

Qualitätskontrolle von Batteriekomponenten im Produktionsprozess

Joachim LAPSIEN¹

¹ CETA Testsysteme GmbH, Hilden

Kontakt E-Mail: joachim.lapsien@cetatest.com

Kurzfassung

Prüfmethoden für End-of-Line Dichtheitsprüfungen und Durchflussprüfungen

Im Bereich der Elektromobilität kommt es darauf an, dass die Batterie und alle Komponenten, die für das Batterie- und Energiemanagement eingesetzt werden, einwandfrei funktionieren.

Das Gesamtsystem besteht aus verschiedenen Komponenten wie Batterie, Batteriegehäuse, Elektronik- und Leistungssteuergeräte, elektrische Verbindungen, Entlüftungselemente, Sensoren, Kühlkreisläufe, Pumpen, Regelventile.

Diese Komponenten müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Sie sind verschiedenen Umwelt- und Betriebsbedingungen ausgesetzt. Deshalb müssen sie dicht sein gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und Feuchtigkeit, was schwerwiegende Fehlfunktionen zur Folge haben kann. Um dieses Risiko zu verringern, werden diese Produkte während des Herstellungsprozesses und vor Auslieferung geprüft.

Das Prüfmedium Druckluft ist in der industriellen Dichtheits- und Durchflussprüfung weit verbreitet. Eine breite Palette von Produkttypen kann hierbei mit verschiedenen Prüfmethoden getestet werden. Je nach Prüfteilvolumen kann Druckluft bei Leckraten bis hinab zu 10^{-3} mbar \cdot l/s und bei der Durchflussmenge bis ca. 400 l/min eingesetzt werden.

Sind die Dichtheitsanforderungen höher, müssen Prüfgasverfahren, auch Tracergas-Methoden, genannt, eingesetzt werden. Mit dem Tracergas Wasserstoff (als Formiergas: 5 % Wasserstoff, 95 % Stickstoff) lassen sich Leckraten bis hinab zu 10^{-6} mbar \cdot l/s nachweisen, unter Einsatz von Helium sind es 10^{-9} mbar \cdot l/s.

Beim Einsatz von Tracergas ist folgende Situation zu berücksichtigen: Wenn das Produkt ein grobes Leck hat, ist die Umgebung kontaminiert. Und dann dauert es eine Weile, bis die Tracergaskonzentration wieder abfällt und der Sensor relaxiert. Aus diesem Grund wird vor dem Befüllen mit Tracergas bisweilen eine Vorprüfung mit Druckluft durchgeführt um grobe Lecks zu erkennen und diese grob undichten Produkte frühzeitig auszuschleusen.



DACH-Jahrestagung 2023 – 15.-17.05.2023, Friedrichshafen



Qualitätskontrolle von Batteriekomponenten im Produktionsprozess

Dichtheitsprüfung | Durchflussprüfung | Prüfparameter

CETA Testsysteme GmbH
Marie-Curie-Str. 35-37
40721 Hilden | Germany
www.cetatest.com

Dr. Joachim Lapsien
Vertriebsleiter
+49(0)2103/2471-19
joachim.lapsien@cetatest.com

Lösungspartner für industrielle Dichtheits- und Durchflussprüfung

2

Inhalt



Firmenprofil

Motivation

Thermomanagement Systeme | Batterie Performance | Batteriekomponenten und Prüfanforderungen

Industrielle Dichtheitsprüfmethoden

Methoden und Auswahlkriterien

Prüfmethoden mit dem Prüfmedium Druckluft

Druckverlustprüfung | Massendurchfluss | Volumenstrom

Tracergas-Methoden

Akkumulation | Schnüffeln | VOC-Nachweis

Ansätze zur Festlegung von Prüfparametern

Prüfdruck | Leckrate

Zusammenfassung

Lösungspartner für industrielle Dichtheits- und Durchflussprüfungen

Entwicklung und Herstellung von Dichtheits- und Durchflussprüfgeräten „Made in Germany“ 

Prüfmedien: **Druckluft** und **Formiergas** (5 % H₂, 95 % N₂)
Leckraten bis 10⁻⁶ mbar^{*l/s} | Durchflüsse von 1 ml/min bis 400 l/min

Mehr als **35 Jahre** Kompetenz in der Lösung industrieller produktionsbegleitenden Dichtheits- und Durchflussaufgaben

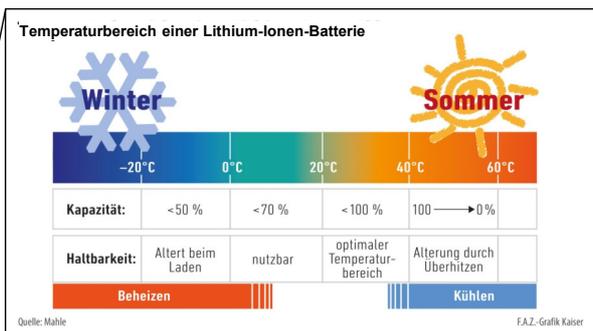
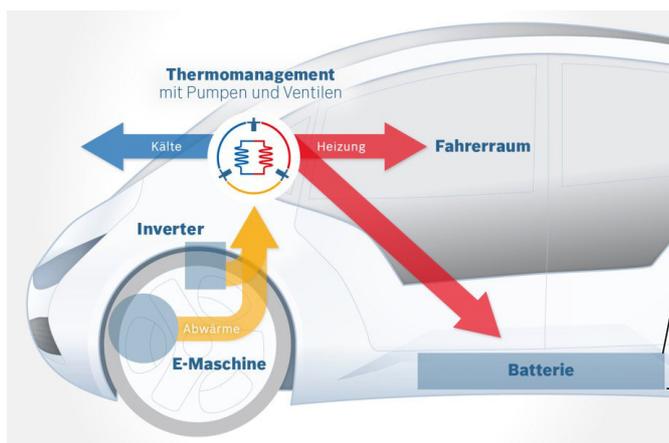
Akkreditiertes **DAKS-Kalibrierlabor** (DIN EN ISO/IEC 17025) für die Messgröße Druck (D-K-19566)



Bevorzugter Lieferant für einige der bekanntesten Automotive-Unternehmen

Weltweit sind **mehrere tausend CETA-Prüfgeräte** im industriellen Einsatz

Exportanteil: 50 %



Source: <https://www.mein-autolexikon.de/e-mobilitaet/thermomanagement-fuer-elektrofahrzeuge.html>

Unterstützende Systeme

Steckverbinder | Kabel | Elektronische Steuergehäuse | Pumpen | Kühlsysteme | Ventile

Batteriebetrieb

Kein optimales Temperaturregime ⇒ Negative Auswirkungen auf Kapazität und Lebensdauer
 Dichtheits- und Durchflussprüfungen der Komponenten des Thermomanagementsystems
 Leckraten: ca. 10^{-2} mbar·l/s | Durchflüsse: mehrere l/min | Prüfdrücke: 0,1 bar bis 6 bar
 (Spezifische Anforderungen hängen von der Komponente ab)

Batteriegehäuse

Eindringen von Feuchtigkeit ⇒ Schädliche chemische Reaktionen (Flusssäure)
 Leckrate: 10^{-4} mbar l/s bei 100 mbar

Batteriepakete

Verlust von Elektrolyt ⇒ Verringerung der Batteriekapazität
 Leckrate: 10^{-4} mbar l/s bis 10^{-5} mbar l/s bei 100 mbar

⇒ **Dichtheitsprüfungen | Unterschiedliche Prüfmedien (Druckluft, Tracergas)**

Komponente	Dichtheit	Durchfluss	Belüftung	Öffnungspunkt
Kühlkanäle	X	X		
Abschaltventile	X			
Kontrollventile	X	X		
Sicherheitsventile	X			X
Elektrische Kabel	X			
Elektronische Steuergehäuse	X		X	
Batteriegehäuse	X		X	
Pumpen	X			
Elektrische Steckverbinder	X		X	
Sensorsysteme	X		X	
Druckausgleichselemente		X		
Berstscheiben				X Zerstörender Test,

Dichtheitsprüfung mit Prüfmedium Druckluft

Messung leckagebedingter Druckänderung

Stabiler Messzustand

Leckratenformel \Rightarrow Berechnung des Druckgradienten
(Prüfteilumgebung auf Atmosphärendruck):

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \left(\frac{\text{Pa}}{\text{s}} \right) = \frac{Q_L [\text{cm}^3/\text{min}] \cdot 100.000 \text{ Pa}}{V_{\text{eff}} [\text{cm}^3] \cdot 60 \text{ s/min}}$$

 $\Delta p/\Delta t$ Druckgradient Q_L Leckrate V_{eff} Effektives Prüfvolumen

Druckgradient als Kriterium zur Auswahl
von Dichtheitsprüfverfahren

q_L	V_{eff}	0,1 cm ³	1 cm ³	10 cm ³	100 cm ³	1.000 cm ³	10.000 cm ³
0,00001	0,0006	10	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
0,0001	0,006	100	10	1	0,1	0,01	0,001
0,001	0,06	1.000	100	10	1	0,1	0,01
0,01	0,6	10.000	1.000	100	10	1	0,1
0,1	6	100.000	10.000	1.000	100	10	1
1	60	1.000.000	100.000	10.000	1.000	100	10
[mbar ³ /s]	[cm ³ /min]	$\Delta p/\Delta t$ [Pa/s]					

1 mbar³/s = 60 cm³/min

Prüfverfahren	Prüfmedium	Typischer Einsatzbereich
Tracergasverfahren Konzentrationsmessung Gassensoren, Massenspektrometer	Wasserstoff Helium	10 ⁻⁴ mbar ³ /s < Q < 10 ⁻² mbar ³ /s
Messung des Massendurchflusses Kalometrischer Massendurchflusssensor	Druckluft	0,3 N cm ³ /min < Q < 600 N cm ³ /min
Messung der Druckänderung Differenzdrucksensor	Druckluft	1 Pa/s < $\Delta p/\Delta t$ < 20 Pa/s
Messung der Druckänderung Relativedrucksensor	Druckluft	20 Pa/s < $\Delta p/\Delta t$ < 1000 Pa/s
Messung des Volumenstroms Druckabfall in laminarer Strömung Einsatz laminarer Messstrecken	Druckluft	5 ml/min < Q < 200 l/min

© CETA Testsysteme GmbH

Dynamische ViskositätWasser: Dynamische Viskosität $\eta = 1138,0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (15°C, 1013 hPa)Luft: Dynamische Viskosität $\eta = 18,0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (15°C, 1013 hPa) $\Rightarrow \eta_{\text{Luft}} \approx 1/50 \eta_{\text{Wasser}}$

Druckluft wird häufig eingesetzt, wenn das Produkt auf Wasserdichtheit geprüft werden soll.

Messprinzip

Druckbeaufschlagung des Prüfteils | Messung der leckagebedingten Druckänderung

Vorteile

Kostengünstiges Prüfmedium

Einfache Verfügbarkeit

Nicht benetzender Prüfprozess

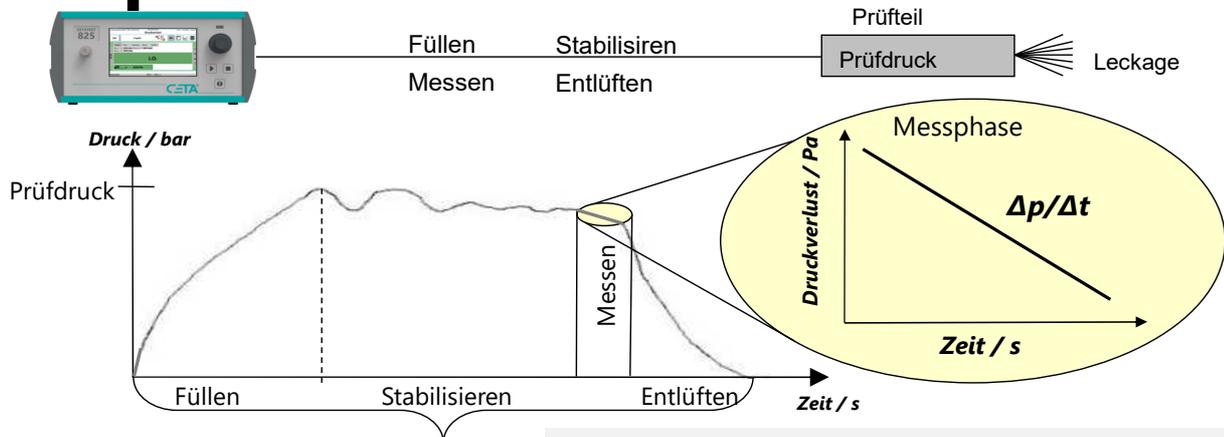
Kurzer Prüfprozess

Einfache Integration in automatisierte Produktionslinie

Objektive Messwerte durch Messung der Druckänderung

© CETA Testsysteme GmbH

Druckluftnetz



Stabiler Messzustand
($\Delta p \sim \Delta t$)



Leckratenformel

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{s}} \right] = \frac{Q_L [\text{ml/min}]}{V [\text{ml}]} \cdot \frac{100.000 \text{ P}}{60 \text{ s}}$$

Typische Anwendung : ECUs (10^{-2} mbar l/s, 100 mbar), Pumpen ($3 \cdot 10^{-2}$ mbar l/s, 2,5 bar)

Anwendung

Großvolumige Produkte | Geringe Leckraten

Messprinzip

Messung der Luftmasse, die durch Leck austritt

Messtechnik

Einsatz kalorimetrischer Massendurchflusssensoren

Messbereiche: $\pm 20 \text{ Ncm}^3/\text{min}$ | bis zu $600 \text{ Ncm}^3/\text{min}$ / Auflösung: $0,01 \text{ Ncm}^3/\text{min}$

Wichtig

Konstanter Druck während Prüfung \Rightarrow Geeignetes Reservoir | Optimierte direkte Druckbeaufschlagung

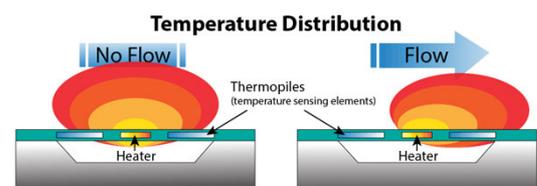
Verwendung von Nachström-Reservoirvolumen \Rightarrow Messwertkorrektur

Befüllvorgang

Begrenzter Durchfluss durch Massendurchflusssensor \Rightarrow Bypass-Befüllung

Erreichen des Zieldruckes \Rightarrow Aktivierung des Sensor-Messkreises

Typische Anwendung: eAchse (13 l, 10^{-2} mbar l/s, 100 mbar, $C_g > 1,33$)



Source: Principle of calorimetric mass flow test © Alicat Scientific

Anwendung

Messung des Durchflusses durch Kanäle, Membranen

Messprinzip

Laminare Messstrecken (LFE) \Rightarrow Laminarisierung des Flusses

Laminarer Fluss $\Rightarrow \Delta V/\Delta t \propto \Delta p$

Messtechnik

Messung der Druckdifferenz Δp längs des LFE

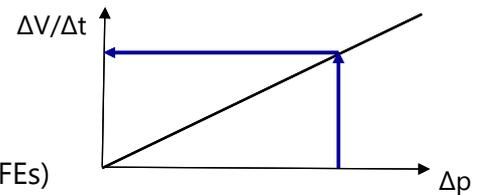
Konversion $\Delta p \Rightarrow \Delta V/\Delta t$

Messbereich: 1 ml/min bis 400 l/min (mit unterschiedlichen LFEs)

Druckbereich: -1 bar bis 6 bar

Wichtig

Stabile Druckbeaufschlagung während der Prüfung



Typische Anwendungen: Kühlkanäle (200 ml, 50 l/min, 50 mbar), Membranen (100 ml/min, 100 mbar)

© CETA Testsysteme GmbH

Vorbereitung

Produkt mit Prüfgas gefüllt | Produkt muss mit Prüfgas gefüllt und unter Druck gesetzt werden

Akkumulationsmethode

Produkt wird in Prüfkammer plaziert

Austretendes Gas (Tracergas) \Rightarrow Homogenisierung durch Ventilatoren | Akkumulation

Injektion in Messkreis \Rightarrow Gasdetektion mit geeignetem Sensor (Metalloxid, Halbleiter)

Schnüffelmethode

Schnüffelsonde mit Empfindlichkeit gegenüber Tracergas

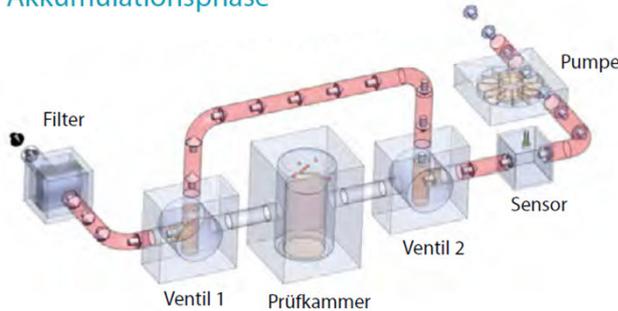
Manuelle oder automatische Suche nach Leckstellen

Direkte Lokalisierung der Leckagen

Typische Anwendung: Batteriepakete (Akkumulationsmethode, 10^{-5} mbar l/s, 100 mbar)

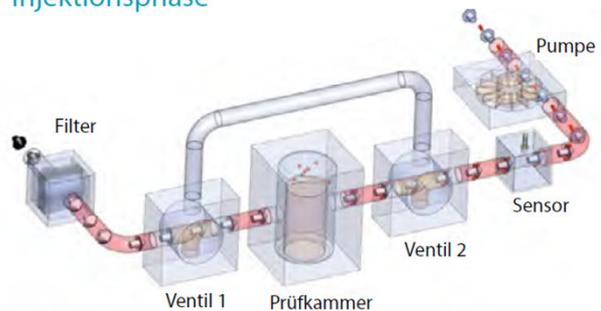
© CETA Testsysteme GmbH

Akkumulationsphase



1. Das durch die Leckage entweichende Prüfmedium sammelt sich in der abgesperrten Prüfkammer.

Injektionsphase



2. Die Kammeratmosphäre wird an einem Sensor vorbeigeführt und das entstehende Signal ausgewertet.

Methode 1: Produkte werden mit Tracergas gefüllt ⇒ Nachweis des Tracergases

Methode 2: Produkt bereits mit Flüssigkeit gefüllt (Lösungsmittel, VOC) ⇒ Nachweis von VOCs

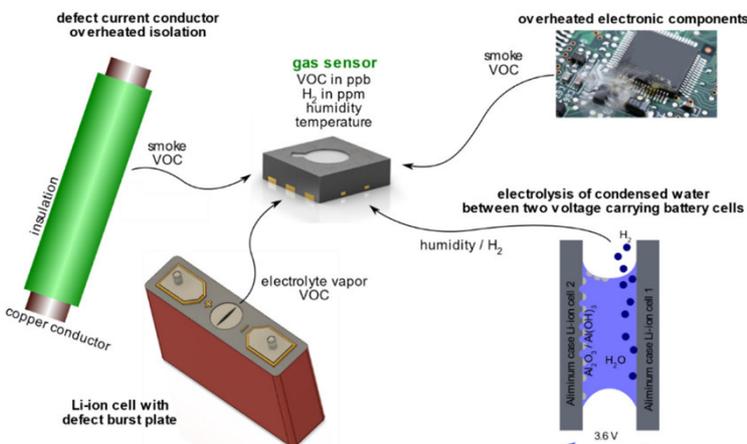
VOC (Volatile Organic Compounds)

Gasförmige, dampfförmige Stoffe organischen Ursprungs (z.B. Hydrocarbonate, Alkohole, Aldehyde, organische Säuren)

Elektrolyte für Batteriezellen

- DMC Dimethylkarbonat
- DEC Diethylkarbonat
- EMC Ethylmethylkarbonat
- PPC Polypropylenkarbonate
- Mischungen (z.B. EMC / PPC)

Nachweis verdampfender Elektrolyte mit VOC-empfindlichen Sensoren
 Akkumulations- und Injektionsverfahren
 Elektrolyte mit niedrigem Dampfdruck
 Evakuierung der Prüfkammer



Source: <https://www.mdpi.com/2313-0105/7/2/25/htm>

Betriebsdruck

Prüfdruck, abgeleitet aus angegebenem Betriebsdruck (ggf. plus Sicherheitszuschlag)

Prüfdruck von Komponenten \leftrightarrow Mindestens der Prüfdruck des Systems

Temperaturbedingte Druckänderungen

$$\Delta p = p_1 \cdot \frac{\Delta T}{T_1}$$

Temperaturänderung von 20°C auf +120°C in gekapseltem Produkt \rightarrow Positiver Überdruck +346 mbar

Hydrostatischer Druck in Eintauchtiefe h

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Hydrostatischer Druck in 1 m Wassertiefe beträgt ca. 100 mbar.

Dichtheit	Leckrate	Lochgröße	Gasleckrate
wasserdicht	$< 10^{-2}$ mbar*l/s	10 μ m	ca. 1 ml / 100 s
dampfdicht	$< 10^{-3}$ mbar*l/s	3 μ m	ca. 1 ml / 15 Minuten
bakteriendicht	$< 10^{-4}$ mbar*l/s	1 μ m	ca. 1 ml / 3 Stunden
öldicht	$< 10^{-5}$ mbar*l/s	300 nm	ca. 1 ml / 1 Tag
virendicht	$< 10^{-6}$ mbar*l/s	100 nm	ca. 1 ml / 10 Tage
gasdicht	$< 10^{-7}$ mbar*l/s	30 nm	ca. 1 ml / 100 Tage
"absolut dicht"	$< 10^{-8}$ mbar*l/s	10 nm	ca. 1 ml / 3 Jahre
	$< 10^{-10}$ mbar*l/s	1 nm	ca. 1 ml / 300 Jahre

Modell Luftsäule über idealem Loch fällt mit Schallgeschwindigkeit in evakuierten Behälter ($p_{rel} = -1$ bar)

Realität: Reale Leckage besteht aus Vielzahl von Mikrolecks (z.B. Klebnähte, Schweißnähte)

Vorsicht Orientierungswerte \rightarrow Gefahr, dass evtl. „zu scharf“ geprüft wird

Laboruntersuchungen zur Ableitung einer zulässigen Leckrate

Transfer in den industriellen Prozess und Produktionstakt notwendig.

1. Herstellung von Produkten unterschiedlicher Produktionsgüte (inkl. typischer Produktionsfehler)
2. Dichtheitsprüfung der Produkte mit einem geeigneten Verfahren und Ermittlung der Leckrate
3. IP-Schutzartenprüfung im Labor
4. Untersuchung des Eindringens von Wasser und Bewertung (in der Regel zerstörend)
5. Auswertung der Korrelationsversuche (Leckrate → dicht / undicht)
6. Ableitung von Prüfdruck und zulässige Leckrate

Vorteil: Festlegung einer produktangepassten Leckrate

Leckratenbudget

Systemleckrate ist die Summe der Einzelleckraten der relevanten Komponenten

Festlegung geeigneter Leckrate für die Komponenten erforderlich

Leckrate bestimmt Auswahl der Prüfmethode

Druckluft

⇒ Verschiedene Methoden (Druckänderung, Massendurchfluss, Volumenstrom)

⇒ Anwendbar für Leckraten bis hinab 10^{-3} mbar·l/s.

⇒ Einsatz als Vortest - vor Einsatz von Tracergas – zur Identifikation von Produkten mit Groblecks

Tracergas Methoden

⇒ Anwendbar für Leckraten bis hinab zu 10^{-9} mbar·l/s

⇒ VOC-sensitive Sensoren erlauben Dichtheitsprüfung von flüssigkeitsgefüllten Produkten

Bei Annahme der Leckrate (z.B. Orientierungswerte)

⇒ Verifikation durch praktische Tests empfohlen

Testlecks

⇒ Simulation grenzwertiger Produkte | Messmittelfähigkeit | Ermittlung C_g -Wert

Druckbelastung im Betrieb | Temperaturbedingte Druckänderungen

⇒ Simulation durch Wahl des Prüfdruckes

Thermisch induzierte Mikrospalte aufgrund unterschiedlicher Materialausdehnungskoeffizienten

⇒ Effekt nicht durch Prüfdruck nachstellbar