

Laseroptisches Messverfahren zur Dichtheitsprüfung von kraftstoffführenden Komponenten bei 200 MPa

Vortrag im Rahmen der
DGZfP-Jahrestagung 2005
2. - 4. Mai in Rostock

Referent: Gerhart Schroff

GEMTEC Laseroptische Systeme GmbH
Otto-Hahn-Str. 3
D-71364 Winnenden

Telefon: 07195 / 911 2950
Fax: 07195 / 911 2959
email: schroff@gemtec-online.com
<http://www.gemtec-online.com>

Veranstalter:

Deutsche Gesellschaft für
Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
Max-Planck-Str. 6
D-12489 Berlin

Dipl.-Phys. Gerhart Schroff, Dipl.-Ing. Michael Stetter

Laseroptisches Messverfahren zur Dichtheitsprüfung von kraftstoffführenden Komponenten bei 200 MPa

INHALT	1	Übersicht Messverfahren
	1.1	Stand der Technik
	1.2	TLF-Prüfverfahren
	2	Grundlagen des TLF-Prüfverfahrens
	2.1	Funktionsprinzip Prüfmediumaufbereitung
	2.1.1	Ermittlung der Löslichkeitsprozessparameter
	2.1.2	Übersicht Testgase
	2.2	Fotoakustisches Gasnachweisverfahren
	2.2.1	Fotoakustisches Messprinzip
	2.2.2	Lecklokalisierungssystem STS 400
	2.2.3	Integrale Prüfsysteme
	2.2.4	Kalibrierung einer TLF-Prüfanlage
	3	Anwendungsbeispiele
	3.1	Lecksuche mit dem Laserscanverfahren
	3.2	Integrale TLF-Dichtheitsprüfanlage

Dipl.-Phys. Gerhart Schroff, Dipl.-Ing. Michael Stetter

Laseroptisches Messverfahren zur Dichtheitsprüfung von kraftstoffführenden Komponenten bei 200 MPa

Viele industriell hergestellte Produkte enthalten bei ihrer Verwendung Flüssigkeiten. Häufig handelt es sich bei diesen technischen Produkten beispielsweise um kraftstoffführende Komponenten im PKW.

1 Übersicht Messverfahren

Die Dichtheitsprüfung von kraftstoffführenden Komponenten, insbesondere bei modernen Dieseleinspritzsystemen erfordert aufgrund der hohen Einspritzdrücke von bis zu 200 MPa und der Tatsache, dass diese Drücke je nach Anwendung für die gesamte Betriebsdauer anstehen, neue auf diesen Anwendungsfall zugeschnittene Prüfverfahren.

1.1 Stand der Technik

Für viele dieser kraftstoffführenden Komponenten ist als Prüfmedium ein Prüfl vorgeschrieben. Eine Dichtheitsprüfung mittels einer Druckabfall- oder Differenzdruckmethode ist bei Drücken von 200 MPa nicht mehr möglich, wenn Leckraten von etwa $0,02 \text{ mm}^3 \text{ Prüfl} / \text{s}$ noch erkannt werden sollen. Die einzige bisher eingesetzte Prüfmethode ist der sogenannte "Löschblatttest".

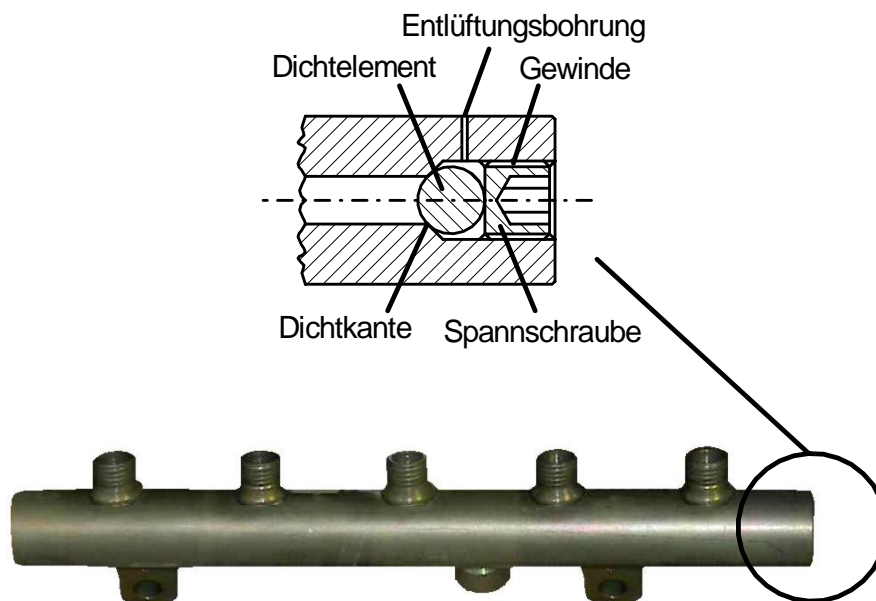


Bild 1: CRI-Rail mit nicht unmittelbar zugänglichen Leckstellen

Bei dem Löschblatttest wird der Prüfling nach einer festgelegten Zeit, für die dieser mit einem flüssigen Prüfmedium mit Druck beaufschlagt wird, manuell mit einem Löschblatt abgetastet. Sollte dann auf dem Löschblatt eine mit Öl benetzte Stelle sichtbar sein, so wird der Prüfling als undicht eingestuft. Der Löschblatttest ist ein:

- manuelles, personalintensives Prüfverfahren, mit einer
- Nachweisgrenze von etwa $(0,5-7) \text{ mm}^3$ Prüföl/s

Bei vielen Dieselhochdruckkomponenten ist die eigentliche Dichtstelle, wie bei dem in Bild 1 dargestellten CRI-Rail nicht unmittelbar zugänglich.

Bevor an der manuell mit einem Löschblatt zugänglichen Prüfobjektoberfläche eine mit Prüföl benetzte Stelle sichtbar wird, müssen erst zum Teil sehr große Totvolumen in der Größenordnung von bis zu $0,5 \text{ cm}^3$ mit aus der Leckstelle austretendem Prüföl gefüllt werden. Hierdurch wird dann natürlich die Nachweisempfindlichkeit noch zusätzlich drastisch reduziert. Obwohl die benötigte Nachweisempfindlichkeit von etwa $0,02 \text{ mm}^3$ Prüföl / s auch an Prüfstellen an denen die Dichtstelle besser zugänglich ist mit dem Löschblatttest nicht erreicht wird, war der Löschblatttest lange Zeit die einzige praktikable Prüfmethode.

1.2 TLF-Prüfverfahren (Testgas in liquid Fluids)

Das für die Dichtheitsprüfung von mit Flüssigkeiten verfüllten Komponenten, insbesondere von Dieselhochdruckkomponenten entwickelte TLF-Prüfverfahren zeichnet sich aus durch:

- flüssiges Prüfmedium mit einem darin gelösten Testgas
- fotoakustischen Testgasnachweis
- Nachweisgrenze von $0,01 \text{ mm}^3$ Prüföl/s
- Prüfdrücke bis über 200 MPa
- automatisiertes, kostengünstiges Prüfverfahren

Bild 2: Eigenschaften des TLF-Prüfverfahren

Bei dem TLF-Prüfverfahren werden die Vorteile eines flüssigen Prüfmediums mit den Vorteilen eines fotoakustischen Gasnachweises kombiniert. Hierzu wird ein gut fotoakustisch nachweisbares Testgas in dem Prüfmedium gelöst. Das so präparierte Prüföl wird dann definiert in den Prüfling verfüllt und der Prüfling für die gewünschte Druckhaltezeit auf dem Prüfdruck gehalten. Sollte der Prüfling eine undichte Stelle haben, so tritt an dieser Prüföl und eine der Prüfölmenge proportionale Testgasmenge aus. Aus der ausgetretenen Testgasmenge kann dann eindeutig und mit hoher Nachweisempfindlichkeit die Prüföl-Leckrate bestimmt werden.

Da bei dem TLF-Prüfverfahren nicht das Prüföl als flüssiges Medium zur Erkennung und Bestimmung der Größe einer Leckrate herangezogen wird, sondern das

darin zuvor in Lösung gedrückte Testgas, kann eine Leckstelle auch in dem oben beschriebenen Fall einer nicht unmittelbar zugänglichen Leckstelle sicher detektiert werden, da ein Gas sehr schnell durch Gewindegänge oder eine Entlüftungsbohrung über Diffusionsvorgänge aus dem Bauteil in die Umgebung des Prüflings gelangen kann.

Als Gasnachweissystem zum Nachweis des an einer Leckstelle von dem Prüfling freigesetzten Testgas wird ein fotoakustisches Gasnachweissystem verwendet, welches auch stark ölhaltiges Analysengas störungsfrei auswerten kann. Mit dem TLF-Prüfverfahren können unter Produktionsbedingungen noch Leckraten von bis zu $0,01 \text{ mm}^3 \text{ Prüfling} / \text{s}$ erkannt werden.

2 Grundlagen des TLF-Prüfverfahrens

Um einen Prüfling nach dem TLF-Prüfverfahren auf Dichtigkeit überprüfen zu können müssen in der Prüfanlage die hierzu erforderlichen notwendigen Voraussetzungen geschaffen werden.

2.1 Funktionsprinzip Prüfmediumaufbereitung

Damit an einer Leckstelle am Prüfling aus dem dort austretenden Prüfling auch eine definierte Menge an Testgas austreten kann muss zuvor sichergestellt werden, dass das Testgas auch in dem Prüfling in der gewünschten Menge enthalten ist.

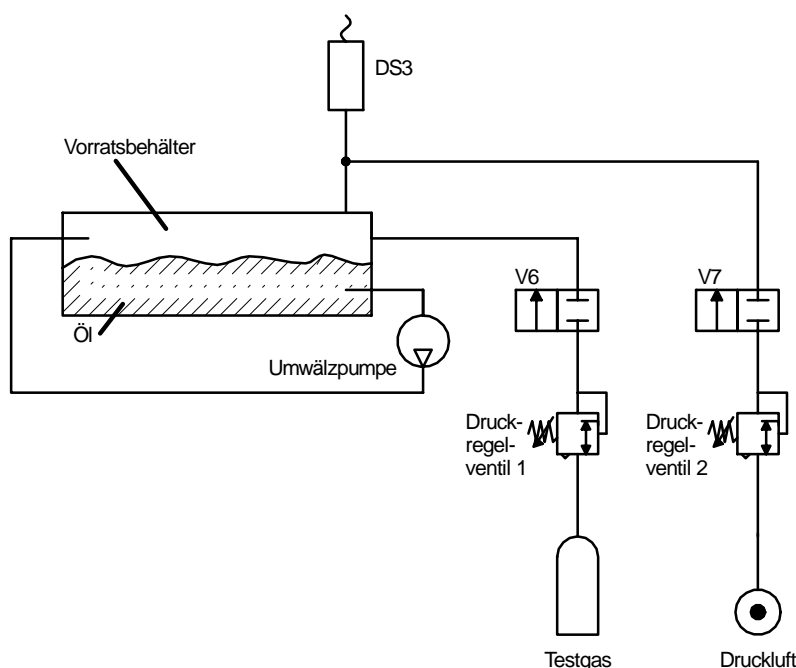
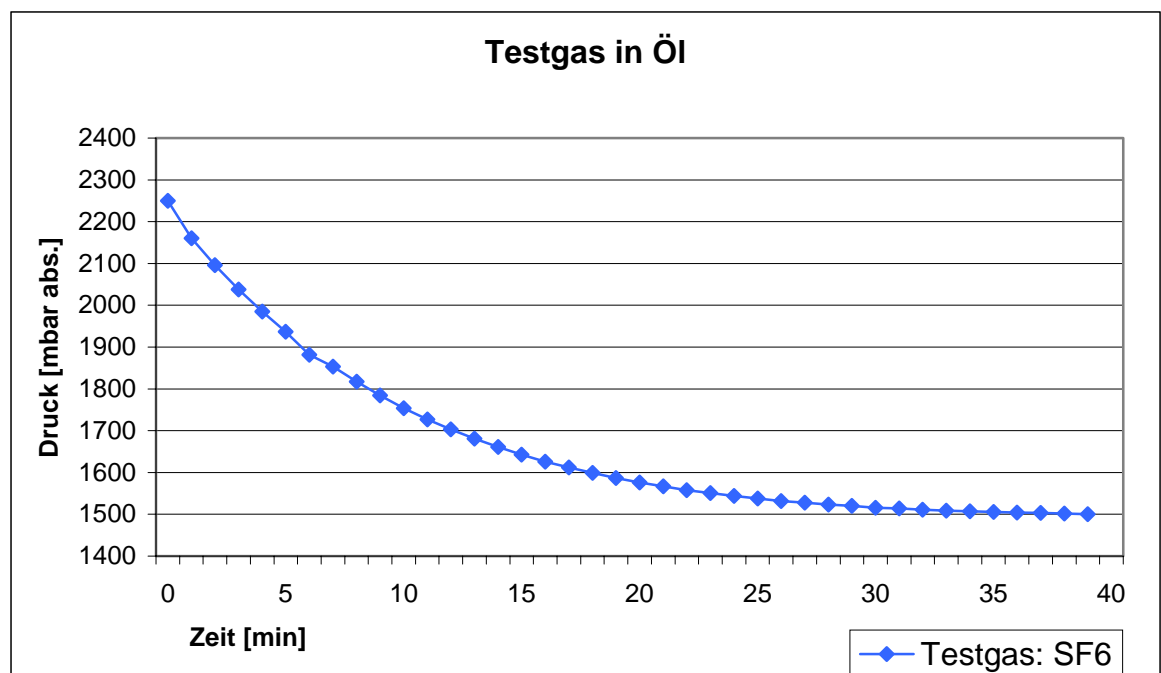


Bild 3: Funktionsprinzip der TLF-Prüfmediumaufbereitung

Dem flüssigen Prüföl wird das jeweilige Testgas in einem Vorratsbehälter durch geeignete Vorgabe des Testgaspartialdrucks in der benötigten Menge in Lösung gedrückt. Durch eine Umwälzpumpe wird das Prüföl stetig umgewälzt. Hierdurch wird sichergestellt, dass nach einer Entnahme von Prüföl aus dem Vorratsbehälter das neu zugeführte testgasfreie Prüföl hinreichend schnell wieder mit dem Testgas anreichert wird und jedes Volumenelement des im Vorratsbehälter befindlichen Prüföls eine definierte Menge an Testgas enthält.

2.1.1 Ermittlung der Löslichkeitsprozessparameter

Für einen stabilen Prüfprozess ist es wesentlich die für die Prozesssteuerung notwendigen Prozessparameter vorab zu ermitteln. Dieses kann für den Vorgang der Löslichkeit des verwendeten Testgases in dem eingesetzten Prüföl mit dem in Bild 3 dargestellten Aufbau erfolgen. Hierzu kann der Vorratsbehälter teilweise, beispielsweise zu 30 %, mit Prüföl befüllt werden. In einem zweiten Schritt wird der Vorratsbehälter mit einer definierten Menge an Testgas bedrückt und der Druckabfall über die Zeit aufgezeichnet.



- Ermittlung der Löslichkeit des verwendeten Testgases
- Ermittlung der Temperatur-Regelparameter
- Ermittlung der zeitlichen Regelparameter

Bild 4: Ermittlung der Löslichkeitsprozessparameter

Aus dem so ermittelten Verlauf des Testgasdrucks über die Zeit können sowohl die Löslichkeit des verwendeten Testgases, als auch die zeitlichen Regelparameter

ter für die gewünschte Prüfoltemperatur abgeleitet werden. In Bild 4 ist dieser Lösungsvorgang für das Testgas SF₆ dargestellt. Führt man diesen Vorgang bei unterschiedlichen Temperaturen durch, so können auch die für die Temperaturregelung wesentlichen Parameter ermittelt werden.

2.1.2 Übersicht Testgase

Für das TLF-Prüfverfahren stehen eine Reihe von Testgase zu Verfügung. In Tabelle 5 sind die wichtigsten Testgase zusammen mit den für das TLF-Prüfverfahren notwendigen Daten aufgeführt.

Testgas	Löslichkeit in Prüfol [cm ³ bar/cm ³]	Löslichkeit in H ₂ O [cm ³ bar/cm ³]	Nachweisgrenze [ppm]	Bemerkungen zum Einsatz
SF ₆	0,45 ^{*)} (bei 40° C)	gering	0,001	Das hohe Treibhauspotential muss bei der Anwendung beachtet werden. Aufgrund der sehr hohen Nachweisempfindlichkeit werden allerdings nur sehr geringe Konzentrationen im Prüfmedium benötigt, so dass das Treibhauspotential für viele Anwendungen vernachlässigt werden kann. Dampfdruck 21 bar bei 20° C. MAK-Wert: 1000 ppm.
N ₂ O	2,5 ^{*)} (bei 23° C)	0,63 (bei 23° C)	2	Dampfdruck 50,8 bar bei 20° C. MAK-Wert: 100 ppm.
CO ₂	1,95 ^{#)} (bei 20° C)	0,88 (bei 20° C)	3	Hohe Hintergrundkonzentration in der Luft, ca. 400 ppm. Bei Anwendung beachten. Dampfdruck 57 bar bei 20° C. MAK-Wert: 5000 ppm.

Anmerkungen: SF₆ hat keine das Ozon schädigenden Eigenschaften wie etwa Chlor und dessen Verbindungen. Alle aufgeführten Testgase können auch gasförmigen Prüfmedien, etwa Luft oder N₂, zugemischt werden. Hierbei ist zu beachten, dass der jeweilige Partialdruck des Testgases in der Testgasmischung den entsprechenden Dampfdruck nicht übersteigt, da das Testgas sich sonst im Mischtank verflüssigt.

^{*)} in Shell-Prüfol 1404

^{#)} in Heptan

Tabelle 5: Übersicht Testgase

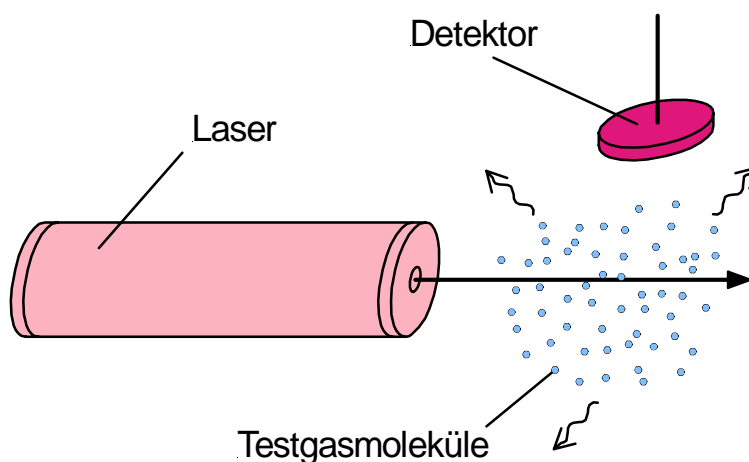
Welches Testgas für welche Anwendung das ideale Testgas ist, hängt von der jeweiligen konkreten Anwendung ab. Das Testgas mit der mit Abstand höchsten Nachweisempfindlichkeit ist das Testgas SF₆. Mit diesem Testgas können noch Leckraten bis etwa 10⁻⁹ mbarl/s detektiert werden. Bei dem Testgas CO₂ ist wichtig, dass die sehr hohe natürliche Hintergrundkonzentration bei der Planung einer Prüfeinrichtung in ausreichendem Maße berücksichtigt wird.

2.2 Fotakustisches Gasnachweisverfahren

Bei den laseroptischen Gasnachweissystemen von GEMTEC erfolgt der Testgasnachweis mittels des fotoakustischen Effektes. Der fotoakustische Testgasnachweis ermöglicht sowohl eine integrale Dichtheitsprüfung als auch eine lokalisierende Dichtheitsprüfung.

2.2.1 Fotoakustisches Messprinzip

Bei dem fotoakustischen Testgasnachweis beleuchtet ein in der Emissionsfrequenz auf das zu detektierende Testgas abgestimmter Laser das zu untersuchende Gasvolumen. Werden von dem Laser Testgasmoleküle beleuchtet, so absorbieren diese das eingestrahlte Laserlicht entsprechende der vorliegenden Testgaskonzentration.



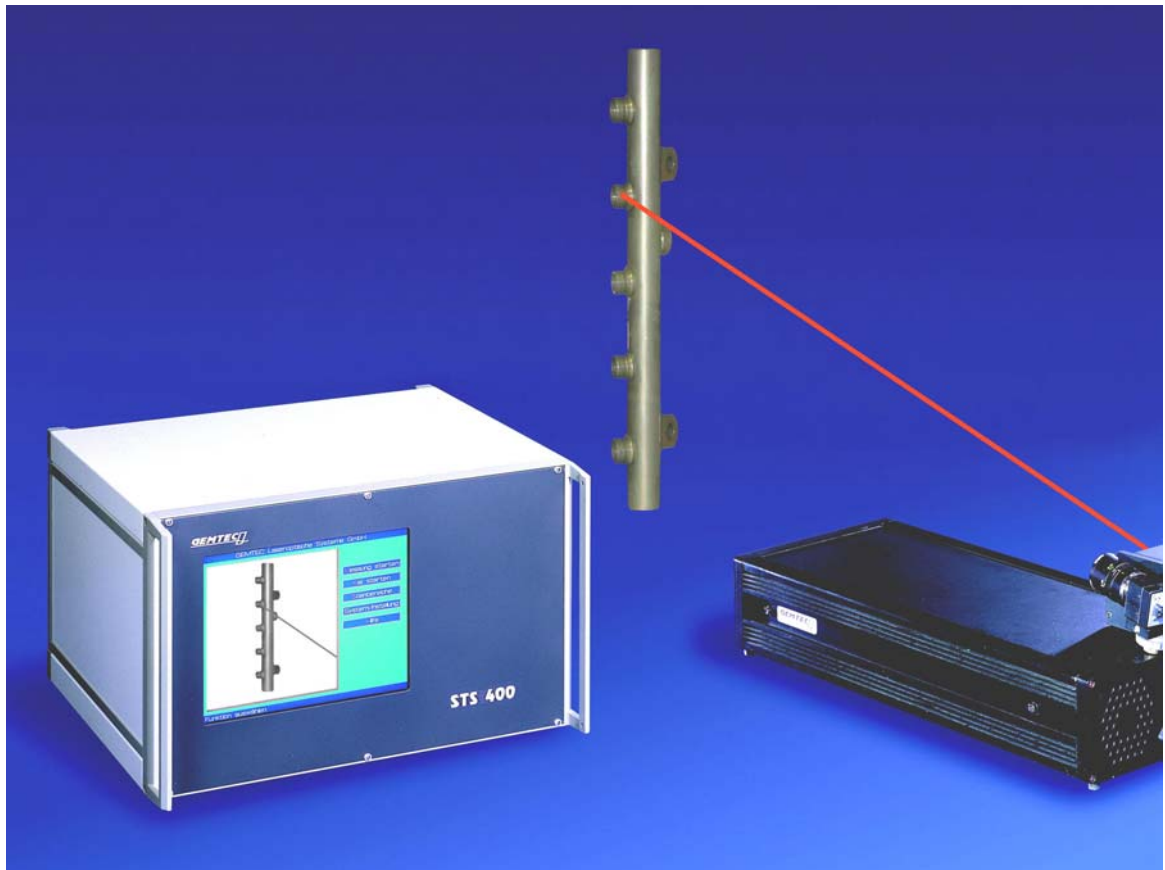
- Bestimmung der Testgaskonzentration in der Gasphase (Anlagerungseffekte an Oberflächen werden vermieden).
- Testgaskonzentration kann in einem weiten Druckbereich (10 - 1000) mbar bestimmt werden.
- Hohe Nachweisempfindlichkeit auch bei rauen Umgebungsbedingungen.

Bild 6: Fotoakustisches Messprinzip

Die optisch angeregten Testgasmoleküle verlieren die aufgenommene Energie allerdings sehr schnell durch Stöße mit anderen Molekülen oder Atomen wieder und treten somit mit ihrer Umgebung in direkte Wechselwirkung. Das durch diesen Vorgang erzeugte Schallsignal kann dann zur Bestimmung der Testgaskonzentration und damit zur Bestimmung der Leckraten an einem Prüfobjekt verwendet werden.

2.2.2 Lecklokalisierungssystem STS 400

Die lokalisierende Dichtheitsprüfung mittels des optischen Laserscanverfahrens von GEMTEC ermöglicht eine flexible automatisierte Qualitätskontrolle. Integriert in industrielle Fertigungsprozesse eröffnen diese optischen Leckortungssysteme gerade bei einer breiten Produktvielfalt völlig neue Perspektiven in der industriellen Qualitätssicherung.

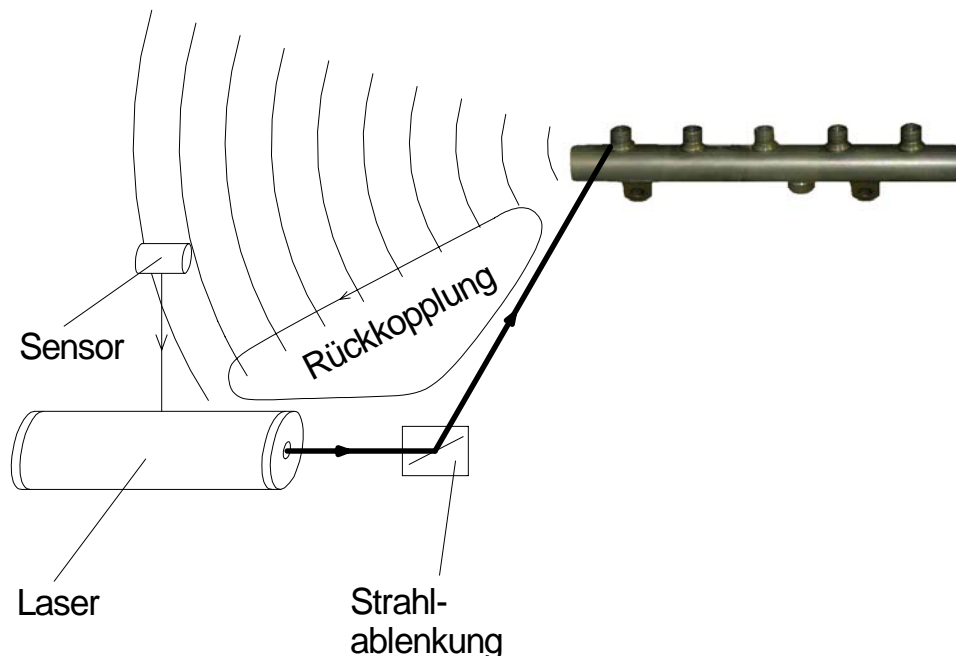


- Ersatz für Löschblatttest
- Quantifizierung der Leckrate
- Visualisierung des Messprozesses

Bild 7: Lecklokalisierungssystem STS 400

Bei dem optischen Laserscanverfahren kommt ein neuartiges optisches Rückkopplungsprinzip zur lokalisierenden Dichtheitsprüfung (Patent angemeldet) zum Einsatz. Zur Detektion von Leckagen wird das Prüfobjekt mit einem Laserstrahl abgerastert. Der Strahl wird, in analoger Weise zu dem Elektronenstrahl einer Bildröhre, über das Prüfobjekt oder Teilbereiche des Prüfobjektes geschwenkt. Das an den Leckstellen des Prüfobjektes austretende Testgas wird nun genau dann das Licht des Laserstrahls absorbieren, wenn der Laserstrahl eine Leckstelle beleuchtet. Die so optisch angeregten Testgasmoleküle verlieren diese aufgenommene Energie allerdings sehr schnell wieder und treten somit mit Ihrer Umgebung in direkte Wechselwirkung. Hierzu können die unterschiedlichsten Relaxati-

onsprozesse, wie etwa die der Fluoreszenzstrahlung oder die der Fotoakustik zugrundeliegenden beitragen. Das beleuchtete Testgas kann nun so auf das optische Dichtheitsprüfsystem rückkoppeln, dass sich das Testgas sicher und schnell detektieren lässt.



- Rückkopplungsprinzip ermöglicht die eindeutige Detektion des verwendeten Testgases auch bei starken Hintergrundgeräuschen.
- Großer Arbeitsabstand (bis zu 2,5 m) möglich.

Bild 8: Prinzipschema zur Leckortung

Im Gegensatz zu konventionellen spektroskopischen Gasnachweisverfahren, bei welchen etwa Hintergrundstrahlung oder auch elastische Streuvorgänge an Staubpartikeln, am Prüfling, oder sonstigen Oberflächen zu Fehlern bei der Testgasdetektion führen können, ermöglicht das im STS 400 verwirklichte optische Rückkopplungsprinzip einen robusten und sicheren Betrieb unter industriellen Bedingungen.

Da zum Entstehen einer Rückkopplung auf das optische System ganz bestimmte, testgasspezifische Relaxationsprozesse in dem von dem Laserstrahl beleuchteten Untersuchungsvolumen ablaufen müssen, kann aus dem Auftreten dieser Rückkopplung sicher zwischen dem zu detektierenden Testgas und der, das Laserlicht ebenfalls teilweise absorbierenden Prüfobjektoberfläche unterschieden werden. Der Rückkopplungskreis beinhaltet die zur Beleuchtung des Untersuchungsvolumens notwendige Strahlquelle, bestehend aus dem Laser und der zum Verschwenken des von dem Laser erzeugten Laserstrahls notwendigen Strahlableitungseinheit, einen empfindlichen Detektor (im Falle des STS 400 ein spezielles, entsprechend empfindliches Mikrophon) und eine Regeleinheit. Wird nun bei dem Verschwenken des Laserstrahls über das Prüfobjekt das aus einem Leck am

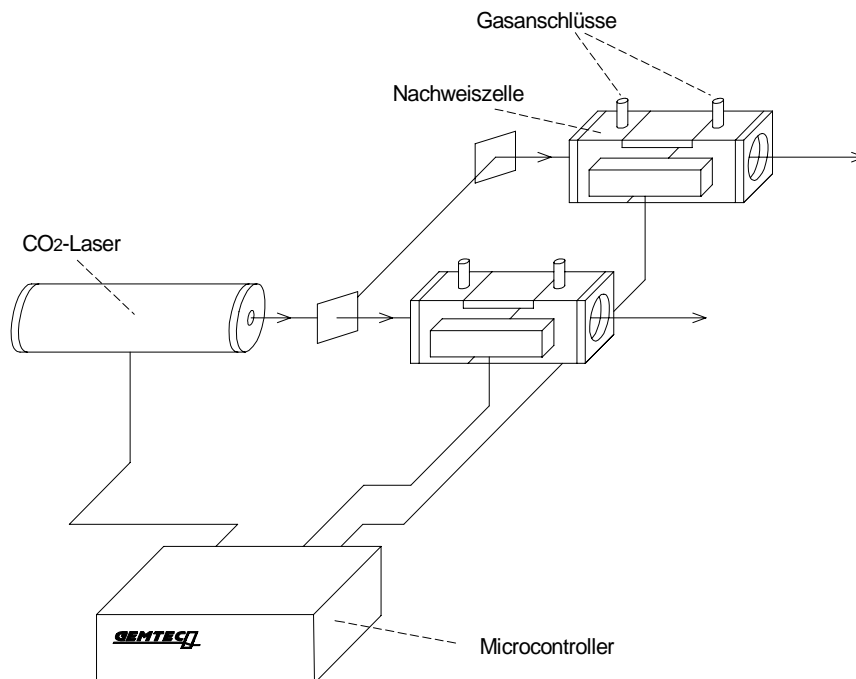
Prüfobjekt ausgetretene Testgas beleuchtet, so entstehen testgasspezifische Signale. Der Detektor registriert diese Signale zusammen mit den immer vorhandenen Hintergrundsignalen. Die Regeleinheit liefert ein Ausgangssignal, welches sich immer dann ändert, wenn in den von dem Detektor registrierten Signalen charakteristische Merkmale enthalten sind, welche die in den Testgasmolekülen ablaufenden Abregungsprozesse auszeichnen. Dies geschieht in der Art, dass ein abgeändertes - beispielsweise vergrößertes - Ausgangssignal den Betriebszustand der Strahlquelle so abändert, dass bei Vorhandensein solcher testgasspezifischer Signalanteile die Analyse der von dem Detektor gelieferten elektrischen Signale durch die Regeleinheit zu einem weiter abgeänderten - also weiter vergrößerten - Ausgangssignal führt, was dann wiederum zu einem noch weiter geänderten Betriebszustand der Strahlquelle führt und dadurch eine noch weitere Abänderung - noch weitere Vergrößerung - des Ausgangssignals der Regeleinheit nach sich zieht, usw.

Dieses im STS 400 verwirklichte Rückkopplungsverfahren ist, abstrakt gesehen, sehr eng mit der Erkenntnis verknüpft, dass das Vorhandensein eines Lautsprechers im Erfassungsbereich eines Mikrophons sehr leicht dadurch erkannt werden kann, indem der Lautsprecher von dem verstärkten Ausgangssignal des Mikrophons angesteuert wird, was zu einer dann akustischen Rückkopplung führt, wobei sich üblicherweise ein "Pfeifton" einstellt. Dieser Effekt ist beispielsweise aus öffentlichen Veranstaltungen oder aus Rundfunksendungen mit telefonischer Beteiligung der Hörer allgemein bekannt. Übertragen auf das optische Rückkopplungsverfahren bedeutet dies dann, dass, hervorgerufen durch Intensitätsänderungen des Laserlichtes, an dem aus dem Leck austretenden Testgas Abregungsprozesse induziert werden. Diese von dem Detektor registrierten Signale beeinflussen dann die Intensitätsänderung des Laserlichtes, was wiederum, bei vorhandenem Leck, zu charakteristischen Signalen am austretenden Testgas führt, so dass ein vom Laserstrahl beleuchtetes Leck zu einer Oszillation dieses Rückkopplungskreises führt. Da jedes aus der Physik bekannte optische Gasnachweisverfahren für ein solches Rückkopplungsverfahren zum Zwecke der Leckdetektion herangezogen werden kann, ist es im Prinzip möglich, nahezu jedes technisch relevante Gas nachzuweisen. Für den rauen industriellen Einsatz sind für die Dichtheitsprüfung vor allem das Inertgas SF_6 und das Gas C_2H_4 aufgrund ihrer hervorragenden Nachweisempfindlichkeit unter Verwendung des fotoakustischen Effektes als optisches Gasnachweisverfahren sehr gut geeignet.

2.2.3 Integrale Prüfsysteme

Wie bei allen integralen Gasnachweisssystemen wird Gas aus der Umgebung des mit dem Testgas bedrückten Prüflings entnommen und durch die Gasanschlüsse in die Nachweiszelle verbracht. Die Nachweiszelle verfügt über Fenster, durch die Laserstrahlung eindringen kann. Bei Vorhandensein des Testgases in der Nachweiszelle kann mittels des fotoakustischen Effektes dessen Konzentration bestimmt und daraus dann die Leckrate berechnet werden. Ein wesentlicher Vorteil fotoakustischer Dichtheitsprüfsysteme besteht darin, dass die Messung der Testgaskonzentration auch bei Atmosphärendruck stattfinden kann und die Messwerte weder von der Temperatur noch von dem Prüflingsvolumen abhängen.

Wird die den Prüfling umgebende Testkammer evakuiert, so ist hierfür bereits ein Vakuum von ca. 10 - 40 hPa, das einfach und schnell erreicht werden kann, ausreichend. Das Bild 9 zeigt den schematischen Aufbau der fotoakustischen integralen Dichtheitsprüfsysteme.

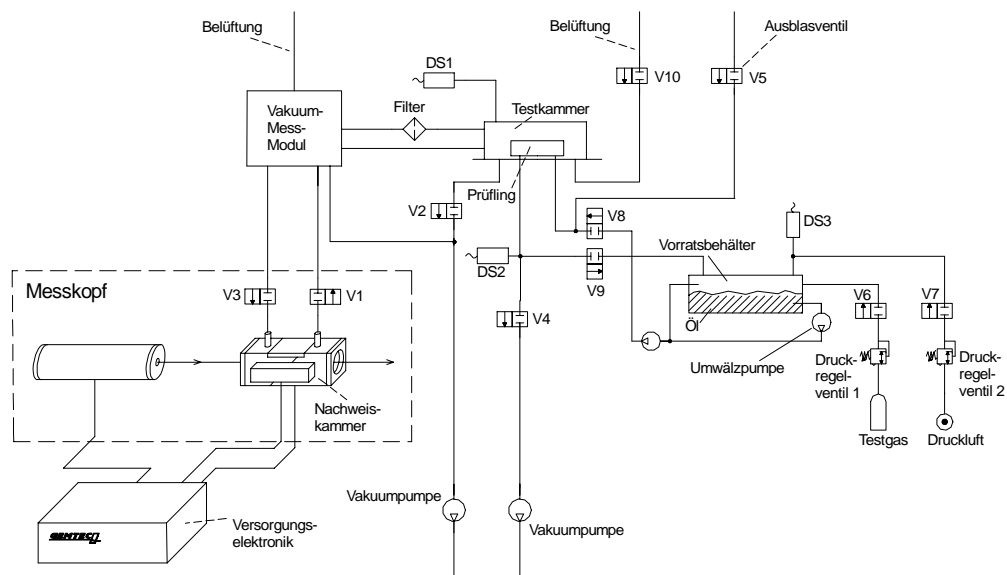


- Kompakter, robuster optischer Aufbau
- Mit bis zu zwei unabhängig betreibbaren Nachweiszellen
- Einfache Anbindung an Prüfanlagen durch in der Pneumatik übliche Komponenten

Bild 9: Prinzipschema integraler Prüfsysteme

Laseroptische Dichtheitsprüfsysteme sind letztendlich auf Grund des völlig unkritischen Vakuumendrucks bzw. der Möglichkeit auch bei Atmosphärendruck das Nachweissystem betreiben zu können, sehr ökonomisch und robust gegenüber verschmutzten oder feuchten Prüflingen. Die gesamte Prüfanlage kann üblicherweise mit normalen Pneumatik-Artikeln wie Ventilen und Kunststoff-Schläuchen aufgebaut werden. Zum Abdichten genügen gewöhnliche O-Ringe, als Vakuumpumpe ist in der Regel eine einfache ölgedichtete Drehschieberpumpe ausreichend. Auch brauchen keine aufwendigen Vorkehrungen gegenüber Groblecks getroffen werden, da die Nachweiskammer des Lasersystems sehr schnell und effektiv bei Atmosphärendruck gespült werden kann.

Bild 10 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Dichtheitsprüfeinrichtung für die integrale Dichtheitsprüfung. Die Vakuumtechnik zum Evakuieren der Testkammer auf das benötigte Grobvakuum von etwa 20 hPa ist einfach zu installieren und in Stand zu halten.



- Einfacher, robuster Anlagenbau
- Hohe Nachweisempfindlichkeit bei gleichzeitig kurzen Taktzeiten
- Geringe Anforderungen an die Vakuumtechnik

Bild 10: Prinzipieller Aufbau zur Dichtheitsprüfung mit Vakuum

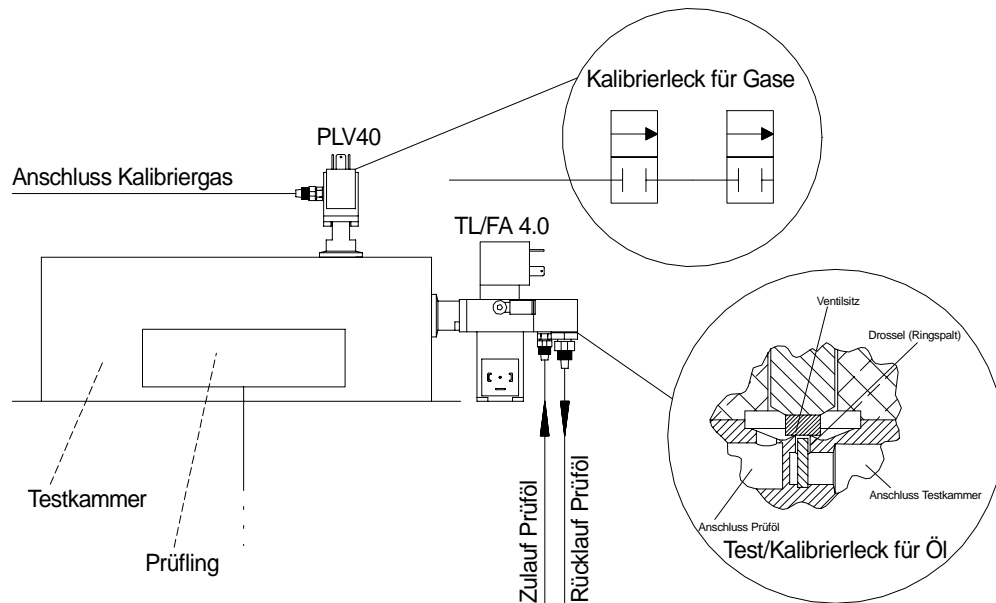
2.2.4 Kalibrierung einer TLF-Prüfanlage

In der industriellen Praxis ist es sehr schwierig und aufwendig, Leckagen mittels feiner, in dichte Prüflinge integrierter Kapillaren oder mittels aus der Produktion ausgesonderten undichten Prüflingen, Test- oder Kalibrierlecks zu generieren, die dann auch über viele Monate oder Jahre hinweg stabil den einmal ermittelten Leckagewert liefern.

Das Pulsleck PLV 40 wurde entwickelt um Dichtheitsprüfeinrichtungen auch unter sehr rauen Umgebungsbedingungen mittels eines Testgas-Kalibrierlecks sicher, reproduzierbar und vor allem langzeitstabil überwachen zu können. Analog ist die Situation, wenn Prüflinge mit einem flüssigen Prüfmedium auf Dichtheit überprüft werden müssen. Auch hier ist es ausgesprochen schwierig, ein stabiles und robustes Kalibrierteil zu erzeugen. Eine Alternative zu den aufwendig ausgesonderten Meisterteilen oder mittels feiner Kapillaren erstellten undichten Prüflinge ist das zuschaltbare Öl-Kalibrierleck TL/FA 4.0.

Zur Kalibrierung oder Überwachung der Konstanz von Dichtheitsprüfeinrichtungen kann mittels des zuschaltbaren Öllecks TL/FA 4.0 eine definierte Menge Prüföl innerhalb einer kurzen Zeit (< 5 s) in die Testkammer abgegeben werden. Soll nun die Prüfanlage getestet oder kalibriert werden, so wird nun nicht der Prüfling mit dem präparierten Prüföl befüllt, sondern mittels des zuschaltbaren Öllecks eine

definierte Menge Prüföl in die Testkammer abgegeben und die darin gelöste Menge an Testgas in der Testkammer freigesetzt.



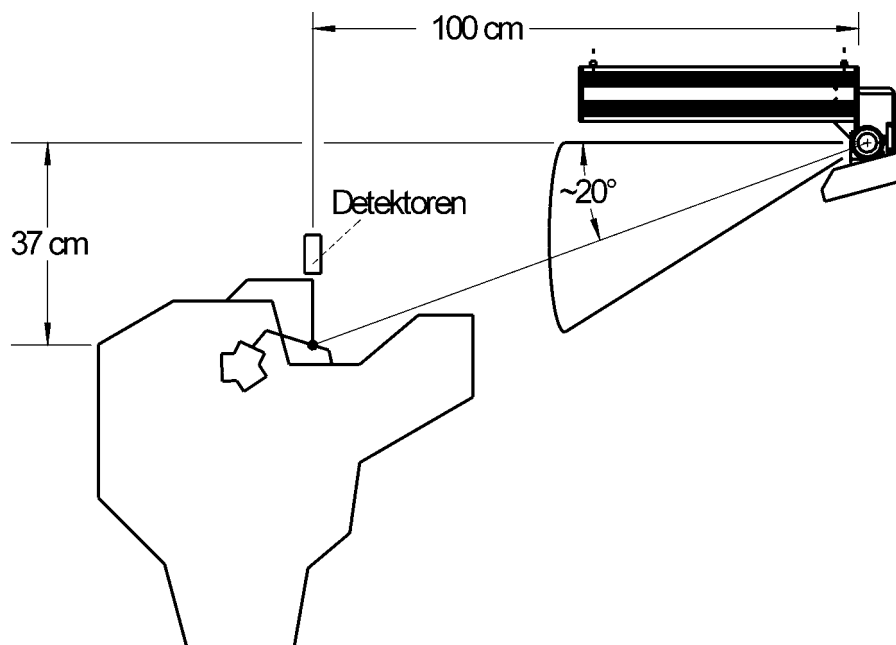
- Pulsleck PLV40 zur Überprüfung der Messtechnik
- TL/FA-Kalibrierleck für Prüfmedium
- Kombination von Pulsleck und Öl-Kalibrierleck ermöglicht eine sichere und schnelle Fehlersuche

Bild 11: Kalibrierung einer TLF-Prüfanlage

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Lecksuche mit dem Laserscanverfahren

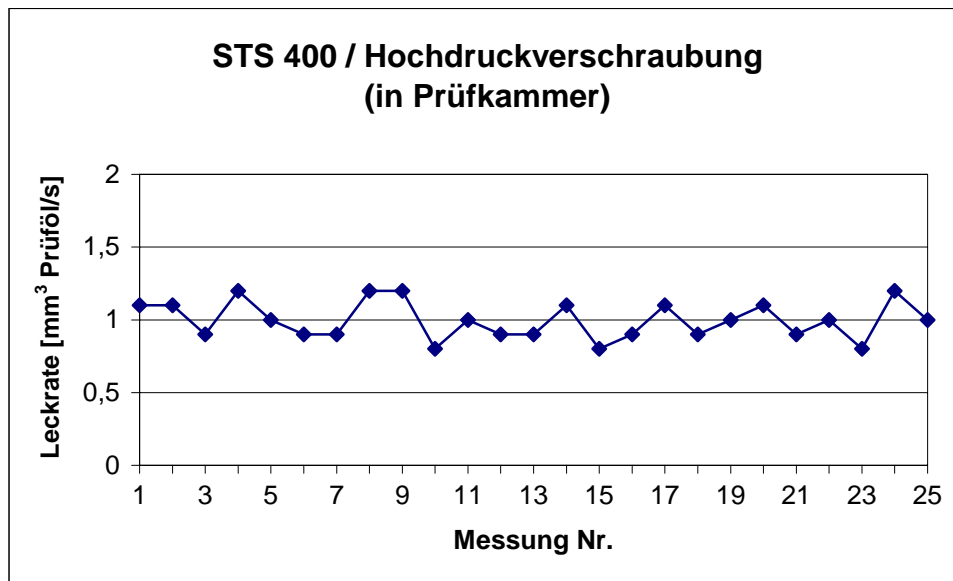
Um an PKW-Motoren die Dichtheitsprüfung der Kraftstoff führenden Komponenten am Kompletmotor mittels des Laserscanverfahrens durchführen zu können, wurde dem Kraftstoff (Diesel) das Testgas (SF_6) in einem Mischtank beigemischt und die Kraftstoff führenden Komponenten des Motors mit dem so präparierten Kraftstoff befüllt und auf Betriebsdruck (bis zu 1300 bar) gebracht. An einer undichten Stelle tritt dann der Kraftstoff aus und setzt das gelöste Testgas wieder frei. Die freigesetzte Menge an Testgas ist somit ein eindeutiges Maß für die Leckrate. Bild 12 zeigt die gewählte Scananordnung. Der Messkopf des STS 400 wurde oberhalb des Motors angeordnet, um einen einfachen Aufbau zu erhalten. Die Detektoren wurden über den Kraftstoff führenden Komponenten platziert.



- Scanposition STS 400 an PKW-Motor
- Nachweisgrenze etwa $0,1 \text{ mm}^3$ Prüföl/s
- Testgas SF_6

Bild 12: Anwendungsbeispiel Laserscanverfahren

Zum Nachweis der Machbarkeit dieses Prüfverfahrens wurden ausführliche Versuchsreihen an PKW-Motoren durchgeführt. Um ein Verwehen des an Leckstellen freigesetzten Testgases zu unterdrücken, wurde der Prüfling in eine Testkammer verbracht. Bild 13 zeigt eine typische Messreihe an einer undichten Verschraubung bei geschlossener Testkammer.



- CRI-Rail mit Leck an einer Hochdruckverschraubung
- Prüfdruck 110 MPa
- Leckrate ca. 1 mm³ Prüföl/s (10⁻³ mbarl/s)

Bild 13: Anwendungsbeispiel Laserscanverfahren

Es können somit sowohl komplexe, großvolumige Teile in der Endmontage, beispielsweise PKW-Motoren, als auch kleine, in hoher Stückzahl produzierte Teile sicher auf Leckstellen überprüft werden. Der vollautomatische Einsatz ermöglicht gleichbleibend niedrige Rückweisungsrate, da im Gegensatz z.B. zur Unterwasser-Dichtheitsprüfung keine bedienerabhängigen Einflüsse vorliegen.

3.2 Integrale TLF-Dichtheitsprüfanlage

Mit dem TLF-Prüfverfahren wurde es erstmals möglich, Dieselhochdruckkomponenten wie etwa CRI-Rails automatisiert auf Dichtigkeit überprüfen zu können. Für viele dieser Komponenten ist ein Prüföl als Prüfmedium vorgeschrieben.

Bild 14 zeigt eine TLF-Prüfanlage zur Dichtheitsprüfung von CRI-Rails. Die Prüfeinrichtung ist modular aufgebaut und besteht aus einem Prüfmodul und einem Versorgungsmodul. Dieser modulare Aufbau ermöglicht es unterschiedliche Prüfmodule für unterschiedliche Prüflinge innerhalb kürzester Zeit an das Versorgungsmodul anschließen und so die Prüfeinrichtung schnell und flexibel auf unterschiedliche Prüflinge umrüsten zu können.

In Bild 15 ist eine Testkammer der in Bild 14 dargestellten CRI-Prüfeinrichtung zu sehen. Die automatisiert eingelegten Prüflinge werden hydraulisch adaptiert. Der am CRI-Rail angeordnete Drucksensor wird parallel zur Dichtheitsprüfung in seiner Funktion überprüft. Bild 16 zeigt das Prüfmodul.



Bild 14: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
Gesamtansicht TLF-Dichtheitsprüfanlage

Die Prüfeinrichtung ist sowohl mit einem Testgas-Kalibrierleck Pulsleck PLV 40 als auch mit einem Kalibrierleck für das verwendete Prüföl vom Typ TL/FA 4.0 ausgestattet.



Bild 15: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
CRI-Rail eingelegt in der Testkammer einer TLF-Dichtheitsprüfanlage

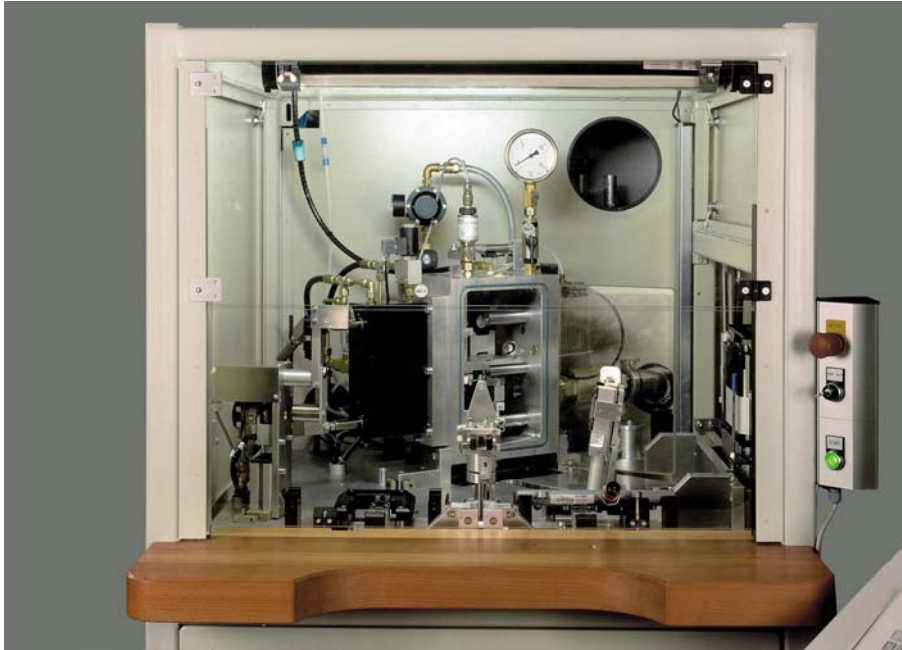


Bild 16: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
Frontansicht Prüfmodul einer TLF-Dichtheitsprüfanlage

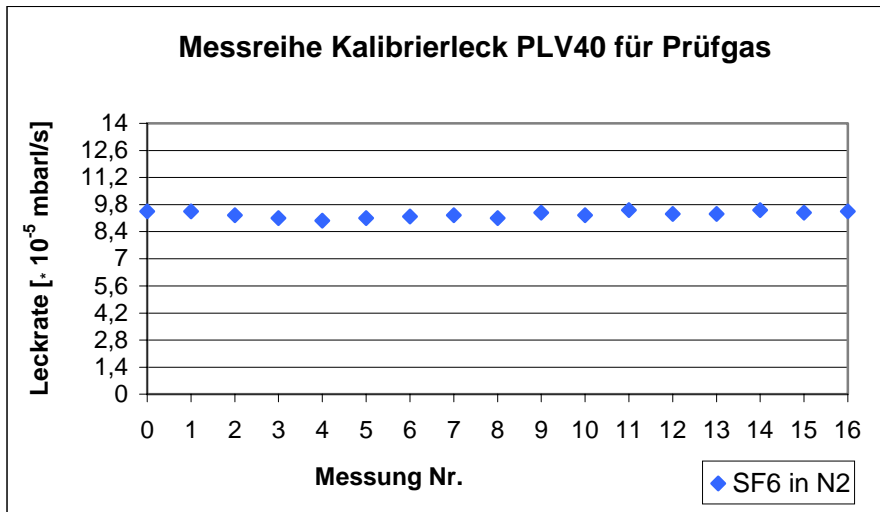


Bild 17: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
Prüfmodul mit integriertem Handlingsystem einer TLF-Dichtheitsprüfanlage

Das in Bild 17 gezeigte Handlingsystem der zu prüfenden CRI-Rails entnimmt die in der Prüflingsablage manuell oder automatisiert abgelegten Prüflinge, legt diese automatisiert in die Testkammer ein, entnimmt diese nach der Prüfung wieder aus

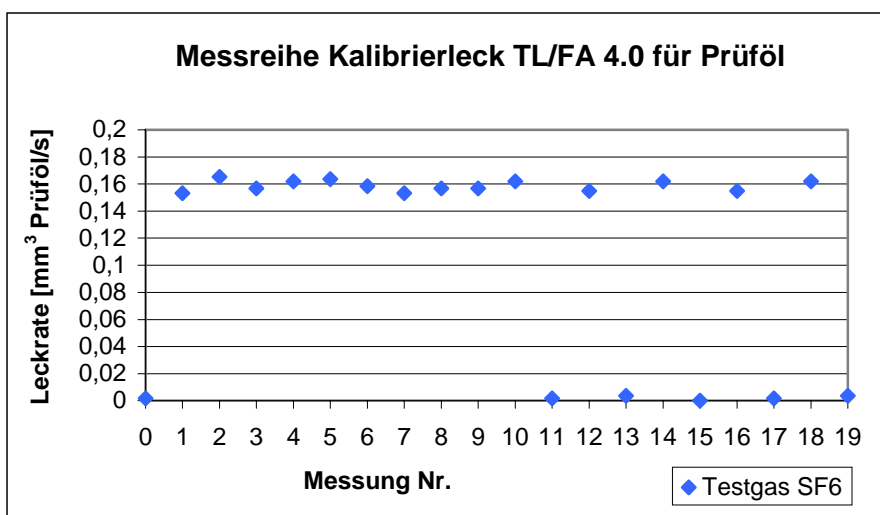
der Testkammer und versieht die IO-Teile mit einem Etikett. Danach wird das CRI-Rail in eine zweite Ablage abgelegt und für den Versand verpackt.

Bild 18 zeigt eine typische Messreihe des Kalibrierlecks PLV 40. Bild 19 zeigt eine typische Messreihe mit einem Öl-Kalibrierleck. Das Kalibrierleck war bei den Messungen Nummer 1 bis 10, 12, 14, 16 und 18 zugeschaltet und bei den Messungen 0, 11, 13, 15, 17 und 19 nicht zugeschaltet. Als Prüfling wurde ein dichter Prüfling in die Prüfvorrichtung eingelegt.



- Prüfdruck Pulsleck 0,4 MPa
- Entspricht einer Leckrate von $9 \cdot 10^{-5}$ mbarl/s

Bild 18: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum



- Prüfdruck 0,2 MPa
- Entspricht einer Leckrate von $0,16 \text{ mm}^3$ Prüföl/s ($9,5 \cdot 10^{-6}$ mbarl/s)

Bild 19: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum