

Einführung und Praxis der laseroptischen Dichtheitsprüfung

Fachvortrag im Rahmen des
Kursus LT2 Dichtheitsprüfung / Lecksuche
17. - 28. Oktober 2005 im
DGZfP-Ausbildungszentrum Dortmund

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

Einführung und Praxis der laseroptischen Dichtheitsprüfung

INHALT	1	Übersicht Dichtheitsprüfverfahren
	1.1	Prüfverfahren mit Luft
	1.2	Testgas nachweisende Prüfverfahren
	2	Fotoakustisches Gasnachweisverfahren
	2.1	Laseroptische Gasnachweissysteme zur integralen Dichtheitsprüfung
	2.1.1	Laseroptische Dichtheitsprüfung bei Umgebungs- oder Unterdruck
	2.2	Laseroptisches Laserscanverfahren
	2.2.1	Funktionsprinzip des Laserscanverfahrens
	2.2.2	Systemkonzept STS 400
	2.3	Übersicht Testgase
	2.4	Ermittlung der erforderlichen Testgaskonzentration
	2.5	Kalibrier- und Testmethoden
	3	Anwendungsbeispiele
	3.1	Integrale laseroptische Dichtheitsprüfung
	3.2	Lecksuche mit dem Laserscanverfahren
	3.3	TLF-Dichtheitsprüfverfahren

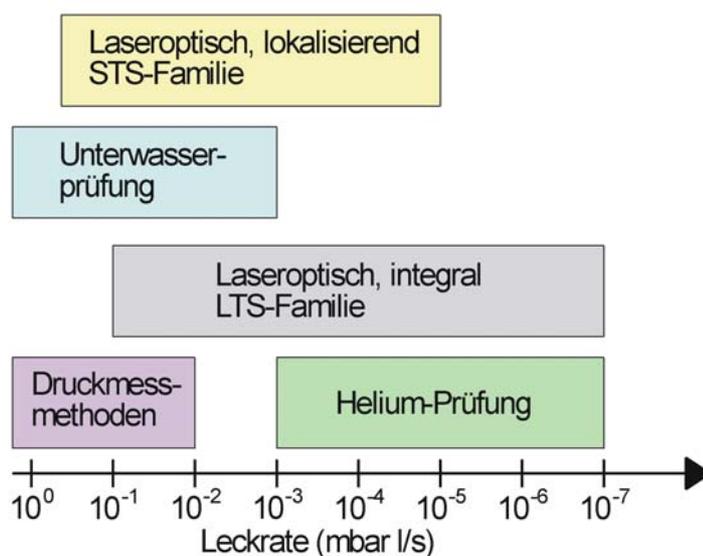
Dipl.-Phys. Gerhart Schroff, Dipl.-Ing. Michael Stetter

Einführung und Praxis der laseroptischen Dichtheitsprüfung

Die Dichtheitsprüftechnik ist ein wichtiger Aspekt in der industriellen Qualitätssicherung. Das Spektrum der zu prüfenden Erzeugnisse ist sehr breit. Genauso vielfältig wie die Produkte sind die Anforderungen an heutige Prüfsysteme. Für die Anwender ist es daher immer wichtiger das für die jeweilige Prüfaufgabe optimale Prüfverfahren zum Einsatz zu bringen.

1 Übersicht Dichtheitsprüfverfahren

Um die Vielzahl der verschiedenen Anwendungsbereiche abdecken zu können, wurden im Laufe der Zeit viele verschiedene Verfahren entwickelt. Um die Einsatzmöglichkeiten der laseroptischen Prüfverfahren abschätzen zu können, ist es hilfreich, weitere gängige Verfahren zur Dichtheitsprüfung kurz anzusprechen.



Laseroptische Gasnachweissysteme kommen zum Einsatz, wenn:

- Druckänderungsverfahren nicht mehr eingesetzt werden können,
- Leckstellen berührungslos lokalisiert werden sollen.

Bild 1: Übersicht Dichtheitsprüfverfahren

1.1 Prüfverfahren mit Luft

Die einzelnen Verfahren zur integralen Dichtheitsprüfung lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen: Prüfungen mit oder ohne Testgas. Ohne Testgas kommen momentan Drucküberwachungsmethoden, Durchflussmethoden und Unterwasserprüfungen im großen Stil zum Einsatz. Alle Druck- und Durchflussmethoden setzen voraus, dass die zu prüfenden Prüflinge in der Prüfaufnahme ein konstantes Volumen einschließen. Ein mit Druck beaufschlagter Prüfling zeigt dann, aufgrund eines Lecks, einen Druckabfall über die Zeit, was als Maß für die Leckage verwendet wird. Im Gegensatz dazu wird bei der Durchflussmesstechnik versucht, den Druck im Prüfling konstant zu halten und die Menge der, infolge eines Lecks in den Prüfling nachströmenden Luft zu messen. Die Durchflussmethode kommt dabei hauptsächlich bei großen Leckagen zur Anwendung. Beide Verfahren stoßen an ihre Grenzen, sobald die Annahme des konstanten Volumens nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Manche Teile ändern ihr Volumen aufgrund der mechanischen Belastung durch den Prüfdruck so, dass sich auch ohne Leckagen Druckänderungen ergeben, bzw. bei konstant gehaltenem Druck Luft nachströmt. Ähnliche Effekte werden durch Temperaturänderungen der Prüflinge oder der Prüfluft während der Prüfung verursacht. Derartige Effekte haben zu verfeinerten Verfahren geführt, beispielsweise der Differenzdruckmethode, bei der gleichzeitig der Prüfling und ein dichtes Prüfobjekt mit Druck beaufschlagt werden und nur die Druckdifferenz zwischen beiden Prüflingen ausgewertet wird. Hierdurch lassen sich manche Temperatur- oder Volumeneffekte teilweise kompensieren. Derzeit werden Druckmethoden in der Industrie für Lecks bis ca. 10^{-2} mbar/s eingesetzt. Druck- bzw. Durchflussmessgeräte sind am Markt derzeit für relativ wenig Geld erhältlich. Druckmethoden sind daher für vollautomatische Prüfanlagen bei Prüflingen mit mittleren bis großen Leckagen sehr ökonomisch.

Eine weitere, trotz ihrer Einfachheit oder gerade deswegen immer noch verbreitete Methode ist die Unterwasserprüfung. Wie beim Fahrradschlauch wird der Prüfling mit Druck beaufschlagt und unter Wasser gedrückt. Ein Beobachter sucht nach aufsteigenden Luftblasen. Diese sehr einfache Methode erlaubt es jedoch, noch relativ kleine Leckagen nachzuweisen (ca. 10^{-3} mbar/s). Weitere Vorteile sind die relativ geringen Investitionskosten und die meist einfache Lokalisierbarkeit von Leckstellen. Dem stehen eine Reihe von Nachteilen gegenüber. Das Verfahren ist sehr personalintensiv, da nicht automatisierbar; die Ergebnisse sind subjektiv und die Prüflinge sind nach der Prüfung nass und müssen getrocknet werden.

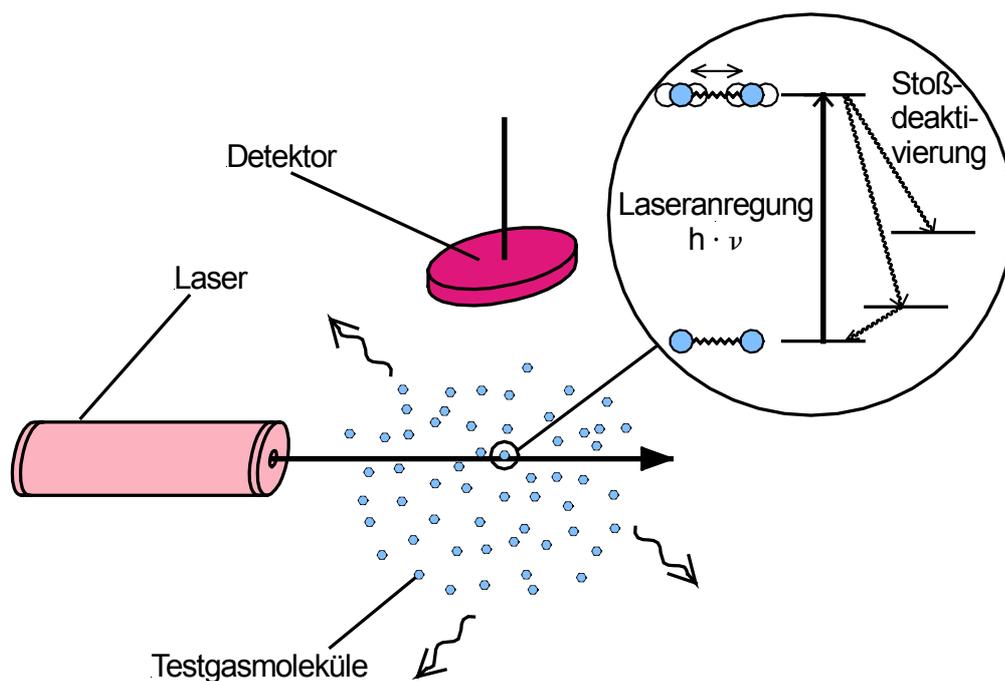
1.2 Testgas nachweisende Prüfverfahren

Die zweite Gruppe der Dichtheitsprüfverfahren bilden die Verfahren mit Testgas. Allen Verfahren gemeinsam ist, dass die Prüflinge mit einem Testgas bedrückt, die Testkammer zur schnelleren Verteilung des Testgases häufig evakuiert und die Umgebung der Prüflinge auf das Testgas hin untersucht wird. Als Testgase kommen Helium, Kältemittel oder auch Wasserstoff zum Einsatz. Hierzu werden beispielsweise bei Helium Massenspektrometer (Helium-Lecktester) eingesetzt. Die in das Massenspektrometer eingeleiteten Moleküle werden ionisiert und die Konzentration der Helium-Atome, welche als Maß für die zu messende Leckage verwendet wird, bestimmt. Theoretisch lassen sich auf diese Art und Weise

Leckagen bis ca. 10^{-11} mbarl/s nachweisen. Im industriellen Einsatz lassen sich Leckagen bis ca. 10^{-7} mbarl/s nachweisen. Voraussetzung hierfür sind allerdings saubere und trockene Prüflinge, was im Wesentlichen mit dem notwendigen Hochvakuum (ca. 10^{-5} mbar) für das Massenspektrometer und (ca. 0,01 - 1 mbar) für die, den Prüfling umgebende, Testkammer zusammenhängt. Derart niedrige Drücke lassen sich nur durch relativ aufwendige Vakuumpumpen erzeugen. Aufgrund des niedrigen Drucks im Massenspektrometer muss ein versehentliches Fluten durch entsprechende konstruktive Maßnahmen in der Prüfanlage vermieden werden. Die integrale Dichtheitsprüfung mit Massenspektrometern ist daher relativ aufwendig und teuer. Eine interessante Alternative bilden laseroptische Dichtheitsprüfsysteme die mittels des fotoakustischen Effektes einen hochempfindlichen Gasnachweis ermöglichen.

2 Fotoakustisches Gasnachweisverfahren

Die laseroptischen Dichtheitsprüfsysteme von GEMTEC arbeiten optisch mittels Laserstrahlung und ermöglichen mittels des fotoakustischen Gasnachweises einen hochempfindlichen Testgasnachweis.



- Bestimmung der Testgaskonzentration in der Gasphase (keine Anlagerungseffekte an Oberflächen).
- Testgaskonzentration kann in einem weiten Druckbereich (1 - 100) kPa bestimmt werden.
- Hohe Nachweisempfindlichkeit auch bei rauen Umgebungsbedingungen.

Bild 2: Fotoakustisches Messprinzip

Als Testgas wird bei diesen fotoakustischen Gasnachweissystemen häufig das Inertgas Schwefelhexafluorid (SF₆) verwendet, als Laser ein darauf abgestimmter CO₂-Wellenleiterlaser. Fotoakustische Gasnachweisverfahren bieten den Vorteil, dass noch sehr geringe Gaskonzentrationen von etwa 1 ppb (10⁻⁹) auch in Gegenwart von anderen Gasen bei relativ hohen Drücken (bis zu 100 kPa) sehr selektiv nachgewiesen werden können.

Diesem liegt das Prinzip zugrunde, dass der Laser auf eine Absorptionsfrequenz der zu untersuchenden Gasprobe abgestimmt wird und so ein Teil der Moleküle durch Absorption des Laserlichtes in einen energetisch angeregten Zustand gebracht werden. Durch Stöße mit anderen Gasmolekülen in der zu untersuchenden Gasprobe können die angeregten Moleküle ihre Anregungsenergie ganz oder teilweise abgeben und in Translations-, Rotations-, oder Schwingungsenergie der Stoßpartner umwandeln. Im thermischen Gleichgewicht wird sich die Energie gleichmäßig auf alle Freiheitsgrade verteilen. Die Erhöhung der Translationsenergie bedeutet aber eine Temperaturerhöhung des zu untersuchenden Gases und damit (bei konstanter Dichte) einen Druckanstieg.

Erst der Einsatz leistungsstarker Laser, empfindlicher Mikrofone und rauscharmer Verstärker ermöglicht die sehr hohe Nachweisempfindlichkeit von 1 ppb bei Drücken von 1 kPa bis etwa 100 kPa unter rauen Industriebedingungen.

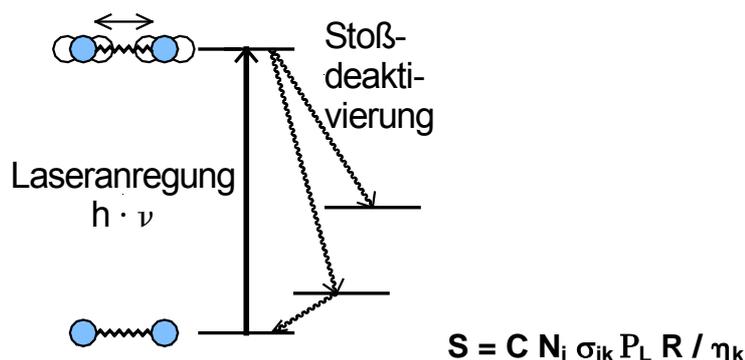
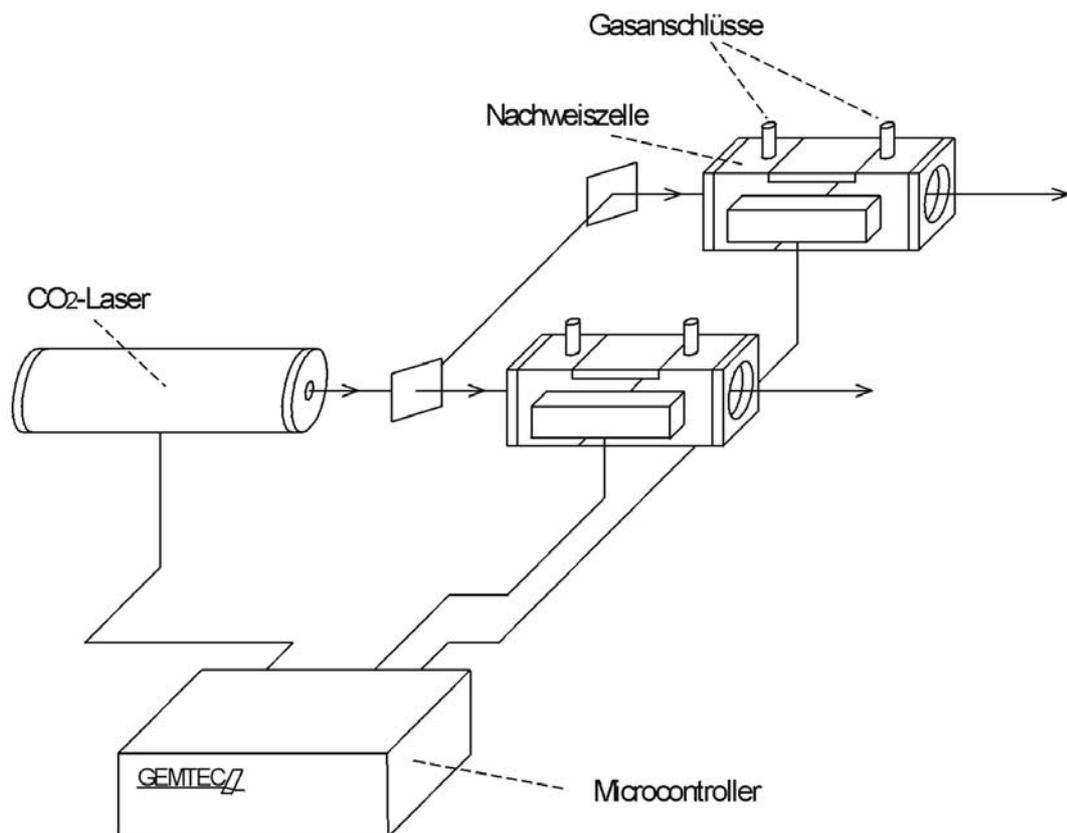


Bild 3: Ermittlung der akustischen Signalamplitude S

Solange Sättigungseffekte vernachlässigt werden können, ist das gemessene akustische Signal S proportional zur Teilchendichte N_i , zum Absorptionsquerschnitt σ_{ik} des absorbierenden molekularen Übergangs, zur mittleren Laserleistung P_L und zur Empfindlichkeit R des Mikrofons, aber umgekehrt proportional zur Quantenausbeute η_k des angeregten Molekülniveaus. Das fotoakustische Signal S wird also umso kleiner, je größer die Quantenausbeute η_k des angeregten Molekülniveaus wird, weil die Fluoreszenz, solange sie nicht innerhalb des Untersuchungsvolumens wieder absorbiert wird, Anregungsenergie aus dem Untersuchungsvolumen entfernt, ohne das zu untersuchende Gas zu erwärmen. Der Proportionalitätsfaktor C hängt von der Geometrie der verwendeten Nachweiszellen oder der geometrischen Verhältnisse in der Umgebung des zu untersuchenden Gases, sowie vom Gasdruck ab.

2.1 Laseroptische Gasnachweissysteme zur integralen Dichtheitsprüfung

Wie bei allen integralen Gasnachweissystemen 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.



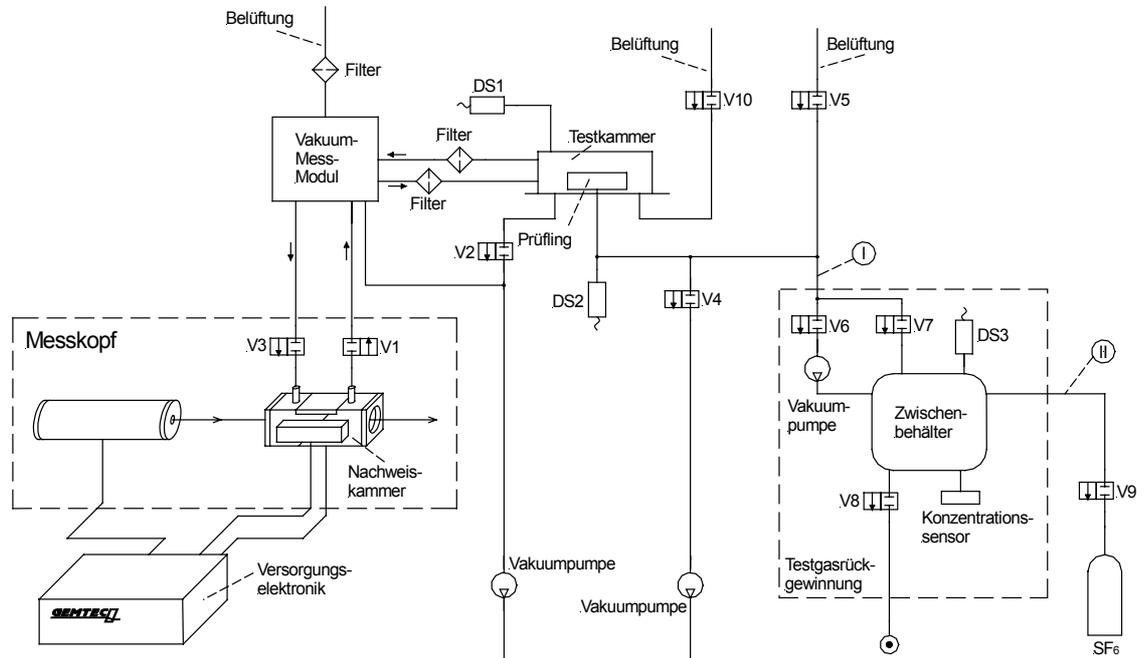
- Kompakter, robuster optischer Aufbau.
- Mit bis zu zwei unabhängig betreibbaren Nachweiszellen.
- Einfache Anbindung an Prüfanlagen durch in der Pneumatik übliche Komponenten.

Bild 4: Prinzipschema integraler laseroptischer Prüfsysteme

2.1.1 Laseroptische Dichtheitsprüfung bei Umgebungs- oder Unterdruck

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 - 20) hPa, das einfach und schnell erreicht werden kann, ausreichend.

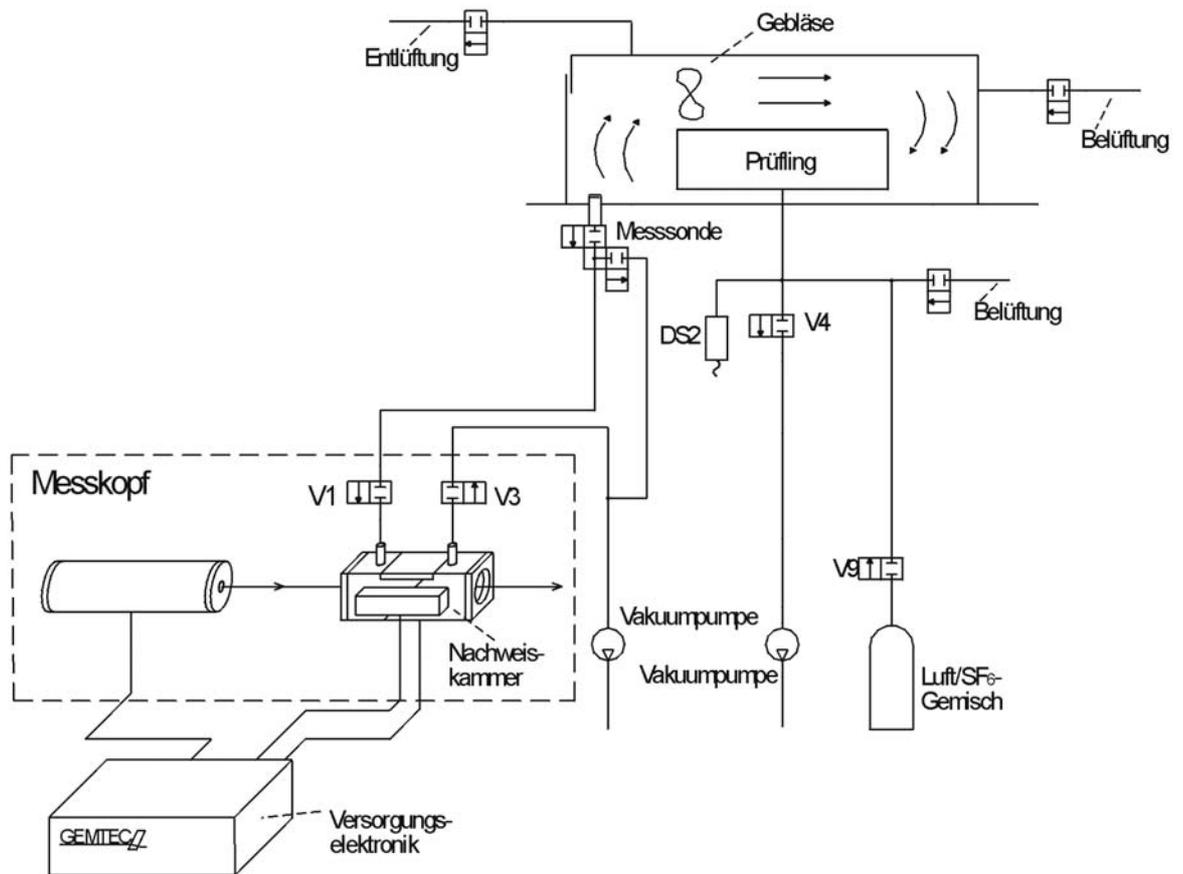


- Einfacher, robuster Anlagenbau.
- Hohe Nachweisempfindlichkeit bei gleichzeitig kurzen Taktzeiten.
- Geringe Anforderungen an die Vakuumtechnik (Druck in Testkammer > 10 hPa).

Bild 5: Prinzipieller Aufbau zur Dichtheitsprüfung mit Vakuum

Bei einer Prüfung bei Atmosphärendruck wird, zur schnelleren Verteilung des Testgases, die in der Testkammer befindliche Umgebungsluft mittels einfacher Gebläse verwirbelt. Bei einer Nachweisempfindlichkeit von 10 ppb ($= 10^{-8}$) können unter rauen industriellen Bedingungen noch Leckagen bis ca. 10^{-6} mbarl/s sicher detektiert werden.

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.



- Einfachster, robuster Anlagenbau.
- Bietet die Möglichkeit, vor allem große Prüflinge mit geringem Aufwand auf Dichtheit zu überprüfen.
- Hohe Nachweisempfindlichkeit, auch bei nicht vakuumfesten Prüflingen.

Bild 6: Prinzipieller Aufbau zur Dichtheitsprüfung bei Atmosphärendruck

Um Dichtheitsprüfungen schnell, zuverlässig und vor allem reproduzierbar durchführen zu können, muss die Peripherie des Prüfaufbaus an den eigentlichen Sensor, das laseroptische Dichtheitsprüfsystem, angepasst sein. Hierzu sind vom Grundsatz her zwei Punkte zu beachten. Zum einen, da mit diesen Systemen ein Gasnachweis durchgeführt wird, muss dafür gesorgt werden, dass die gesamte Prüfmimik, welche sich innerhalb des Nachweiskreises befindet, ausreichend effektiv gespült werden kann. Zum anderen sollte die verwendete Testgaskonzentration immer so niedrig wie möglich gehalten werden, um ein effektives Spülen des Nachweiskreises zu erleichtern.

In Bild 5 ist ein möglicher Aufbau eines Dichtheitsprüfplatzes zur Dichtheitsprüfung mit Vakuum schematisch dargestellt. Von den in Bild 5 dargestellten Komponenten sind die Ventile V1 und V3 bereits zusammen mit der Nachweiskammer und

dem Laser im Messkopf des LTS 310 V (laseroptisches Dichtheitsprüfsystem) integriert. Die Ventile V1 und V3 werden intern über den Mikrocontroller des LTS 310 V angesteuert.

Der Prüfling kann über Ventil V4 mittels einer Vakuumpumpe evakuiert werden und anschließend mit Druckluft, welcher das Testgas beigemischt wurde, definiert mit Druck beaufschlagt werden. Hierzu muss Ventil V4 geschlossen und V7 geöffnet werden. V7 bleibt so lange geöffnet, bis der Drucksensor DS2 den gewünschten Prüfdruck anzeigt und wird dann geschlossen. Nach der Prüfung kann der Prüfling über Ventil V6 evakuiert und durch anschließendes Belüften über V5 in seinen Ausgangszustand zurückversetzt werden. Das Evakuieren des Prüflings über Ventil V6 erlaubt eine sehr einfache und effektive Testgas-Rückgewinnung, da das eingesetzte Luft/Testgasgemisch dann direkt in den Zwischenbehälter zurückgepumpt wird. Die im Zwischenbehälter vorliegende Testgas-Konzentration wird mit einem einfachen Konzentrationssensor (als Modul zu den Prüfsystemen erhältlich) gemessen und kann mittels der Ventile V8 und V9 druckgesteuert (über Drucksensor DS3) erniedrigt bzw. erhöht werden.

Wird Anschluss (I) direkt mit Anschluss (II) verbunden, d.h. wird keine Testgasrückgewinnung eingesetzt, so kann der Prüfling dann über Ventil V9 mit dem gewünschten Luft/Testgasgemisch mit Druck beaufschlagt werden.

Um das bei einem Leck aus dem Prüfling austretende Testgas detektieren zu können, wird die übrige Anordnung, der sogenannte Nachweiskreis, des Prüfaufbaus benötigt. Nach Einlegen des Prüflings in die Testkammer, Adaption des Prüflings und Schließen der Testkammer kann diese durch Öffnen der Ventile V10 und V2 kurz durchspült und nach Schließen von V10 mittels einer Vakuumpumpe evakuiert werden. Meldet der Drucksensor DS1 das Erreichen des vorgegebenen Unterdrucks, so wird das Ventil V2 geschlossen. Der Prüfling kann nun, wie oben beschrieben, mit Druck beaufschlagt werden. Tritt aus dem nun mit Druck beaufschlagten Prüfling aufgrund eines Lecks Testgas aus, so kann dieses sich, bedingt durch das vorhandene Vakuum, während der Diffusionszeit schnell in der Testkammer verteilen.

Durch innerhalb der Testkammer integrierte Gebläse kann, bedingt durch die hierdurch hervorgerufene intensive Verwirbelung der Luft, die homogene Verteilung der Testgasmoleküle innerhalb der Testkammer stark beschleunigt werden. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die für die homogene Verteilung der Testgasmoleküle notwendige Diffusionszeit stark verkürzt werden kann und zum anderen, dass der in der Testkammer erforderliche Diffusionsdruck deutlich höher gewählt werden kann und somit kürzere Evakuierzeiten realisierbar sind.

In der Nachweiskammer des LTS 310 V, welche mit der Testkammer über Leitungen verbunden ist, kann dann, gesteuert über das Vakuummessmodul, die Konzentration des Testgases bestimmt werden. Je nach der Größe der Undichtigkeit des Prüflings ergibt sich somit eine entsprechende Testgaskonzentration in der Nachweiskammer des LTS 310 V. Da die Nachweiskammer zusammen mit dem für den Testgasnachweis notwendigen Laser und die Ventile V1 und V3 in einem kompakten Messkopf integriert wurden, kann dieses Dichtheitsprüfsystem einfach, zusammen mit nahezu jeder denkbaren Peripherie, eingesetzt werden.

Die unten aufgeführte Ablaufbeschreibung verdeutlicht die oben beschriebene Dichtheitsprüfung mit Vakuum anhand eines exemplarischen Prüfablaufs mit vorgeschalteter Untergrundmessung:

- Prüfling in Testkammer einlegen, adaptieren und Testkammer schließen
- $T_1 = 0$
- Testkammer spülen (Belüftungs- und Evakuierventil offen)
- $T_2 = 2$ s
- Testkammer auf 10 mbar Absolutdruck evakuieren
- $T_3 = 6$ s
- Warten, bis LTS 310 V messbereit
- $T_4 = 8$ s
- Messwert bei LTS 310 V anfordern (für Untergrund)
- $T_5 = 10$ s
- Signal "Testkammer freigeben" wird angezeigt (d.h. die Probenentnahme aus der Testkammer ist abgeschlossen)
 - Prüfling mit Testgasgemisch befüllen und hierdurch Diffusionszeit starten (Befüllzeit = 1 s, Diffusionszeit = 4 s)
- $T_6 = 14$ s
- Messwert Untergrund liegt vor. Falls Untergrund NIO Prüfling entleeren und bei $T = T_1$ neu beginnen
- $T_7 = 15$ s
- Ende Diffusionszeit
 - Warten, bis LTS 310 V messbereit
- $T_8 = 17$ s
- Messwert bei LTS 310 V anfordern. Warten, bis Signal "Testkammer freigegeben" angezeigt wird.
- $T_9 = 19$ s
- Testkammer belüften, Prüfling deadaptieren und evtl. Testkammer öffnen. Dann warten, bis Messwert vom LTS 310 V ausgegeben wird.
- $T_{10} = 23$ s
- Prüfling entnehmen und IO/NIO-Sortierung durchführen

In Bild 6 ist ein möglicher Aufbau eines Dichtheitsprüfplatzes zur Dichtheitsprüfung bei Atmosphärendruck schematisch dargestellt.

Der Prüfling kann über Ventil V4 mittels einer Vakuumpumpe evakuiert werden und anschließend mit Druckluft, welcher das Testgas beigemischt wurde, definiert mit Druck beaufschlagt werden. Hierzu muss Ventil V4 geschlossen und V9 geöffnet werden. V9 bleibt so lange geöffnet, bis der Drucksensor DS2 den gewünschten Prüfdruck anzeigt und wird dann geschlossen. Nach der Prüfung kann der Prüfling über Ventil V4 evakuiert und durch anschließendes Belüften in seinen Ausgangszustand zurückversetzt werden.

Um das bei einem Leck aus dem Prüfling austretende Testgas detektieren zu können, wird die übrige Anordnung, der sogenannte Nachweiskreis, des Prüfaufbaus benötigt. Nach Einlegen des Prüflings in die Testkammer, Adaption des Prüflings und Schließen der Testkammer wird diese kurz durchspült. Der Prüfling kann nun, wie oben beschrieben, mit Druck beaufschlagt werden. Durch in der Testkammer geeignet integrierte Gebläse wird die Luft innerhalb der Testkammer intensiv verwirbelt. Tritt aus dem mit Druck beaufschlagten Prüfling aufgrund eines Lecks Testgas aus, so wird dieses, bedingt durch die intensive Verwirbelung der Luft, während der Diffusionszeit schnell innerhalb der Testkammer homogen verteilt. In der Nachweiskammer des LTS 310, welche mit der, an der Testkammer angebrachten Messsonde über Leitungen verbunden ist, kann dann die sich so in der Testkammer einstellende Konzentration des Testgases bestimmt werden. Je nach der Größe der Undichtigkeit des Prüflings ergibt sich somit eine entsprechende Testgaskonzentration in der Nachweiskammer des LTS 310. Da die Nachweiskammer zusammen mit dem für den Testgasnachweis notwendigen Laser und die Ventile V1 und V3 in einem kompakten Messkopf integriert wurden, kann dieses Dichtheitsprüfsystem einfach in Prüfanlagen integriert werden.

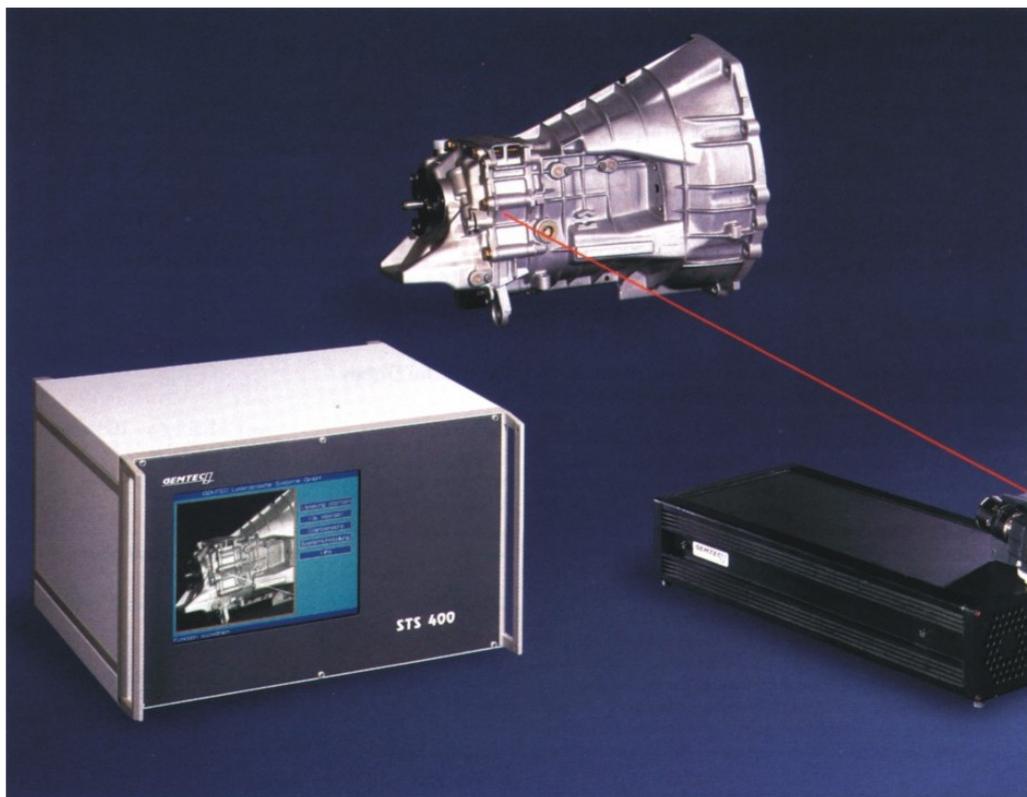
Die unten aufgeführte Ablaufbeschreibung verdeutlicht die oben beschriebene Dichtheitsprüfung bei Atmosphärendruck anhand eines exemplarischen Prüfablaufs mit vorgeschalteter Untergrundmessung:

- Prüfling in Testkammer einlegen, adaptieren und Testkammer schließen
- $T_1 = 0$
- Testkammer spülen (Belüftungs- und Entlüftungsventilventil offen)
- $T_2 = 3 \text{ s}$
- Warten, bis LTS 310 messbereit
- $T_3 = 4 \text{ s}$
- Messwert bei LTS 310 anfordern (für Untergrund)
- $T_4 = 6 \text{ s}$
- Signal "Testkammer freigeben" wird angezeigt (d.h. die Probenentnahme aus der Testkammer ist abgeschlossen)
 - Prüfling mit Testgasgemisch befüllen und hierdurch Diffusionszeit starten (Befüllzeit = 2 s, Diffusionszeit = 20 s)
- $T_5 = 10 \text{ s}$
- Messwert Untergrund liegt vor. Falls Untergrund NIO Prüfling entleeren und bei $T = T_1$ neu beginnen
- $T_6 = 28 \text{ s}$
- Ende Diffusionszeit
 - Messwert bei LTS 310 anfordern. Warten, bis Signal "Testkammer freigeben" angezeigt wird.
- $T_7 = 30 \text{ s}$
- Testkammer spülen, Prüfling deadaptieren und evtl. Testkammer öffnen. Dann warten, bis Messwert vom LTS 310 ausgegeben wird.
- $T_8 = 34 \text{ s}$
- Prüfling entnehmen und IO/NIO-Sortierung durchführen

Der Ablauf für eine Kalibrierung der Prüfanlage kann zu dem eines Prüfablaufs völlig analog gewählt werden. Zur Kalibrierung der Anlage kann beispielsweise in Pulsleck PLA 40 oder eine Kalibriernormale -integriert in einem dichten Prüfling- eingesetzt werden. Alternativ hierzu kann zur Kalibrierung auch ein undichter Prüfling mit bekannter Leckage verwendet werden. Die bei der Kalibrierung gemessene Testgaskonzentration kann dann per Definition der bekannten Leckrate des Kalibrierlecks zugeordnet werden.

2.2 Laseroptisches Laserscanverfahren

Preiswerte Massenprodukte die durch eine integrale Dichtheitsprüfung als undicht erkannt worden sind, werden in aller Regel nicht nachgearbeitet. Bei aufwendigen Produkten, wie beispielsweise PKW-Motoren, kann natürlich nicht so verfahren werden. Es besteht die Notwendigkeit, den genauen Ort der Leckstellen ausfindig zu machen um diese Lecks dann beheben zu können.



- Ersatz für Unterwasserprüfung
- Quantifizierung der Leckraten
- Visualisierung des Messprozesses

Bild 7: Laseroptisches Lecklokalisierungssystem STS 400

Bei allen bisher bekannten lokalisierenden Verfahren werden die Prüfobjekte mittels Luft oder Testgas mit Druck beaufschlagt. Ein einfaches Verfahren zur Lokalisierung ist die Unterwasserprüfung. Ist diese nicht möglich oder nicht gewünscht, so kann der unter Druck stehende Prüfling mit einer seifenartigen Flüssigkeit besprüht werden, so dass die Leckstellen durch Blasenbildung sichtbar werden.

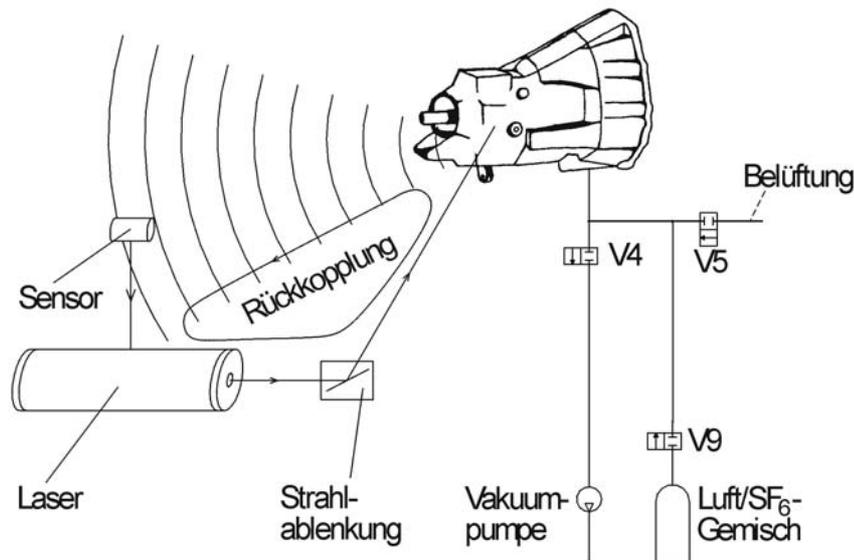
Insbesondere bei großen Prüflingen und kleinen Leckagen kommen die sogenannten Schnüffelverfahren zum Einsatz. Dabei wird manuell, oder auch mittels eines Roboters, eine Schnüffelsonde, d.h. eine Kapillare, durch die Gas eingesaugt wird, an die vermuteten Leckstellen des Prüflings gehalten. Bei vorhandenem Leck wird das aus dem Leck austretende Testgas mit eingesaugt und durch einen Detektor nachgewiesen. Als Detektor kommen Massenspektrometer, laseroptische Gasnachweissysteme vom Typ LTS 310 mit integriertem Schnüffelmodul oder Halbleitersensoren zum Einsatz. Dementsprechend können als Testgas unter anderem Helium, SF₆, Wasserstoff oder verschiedene Kältemittel verwendet werden. Mit den in einem laseroptischen Dichtheitsprüfsystem LTS 310 integrierbaren Schnüffelmodulen können noch Leckraten von 10⁻⁹ mbarl/s (bezogen auf das inerte Testgas SF₆) sicher detektiert werden.

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

2.2.1 Funktionsprinzip des Laserscanverfahrens

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 Relaxationsprozesse, 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.

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.



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

Bild 8: Prinzipschema Laserscanverfahren

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 Mikrofons sehr leicht dadurch erkannt werden kann, indem der Lautsprecher von dem verstärkten Ausgangssignal des Mikrofons 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 SF₆ und das Gas C₂H₄ aufgrund ihrer hervorragenden Nachweisempfindlichkeit unter Verwendung des fotoakustischen Effektes als optisches Gasnachweisverfahren sehr gut geeignet.

2.2.2 Systemkonzept STS 400

Das optische Leckortungssystem STS 400 setzt sich aus dem Messkopf und einer separaten Versorgungs- und Steuerelektronik zusammen. Der Messkopf umfasst einen luftgekühlten CO₂-Wellenleiterlaser sowie die zum Verschwenken des Laserstrahls notwendige Strahlableitungseinheit (Scanner). Dem für das menschliche Auge unsichtbaren Laserstrahl des CO₂-Lasers ist ein roter Laserstrahl überlagert, so dass das Abrastern des Prüfobjektes visuell nachvollzogen werden kann. Eine am Messkopf angebrachte CCD-Kamera erlaubt die Darstellung des Prüfobjektes auf einem Bildschirm.

Ein Mikrocontroller erfasst die bei einer Prüfung gewonnenen Daten und macht sie dem Anwender in Form eines "Leckstellenbildes" zugänglich. Dieses Leckstellenbild wird nun dem von der CCD-Kamera gelieferten Bild des Prüfobjektes überlagert. An den Stellen, an denen Leckagen erkannt wurden, wird das auf dem LCD-Bildschirm dargestellte Prüfobjekt farbig markiert. Dem Benutzer ermöglicht dies eine einfache visuelle Beurteilung des Prüfvorganges.

Ergänzend zu dieser Möglichkeit der visuellen Inspektion der Leckstellen anhand des Leckstellenbildes erlaubt das System einen vollautomatischen Prüfbetrieb. Wesentlich für diese einfache Möglichkeit der Einbindung in einen automatisierten Produktionsablauf ist die Möglichkeit, für einen Einrichtbetrieb am Bildschirm verschiedene Scanbereiche durch das Aufziehen entsprechender Fenster definieren und durchnummerieren zu können. Für jeden so definierten Bereich findet dann eine getrennte IO/NIO-Bewertung statt. Diese Vorgehensweise führt somit auch zu

einer deutlichen Reduzierung der Prüfzeit immer dann, wenn Teilbereiche des Prüfobjektes nicht abgescannt werden müssen, beispielsweise wenn diese bereits als Einzelteile vorab schon geprüft wurden.

Zur Systemkalibrierung kann in aller Regel ein Prüfling mit bekannten Leckagen verwendet werden. Es wird dann die Größe der das Testgas enthaltenden Bereiche ermittelt und automatisch dem entsprechenden Kalibrierleckwert zugeordnet. Dies ist notwendig, da sich je nach Größe des Prüflings, aber auch in Abhängigkeit der konkreten Vorgaben durch die Prüfanlage unterschiedlich große Testgas enthaltende Bereiche ergeben können.

2.3 Übersicht Testgase

Für die laseroptischen Dichtheitsprüfsysteme stehen eine Reihe von Testgasen zu Verfügung. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Testgase zusammen mit den für die verschiedenen Prüfanwendungen notwendigen Daten aufgeführt.

Testgas	Löslichkeit in Prüfföl [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 Testgas Mischung den entsprechenden Dampfdruck nicht übersteigt, da das Testgas sich sonst im Mischtank verflüssigt.

^{*)} in Shell-Prüfföl 1404

^{#)} in Heptan

Tabelle 2: 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.

2.4 Ermittlung der erforderlichen Testgaskonzentration

Die Testgaskonzentration K_{Testgas} in der Nachweiskammer der laseroptischen Dichtheitsprüfsysteme der LTS-Systemreihe berechnet sich wie folgt:

$$K_{\text{Testgas}} = \frac{L \cdot T_{\text{Diff}} \cdot C_{\text{Testgas}} \cdot F_1}{V_{\text{Diff}} \cdot P_{\text{Diff}}} = K_{\text{Test}} \cdot F_1$$

Als Ausgangssignal S_{Signal} der Nachweiskammer des optischen Dichtheitsprüfsystems erhält man dann:

$$S_{\text{Signal}} = K_{\text{Testgas}} \cdot F_2$$

Mit:

- V_{Diff} := Volumen der Testkammer (Glocke) minus Volumen des Prüflings (in l).
- P_{Diff} := Druck in der Testkammer während der Diffusionszeit (in mbar).
- L := Leckrate der Leckage (in mbarl/s).
- T_{Diff} := Diffusionszeit (in s).
- K_{Test} := Testgaskonzentration, die sich in der Testkammer einstellt.
- C_{Testgas} := Testgasanteil der Druckluft im Prüfling.
- F_1 := Proportionalitätsfaktor. Ist ein einstellbarer Prüfparameter, abhängig von P_{Diff} . F_1 liegt je nach Anwendung zwischen 1 und 0,05. Für $P_{\text{Diff}} = 10$ mbar wird meist $F_1 = 0,4$ gesetzt. Für $P_{\text{Diff}} = 1020$ mbar ergibt sich: $F_1 = 1$.
- F_2 := Proportionalitätsfaktor. Abhängig vom verwendeten Testgas.
 $F_2 = 1$ ¹⁾.

Anmerkungen:

- ¹⁾: Gültig für das Testgas SF₆ (in erster Näherung).

Zur Beurteilung einer konkreten Prüfaufgabe sind somit folgende Vorgaben notwendig:

Beispiel I: Dichtheitsprüfung mit Vakuum

- Nachzuweisende Leckrate: $L = 0,0006 \text{ cm}^3/\text{min}$. (entspricht 10^{-5} mbarl/s).
- Restvolumen zwischen Prüfling und Testkammer (Glocke): $V_{\text{Diff}} = 4 \text{ l}$.
- Diffusionszeit (Zeit während der der Prüfling mit Testgas/Testgasgemisch bedrückt wird): $T_{\text{Diff}} = 4 \text{ s}$.
- Testgas: SF_6 .
- Weiter sei $P_{\text{Diff}} = 10 \text{ mbar}$ und $F_1 = 0,4$. Hieraus ergibt sich für F_2 der Wert 1.

Um abschätzen zu können, ob die gesuchte Leckage unter diesen Vorgaben überhaupt detektierbar ist, kann beispielsweise $C_{\text{Testgas}} = 1$ gesetzt werden. Dies entspräche einer Prüfung mit reinem Testgas.

Hiermit ergibt sich dann für K_{Testgas} und S_{Signal} der Wert $4 \cdot 10^{-7}$; d.h. eine Testgaskonzentration von 0,4 ppm. Da der Nachweisgrenze der optischen Dichtheitsprüfsysteme LTS 310 V/320 V ein Ausgangssignal S_{Signal} von ca. 10^{-9} entspricht, könnte die Leckrate von $L = 10^{-5} \text{ mbarl/s}$ schon mit einer Testgaskonzentration von ca. 2 % (d.h., $C_{\text{Testgas}} = 0,02$ bei $S/N = 8$) sicher detektiert werden.

Beispiel II: Dichtheitsprüfung bei Atmosphärendruck

- Nachzuweisende Leckrate: $L = 0,12 \text{ cm}^3/\text{min}$. (entspricht $2 \cdot 10^{-3} \text{ mbarl/s}$).
- Restvolumen zwischen Prüfling und Testkammer (Glocke): $V_{\text{Diff}} = 10 \text{ l}$.
- Diffusionszeit (Zeit während der der Prüfling mit Testgas/Testgasgemisch bedrückt wird): $T_{\text{Diff}} = 10 \text{ s}$.
- Testgas: SF_6 .
- Weiter sei $P_{\text{Diff}} = 1000 \text{ mbar}$ und $F_1 = 1$. Hieraus ergibt sich für F_2 der Wert 1.

Um abschätzen zu können, ob die gesuchte Leckage unter diesen Vorgaben überhaupt detektierbar ist, kann beispielsweise $C_{\text{Testgas}} = 1$ gesetzt werden. Dies entspräche einer Prüfung mit reinem Testgas.

Hiermit ergibt sich dann für K_{Testgas} und S_{Signal} der Wert $2 \cdot 10^{-6}$; d.h. eine Testgaskonzentration von 2 ppm. Da der Nachweisgrenze der optischen Dichtheitsprüfsysteme LTS 310/320 ein Ausgangssignal S_{Signal} von ca. 10^{-9} entspricht, könnte die Leckrate von $L = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbarl/s}$ schon mit einer Testgaskonzentration von ca. 0,5 % (d.h., $C_{\text{Testgas}} = 0,005$) sicher detektiert werden.

2.5 Kalibrier- und Testmethoden

Das Pulsleck PLV 40 wurde entwickelt um Leckagen auch unter sehr rauen Umgebungsbedingungen sicher, reproduzierbar und vor allem langzeitstabil simulieren zu können. Hierzu kann mittels des Pulslecks eine genau bekannte Menge an Testgasmolekülen zu einem definierten Zeitpunkt (pulsförmig) in die Testkammer abgegeben werden. Die dieser Menge zugeordnete Leckrate berechnet sich wie folgt:

Bei der integralen Dichtheitsprüfung mittels optischer Gasnachweissystemen wird der Prüfling für eine Zeit T_{Diff} mit Druckluft (oder einem anderen gasförmigen Medium) mit einem Testgasanteil von $C_{Testgas}$ mit dem Prüfdruck $P_{Prüfling}$ bedrückt. Liegt am Prüfling nun eine Undichtheit vor, so ergibt sich die Leckrate $L_{Prüfling}$ eines Prüflings zu:

$$L_{Prüfling} = \frac{M_{Test}}{T_{Diff} \cdot C_{Testgas}} \quad (I)$$

Für die Bestimmung der Leckrate eines Prüflings ist es also wichtig ein Maß für die Menge M_{Test} ("Anzahl der Testgasmoleküle die in der Zeit T_{Diff} aus dem Prüfling in die Testkammer gelangen") zu haben. Evakuiert man die Testkammer mit einem Volumen V_{Diff} vor dem Bedrücken des Prüflings auf einen bekannten Druck P_{Diff} so bildet die, sich in der Testkammer durch das aus dem Prüfling ausströmende Testgas einstellende Konzentration K_{Test} ein eindeutiges Maß für die Menge M_{Test} , sofern das Testgas sich in der Testkammer homogen verteilt. Es gilt:

$$K_{Test} = \frac{M_{Test}}{V_{Diff} \cdot P_{Diff}} = \frac{L_{Prüfling} \cdot T_{Diff} \cdot C_{Testgas}}{V_{Diff} \cdot P_{Diff}} \quad (II)$$

Mit den optischen Dichtheitsprüfsystemen LTS 310/320 V können noch sehr geringe Testgaskonzentrationen von bis zu 1 ppb (bezogen auf das Testgas SF_6) unter industriellen Bedingungen erkannt und quantifiziert werden.

Da es sehr schwierig ist, 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, ist es hilfreich eine Alternative zu diesen sehr aufwendigen und anfälligen Test- und Kalibrierlecks zu haben. Als Alternative hierzu wurde das Pulsleck PLV 40 entwickelt.

Zur Simulation von Leckraten kann mittels des Pulslecks PLV 40 eine definierte Menge M_{PLV} an Testgas in die Testkammer innerhalb sehr kurzer Zeit (< 100 ms) abgegeben werden. Die so abgegebene Menge ergibt sich zu:

$$M_{PLV} = (P_{PLV} - P_{Diff}) \cdot V_{PLV} \cdot C_{PLV} \quad (III)$$

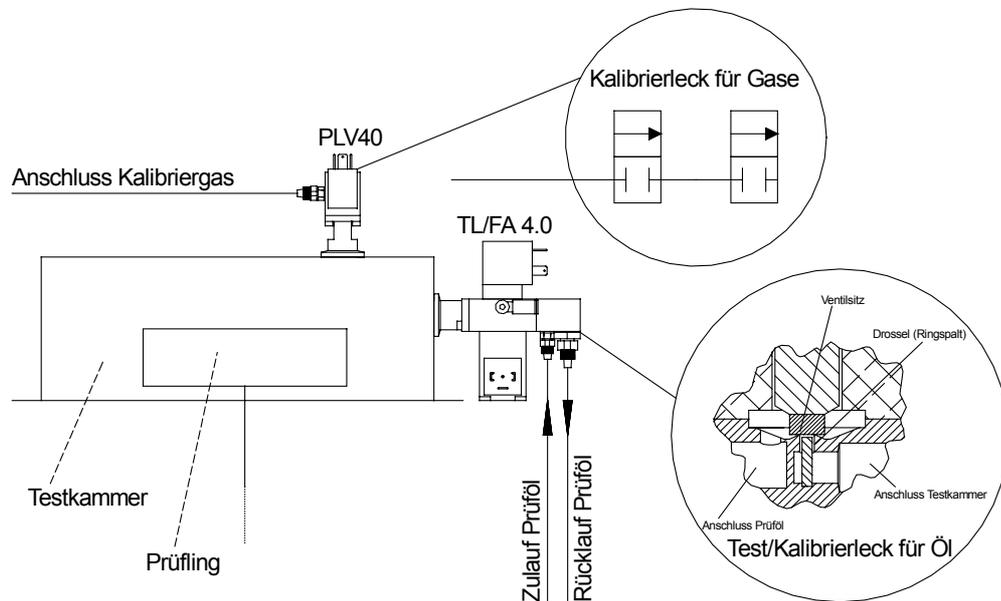
Hierbei steht V_{PLV} für ein festes, mit einem Druck P_{PLV} , mit einem Test- oder Kalibriergas mit einer Testgaskonzentration C_{PLV} befüllbares Volumen, welches von dem Pulsleck schnell an die Prüfkammer zugeschaltet werden kann.

Wird ein Pulsleck PLV 40 als Kalibrier- oder Testleck verwendet, so ergibt sich die Kalibrier- bzw. Testleckrate $L_{Kal/Test}$ aus der Bedingung $M_{PLV} = M_{Test}$ zu:

$$L_{Kal/Test} = \frac{(P_{PLV} - P_{Diff}) \cdot V_{PLV} \cdot C_{PLV}}{T_{Diff} \cdot C_{Testgas}} \quad (IV)$$

Da es sich bei den Größen P_{PLV} und V_{PLV} in einem konkreten Prüfaufbau in der Regel um fest vorgegebene Größen handelt, stehen als Variablen nur die Größen

P_{Diff} , C_{PLV} , $C_{Testgas}$ und T_{Diff} zur Verfügung. Zu beachten ist hierbei, dass die Variablen P_{Diff} , $C_{Testgas}$ und T_{Diff} unter Berücksichtigung der Gleichung (II) so festgelegt werden müssen, dass messbare Testgaskonzentrationen K_{Test} entstehen; d.h.: $1 \text{ ppb} < K_{Test} < 30 \text{ ppm}$ und für das Volumen in der Testkammer gilt: $V_{Diff} > 1 \text{ Liter}$.



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

Bild 9: Pulsleck PLV 40 und zuschaltbares Ölleck TL/FA 4.0 an Testkammer

Liefert ein an die Testkammer angeschlossenes optisches Dichtheitsprüfsystem LTS 310 V bei der Kalibrierung mittels des PLV 40 für L_{Kal} z.B. den Messwert 100 (d.h., $MW(L_{Kal}) = 100$) und bei einer darauffolgenden Prüfung eines unbekannten Prüflings den Messwert 560 (d.h., $MW(L_{Prüf}) = 560$), so weiß man, dass $L_{Prüfling} = 5,6 \times L_{Kal}$. Der Messwert den der unbekannte Prüfling liefert ist also 5,6 mal so groß wie der Messwert den das Kalibrierleck PLV 40 liefert (das LTS 310 V liefert Messwerte zwischen 0 und 999 (d.h., $0 \leq MW \leq 999$), wobei ein Messwert von 330 in der empfindlichsten Einstellung etwa einer Konzentration von 10 ppb SF_6 entspricht. Der Messwert ist proportional zur Testgaskonzentration.

Wird eine Prüfeinrichtung mit einem Pulsleck PLV 40 kalibriert, so berechnet sich der Leckagewert eines unbekannten Prüflings $L_{Prüf}$ aus den Messwerten $MW(L_{Prüf})$ und $MW(L_{Kal})$ des LTS 310 V in Verbindung mit dem Wert L_{Kal} somit wie folgt:

$$L_{Prüf} = \frac{MW(L_{Prüf})}{MW(L_{Kal})} \cdot L_{Kal} = \frac{MW(L_{Prüf})}{MW(L_{Kal})} \cdot \frac{(P_{PLV} - P_{Diff}) \cdot V_{PLV} \cdot C_{PLV}}{T_{Diff} \cdot C_{Testgas}} \quad (IA)$$

mit den Bezeichnungen:

$MW(L_{Kal}) =$ Messwert den das Gasnachweissystem LTS 310 V bei der Kalibrierung liefert.

$MW(L_{Prüf}) =$ Messwert den das Gasnachweissystem LTS 310 V bei der Prüfung liefert.

Wichtig: Bei diesen Formeln wurde angenommen, dass die Testkammer in der sich der Prüfling bei der Prüfung befindet kein Testgas enthält. Diese Annahme ist häufig gerechtfertigt, da die für die LTS Systeme verfügbaren Testgase wie etwa SF₆, Ethen, Prophen oder auch verschiedene Ether im Unterschied zu Helium oder Wasserstoff in der natürlichen Umgebungsluft nur in so geringen Konzentrationen vorliegen, dass diese bei einer Messung nicht stören. Sollte die Hintergrundkonzentration des verwendeten Testgases beispielsweise durch das Deadaptieren des Prüflings in der Testkammer ansteigen und nicht wieder vollständig entfernt werden können, so ist in der Formel (IA) $MW(L_{Kal})$ und $MW(L_{Prüf})$ als Konzentrationserhöhung (Messwert minus Hintergrundmesswert) zu lesen.

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 Test- und Kalibrierzwecken ist hier das zuschaltbare Ölleck TL/FA 4.0.

Bei der integralen Dichtheitsprüfung nach dem TLF-Prüfverfahren bei welchem dem flüssigen Prüfmedium vor der Prüfung definiert ein Testgas beigemischt wird (Details siehe Abschnitt 3.3), wird der Prüfling hierzu für eine Zeit T_{Diff} mit diesem so aufbereiteten Prüföl mit dem Prüfdruck $P_{Prüfling}$ bedrückt. Liegt am Prüfling nun eine Undichtheit vor, so ergibt sich die Leckrate $L_{Oel/Prüfling}$ (des nun flüssigen Prüfmediums) des Prüflings zu:

$$L_{Oel/Prüfling} = \frac{M_{Oel/Prüfling}}{T_{Diff}} = \frac{M_{Test}}{T_{Diff} \cdot F_{Oel} \cdot P_{MTestgas}} \quad (V)$$

Zur Simulation von Leckraten kann mittels des zuschaltbaren Öllecks TL/FA 4.0 also eine definierte Menge Öl $M_{Oel/TLA}$ innerhalb einer kurzen Zeit (< 5 s) in die Testkammer abgegeben werden. Um die so in die Testkammer abgegebene Ölmenge mittels des Gasnachweissystems LTS 310 V quantifizieren zu können, wird die aus der Ölmenge $M_{Oel/TLA}$ in die Testkammer freigesetzte Testgasmenge bestimmt. Soll nun die Prüfanlage getestet oder kalibriert werden, wird nun nicht der Prüfling mit dem so präparierten Prüföl befüllt, sondern mittels des zuschaltbaren Öllecks eine definierte Menge Prüföl in die Testkammer abgegeben. Die so mittels des TL/FA 4.0 in die Testkammer verbrachte Ölmenge setzt nach einer Zeit $T_{DiffOel}$ in erster Näherung die Menge M_{TLA} an Testgas in der Testkammer frei:

$$M_{TLA} = M_{Oel/TLA} \cdot F_{Oel} \cdot P_{MTestgas} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-T_{DiffOel}}{15}\right) \right) \quad (VI)$$

Wird ein zuschaltbares Ölleck TL/FA 4.0 als Kalibrier- oder Testleck verwendet, so ergibt sich die zugeordnete Kalibrier- bzw. Testleckrate $L_{Oel/Kal/Test}$ aus der Bedingung $M_{TLA} = M_{Test}$ (mit T_{Diff} , $T_{DiffOel} > 30$ s) in erster Näherung zu:

$$L_{Oel/Kal/Test} = \frac{M_{Oel/TLA}}{T_{Diff}} \quad (VII)$$

Liefert ein an die Testkammer angeschlossenes optisches Dichtheitsprüfsystem LTS 310 V bei der Kalibrierung mittels des TL/FA 4.0 für $L_{Oel/Kal}$ z.B. den Messwert 100 und bei einer darauffolgenden Prüfung eines unbekanntes Prüflings den Messwert 400, so weiß man, dass $L_{Oel/Prüfling} = 4 \times L_{Oel/Kal}$. Der Messwert, den der unbekanntes Prüfling liefert, ist also 4 mal so groß wie der Messwert, den das Kalibrierleck liefert.

Bezeichnungen:

$M_{Test} :=$	Testgasmenge die in der Zeit ($T_{Diff} + T_{DiffOel}$) vom Prüfling in die Testkammer abgegeben wird (bei gasförmigen Prüfmedien gilt $T_{DiffOel} = 0$) (in mbarl).
$M_{Oel/Prüfling} :=$	Ölmenge die in der Zeit T_{Diff} vom Prüfling in die Testkammer abgegeben wird (in ml).
$M_{PLV} :=$	Testgasmenge die vom PLV 40 pro Puls in die Testkammer abgegeben wird (in mbarl).
$M_{TLA} :=$	Die in der Zeit $T_{DiffOel}$ von der Ölmenge $M_{Oel/TLA}$ in erster Näherung abgegebene Menge an Testgas (in mbarl).
$M_{Oel/TLA} :=$	Abgegebene Ölmenge bei fest vorgegebener Zuschaltzeit (< 5 s) des Testlecks TL/FA 4.0 (wird für jedes Testleck einzeln ermittelt und im Werksprüfzeugnis dokumentiert) (in ml).
$V_{Diff} :=$	Volumen der Testkammer minus Volumen des Prüflings (in l).
$V_{PLV} :=$	Vom PLV 40 zuschaltbares Volumen (in l).
$P_{Diff} :=$	Druck in der Testkammer während der Diffusionszeit (in mbar).
$P_{PLV} :=$	Druck im Pulsleck (in mbar).
$P_{MTestgas} :=$	Partialdruck des Testgases im Mischtank (in mbar).
$L :=$	Leckrate für gasförmiges Medien (in mbarl/s).
$L_{Oel} :=$	Leckrate für flüssige Medien (in ml/s).
$T_{Diff} :=$	Diffusionszeit, Zeit für die der Prüfling unter Druck steht (in s).
$T_{DiffOel} :=$	Zeit in der das Testgas (nachdem es von dem TL/FA 4.0 freigesetzt wurde bzw. der Druck im Prüfling abgebaut wurde) aus dem Prüfling ausgasen kann (in s).
$K_{Test} :=$	Testgaskonzentration, die sich in der Testkammer einstellt.
$C_{Testgas} :=$	Testgasanteil der Druckluft im Prüfling.
$C_{PLV} :=$	Testgasanteil in der Druckluft im PLV 40.
$F_{Oel} :=$	Proportionalitätsfaktor (= 0,48 für SF ₆ bei 25°C).

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Integrale laseroptische Dichtheitsprüfung

Bild 10 zeigt die Testkammer mit Prüflingsaufnahme und Adaptionseinheit zur integralen Dichtheitsprüfung von zylindrischen Prüflingen. Die Nachweisgrenze lag bei 10^{-8} mbarl/s bei einem Testkammerdruck von 10 mbar und einem Testgasanteil von 30% (SF_6 in N_2) im Prüfling. Der Prüfling wurde für 10 Sekunden mit Druck beaufschlagt.

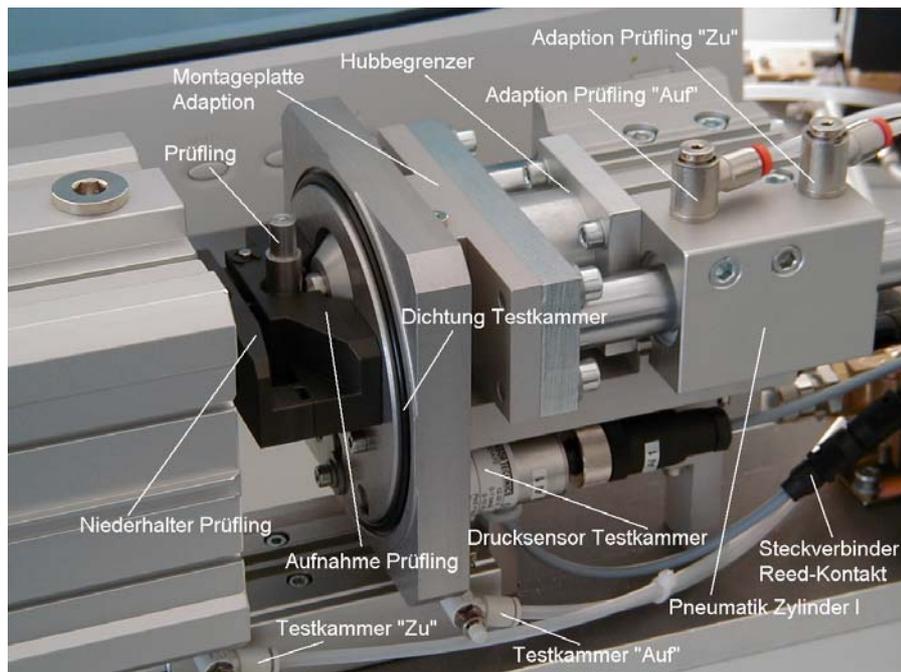


Bild 10: Testkammer mit Prüflingsaufnahme

Die Prüfvorrichtung wurde als einfacher Handarbeitsplatz ausgelegt. Bild 11 zeigt

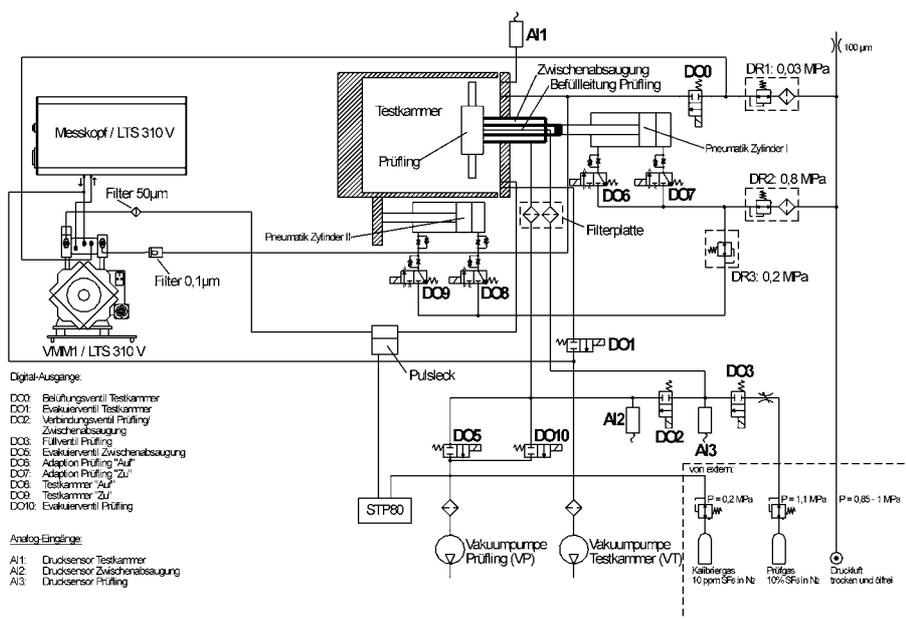


Bild 11: Pneumatikplan der Prüfeinrichtung

den Pneumatikplan der Prüfeinrichtung. Der Prüfablauf wurde über einen PC gesteuert und die Ergebnisse sowie der Prüfablauf dokumentiert.

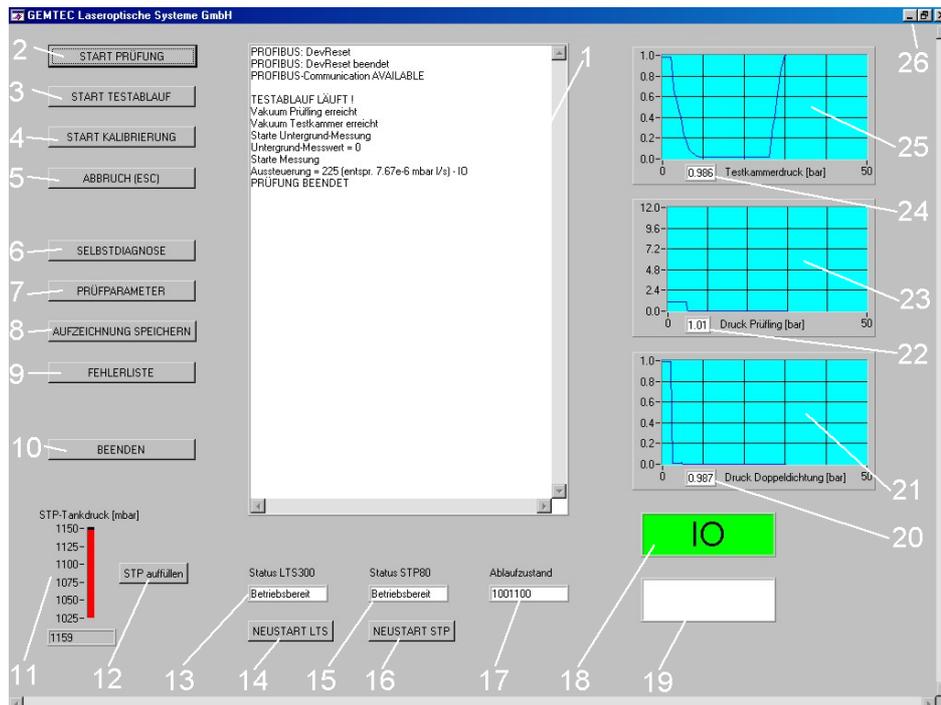


Bild 12: Bedienoberfläche

In Bild 12 ist die Bedienoberfläche abgebildet. Alle für den Betrieb notwendigen Größen wie etwa Druckverläufe oder der Zustand des Prüfablaufs werden angezeigt. Die für die Prüfung relevanten und dem Bediener zugänglichen Parameter sind in Bild 13 dargestellt.

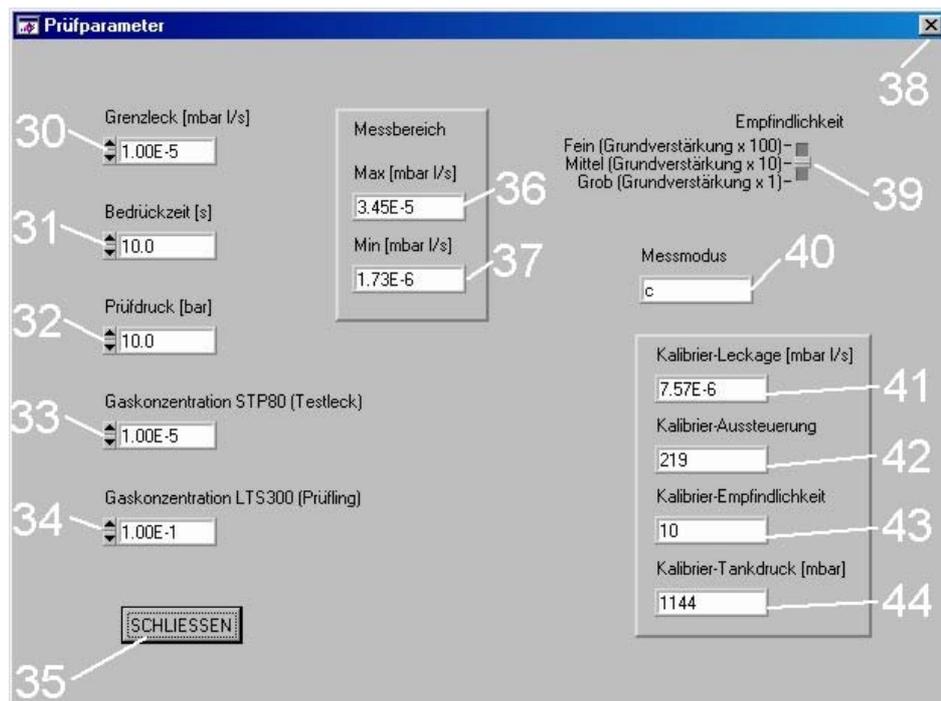


Bild 13: Bildschirm Prüfparameter

Bild 14 zeigt eine typische Messreihe mit einem Kalibrierleck. Das Kalibrierleck war bei den Messungen Nummer 1 bis 9 und 15 bis 23 zugeschaltet und bei den Messungen 10 bis 14 nicht zugeschaltet. Als Prüfling wurde ein dichter Dummy in die Prüfvorrichtung eingelegt (siehe auch Bild 10).

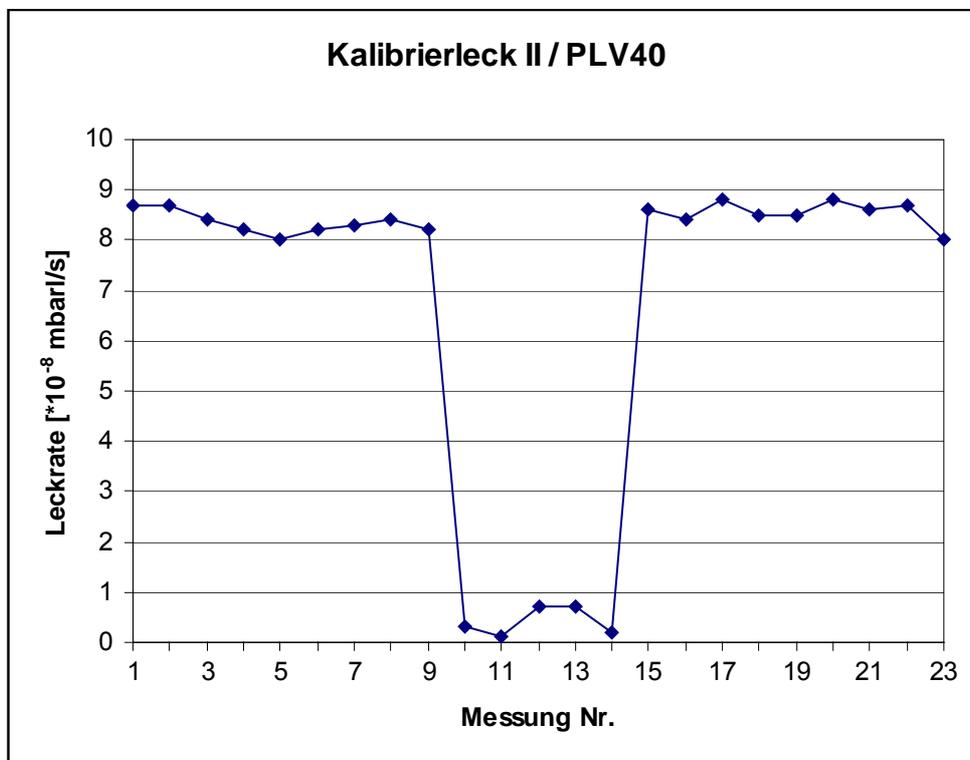


Bild 14: Messreihe mit Kalibrierleck

Die Prüflingsadaption war mit einer Zwischenabsaugung ausgestattet. Somit konnte von der Adaptionstelle kein Testgas in die Prüfkammer gelangen. Die Zwischenabsaugung wurde so dimensioniert, dass Leckraten von bis zu 1 mbar/s an der Adaptionstelle sicher durch diese abgesaugt werden konnte.

3.2 Lecksuche mit dem Laserscanverfahren

Um an PKW-Motoren die Dichtheit der Kraftstoff führenden Komponenten am Komplettmotor 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 präparierte 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 15 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.

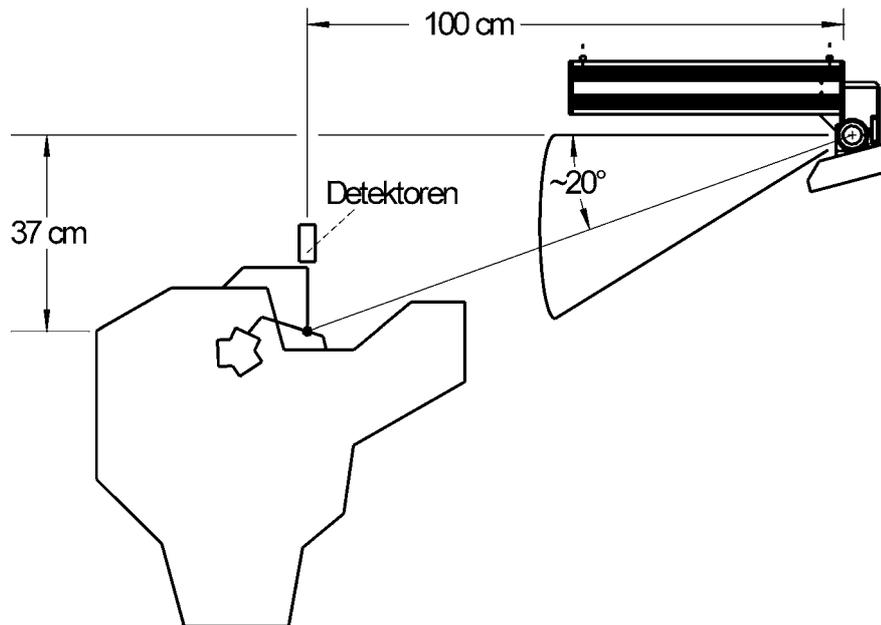


Bild 15: Scanposition STS 400 an PKW-Motor

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 16 zeigt eine typische Messreihe an einer undichten Verschraubung bei geschlossener Testkammer. Wie wichtig die richtige Auslegung und Dimensionierung der Testkammer ist, wird deutlich, wenn eine Seitenverkleidung der Testkammer entfernt wird. Diese Situation ist liegt der Messreihe in Bild 17 zugrunde. Obwohl die Luft in der Umgebung des Testaufbaus in Ruhe war, wurde die Messreihe durch die bei offener Testkammer kaum zu unterdrückende Konvektionsströmung deutlich sichtbar beeinflusst.

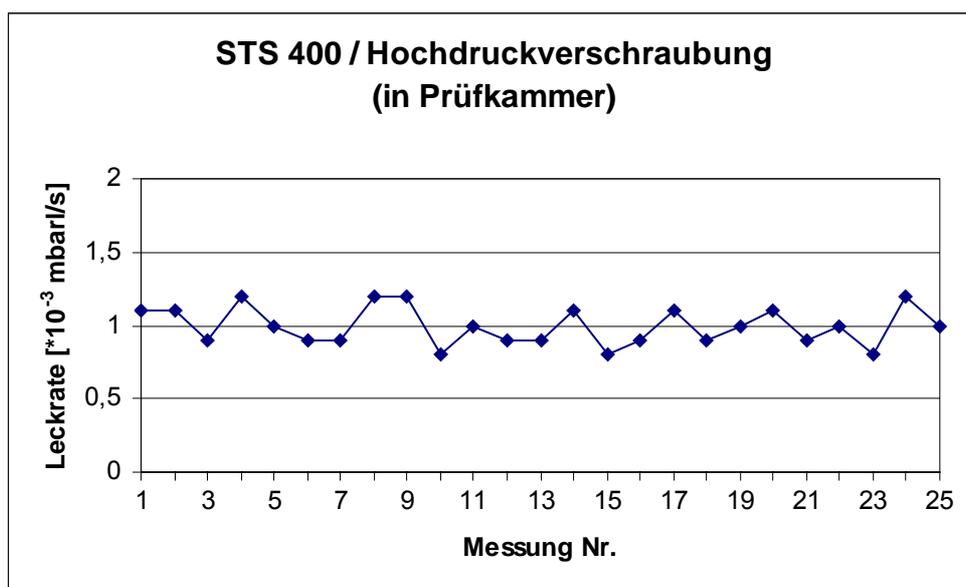


Bild 16: Messreihe mit geschlossener Testkammer

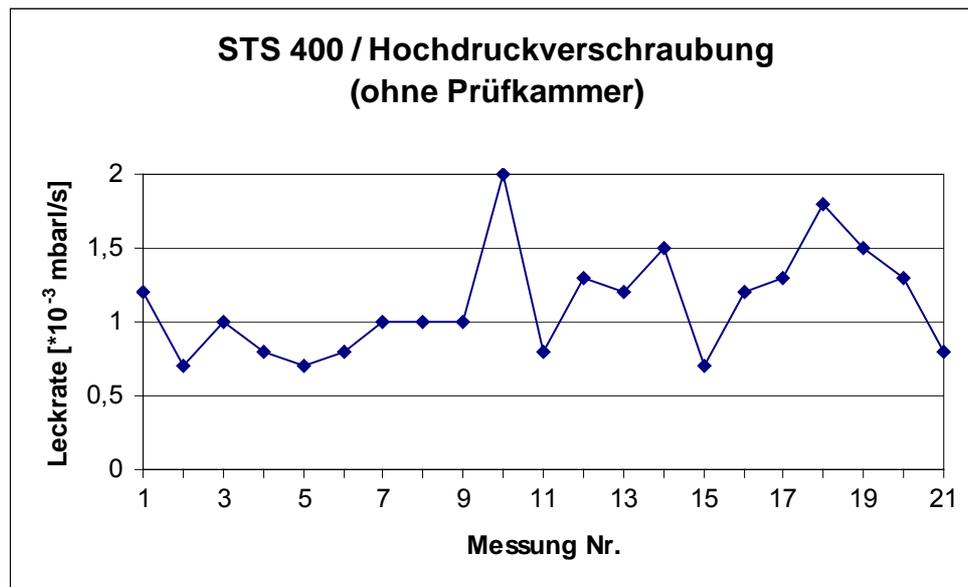
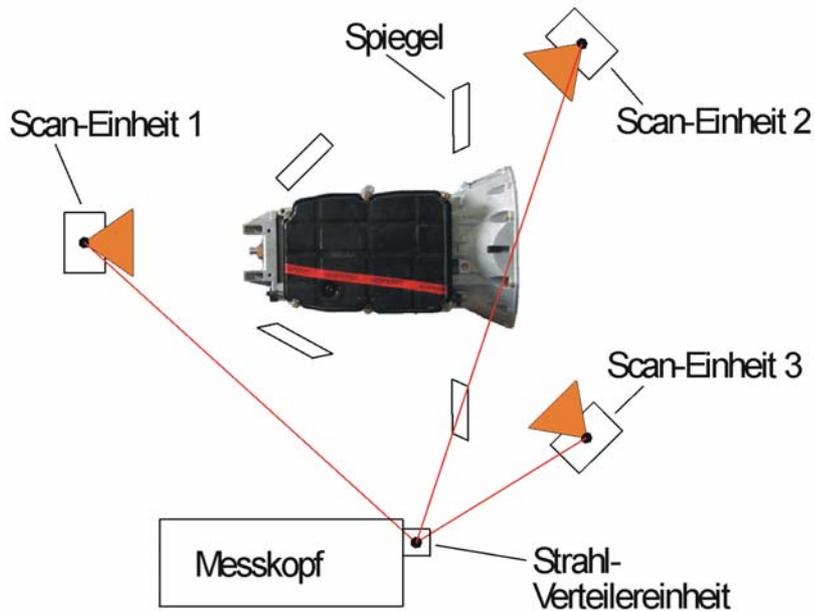


Bild 17: Messreihe mit offener Testkammer

Ein weiteres Anwendungsbeispiel, das ausführlich untersucht wurde, ist die lokalisierende Dichtheitsprüfung von PKW-Getrieben. Hierzu wird der Prüfling definiert mittels Testgas mit Druck beaufschlagt. Je nach Größe der zu detektierenden Leckagen kann zum Beaufschlagen des Prüflings mit Druck auch ein Gemisch aus beispielsweise Luft oder Stickstoff mit dem jeweiligen Testgas verwendet werden. Damit die Leckagen detektiert werden können, muss sichergestellt sein, dass das Testgas an die Prüflingsaußenseite gelangt und dort mittels des Laserstrahls beleuchtet werden kann. Dies ist in der Regel durch ein hinreichend langes Bedrücken des Prüfobjektes mit Testgas einfach sicherzustellen. Für den Fall, dass nicht alle zu prüfenden Bereiche des Prüflings direkt aus einer Scan-Position mit dem Laserstrahl beleuchtet werden können und der Prüfling nicht so gedreht werden kann, dass alle zu prüfenden Bereiche nacheinander beleuchtet werden können, kann das optische Leckortungssystem STS 400 M eingesetzt werden.

Das STS 400 M unterscheidet sich von dem oben beschriebenen optischen Leckortungssystem STS 400 im Wesentlichen dadurch, dass die Scan-Einheit (in welcher die CCD-Kamera integriert ist) bei dem STS 400 M als separate Einheit frei im Raum um den Prüfling positioniert werden kann. Beim STS 400 ist die Scan-Einheit fest mit dem Messkopf verbunden. Das optische Leckortungssystem STS 400 M kann mit bis zu 16 Scan-Einheiten betrieben werden.

Am Messkopf ist hierzu bei dem optischen Leckortungssystem STS 400 M eine Strahl-Verteilereinheit angebracht, welche den aus dem Messkopf austretenden Laserstrahl auf die Scan-Spiegel der einzelnen separaten Scan-Einheiten lenkt. Soll ein Prüfling nun mit dem optischen Leckortungssystem STS 400 M auf Dichtheit geprüft werden, so müssen alle zu prüfenden Bereiche optisch einsehbar sein. D.h., es können um den Prüfling so viele Scan-Einheiten positioniert werden, dass jeder zu prüfende Bereich zumindest von einer Scan-Einheit aus mit dem Laserstrahl beleuchtet und damit abgerastert werden kann.



- Erlaubt den flexiblen Messeinsatz auch bei nur schlecht einsehbaren Prüfbereichen.
- Betrieb mit bis zu 16 Scan-Einheiten möglich.
- Es können auch mit Flüssigkeiten (Ölen) gefüllte Teile geprüft werden.

Bild 18: STS 400 M / Anordnung Getriebe

Die Prüfung läuft dann so ab, dass die einzelnen zu prüfenden Bereiche mit dem Laserstrahl jeweils von der Scan-Einheit mit dem Laserstrahl beleuchtet und abge-



Bild 19: STS 400 M / Scan-Ansicht 1

rastert werden, von der aus der entsprechende Bereich am besten eingesehen werden kann. Der jeweils aktiven Scan-Einheit wird hierzu der Laserstrahl mittels der Strahl-Verteilereinheit zur Verfügung gestellt. D.h., der aus dem Messkopf austretende Laserstrahl wird über die Strahl-Verteilereinheit auf den Scan-Spiegel der entsprechenden Scan-Einheit gerichtet. Der eigentliche Scan-Vorgang einer Scan-Einheit verläuft dann völlig analog zu dem Scan-Vorgang bei dem STS 400.

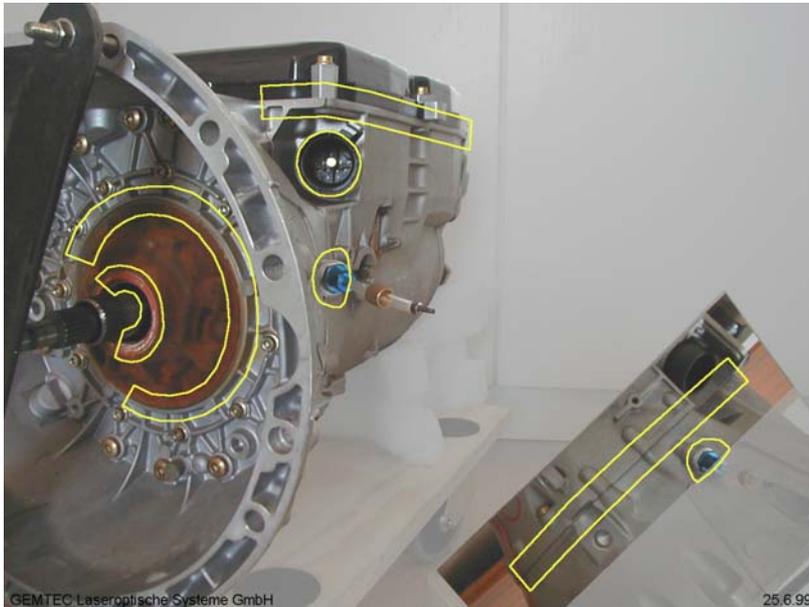


Bild 20: STS 400 M / Scan-Ansicht 2

Zur lokalisierenden Dichtheitsprüfung beispielsweise von PKW-Getrieben ist es dann mit dem STS 400 M möglich, mit einem Messkopf, einer Strahl-Verteilereinheit (welche in der Regel am Messkopf montiert ist) und mit drei Scan-Einheiten

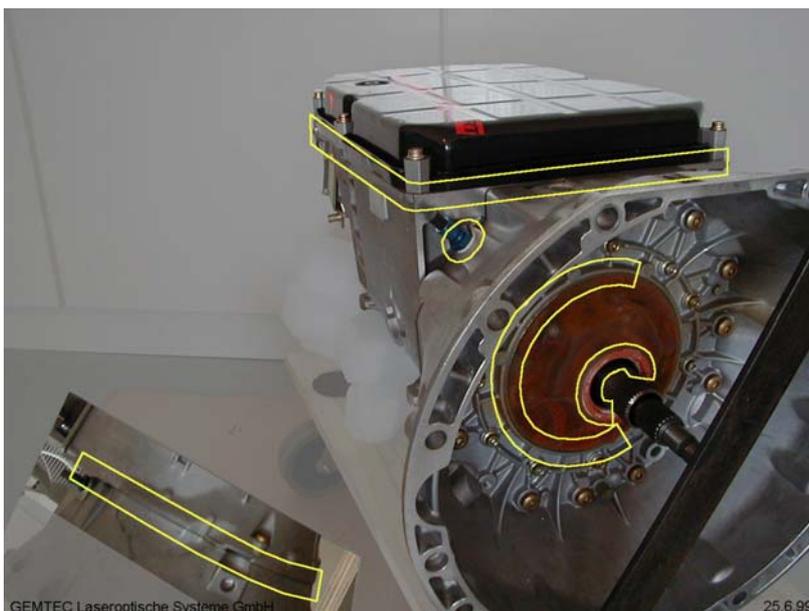


Bild 21: STS 400 M / Scan-Ansicht 3

alle für die Dichtheit eines Getriebes relevanten Bereiche einzusehen und abzurastern. Dieses kann dann natürlich leicht mittels der drei Scan-Ansichten der einzelnen Scan-Einheiten kontrolliert werden. Die zu scannenden Bereiche können wie beim STS 400 jeweils farblich markiert werden. Um die Anzahl der Scanner zu minimieren, können natürlich auch zusätzlich einzelne Bereiche über Spiegel mit dem Laserstrahl abgerastert werden. Diese werden dann so angeordnet, dass alle zu untersuchenden Stellen des Prüflings entweder direkt mittels einer der Scan-Einheiten oder über einen der Spiegel abgerastert werden können.

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. Das Laserscanverfahren eignet sich daher insbesondere zur Qualitätssicherung und Fertigungskontrolle in der Produktion.

3.3 TLF-Dichtheitsprüfverfahren

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

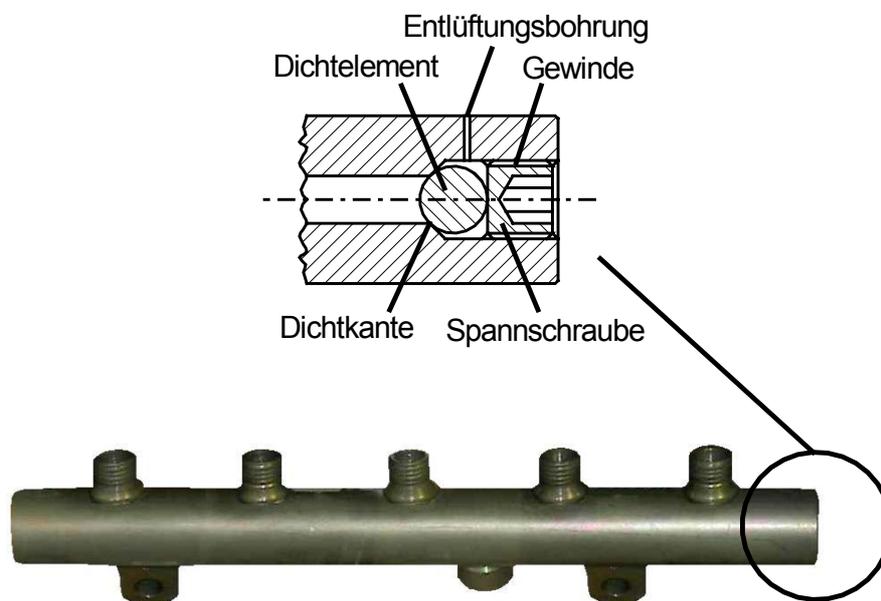


Bild 22: CRI-Rail mit nicht unmittelbar zugänglichen Leckstellen

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 $(0,5-7) \text{ mm}^3 \text{ Prüföl/s}$

Bei vielen Dieselhochdruckkomponenten ist die eigentliche Dichtstelle, wie bei dem in Bild 22 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 $0,02 \text{ mm}^3 \text{ Prüföl/s}$ 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.



Bild 23: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
Gesamtansicht TLF-Dichtheitsprüfanlage

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.

Das für die Dichtheitsprüfung von mit Flüssigkeiten verfüllten Komponenten, insbesondere von Dieselhochdruckkomponenten entwickelte TLF-Prüfverfahren (Testgas in liquid Fluids) 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

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.



Bild 24: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
CRI-Rail eingelegt in der Testkammer einer TLF-Dichtheitsprüfanlage

Als Gasnachweissystem zum Nachweis des an einer Leckstelle von dem Prüföl freigesetzten Testgas kann sowohl das STS 400 als auch ein System der LTS-Systemreihe eingesetzt werden, welche auch stark ölhaltige Analysengase störungsfrei bewerten können. Mit dem TLF-Prüfverfahren können unter Produktionsbedingungen noch Leckraten von bis zu $0,01 \text{ mm}^3 \text{ Prüföl} / \text{s}$ erkannt werden.

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

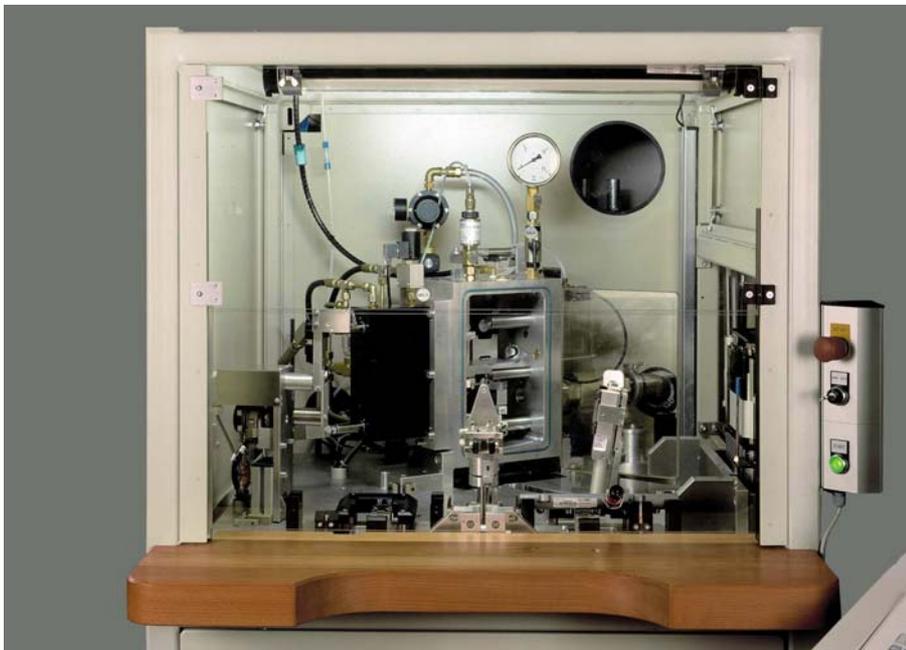


Bild 25: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
Frontansicht Prüfmodul einer TLF-Dichtheitsprüfanlage

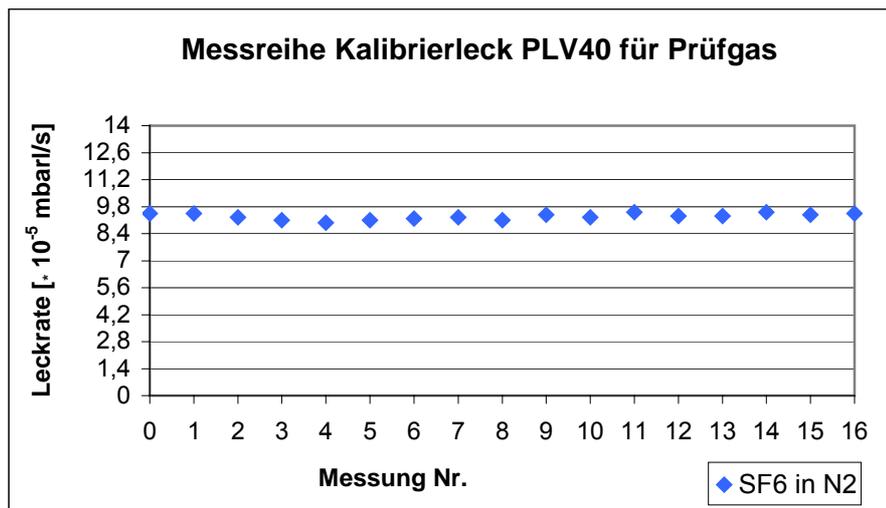
Mit dem TLF-Prüfverfahren wurde es erstmals möglich, Dieselhochdruckkomponenten wie etwa CRI-Rails automatisiert auf Dichtigkeit überprüfen zu können. Für viele dieser Komponenten ist ein Prüföl als Prüfmedium vorgeschrieben.

Bild 23 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.



Bild 26: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum
Prüfmodul mit integriertem Handlingsystem einer TLF-
Dichtheitsprüfanlage

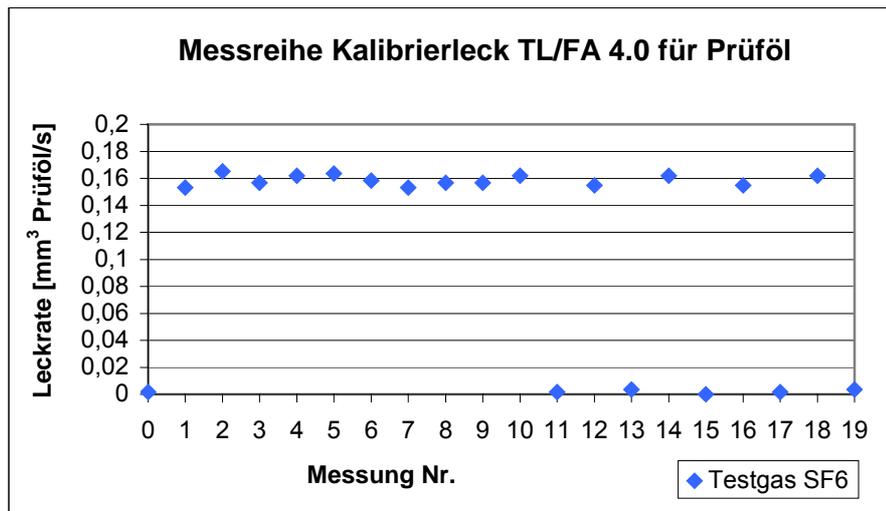
In Bild 24 ist eine Testkammer der in Bild 23 dargestellten CRI-Prüfeinrichtung zu sehen. Die automatisch eingelegten Prüflinge werden hydraulisch adaptiert. Der am CRI-Rail angeordnete Drucksensor wird parallel zur Dichtheitsprüfung in seiner Funktion überprüft. Bild 25 zeigt das Prüfmodul.



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

Bild 27: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum

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. Das in Bild 26 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.



- Prüfdruck 0,2 MPa
- Entspricht einer Leckrate von 0,16 mm³ Prüföl/s ($9,5 \cdot 10^{-6}$ mbarl/s)

Bild 28: Anwendungsbeispiel integrale Dichtheitsprüfung im Vakuum

Bild 27 zeigt eine typische Messreihe des Kalibrierlecks PLV 40. Bild 28 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.