregatzustand des Mediums		gesamt
	gasförmig	leichtflüssig	
Flansch	ca. 200	ca. 3100	ca. 3300
Ventil	ca. 70	ca. 680	ca. 750

In der Anlage wurden ca. 280 Flansche und ca. 100 Ventile mit der Schnüffelmethode vermessen. Dies war nur ein kleiner Ausschnitt aller Flansche (8%) und Ventile (14%). Die Messungen wurden in den Anlagenteilen durchgeführt, bei denen die beste Zugänglichkeit gewährleistet war. Es wurde darauf geachtet, dass ein möglichst breites Spektrum von Flanschgrößen, unterschiedlichen Drücken und Temperaturen sowie die verschiedenen Dichtungstypen erfasst wurde. Die **Abbildungen 8.4.1.1** und **8.4.1.2** zeigen einen Vergleich der Gesamtanlage mit den vermessenen Ausrüstungsteilen.

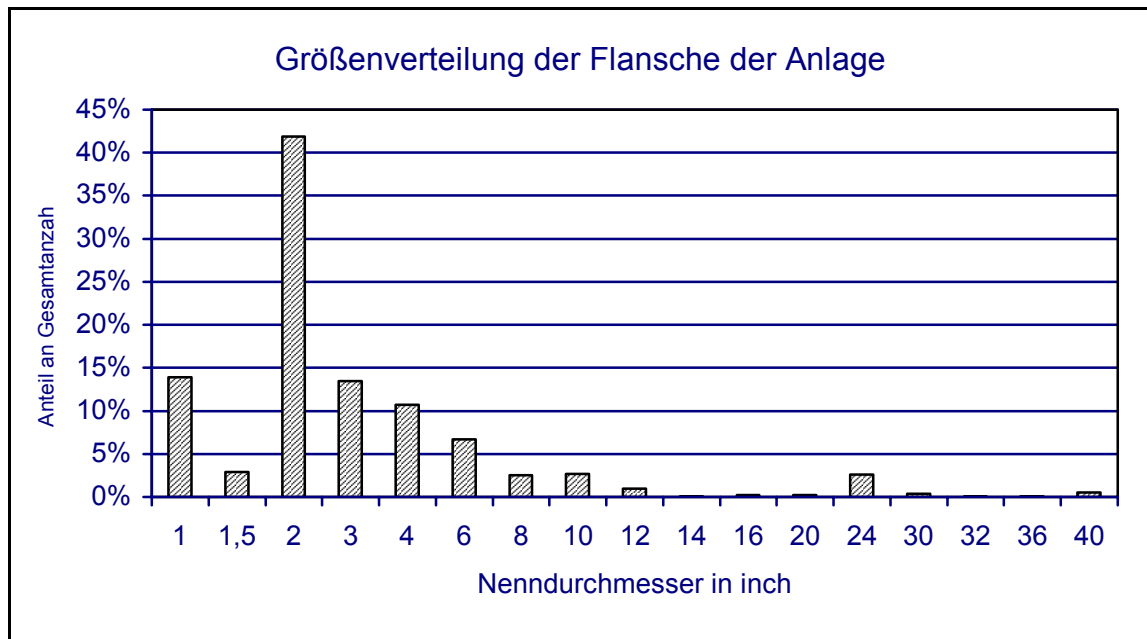


Abbildung 8.4.1.1: Verteilung der Flanschgrößen der untersuchten Anlage

Es wurden Flansche mit einem Nennendurchmesser bis 12 Inch vermessen. Besonders schwierig war es, Ausrüstungsteile mit Temperaturen über 50 °C zu vermessen. Meist sind diese Ausrüstungsteile mit einer Isolierung versehen, die nicht ohne großen Aufwand und Kosten entfernt werden kann. Eine Abschätzung ergab, dass deutlich mehr als die Hälfte der Flansche und Ventile isoliert sind.

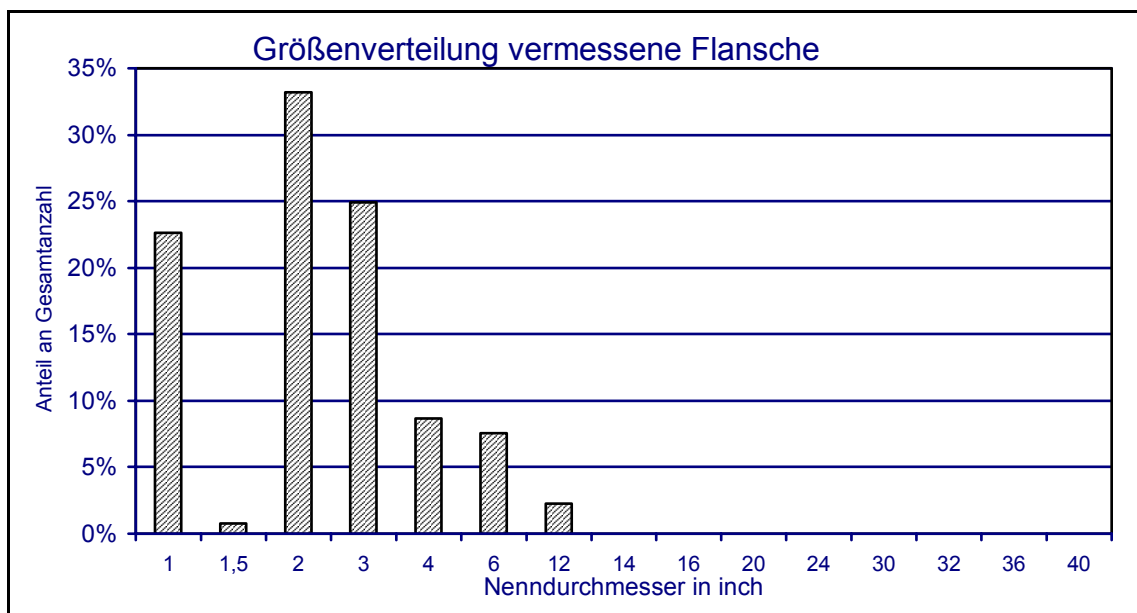


Abbildung 8.4.1.2: Verteilung der Flanschgrößen der vermessenen Flansche der untersuchten Anlage

In den **Abbildungen 8.4.1.3** und **8.4.1.4** sind die Messergebnisse für Flansche bzw. Ventile, wie sie mit Hilfe der Schnüffelmethode ermittelt wurden, dargestellt. Nur an wenigen Verbindungen wurden hohe Konzentrationen oberhalb 1.000 ppm festgestellt. Bei etwa 25 bis 35 % der gemessenen Ausrüstungsteile wurden Konzentrationen unter 1 ppm gemessen. Insgesamt wurden bei nur 0,4 % der Ausrüstungsteile Konzentrationen größer 10.000 ppm vorgefunden.

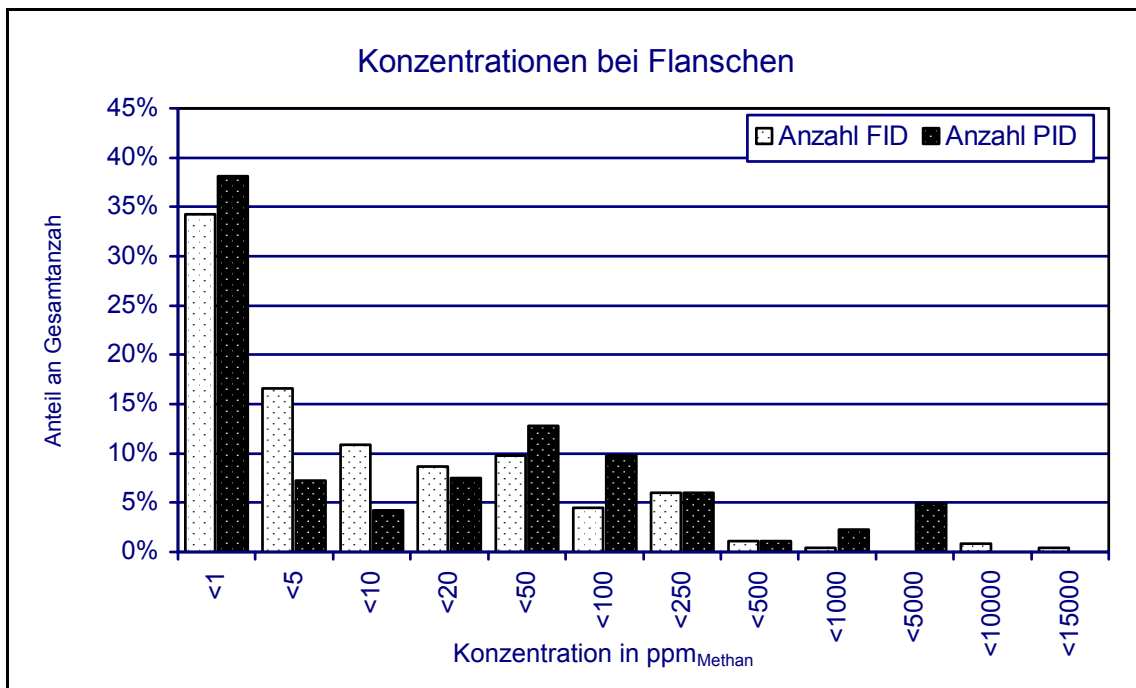


Abbildung 8.4.1.3: Verteilung der Messergebnisse der untersuchten Flansche

Bei den Ventilen sieht das Bild ähnlich aus wie bei den Flanschen. Es wurden nur wenige Ventile mit einer hohen Schnüffelkonzentration detektiert.

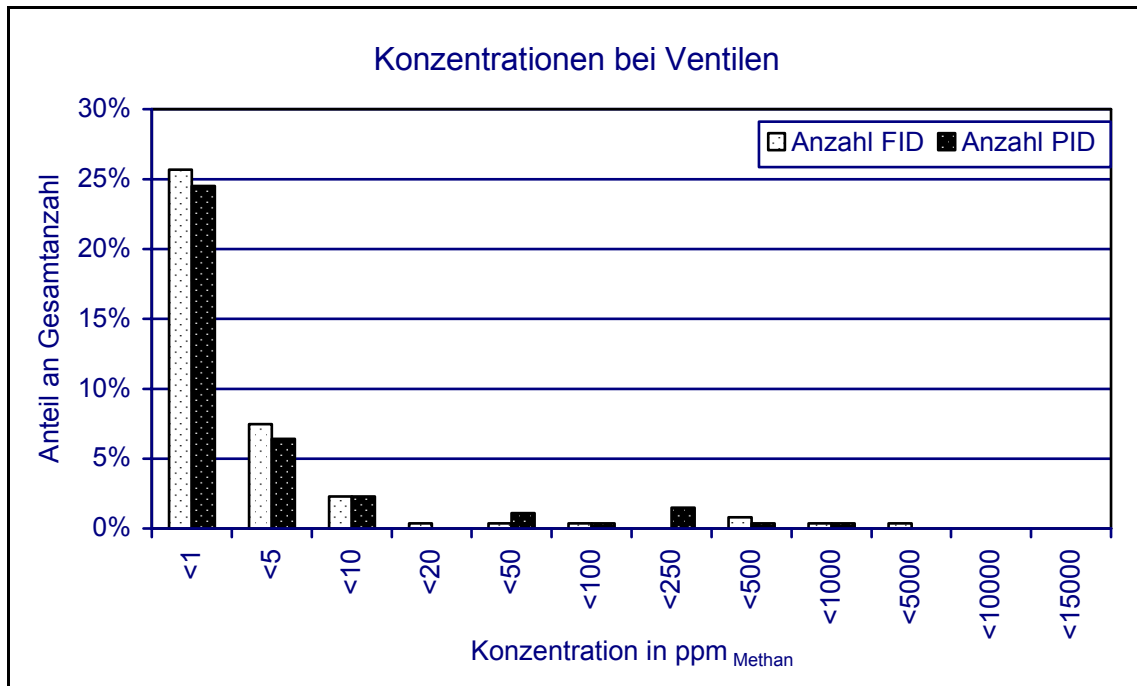


Abbildung 8.4.1.2: Verteilung der Messergebnisse der untersuchten Ventile

Wie diese Konzentrationsverteilungen sich auf die flüchtigen Gesamtemissionen auswirken, wird im Kapitel 8.4.3.2 „Ergebnisse der Leckagebestimmung von Flanschen nach der Einpackmethode“ dargestellt.

8.4.2 Abschätzung nach EPA und VDI

Grundlage für die Ermittlung der flüchtigen Gesamtemissionen nach EPA und VDI ist das Verzeichnis der lösbaren Verbindungen, aus dem die geometrischen Daten der potentiellen diffusen Quellen ermittelt wurden. Für eine erste grobe Abschätzung der diffusen Emissionen der Anlage kommen die Methoden in Betracht, bei denen keine Messungen erforderlich sind. Dies gilt für die EPA-Methode „Ermittlung mit den mittleren Emissionsfaktoren“ sowie für die Methode der VDI-Richtlinie 2440.

Für die Berechnung der flüchtigen Gesamtemissionen der Aromatanlage werden nur die Anzahl der Flansche und Ventile betrachtet. Bei Anwendung EPA- Methoden werden nur die Emissionsfaktoren bzw. Korrelationen der SOCMI benutzt.

In einigen Fällen ist der Aggregatzustand der gefassten Medien während des Betriebes nicht eindeutig als gasförmig, leichtflüssig oder schwerflüssig angegeben. Dieser ist aber für die Anwendung der EPA-Methoden für die Auswahl der zu verwendenden Emissionsfaktoren für Ventile von Bedeutung. Es wurden daher folgende Annahmen getroffen:

Tabelle 8.4.2.1: Annahmen für Berechnung nach EPA-Methoden

Angaben im Fließschema	gewählter Aggregatzustand nach EPA
gas/dampfförmig	⇒ gilt als gasförmig
dampfförmig	⇒ gilt als gasförmig
flüssig/gasförmig	⇒ gilt als leichtflüssig

8.4.2.1 Ermittlung nach EPA mit mittleren Emissionsfaktoren

Auf Grundlage des Verzeichnisses aller lösbaren Verbindungen wurde nach Gleichung 13 die Gesamtemissionen der einzelnen Ausrüstungstypen abgeschätzt:

$$E_{TOC,x} = \sum_{xi} F_{A,x} \cdot WF_{TOC,xi} \cdot N_{xi} \quad (13)$$

$E_{TOC,x}$	Emissionsrate aller Kohlenstoffverbindungen aller Ausrüstungsteile eines Typs x im gleichen Medienstrom in (kg/h)
$F_{A,x}$	durchschnittlicher Emissionsfaktor eines Ausrüstungstyps x in Abhängigkeit des Aggregatzustandes (kg/h/Quelle)
$WF_{TOC,xi}$	durchschnittlicher Massenanteil der Kohlenstoffverbindungen des Medienstroms xi
N_{xi}	Anzahl der Ausrüstungsteile des gleichen Typs x im Medienstrom xi

Die verwendeten mittleren Emissionsfaktoren nach SOCM I sind im Anhang 2 ausgewiesen. Alle lösbaren Verbindungen an den Behältern, wie z. B. Mannlöcher und Verbindungen zu Füllstands- und Druckmessungen, wurden einheitlich als Flanschverbindungen bewertet. Für den VOC-Massenanteil wurde in diesem Fall 1 einge-

setzt. Als Betriebsstunden werden für alle Ausrüstungsteile die 8.760 Stunden pro Jahr angesetzt.

Tabelle 8.4.2.1.1: Diffuse Gesamtemissionen der Aromatanlage nach EPA/SOCMI mit mittleren Emissionsfaktoren

Typ	Medium Zustand	Mittlerer EF (F _A)	Massenanteil (W _{F_{TOC}})	Anzahl (N)	Betriebsstunden	Emissionen kg/a
Flansch	jeder	0,00183 kg/h	1	3.300	8.760	52.902
Ventil	gasförmig	0,00597 kg/h	1	70	8.760	3.661
Ventil	leichtflüssig	0,00403 kg/h	1	680	8.760	24.006
Gesamtemissionen						80.568

Die diffusen Gesamtemission der Anlage betragen danach 80,6 t/a.

8.4.2.2 Ermittlung nach VDI-Richtlinie 2440

Die Berechnung der flüchtigen Gesamtemissionen mittels der VDI-Methode erfolgt in ähnlicher Weise. Nach der VDI-Methode ist es jedoch notwendig, einen mittleren Dichtungsumfang für die Ausrüstungsteile zu bestimmen. Bei Flachdichtungen von Flanschen ist deren Umfang einfach als mittlerer Umfang der Flanschdichtfläche zu ermitteln. Der mittlere Dichtungsumfang bei Ventilen wird anhand des Schaftdurchmessers und der zugehörigen Packungsbreite bestimmt. Anschließend wird aus dem Verzeichnis der lösbaren Verbindungen aus den Dichtungsumfangsgrößen und der Anzahl ein mittlerer Dichtungsumfang errechnet. Dieser ist mit dem VDI-Emissionsfaktor, der Anzahl der Ausrüstungsteile eines Armaturentyps zu multiplizieren, um die flüchtigen Emissionen des Ausrüstungsteils bzw. Armaturentyps zu berechnen. Die Emissionen aller Ausrüstungsteile addiert ergeben die Gesamtemission der Anlage:

$$E_{TOC,x} = \sum_x F_{A,x} \cdot ASC_x \cdot N_x \cdot k \quad (14)$$

E_{TOC,x} Emissionsrate aller Kohlenstoffverbindungen aller Ausrüstungsteile eines Typs x in kg/h

F_{A,x} Emissionsfaktor eines Ausrüstungsteils eines Typs x in mg/(s·m) (VDI)

Tabelle 8.4.2.2.1: Diffuse Gesamtemissionen der Aromatenanlage nach der Methode des VDI mit mittleren Emissionsfaktoren der VDI Richtlinie 2440

Typ	zugehörige Rohrnnenn- weite inch	Anzahl total	mittlerer Dichtungs- umfang m	Emissions- faktor VDI mg/(s•m)	Emissions- rate kg/h/Quelle	Emissionen Total kg/h/Quellentyp	% pro Quellentyp
Ventil	1	178	0,03	0,1	0,0000108 kg/h	0,0019 kg/h	3,1
	2	279	0,04	0,1	0,0000144 kg/h	0,0040 kg/h	6,5
	3	124	0,06	0,1	0,0000216 kg/h	0,0027 kg/h	4,3
	4	94	0,08	0,1	0,0000288 kg/h	0,0027 kg/h	4,4
	6	46	0,12	0,1	0,0000432 kg/h	0,0020 kg/h	3,2
	8	11	0,16	0,1	0,0000576 kg/h	0,0006 kg/h	0,9
	10	14	0,2	0,1	0,0000720 kg/h	0,0010 kg/h	1,6
	30	2	0,24	0,1	0,0000864 kg/h	0,0002 kg/h	0,3
	40	2	0,28	0,1	0,0001008 kg/h	0,0002 kg/h	0,3
Flansch	1	460	0,16	0,01	0,0000057 kg/h	0,0026 kg/h	3,8
	1,5	97	0,23	0,01	0,0000083 kg/h	0,0008 kg/h	1,1
	2	1378	0,29	0,01	0,0000104 kg/h	0,0143 kg/h	20,5
	3	447	0,40	0,01	0,0000144 kg/h	0,0064 kg/h	9,1
	4	355	0,49	0,01	0,0000178 kg/h	0,0063 kg/h	9,0
	6	224	0,68	0,01	0,0000244 kg/h	0,0055 kg/h	7,8
	8	81	0,85	0,01	0,0000305 kg/h	0,0025 kg/h	3,5
	10	88	1,02	0,01	0,0000366 kg/h	0,0032 kg/h	4,6
	12	34	1,20	0,01	0,0000431 kg/h	0,0015 kg/h	2,1
	14	4	1,30	0,01	0,0000467 kg/h	0,0002 kg/h	0,3
	16	6	1,48	0,01	0,0000531 kg/h	0,0003 kg/h	0,5
	20	8	1,84	0,01	0,0000664 kg/h	0,0005 kg/h	0,8
	24	84	2,21	0,01	0,0000797 kg/h	0,0067 kg/h	9,6
	30	13	2,77	0,01	0,0000996 kg/h	0,0013 kg/h	1,9
	32	2	2,95	0,01	0,0001062 kg/h	0,0002 kg/h	0,3
	36	4	3,32	0,01	0,0001195 kg/h	0,0005 kg/h	0,7
	40	15	3,69	0,01	0,0001328 kg/h	0,0020 kg/h	2,9
						0,070 kg/h	100
	Gesamtemissionen mit 8.760 Betriebsstunden:					614 kg/a	

Die niedrigen Emissionsfaktoren von 0,1 mg/(s·m) für Ventile und 0,01 mg/(s·m) für Flansche ergaben sich aus den verwendeten Dichtungssystemen bzw. Bauarten der Ventile. So werden in der Aromatanlage ausschließlich hochwertige Dichtungen, wie z. B. Ring-Joint-Dichtungen, Spießblech mit Innenbördel usw. eingesetzt. Die Ventile sind alle mit einem Vorspannsystem ausgerüstet (vgl. Abbildung 5.7.2.3.1), so dass sie bei temperaturbedingten Lastwechseln automatisch nachgespannt werden.

Die mit Hilfe der mittleren Emissionsfaktoren des VDI berechneten flüchtigen Emissionen der Aromatanlage fallen um zwei Zehnerpotenzen niedriger aus als das vergleichbare Ergebnis nach EPA. Nach der VDI-Methode hängt die Leckagerate von der Dichtungslänge ab, welche entscheidend über die Höhe der Leckagerate bestimmt. Sie lehnt sich damit an die Labortestverfahren an, die ebenfalls die Dichtungslänge berücksichtigen. Die auf diesem Wege ermittelten Werte stellen einen Basiswert für die diffusen Emissionen einer Anlage dar, der erreicht wird, wenn alle eingebauten Dichtelemente korrekt eingebaut und betrieben werden.

8.4.2.3 Ermittlung nach EPA durch Einteilung in Überprüfungsbereiche

Bei dieser Methode ist, wie in Kapitel 8.2.1.2. beschrieben, ein erheblicher messtechnischer Mehraufwand nötig. Für alle lösbaren Verbindungen muss ein Schnüffelmessprogramm durchgeführt werden, damit die Einteilung in die Schnüffelskonzentrationsbereiche, für die verschiedene Emissionsfaktoren gelten, erfolgen kann.

Da dies im Rahmen des Untersuchungsprogramms für die gesamte Aromatanlage nicht möglich war, wurde eine Auswahl von repräsentativen Ausrüstungsteilen vermessen. Auswahlkriterien waren dabei Temperatur, Größe, Druck und Rohrspezifikation, so dass das vermessene Kollektiv die Gesamtheit der Anlage näherungsweise widerspiegelte und eine Hochrechnung auf die Gesamtanlage ermöglicht wurde. Wie bei der Ermittlung der Gesamtemissionen mit Hilfe der mittleren Emissionsfaktoren wurden auch hier die Ausrüstungsteile zusammengefasst. Dabei

Nach dieser Methode der EPA betragen die flüchtigen Emissionen ca. 13,3 t/a. Ob dies ein genaueres Abbild der tatsächlichen Verhältnisse darstellt, kann nur vermutet werden. Tatsächlich bilden mit dieser Methode erstmals Messergebnisse an der betrachteten Anlage die Grundlage zur Ermittlung der Gesamtemissionsrate. Der Anlagenzustand fließt somit in die Bewertung ein.

Die Sensibilität der Schnüffelmessung wird an folgendem Beispiel demonstriert: In der untersuchten Anlage resultieren 10 t/a von 13 t/a der flüchtigen Emissionen aus einem einzigen Flansch. Es wurde dort mit Hilfe der Schnüffelmethode eine Konzentration >10 000 ppm gemessen. Nach der beschriebenen EPA-Methode wird dieser Konzentration ein bestimmter Emissionsfaktor zugeordnet. Läge die Konzentration für diesen Flansch bei 9.500 ppm wäre der zugeordnete Emissionsfaktor deutlich niedriger, was zur Folge hätte, dass die Anlage rechnerisch ca. 10 t/a weniger an VOC emittieren würde. Da von einer repräsentativen Verteilung der beobachteten Flansche aus der Gesamtanzahl (10%) ausgegangen wird, geht der eine Schnüffelergebnis sogar 10-fach in die Summe ein.

Dreibereichsmethode (Leck/kein Leck Methode)

Die Bereichsgrenzen für diese Methode wurden von der EPA von 0 bis 1.000 ppm, 1.001 bis 10.000 ppm und > 10.000 ppm festgelegt. Die Methode mit der Einteilung in drei Bereiche gilt als die genauere von den Bereichsmethoden. Die Ermittlung der diffusen VOC-Emissionen erfolgt hier ähnlich wie bei der Zweibereichsmethode. Jedem dieser Bereiche sind Emissionsfaktoren für die jeweiligen Ausrüstungstypen zugeordnet.

Die Ermittlung erfolgt nach dieser Methode nach folgender Gleichung:

$$E_{\text{TOC},x} = \frac{(F_{G,x} \cdot N_{G,x}) + (F_{M,x} \cdot N_{M,x}) + (F_{L,x} \cdot N_{L,x})}{(N_{G,x} + N_{M,x} + N_{L,x})} \cdot N_{\text{total}} \quad (16)$$

$E_{TOC,x}$	Emissionsrate der Kohlenstoffverbindungen für aller Ausrüstungstypen x in (kg/h)
$F_{G,x}$	Emissionsfaktor für Ausrüstungstyp x mit einer gemessenen Schnüffelsonzentration größer oder gleich 10.000 ppm (kg/h)
$N_{G,x}$	Anzahl der Ausrüstungsteile eines Typs x mit einer gemessenen Schnüffelsonzentration größer oder gleich 10.000 ppm
$F_{M,x}$	Emissionsfaktor für Ausrüstungstyp x mit einer gemessenen Schnüffelsonzentration zwischen 1.001 und 10.000 ppm (kg/h)
$N_{M,x}$	Anzahl der Ausrüstungsteile eines Typs x mit einer gemessenen Schnüffelsonzentration zwischen 1.001 und 10.000 ppm
$F_{L,x}$	Emissionsfaktor für Ausrüstungstyp x mit einer gemessenen Schnüffelsonzentration zwischen 0 und 1.000 ppm (kg/h)
$N_{L,x}$	Anzahl der Ausrüstungsteile eines Typs x mit einer gemessenen Schnüffelsonzentration zwischen 0 und 1.000 ppm
N_{total}	Anzahl aller Ausrüstungsteile eines Typs x

Tabelle 8.4.2.3.2: VOC-Gesamtemissionen nach der Dreibereichsmethode der EPA mit Konzentrationsverteilung der FID Messungen

[illegible]

8.4.2.4 Ermittlung nach EPA-Korrelationsmethode

Für die Anwendung der EPA-Korrelationsmethode muss für jedes einzelne Ausrüstungsteil die Schnüffelkonzentration ermittelt werden. Die Gleichung dient zur Abschätzung der Leckageraten der einzelnen Ausrüstungsteile auf Basis der Schnüffelkonzentrationen:

$$Leckagerate(kg/h) = A \cdot Messwert^B \quad (17)$$

A, B Konstanten der EPA-Korrelationsmethode (vgl. Anhang 4, Tabelle 1)

Die Messwerte sind als ppm Methanäquivalente einzusetzen. Die verwendeten Konstanten A und B sind in **Tabelle 8.4.2.4.1** aufgelistet.

Tabelle 8.4.2.4.1: A und B Werte für das Errechnen der Leckagerate nach der EPA-Korrelationsmethode (vgl. Anhang 4, Tabelle 1)

Typ	A	B
Ventile Medium gasförmig	1,87E-06	0,873
Ventile Medium leicht flüssig	6,41E-06	0,797
Flansche	3,05E-06	0,885

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden, wie oben schon erläutert wurde, ca. 10% der gesamten Ausrüstungsteile vermessen. Um auf die Gesamtanlage zu schließen, wurden zunächst die flüchtigen Gesamtemission für die vermessenen Flansche und Ventile ermittelt (**Tabelle 8.4.2.4.2**). Anschließend erfolgte die Hochrechnung auf das Verhalten der Gesamtanlage.

Tabelle 8.4.2.4.2: Flüchtige Gesamtemissionen nach der EPA-Korrelationsmethode

Messgerät	Typ	Gesamt Anzahl	Vermessen Anzahl	Prozentsatz	Betriebsstunden	Gesamtemissionen Vermessen	Gesamtemissionen Anlage
FID	Flansch	3.300	300	9,09%	8.760	0,026 kg/h	2.930 kg/a
FID	Ventil gasförmig	70	15	21,43%	8.760	0,0022 kg/h	90 kg/a
FID	Ventil leichtflüchtig	680	85	12,50%	8.760	0,0055 kg/h	385 kg/a
							3.405 kg/a

8.4.3 Untersuchungsergebnisse der Einpackversuche

8.4.3.1 Durchführung der Untersuchungen

Im Gegensatz zu der Schnüffelmethode liefert die Einpackmethode direkte Daten zu den Emissionsquellstärken. Sie wird nach Durchströmverfahren (auch Spülgasverfahren) oder Vakuumverfahren durchgeführt. Beiden Varianten der Methode ist gemein, dass die zu überprüfende lösbare Verbindung mit einer gasdichten Hülle/Einkapselung versehen, also eingepackt wird.

Beim Durchströmverfahren bildet der Raum zwischen der lösbaren Verbindung und der gasdichten Manschette den Messraum, durch den ein Trägergas (Spülgas) mit kontrolliertem Volumenstrom geführt wird. Die Emissionen aus dem Dichtungsbereich werden von dem Trägergas erfasst und einem geeigneten Detektor zugeleitet. Die VOC-Konzentration des austretenden Trägergases wird entweder vor Ort mit einem FID bestimmt oder in einem Gassammelgefäß erfasst und durch Laboranalyse ermittelt. Aus der gemessenen Gaskonzentration und dem Spülgasvolumenstrom kann die Emissionsrate errechnet werden.

Das Durchströmverfahren ist im Vergleich zu Schnüffelmethode mit erheblich größerem Aufwand verbunden. Es wird meist benutzt, um für die Konzentrationswerte der Schnüffelmethode armaturenspezifische Korrelationsfaktoren zu Leckageraten zu ermitteln. Die Korrelationsdiagramme zwischen den Leckageraten nach der Gasspülmethode und den Konzentrationswerten der Schnüffelmethode zeigen häufig

größere Schwankungen. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass die Schnüffelmethode bei einer gegebenen Gesamtleckagerate immer dann höhere Konzentrationen anzeigen wird, wenn die Leckage sich im Vergleich zu vielen kleinen Lecks auf wenige große Lecks konzentriert. Dieser Effekt ist bei großflächigen Dichtungen besonders ausgeprägt.

Die Ergebnisse der Schnüffelmethode können zur Entscheidung, welche Armaturen mit der Einpackmethode bewertet werden, herangezogen werden. Es stehen statistische Methoden zur Verfügung, um eine Entscheidung zu treffen, welche und wie viele Komponenten eines Armaturentyps eingepackt werden müssen, um eine verlässliche Korrelation zu erhalten.¹⁾ Die Kosten dieser Kombinationsmethoden sind deutlich niedriger als die der flächendeckenden Emissionsratenmessung nach dem Durchströmverfahren. Zu berücksichtigen ist, dass diese Einpackmethode bei heißen Armaturen, d. h. bei Temperaturen von mehr als 150°C, schwieriger zu realisieren ist, da nur wenige geeignete flexible, dichtende und nicht ausgasende Packmaterialien zur Verfügung stehen. Die Kosten für Messungen nach dem Durchströmverfahren werden in den USA mit 200 bis 500 \$ pro Messung beziffert.

Beim Vakuumverfahren wird im eingekapselten Raum, um die lösbare Verbindung herum, ein Vakuum aufgebaut. Zur Detektion der aus der lösbaeren Verbindung in das Vakuum eintretenden Stoffe wird ein Massenspektrometer herangezogen. Die Vakuummethode ist sehr nachweisempfindlich und genau. Messungen der Leckageraten nach dem Vakuumverfahren sind temperaturunabhängig und können in einem Leckageratenbereich von 10^{-9} atm·l/s bis 50 atm·l/s erfolgen. Zu berücksichtigen ist, dass das Vakuumverfahren im Vergleich zum Durchströmverfahren im Regelfall höhere Leckageraten liefert. Durch die Absenkung des Druckes wird der Siedepunkt von Flüssigkeiten herabgesetzt, weshalb mehr flüchtige organische Verbindungen in die Dampfphase übergehen. Zudem wird das treibende Druck/Konzentrationsgefälle über die Dichtung erhöht. Da die Erzeugung des Vakuums unter betrieblichen Bedingungen schwierig ist, wird das Vakuumverfahren in erster Linie unter Laborbedingungen für Untersuchungen an Prototypen eingesetzt. Allerdings zeigen neuere

¹⁾ Kittleman, Th.A.: „Sensorüberwachung“ oder „Einsacken“ zur Kontrolle und Überwachung von Leckagen“. VDI – Berichte 1440; 1998; VDI – Verlag; S. 367 –381

Untersuchungen auch Technologien auf, durch die das Vakuumverfahren auch vor Ort betrieben werden kann.

An 21 Flanschen wurden die Leckageraten mittels Einpackmethode bestimmt. Hierzu wurde mit Hilfe einer Manschette um die Dichtung ein gegen die Atmosphäre abgedichteter Raum geschaffen. Dieser wurde dann mit synthetischer kohlenwasserstofffreier Luft gespült, die anschließend einer Konzentrationsmessung unterzogen wurde. Sobald sich ein stationärer Zustand eingestellt hatte, konnte aus dem geförderten Volumenstrom und der gemessenen Konzentration eine Leckagerate bestimmt werden. **Abbildung 8.4.3.1.1** zeigt die Manschette im Einsatz.

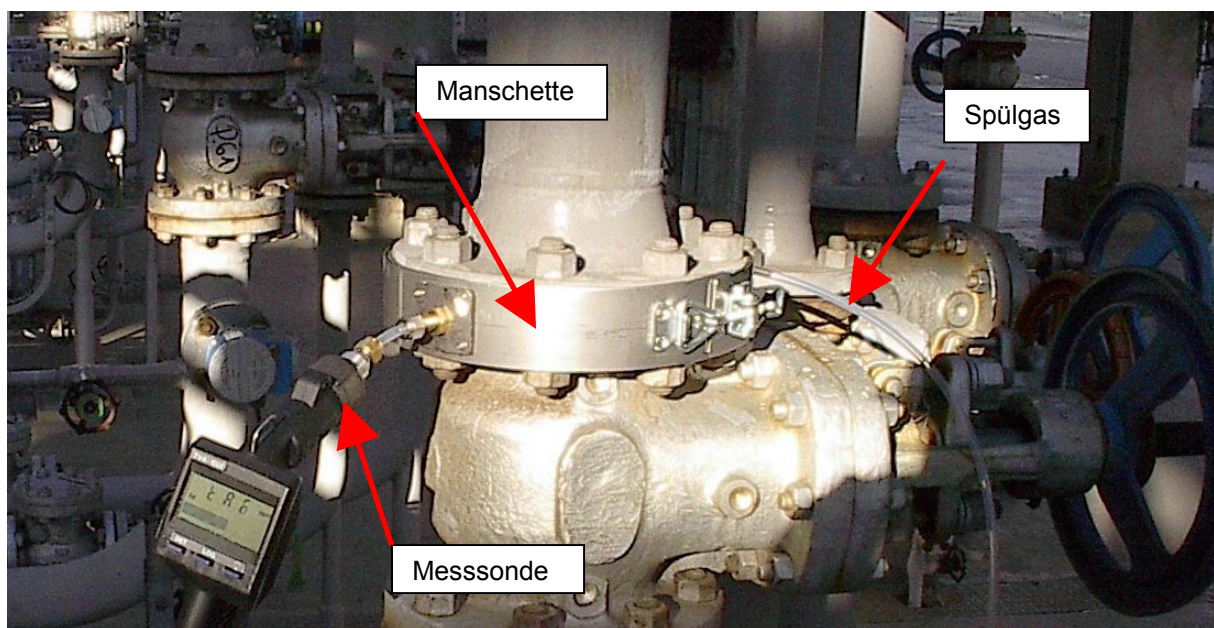


Abbildung 8.4.3.1.1: Einpackversuch mit einer Manschette an einem Flansch

Abbildung 8.4.3.1.2 zeigt Manschetten mit unterschiedlichen Größen.



Abbildung 8.4.3.1.2: Manschetten für Einpackversuche

Zwei gegenüberliegende Anschlüsse dienen als Spülgasein- und -auslass. Dieser relativ einfache Versuchsaufbau ist für Messungen während des Betriebes geeignet. Für die Messungen wurden Flansche gewählt, die auch schon mit der Schnüffelmethode vermessen wurden.

8.4.3.2 Leckagebestimmung von Flanschen

Die Ermittlung der Leckagerate mit Hilfe der Einpackmethode erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\lambda = c \cdot \dot{V} \cdot \rho_{\text{Dampf}} \cdot k_u \cdot \frac{293}{273 + t_m} \quad (18)$$

λ	Leckagerate eines Ausrüstungsteils in kg/h
c	mit der Einpack-Methode gemessene Konzentration des Ausrüstungsteils in ppm _{BTX} (ml/m ³)
$\dot{V}$	Volumenstrom der durch abgedichteten Raum strömt in l/min
ρ_{Dampf}	Dampfdichte im Falle der Aromatanlage von Pyrolysebenzin = 3,24 kg/m ³ bei 20°C
k_u	Umrechnungsfaktor, wenn Größen eingesetzt werden wie angegeben $k_u = 0,006 \text{E-}06$
t_m	Messtemperatur in Grad Celsius

In **Tabelle 8.4.3.2.1** sind die Ergebnisse der Ermittlung der Leckageraten für die einzelnen Messtellen zusammengefasst. Darüber hinaus sind in der Tabelle 8.4.3.2.1 die Konzentrationen nach der Schnüffelmethode sowie die sich hieraus nach der EPA-Korrelation ergebenden Leckageraten dargestellt.

Tabelle 8.4.3.2.1: Leckageraten nach der Einpackmethode sowie nach der EPA-Korrelation

Messstellen Nr.	Typ	Druck in bar	Temp. in °C	Konzentration Manschette in ppm _{Methan}	Konzentration Schnüffelm. in ppm _{Methan}	Leckagerate vermessen in kg/h	EPA - Leckagerate in kg/h
1	Flansch	1,3	38	129,94	60,41	2,33E-05	1,15E-04
2	Flansch	3,8	38	109,5	73,95	1,97E-05	1,38E-04
3	Flansch	3,8	38	94,9	41,23	1,70E-05	8,20E-05
4	Flansch	3,8	38	204,4	67,15	3,67E-05	1,26E-04
5	Flansch	1,3	38	131,4	80,15	2,36E-05	1,48E-04
6	Flansch	3,8	38	122,64	78,12	2,20E-05	1,44E-04
7	Flansch	3,8	38	89,06	32,94	1,60E-05	6,72E-05
8	Flansch	3,8	38	277,4	191,26	4,98E-05	3,19E-04
9	Flansch	3,8	38	163,52	76,36	2,94E-05	1,41E-04
10	Flansch	4,5	36	131,4	105,56	2,36E-05	1,88E-04
11	Flansch	4,5	36	335,8	160,60	6,03E-05	2,73E-04
12	Flansch	4,5	36	153,3	63,06	2,75E-05	1,19E-04
13	Flansch	4,5	36	1036,6	511,00	1,86E-04	7,61E-04
14	Flansch	4,5	36	29,2	9,68	5,24E-06	2,27E-05
15	Flansch	4,5	36	113,88	59,54	2,04E-05	1,14E-04
16	Flansch	4,5	36	73	42,19	1,31E-05	8,37E-05
17	Flansch	4,5	36	78,84	46,63	1,42E-05	9,14E-05
18	Flansch	4,5	36	56,94	33,00	1,02E-05	6,73E-05
19	Flansch	4,5	36	65,7	57,74	1,18E-05	1,10E-04
20	Flansch	4,5	36	94,9	63,36	1,70E-05	1,20E-04
21	Flansch	4,5	36	17,52	12,83	3,15E-06	2,92E-05

Aus den Messungen ergibt sich folgender Korrelationsansatz für Flansche zwischen Leckagerate ermittelt nach der Einpackmethode und der Schnüffelkonzentration:

$$Leckagerate\ e(kg/h) = 1E-06 \cdot Messwert\ (ppm)^{0,5882} \quad (19)$$

Für alle 3300 Flansche ergibt sich eine Gesamtemission von 330 kg/a. Die Gesamtemission der Anlage insgesamt konnte nicht bestimmt werden, weil wegen des zu großen Aufwandes für die Ventile keine Korrelation mit Hilfe der Einpackmethode ermittelt wurde. Daher beschränkt sich der Vergleich aller Methoden in **Tabelle 8.4.3.2.2** auf die Gesamtemission der Flansche.

Tabelle 8.4.3.2.2: Vergleich der Emissionsmassenströme für Flansche

Abschätzmethode	Gesamtemission aller Flanschverbindungen der untersuchten Aromatanlage
EPA mittlere Emissionsfaktoren	52.900 kg/a
VDI mittlere Emissionsfaktoren	458 kg/a
EPA Zweibereichsmethode	11.850 kg/a
EPA Dreibereichsmethode	15.242 kg/a
EPA Korrelationsmethode	2.930 kg/a
anlagenspezifische Korrelation	330 kg/a

Der Vergleich der nach den unterschiedlichen Methoden abgeschätzten Emissionsmassenströme zeigt, dass die Werte um zwei Zehnerpotenzen differieren. Auffällig ist, dass die Emissionsrate der eigenen Korrelation sehr nahe an derjenigen der VDI-Methode liegt. Bei der Bewertung dieses Ergebnisses muss jedoch beachtet werden, dass von insgesamt 3.300 Flanschen nur 21 untersucht wurden. Gleichwohl ist festzustellen, dass das Ergebnis mit dem höchsten messtechnischen Aufwand (eigene Korrelation) die gleiche Größenordnung anzeigt wie die des VDI, die ohne irgendeine Messung auskommt. Die generelle Annahme, dass je höher der messtechnische Aufwand ist, desto genauer ist der abgeschätzte Emissionsmassenstrom, kann schon deshalb nicht bestätigt werden.

Im Ergebniss kann festgestellt werden, dass vermutlich mit keiner Methode eine genaue Abschätzung des tatsächlichen Emissionsmassenstroms möglich ist. Sie stellen allenfalls Näherungsverfahren dar. Eine abschließende Bewertung, welche Methode am besten den realen Zustand einer Anlage abbildet, kann nur durch einen Vergleich der Ergebnisse der Abschätzungsverfahren mit den gemessenen Emissio-

nen aus diffusen Quellen von eingehausen Anlagen (vgl. Kapitel 5.12) erfolgen. Bei Freiluftanlagen ist dies nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich.

8.4.4 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Ermittlung von diffusen Gesamtemissionen und Empfehlungen

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen sind für die untersuchte Aromatanlage in **Tabelle 8.4.4.1** zusammengestellt:

Tabelle 8.4.4.1 Emissionsraten nach den verschiedenen Abschätzungsverfahren

Abschätzungsmethode	Emissionsrate der Aromatanlage
VDI-Methode mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren	614 kg/a
EPA-Methode mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren	80.600 kg/a
EPA-Methode mit Überprüfungsbereiche	
- Zweibereichsmethode	13.300 kg/a
- Dreibereichsmethode	17.000 kg/a
EPA-Korrelationsmethode	3.400 kg/a

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die ermittelten Gesamtemissionsraten für die Anlage stark differieren. Folgende Schlussfolgerungen können aus der praktischen Anwendung an einer konkreten Anlage abgeleitet werden:

1. Die tatsächliche Gesamtemissionsrate lässt sich nur mit Hilfe der Einpackmethode bestimmen. Für dieses Ziel müssten alle Flansche, Ventile usw. und über einen längeren Zeitraum vermessen werden, was in der Praxis wegen des zu hohen Aufwandes nicht möglich ist.
2. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Methode des VDI, die für Raffinerien entwickelt wurde, den vermutlich technisch optimalen Fall einer

minimalen Emissionsrate abbildet.¹⁾ Der Ergebnisvergleich für Flansche scheint trotz der beschränkten Zahl der Messpunkte, diese Annahme zu bestätigen. Daher wäre mit der VDI-Methode ein Bezugspunkt, nämlich der technisch optimale Fall, ohne eine Messung ermittelbar.

3. Analog der üblichen wissenschaftlichen Vorgehensweise müsste nach der Ermittlung der technisch optimalen Emissionsrate versucht werden, die realen Verhältnisse so gut wie möglich abzubilden. Hierzu könnten die Methoden der EPA, die auf Messungen basieren, herangezogen werden. Für die Beurteilung der einzelnen Methoden sind prinzipiell zwei wesentliche Einflussfaktoren entscheidend:

- Genauigkeit und Anzahl der durchgeführten Messungen mit Hilfe der Schnüffel- sowie der Einpackmethode
- Genauigkeit der Emissionsfaktoren bzw. der verwendeten Korrelation

Hieraus folgt, dass im Einzelfall trotz sehr präziser und gewissenhaft durchgeführter Messungen die Ergebnisse anzweifelbar sind, weil die verwendeten Emissionsfaktoren oder die Korrelation für den untersuchten Anwendungsfall nicht korrekt sind. Dies gilt selbstverständlich auch umgekehrt und auch gleichzeitig. Die Einflussfaktoren und Grenzen der Schnüffelmethode wurden schon in Kapitel 7 ausführlich dargelegt. Die Sensibilität der EPA-Methode mit Überprüfungsbereichen wurde in Kapitel 8.4.2.3 an einem Beispiel erläutert. Wenn ein Messwert knapp über oder unter der Bereichsgrenze von z. B. 10.000 ppm liegt, wirkt sich dies auf das Gesamtergebnis um so stärker aus, je weniger potenzielle Quellen vermessen wurden.

Ob die in Amerika ermittelten Emissionsfaktoren überhaupt auf deutsche Anlagen übertragen werden können, ist wissenschaftlich, so weit bekannt, bislang nicht untersucht worden. Die im Rahmen dieses Forschungsvor-

¹⁾ Als technisch optimaler Fall ist der Fall anzusehen, bei dem unter Praxisbedingungen die Leckageraten über die Betriebszeit unverändert bleiben. Der Idealfall bedeutet dagegen die Nullemission, was praktisch nur mit geschweißten Verbindungen erreichbar ist.

habens durchgeführten Untersuchungen lassen jedenfalls keine abschließende Bewertung zu.

Selbst die allgemeine Annahme, dass mit steigendem messtechnischen Aufwand ein genaueres Abbild der realen Verhältnisse erreicht wird, kann den Vergleich der Gesamtemissionen aus Flanschverbindungen der untersuchten Aromatanlage nicht bestätigen.

4. Die Ermittlung einer individuellen anlagenbezogenen Korrelation für die jeweils betrachtete Produktionsanlage scheidet wegen des nicht vertretbaren Aufwandes aus. Zudem muss bezweifelt werden, ob die auf Basis von insgesamt 21 Messungen an eingepackten Flanschen ermittelte Korrelation ausreicht, die Gesamtanlage mit über 3.000 Flanschen abzubilden.

Diese sicherlich zunächst ernüchternden Feststellungen führen somit zu dem Schluss, dass keine der gegenwärtig bekannten Methoden die tatsächlichen Verhältnisse mit vertretbarem Aufwand reproduzierbar abbilden kann. Hieraus ergeben sich zwangsläufig folgende Fragen:

1. Welche Aussagekraft haben angesichts der dargestellten Schwächen die vorgestellten Abschätzungsmethoden?
2. Welche Entwicklungen müssen erfolgen, um präzisere und reproduzierbare Aussagen über die Gesamtemissionsrate einer Anlage zu erhalten?
3. Welche Alternativen gibt es zu den Abschätzungsmethoden zur Bestimmung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen?

In den folgenden Abschnitten wird versucht, die aufgeworfenen Fragen zu beantworten oder zumindest sich einer Antwort zu nähern.

zu 1: Aussagekraft der Abschätzungsmethoden

Wenn eine genaue Angabe über die Gesamtemissionen aus diffusen Quellen mit Hilfe der EPA-Methoden nicht möglich ist, können die EPA-Methoden, die sich auf

Messwerte stützen, jedoch möglicherweise dazu dienen, Tendenzen abzuleiten. Grundlage für eine solche Tendenzbetrachtung könnte z.B. eine festgelegte Korrelation nach der Vorgabe der EPA sein. Auf der Basis von Schnüffelmessungen und mit Hilfe dieser festgelegten Korrelation wird das Ergebnis für das Jahr x mit 100 % festgelegt. In den nachfolgenden Jahren wird die jeweils gemessene Emissionsrate immer auf das Ergebnis des Jahres x bezogen. Somit können aufgrund der Tendenzbeschreibung ohne Nennung konkreter Emissionsmassenströme Ziele zur Emissionsminderung festgelegt werden. Eine Zielformulierung auf Basis von Absolutwerten in kg/a erscheint unter Berücksichtigung der zu großen Anzahl von Einflussfaktoren in der Praxis wenig sinnvoll.

Die grundsätzliche Problematik der Schnüffelmethode (Zugänglichkeit von Anlagen teilen, Isolierungen, klimatische Einflüsse, Aufwand usw.) wird jedoch mit diesem Vorschlag nicht gelöst. Unter Berücksichtigung der genannten Gesichtspunkte sollte die Zahl der Messungen daher auf eine bestimmte Anzahl von lösbaren Verbindungen beschränkt bleiben. Voraussetzung ist, dass die ausgewählten Flansche und Ventile die prozentualen Anteile an der Gesamtanlage repräsentieren, wie dies im Rahmen dieses Forschungsvorhabens versucht wurde (vgl. die Abbildung 8.4.1.1 und 8.4.1.2). Gegenstand einer zukünftigen Untersuchung sollte es sein, eine geeignete Prozentzahl zu ermitteln, die mit hinreichender Genauigkeit ein Ergebnis ergibt und gleichzeitig den messtechnischen Aufwand auf ein Minimum beschränkt.

zu 2: Zukünftig erforderliche Entwicklungen

Grundsätzlich ist es schwierig, neue Überlegungen in die laufende Diskussion einzubringen. Dennoch wird an dieser Stelle der Versuch unternommen, eine denkbare Entwicklungslinie aufzuzeigen, an deren Ende reproduzierbare Emissionsmassenströme aus diffusen Quellen mit möglichst geringem Aufwand kalkuliert werden können.

Grundlage der Überlegungen ist die vom VDI entwickelte Methode mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren. Unter der Annahme, dass das Ergebnis dieser Methode den technisch optimalen Fall darstellt, bildet sie den Ausgangspunkt der

folgenden Überlegungen. In der Wissenschaft ist es üblich einen Sachverhalt zunächst unter idealen Annahmen mathematisch zu beschreiben, um die zahlreichen Einflussfaktoren zu minimieren. Auf der Basis des unter idealen Bedingungen entwickelten Modells werden anschließend „Korrekturfaktoren“ ermittelt, mit denen das Modell an die realen Bedingungen angepasst werden kann.

Diese prinzipielle Vorgehensweise bietet auch die Methode des VDI. Der verwendete Emissionsfaktor von 0,1 mg/(s·m) nach VDI-Richtlinie 2440 in Tabelle 8.4.2.2.1 repräsentiert den technisch günstigsten Fall für das Ventil x. Er wäre zur Annäherung an die realen Verhältnisse mit geeigneten Korrekturfaktoren zu multiplizieren, die die wesentlichen Einflussfaktoren in geeigneter Weise berücksichtigen. Beispielsweise wäre es denkbar, das Nachlassen der Dichtheit im Verlauf ihres zeitlichen Einsatzes zu berücksichtigen. Bei den Chemieunternehmen liegen zahlreiche Erfahrungswerte vor, wann Dichtungen ausgetauscht werden müssen. Würden man diese Erfahrungswerte messtechnisch im Rahmen eines Forschungsvorhabens in Korrekturfaktoren zusammenfassen, wäre eine geeignete Anpassung der Emissionsfaktoren an die realen Bedingungen möglich. **Abbildung 8.4.4.1** verdeutlicht die Überlegungen zur Anpassung der VDI-Methode an die realen Bedingungen.

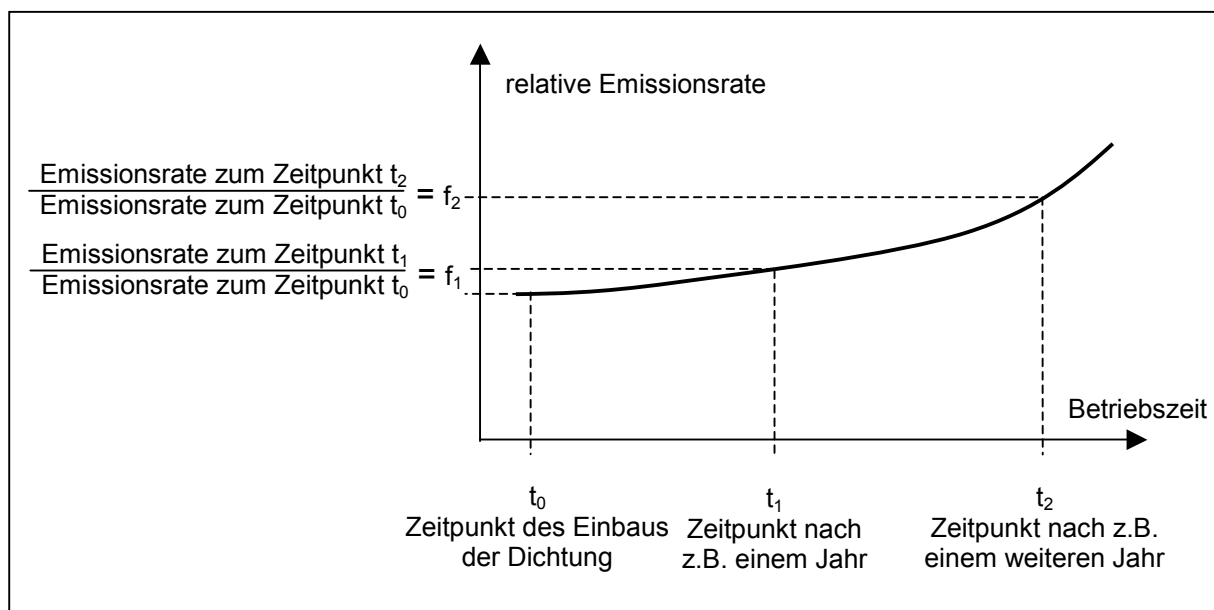


Abbildung 8.4.4.1: Vorgehensweise zur Ermittlung eines Korrekturfaktors (idealisiert)

Wie in Abbildung 8.4.4.1 dargestellt, steigt im Laufe der Zeit die Leckagerate einer Armatur an, was durch die Bildung des Quotienten aus der Emissionsrate zum Zeitpunkt t_x und Emissionsrate zum Zeitpunkt t_0 abgebildet werden kann. Der Faktor, der eine relative Emissionsrate darstellt, liegt in diesem Beispiel über 1. Damit kann die vom VDI ermittelte Emissionsrate von $0,1 \text{ mg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ in geeigneter Weise an die tatsächlichen Verhältnisse angepasst werden. In der Praxis würde dies bedeuten: Je schlechter die Anlage gewartet wird, desto stärker steigt der Korrekturfaktor f_x . Bei regelmäßiger Wartung würde er sich wieder dem Wert 1 und somit dem technisch optimalen Zustand nähern. Die verschiedenen Einflussfaktoren, die u. U. zu berücksichtigen wären, sind im Kapitel 5.4.4 „Ursachen von Emissionen aus Flanschverbindungen“ vorgestellt worden. Die Vorteile dieses Ansatzes können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die VDI-Methode berücksichtigt mit der mittleren Dichtungslänge im Gegensatz zur vergleichbaren Methode der EPA eine geometrische Differenzierung.
2. Mit Einführung von Korrekturfaktoren, wie dies in der Technik allgemein üblich ist, erscheint es möglich, die VDI-Methode an die realen Verhältnisse anzupassen. Der Korrekturfaktor zur Abbildung der nachlassenden Dichtigkeit z.B. einer Flanschverbindung könnte in Abhängigkeit von der Art der Dichtung, des Dichtungsmaterials usw. differenziert ermittelt werden.
3. Liegen Korrekturfaktoren, die z.B. im Rahmen von Langzeitstudien an Praxisanlagen ermittelt werden müssten, vor, könnte der Zustand der Anlage ohne weitere Messungen beschrieben werden. Änderungen bei der Auswahl von Dichtungsmaterialien und der Form der Verbindung werden bei der Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen schon heute bei der VDI-Methode berücksichtigt.

Nachteilig an diesem Vorschlag erscheint zunächst, dass die sogenannten „high leakers“ nicht erkannt werden. Hierin liegt aber die Bedeutung der strikten Trennung von Leckageerkennung und Abschätzung der diffusen Gesamtemission. Es ist Aufgabe von LDAR-Programmen „high leakers“ zu erkennen und zu beseitigen. Sind diese beseitigt, lässt sich die Abschätzung der Gesamtemission z. B. auf Basis der

VDI-Methode durchführen. Die vorgeschlagenen Korrekturfaktoren dienen nur dazu, die „altersbedingten“ Leckageraten zu berücksichtigen.

Wie erste Diskussionen mit Fachleuten aus der Industrie gezeigt haben, erscheint die Einführung eines Korrekturfaktors für Flachdichtungen durchaus möglich. Problematischer erscheinen dagegen dynamische Systeme, wie z.B. Ventile, weil die Einflussfaktoren sehr zahlreich sind. Ob ein solcher Vorschlag für eine zukünftige Entwicklungslinie praktikabel ist, kann sich letztlich erst in konkreten Untersuchungen erweisen.

zu 3: Alternativen zu den Abschätzmethoden

Als Alternative zu den Abschätzmethoden bieten sich im Gegensatz zur Leckageerkennung integrale Messverfahren an. Hierzu zählen nicht nur photooptische oder ähnliche Messverfahren, wie sie in Kapitel 7.3 beschrieben wurden, sondern im Falle von eingehausten Anlagen, auch Messungen zur Bestimmung der Gebäudeabluft, wie sie im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurden (Kapitel 5.12).

Gebäude, in denen Produktionsanlagen installiert sind, sind in der Regel mit Abluftventilatoren ausgestattet. Werden VOC-Messungen an diesen Ventilatoren durchgeführt, werden nicht nur die Schwankungen innerhalb des Messzeitraums aufgezeichnet, sondern es lassen sich auch die tatsächlichen Gesamtemissionen berechnen. In dem von uns untersuchten Fall konnte ohne große Mühe der tatsächliche Emissionsmassenstrom ermittelt werden.

Derartige Möglichkeiten bleiben jedoch zunächst auf Anlagen in Gebäuden beschränkt. Für Freiluftanlagen kommen dagegen z.B. photooptische Verfahren in Frage. In Kombination mit einem geeigneten Ausbreitungsmodell kann aus den gemessenen Konzentrationswerten die Quellstärke von diffusen Emissionen bestimmt werden. Die Anwendbarkeit der photooptischen Verfahren erscheint vor allem dann gegeben, wenn es sich um Einzelanlagen ohne die enge Nachbarschaft zu anderen Anlagen handelt. Die Grenzen dieser Verfahren sind sicherlich bei größeren Industriekomplexen zu sehen, wo eine genaue Differenzierung der einzelnen Produktionsanlagen nicht mehr möglich ist.

9 Schlussbetrachtung

Seit dem Jahr 2000 sind auf europäischer Ebene zahlreiche Arbeitsgruppen mit dem Thema „diffuse Emissionen“ beschäftigt. An erster Stelle sind dabei die Arbeitsgruppen von IMPEL mit ihrem Bericht „Diffuse VOC Emissions Estimation Methods, Reduction Measures, Licensing and Enforcement Practice“ vom Dezember 2000 sowie die Arbeitsgruppe 17 von CEN/TC 264 mit ihrem Bericht „Working Paper on General Principles of Monitoring“ vom September 2001 zu nennen. Insbesondere der Bericht von IMPEL stellt die amerikanische Vorgehensweise zur Leckageerkennung und Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen vor. Die VDI-Richtlinie 2440 „*Emissionsminderung Mineralölraffinerien*“ wurde im November 2000 veröffentlicht.

Allein die Zahl der seit dem Jahr 2000 vorgelegten Arbeitspapiere sowie die begleitenden Studien zeigen an, dass sich die Aktivitäten auf europäischer Ebene zur Erarbeitung von Vorgaben zur Leckageerkennung und Abschätzung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen deutlich verstärkt haben.

Mit dem hiermit vorgelegten UBA-Forschungsbericht wird erstmals auch in Deutschland eine umfangreiche Darstellung

- der konstruktiven Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung diffuser Emissionen,
- der Vorgehensweise zur sachgerechten Montage,
- der technischen Möglichkeiten der Leckageerkennung sowie
- der verschiedenen Methoden zur Abschätzung der Gesamtemissionen aus chemischen und petrochemischen Produktionsanlagen

vorgelegt. Durch eigene Untersuchungen an einer Aromatanlage wurden die Möglichkeiten, aber auch Grenzen der Schnüffelmethode, die derzeit das verbreitetste Messverfahren zur Leckageerkennung darstellt, beleuchtet. Die Abschätzung der Gesamtemissionen der Anlage aus diffusen Quellen erfolgte zum Teil auf Basis der Ergebnisse der Schnüffelmethode mit Hilfe der verschiedenen Methoden der amerikanischen Umweltbehörde (Methode mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren, Zwei-

und Dreibereichsmethode und EPA-Korrelationsmethode) sowie nach VDI-Richtlinie 2440, die ursprünglich für Raffinerien erarbeitet wurde. Darüber hinaus konnte für Flansche mit Hilfe der Einpackmethode für die Aromatanlage eine anlagenspezifische Korrelation ermittelt werden.

Neben den Untersuchungen an einzelnen Anlagenkomponenten (Flansche, Ventile usw.) wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens auch Messungen in der Gebäudeabluft von eingehausten Produktionsanlagen durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass für eingehauste Anlagen durch Messung die Bestimmung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen möglich ist.

Der Bericht bemüht sich aber auch, die z.T. sehr unterschiedlichen Definitionen wesentlicher Begriffe sowie der Bilanzgrenzen, die in den verschiedenen Regelwerken Deutschlands, der Europäischen Gemeinschaft sowie den USA gebräuchlich sind, darzustellen.

Die Bewertung der Methoden zur Leckageerkennung sowie zur Abschätzung der Gesamtemissionen auf der Basis der verschiedenen Berechnungsverfahren der EPA und des VDI orientierte sich in erster Linie an der Praktikabilität des jeweiligen Mess- bzw. Berechnungsverfahrens. Weil zudem im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Untersuchungen mit der Schnüffel- und der Einpackmethode an einer Praxisanlage durchgeführt wurden, konnten eigene Erfahrungen gesammelt werden, die den messtechnischen Aufwand deutlich werden ließen. Es zeigte sich, dass die bislang am stärksten favorisierte Schnüffelmethode zur Leckageerkennung durchaus in der Lage ist, sogenannte „high leakers“ zu erkennen, gleichwohl der Aufwand zur erforderlichen Demontage von Isolierungen mit anschließender Wiederherstellung nicht vernachlässigt werden kann. Die eigenen Erfahrungen bezüglich der Praktikabilität sowie die vom Umweltbundesamt vorgegebene Aufgabenstellung für dieses Forschungsvorhaben waren Anlass, eigene Vorschläge

- zur Fassung und Behandlung von Leckagen aus diffusen Quellen,
- zur Erkennung von Leckagen sowie
- zur Berechnung der Gesamtemissionen

zu erarbeiten. Die Vorschläge sollen neue Wege aufzeigen, mit denen auf möglichst einfache Weise diffuse Emissionen aus Flanschverbindungen, Ventilen usw. vermindert oder gar vermieden werden können. In diesem Zusammenhang wurde mehrfach im Rahmen dieses Berichtes zu bestimmten Punkten auf einen Forschungsbedarf hingewiesen. Es wird erwartet, dass die Vorschläge nicht auf einhellige Zustimmung stoßen werden. Gleichwohl ist zu hoffen, dass sie von den Fachkreisen als ein konstruktiver Beitrag anerkannt werden, der die Diskussion über Möglichkeiten zur Vermeidung und Verminderung von Emissionen aus diffusen Quellen um neue Überlegungen erweitert.

Die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Definitionen zahlreicher Begriffe differieren in den Arbeitspapieren der Europäischen Union und den deutschen Regelwerken. Hierzu zählen z. B. die Begriffe „diffuse“, „flüchtige“ und „fugitive“ Emissionen. Ein weiteres Problemfeld ist die Bezugsverbindung bei der Angabe von VOC-Emissionen. Weil das C für Compound steht, muss klar festgelegt werden, auf welche Verbindung die Emissionen bezogen werden. Wird dagegen vereinfacht auf Kohlenstoff (C = Carbon) Bezug genommen, sollte eher vom TOC gesprochen werden. Verwirrung stiftet auch die Vielzahl der verwendeten Einheiten.
2. Es wird eine Vielzahl technischer Lösungen zur Abdichtung lösbarer Verbindungen angeboten, die die Anforderungen der TA-Luft problemlos erfüllen. Wie die Erfahrungen gezeigt haben, treten größere Emissionen nicht durch die falsche Wahl einer Dichtung, sondern eher durch deren fehlerhafte Montage auf.
3. Nur sehr wenige lösbare Verbindungen (meist < 1 %) verursachen nicht zu vernachlässigende Emissionen. Daher muss der Aufwand mit Hilfe der Schnüffelmethode zur Leckageerkennung dieser „high leakers“ gleichfalls berücksichtigt werden. Der Aufwand steigt erheblich, wenn die Rohrleitungen bzw. Flanschverbindungen isoliert sind.

4. Grundsätzlich sollten die Methoden der Leckageerkennung von denen der Gesamtemissionsermittlung getrennt betrachtet werden. Werden die Methoden der EPA - Bereichsmethoden oder der EPA-Korrelationsmethode - zur Abschätzung der Gesamtemissionen als Verfahren der Wahl festgelegt, wird damit automatisch die Schnüffelmethode als einzig mögliches Messverfahren festgeschrieben. Im Grundsatz bedeutet dieses, dass der Stand der Technik eingefroren wird. Die betroffenen Unternehmen haben unter diesen Rahmenbedingungen kaum Möglichkeiten, andere Systeme einzusetzen.
5. Erst durch die Trennung von Leckageerkennung einerseits und Abschätzungsverfahren andererseits können neben der Schnüffelmethode auch andere Methoden zur Leckageerkennung in die Diskussion eingebracht werden, wenngleich im Einzelfall noch ein Forschungsbedarf besteht. Hierzu zählen z. B. die sehr einfach zu handhabenden Farbbänder.
6. Die bislang von der EPA und dem VDI vorgestellten Abschätzungsverfahren zur Berechnung der Gesamtemissionen aus diffusen Quellen stellen Näherungsverfahren dar, wobei die tatsächlichen Gesamtemissionen vermutlich keines der Verfahren beschreiben kann. Die Vor- und Nachteile sind in **Tabelle 9.1** noch einmal zusammengefasst dargestellt.
7. Mit der Abluftmessung von eingehausten Produktionsanlagen können die Gesamtemissionen aus diffusen Quellen einer Anlage gemessen und damit exakt und kontinuierlich bestimmt werden. Eine Abschätzung nach den verschiedenen Methoden der EPA oder des VDI ist nicht erforderlich.
8. Wie die Ergebnisse der Abluftmessungen diskontinuierlich betriebener Produktionsanlagen gezeigt haben, treten in der Regel nur kurzzeitig messbare Emissionen auf. Dies bedeutet, dass Leckageuntersuchungen mit Hilfe der Schnüffelmethode, die eine Kurzzeitmessmethode darstellt, bei derartigen Anlagen nur sehr eingeschränkt möglich sind.

Tabelle 9.1: Vorteile und Nachteile der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der diffusen Emissionen

Methode	Vorteile	Nachteile
VDI	- keine Messungen notwendig - einfache Ermittlung der diffusen Gesamtemissionen möglich	- Beschaffung umfangreicher Daten (Anzahl, Art und Größe von Ausrüstungsteilen) - Anlagenzustand nicht beachtet
EPA mittlere Emissionsfaktoren	- keine Messungen notwendig - einfache Ermittlung der diffusen Gesamtemissionen möglich	- Emissionsfaktoren sind sehr hoch - Anlagenzustand nicht beachtet
EPA Einteilung in Überprüfungs-bereiche	- differenziertere Betrachtungsweise durch Einteilung in mehrere Bereiche	- umfangreiche Schnüffelmessungen müssen durchgeführt werden - Datenbank notwendig - hoher Zeitaufwand - Einsatz von geeigneten Messgeräten ist notwendig - unzugängliche, nicht zu vermessende Bauteile erschweren die Gesamtbewertung
EPA Korrelation	- Sprünge, die bei den Mehrbereichsmethoden zwangsläufig vorhanden sind, werden durch die Korrelationsmethode ausgeglichen	- umfangreiche Schnüffelmessungen müssen durchgeführt werden - Aufbau einer umfangreichen Datenbank notwendig - höherer Zeitaufwand - Einsatz von geeigneten Messgeräten ist notwendig - unzugängliche, nicht zu vermessende Bauteile erschweren die Gesamtbewertung
anlagen-spezifische Korrelation	- spiegelt vermutlich den Anlagenzustand am besten wieder	- Einpackmessungen notwendig - Schnüffelmessungen nötig - hoher messtechnischer Aufwand - Aufbau einer umfangreichen Datenbank notwendig - qualifiziertes Personal notwendig - höchste Kosten aller Methoden

9. Mit der Abluftmessung von eingehausten Anlagen ist im Gegensatz zur Schnüffelmethode eine kontinuierliche Überwachung der Anlage möglich.

10. Eine weitere Möglichkeit zur kontinuierlichen Überwachung von z. B. längeren Rohrbrücken besteht in der Möglichkeit der Absaugung isolierter Rohrleitun-

gen mit Hilfe eines pervorierten Schlauchs. In diesem Fall wären Isolierungen kein Hindernis zur Überprüfung von lösbaren Verbindungen, sondern stellen eine weitere Kapselung der lösbaren Verbindungen zur Atmosphäre dar. Damit wäre ein Raum gegeben, der definiert und somit kontrollierbar ist.

Anhang 1 – Umrechnungsfaktoren

Umrechnungsfaktoren für Druck-Volumen-Änderungen

	Pa m ³ /s	atm cm ³ /s	mbar l/s	Torr l/s
1 Pa m ³ /s	1	9,869	10 ⁻²	7,501
1 atm cm ³ /s	0,1013	1	1,013	0,76
1 mbar l/s	10 ²	0,9869	1	0,7501
1 Torr l/s	0,1333	1,316	1,333	1

Umrechnungsfaktoren für Massen-, Volumen- und Molenstrom-Änderungen

	Stickstoff M = 28,014g/mol		Helium M = 4,003g/mol		Methan M = 16,042g/mol		Vinylchlorid M = 62,494g/mol		Benzol M = 78,108g/mol		
	mol/s	cm ³ /s	g/s	mol/s	cm ³ /s	g/s	mol/s	cm ³ /s	mol/s	cm ³ /s	g/s
mol/s	1	2,24*10 ⁴	28,014	1	2,24*10 ⁴	4,003	1	2,24*10 ⁴	1	2,24*10 ⁴	6,042
cm ³ /s	4,46*10 ⁻⁵	1	1,25*10 ⁻³	4,46*10 ⁻⁵	1	1,78*10 ⁻⁴	4,46*10 ⁻⁵	1	4,46*10 ⁻⁵	1	7,17*10 ⁻⁴
g/s	3,57*10 ⁻²	7,99*10 ²	1	0,25	5,595*10 ³	1	0,0128	2,86*10 ²	1	0,0623	1,396*10 ³

Umrechnungsfaktoren für Massenstrom-Änderung in Druck-Volumen-Änderungen

	Stickstoff M = 28,014g/mol ρ _N = 1,251g/l		Helium M = 4,003g/mol ρ _N = 0,1791g/l		Methan M = 16,042g/mol ρ _N = 0,901g/l		Vinylchlorid M = 62,494g/mol ρ _N = 0,874*10 ⁻³ g/l		Benzol M = 78,108g/mol ρ _N = 0,717g/l	
	Pa*m ³ /s	g/s	Pa*m ³ /s	g/s	Pa*m ³ /s	g/s	Pa*m ³ /s	g/s	Pa*m ³ /s	g/s
Pa*m ³ /s	1	1,13*10 ⁻²	1	1,616*10 ⁻³	1	3,152*10 ⁻²	1	2,5224*10 ⁻²	1	6,474*10 ⁻³
g/s	88,4405	1	618,929	1	31,719	1	39,6449	1	154,442	1

Anhang 2 – Durchschnittliche Emissionsfaktoren der EPA (Average Factors)

Tabelle 1: Synthetic Organic Compound Manufacturing Industry (SOCMI)
Average Emission Factors

Ausrüstungstyp	Zustand des geförderten Mediums	Emissionsfaktoren [kg/h/Quelle]
Ventile	gasförmig leicht flüssig schwer flüssig	0,00597 0,00403 0,00023
Pumpendichtungen	leicht Flüssig schwer flüssig	0,0199 0,00862
Kompressordichtungen	gasförmig	0,228
Druckentlastungsventile	gasförmig	0,104
Flanschverbindungen	jeder	0,00183
Blindflansche	jeder	0,0017
Probenahmestellen	jeder	0,0150

Anhang 3 - Einteilung in Überprüfungsbereiche (Screening Ranges Factors) nach EPA

Tabelle 1: SOCMI; EPA Screening Ranges Factor's

Ausrüstungstyp	Zustand des geförderten Mediums	Emissionsfaktoren [kg/h/Quelle] ≥ 10 000 ppm v	Emissionsfaktoren [kg/h/Quelle] < 10 000 ppm v
Ventile	gasförmig leicht flüssig schwer flüssig	0,0782 0,0892 0,00023	0,000131 0,000165 0,00023
Pumpendichtungen	leicht flüssig schwer flüssig	0,243 0,216	0,00187 0,00210
Kompressordichtungen	gasförmig	1,608	0,0894
Druckentlastungsventile	gasförmig	1,691	0,0447
Flanschverbindungen	jeder	0,113	0,0000810
Blindflansche	jeder	0,001195	0,0015
Probenahmestellen	jeder	-	-

Anhang 4 - EPA Korrelation

Tabelle 1: SOCMI Leckagerate/ Messwert EPA Korrelation

Ausrüstungstyp	Korrelation
Ventile im Gasstrom	Leckagerate [kg/h] = $1,87E - 06 \times (\text{Messwert})^{0,873}$
Ventile im Flüssigkeitsstrom leicht flüssig	Leckagerate [kg/h] = $6,41E - 06 \times (\text{Messwert})^{0,797}$
Pumpendichtungen leicht flüssig	Leckagerate [kg/h] = $1,90E - 06 \times (\text{Messwert})^{0,824}$
Flanschverbindungen Alle	Leckagerate [kg/h] = $3,05E - 06 \times (\text{Messwert})^{0,885}$

Der Messwert ist in ppm_{Methan} einzusetzen!

Tabelle 2: Null- und Maximum-Emissionsraten für SOCMI Anlagen

Ausrüstungstyp	Null – Emissionsraten in kg/h	Maximum – Emissionsraten in kg/h	
		10 000 ppm	100 000 ppm
Ventile im Gasstrom	6,6 E – 07	0,024	0,11
Ventile im Flüssigkeitsstrom leicht flüssig	4,9 E – 07	0,036	0,15
Pumpendichtungen leicht flüssig	7,5 E – 06	0,14	0,62
Flanschverbindungen Alle	6,1 E – 07	0,044	0,22

Anhang 5 - VDI Faktoren

Tabelle 2: Durchschnittliche gasförmige Emissionen des Fördergutes bei Pumpen nach VDI

Nr.	Dichtsystem mit nachfolgendem Dichtungstyp	Durchschnittliche gasförmige Emission des Fördergutes im laufenden Betrieb *)	Bemerkung
1	Stopfbuchse mit Packung	Leckagen sind nicht emissionsrelevant	Anwendung nur bei nicht emissionsrelevanten hochviskosen Produkten, die in der Regel bei der Umgebungstemperatur fest oder pastös sind
2	Einzel-Gleitringdichtung	1 g/(h · Stück)	DW**) = 50 mm p = 10 bar n = 3000 min ⁻¹
3	Mehrfach-Gleitringdichtung mit Vorlagemedium (bei geschlossener Leckageabfuhr)	annähernd null	
4	Mehrfach-Gleitringdichtung mit Spermediem	keine Emission (technisch dicht)	
5	wellendichtungslose Ausführung/Membranpumpe	keine Emission (technisch dicht)	

*) Es handelt sich hierbei nicht um Grenzwerte

**) Wellendurchmesser

Tabelle 3: Durchschnittliche gasförmige Emissionen des Fördergutes bei Kompressoren nach VDI

Nr.	Dichtsystem mit nachfolgendem Dichtungstyp	Durchschnittliche gasförmige Emission des Fördergutes im laufenden Betrieb *)	Bemerkungen
1	Wellenabdichtung, rotierend		
1.1	Einzel-Labyrinthdichtung	32 l/min/mm DW ***)/bar im Normzustand **)	Labyrinth mit 5 Spitzten/0,1 mm Spalt/b = 20 mm
1.2	Einzel-Segmenttringdichtung	2 l/min/mm DW ***)/bar im Normzustand	
1.3	Einzel-Gleitringdichtung, gasgeschmiert	25 l/min/10 bar/100 mm DW ***) im Normzustand	bei $n = 1000 \text{ min}^{-1}$
1.4	Mehrfach-Labyrinthdichtung mit Sperrrmedium o. Absaugung	keine Emission (technisch dicht)	
1.5	Mehrfach-Segmenttringdichtung mit Sperrrmedium oder Absaugung	keine Emission (technisch dicht)	
1.6	Mehrfach-Gleitringdichtung, gasgeschmiert, mit Sperrrmedium oder Absaugung	keine Emission (technisch dicht)	
1.7	Mehrfach-Gleitringdichtung, flüssigkeitsgeschmiert, mit Sperrrmedium	keine Emission (technisch dicht)	
2	Stangenabdichtung, oszillierend		
2.1	Dichtung, trockenlaufend, ohne Kontakt zur Kolbenstange, Labyrinthbauart	20 l/min/10 bar/25mm DW ***) im Normzustand	
2.2	Dichtung, trockenlaufend, mit Kontakt zur Kolbenstange	5 l/min/10 bar/25 mm DW ***) im Normzustand	
2.3	Dichtung, geschmiert, mit Kontakt zur Kolbenstange	2 l/min/10 bar/25 mm DW ***) im Normzustand	

*) Es handelt sich hierbei nicht um Grenzwerte

**) 0°C, 1013 hPa (mbar)

***) Wellendurchmesser

Tabelle 4: Durchschnittliche gasförmige Emissionen des Fördergutes an Durchführungen der Absperr- und Regelorgane nach VDI

Nr.	Dichtsystem mit nachfolgendem Dichtungstyp	Durchschnittliche gasförmige Emission *) des Fördergutes im laufenden Betrieb bezogen auf den mittleren Dichtungsumfang mg/(s · m)
1	Stopfbuchse mit Packung	1,0
2	Stopfbuchse mit Manschette, O-Ring	0,1
3	Stopfbuchse mit Packung, Stopfbuchse mit Manschette, O-Ring	0,01
4	metallischer Faltenbalg, abgedichtet	0,01
5	metallischer Faltenbalg, abgedichtet	0,001
6	Stopfbuchse mit Packungen und Spermedium/Absaugung, metallischer Faltenbalg, beidseitig verschweißt	keine Emission (technisch dicht)

*) Es handelt sich hierbei nicht um Grenzwerte

Tabelle 5: Durchschnittliche gasförmige Emissionen des Fördergutes bei Flanschverbindungen nach VDI

Nr.	Dichtsystem mit nachfolgendem Dichtungstyp	Durchschnittliche gasförmige Emission *) des Fördergutes im laufenden Betrieb, bezogen auf den mittleren Dichtungsumfang mg/(s · m)	Bemerkung
1	Weichstoffdichtung; Weichstoff-Metall-Dichtung; Metall-Weichstoff-Dichtung	0,01	z. B. Faserplatte oder Platte aus expandiertem Graphit oder PTFE-Platte; innen mit Metall eingefasste Faserstoff- oder Graphitabdichtung; Spiraldichtung sowie Wellringdichtung oder Kammprofilabdichtung mit Weichstoffauflage
2	Weichstoffdichtung; Weichstoff-Metall-Dichtung; Metall-Weichstoff-Dichtung	0,001	z. B. Elastomerdichtung; innen mit Metall eingefasste Spießblech- oder Klettblechdichtung; Spiraldichtung sowie Wellringdichtung oder Kammprofilabdichtung mit Weichstoffauflage
3	Metalldichtung; Schweißdichtung	keine Emission (technisch dicht)	

*) Es handelt sich hierbei nicht um Grenzwerte