

E-Book

E-Mobilität: Dichtheitsprüfung für elektrische und Brennstoffzellen-Fahrzeuge



Prüfaufgaben bei der industriellen Fertigung von BEV/PHEV/ FCEV-Fahrzeugen: bei der Herstellung von Antriebsbatterien, Elektromotoren und Brennstoffzellen

Inhalt

Vorwort	4
Einleitung	5
1 Elektromobilität heißt Zukunft	7
2 Das Herz von BEV/PHEV-Fahrzeugen: die Traktionsbatterie ..	8
2.1 Von Batteriezellen über Batteriemodule und -packs bis zur Traktionsbatterie. .	8
2.2 Brandrisiko und Thermal Runaway	9
2.3 Wareneingangstest für Batteriezellen	11
2.4 Dichtheit für Batteriemodule und -packs	11
2.5 Batterielebensdauer sicherstellen	12
3 Prüfverfahren für Batteriezellen	12
3.1 Versagensmodelle der verschiedenen Zelltypen	13
3.2 Leckratenanforderung nach Zelltyp	14
3.2.1 Geforderte Leckrate für Hardcase-Zellen	14
3.2.2 Geforderte Leckrate für Pouchzellen	15
3.3 Vortests der Zellengehäuse	16
3.4 Dichtheitsprüfung an fertig befüllten Batteriezellen	18
3.4.1 Direkter Lecknachweis durch Elektrolyt-Lösungsmittel	18
3.4.2 Direkter Nachweis ist Druckverfahren und Helium-Bombing überlegen . . .	20
4 Anforderungen an die Gehäuse von Batteriepacks	21
Exkurs 1: IP67 – Das Gehäusematerial bestimmt die Grenzleckrate.	22
4.1 Gehäuse-Vorprüfung in Vakuum- oder Akkumulationskammer	26
4.2 Die automatisierte Roboter-Schnüffellecksuche	27
Exkurs 2: Warum hoher Gasfluss beim Roboterschnüffeln entscheidend ist.	30
4.3 Manuelle Schnüffellecksuche mit Formiergas	32

5	Dichtheit der Kühlkomponenten	32
5.1	Glykol-Wasser-Kühlung oder Kältemittel	32
5.2	Dichtheitsanforderungen an die Kühlkreislauf-Komponenten	33
5.3	Schnüffellecksuche beim Einbau der Batterie	34
6	Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) und ihre Komponenten	35
6.1	Bipolarplatten für Brennstoffzellen	36
6.2	Die Kühlmittelschleife der Bipolarplatte	38
6.3	Prüfung der Bipolarplatte auf Wasserstoffleckagen	39
6.4	End-of-line-Tests an kompletten Fuel Cell Stacks	39
7	Wasserstofftanks und-leitungen	40
7.1	Normen und Permeationsgrenzwerte	40
7.2	Leckraten orientieren sich an Permeationsraten	42
7.3	Akkumulationsprüfung für Wasserstofftanks	42
7.4	Vakuumprüfung für Wasserstofftanks	43
7.5	Schnüffellecksuche an komplettierten Tanks mit allen Armaturen	43
8	Elektrische und elektronische Komponenten	45
8.1	Sensoren und Steuermodule	46
8.2	Elektrische Antriebsmotoren	46
8.3	Vakuum- oder Akkumulationsprüfung für Motorengehäuse	47
8.4	Dichtheitsprüfung des Wasserkühlmantels	48
9	Über INFICON	49
10	Weitere Informationsquellen	50
10.1	Dokumentserie über spezifische Dichtheitsprüfaufgaben	50
10.2	Weiterbildung in der INFICON ACADEMY	51
	Impressum	52
	Kontakt	52

Vorwort

Die Anforderungen an die Dichtheitsprüfung von alternativen Antrieben und deren Einzelkomponenten sind ebenso komplex wie das Produkt selbst. Kritische Komponenten sind dabei etwa Batterien (da gefüllt mit Elektrolyten), Medienkreisläufe (mit Wasser-Glykol oder Wasserstoff), aber auch die elektrischen Bauteile (mit hohen Spannungen/Strömen). Sie alle stellen höchste Anforderungen an die Qualitätssicherung in der Fertigung und damit auch an die Dichtheitsprüfung.

Bei der Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH beschäftigen wir uns seit vielen Jahren mit hochpräziser Dichtheitsprüftechnik. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass theoretische Betrachtungen wie physikalische Grundlagen der Thermodynamik und Simulationen eine erste Richtung zur Auswahl der geeigneten Prüfmethode sind. Letztendlich ist das aber nicht ausreichend: So ist beispielsweise allein die Beantwortung der Frage, ab welcher Lochgröße Flüssigkeit ausläuft, alles andere als trivial. Hier spielen Material- und Lochgeometrie sowie thermodynamische Randbedingungen wie Temperatur, Druck und Viskosität eine große Rolle.

Neben dem eigentlich zu prüfenden Leckagegrenzwert, sei dieser normativ oder aus anderen Überlegungen zur Produktqualität vorgegeben, gilt es, das richtige Prüfverfahren auszuwählen. Dabei sind die Kosten für eine Dichtheitsprüfung stets mit zu bewerten. In einem ersten Schritt wird dabei gerne auf einfache und preiswerte druckluftbasierte Verfahren wie etwa eine Druckabfall- oder Massenflussleckprüfung zurückgegriffen. Dabei verdeutlicht die vorliegende Unterlage, und ich kann das aus meinen Erfahrungen nur bestätigen, dass die zu prüfenden Leckagegrenzwerte eher eine Spurengasanalyse erfordern. Mit den dargestellten neuen Prüftechnologien ergeben sich, insbesondere für die industrielle Fertigung mit entsprechenden Anforderungen an Taktzeit und Prozessfähigkeit, wirtschaftliche Lösungen.

Neben den eigentlichen Herausforderungen in der Dichtheitsprüfung allgemein zeigt dieses E-Book verschiedene Prüftechnologien und wichtige Erfahrungsbeispiele. Ferner erhält man noch einen guten Einblick in den Bereich der alternativen Antriebe.

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Alexander Stratmann

Stuttgart, im März 2021, Robert Bosch Manufacturing Solutions GmbH

Einleitung

Dichtheitsprüfung: Bei der Fertigung von Traktionsbatterien und Brennstoffzellen unerlässlich

Elektromobilität wird von Jahr zu Jahr bedeutender. Mit der Zahl der BEV/PHEV-Fahrzeuge – der Battery Electric Vehicles und der Plug-in Hybrid Electric Vehicles – wächst auch die Zahl der benötigten Traktionsbatterien. Deren Qualität zu sichern, wird für Automobilhersteller und Zulieferer zu einer zentralen Aufgabe. Auch Fahrzeuge mit Brennstoffzelle, die Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV), benötigen eine Batterie, um die antreibenden Elektromotoren mit Strom zu versorgen – wenngleich eine mit deutlich geringerer Kapazität. Für die Wasserstofftanks und Brennstoffzellen von FCEVs sind sorgfältige Dichtheitsprüfungen ohnehin unentbehrlich.

Während der Fertigung von Antriebsbatterien ist eine konsequente Dichtheitsprüfung aller



Lithium-Ionen-Batterie im Hybridfahrzeug.

relevanten Komponenten entscheidend. Schon weil Endkunden im Zeitalter der alternativen, emissionsfreien Antriebe keine brennenden Luxuslimousinen bestaunen wollen. Ebenso wenig sind sie bereit, nach wenigen Jahren hohe Summen in eine neue Batterie zu investieren, um wieder die nötige Kapazität und eine akzeptable Reichweite zu erzielen. So ist es bei Traktionsbatterien wichtig, auf jeder Fertigungsstufe sicherzustellen, dass der Elektrolyt der Batteriezellen keinesfalls austritt oder mit Wasser in Berührung kommt – auch nicht mit Luftfeuchtigkeit. Denn es besteht die Gefahr, dass das Wasser mit dem Elektrolyten der Zelle zu Flusssäure reagiert. Zudem darf schon wegen der Kurzschlussgefahr kein Wasser von außen in Batteriemodule und -packs eindringen. Und weil eine Batterie nie überhitzen soll, muss auch der Kühlkreislauf der Traktionsbatterie dicht und vor dem Verlust des Kühlmediums geschützt sein. Traktionsbatterien stellen sowohl potenzielle Gefahrenherde als auch erfolgskritische Verschleißteile für BEV/PHEV-Fahrzeuge dar. Im Bereich der Wasserstofftechnologie von FCEV-Fahrzeugen sind Sicherheit und Dichtheit ohnehin unverzichtbar. Wer als Hersteller alternativer Antriebe den Ansprüchen seiner Kunden auf Dauer genügen möchte, kommt um geeignete Dichtheitsprüfmethoden in seinen Fertigungsprozessen nicht herum. Die Qualitätssicherung ist unerlässlich.



Ein Fuel-Cell-Fahrzeug von Toyota.

Dieses Whitepaper gibt einen detaillierten Überblick darüber, welche Anforderungen auf welcher Stufe im industriellen Fertigungsprozess von BEV-, PHEV- und FCEV-Fahrzeugen relevant sind und welche Dichtheitsprüfmethoden

sich im konkreten Anwendungsfall eignen. Eine Erkenntnis: Nur moderne Prüfgasverfahren sind in der Lage, die unerlässliche Gasdichtheit alternativer Antriebskomponenten sicherzustellen.

1 Elektromobilität heißt Zukunft

2019 gab es einen neuen Rekord: Weltweit wurden mehr als 2,1 Millionen BEV- und PHEV-Fahrzeuge verkauft – 40 Prozent mehr als im Vorjahr, wobei 2018 schon einen neuen Rekordwert gesetzt hatte. So die Zahlen des „Global EV Outlook 2020“ der International Energy Agency (IEA), einer OECD-Organisation mit Sitz in Paris. Die Entwicklung hin zu emissionsfreier Mobilität ist auch politisch gewollt. Sie wird ebenso durch offizielle Klimaziele wie durch explizite Quotenregelungen vorangetrieben. Andererseits hat beispielsweise China seine Zuschüsse für Käufer 2019 fast halbiert – Elektrofahrzeuge setzen sich dort auch ohne hohe Subventionen durch. In der Volksrepublik fahren rund 47 Prozent aller BEV/PHEV-Fahrzeuge auf der Welt, gefolgt von Märkten wie Europa und den USA. Und während der weltweite Pkw-Markt 2019 insgesamt schwächelte, gab es bei Elektrofahrzeugen ein klares Wachstum. In China beispielsweise erreichten BEV/PHEV-Fahrzeuge 2019 bereits einen Anteil von 4,9 Prozent an allen Pkw-Zulassungen, in Europa betrug ihr Marktanteil 3,5 Prozent. Die Zahlen, die sich für 2020 abzeichnen, ergeben ein ähnliches Bild: Während die Corona-Pandemie die weltweite Pkw-Konjunktur bremst, können sich BEV/PHEV-Fahrzeuge mit zumindest sta-

bilien, wenn nicht sogar steigenden Absatzzahlen behaupten.

Auch die großen deutschen Hersteller treiben das deutliche Wachstum im BEV/PHEV-Markt voran. So will beispielsweise VW bis 2024 konzernweit 33 Milliarden in Elektromobilität investieren. Daimler fertigt im sächsischen Kamenz bereits eigene Traktionsbatterien für Pkw und Nutzfahrzeuge, und das zweite europäische Batteriezellenkonsortium aus BASF, BMW und VARTA will sich, unterstützt durch Milliarden-subventionen der EU, der Fertigung von Batteriezellen widmen. Der emissionsfreien Mobilität gehört die Zukunft.

Ein weiterer Trend, der der neuen Technologie den Weg bahnt, sind immer weiter sinkende Preise für die Batteriekapazität. Während 2010 eine Kilowattstunde Speicherkapazität noch 1.100 US-Dollar kostete, ist sie heute für nur 156 US-Dollar zu haben. Parallel dazu vergrößert sich die Gesamtkapazität der in BEV- und PHEV-Fahrzeugen verbauten Batterien. Lag sie 2018 für die gesamte Klasse der leichten elektrischen Nutzfahrzeuge noch bei durchschnittlich 37 kWh, sind es heute bereits 44 kWh. In den meisten Märkten verfügen rein batterieelektrisch angetriebene Pkw heute schon über Speicherkapazitäten im Bereich zwischen 50 und 70 kWh – was ihnen zu einer entsprechenden Reichweite verhilft.

Parallel zu den rein batterieelektrischen An-

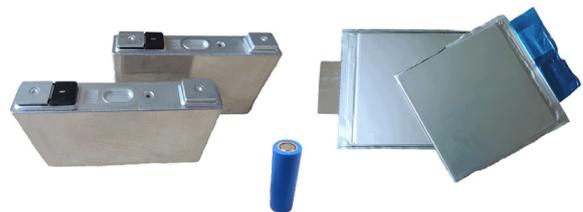
trieben steht auch das Thema Brennstoffzelle wieder auf der Tagesordnung. Der wesentliche Energiespeicher eines FCEV-Fahrzeugs ist sein Wasserstofftank. In der Brennstoffzelle reagiert dieser mitgeführte Wasserstoff gemeinsam mit Luftsauerstoff zu Wasser. Eine vergleichsweise kleine Traktionsbatterie speichert den dabei entstehenden Strom und speist die Elektromotoren, die das Fahrzeug antreiben. Trotz höherer Energiekosten haben FCEVs gegenüber den batterieelektrischen BEVs auch Vorteile: etwa eine größere Reichweite und weit kürzere Tankstopps. Das macht die Brennstoffzellentechnologie zu einer interessanten CO₂-freien Antriebsalternative für große Reise-Pkw und Nutzfahrzeuge.

Derzeit glauben nicht zuletzt asiatische Hersteller wie Honda, Hyundai und Toyota an die Zukunft der Technologie und bieten FCEV-Pkws an. Von der bereits vorgestellten neuen Modellgeneration des Toyota Mirai beispielsweise sollen von 2021 an jährlich 30.000 Exemplare entstehen – eine Verzehnfachung der aktuellen Produktionskapazität. Auch der Zulieferer Robert Bosch stellt an seinem Standort Homburg/Saar Brennstoffzellenkomponenten her und will bis 2022 einen neuen „Bosch Stack“ auf den Markt bringen, der nicht zuletzt schwerere und Nutzfahrzeuge antreiben soll. Bei Bosch erwartet man, dass bis 2030 sogar 20 Prozent aller Elektrofahrzeuge weltweit ihren Antriebsstrom per Brennstoffzelle generieren.

2 Das Herz von BEV/ PHEV-Fahrzeugen: die Traktionsbatterie

2.1 Von Batteriezellen über Batteriemodule und -packs bis zur Traktionsbatterie

In klassischen Automobilen darf man wohl den Verbrennungsmotor als Herzstück des Fahrzeugs betrachten. In BEV/PHEV-Fahrzeugen kommt diese Rolle aber weniger dem Elektromotor zu als der Traktionsbatterie. Aktuell ist die Traktionsbatterie mit einem Anteil zwischen 25 und 30 Prozent an der Wertschöpfung des gesamten Fahrzeugs beteiligt – wengleich sich die Preise für die Batterien im Laufe der Jahre



Verschiedene Geometrien bei Batteriezellen (v. l. n. r.): prismatische Zellen, Rundzelle (zylindrische Zelle), weiche Pouch-Zellen.

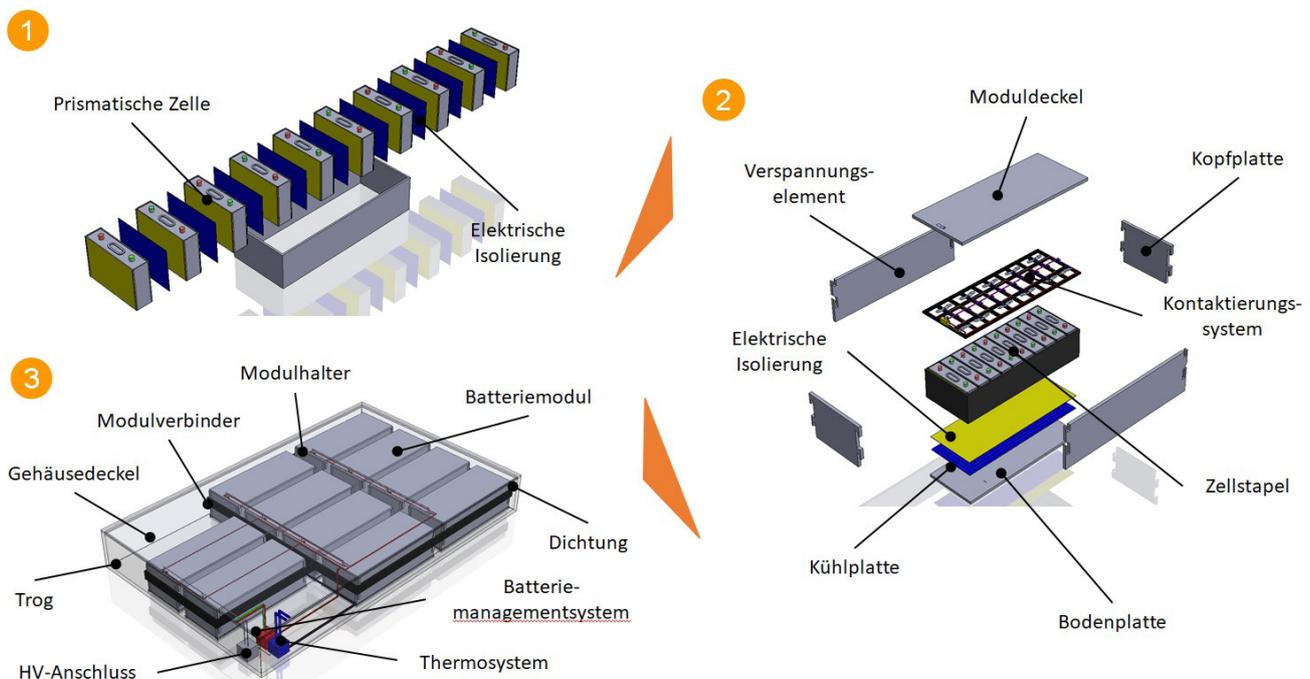
kontinuierlich reduziert haben und dies auch in Zukunft weiter tun dürften. Die kleinste Fertigungseinheit in der Traktionsbatterie ist die mit Elektrolyt gefüllte Batteriezelle, in der die Energie gespeichert wird. Für Batteriezellen gibt es derzeit drei unterschiedliche Bauformen. Die

zylindrischen Rundzellen (oft vom Typ 18650 oder 26650) sind uns allen aus unserem Alltag geläufig. Rundzellen sowie prismatische Zellen weisen beide ein stabiles Gehäuse auf, während die sogenannten Pouch-Zellen ein flexibles Gehäuse haben, das einem Beutel ähnelt. Die einzelnen Batteriezellen werden auf weiteren Stufen der Fertigungskette zunächst zu sogenannten Batteriemodulen und diese wiederum zu Batteriepacks zusammengeschlossen. Am Ende des Fertigungsablaufs werden dann alle Batteriepacks in einem Gehäuse zusammengefasst. Auf jeder Fertigungsstufe gilt es, sicherzustellen, dass der Elektrolyt der Batteriezellen keinesfalls austritt oder mit Wasser in Be-

rührung kommt – auch nicht mit Luftfeuchtigkeit. Dieser Forderung nach Gasdichtheit lässt sich nur durch moderne Prüfgasverfahren entsprechen.

2.2 Brandrisiko und Thermal Runaway

Verlässliche Dichtheitsprüfungen der Batteriezellen sind schon wegen der leichten Brennbarkeit des enthaltenen Elektrolyts notwendig: Aus tretender Elektrolyt birgt die Gefahr brennender Fahrzeuge und brandbedingter Totalschäden. Eindringende Luftfeuchtigkeit wiederum verursacht ein Kurzschlussrisiko und reduziert zu-



Wertschöpfungskette in der Batterieproduktion. (Quelle: RWTH Aachen, PEM)

dem die Lebensdauer der Batterie. Auch wegen der langen Transportwege aus Asien ist die aktuelle Situation der überseeischen Fertigung der Batteriezellen durchaus problematisch. Denn leider sind Beschädigungen von Batteriezellen auf ihrem Transport keine Seltenheit. Dies kann schon auf dem Transportweg selbst fatale Konsequenzen haben. So dürfen beispielsweise Lithium-Ionen-Batterien und -Zellen wegen ihrer Brandgefährlichkeit nicht mehr als Fracht in Passagierflugzeugen transportiert werden. Flugzeugabstürze aufgrund brennender Fracht haben diverse Flugaufsichtsbehörden zu die-

sen Schritten veranlasst. Zugleich setzt man – etwa bei FedEx – spezielle Cargo-Foam-Systeme ein, um gezielt Brände in Containern mit Batteriezellen an Bord von Frachtmaschinen löschen zu können. Auch völlig zerstörte Schiffscontainer hat es schon häufiger gegeben. Der sogenannte Thermal Runaway einer einzelnen Batteriezelle – beispielsweise ausgelöst durch einen lokalen Kurzschluss der internen Elektroden – kann dazu führen, dass sich schließlich der gesamte Schiffscontainer durch den brennenden Elektrolyt der Zellen auf bis zu 1.100 °C aufheizt und explodiert.



Eines der gravierendsten Risiken bei Lithium-Ionen-Batterien ist ihre Brennbarkeit.



Dichtheitsprüfung auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette.

2.3 Wareneingangstest für Batteriezellen

Vor diesem Hintergrund wundert es nicht, dass viele Experten und Wissenschaftler – beispielsweise das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen – die Ansicht vertreten, es sei von großer Bedeutung, einen effizienten Wareneingangstest zu konzipieren, damit deutsche Hersteller und Zulieferer fehlerhafte Zellen vor dem Zusammenbau erkennen können.

2.4 Dichtheit für Batteriemodule und -packs

Auch in den anschließenden Wertschöpfungsprozessen sind verschiedenste Dichtheitsprü-

fungen erforderlich. Batteriezellen werden zunächst zu Batteriemodulen zusammengebaut, aus denen dann Batteriepacks entstehen. Einige deutsche OEMs übernehmen diese Produktionsschritte derzeit schon selbst, andere beziehen ihre kompletten Batteriepacks von deutschen Tier-1-Suppliern.

Sowohl Batteriemodule als auch Batteriepacks sind normalerweise mit mehreren Kühlkanälen versehen, die entweder mit einem Wasser-Glykol-Gemisch oder mit Kältemittel aus der Klimaanlage des Fahrzeugs versorgt werden. Im Regelfall wird auch die Leistungselektronik, die den Batteriebetrieb im Fahrzeug steuert, auf eine der beiden Weisen gekühlt. Die Dichtheit dieser Systeme ist deswegen kritisch, weil die Kühlung der Batterien zum einen langfristig gewährleistet sein muss und zum anderen ein

Austreten des Kühlmediums zu Kurzschlüssen führen könnte.



Warum eine Zelle dicht sein muss: prismatische Zelle (links) und weiche Pouch-Zelle (rechts).

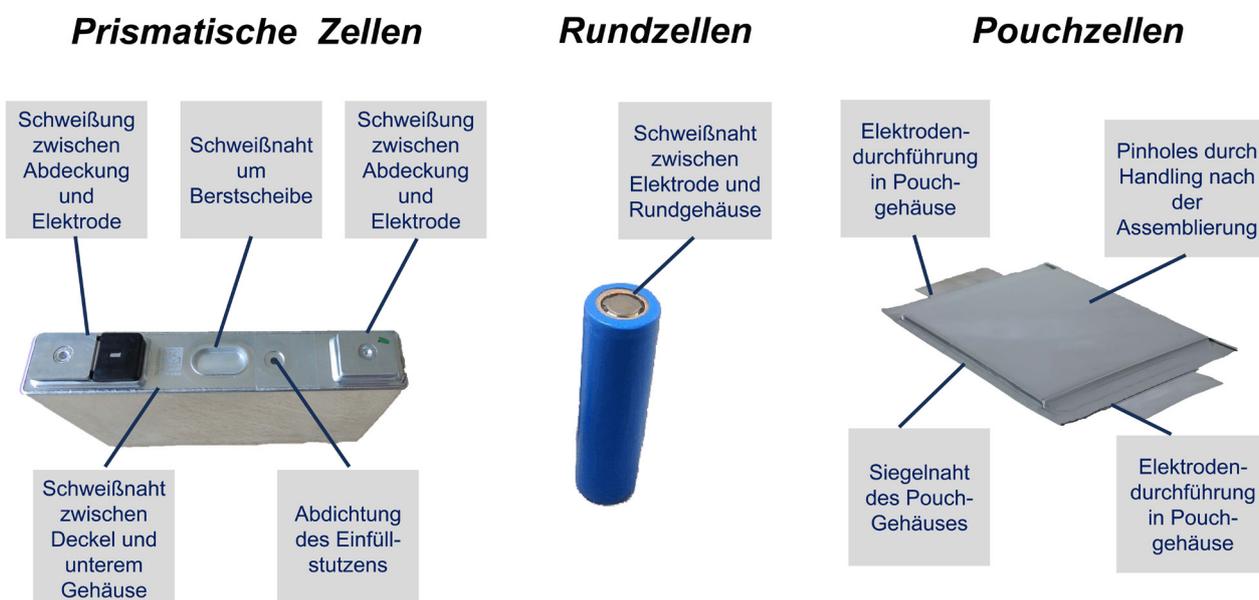
2.5 Batterielebensdauer sicherstellen

Noch entscheidender als die Frage nach dem etwaigen Kurzschluss- und Brandrisiko könnte sich im Alltag der BEV/PHEV-Fahrzeuge das Problem der verkürzten Lebensdauer der Traktionsbatterie erweisen. Denn wer zahlt für den Austausch einer Batterie, wenn sie wegen mangelhafter Verarbeitung viel von ihrer Kapazität eingebüßt hat? An wen wendet sich der Pendler, der selbst bei voller Batterieladung kaum noch 100 km Reichweite erzielt? Wer trägt das Risiko einer verkürzten Batterielebensdauer: der Kunde, sein Händler, der Fahrzeughersteller oder dessen Zulieferer? So oder so: Eine teure Traktionsbatterie mit unzulänglicher Lebensdauer würde Kunden schnell auf die Barrikaden treiben. Gelegentlich wird derzeit als Zielgröße für die Durchhaltefähigkeit der Traktionsbatterie eine verbleibende Speicherfähigkeit von

ungefähr 80 Prozent nach 10.000 Ladezyklen genannt. Es ist eindeutig: Der Siegeszug der Elektromobilität bringt neue Anforderungen an die Qualitätssicherung mit sich. Es gilt, auf jeder Fertigungsstufe sicherzustellen, dass der Elektrolyt der Batteriezellen keinesfalls austritt oder mit Wasser und Luftfeuchtigkeit in Berührung kommt. Die Batterie muss also gasdicht sein. Nur mit modernen, empfindlichen Prüfverfahren sind Automobilhersteller und -zulieferer in der Lage, dieser Forderung nach Gasdichtheit zu entsprechen.

3 Prüfverfahren für Batteriezellen

Wenn Elektrolyt mit Wasser reagiert, entsteht dabei Flusssäure, die die Batteriezelle zerstört. Am Ende der Lebensdauer einer Zelle – viele Hersteller rechnen mit 10 Jahren – muss die Wasserkonzentration im Elektrolyt darum so gering wie möglich sein. Auch den Elektrolytverlust gilt es über die Lebensdauer hinweg minimal zu halten. Dies ist schon deswegen erforderlich, weil im Elektrolyt gesundheitsschädliche Schwermetalle gelöst sind. Die genaue Höhe der tolerierbaren Leckrate hängt von mehreren Faktoren ab, unter anderem von den Druckverhältnissen in der Batteriezelle, der erforderlichen Lebensdauer der Zelle und von ihrem Volumen. In den weichen Pouch-Zellen etwa



Neuralgische Stellen der verschiedenen Zelltypen.

herrscht nach deren Formierung ein Unterdruck von 50 bis 500 mbar absolut, damit der Elektrolyt Anode und Kathode gut benetzt und um eine mechanische Stabilität der Zelle zu ermöglichen. Prismatische, Knopf- und Rund-Zellen mit festem Gehäuse werden üblicherweise bei atmosphärischen Druck abgefüllt, so dass es keine Druckdifferenz gibt. Entsprechend sind hier die Leckraten, die noch tolerabel sind, größer. Allgemein bewegen sich die Grenzleckraten, gegen die zu testen ist, in einer Größenordnung von 10^{-6} mbar-l/s. Aus diesem Grund bieten sich für die Dichtheitsprüfung in der Batteriezellenfertigung prüfgasbasierte Methoden an.

3.1 Versagensmodelle der verschiedenen Zelltypen

Jede der drei Bauformen – prismatische, Rund- und Pouch-Zelle – hat ihre eigenen neuralgischen Stellen. Prismatische Zellen etwa werden bei atmosphärischem Druck oder leichtem Unterdruck (-20 mbar) versiegelt. Bei der Formatierung entstehen oftmals gasförmige Reaktionsprodukte, sodass nach dem Formatierungsprozess in der Zelle ein leichter Überdruck vorliegen kann. Durch ein etwaiges Leck kann zum einen Luft und Luftfeuchtigkeit in die Zelle eindringen und schließlich auch Elektrolyt aus-

treten. Das Versagensmodell der prismatischen Zellen identifiziert mehrere mögliche Leckstellen. Dazu gehören die Schweißnähte zwischen der Deckplatte und den beiden Elektrodenkontakten sowie der dort eingeschweißten Berstscheibe; die Schweißnaht zwischen der Deckplatte und dem unteren Gehäuseeteil; sowie die Abdichtung der Öffnung zur Elektrolyt-Befüllung. Bei Rundzellen befinden sich die leckgefährdeten Stellen jeweils an den gecrimpten Verbindungen zwischen dem zylindrischen Gehäuse und den Elektroden, die an den Enden des Zylinders angebracht sind. Die weichen, beutelartigen Pouch-Zellen schließlich sind durch Leckstellen an der Versiegelung des Beutels gefährdet, durch Lecks an den zwei Durchführungen für die Elektroden – die in diesem Kontext meist Stromabnehmer genannt werden – und durch nadelförmige Löcher, die durch Handlingprozesse nach dem Verschließen verursacht werden könnten.

3.2 Leckratenanforderung nach Zelltyp

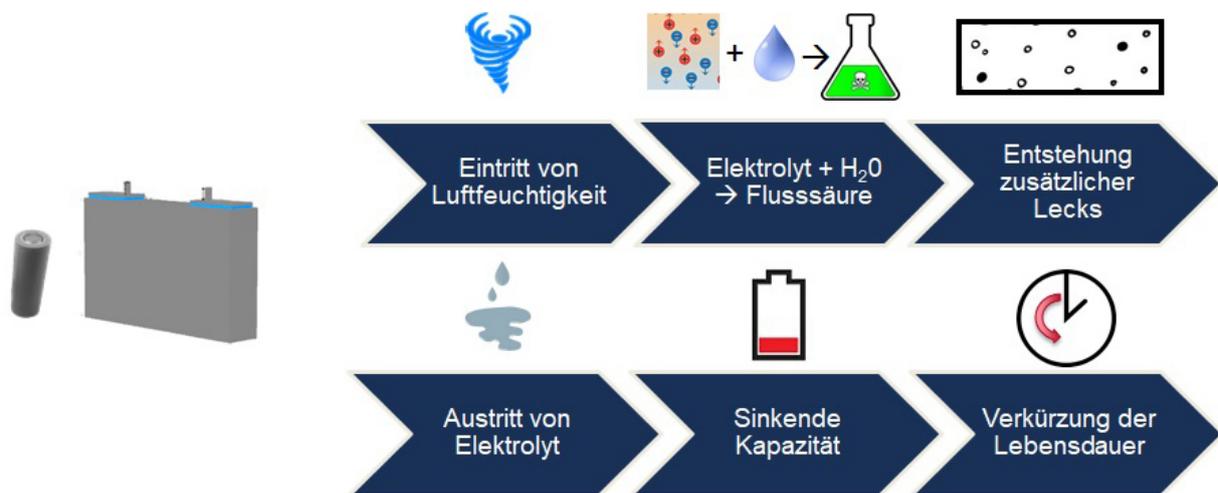
Welche Anforderungen stellen nun die verschiedenen Bauformen der Batteriezellen an die Grenzleckrate, gegen die bei einer Dichtheitsprüfung getestet werden sollte? Für prismatische und Rundzellen gilt, dass auch nach der Füllung mit Elektrolyt unter atmosphärischem Druck ein

kleiner Rest Luft in der Zelle verbleibt. Wenn also Luft mit einem gewissen Anteil an Feuchtigkeit in die Zelle eindringt, gibt es unter Umständen eine große Kontaktfläche zum Elektrolyt, über die das Wasser in Lösung gehen kann. Der Austausch mit der Umgebungsluft geschieht – aufgrund der nahezu nicht vorhandenen Druckdifferenz – allerdings nur durch Diffusion und damit sehr langsam.

Bei Pouchzellen wird durch den Unterdruck in ihrem Innern im Falle eines Lecks zwar Luft eingesogen, aber die Fläche des Elektrolyts, die mit Wasser in Kontakt kommt, bleibt klein und befindet sich bei Feinlecks ausschließlich im Leckkanal.

3.2.1 Geforderte Leckrate für Hardcase-Zellen (prismatische, Knopf- und Rundzellen)

Wenn nach zehn Jahren die Konzentration des unerwünschten, im Elektrolyt gelösten Wassers möglichst klein sein soll, ergeben sich (je nach maximal tolerierbarem Feuchtigkeitsanteil und Zellgeometrie) zulässige Leckgrößen im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-8} mbar·l/s. Bei einer Prüfung im Vakuum wird künstlich eine Druckdifferenz von etwa 1 bar erzeugt und so bei gleicher Lochgröße eine größere Leckrate generiert. Daher wird bei der Vakuummethode meist auf Leckraten im Bereich von 10^{-6} mbar·l/s geprüft.



Zwei Versagensmodelle bei festen Zellen, ob prismatic oder rund.

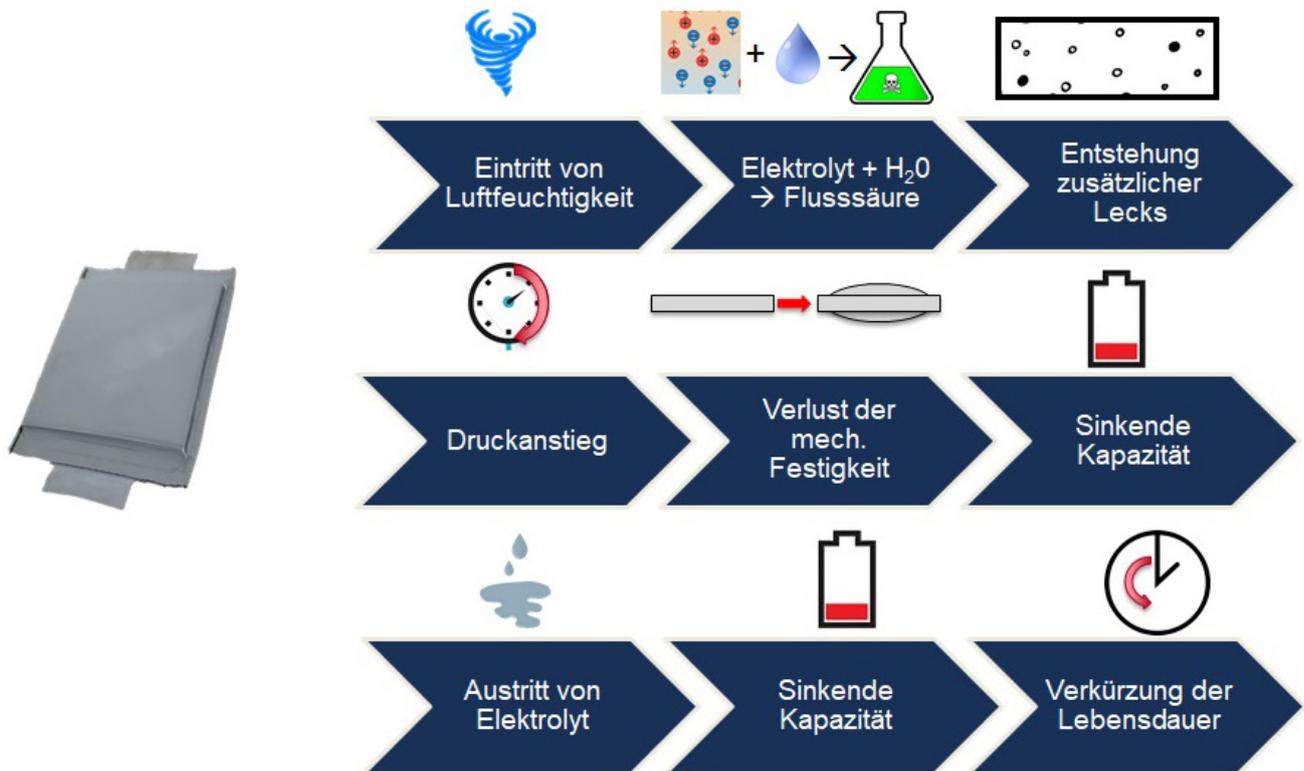
3.2.2 Geforderte Leckrate für Pouchzellen

Es ist sinnvoll, bei Pouchzellen zwischen zwei Versagensmodellen zu unterscheiden. Kommt es zu einem großen, einem sogenannten Grobleck, wird die eindringende Luft den erforderlichen Unterdruck in der Zelle beeinträchtigen. Es gehört zu den Dichtheitsanforderungen an Pouchzellen, dass der Unterdruck auch nach zehn Jahren noch besteht, der Innendruck also kleiner als 1.000 mbar ist. Daraus resultiert eine außergewöhnlich strenge Anforderung an die Grenzleckrate: Sie darf nur 10^{-9} mbar·l/s be-

tragen. Aus dem zweiten Versagensmodell für Pouchzellen ergeben sich weniger strenge Anforderungen. Bei einem nadelförmigen Leck kommt das Wasser aus der Luft nur auf einer recht kleinen Oberfläche mit dem Elektrolyt in Berührung, entsprechend langsam steigt dadurch die unerwünschte Wasserkonzentration im Elektrolyt. Damit die Wasserkonzentration nach 10 Jahren Lebensdauer kleiner 80 ppm ist, muss ein nadelförmiges Kapillarleck einen Durchmesser von weniger als 1 μm haben. Dies entspricht einer Grenzleckrate im Bereich von 10^{-8} mbar·l/s.

Vertiefendes SAE-Papier

„Methods for Leak Testing Lithium-Ion Batteries to Assure Quality with Proposed Rejection Limit Standards“ heißt ein SAE-Papier von Dr. Daniel Wetzig, Research Manager bei INFICON. Es untersucht die Leckszenarien für die verschiedenen Typen von Lithium-Ionen-Zellen und diskutiert – basierend auf der Erfahrung von INFICON –, welche Grenzleckraten für deren Prüfung sinnvoll sind: www.sae.org/publications/technical-papers/content/2020-01-0448/



Drei Versagensmodelle bei weichen Pouchzellen.

Diese beiden theoretischen Grenzleckraten für Pouchzellen kommen in der Praxis allerdings nicht zum Tragen, da Kapillaren ab einem Grenzdurchmesser von wenigen μm (je nach Innendruck und Werkstoffkombination) mit Elektrolyt „verblocken“. Das heißt, sie füllen sich vollständig mit Elektrolyt, welches aber aufgrund der Oberflächenspannung und des Benetzungsverhaltens nicht am Ende der Kapillare austritt. Für die Praxis bedeutet dies, dass aus Lecks, die kleiner als dieser Grenzdurchmesser sind, weder Elektrolyt austreten kann, noch Luft und damit auch keine Luftfeuchtigkeit eintritt. An

der sehr kleinen Kontaktfläche – eine Kreisfläche mit wenigen μm Durchmesser – zwischen feuchter Luft und dem Elektrolyt am Ende eines Leckkanals können durch Diffusion zwar sehr geringe Mengen Wasser eintreten, aber die Größenordnung ist so gering, dass man sie vernachlässigen kann.

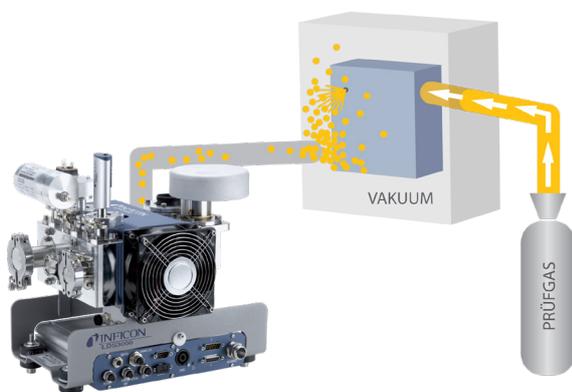
3.3 Vortests der Zellengehäuse

Viele Hersteller von Batteriezellen führen bereits an den Gehäusen der Zellen Dichtheitsprüfungen durch. Die festen Gehäuse von prisma-

Fehlerfall	Max. zulässige Lochgröße	Entsprechende Helium-Leckrate
Aufnahme von Feuchtigkeit < 80 ppm	(1µm)	~ 10 ⁻⁸ mbar·l/s
Keine signifikante Zunahme des Drucks über 10 Jahre	(<< 1µm)	< 10 ⁻⁹ mbar·l/s
Verblockung des Leckkanals → Kein Eindringen von Luftfeuchtigkeit, kein Austreten von Elektrolyt	(2 ... 5 µm)	~ 10 ⁻⁶ mbar·l/s

Herleitung der zu prüfenden Grenzleckraten.

tischen und Rundzellen werden dazu evakuiert, um dann wieder mit 100 Prozent Helium befüllt und versiegelt zu werden. Nun platziert man die Zelle in der Vakuumprüfkammer, evakuiert die Kammer und misst dann, wie viel Helium aus der Batteriezelle in einem gegebenen Zeitraum austritt. Anschließend an diese Ermittlung der Leckrate lässt sich das Helium aus der Zelle zurückgewinnen. Für diesen Gehäusetest arbeitet man meist mit einer Grenzleckrate von 10⁻⁶ mbar·l/s. Um den Helium-Bedarf zu reduzieren, ist es auch möglich, die Heliumkonzentration zu senken – vorausgesetzt man mischt das Prüfgas entweder mit trockener Luft oder mit Stickstoff.



Schema der Heliumprüfung in einer Vakuumkammer.



Vortest von unbefüllten, prismatischen Zellen.

Leckkanaldurchmesser (Lochgröße)	Helium-Leckrate in Vakuumprüfung
10 µm	3·10 ⁻⁴ mbar·l/s
5 µm	2·10 ⁻⁵ mbar·l/s
2 µm	5·10 ⁻⁷ mbar·l/s

Zusammenhang zwischen Leckkanaldurchmesser und Heliumleckrate für prismatische und Rundzellen bei Prüfung im Vakuum, bei einer angenommenen Wandstärke der Zelle von 2 mm.

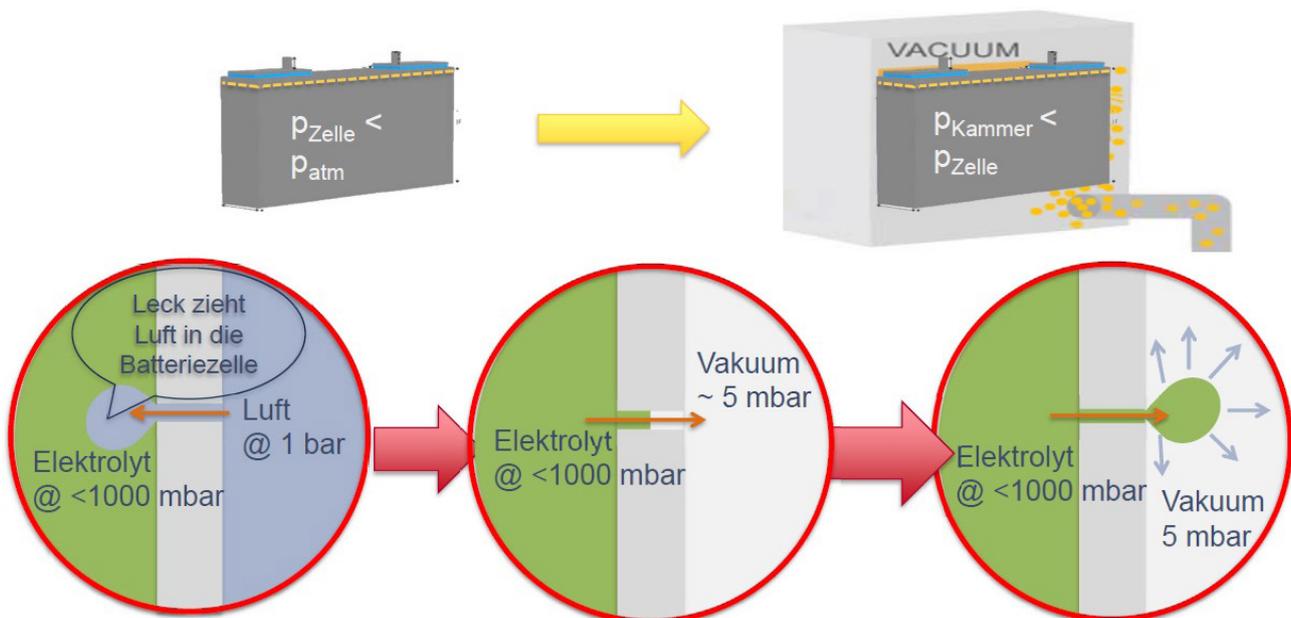
3.4 Dichtheitsprüfung an fertig befüllten Batteriezellen

Auch wenn eine Zelle mit starrem Gehäuse vorgeprüft wurde, ist es immer noch möglich, dass etwa der Befüllstutzen undicht ist. Bei weichen Pouchzellen ist eine Vorprüfung ohnehin kaum möglich. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die fertig befüllten Batteriezellen auf Dichtheit zu prüfen. Diese Prüfung ist allerdings keine triviale Aufgabe. Bisher gab es dafür nur Verfahren, die entweder nicht empfindlich genug, zu unzuverlässig oder sogar beides waren. So ist die Druckprüfung, deren kleinste nachweisbare Leckrate im allerbesten Fall 10^{-4} mbar·l/s beträgt, viel zu unempfindlich für den erforderlichen Test gegen die hundertfach kleinere Leckrate von 10^{-6} mbar·l/s. Zudem birgt die Druck-

prüfung immer die Gefahr, dass bereits kleinste Temperaturschwankungen die Ergebnisse verfälschen, gerade bei größeren Prüfteilvolumina. Und das sogenannte Helium-Bombing weist zwar eine ausreichende Empfindlichkeit auf, nur hängt die erfolgreiche Prüfung beim Bombing entscheidend von der Lage der Batteriezelle und der genauen Position der Leckstelle ab. Durch ein eigens entwickeltes Nachweisverfahren hat INFICON jetzt erstmals Abhilfe geschaffen: Diese völlig neue Methode benutzt das Elektrolyt-Lösungsmittel in der fertig befüllten Zelle als Prüfgas.

3.4.1 Direkter Lecknachweis durch Elektrolyt-Lösungsmittel

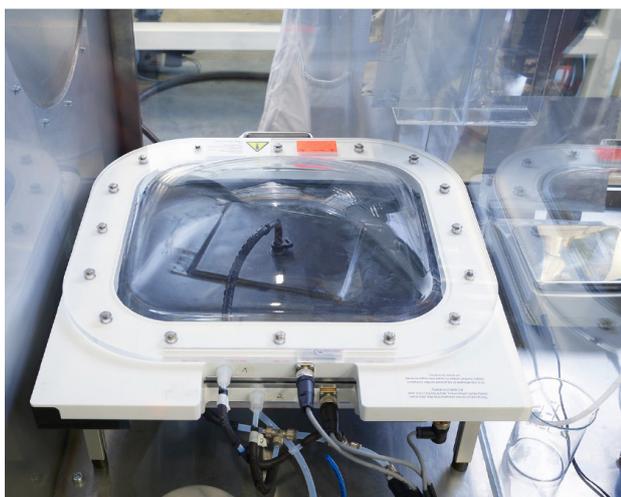
Um alle drei Bauarten von Zellen auch nach



Direkter Nachweis von austretendem, gasförmigen Elektrolyt im Vakuum.

ihrem endgültigen Befüllen zuverlässig auf Dichtheit testen zu können, hat INFICON ein Verfahren entwickelt, das etwaige Lecks in Lithium-Ionen-Batteriezellen direkt nachweist. Bei dieser neuen Methode dient austretendes Elektrolyt-Lösungsmittel als Prüfgas. Auf diesem Weg kann das INFICON ELT3000-Prüfgerät in Lithium-Ionen-Zellen Lecks bis zu einer Helium-Äquivalenzleckrate von $1 \cdot 10^{-6}$ mbar·l/s identifizieren – was einem Leckdurchmesser von wenigen Mikrometern entspricht. Für Batteriezelltypen mit festem Gehäuse eignet sich eine starre Vakuumkammer.

Für die fragilen Pouchzellen hat INFICON eine flexible Folienvakuumkammer entwickelt und patentiert, die sich bei der Prüfung eng an die Pouchzellen anschmiegt. Als Trägerschicht schützt die Folie die Zellen vor etwaigen Beschädigungen im Vakuum.



Flexible Folienvakuumkammer verhindert Beschädigungen bei empfindlichen Pouchzellen.

Ist das Vakuum erzeugt, tritt aus potenziellen Lecks Elektrolyt-Lösungsmittel in die Kammer aus. Weil dort ein Luftdruck von nur wenigen mbar absolut herrscht, verdampft das Lösungsmittel in der Vakuumkammer sofort, sodass es sich als Gas durch das Massenspektrometer des ELT3000 detektieren lässt. Der ELT3000 weist alle gängigen Elektrolyt-Lösungsmittel wie zum Beispiel DMC, DEC, EMC und PP direkt nach. Das Gerät ist so konzipiert, dass es sich für den Einsatz an manuellen Arbeitsplätzen in der Entwicklungsabteilung genauso eignet wie für die gleichzeitige Prüfung mehrerer Zellen in automatisierten Fertigungslinien. Die reine Messzeit beträgt dabei circa 10 Sekunden, die Abpumpzeit ist von der verwendeten Kammer- und Pumpengröße abhängig.



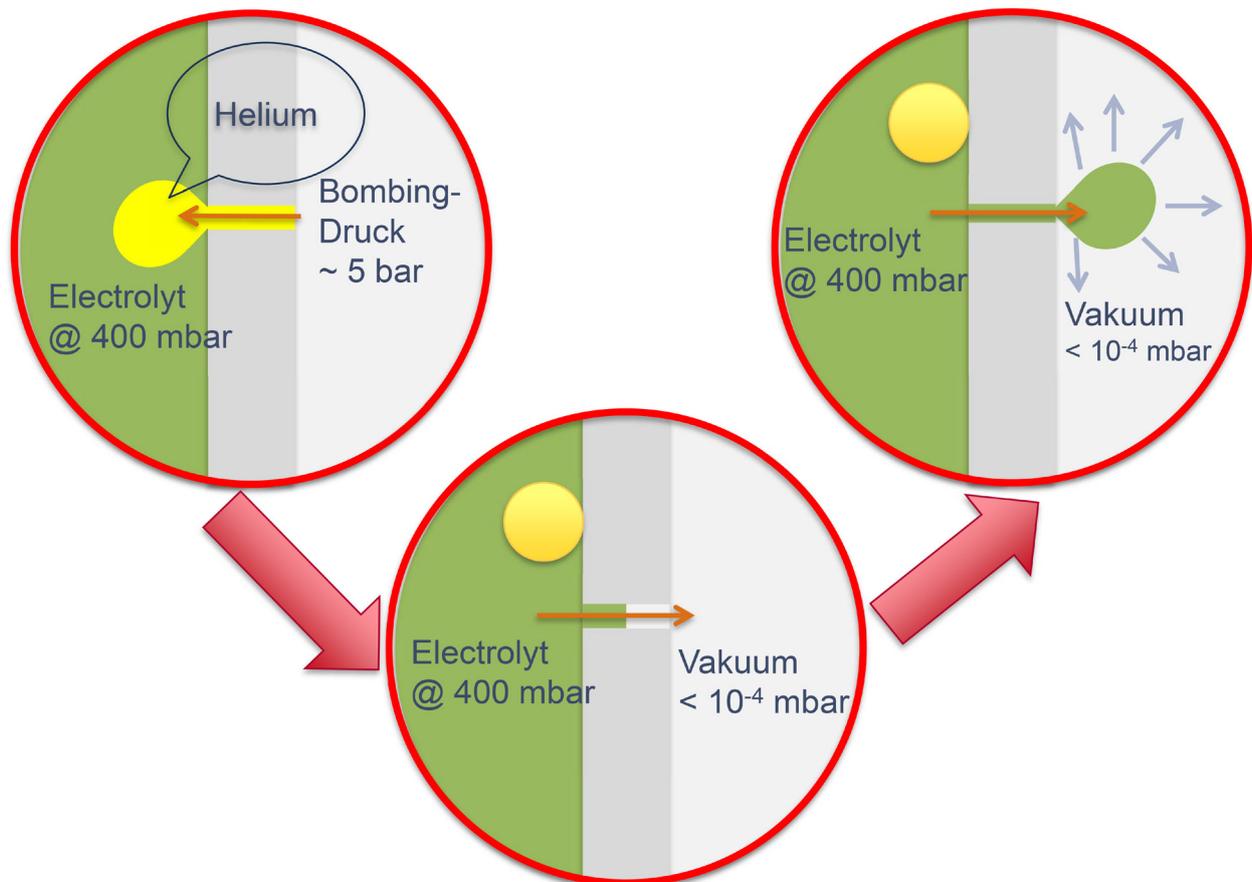
Manuelles Beschicken vor der Vakuumprüfung.

3.4.2 Direkter Nachweis ist Druckverfahren und Helium-Bombing überlegen

Mit seiner Massenspektrometer-Technologie ist das neue Batteriezellen-Prüfgerät von INFICON in der Lage, 1.000-fach kleinere Lecks zu detektieren als herkömmliche Druckmessverfahren – unabdingbar für die angestrebte 10-jährige Lebensdauer der Zelle.

In diesem speziellen Anwendungsszenario der Batteriezellenprüfung ist der ELT3000 auch weit

zuverlässiger als ein Verfahren wie das Helium-Bombing. Beim Bombing wird die Batteriezelle zunächst in eine Vakuumkammer gebracht, um dann einer Helium-Atmosphäre unter Überdruck ausgesetzt zu werden. So soll das Prüfgas Helium durch etwaige Lecks in die Zelle eindringen. Nachgewiesen wird es dann in einem letzten Schritt, wenn es durch das Leck wieder austritt. Für den Erfolg der Bombing-Methode sind allerdings die genaue Leckstelle und die Lage der Batteriezelle entscheidend: Befindet sich das Leck beispielsweise an der Unterseite der



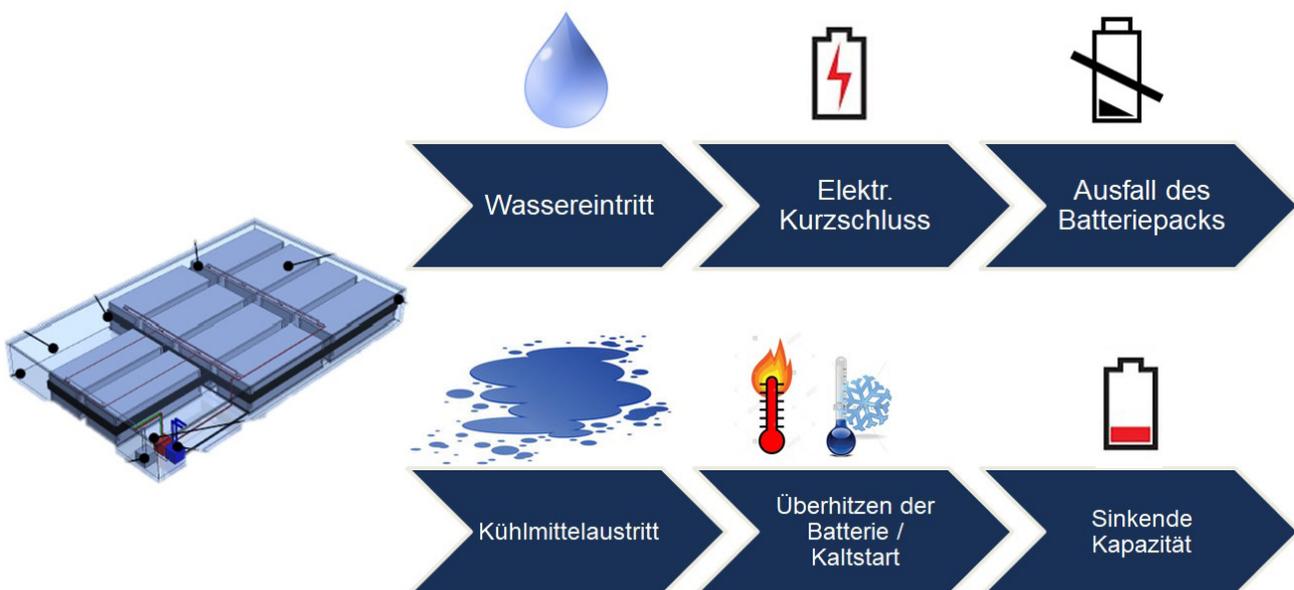
Warum das Helium-Bombing für die Dichtheitsprüfung an Batteriezellen nicht geeignet ist.

Zelle, kann die abschließende Vakuumprüfung das Prüfgas nicht sicher nachweisen, weil das leichte Helium in der Batteriezelle nach oben steigt und mitunter gar nicht aus dem Leck am Boden austritt. Diese Probleme kennt die neue direkte Prüfmethode nicht: Bei der Prüfung von fertig befüllten Lithium-Ionen-Batteriezellen vereint sie Genauigkeit und Zuverlässigkeit – ob es sich dabei um prismatische, Rund- oder Pouchzellen handelt.

4 Anforderungen an die Gehäuse von Batteriepacks

Dichtheitsanforderungen an die Gehäuse von Batteriepacks ergeben sich im Wesentlichen da-

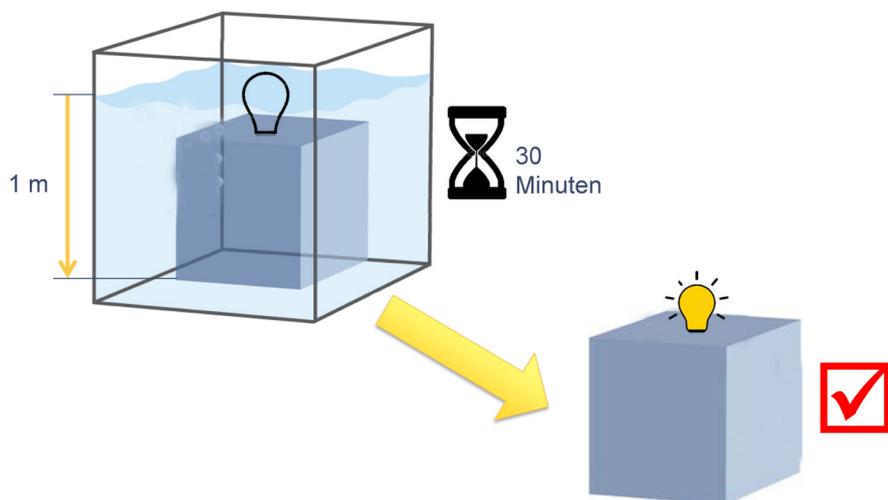
raus, dass sie die enthaltenen Module und Zellen vor Wasser schützen müssen. Je nach Einbauort im Fahrzeug ist es erforderlich, dass ein Gehäuse die Bedingungen für Schutzklassen wie IP67 oder IP69K erfüllt. Letzteres wird relevant, wenn das Gehäuse potenziell dem Strahl eines Hochdruckreinigers ausgesetzt ist. Ist unter der Traktionsbatterie des Fahrzeugs aber eine weitere Bodenplatte angebracht, reicht es aus, wenn das Gehäuse des Batteriepacks der Schutzklasse IP67 genügt. Die konkrete Grenzleckrate, gegen die geprüft werden sollte, hängt wiederum vom Material ab, aus dem das Gehäuse gefertigt ist. Stahl und Kunststoffe sind vergleichsweise unkritisch, während Aluminium besonders hohe Anforderungen stellt.



Zwei Versagensmechanismen bei Batteriepacks.

Exkurs 1: IP67 – Das Gehäusematerial bestimmt die Grenzleckrate

Gehäuse für stromführende Komponenten werden oft gemäß der Schutzklasse IP67 ausgelegt – ob es sich dabei um Gehäuse für Lithium-Ionen-Akkus, Power Control Units, Elektromotoren oder Elektronikmodule handelt. Die Prüfung gemäß IP67 verlangt, dass nach einem Tauchbad von 30 Minuten in 1 Meter Tiefe das Bauteil seine völlige Funktionsfähigkeit bewahrt haben muss. In manchen Fällen bedeutet dies, dass keinerlei Wasser in das Bauteil eingedrungen sein darf. Betrachtet man die Anforderungen der IP67 eingehender, werden zwei Dinge deutlich. Erstens: Die dafür erforderlichen Grenzleckraten sind üblicherweise nur mit modernen Prüfgasmethoden zu testen. Zweitens: Das Gehäusematerial selbst hat einen deutlichen Einfluss auf die Dichtheitsanforderungen, weil sich Wassertropfen von manchen Materialien leichter ablösen – und so durch einen Leckkanal ins Gehäuse eindringen – als von anderen.

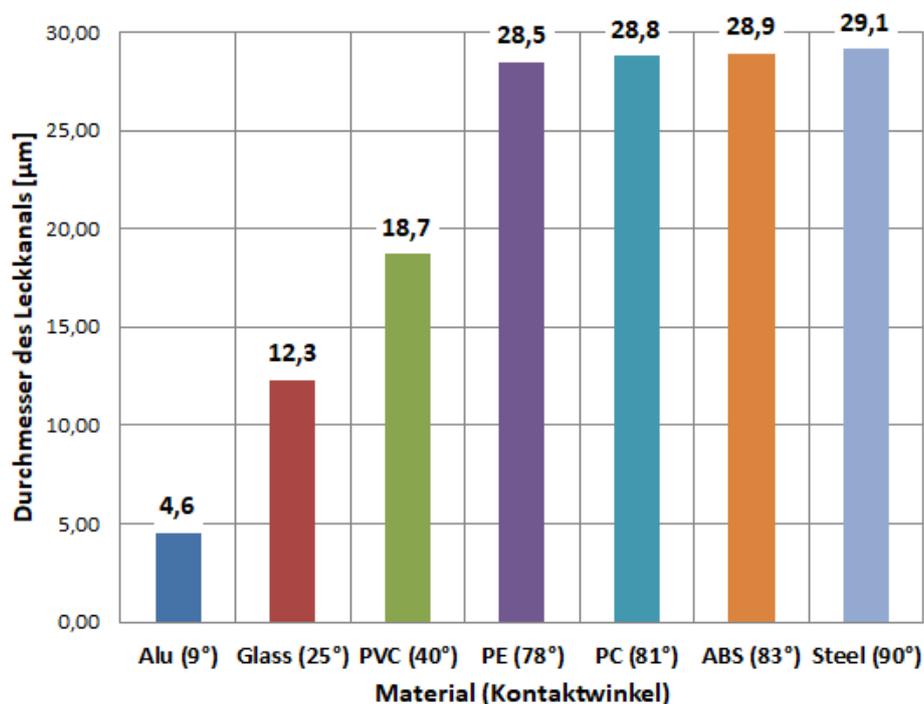


Definition IP67.

Das Gehäusematerial bestimmt die Grenzleckrate

Versuche mit Glaskapillaren von definierter Länge und definiertem Durchmesser verdeutlichen, wann ein Wassertropfen bei dem von der IP67 geforderten Differenzdruck von 0,1 bar durch einen Leckkanal dringt. Hat ein Glasleckkanal eine Länge von 10 mm und einen Durchmesser von 20 µm, entspricht diese Leckgröße einer Helium-Grenzleckrate von $2 \cdot 10^{-4}$ mbar-l/s. Verwendet man im Versuch solch eine Glaskapillare bei diesen Druckbedingungen, zeigt sich zwar bald ein erster Wassertropfen, er löst sich aber erst nach einem Zeitraum von mehr als 30 Minuten ab. In der Theorie gilt, dass der Wasserdruck von 0,1 bar dann mit den Kräften im Gleichgewicht ist, die das Wasser an der Oberfläche des Leckkanals von 10 mm Länge haften lassen, wenn die Glaskapillare einen Durchmesser von 12 µm aufweist. Versuche haben gezeigt, dass sich innerhalb von 30 min schon bei einem Durchmesser von 15 µm keinerlei Tropfen mehr bilden.

Leckkanal-Begrenzungsdurchmesser verschiedener Materialien für Wasser @1,1 --> 1 bar



Grenzdurchmesser für Wassereintritt bei Prüfung nach IP67 (100 mbar Überdruck) für verschiedene Materialien.

Allgemein gilt, dass sich Wassertropfen von Glas vergleichsweise schlecht ablösen, weil das Wasser an dessen Oberfläche gut haftet. An anderen Materialien wie etwa Stahl oder ABS haften Wassertropfen sogar noch etwas besser als an Glas. Bevor hier ein Leck dazu führt, dass Wasser unter einem Differenzdruck von 0,1 bar in ein Gehäuse eindringt, muss der Leckkanal-Durchmesser noch ein wenig größer sein. Sollen Gehäuse aus Stahl oder ABS gemäß IP67 wasserdicht sein, empfiehlt sich also eine Prüfung gegen eine Grenzleckrate von ungefähr $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s. Gehäuse aus Aluminium dagegen haben höhere Dichtheitsanforderungen. Hier haften Wassertropfen nur bei einem sehr kleinen Leckdurchmesser noch am Material. Entsprechend ist ein Aluminiumgehäuse für völlige Wasserdichtheit im halbstündigen IP67-Szenario gegen eine hundertfach kleinere Grenzleckrate zu prüfen, im Bereich 10^{-5} mbar·l/s.

Einige Wassertropfen oder gar keine?

Die Schutzklasse IP67 verlangt nach dem definierten Tauchprozess eine unveränderte, vollständige Funktionsfähigkeit. Was sie nicht ausdrücklich verlangt, ist, dass bei einem 30-minütigen Tauchbad mit 0,1 bar Druckdifferenz keinerlei Wasser in das Bauteil eindringt. Wenn ein Hersteller entscheidet, doch das Eindringen einiger Tropfen Wasser tolerieren zu können, weil es die Funktionstüchtigkeit der Komponente nicht beeinträchtigt, kann er für die Prüfung entsprechend andere, weniger kleine Leckraten wählen. Hat ein Bauteil zum Beispiel ein ABS- oder Stahlgehäuse mit Polymerdichtung, stellt schon eine Prüfung gegen eine Grenzleckrate von $5 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s (ungefähr 0,3 sccm) sicher, dass nur vereinzelte Tropfen eindringen. Für völlige Wasserdichtheit wäre allerdings gegen $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s (ungefähr 0,06 sccm) zu prüfen.



Glas-Kapillare Ø x L	220 x 33	150 x 43	75 x 27	40 x 22	15 x 30	[µm x mm]
Luft-Leckrate	56	9	1	0,1	0,001	[sccm]
Luft-Leckrate	$1,01 \cdot 10^0$	$1,69 \cdot 10^{-1}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$6,91 \cdot 10^{-5}$	[mbar·l/s]
Helium-Leckrate	$9,51 \cdot 10^{-1}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$6,42 \cdot 10^{-5}$	[mbar·l/s]
Tropfen-Interval	~ 1	~ 1,5 – 2	~ 60	~ 120 – 180	—	[s]

Zusammenhang Gasleckrate und Wasserleckrate.

Prüfgas schlägt Druckabfallprüfung

Leckraten in der Größenordnung von 10^{-3} mbar·l/s (0,06 sccm) stellen in der Praxis die Grenze dessen dar, was sich mit einer herkömmlichen Druckabfallprüfung unter idealen Bedingungen gerade noch feststellen lässt. Für ihre Dichtheitsprüfung in der Fertigung greifen viele Hersteller darum nur bis zu Grenzleckraten von 10^{-2} mbar·l/s (bzw. bis 1 sccm) und bei der Prüfung auf Groblecks zur tendenziell unzuverlässigeren Druckabfallprüfung. Denn gerade bei großen Bauteilvolumina wird die Messung der Druckveränderung schon durch kleinste Temperaturschwankungen während des Prüfprozesses stark beeinträchtigt. Dies lässt sich bei der Druckabfallprüfung nicht vollständig kompensieren – sie führt dann sehr leicht zu falsch positiven oder falsch negativen Ergebnissen. Darum bieten sich für alle Grenzleckraten im Bereich 10^{-3} mbar·l/s oder kleiner eher die zuverlässigeren prüfgasbasierten Methoden an, denn sie sind frei von Temperatureinflüssen. Die Wahl der konkreten Prüfmethode hängt auch davon ab, welche Druckdifferenz ein Bauteil verträgt. Viele Teile, die dazu ausgelegt sind, die Schutzklasse IP67 einzuhalten, widerstehen nur recht kleinen Druckdifferenzen von 0,1 oder 0,2 bar. Ansonsten würden das Bauteil oder seine Dichtungen beschädigt.

4.1 Gehäuse-Vorprüfung in Vakuum- oder Akkumulationskammer

Ein noch nicht bestücktes Gussgehäuse aus Aluminium hält dagegen auch hohen Druckdifferenzen stand. Für eine Vorprüfung der Dichtigkeit eines solchen Aluminiumgehäuses bietet sich darum eine Helium-Dichtheitsprüfung in der Vakuumkammer an. Neben ihrer Empfindlichkeit ist der große Vorzug der Vakuummethode ihre hohe Geschwindigkeit: Ein modulares Dichtheitsprüfgerät wie der LDS3000 gestattet besonders kurze Taktzeiten in der Fertigungsline. Das Prüfteil wird bei der Vakuummethode zuerst evakuiert und dann unter einem Druck von 1 bar oder mehr mit dem Prüfgas Helium befüllt. Um das Prüfteil herum erzeugt man in der Vakuumkammer dann ein Vakuum. So lässt sich austretendes Helium sofort nachweisen. Alternativ arbeitet man sogar mit einem Druck von bis zu 6 bar, reduziert dann aber die Helium-Konzentration auf 15 Prozent. In jedem Fall ist bei der Vakuummethode die Druckdifferenz so groß, dass sich die Grenzleckrate, gegen die geprüft werden muss, vergrößert – ungefähr um den Faktor 10. Für die völlige Wasserdichtheit eines Aluminiumgehäuses prüft man in der Vakuumkammer also nicht gegen eine Grenzleckrate im Bereich von 10^{-5} mbar·l/s, sondern von 10^{-4} mbar·l/s. Der grundsätzliche

Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Materials im Hinblick auf das Haftvermögen gegenüber Wasser und der entsprechend zu prüfenden Grenzleckrate bleibt aber auch bei der Vakuumprüfung unverändert wirksam: Stahl und Kunststoffe sind am unkritischsten und Aluminium besonders anspruchsvoll.

Auch der Prüfablauf unterscheidet sich je nach Material. Bei Gehäusen, die aus vergleichsweise leicht verformbarem Kunststoff gefertigt werden, ist es nicht möglich, sie zu Beginn der Prüfung vollständig zu evakuieren. Wenn das Gehäuse überhaupt evakuiert wird, dann nur bis zum maximal tolerierbaren Unterdruck. Anschließend werden die – moderat evakuierten – Gehäuse bis zum maximal tolerierbaren Überdruck mit Prüfgas befüllt. Bei der Messung des austretenden Prüfgases ist zu beachten, dass die Prüfgaskonzentration geringer ist als bei einem vollständig evakuierten Gehäuse, da sich das Helium mit der im Bauteil vorhandenen Restluft mischt. Entsprechend ist die tatsächlich gemessene Leckrate kleiner und immer mit dem erforderlichen Korrekturfaktor zu versehen.

Die schnellste und genaueste Möglichkeit, eine Komponente in der Fertigungsline auf ihre Dichtigkeit zu prüfen, stellt die Heliumprüfung in einer Vakuumkammer dar. Eine weitere Option für eine integrale Dichtheitsprüfung von bestückten wie unbestückten Gehäusen ist die Akkumulationsprüfung, die allerdings et-

was längere Taktzeiten benötigt. Dabei ermittelt man in einer simplen Akkumulationskammer, ob Prüfgas aus dem Innern des Prüfteils austritt. Ventilatoren sorgen dafür, dass sich austretendes Prüfgas in der Kammer verteilt und sich darin akkumuliert, um dann vom stationären Sensor detektiert zu werden. In solchen Prüf-anlagen kommt der LDS3000 AQ von INFICON zum Einsatz. Er verwendet als Prüfgase wahlweise Helium oder das kostengünstige Formiergas, ein unbrennbares Gemisch aus 5 Prozent Wasserstoff und 95 Prozent Stickstoff. Trotz der niedrigen Nachweisgrenze von 10^{-5} mbar·l/s – bei entsprechend geringem Totvolumen der Kammer – sind die Kosten der Akkumulationsprüfung mit dem LDS3000 AQ ähnlich niedrig wie bei einer simplen Luftprüfung.

Entsprechend bietet sich die Akkumulationsprüfung bei Gehäusen aus Kunststoff oder Stahl an. Für die anspruchsvolleren Aluminiumgehäuse, die gegen eine Grenzleckrate von 10^{-5} mbar·l/s zu prüfen sind, ist nach wie vor eine Vakuumprüfung erforderlich.



Akkumulationsprüfung mit LDS3000AQ Dichtheitsprüfgerät

4.2 Die automatisierte Roboter-Schnüffellecksuche

Möchte ein Hersteller beispielsweise die Integrität der Dichtungen an einem bereits zusammengebauten Battery Pack testen, verbietet sich eine Vakuumprüfung, denn ein zu hoher Differenzdruck könnte die Dichtungen beschädigen und Unterdruck die verbauten Kondensatoren zerstören. Für die Prüfung an fertigen Battery Packs und bereits bestückten Gehäusen empfiehlt sich stattdessen die prüfgasbasierte Schnüffellecksuche. Entweder befindet sich die Messspitze des Schnüffellecksuchgeräts dabei an einem Roboterarm, der an allen gedichteten Verbindungsstellen zwischen Gehäuseboden und -abdeckung entlangfährt, oder ein Prüfer führt eine Messspitze manuell über die neuralgischen Stellen des Gehäuses. Prinzipiell unterscheidet man zwischen der statischen Dichtheitsprüfung einerseits – die Schnüffelspitze bleibt für einige Sekunden über einer definierten Stelle (bevor sie zur nächsten fährt) – und der dynamischen Dichtheitsprüfung andererseits. Dabei bewegen der Roboterarm oder der menschliche Prüfer die Schnüffelspitze in einer kontinuierlichen Bewegung über die Oberfläche, etwa an einer Schweißnaht oder einer installierten Dichtung entlang.

Bei der statischen wie bei der dynamischen Schnüffellecksuche ist der kleinstmögliche Sicherheitsabstand zwischen Schnüffelspitze und Prüfteiloberfläche wünschenswert, gerade bei einer automatisierten Prüfung mit dem Roboterarm. Denn die Schnüffelspitze darf das Bauteil zwar nie berühren, dennoch muss sie eine austretende Prüfgaswolke zuverlässig erfassen können. Bauteiltoleranzen und die Zugänglichkeit potenzieller Leckstellen sind hier begrenzende Faktoren. Zudem sollte sich eine Roboter-Prüfanlage jedenfalls in einem abgeschirmten Bereich befinden, damit austretende Prüfgaswolken nicht verwehen können – im Idealfall schützt die Plexiglas-Sicherheitseinhäusung der Roboterstation zugleich vor Luftbewegungen im Produktionsbereich.



Schema der robotergestützten Schnüffellecksuche mit dem modularen LDS3000 plus XL-Schnüffeladapter.

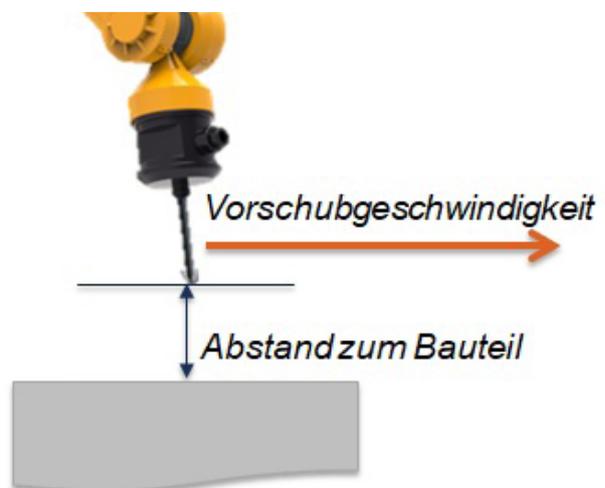
Bei der dynamischen Roboter-Schnüffellecksuche spielt neben einem möglichst kleinen Sicherheitsabstand der Schnüffelspitze zudem die Vorschubgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Um robotergestützte Dichtheitsprüfungen mit hoher Zuverlässigkeit durchführen zu können, ist es darum unerlässlich, dass das Schnüffellecksuchgerät die zu prüfende Luft mit einem hohen Gasfluss ansaugt. Herkömmliche Schnüffellecksuchgeräte arbeiten meist mit einem Gasfluss von nur 60 sccm – eine dynamische Roboter-Schnüffellecksuche ist damit völlig unmöglich.

INFICON bietet mit dem Protec P3000XL und dem XL3000flex zwei Lecksuchgeräte mit einem sehr hohen Gasfluss von 3000 sccm. Sie wurden speziell für eine schnelle und robotergestützte Dichtheitsprüfung entwickelt. Der Protec P3000XL arbeitet mit Helium und eignet sich für die dynamische Roboterprüfung gegen mittlere Grenzleckraten bis zur Größenordnung von 10^{-4} mbar·l/s. Bei einer statischen Roboterlecksuche und geringstmöglichem Abstand zum Prüfteil ermittelt das Gerät in der Praxis Lecks von bis zu 10^{-5} mbar·l/s. Noch empfindlicher ist allerdings der XL3000flex. Dieses Gerät empfiehlt sich darum für die dynamische Roboterlecksuche gegen Grenzleckraten im Bereich von unter $1 \cdot 10^{-4}$ mbar·l/s. Dabei lässt sich der XL3000flex wahlweise mit Helium als Prüfgas betreiben oder mit dem kostengünstigen For-

miergas. BUS-Schnittstellen gestatten eine problemlose Integration des XL3000flex in verschiedenste Produktionsumgebungen.

Die dynamische Roboter-Schnüffellecksuche kommt bei der Dichtheitsprüfung fertig bestückter Battery Packs zum Einsatz. Zunächst wird das Bauteil bis zu einem gewissen Grad evakuiert und dann in ihm ein Prüfgasüberdruck von nur 0,1 bar erzeugt. Anschließend führt ein Roboterarm den Prüfgassensor automatisch an den Dichtungen des Battery Packs entlang, um gegebenenfalls austretendes Prüfgas zu detektieren. In diesem Szenario besteht ein etwaiger Leckkanal auf seiner einen Seite aus dem Gehäusematerial, meist Aluminium, und auf seiner anderen Seite aus dem Polymer der Dichtung. Entsprechend sollte man auch die Grenzleck-

rate, gegen die die Dichtung zu prüfen ist, zwischen den materialtypischen Leckraten mitteln. Für dieses Prüfszenario ist also eine Grenzleckrate im Bereich 10^{-4} mbar·l/s ausreichend – auch wenn das reine Aluminiummaterial eine Prüfung gegen 10^{-5} mbar·l/s erfordern würde.



Zwei begrenzende Faktoren für die Roboterschnüffellecksuche.

	Evakuierungsdruck	Prüfgaskonzentration nach Befüllung	Korrekturfaktor der Leckrate ²
1,1 bar (100 mbar)	Ohne Evakuierung	9%	0,09
	auf 0,9 bar	18%	0,18
1,2 bar (200 mbar)	Ohne Evakuierung	17%	0,17
	auf 0,8 bar	33%	0,33
1,3 bar (300 mbar)	Ohne Evakuierung	23%	0,23
	auf 0,7 bar	46%	0,46
1,4 bar (400 mbar)	Ohne Evakuierung	29%	0,29
	auf 0,6 bar	57%	0,57
1,5 bar (500 mbar)	Ohne Evakuierung	33%	0,33
	auf 0,5 bar	67%	0,67

1) max. Differenzdruck

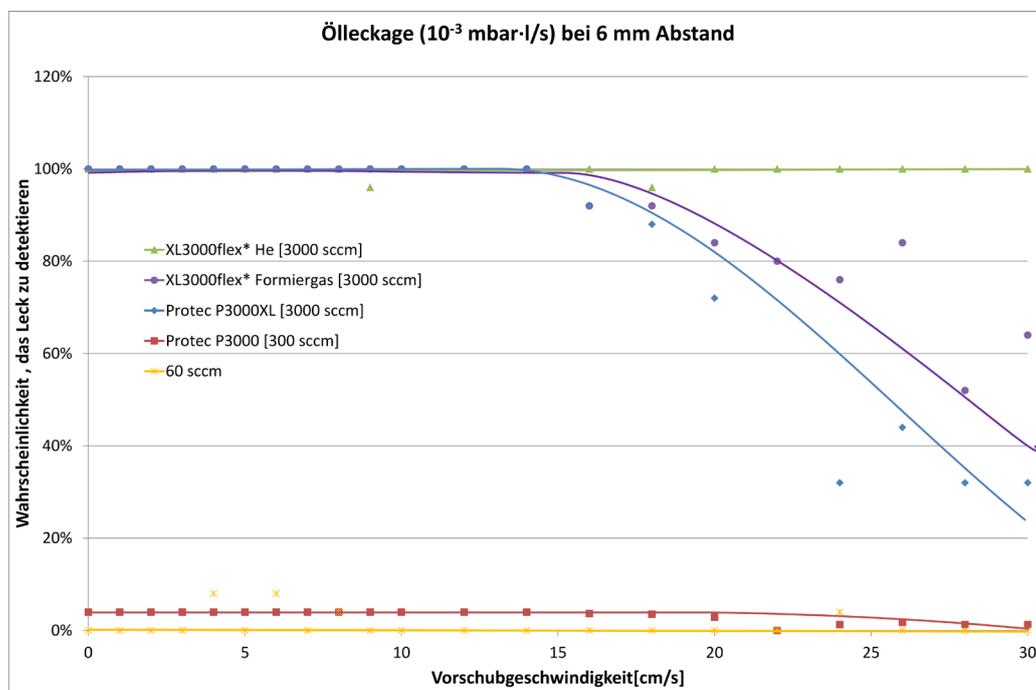
2) Reale Leckrate zu angezeigter Leckrate.

Prüfgaskonzentration beeinflusst die Leckratenmessung

Exkurs 2: Warum hoher Gasfluss beim Roboterschnüffeln entscheidend ist

Die dynamische Schnüffellecksuche soll gleich zwei Dinge leisten: Einerseits soll sie einen größeren Bereich des Prüfteils auf etwaige Leckstellen prüfen, andererseits soll sie dies mit möglichst hoher Geschwindigkeit tun. Leider sind beide Ziele nicht leicht miteinander zu vereinbaren. Denn je kleiner die Leckrate ist, desto langsamer verteilt sich an einer Leckstelle auch die Wolke mit austretendem Prüfgas.

Viele herkömmliche Schnüffellecksuchgeräte saugen Gas an ihrer Schnüffelspitze mit einem Teilchenstrom im Bereich von lediglich 60 bis 300 sccm an. Bei einer sorgfältigen manuellen Handhabung der Schnüffelspitze kann dies mitunter ausreichend sein – etwa wenn es nur wenige Prüfstellen gibt und die Schnüffelspitze nur langsam und nah an der Oberfläche bewegt wird. Allerdings hat die dynamische Roboter-Schnüffellecksuche sehr viel höhere Anforderungen.



Dynamische Roboter-Schnüffellecksuche auf Öllecks, gegen eine Leckrate von 10^{-3} mbar·l/s.

Versuchsreihen zeigen, welche Auswirkung die Scan- bzw. Vortriebsgeschwindigkeit des Messkopfes hat, wenn etwa gegen eine Leckrate von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s getestet werden muss (am Beispiel eines Testlecks von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s, bei einem Sicherheitsabstand von 6 mm vom Prüfteil – siehe Abbildung auf Seite 31). Das ernüchternde Ergebnis: Herkömmliche, marktübliche Schnüffellecksucher, die Gas mit einem Fluss von nur 60 sccm ansaugen, versagen in solch einem Szenario vollkommen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Leck von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s von solchen Geräten gefunden wird, ist gleich null. Selbst Geräte, die mit einem Teilchenfluss von 300 sccm arbeiten, sind für diesen Einsatzzweck ungeeignet.

Erst Geräte wie der Protec P3000XL und der XL3000flex, die eigens mit einem Fluss von 3000 sccm ausgelegt wurden, erfüllen die Anforderungen des dynamischen Roboterschnüffels. Führt der Roboterarm die Messspitze dieser Geräte mit einer Geschwindigkeit von weniger als circa 14 cm/s über die Oberfläche des Prüflings, werden Lecks bis zur Grenzleckrate von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l/s zu 100 Prozent erkannt und lokalisiert. Bei einer Prüfgeschwindigkeit von mehr als 14 cm/s nimmt die Nachweiswahrscheinlichkeit beim Protec P3000XL langsam ab; während der XL3000flex selbst bei einer Geschwindigkeit von 30 cm/s das Leck noch völlig zuverlässig nachweisen kann – vorausgesetzt man verwendet Helium als Prüfgas.

Führt man diesen Test mit einer noch kleineren Grenzleckrate von $1 \cdot 10^{-4}$ mbar·l/s durch, bestätigt sich die Unverzichtbarkeit eines hohen Gasflusses. Wieder sind es nur die Geräte mit einem Gasfluss von 3000 sccm, die das Leck zu 100 Prozent erkennen können. Allerdings ist dafür die Vortriebsgeschwindigkeit der Messspitze auf höchstens 8 cm/s (Protec P3000XL) bzw. 10 cm/s (XL3000flex) zu reduzieren.

4.3 Manuelle Schnüffellecksuche mit Formiergas

Soll die Schnüffellecksuche nicht automatisiert, sondern manuell ablaufen, etwa in der Pilotproduktion der Gehäuse, eignet sich dafür auch ein Gerät wie der Sensistor Sentrac von INFICON. Der Sensistor Sentrac verwendet das günstigere Formiergas als Prüfgas und genügt dennoch den etwas höheren Dichtheitsanforderungen von Aluminiumgehäusen mit Polymerdichtung im Bereich von 10^{-4} mbar·l/s. Selbst wenn ein Prüfer die Schnüffellecksuche in der Pilotproduktion noch manuell vornimmt – in der Linienfertigung empfiehlt sich doch meist eine Automatisierung mit Geräten wie dem Protec P3000XL oder dem XL3000flex. Sollten dann Nacharbeiten an Gehäusen erforderlich werden, lässt sich zur Ergebniskontrolle wieder auf das manuelle Verfahren mit dem Sensistor Sentrac zurückgreifen.



Sensistor Sentrac – manuelles Schnüffellecksuchgerät für Formiergas.

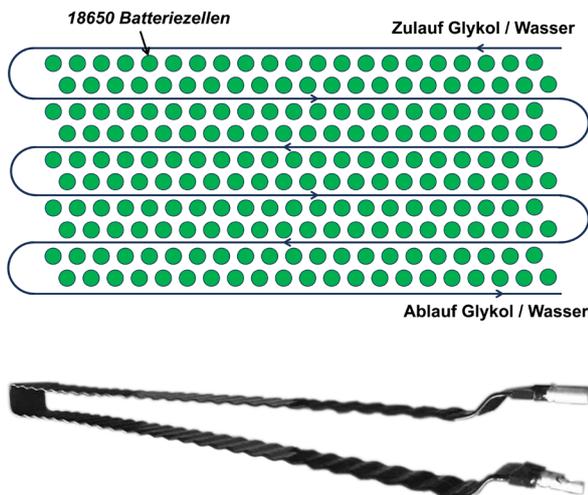
5 Dichtheit der Kühlkomponenten

Auch die Zuverlässigkeit der Kühlung einer Traktionsbatterie wirkt sich auf ihre Betriebssicherheit und Lebensdauer aus. Batterien heizen sich sowohl im Fahrbetrieb als auch bei Ladevorgängen auf. Es gilt darum, sowohl die Batteriezellen als auch das elektronische Steuergerät (ECU) der Traktionsbatterie zuverlässig zu kühlen. Prinzipiell sind zwei verschiedene Kühlsysteme im Einsatz: eine passive Luftkühlung und eine aktive Flüssigkeitskühlung. Bei letzterer muss man wiederum nach dem flüssigen Medium unterscheiden: es gibt Wasser-Glykol-Gemische oder Kältemittel wie etwa R1234yf. Die Kühlkanäle, durch die bei der aktiven Kühlung die Kühlflüssigkeit geleitet wird, bestehen typischerweise aus Aluminium oder Kupfer. Eine Dichtheitsprüfung der Kühlkomponenten hat nicht nur den Zweck, eine effektive Kühlung der Batterie sicherzustellen – wenn Wasser oder Kältemittel austritt, kann dies auch Kurzschlüsse in den Batteriezellen oder -modulen nach sich ziehen.

5.1 Glykol-Wasser-Kühlung oder Kältemittel

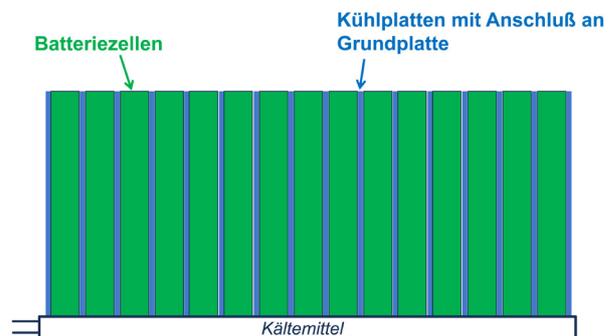
In einem BEV-Fahrzeug wie dem Tesla Model S werden Rundzellen des Typs 18650 in Bat-

teriemodulen zusammengefasst. 16 dieser Module bilden wiederum ein Batterie-Pack. Die Kühlschlange, mit der das Wasser-Glykol-Gemisch durch ein Batteriemodul geleitet wird, beschreibt einen s-förmigen Weg durch diverse Lagen an Rundzellen. In der Batterie des Model S sind 16 dieser Module zu einem Batteriepack zusammengeschlossen. Auch in China ist diese Batterie-Architektur derzeit besonders beliebt.



Schema der Kühlerkonstruktion für Rundzellen und Abbildung einer Kühlschlange.

Ein Beispiel für eine Modulararchitektur mit prismatischen Zellen liefert BMW im BMW i3. Hier sind die Zellen zwischen einer größeren Zahl von Kühlplatten geschichtet, die ihrerseits mit einer Basisplatte verbunden sind, die von Kältemittelrohren durchzogen wird. Die Kühlung des Batteriemoduls erfolgt also über einen Bypass von der Klimaanlage des Fahrzeugs und damit letztlich durch ein Kältemittel.



Schema der Kühlung prismatischer Zellen.

5.2 Dichtheitsanforderungen an die Kühlkreislauf-Komponenten

Die konkreten Dichtheitsanforderungen hängen vom Kühlmedium ab. Bei einem Wasser-Glykol-Gemisch – der verbreitetere Ansatz – beträgt die Grenzleckrate 10^{-3} mbar·l/s. Bei einem Kältemittel wie R1234yf sollte wegen seiner leichten Brennbarkeit sogar gegen eine Leckrate von ungefähr 10^{-5} mbar·l/s geprüft werden. Eine Grenzleckrate von 10^{-3} mbar·l/s könnte dazu verführen, eine simple Druckabfallprüfung einzusetzen, um die Wasserdichtheit einer Komponente festzustellen. Aber leider verbietet sich die Druckabfallprüfung für diesen Anwendungsfall. Naturgemäß sind Kühlkreislaufkomponenten wie Kühlplatten und Wärmetauscher äußerst anfällig für Temperaturschwankungen – mit wechselnder Temperatur verändert sich aber auch der gemessene Luftdruck im zu prüfenden Bauteil. Eine Temperaturschwankung

von nur 0,1 °C kann die Ergebnisse der Druckabfallprüfung bereits um den Faktor 100 verfälschen.

Oft ist für Kühlkreislauf-Komponenten stattdessen eine Prüfung in der simplen Akkumulationskammer sinnvoll. Austretendes Prüfgas sammelt sich dabei in der Prüfkammer an, wo es nach einigen Sekunden nachgewiesen werden kann. Statt Helium kann man dazu inzwischen auch besonders günstiges Formiergas verwenden, ein unbrennbares Gemisch aus 95 Prozent Stickstoff und 5 Prozent Wasserstoff. Möglich wird dies durch ein neues Dichtheitsprüfgerät von INFICON: den LDS3000 AQ. Er erkennt Flüssigkeitslecks mit der einfachen Akkumulationsmethode ebenso zuverlässig, wie es früher nur die aufwendigere Helium-Vakuumpfung konnte. Die Nachweisgrenze des Geräts liegt im Bereich von 10^{-5} mbar·l/s. Dabei sind die Kosten der Prüfung allerdings ähnlich niedrig wie bei einer simplen Luftprüfung. Einen Vorteil behält die Vakuumpfung mit Helium allerdings: Sie gestattet kürzere Taktzeiten als die Akkumulationsprüfung.

5.3 Schnüffellecksuche beim Einbau der Batterie

Sind die Batteriezellen gefertigt, mit Elektrolyt befüllt und zu Batteriemodulen zusammengefasst, die wiederum zu Batteriepacks gruppiert

wurden, müssen diese Batteriepacks noch in das Elektrofahrzeug eingebaut werden. Dadurch kommen auch auf den Fahrzeughersteller selbst Dichtheitsprüfaufgaben zu, die den Kühlkreislauf betreffen. Nach dem Einbau der Traktionsbatterie muss der OEM die Verbindungen zum Wasser-Glykol- beziehungsweise im Kältemittelkreislauf auf Dichtheit testen.

Die exakte Grenzleckrate bei einer Kühlung mit Kältemittel hängt von dessen Spezifikationen ab. Die zulässige Leckrate, die üblicherweise in der Einheit g/a angegeben wird, bewegt sich zwischen 2 und 5 g des jeweiligen Kältemittels pro Jahr, was einer Helium-Leckrate im Bereich von 10^{-5} mbar·l/s entspricht. Allerdings existieren Dichtheitsprüfgeräte, die bei der Schnüffellecksuche das jeweilige Kältemittel selbst als Prüfgas nutzen können und austretendes Kältemittel so direkt nachweisen. Der INFICON Ecotec E3000 ist solch ein Multigas-Lecksuchgerät, bei dem der Anwender aus einer Bibliothek aller re-



Ecotec E3000 Multigas-Lecksuchgerät zur Detektion von Glykol und Kältemittel.

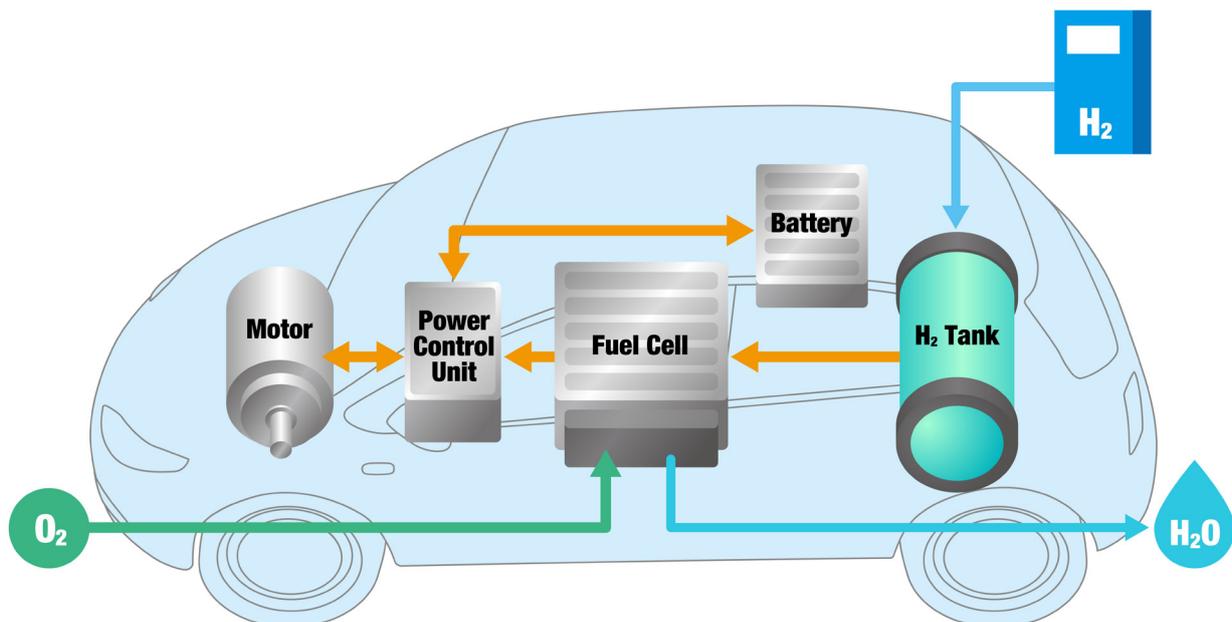
levanten Kältemittel das für seine Situation erforderliche auswählen kann. Tatsächlich stellt dies die einzige Möglichkeit dar, das Befüllventil nach dem Verschließen noch auf Dichtheit zu prüfen.

Die Dichtheit eines Wasser-Glykol-Kühlkreislaufs muss gegen eine Grenzleckrate von 10^{-3} mbar·l/s getestet werden. Dies kann entweder durch eine Schnüffellecksuche mit Formiergas (und dem Sensistor Sentrac) oder durch eine Schnüffellecksuche mit Helium (und mit Geräten wie dem Protec P3000XL oder dem INFICON XL3000flex) erfolgen – wobei für das Heliumverfahren eine Prüfgaskonzentration von 5 Prozent ausreichend ist. Beide letztgenannten Geräte arbeiten mit einem besonders hohen Gasfluss von 3000 sccm. Wie in [Exkurs 2: Warum hoher Gasfluss beim Roboterschnüf-](#)

[feln entscheidend ist](#) beschrieben, ist dies die Voraussetzung für eine automatisierte Schnüffellecksuche. Gegenüber dem P3000XL weist der XL3000flex unter Produktionsbedingungen die noch höhere Zuverlässigkeit auf. Das Gerät eignet sich für raue Produktionsumgebungen, erlaubt hohe Prozessgeschwindigkeiten und detektiert Lecks selbst bei einem erhöhten Prüfgasuntergrund.

6 Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) und ihre Komponenten

Die Gattung der Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV) hat viele Komponenten, bei denen es dieselben Dichtheitsanforderungen gibt wie bei den batterieelektrischen EV-Fahrzeugen. Denn



Aufbau eines Brennstoffzellenfahrzeugs (FCEV).

beide werden letztlich durch die gleichen Elektromotoren angetrieben. Auch die Lithium-Ionen-Batterien, die diese Elektromotoren mit Strom versorgen, sind ihrem Prinzip nach identisch. Wenngleich diese Batterien in Brennstoffzellen-Fahrzeugen viel kleiner sind und eine geringere Speicherkapazität aufweisen. Denn im FCEV dienen sie nur als Pufferbatterien. Sie haben die Aufgabe, elektrische Energie zwischenspeichern, damit die Brennstoffzelle immer am optimalen Arbeitspunkt betrieben werden kann. Die vielfältigen Prüfaufgaben an den Antriebsbatterien sind prinzipiell dieselben wie bereits in den Kapiteln [3. Prüfverfahren für Batteriezellen](#) und [4. Anforderungen an die Gehäuse von Batteriepacks](#) beschrieben. Von den spezifischen Dichtheitsanforderungen an Elektromotoren wird später, in Kapitel [8.1 Elektrische und elektronische Komponenten](#), die Rede sein.

Was FCEV-Fahrzeuge von BEV-Fahrzeugen grundsätzlich unterscheidet, ist, dass sie ihre elektrische Energie selbst erzeugen. Sie führen in einem Tank Wasserstoff mit, aus dem sie in einer galvanischen Zelle – der Brennstoffzelle – Strom generieren. Das einzige Abgas, das bei dieser kontrollierten Reaktion von Wasserstoff und Luftsauerstoff entsteht, ist ökologisch völlig unbedenklicher Wasserdampf. Während also die Prüfaufgaben für die elektrischen Komponenten und Batterien bei einem Brennstoffzellenfahrzeug dieselben sind wie einem BEV- oder

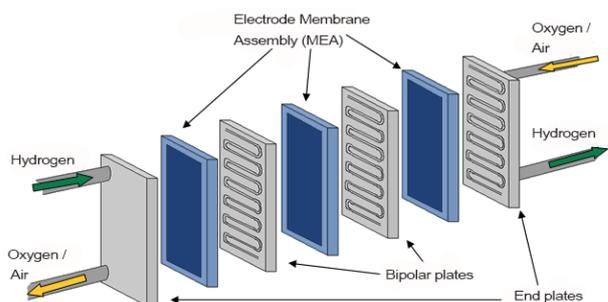
PHEV-Fahrzeug, kommen bei FCEV-Fahrzeugen noch die vielfältigen Dichtheitsanforderungen an die Komponenten der Brennstoffzelle hinzu. Auch die Wasserstofftanks, die Wasserstoffleitungen und die Wasserstoffzirkulation von FCEV-Fahrzeugen erfordern Dichtheitsprüfungen – von ihnen wird in [Kapitel 7. Wasserstofftanks und -leitungen](#) die Rede sein.



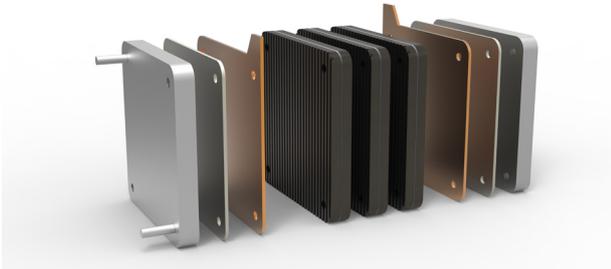
Montierter Brennstoffzellenstack.

6.1 Bipolarplatten für Brennstoffzellen

Fuel Cell Stacks sind das Herz von Brennstoffzellenfahrzeugen. Diese Brennstoffzellen-Stacks bestehen aus zwei Endplatten, zwischen denen mehrere Bipolarplatten geschichtet sind. Die Bipolarplatten sind jeweils durch Membran-Elektroden-Einheiten (Membrane Electrode Assembly, MEA) getrennt. Als elektrisch leitende



Aufbau eines Brennstoffzellenstacks.



Bipolarplatten – drei verschiedene Kanäle für drei verschiedene Medien.

Platten haben Bipolarplatten die Aufgabe, die Anode einer Zelle mit der Kathode der anderen Zelle zu verbinden. Jede Bipolarplatte enthält zwei Hohlräume für die Prozessgase Wasserstoff und Luftsauerstoff sowie eine interne Kühlschleife. Abgehend von den Hohlräumen der Prozessgasführung werden die Prozessgase Wasserstoff und Luftsauerstoff über das sogenannte Flow Field großflächig an die Membrane der Membran-Elektroden-Einheit geleitet. Der entsprechende Hochtemperatur-Kühlkreislauf hat die Aufgabe, eine optimale Prozesstempe-

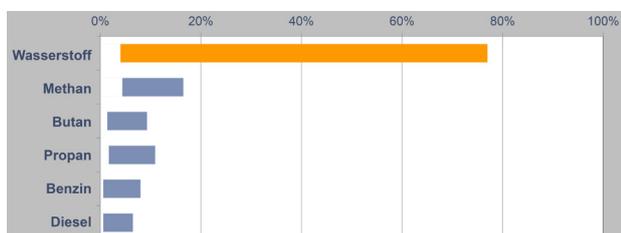
ratur des gesamten Brennstoffzellen-Systems aufrechtzuerhalten.

Im Wesentlichen gibt es für eine Brennstoffzelle vier Versagensmodi:

- a. Den Austritt bzw. Verlust von – brennbarem – Wasserstoff.
- b. Ein Austreten von Wasserstoff mit einer anschließenden unkontrollierten Reaktion mit Sauerstoff, sei es durch sogenannte Cross-over-Lecks zwischen Anode und Kathode oder durch Overboard-Lecks an Dichtungen.
- c. Verlust von Kühlflüssigkeit, mit Effizienzverlust und Beschädigung des Fuel Cell Stacks.
- d. Ein Austreten von Wasserstoff in den Kühlkreislauf, was zum einen korrosiv wirkt und zum anderen wegen der Gasblasen in der Kühlflüssigkeit die Effizienz der Kühlung beeinträchtigt oder sogar die Pumpe beschädigt.

H ₂ Wasserstoff-Leckage	Luft-Leckage	Kühlmittel-Leckage
<p>Wasserstoff-Kanal nach außen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unterversorgung der Brennstoffzelle • Konzentration brennbarer Gase 	<p>Luft-Kanal nach außen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unterversorgung der Brennstoffzelle 	<p>Kühl-Kanal nach außen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Überhitzung der Brennstoffzelle • Elektrischer Kurzschluß
<p>Wasserstoff-Kanal → Luft-Kanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • unkontrollierte Reaktion von H₂ und O₂ • Verbreitung des Defekts 	<p>Luft-Kanal → Wasserstoff-Kanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • unkontrollierte Reaktion von H₂ und O₂ • Verbreitung des Defekts 	<p>Kühl-Kanal → Luft-Kanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blockieren des Gas-Kanals • Unterversorgung der Brennstoffzelle
<p>Wasserstoff-Kanal → Kühlkanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gasblasen im Kühlmittel • Korrosion/Defekt der Pumpe • Überhitzung der Brennstoffzelle 	<p>Luft-Kanal → Kühlkanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gasblasen im Kühlmittel • Defekt der Pumpe • Überhitzung der Brennstoffzelle 	<p>Kühl-Kanal → Wasserstoff-Kanal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blockieren der Gas-Kanals • Unterversorgung Brennstoffzelle

Fehlermechanismen für eine Brennstoffzelle.



Entflammbarkeitsgrenzen verschiedener Treibstoffe.

Aus den unterschiedlichen Fehlerszenarien ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Leckrate. Gegen ein Austreten von Wasserstoff – sowohl nach außen als auch in den Kühlkanal – sollte typischerweise gegen Leckraten im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-6} mbar·l/s geprüft werden. Generell gilt allerdings, dass Wasserstoffleckraten so gering wie möglich sein sollten – schon weil Wasserstoff in einem breiten Konzentrationsbereich zündfähig ist: zwischen 4 und 73 Prozent Wasserstoff in Luft. So kann es durchaus sinnvoll sein, die Grenzleckrate noch eine Dekade kleiner zu wählen und gegen 10^{-7} mbar·l/s zu prüfen.

6.2 Die Kühlmittelschleife der Bipolarplatte

Das Kühlmedium im Hochtemperaturkühlkreislauf, der durch die Bipolarplatten führt, muss eine geringe Leitfähigkeit aufweisen, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Darum dient hier in der Regel deionisiertes Wasser mit einem Frostschutzzusatz als Kühlfüssigkeit. Um ein Austreten dieser Flüssigkeit aus dem Kühlkanal zu vermeiden, empfiehlt sich eine Dichtheitsprüfung gegen Grenzleckraten im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-4} mbar·l/s. Dies ist die übliche Größenordnung für Flüssigkeitsdichtheit, weil Lecks dieser Größe dann vom Wasser selbst verschlossen werden. In der Linienfertigung der Bipolarplatten ist die Vakuumprüfung mit Helium auch deswegen die Methode der Wahl, weil sie kurze Taktzeiten und einen hohen Durchsatz gestattet. Bei der Vakuumprüfung wird der

Schritte der Dichtheitsprüfung	1	2	3	4	5
Zu verhindernder Fehler	Wasserstoff-Leckage nach außen	Cross-over-Leckage • Wasserstoff-Luft-Kanal • Luft-Wasserstoff-Kanal	Wasserstoff-Leckage in den Kühl-Kanal	Luft-Leckage in die Kühl-Kanal	Kühlmittel-Leckage nach außen
Typische Leckraten	<ul style="list-style-type: none"> „so niedrig wie möglich“, genaue Spezifikation hängt von Belüftung ab 10^{-3} ... 10^{-5} mbar·l/s Einige Publikationen fragen nach 10^{-7} mbar·l/s 				10^{-3} ... 10^{-4} mbar·l/s

Prüfszenarien bei der Prüfung von Bipolarplatten.



Prüfschritte in der Produktion von Brennstoffzellenstacks.

Kühlkanal zunächst evakuiert, anschließend mit Helium gefüllt und dann wieder verschlossen. Ist die zu prüfende Bipolarplatte in der Vakuumkammer platziert und die Kammer evakuiert, erkennt ein Helium-Lecksuchgerät wie der INFICON LDS3000 etwaiges Helium, das aus dem Kühlkanal ins Vakuum der Kammer austritt. Das eingesetzte Helium lässt sich im Anschluss an den Prüfvorgang natürlich jedes Mal zurückgewinnen.

Neben dem Hochtemperatur-Kühlkreislauf, der die Bipolarplatten durchströmt, verfügen FCEV-Fahrzeuge auch über einen oder mehrere Niedertemperatur-Kühlkreisläufe, die elektrische Komponenten wie Antrieb, Wandler und Leistungselektronik in Temperaturbereichen von unter 60 °C halten. Sie werden mit einem herkömmlichen Wasser-Glykol-Gemisch betrieben und sind ebenfalls gegen Flüssigkeitsdichtheit zu prüfen.

6.3 Prüfung der Bipolarplatte auf Wasserstoffleckagen

Bei der Prüfung einer Bipolarplatte auf Wasserstoffleckagen kommt ebenfalls die Vakuummethode zum Einsatz. Dazu wird der Wasserstoffhohlraum der Bipolarplatte abgedichtet, evakuiert und mit Helium gefüllt. In einer evakuierten Vakuumkammer kann dann ein Lecksuchgerät wie der LDS3000 wiederum austretendes Helium nachweisen – bei Grenzleckraten von 10^{-6} oder 10^{-7} mbar·l/s. Ist kein Helium nachweisbar, steht fest, dass es keine Lecks aus dem Wasserstoffhohlraum nach außen oder in den Kühlkanal hinein gibt. Wird ein Leck festgestellt, ist eine weitere Ursachenforschung möglich. Dabei nutzt man den Umstand, dass der Wasserstoffhohlraum der Bipolarplatte nach der initialen Prüfung in der Vakuumkammer noch mit Helium befüllt und abgedichtet ist. Allerdings wird jetzt nur noch der Kühlkanal der Bipolarplatte an eine Vakuumpumpe angeschlossen:

So kann der LDS3000 nachweisen, ob Helium ins Vakuum des Kühlkanals eindringt. Falls nicht, führte das ursprünglich identifizierte Leck nach außen.

6.4 End-of-line-Tests an kompletten Fuel Cell Stacks

Nach dem Zusammenbau der Bipolarplatten zu kompletten Fuel Cell Stacks werden End-of-line-Tests auf mögliche Wasserstofflecks durchgeführt – wobei auch bereits nach vorangehenden Zwischenschritten Prüfungen sinnvoll sein können. Typische Grenzleckraten für die Dichtheitsprüfung assemblierter Bipolarplatten bewegen sich im Bereich zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mbar·l/s. In einzelnen Fällen werden aber auch schon Grenzleckraten bis in den Bereich 10^{-7} mbar·l/s diskutiert. Für all diese Tests an montierten Fuel Cell Stacks dient ebenfalls Helium als Prüfgas – schon weil eine Prüfung mit Wasserstoff das Risiko birgt, dass die Brennstoffzelle ungewollt zu arbeiten beginnt und Strom produziert. Auch aus Gründen der Sicherheit sollte Wasserstoff nicht als Prüfgas verwendet werden, da eine grobe Leckage im Wasserstoffkreis schnell zu Wasserstoffkonzentrationen von mehr als 4 Prozent in Luft und damit zu einem zündfähigen Gemisch führen könnte. Weitere Dichtheitsprüfungen sind an Komponenten wie der Medienverteilerplatte einer Brennstoffzelle (die

Wasserstoff, Luft und Kühlmittel leitet), an ihren diversen Ventilen, Pumpen und ihrer Wasserstoffzirkulation erforderlich. Weil Wasserstoff und Luftsauerstoff an den Membran-Elektroden-Einheiten der Bipolarplatten nicht vollständig miteinander reagieren, werden die Gase – nachdem sie Wasserabscheider durchlaufen haben – in der Brennstoffzelle rezirkuliert und erneut genutzt. Auch hier gilt, dass man wasserstoffführende Komponenten idealerweise gegen möglichst kleine Leckraten von bis zu 10^{-6} oder 10^{-7} mbar·l/s prüft.



Schnüffelprüfung am Brennstoffzellenstack.

7 Wasserstofftanks und -leitungen

7.1 Normen und Permeationsgrenzwerte

Die Wasserstofftanks, die in Brennstoffzellenfahrzeugen verbaut werden, sind meist sogenannte Typ-IV-Tanks, die aus Verbundwerkstoffen hergestellt werden. Die Aufgabe dieser Drucktanks ist es, eine größere Menge Wasserstoffgas im Fahrzeug mitführen zu können.



Wasserstofftank eingebaut im Toyota Mirai.

Für die Festigkeit eines Typ-IV-Tanks sorgt typischerweise eine Kohlenstofffaserstruktur; ausgekleidet sind diese Tanks mit einer Polymerschicht. Wasserstoff-Drucktanks vom Typ IV für Pkws sind üblicherweise konstruiert, um Betriebsdrücken von bis zu 700 bar (oder 10.153 psi) zu widerstehen, während die weit größeren Wasserstofftanks von Bussen nur für Betriebsdrücke bis 350 bar (5.076 psi) ausgelegt sind. Ein Fuel-Cell-Serien-Pkw wie der Toyota Mirai hat zwei Tanks mit jeweils rund 60 l Volumen, während Wasserstoffbusse Tanks mit Volumina zwischen 1.300 und 1.700 l verwenden.

Die Dichtheits- bzw. Leckratenanforderungen

für die Wasserstofftanks von Brennstoffzellenfahrzeugen ergeben sich aus einer Reihe von internationalen Normen, die maximal zulässige Permeationsraten für diese Tanks definieren. Dies sind Normen wie ISO15869 B.16, EU406-2010 4.2.12.3. und ECE R134 5.3.3.

ISO 15869 B.16 definiert für den Dauerbetrieb eine Permeationsrate für Wasserstoffgas von weniger als 2 cm³ pro Stunde und Liter Tankkapazität bei einem Druck von 350 bar (wie er in Bussen typisch ist). Bei einem Druck von 700 bar (also bei Tanks für Pkw) darf die Permeationsrate 2,8 cm³ pro Stunde und Liter Tankkapazität betragen.

Die Norm EU406-2010 4.2.12.3 definiert, dass

im Dauerbetrieb die Permeationsrate geringer als 6 Ncm³ pro Stunde und Liter Tankkapazität sein muss.

Und die Norm ECE R134 5.3.3. (c) legt fest, dass bei einer gemessenen Permeationsrate von mehr als 0,005 mg/s (entspricht 3,6 Nml/min) eine lokale Dichtheitsprüfung notwendig wird, um zu ermitteln, dass an keiner einzelnen Leckstelle der Gesamtwert von 0,005 mg/s (3,6 Nml/min) überschritten wird.

7.2 Leckraten orientieren sich an Permeationsraten

Die Permeationsrate eines Wasserstofftanks ist bei seiner Dichtheitsprüfung mit einer Leckrate gleichzusetzen. Bei einem PKW-Wasserstofftank mit 30 l Kapazität und 700 bar Druck ergibt sich nach den Permeationsgrenzwerten der ISO 15869 B.16 damit umgerechnet eine Helium-Grenzleckrate von $2,3 \cdot 10^{-2}$ mbar·l/s. Bei derselben Tankgröße und nur 350 bar Druck wäre die Grenzleckrate sogar noch etwas kleiner und läge bei $1,6 \cdot 10^{-2}$ mbar·l/s. Die Norm EU406-2010 4.2.12.3. ergibt für einen PKW-Tank mit 30 l eine Grenzleckrate von umgerechnet $5 \cdot 10^{-2}$ mbar·l/s. Nach der ECE R134 5.3.3. (c) schließlich ist die maximal zulässige Grenzleckrate $6 \cdot 10^{-2}$ mbar·l/s.

In der Realität werden Wasserstofftanks aber oft nicht bloß den Normen entsprechend geprüft

– und damit im Bereich 10^{-2} mbar·l/s –, sondern sogar gegen Leckraten im Bereich 10^{-3} mbar·l/s. Denn häufig ist die tatsächliche Permeabilität der für die Wasserstofftanks verwendeten Materialien eine Dekade geringer als von den Normen gefordert.

7.3 Akkumulationsprüfung für Wasserstofftanks

Erst wenn an einen Wasserstofftank die erforderlichen Armaturen und Ventile angebracht sind, wird aus dem ursprünglichen Tankkörper das sogenannte Tankmodul. Für die Vorprüfung der Tankkörper eignen sich sowohl die Vakuumdichtheitsprüfung mit Helium als auch die Akkumulationsprüfung mit Formiergas. Weil derzeit die Stückzahlen in der Produktion oft noch nicht so hoch sind, dass sich eine aufwendigere Vakuumprüfung ihrer kürzeren Taktzeiten wegen lohnen würde, spielt die Akkumulationsprüfung derzeit noch eine größere Rolle. Dies gilt nicht zuletzt für die großen Wasserstofftanks von Bussen. Diese weisen typischerweise Volumina von bis zu 1.700 l auf und werden in Akkumulationskammern mit bis zu 4.000 l Kammervolumen geprüft. Wegen der geringeren Prüfgaskosten wird solch ein Prüfling mit dem günstigeren Formiergas befüllt – allerdings mit einem Druck von 700 bar. Dieser doppelte Betriebsdruck wäre auch für eine Berstprüfung geeignet (die al-

lerdings schon zuvor mit Wasser durchgeführt wird). Aber auch bei der Akkumulationsprüfung ist der hohe Prüfgasdruck notwendig, weil die ansonsten deutlich kleineren Leckraten in der recht großen Akkumulationskammer nicht nachweisbar wären. Wegen des hohen Prüfdrucks gibt es in der Akkumulationskammer einen Notauslass, der bei Überdruck öffnet.

7.4 Vakuumprüfung für Wasserstofftanks

Wenn die Wasserstofftanks für Busse mit höherem Durchsatz geprüft werden sollen oder wenn die kleineren Tanks für Pkw auf Dichtheit zu prüfen sind, ist grundsätzlich auch die Vakuumprüfung mit Helium einsetzbar. Allerdings verlangt dies bei den großen Wasserstofftanks von Bussen auch entsprechende Investitionen in Pumpsätze, die in der Lage sind, das große Volumen der Vakuumkammer schnell zu evakuieren und so den prinzipiellen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber der Akkumulationsprüfung zu realisieren. Da die Vakuumkammer selbst aber viel dichter sein muss als eine einfache Akkumulationskammer, lässt sich hier kein Notauslass verbauen. Stattdessen ist es erforderlich, die Vakuumkammer mit einem Sicherheitskäfig auszurüsten, der Beschädigungen beim Bersten des Tanks vermeidet. Wegen der prinzipiellen Empfindlichkeit der Vakuummetho-

de ist es allerdings möglich, die Heliumkonzentration im Prüfgas deutlich zu reduzieren oder den Prüfling alternativ mit niedrigerem Druck als dem Betriebsdruck zu befüllen – beides reduziert den Heliumeinsatz. Parallel verkleinert sich dann auch die Grenzleckrate, gegen die geprüft werden muss. Reduziert man die Heliumkonzentration im Prüfgas beispielsweise auf 1 Prozent, steigt entsprechend auch die Anforderung an die Grenzleckrate um zwei Dekaden: Statt gegen $5 \cdot 10^{-2}$ mbar·l/s ist der Wasserstofftank dann gegen $5 \cdot 10^{-4}$ mbar·l/s zu prüfen.

7.5 Schnüffellecksuche an komplettierten Tanks mit allen Armaturen

Auch nach dem Zusammenbau des Tankkörpers mit allen Armaturen – Befüll- und Auslassventile sowie Drucksensoren – sind noch Dichtheitsprüfungen erforderlich. Allerdings verwendet man hier üblicherweise die sogenannte Schnüffellecksuche. Das Prüfteil – der fertige

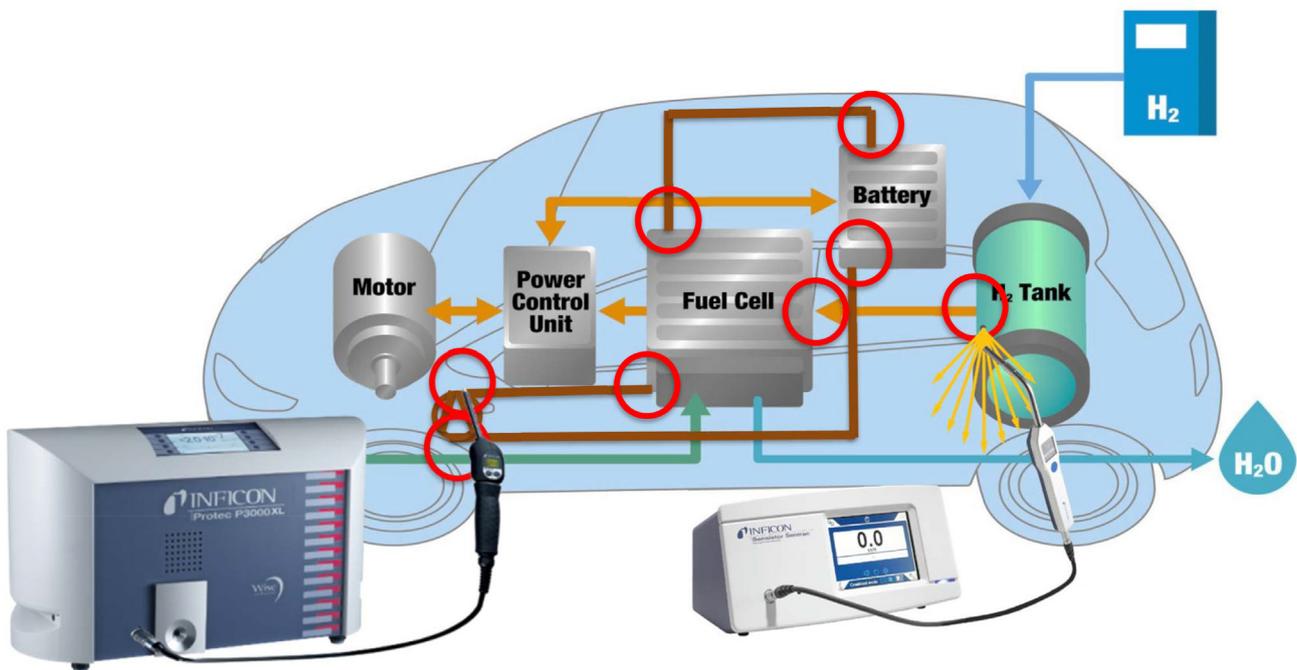


Schnüffellecksuche an den Armaturen eines Wasserstofftanks.

Tank – wird dazu mit Prüfgas (entweder Helium oder Formiergas) befüllt und abgedichtet. Anschließend fährt man mit einer Schnüffelspitze an der Oberfläche des Tanks entlang – entweder komplett oder konzentriert auf die neuralgischen Punkte.

Prinzipiell unterscheidet man zwischen einer manuellen Schnüffellecksuche und einer automatischen Roboterlecksuche: Dabei führt statt eines menschlichen Prüfers ein programmierter Roboterarm die Schnüffelspitze über die Oberfläche des Prüflings. Wie in [Exkurs 2: Warum hoher Gasfluss beim Roboterschnüffeln ent-](#)

[scheidend ist](#) beschrieben, spielt der Gasfluss gerade bei einer dynamischen Schnüffellecksuche mit einer kontinuierlich bewegten Schnüffelspitze eine entscheidende Rolle. Lecksuchgeräte von INFICON wie der Protec P3000XL und der XL3000flex arbeiten mit einem sehr hohen Gasfluss von 3000 sccm – sie wurden speziell für eine schnelle und robotergestützte Dichtheitsprüfung entwickelt. Typische Grenzleckraten bei diesen End-of-line-Prüfungen an fertigen Wasserstofftanks, die mit Helium oder Formiergas erfolgen können, liegen im Bereich $5 \cdot 10^{-2}$ mbar·l/s.

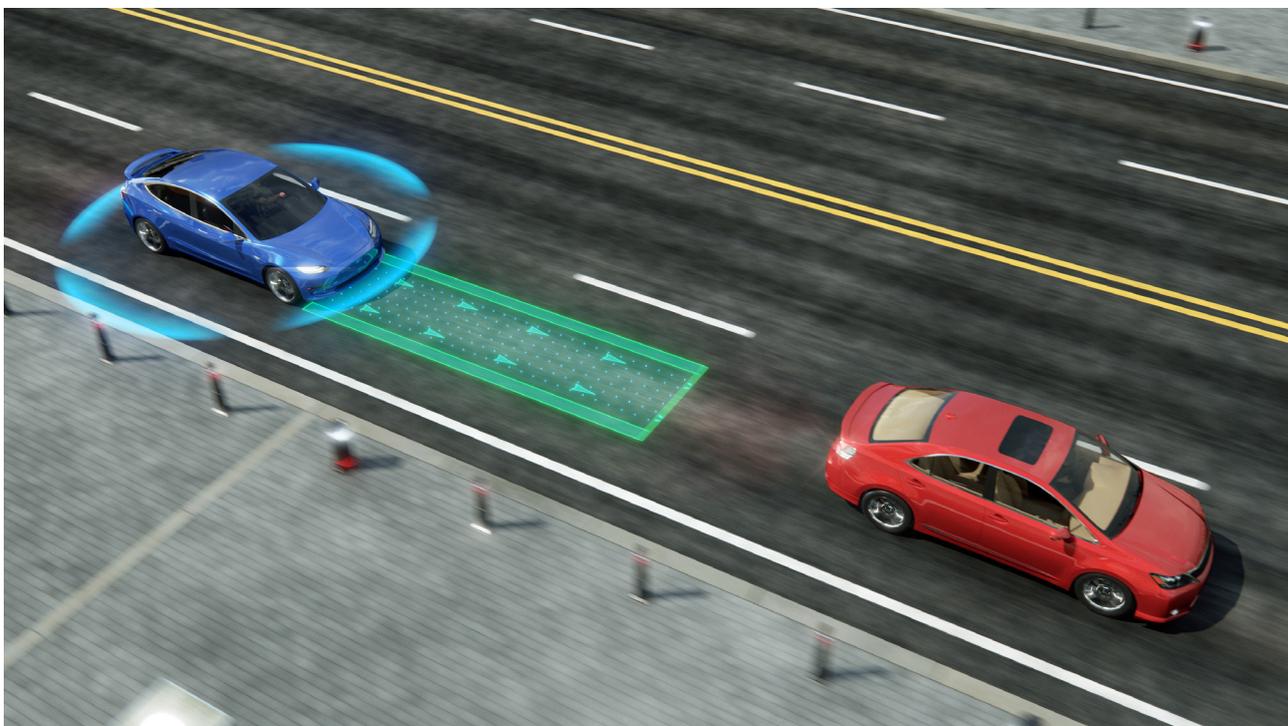


Dichtheitsprüfung beim Einbau der Komponenten ins Fahrzeug.

8 Elektrische und elektronische Komponenten

Der zentrale Feind aller elektrischen und elektronischen Komponenten in einem Fahrzeug ist naturgemäß Wasser. Entsprechend stellt die Wasserdichtheit der Gehäuse dieser Komponenten eine wichtige Anforderung dar – in der Regel geht es darum, dass sie der Schutzklasse IP67 genügen. Der enge Zusammenhang zwischen dem Gehäusematerial und den sich daraus ergebenden Anforderungen an die Grenzleckrate, gegen die geprüft werden muss,

wurde bereits in [Exkurs 1: IP67 – Das Gehäusematerial bestimmt die Grenzleckrate](#) beschrieben. Neben den generellen Anforderungen an die Wasserdichtheit von Gehäusen, wie sie etwa für die Power Control Units und die elektronischen Module der Fahrzeuge unerlässlich ist, kommen im Falle von Elektromotoren auch noch Dichtheitsanforderungen an deren Kühlkreisläufe hinzu. Im Falle von Advanced Driver Automation Systems (ADAS) wiederum ist unter anderem für deren Sensoren Gasdichtheit unverzichtbar, um eine dauerhafte Funktionssicherheit zu gewährleisten.



Autonomes oder teilautonomes Fahren benötigt funktionssichere Umgebungssensoren.

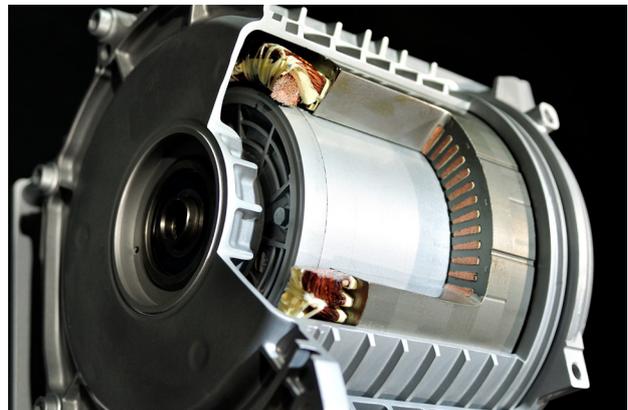
8.1 Sensoren und Steuermodule

Bislang werden Sensoren noch oft mit der wenig empfindlichen und stark temperaturabhängigen Druckabfallprüfung getestet. Erhöht sich die Temperatur während der Druckabfallprüfung, verschleiert dies potenzielle Lecks, während ein Abfall der Temperatur zu fälschlich identifizierten Lecks und Fehlalarmen führt. Mit den Anforderungen an autonom fahrende Fahrzeuge steigen aber die Ansprüche an die Zuverlässigkeit ihrer ADAS-Systeme, an die Dichtheit ihrer Radar (Radio detection and ranging)- und Lidar (Light detection and ranging)-Sensoren. Ein Six-Sigma-Ansatz, der 3,4 Fehler unter einer Million Fällen toleriert, ist im ADAS-Kontext unvorstellbar. Hersteller von ADAS-Komponenten verfolgen eine Null-Fehler-Strategie – mit einer tausendfach höheren Zuverlässigkeit. Entsprechend müssen Sensoren mit Radar- bzw. Lidar-Technologie nicht nur wasser-, sondern auch gasdicht sein, damit keinerlei Luftfeuchtigkeit in sie eindringen kann. Damit werden andere Dichtheitsprüfmethoden erforderlich. Hersteller prüfen ihre Radar- und Lidar-Sensoren darum mit einer Helium-Vakuumprüfung gegen Leckraten im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-7} mbar·l/s. Helium-Vakuumprüfungen kommen auch für Glasdurchführungen zum Einsatz, durch die Kabel in ein Gehäuse geführt werden.

Steuermodule bewerkstelligen einen Druckaus-

gleich bei sich verändernder Außentemperatur (was beispielsweise jahreszeitlich relevant ist) oft über eine wasserundurchlässige Gore-Tex® Membran. Hier dient die prüfgasbasierte Akkumulationsmethode zur Qualitätssicherung. Das Steuermodul wird zunächst unter einem Überdruck von bis zu maximal 100 mbar mit Helium beaufschlagt, sodass das Prüfgas durch die Membran in das Steuermodul eindringt. Anschließend kann das Helium durch ein etwaiges Leck wieder in eine Akkumulationskammer mit leichtem Unterdruck austreten, in der es sich ansammelt. So ist das Leck nachweisbar.

8.2 Elektrische Antriebsmotoren



Elektrischer Antriebsmotor für EVs.

Alle Fahrzeuge mit alternativen Antrieben verwenden letztlich Elektromotoren. Es ist unerlässlich, diese Antriebsmotoren sowohl daraufhin zu prüfen, dass kein Wasser von außen in sie eindringt, als auch darauf, dass es in ihrem

mit Wasser gefüllten Kühlmantel keine Leckagen gibt – weder nach außen noch in den Motor hinein. Schon bei ganz normaler Fahrzeugnutzung sind die Elektromotoren Wasser ausgesetzt, sei es durch Umwelteinflüsse wie Regen oder durch den Wasserstrahl eines Hochdruckreinigers, etwa in der Autowaschanlage. Entsprechend müssen die Gehäuse den Anforderungen der Schutzarten IP67 bis IP69 genügen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Kunststoff- oder Stahlgehäuse gegen Grenzleckraten im Bereich von 10^{-3} mbar·l/s und die anspruchsvolleren Aluminiumgehäuse gegen 10^{-5} mbar·l/s (bei 100 mbar Differenzdruck) zu prüfen.

Zudem verwenden immer mehr Elektromotoren eine aktive Wasserkühlung, die den Motor konstant auf idealer Temperatur hält, damit er mit maximaler Effizienz arbeitet. Als Kühlflüssigkeit dient normalerweise ein Wasser-Glykol-Gemisch. Die Dichtheit des Wasserkühlmantels ist zum einen wichtig, damit Wasser nicht in die elektrischen Bauteile des Motors eindringt und Kurzschlüsse verursacht. Zugleich darf die Kühlflüssigkeit aber auch nicht nach außen aus dem Kreislauf austreten und verloren gehen. Die typische Dichtheitsanforderung für den Kühlwasserkreislauf eines elektrischen Antriebsmotors liegt im Bereich von 10^{-3} mbar·l/s.

8.3 Vakuum- oder Akkumulationsprüfung für Motorengehäuse

Weil die Komponenten im Kühlwasserkreislauf für eine schnelle Wärmeübertragung ausgelegt sind, sind Dichtheitsprüfmethoden wie die Luft- oder Druckabfallprüfung prinzipiell überfordert: Sie sind viel zu empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen. Darum bieten sich bei diesen Aufgaben prüfgasbasierte Verfahren an.

Um die Wasserdichtheit der Gehäuse von Elektromotoren zu prüfen, eignet sich bei Materialien wie Stahl oder Kunststoff nicht nur die Vakuumprüfung mit Helium, sondern auch die Akkumulationsmethode, bei der als Prüfgas neben Helium auch ein unbrennbares Gemisch aus 5 Prozent Wasserstoff und 95 Prozent Stickstoff zum Einsatz kommt, das sogenannte Formiergas. Formiergas ist kostengünstiger als Helium, und auch die einfache Akkumulationskammer ist weniger aufwendig als eine Vakuumkammer. Bei der Akkumulationsprüfung wird das Gehäuse evakuiert, bei circa 5 bar (dem maximal zulässigen Druck für das Gehäuse) mit Prüfgas gefüllt und dann verschlossen. Das mit Prüfgas befüllte Gehäuse setzt man in eine Akkumulationskammer, in der das etwaig durch Lecks austretende Prüfgas akkumuliert und von einem Prüfgerät wie dem INFICON LDS3000 AQ nachgewiesen werden kann. Die Geschwindig-

keit des allmählichen Konzentrationsanstiegs des Prüfgases in der Kammer ist dabei ein Maß für die Leckrate. Für Aluminiumgehäuse allerdings, die gegen Leckraten im Bereich von 10^{-5} mbar·l/s (bei 1000 mbar Differenzdruck) geprüft werden müssen, empfiehlt sich die Prüfung mit der Vakuummethode. Sie ist zwar aufwendiger, hat aber auch die Vorzüge, empfindlicher zu sein und kürzere Taktzeiten zu gestatten als eine Akkumulationsprüfung.

8.4 Dichtheitsprüfung des Wasserkühlmantels

Um den Wasserkühlmantel des Gehäuses eines Elektromotors zu prüfen, verfährt man analog. Nur wird dabei ausschließlich der Hohlraum des Kühlmantels bei circa 2 bis 3 bar (oder beim maximal zulässigen Druck) mit dem Prüfgas gefüllt. Weil die Leckratenanforderungen vom Material abhängen, kann bei Stahl- und Kunststoffgehäusen die Akkumulationsmethode zum Einsatz kommen – wahlweise mit Helium oder Formiergas. Die Grenzleckrate beträgt dabei 10^{-3} mbar·l/s. Die anspruchsvolleren Aluminiumgehäuse werden stattdessen in der Vakuumkammer mit Helium geprüft – gegen Leckraten im Bereich von 10^{-5} mbar·l/s (bei 1000 mbar Differenzdruck).

9 Über INFICON

Die INFICON GmbH in Köln ist einer der weltweit führenden Entwickler, Produzenten und Anbieter von Instrumenten und Geräten für die Dichtheitsprüfung. Die Lecksuchgeräte werden bei anspruchsvollen Industrieprozessen in der Produktion und Qualitätskontrolle eingesetzt und decken eine große Bandbreite von Anwendungen ab. Hauptkunden von INFICON sind Hersteller und Serviceunternehmen von Klima- und Kühlgeräten, die Automobil- und Automobilzulieferindustrie, die Halbleiterindustrie sowie Hersteller von Dichtheitsprüfanlagen. Mit seinen jahrelangen Erfahrungen in der Dichtheitsprüfung und Lecksuche unterstützt INFICON nun auch die Lebensmittelindustrie und bietet hier die patentierte Contura S400 an.



INFICON blickt inzwischen auf mehr als 50 Jahre Erfahrung in der Lecksuchtechnik zurück. Über Produktionsstätten in Köln (Deutschland), Balzers (Liechtenstein), Linköping (Schweden), Syracuse (USA) und Shanghai (China) sowie über Vertriebsbüros in allen wichtigen Industrieländern und ein erweitertes Netz von Vertriebspartnern wickelt INFICON den weltweiten Vertrieb ab. Im Geschäftsjahr 2020 erreichte die INFICON AG mit ihren ca. 1100 Mitarbeitern einen weltweiten Umsatz von ca. 398 Mio. US\$. Die Namenaktien von INFICON (IFCN) werden an der SIX Swiss Exchange gehandelt.

10 Weitere Informationsquellen zur Dichtheitsprüfung an Automobilkomponenten

10.1 Dokumentserie über spezifische Dichtheitsprüfaufgaben

INFICON bietet eine ganze Reihe von Dokumenten, die beschreiben, wie spezifische Automobilkomponenten während der Fertigung effizient auf ihre Dichtheit geprüft werden können. Sie erfahren, welche Leckraten sinnvoll sind, welche Methoden sich eignen und wie die Prüfung durchgeführt wird. Alle PDFs dieser [Dokumentserie](#) sind auf der INFICON Website zum kostenlosen Download verfügbar.

Eine Auswahl:

Batteriezellen



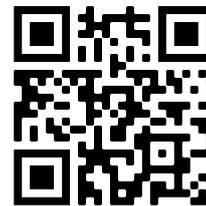
<https://bit.ly/3jFxfXJ>

Batteriepacks



<https://bit.ly/3rVFbaz>

Elektrische Antriebsmotoren



<https://bit.ly/3tLwjpv>

Bipolarplatten für Brennstoffzellen



<https://bit.ly/3d3jb9e>

Wasserstofftanks



<https://bit.ly/3pbMuJ2>

10.2 Weiterbildung in der INFICON ACADEMY



Der Sinn unserer INFICON ACADEMY besteht in der Qualifizierung Ihrer Mitarbeiter. Durch unsere Seminare möchten wir Ihnen helfen, die Effizienz Ihrer Dichtheitsprüfungen zu erhöhen. Unser umfassendes [Seminarprogramm](#) ist bewusst herstellernerneutral konzipiert. Wir vermitteln Ihnen die Grundlagen der Dichtheitsprüfung, geben einen Überblick über die gängigen Messverfahren und stellen unterschiedlichste Einsatzgebiete in den verschiedenen Branchen dar.

Zum vielfältigen Seminarprogramm gehören spezifische Veranstaltungen über:

- „Dichtheitsprüfung von Batterien und E-Fahrzeugen“
- „Dichtheitsprüfung von Brennstoffzellen und FCVs“
- „Roboterprüfsysteme“.

In der INFICON ACADEMY erhalten Sie das Know-how, das Sie brauchen, um das richtige Prüfverfahren für Ihre Applikation einzusetzen und um das volle Potenzial Ihrer Prüfmethode und Ihrer Prüfgeräte auszuschöpfen. Auch und gerade bei der Fertigung neuer automobiler Komponenten.

Lernen Sie von unseren Spezialisten: den Experten für Dichtheitsprüfung!

Impressum

Herausgeber: INFICON GmbH, Köln (www.inficon.com)

Redaktion und Layout: Möller Horcher Kommunikation GmbH, Offenbach und Freiberg
(www.moeller-horcher.de)

© INFICON 2021

Abbildungsnachweis

Titelbild	Shutterstock © buffaloboy	S. 17,19,18	INFICON
S. 5	Shutterstock © apiguide	S. 20	INFICON / WorldArtsMe © gulfy/
S. 6	Wikimedia Commons		Can Stock Photo © pix2go / Can
	© Tokumeigakarinoaoshima		Stock Photo © teshimine / Can
S. 8	INFICON /		Stock Photo © Makhnach
	RWTH Aachen, PEM	S. 22,23,25	INFICON
S. 9	INFICON	S. 27	INFICON /
S. 10	Shutterstock		Shutterstock © SasinTipchai
	© Kondrachov Vladimir	S. 28,29,30	INFICON
S. 11	INFICON	S. 32,33,34	INFICON
S. 12	INFICON / Can Stock Photo	S. 35	Shutterstock © metamorworks
	© panambapro /	S. 36	Shutterstock
	Clipart Library 1376954		© Sergii Chernov / INFICON
S. 13	INFICON	S. 37	Shutterstock
S. 15	INFICON / WorldArtsMe		© Polina Krasnikova / INFICON
	© gulfy Clipart Library 1376954/	S. 38	INFICON / INFICON
	Can Stock / Photo © Makhnach/	S. 39,40	INFICON
	Can Stock Photo © pix2go / Can	S. 41	Wikicommons
	Stock Photo © konstantinks /	S. 43	INFICON
	WorldArtsMe © gulfy	S. 44	Shutterstock
S. 16	INFICON / Can Stock Photo		© metamorworks / INFICON
	© konstantinks / Clipart Library	S. 45	Shutterstock © temp-64GTX
	1376954 / Can Stock Photo	S. 46	Shutterstock © loraks
	© Makhnach / Can Stock Photo	S. 49,51	INFICON
	© pix2go / Can Stock Photo		
	© konstantinks		

Kontakt

INFICON GmbH

Vertrieb Bereich Automotive

Bonner Straße 498

50968 Köln

Deutschland

Tel: +49(0)221-56788-100

E-Mail: reach.germany@inficon.com

Internet: <https://www.inficon.com/de/maerkte/automobilindustrie/>