

Abschlussbericht

Teil I Kurzdarstellung

Projekt: Wasserstoffdosierventil

Förderkennzeichen: 03BI101

Vorhabensbezeichnung:

Wasserstoffdosierventil für die Anodengasversorgung von Kfz-Brennstoffzellensystemen, Hydrogen Gas Injector (HGI)

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2008 bis 31.12.2013



Autoren: Heiko Jung, Hubert Stier, Frank Ilgner, Ralf Schindler
(alle Robert Bosch GmbH)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1. Aufgabenstellung

Das Vorhabensziel war die Entwicklung eines Wasserstoffdosierventils für die Anodengasversorgung von Kfz-Brennstoffzellensystemen, welches die Anforderungen an Funktionalität, Zuverlässigkeit und Sicherheit unter automobilen Einsatzbedingungen erfüllt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde (Rahmenbedingungen)

2.1 Energie- und umweltpolitische Rahmenbedingungen

Im Projektantrag wurde bereits ausgeführt, dass das so genannte Wasserstoffmanifest des Europäischen Parlaments vom 12. September 2005 den Aufbau einer grünen, d.h. sauberen Wasserstoffwirtschaft in kürzest möglicher Zeit fordert. Zielsetzung ist die Sicherstellung der langfristigen Energieversorgung bei Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. Durch Nutzung regenerativer Energiequellen zur Herstellung des Wasserstoffs (H₂) wird eine nachhaltige Reduzierung der CO₂-Emissionen erreicht.

Die Ereignisse der Atomkatastrophe in Fukushima/Japan und die energiepolitische Konsequenzen des beschlossenen Atomausstiegs in Deutschland führen zu einem forcierten Aufbau regenerativer Energiequellen (Energiewende). Dies bedeutet, dass die Energiespeicherung eine zunehmende energiepolitische Bedeutung erlangt. Hierbei wird Wasserstoff und damit auch die mögliche direkte Nutzung des Wasserstoffs in Brennstoffzellenfahrzeugen in Zukunft von großer Wichtigkeit sein.

2.2 Beschäftigungspolitische Rahmenbedingungen

Im Zeitraum 2009/2010 erlebte Deutschland die Phase einer Rezession die unter anderem mit umfangreichen beschäftigungspolitischen Maßnahmen aufgefangen werden musste. Das HGI-Projekt fand in diesem beschäftigungsmäßig kritischen Zeitraum statt und hatte dadurch in dieser Rezessionsphase eine positive Auswirkung auf Beschäftigung bei den im Rahmen des Projekts tätigen Unternehmen, darunter viele KMU.

2.3 Technologische und kommerzielle Rahmenbedingungen

Industrie und Forschung haben sich bisher primär auf die Entwicklung und Verbesserung der Brennstoffzelle selbst fokussiert. In der Brennstoffzellen-Peripherie wurden bisher häufig vorhandene Erzeugnisse aus anderen Anwendungsgebieten, teilweise mit angepasster Funktion, verwendet. Die auf Grundlage der bisher existierenden Komponenten vorliegenden Aussagen zur Serienherstellbarkeit und zu den Serienkosten von Brennstoffzellenfahrzeugen haben gezeigt, dass die Brennstoffzellentechnologie auf Grundlage dieser Aussagen noch nicht für die Serieneinführung geeignet ist. Im Weiteren waren die zu Projektbeginn bekannten Brennstoffzellensysteme noch sehr komplex, was wiederum zu hohen Kosten und ungünstiger Wirtschaftlichkeit führt.

Die Fahrzeughersteller haben diese Situation erkannt und es sind substantielle Vereinfachungen in der Architektur der Brennstoffzellensysteme erkennbar. Dabei ist festzustellen, dass das Wasserstoffdosierventil eine Kernkomponente darstellt, welche in allen bekannten Automotive Systemen Anwendung findet. Deshalb hat die Entwicklung dieser Komponenten aus technischer und kommerzieller Sicht eine hohe Nachhaltigkeit.

2.4 Internationale Positionierung der deutschen Unternehmen

Bereits vor Beginn des HGI-Projekts war festzustellen, dass die Aktivitäten zum Thema Brennstoffzellentechnologie außerhalb Deutschland, vor allem im asiatischen Raum sehr ausgeprägt sind. Es bestand und besteht weiterhin die Notwendigkeit, die Marktposition der deutschen Automobilindustrie, der Automobil-Zulieferer und der damit verbundenen Unternehmen, häufig KMU, zu verbessern.

2.5 Markt-Rahmenbedingungen in Deutschland

Zum Zeitpunkt des Projektantrags existierte noch kein Serienmarkt für Brennstoffzellenfahrzeuge. Daher war die Entwicklung eines HGI-Qualitätsprototyps nicht unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu rechtfertigen. Im Verlauf des Projekts war in der gesamten Automobilindustrie eine starke Zunahme im Bereich der batterieelektrischen Mobilität festzustellen mit der Konsequenz der finanziellen Fokussierung auf diese Technologie. Eine Allianz von Fahrzeugherstellern hatte im Herbst 2009 angekündigt, Brennstoffzellenserienfahrzeuge im Zeitraum 2014/2015 in den Markt zu bringen. Die uns vorliegenden Markterwartungen gehen von relevanten Serienstückzahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen im Horizont 2018 bis 2020 aus.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Arbeitsinhalte

Die folgende Tabelle zeigt alle im Projekt geplanten Arbeitspakete

| lfd. Nummer | Arbeitspakete |
|-------------|--|
| 1 | AP1 Theoretischer Lösungsansatz 1.1 Verifizierung Lastenheft durch Analyse Gesamtsystem BZ 1.2 Modellierung Simulationsmodell 1.3 Theoretische Auslegung Gesamtsystem Dosierventil am Verhaltensmodell |
| 2 | AP2 Konzeptentwurf, Machbarkeit 2.1 Ausarbeitung Gesamtkonstruktion 2.2 Systemintegration 2.3 Bestätigung und Qualifizierung Lösungskonzept 2.4 Kostenbetrachtung |
| 3 | AP3 Prüfkonzept 3.1 Festlegung Prüfkonzept incl. Erprobungsstrategie 3.2 Typzulassung nach ECE 3.3 Auslegung, Aufbau und Erweiterung von Prüfeinrichtungen |

Hystereseeigenschaften. Erste Abschätzungen hatten bereits vorab gezeigt, dass das bisher im Projektverlauf gewählte Grundkonzept in der Lage ist, die zusätzlichen Anforderungen zu erfüllen.

Der Verlauf der Arbeiten der Projektverlängerung erfolgte schneller als erwartet. Die durch Simulation gewonnenen Erkenntnisse wurden technisch umgesetzt und zeigten bereits in ersten Versuchen die erwünschten Ergebnisse. Damit konnte auf die in der Planung vorgesehene Rekursion verzichtet werden, was zu einem erfolgreichen Abschluss der Arbeiten bereits Ende 2013 führte.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

In Demonstrations- und Versuchsfahrzeugen wurden zur Dosierung des Wasserstoffs in der Regel Ventile aus der Industrietechnik oder modifizierte Komponenten aus vorhandenen Automotive-Anwendung eingesetzt. Einsatzgebiete waren dabei beispielsweise stationäre oder automobiler Gasmotoren, bei denen Erdgas oder Wasserstoff als Kraftstoff verwendet wurde. Während bei der Kfz-Anwendung die „Erdgaseinblasetechnologie“ bereits Serienstand erreicht hatte, waren Einblaseventile für die H₂-Verbrennung nur im Rahmen von Demonstrationsprojekten erprobt.

Aufgrund der intermittierenden Arbeitsweise der Kolbenmaschine waren solche Ventile als sogenannte Taktventile ausgelegt und hatten demnach im Wesentlichen die beiden Betriebszustände „offen“ oder „geschlossen“. Die Dosierung der für die Verbrennung erforderlichen Kraftstoffmenge erfolgt analog zum Benzin- oder Dieseleinspritzventil über die Öffnungszeit je Takt des Ventils.

Um eine ausreichende Menge von Wasserstoff für die BZ bereitzustellen, wurden zwei bis vier Wasserstoffdosierventile auf Taktventilbasis (z. B. NGI2, Natural Gas Injector 2) parallel geschaltet.

Eine Vorarbeit für das Vorhaben war neben Untersuchungen im stationären und portablen Bereich der Bosch-interne Aufbau eines Brennstoffzellenlabors samt Sicherheitskonzept sowie der Aufbau eines Prüfstandes für ein 5 kW-Brennstoffzellensystem im Entwicklungszentrum in Schwieberdingen, mit dem erste Schritte zur Auswahl von Komponenten und zum Zusammenspiel der Komponenten samt Steuerung und Regelung gemacht wurden. Bosch war im europäischen Förderprojekt im 5. Rahmenprogramm im Projekt NFCCPP tätig, um eine Brennstoffzellensystem-Simulation aufzubauen. Ziel war die Austauschbarkeit und den vertraulichen Umgang mit verschiedenen Simulationsmodellen von unterschiedlichen Zulieferern zu sichern.

Untersuchungen auf dem Gebiet der H₂-Verträglichkeit von Werkstoffen wurden bezüglich einzelner potenziell kritischer Aspekte durchgeführt. Diese betrafen die Auswahl und Qualifizierung von geeigneten Werkstoffen, den Einfluss eines Fertigungsverfahrens, den Aufbau einfacher Laboreinrichtungen zur Darstellung der Funktionalität sowie erste Untersuchungen für eine spätere Absicherung der Lebensdauer von H₂-Komponenten.

Ein schnelles Verfahren, die H₂-Empfindlichkeit von Werkstoffen zu testen und somit eine Vorauswahl von geeigneten Werkstoffen durchführen zu können, bietet der Scheibenberstversuch. Eine solche Versuchseinrichtung für Drücke bis zu 300 bar wurde aufgebaut und erste Werkstoffe damit untersucht.

Um die Funktion sowie die Haltbarkeit von potenziellen BZ-Komponenten in H₂ darstellen zu können, wurde ein Versuchsstand aufgebaut. Darin können Komponenten komplett in einer Wasserstoffatmosphäre von bis zu 20 bar ausgelagert und im Betrieb getestet werden. Mit Hilfe von Taktventilen wurde darin der Einfluss des Wasserstoffs auf typische Verschleissstellen untersucht.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Darstellung aller Entwicklungspartner und Forschungseinrichtungen, mit denen im Rahmen des Projektes zusammen gearbeitet wurde, finden sich in III. Erfolgskontrollbericht wieder.

Abschlussbericht

Teil II Eingehende Darstellung

Projekt: Wasserstoffdosierventil

Förderkennzeichen: 03BI101

Vorhabensbezeichnung:

Wasserstoffdosierventil für die Anodengasversorgung von Kfz-Brennstoffzellensystemen, Hydrogen Gas Injector (HGI)

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2008 bis 31.12.2013



Autoren: Heiko Jung, Hubert Stier, Frank Ilgner, Ralf Schindler
(alle Robert Bosch GmbH)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Gesamtziel

Das öffentlich geförderte Projekt „Wasserstoffdosierventil für die Anodengasversorgung von Kfz-Brennstoffzellensystemen - Hydrogen Gas Injector“ hatte zum Ziel, automobiltaugliche Qualitäts-Prototypen von elektromagnetisch betriebenen Wasserstoffdosierventilen zu entwickeln. Diese sollen geeignet sein, die Anforderungen an Funktionalität, Zuverlässigkeit und Sicherheit unter automobilen Einsatzbedingungen zu erfüllen.

Teilziele

Automotivetauglichkeit bedeutet im Wesentlichen:

- eine genügende Robustheit für den Einsatz im Kraftfahrzeug unter allen feldrelevanten Bedingungen
- eine hohe Zuverlässigkeit
- sicheren Betrieb
- kraftfahrzeugübliche Lebensdauer
- die Eignung der Konstruktion zur Serienfertigung in großen Stückzahlen bei geringen Durchlaufzeiten, gleichbleibender Qualität und zu geringen Kosten

Folgende Teilziele sollen erreicht werden:

- Erstellung, Analyse und Bewertung eines Komponentenlastenheftes
- Ausarbeitung einer Gesamtkonstruktion für die Komponente
- Festlegung eines Prüfkonzepts und der Erprobungsstrategie
- Planung, Auslegung und Aufbau von Testeinrichtungen
- Theoretische und Experimentelle Absicherung der Werkstoffe/Bauteile in Bezug auf Wasserstoffversprödung
- Nachweis der Funktion und Dauerhaltbarkeit an Mustern
- Auswahl von Fertigungsprozessen mit Blick auf Industrialisierung
- Aufbau und Gesamterprobung von Qualitätsprototypen

Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses aus den Arbeitspaketen

AP 1 Theoretischer Lösungsansatz

Inhalt des AP1 war die Entwicklung und Validierung des theoretischen Lösungsansatzes für das HGI-XL. Basis hierfür bilden die aus den Systemeigenschaften abgeleiteten Anforderungen an die Hauptfunktionen des Ventils sowie die Randbedingungen, unter denen diese vom HGI-XL erreicht werden müssen.

Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Darstellung eines Lastenheftes für die erforderlichen Ventulfunktionalitäten und der relevanten Systemrandbedingungen in Zusammenarbeit mit dem Systemhersteller.
- Die Designmerkmale des HGI-XL (insbesondere bzgl. Strömungsgeometrie und Dichtheitsanforderungen) wurden auf Basis der definierten Größen unter Einsatz analytischer Verfahren sowie CFD- und FEM-Simulationen ausgelegt.

- Es wurden Musterventile verschiedener Entwicklungsstufen aufgebaut und umfangreiche Funktionstests (Durchsatz, Dichtheit, Kaltstartfähigkeit, Vollastfähigkeit, Dynamik, ...) durchgeführt. Mittels dieser Ergebnisse wurde der Lösungsansatz für das HGI-XL hinsichtlich Funktionserfüllung versuchstechnisch abgesichert.
- Ein Komponentenmodell für das HGI-XL wurde erstellt und in eine Teilsystemsimulation implementiert. Anhand dieser Simulation wurde ein Verfahren zur Vorsteuerung des Ventils im Regelbetrieb validiert.
- Anhand der Simulationsmodelle wurde der theoretische Nachweis der Robustheit des HGI-XL gegenüber Fertigungsstreuungen und Lebensdauereffekten erbracht.
- Die Funktionalität des HGI-XL im System wurde anhand dynamischer Teilsystemsimulationen analysiert und validiert.

Die Anforderungen an das HGI-XL wurden über den formalen Abschluss von AP1.1 in 03/09 hinaus weitergeführt. Damit wurden auch neue technologische Entwicklungen im Anodenpfad der Brennstoffzelle berücksichtigt. Dazu gehören im Wesentlichen Anforderungen aus dem Einsatz von Jetpumps zur Wasserstoffrezirkulation sowie Anforderungen aus der gepulsten Wasserstoffbereitstellung. Diese Anforderungen wurden auch laufend in den Simulationen aus AP1.2 und im Verhaltensmodell aus AP1.3 ein.

AP 1.1 Verifizierung Lastenheft durch Analyse Gesamtsystem BZ

Abbildung 1.1.1 zeigt die prinzipielle Systemumgebung des Ventils und die für Funktionalität und Lebensdauer relevanten Betriebsrandbedingungen. Die Hauptfunktion des Ventils ist, den für die elektrische Belastung der Brennstoffzelle (BZ) erforderlichen Druck p_{nach} vor der Anode durch Zumessung der in die BZ eintretenden Wasserstoffmenge Q_{H_2} einzustellen. Im stationären Zustand entspricht die vom HGI-XL dosierte Menge der in der BZ in elektrischen Strom umgesetzten Menge an H_2 . Die Ansteuerung des Ventils erfolgt über ein Steuergerät. Der maximal mögliche Strom I_{Spule} mit dem das HGI-XL betrieben werden kann hängt damit von der Versorgungsspannung U_{batt} des Steuergerätes und dem Widerstand der Magnetspule ab, der wiederum durch die Umgebungstemperatur beeinflusst wird. Die Temperatur T_{vor} und der Druck p_{vor} des in das HGI-XL eintretenden Gases haben einerseits über die Gasdichte andererseits über die druckabhängige Kennliniencharakteristik $Q(I)$ des Ventils Einfluss auf die dosierte Gasmenge Q_{H_2} .

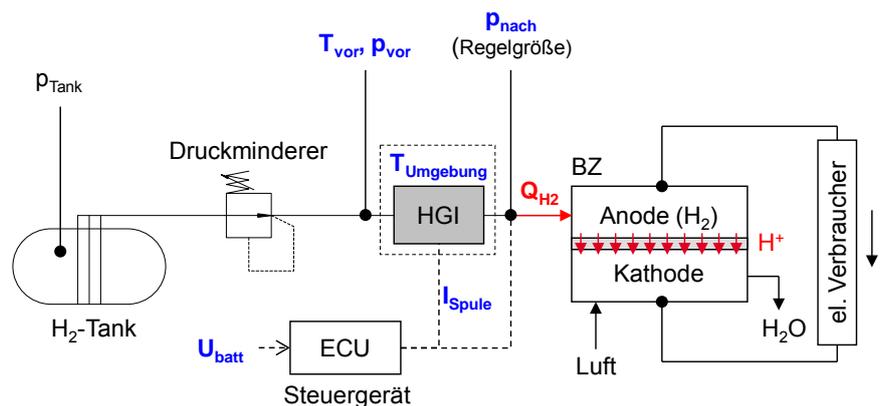


Abbildung 1.1.1: Systemumgebung und Randbedingungen HGI

Ausgehend vom Betriebsverhalten der Brennstoffzelle wird zur Zumessung des Betriebsstoffs H_2 ein Ventil in Ausführung als Proportionalventil favorisiert. Im Gegensatz zum verbrennungsmotorischen Prozess ist hier eine kontinuierliche Zuführung des Kraftstoffes erforderlich. Der Einsatz eines nicht getaktet betriebenen Ventils bietet zudem Vorteile bzgl. der Geräuschproblematik.

Abbildung 1.1.2 zeigt das Funktionsprinzip und das grundsätzliche Design des Lösungsansatzes für das HGI-XL. Die entgegen der Federkraft wirkende Magnetkraft öffnet das Ventil mit Unterstützung der Druckkraft und gibt im Dichtsitz den hubabhängigen Drosselquerschnitt für das zwischen Verschluss und Düse strömende Gas frei. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Dichtheit ist der Dichtsitz des Ventils als Elastomerdichtung ausgeführt. Um den H_2 -Durchsatz über eine kontinuierliche (proportionale) Verstellung des Ventilhubes einstellen zu können, ist ein stabiles Gleichgewicht der wirkenden Druck- Feder- und Magnetkräfte erforderlich. Die Geometrie der Strömungsquerschnitte $A_{Düse}$ in der Düse und $A_{Dichtsitz}$ zwischen Elastomerdichtung und Dichtlippen ist dabei sowohl entscheidend für den Massenstrom Q als auch für die sich einstellende Druckkraft. Bei der Auslegung der Strömungsquerschnitte muss deshalb das komplexe Zusammenspiel aller relevanten Parameter berücksichtigt werden.

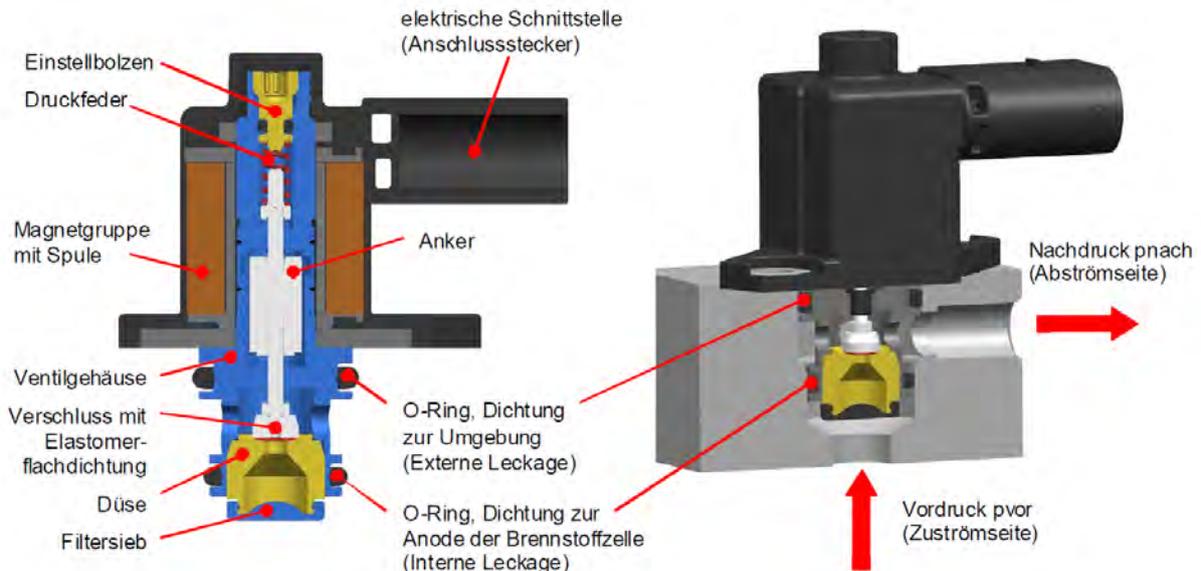


Abbildung 1.1.2: Funktionsprinzip und Ventildesign

Die Wechselwirkungen der Anforderungen, Randbedingungen und Designmerkmale des Ventils hinsichtlich der geforderten Funktionalität sind hochkomplex und werden im Rahmen des Projekts unter anderem laufend in einer Konstruktions-FMEA analysiert und bewertet. Um die Auswirkungen potenzieller Fehler des Ventils auf das Verhalten des Gesamtsystems bewerten zu können, wurden die Schnittstellen der Konstruktions-FMEA zur System-FMEA abgeglichen.

Tabelle 1.1.1 zeigt die Übersicht über die wesentlichen Zusammenhänge bei der Auslegung des Ventils. Die Funktionen und Randbedingungen entsprechen einem qualitativen Auszug aus dem erstellten Lastenheft.

Darin ist erkennbar, dass zur Erfüllung der Funktionalität über dem Betriebsbereich teilweise gegensätzliche Anforderungen hinsichtlich der Auslegung der Designmerkmale des HGI-XL gestellt werden.

Die Detaillierung dieser und weiterer Spezifikationen (z.B. Partikelbeladung, Feuchte- und Eisbildung im Ventil) sowie deren Absicherung erfolgte in den Arbeitspaketen 2.1 und 2.2. zur Systemintegration und zur Qualifizierung des Lösungskonzeptes.

| Funktionalität | Funktionsparameter | Auslegungsrelevante Randbedingung | Bedeutung | Konsequenz für Ventilparameter/-design |
|--|---|--|--|--|
| Vollastfähigkeit | Volllastdurchsatz | minimaler Vordruck maximaler Nachdruck maximale Gastemperatur maximale Umgebungstemperatur minimale Batteriespannung | Geringe Gasdichte und geringer Öffnungsdruck. Hoher Ventilwiderstand Ventilstrom eingeschränkt | Strömungsquerschnitt und Abströmquerschnitt groß. Federkonstante klein (oder Magnetkraftverlauf über Strom steil). |
| interne Dichtheit | interne Leckagerate | maximaler Vordruck minimaler Nachdruck | Hohe Druckkraft (öffnend) | Strömungsquerschnitte klein und Federvorspannung hoch. Geringes Lagerspiel. |
| Regelbarkeit (auch abhängig von Systemeigenschaften und Regelungskonzept) | Steigung Q(I)-Kennlinie | gesamter Druck-, Temperatur und Durchflußbereich Auflösung Ansteuersignal (ECU) | Steigung der Q(I)-Kennlinie nicht konstant im Betriebsbereich | Federkonstante hoch (oder Magnetkraftverlauf über Strom flach). |
| | Hysterese Q(I)-Kennlinie | gesamter Druck-, Temperatur und Durchflußbereich | Einfluß auf Stabilität der Regelung | Geringe magnetische Hysterese. Geringe Reibung/hohes Lagerspiel. |
| | Verlauf Feder-, Druck- und Magnetkraft (stabiles Kräftegleichgewicht) | gesamter Druck-, Temperatur und Durchflußbereich | Einfluß auf Stabilität der Regelung und Ventil (Geräusch, Verschleiß) | Gleichförmiger Verlauf Magnetkraft (Tauchstufe). |
| externe Dichtheit | externe Leckrate und Permeation | maximaler Vordruck minimale Temperatur (Leckage) maximale Temperatur (Permeation) | hohes (Partial-)druckgefälle Elastomere nicht mehr flexibel hohe Permeationsraten | Geringe Permeationsquerschnitte (kleines Ventil). Geeignete Werkstoffe hinsichtlich Flexibilität bei Tieftemperatur und Permeation bei Hochtemperatur. |

Tabelle 1.1.1: Zusammenhang wesentlicher Funktionsgrößen, Randbedingungen und Designmerkmale

AP 1.2 Modellierung Simulationsmodell und Funktionstests

Wie aus Tabelle 1.1.1 ersichtlich hat der Strömungsquerschnitt in der Düse eine große Bedeutung für die Funktionen „Vollastfähigkeit“ und „interne Dichtheit“.

Der Strömungsquerschnitt muss so ausgelegt sein, dass ein für den Betrieb des Fahrzeugs ausreichender Durchfluss auch bei ungünstigen Randbedingungen gewährleistet werden kann. Dies erfordert tendenziell einen großen Querschnitt, damit auch bei geringer Gasdichte noch ausreichend Wasserstoff dosiert werden kann. Große Querschnitte führen bei hohem Differenzdruck über dem Ventil hingegen zu einer hohen, öffnend wirkenden Druckkraft, die bei abgeschaltetem Ventil durch die Federvorspannung überkompensiert werden muss, um das Ventil dicht zu halten.

Zur Auslegung der Strömungsquerschnitte wurde ein analytisches Modell erstellt, anhand dessen die Ventilcharakteristik in Form der Strom-Durchsatz-Kennlinie $Q(I)$ in Abhängigkeit der Druck- und Temperaturbedingungen des Gases abgeschätzt. Das Modell wurde durch entsprechende Messungen validiert. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten. Mittels des validierten Modells wurden die geometrischen Parameter des HGI-XL so ausgelegt, dass über dem für automotiv Anwendungen durch das Steuergerät darstellbaren Strombereich von bis zu ca. 3A der geforderte Durchsatz erreicht wird.

Zur weiteren Verifizierung des Modells und zur detaillierten Untersuchung der Strömungseigenschaften im HGI-XL sowie deren Einfluss auf die Funktionalität wurden umfangreiche CFD-Simulationen durchgeführt. Damit wurde die Innenströmung eines 1. Musterstandes (Prototypen) unter verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht. Es wurde insbesondere der Einfluss des Hubes, der Temperatur und des Mediums auf den Durchfluss und die pneumatische Öffnungskraft quantifiziert und dabei auftretende physikalische Effekte erklärt. Die Ergebnisse wurden mit Messdaten validiert und das analytische Auslegungsprogramm auf Plausibilität und Allgemeingültigkeit überprüft. Darüber hinaus wurden analytische Korrelationen für die Umrechnung des Durchflusses unter verschiedenen Betriebsbedingungen (Temperatur, Medium, Druck) abgeleitet und deren Genauigkeit anhand von CFD-Ergebnissen quantifiziert.

Auf Basis der Ergebnisse für die prototypische Auslegung wurden Geometrieoptimierungen (z. B. Kontur der Dichtlippen, mechanischer Anschlag am Verschluss) unter Beachtung von Fertigungsaspekten und Funktionalitäten wie Kaltstartfähigkeit für den nächsten Musterstand umgesetzt und deren Einfluss auf Funktionsgrößen untersucht. Mittels der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurde das Design des Funktionsmusters festgelegt. Die CFD-Simulation erwies sich dabei als hilfreiches Tool zur Ventiloptimierung und lieferte einen mit Messungen nicht darstellbaren Einblick in die komplexe Innenströmung des Ventils.

Die Validierung des analytischen Auslegungsprogramms ergab eine gute Vorhersagequalität. Das erstellte Modell wurde daher auch bei Aktualisierungen der Randbedingungen bzw. Anforderungen

eingesetzt, und erforderliche Anpassungen am Design des Ventils schnell bewertet. Die abgeleiteten Ziellösungen für das Design wurden jeweils durch CFD- oder Messdaten validiert.

Neben der Optimierung des Ventildesigns für die Durchflussfunktionalität lieferten die CFD-Rechnungen weitere Ergebnisse hinsichtlich Temperaturverteilung und Wärmeableitung im HGI-XL sowie zur Korrelierbarkeit der Medien N_2 zu H_2 .

Diese Ergebnisse lieferten wichtige Erkenntnisse bzgl. der Möglichkeiten und Anforderungen hinsichtlich Funktions- und Dauererprobung des HGI-XL:

- Einsatz von N_2 anstatt H_2 ist bei Funktionsprüfungen möglich. Damit wird eine Kostenreduzierung in Entwicklung und Fertigung erreicht.
- Für die Absicherung der Lebensdauer, insbesondere hinsichtlich thermischer Schockwechselbelastung und H_2 -Beständigkeit der Werkstoffe (vgl. AP3 und AP4), ist der Einsatz von Wasserstoff als Prüfmedium erforderlich. Bei der Planung und dem Aufbau der entsprechenden Prüfeinrichtungen wird dies berücksichtigt.

Zusätzlich zu den theoretischen Betrachtungen wurden zur Bewertung des Lösungsansatzes für das HGI-XL Funktionstests mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

- Durchsatz / Vollastfähigkeit:
Spezifikation erreichbar mit zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen (Verringerung der Federkonstanten)
- Steigung der Kennlinie (Regelbarkeit):
Spezifikation noch nicht erreicht. Regelbarkeit im System jedoch gegeben. Weitere Untersuchungen erforderlich (vgl. AP 1.3).
- Linearisierbarkeit der Kennlinien (Regelbarkeit):
Spezifikation noch nicht über gesamten Betriebsbereich erreicht. Regelbarkeit im System jedoch gegeben. Weitere Untersuchungen erforderlich (vgl. AP 1.3).
- Interne Leckage:
Spezifikation erreichbar mit zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen.
- Externe Dichtheit:
Spezifikation mit Prototyp nicht erreicht über Temperaturbereich. Weitere Optimierung des Designs erforderlich. Umsetzung hierzu vgl. AP 4.
- Kaltstartfähigkeit:
Spezifikation erreicht mit Prototyp.
- Dauerlaufstest (ca. 600h) in H_2 :
Trockenlauf in Lagerbuchsen als betriebsrelevanter Verschleißmechanismus identifiziert. Erforderliche Designänderung wurde durch Anpassung Material umgesetzt vgl. AP

AP 1.3 Modellerstellung und Teilsystemsimulation

Zur Abschätzung des Ventilverhaltens im System wurde ein Komponentenmodell basierend auf den experimentell ermittelten Kennfelddaten erstellt und die Möglichkeiten zur Linearisierung der Kennliniencharakteristik des HGI-XL innerhalb der Druckregelung im Anodenpfad verifiziert. Der Fokus lag dabei auf der Kompensation des Einflusses von Druck und Temperatur zur Linearisierung der Ventilcharakteristik (Q(I)-Kennlinien) des Ventils. Die Ergebnisse der Simulation in stationären Betriebspunkten zeigten, dass eine Linearisierung der Ventilcharakteristik über dem gesamten Betriebsbereich unter Berücksichtigung der in Realität auftretenden Ungenauigkeiten bei Messung der relevanten Betriebsgrößen sowie Streueffekten nicht ohne erheblichen Aufwand umsetzbar ist.

Durchgeführte Messungen im System zeigten, dass auch mit einem einfachen Regelungsansatz die Systemanforderungen an die Druckregelung mit dem aufgebauten HGI-XL-Funktionsmuster grundsätzlich erreicht werden können. Die Anforderungen an die für die Regelbarkeit relevanten Eigenschaften des HGI-XL (vgl. Tabelle 1), insbesondere die Steigung der Q(I)-Kennlinie, wurden auf Basis dieser Ergebnisse an die tatsächlichen systemseitigen Anforderungen angepasst.

Um die experimentellen Ergebnisse abzusichern und optimierte Regelungsansätze ableiten zu können wurde ein Teilsystemmodell erstellt, mit dem auch die dynamischen Effekte im Regelkreis des Anodenpfades untersucht wurden. Das Teilsystemmodell wurde innerhalb der Simulationsumgebung Matlab/Simulink. Das Modell bildet sowohl die Kraft/Hub-Charakteristik des Ventils als auch seine Hub/Durchfluss-Charakteristik ab.

Das Modell wurde zunächst für den ersten Musterstand parametrisiert und gibt das Durchflussverhalten mit guter Genauigkeit wieder (vgl. Abb. 1.3.1). Damit wurde der Einfluss von Auslegungsparametern des HGI-XL wie Federkonstante oder Düsengeometrie sowohl auf die Durchflusskennlinie als auch auf das Systemverhalten (Druckregelbarkeit) untersucht.

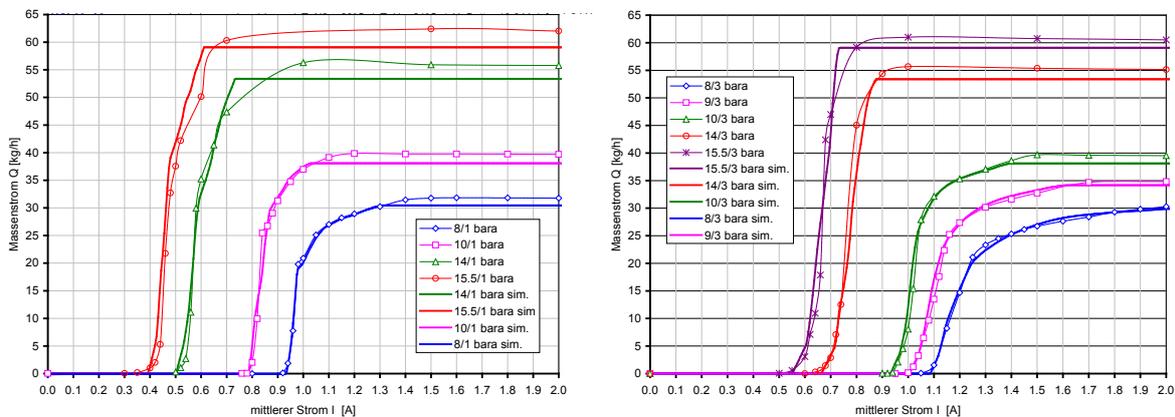


Abb. 1.3.1: Gemessene und simulierte N_2 -Durchflusskennlinien bei variablem Vordruck mit Nachdruck 1 bar (links) und 3 bar (rechts)

Für diese Analyse wurde das Modell zunächst in ein vereinfachtes Modell des Anodensystems integriert. Dabei wurde der Vordruck des HGI-XL als konstant angenommen und die Anode als Volumen abgebildet, aus dem der entsprechend dem elektrischen Strom umgesetzte H_2 -Stoffstrom abgezogen wird. Im Zuge der Reglerauslegung wurden verschiedene Ansätze zur Vorsteuerung und Reglerkonfiguration untersucht. Es zeigte sich, dass mit einem einfachen PI-Regler eine zufriedenstellende Regelgüte erreichbar ist. Um mit den durchgeführten Versuchen zur Druckregelbarkeit konsistent zu bleiben, wurde der Öffnungsstrom des HGI-XL in Abhängigkeit der Druckdifferenz am Ventil vorgesteuert.

Um die Druckregelung zu testen wurden zunächst synthetische Lastprofile bei variierendem HGI-XL-Vordruck simuliert. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Druckregel-Versuche ergibt sich für die Parameter des vorübergehenden Musterstands (stabiles Ventilverhalten) eine zufriedenstellende Regelgüte.

Die Einflüsse der auftretenden Kräfte (pneumatische Kraft, Magnetkraft) bzw. Ventilparameter (Federkonstante) auf das Regelverhalten wurden anhand einer Parameterstudie untersucht. Es zeigte sich, dass ein zu hoher Gradient der pneumatischen Kraft in bestimmten Betriebsbereichen zu Huboszillationen führt (vgl. Abb. 1.3.2 rechts). Die daraus resultierenden Druckoszillationen konnten auch in den Versuchen mit dem aktuellen Musterstand beobachtet werden. Daraus lässt sich auf ein nicht stabiles Betriebsverhalten des Ventils schließen. Bei geringen Hubamplituden wirken sich diese kaum auf den Druckverlauf in der Anode aus, so dass die Regelbarkeit auch für dieses nicht stabile Ventilverhalten gegeben ist. Allerdings könnten sich die Oszillationen negativ auf die Geräuschentwicklung und die Lebensdauer (erhöhter Verschleiß) auswirken. Ein stabiles Ventilverhalten ist daher in jedem Fall anzustreben.

Für die stabile Regelung im System ist somit nicht die Steigung der $Q(I)$ -Kennlinie allein sondern vielmehr die Streuung bzgl. Steigung und Lage sowie stabiles Ventilverhalten durch eine geeignete Auslegung relevant.

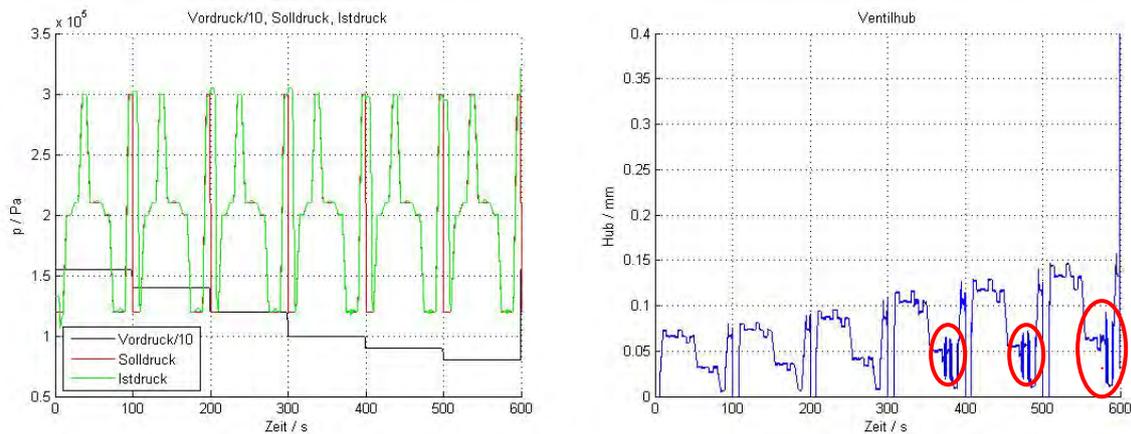


Abb. 1.3.2: Simulierter Verlauf von Druck (links) und Ventilhub (rechts) bei zu hohem Gradient der pneumatischen Kraft

Mit dem erstellten Modell konnte das Verhalten des Ventils im System mit ausreichender Genauigkeit simuliert werden. Dieses validierte Teilsystemmodell wurde in eine Gesamtsystemsimulation integriert und damit für unterschiedliche Betriebsstrategien des Fahrzeug-Gesamtsystems (z. B. Hybridisierungsgrad,...) u.a. das Hubverhalten des Ventils für unterschiedliche Lastzyklen (NEFZ, AMS-Zyklus,...) ermittelt und so Belastungsprofile für die Dauerläuferprobung des Ventils abgeleitet (vgl. AP2 und AP3).

AP 2 Konzeptentwurf, Machbarkeit

Ziel des AP2 war die Umsetzung des Konzepts aus dem theoretischen Lösungsansatz in ein industrialisierbares Design. Dies beinhaltet den Nachweis der Funktionalität im System sowie des Potenzials zur Wirtschaftlichkeit durch eine geeignete Kostenbetrachtung.

Das Arbeitspaket 2 wurde in 1. HJ 2012 abgeschlossen. Der Konzeptentwurf wurde in der Konstruktion umgesetzt und getestet (vgl. AP 2.1.-2.3). Zur Zielerreichung wurde an diversen Stellen noch Optimierungsbedarf festgestellt (z.B. Elastomerdesign), das grundlegende Konzept des Proportionalventils erwies sich jedoch uneingeschränkt als tragfähig.

Zur Erreichung einer wirtschaftlichen Fertigung wurde ein Lösungsansatz für skalierbare Prozesse sowohl bei kleinen Stückzahlen (Markteintrittsphase) als auch großen Stückzahlen (Marktpenetration) erarbeitet. Für die Markteintrittsphase wurde dieser umgesetzt (vgl. AP-D).

AP 2.1 Ausarbeitung Gesamtkonstruktion

Ausgehend vom theoretischen Lösungsansatz des Prototypen wurde die Gesamtkonstruktion des HGI-XL unter Berücksichtigung fertigungstechnischer und funktionaler Aspekte angepasst und für die Fertigung der Musterteile aufbereitet.

Diese Arbeiten umfassten:

- Modellierung der Einzelteile und des Ventils in CAD
- Erstellung und Freigabe von Bauteilzeichnungen und Bemaßung inklusive Toleranzangaben aus durchgeführter Toleranzrechnung
- Erstellen von Stücklisten inklusive Zeichnungen, Prüfvorschriften, Materialblättern, ...
- Entwurf, Bewertung und Festlegung von Werkzeugkonzepten
- Analyse von Musterteilen

Insgesamt wurden mehrere rekursive Designanpassungen vorgenommen, in die jeweils Ergebnisse und Erkenntnisse aus den laufenden Simulationen und Tests einfließen. Insbesondere hinsichtlich der Anforderungen an Durchsatz und Regelbarkeit konnten durch konstruktive Maßnahmen laufend Verbesserungen in der Funktionalität erreicht werden.

Neben den funktionalen Eigenschaften wurden auch die fertigungstechnischen Aspekte der einzelnen Bauteile optimiert. Hierzu wurden laufend technische Gespräche mit den Zulieferern durchgeführt und die Verbesserungen in das Design der Einzelteile eingearbeitet. Besonders die Bauteile „Verschluss“ und „Düse“ stellten bzgl. der Abdichtung des Mediums Wasserstoff hohe Anforderungen an die Fertigung und die Prozessentwicklung.

Wesentliche Schritte und Ergebnisse bei der Designoptimierung der Einzelteile (vgl. Abbildung 1.1.2) waren

Ventilgehäuse:

- Vergrößerung des Durchmessers des internen O-Rings ggü. dem externen O-Ring
Ergebnis: Verbesserte Montage durch Vermeidung Abscheren des internen O-Rings und Erhöhung Durchsatz durch Vergrößerung der Austrittsströmungsquerschnitte.

Düse:

- Verringerung Außendurchmesser der nierenförmigen Düse
Ergebnis: Erhöhte Dichtwirkung durch Verminderung der Öffnungskraft.
- Änderung Dichtkontur von Rampe zu Radius
Ergebnis: Verbesserte Dichtwirkung durch Erhöhung der lokalen der Dichtung.
- Wechsel von Nieren- auf Lochgeometrie (möglich durch Materialanpassung Anker s.u.)
Ergebnis: Kostenreduzierung durch vereinfachte Fertigung.
- Wechsel von Stahl auf Messing
Ergebnis: Verbesserte Montage bei Pressverbindung in Ventilgehäuse.

Verschluss mit Elastomerdichtung:

- Vergrößerung Durchmesser der Querbohrungen
Ergebnis: Verbesserte Regelbarkeit durch Minderung der drosselungsinduzierten Öffnungskraft (Innenströmung „Nierendüse“).
- Wechsel von FKM zu Silikonwerkstoff inkl. Oberflächenbehandlung
Ergebnis: Verbesserung Tieftemperaturdichtheit und Kaltstartverhalten.
- Wechsel von kreisförmiger Elastomerkontur zu „asymmetrischer Kontur“
Ergebnis: Verbesserte Regelbarkeit durch Minderung der drosselungsinduzierten Öffnungskraft (Außenströmung „Lochdüse“).

Druckfeder:

- Erhöhung der Federsteifigkeit
Ergebnis: stabiles Ventilverhalten erhöhten Gradient der Öffnungskraft
- Taillierung (querkraftminimierte Feder)
Ergebnis: Erhöhte Robustheit für Regelbarkeit durch Reduzierung der querkraftinduzierten Reibung.

Magnetanker:

- Wechsel von weichmagnetischem Stahl auf Co-Fe-Legierung
Ergebnis: Erhöhte Druckspreizung durch erhöhte Magnetkraft. Verwendung einfacherer Düsengeometrie (Loch) möglich.

O-Ring Einstellbolzen

- Wechsel von FKM auf Silikonwerkstoff.
Ergebnis: Verbesserte Tieftemperaturdichtheit erreicht
- Beschichtung / Oberflächenbehandlung
Ergebnis: Für Montage keine Schmierung erforderlich.

Lagerbuchsen:

- Wechsel auf PEEK-Werkstoff
Ergebnis: Ausreichende Beständigkeit gegen Verschleiß erreicht.

Interner/externer O-Ring

- Einsatz von Butylkautschuk
Ergebnis: Minderung der H₂-Permeation und Verbesserung Tieftemperaturdichtheit
- Plasma-Beschichtung
Ergebnis: Verbesserte Montage durch Reduzierung Montagekräfte

Die Ausarbeitung der Konstruktion wurde mit dem C-Musterstand und der damit erfolgreich durchgeführten Lebensdauererprobung abgeschlossen. Weitere Ergebnisse und Entwicklungsschritte im Laufe der Designoptimierung sind auch in den übrigen Arbeitspaketen dokumentiert.

AP 2.2 Systemintegration

Der funktionale Konzeptnachweis erfolgte an diversen Musterständen und umfasste auch Versuche zur Druckregelbarkeit unter systemähnlichen Randbedingungen. Das Anodenvolumen der BZ wurde dabei durch einen Druckbehälter simuliert. Zur Einstellung des Durchflusses analog dem H₂-Verbrauch in der BZ wurden CNG-Injektoren eingesetzt. Die Versuchssteuerung wurde in der automotive Standard-Software ASCET (ETAS) implementiert. Die Druckregelung wurde mittels des in der Simulation ausgelegten PI-Reglers sowie einer Vorsteuerung des Öffnungsstroms des HGI-XL ausgeführt. Zur Kompensation der Einflüsse von Vordruck und Nachdruck auf das Ventilverhalten wurden die Vorsteuerung und die Reglerparameter als Funktion der Druckdifferenz am HGI-XL bedatet. Abb. 2.2.1 zeigt beispielhaft Versuchsergebnisse bei gleichzeitiger Variation von Solldruck und Durchfluss (entspricht elektrische Last der BZ) bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einem Vordruck von 14 bara (Obergrenze Nenndruckbereich).

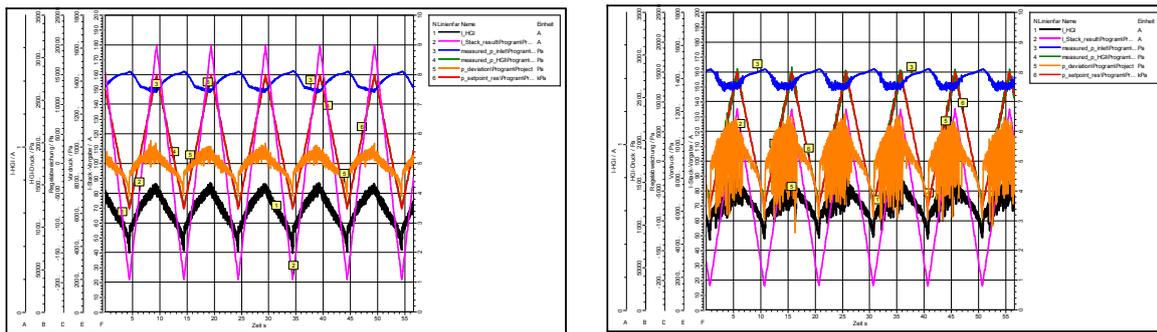


Abb. 2.2.1: Verlauf von Vordruck (blau), Solldruck (rot), Istdruck (grün), Regelabweichung (orange), HGI-XL-Ansteuerstrom (schwarz) und simuliertem Stackstrom (rosa) mit vorherigem Musterstand (links) und nächster Musterstand (rechts)

Über die laufenden Musterstände zeigte sich ein unterschiedliches Funktionsverhalten. Im vorliegenden Beispiel folgt der Istdruck dem Solldruck stabil mit einer Regelabweichung von <50 mbar. Mit einem nächsten Musterstand traten bei diesem hohen Vordruck deutliche Druckoszillationen auf, die sich auch auf den Vordruck übertragen. Im Signal des Ansteuerstroms sind deutliche Reaktionen auf die Druckoszillationen erkennbar. Die Regelung ist in der Lage, den Solldruck mit im Mittelwert akzeptabler Genauigkeit einzuregeln.

Da es nicht möglich war, die Oszillationen durch eine geänderte Reglerparametrisierung zu vermeiden, wurde das Verhalten mittels Simulation genauer untersucht (vgl. AP 1.3). Im Weiteren wurden die Ventile hinsichtlich der Druckregelbarkeit am Systemprüfstand untersucht.

Druckrandbedingungen im System:

Im Hinblick auf die Systemintegration des HGI-XL besteht die Hauptanforderung darin, einerseits die geforderte interne Leckage bei max. spezifiziertem Vordruck und min. spezifiziertem Nachdruck und andererseits die Vollastmenge bei min. spez. Vordruck und max. spez. Nachdruck darzustellen. Der Nachdruck-Bereich wird dabei durch die für den verwendeten Brennstoffzellen-Stack optimale Betriebsstrategie festgelegt. Der Vordruck ergibt sich aus dem Regelbereich des vorgeschalteten mechanischen Druckreglers. Für neue Druckregler ergeben sich außer durch die Teilleistung Variationen im HGI-XL-Vordruck mit dem Mengenstrom und dem Druck im H₂-Tank. Bei schnellem Öffnen und Schließen des HGI-XL treten zudem dynamische Unter- bzw. Überschwinger im Vordruck auf. Driteffekte des Druckreglers wie z. B. zunehmende Undichtheit können zu einer weiteren

Vergrößerung des Vordruckbereichs führen, in dem das HGI-XL die Anforderungen an interne Leckage und stabil einstellbaren Durchfluss erfüllen muss. Im Hinblick auf eine optimierte Integration des HGI-XL im System wurde daher eine intensive Diskussion der Druckrandbedingungen mit dem BZ-System Verantwortlichen gestartet. Dabei wurden die Dynamik des Vor- und Nachdruckes bei Lastsprüngen sowie der Druckverlauf vor und nach dem HGI-XL bei geringer Ventilleckage genauer betrachtet und daraus optimierte Spezifikationswerte abgeleitet.

Ansteuerung:

Bei der Systemintegration des HGI-XL müssen nicht nur die thermodynamischen Randbedingungen sondern auch seine elektrische Ansteuerung in Betracht gezogen werden. Für das Magnetventil wurde eine PWM-Ansteuerung aus dem 14 V-Bordnetz mit einer Frequenz von mind. 1000 Hz (Eigenfrequenz ca. 500 Hz) definiert. Hinsichtlich der Anforderungen an das PWM-Signal zeigten die Simulationen, dass mit einer Auflösung des Stroms von < 0,5mA ein ausreichend gute Regelgüte erreicht werden kann.

Ein weiteres Ergebnis der Simulationsstudien zum Test der Druckregelgüte war, dass der sich mit der Temperatur verändernde Widerstand der Magnetspule einen signifikanten Einfluss auf die Regelgüte hat. Es wird daher als zielführend angesehen, den sich einstellenden Ansteuerstrom durch einen geeigneten Shunt im Steuergerät zu messen, um den aktuellen Spulenwiderstand zu ermitteln. Die Reglerparameter können dann mittels einer geeigneten Funktion entsprechend adaptiert werden. Eine derartige Vorgehensweise für proportionale Stellventile ist aus der Motorsteuerung bei Verbrennungsmotoren bekannt.

Die aus der Simulation zum Konzeptnachweis gewonnen Ergebnisse flossen als Basis in den umfassenden Funktionsnachweis am Zieldesign ein (vgl. AP 5).

Neben der Funktion Regelbarkeit wurden mittels der Simulationen auch Belastungsprofile zum Nachweis Der Dauerhaltbarkeit abgeleitet.

Die möglichst frühzeitige Kenntnis des Hubverhaltens des HGI-XL (Anzahl der Hübe in best. Hubklassen, Vollhübe, Elastomerkontakte, Ventilweg) über Lebensdauer bildet eine wichtige Grundlage für die Entwicklung des Designvalidierungs (DV)-Plans.

Für die Definition des HGI-XL-Dauerlaufprofils wurden zwei unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung des Hubverhaltens des HGI-XL verfolgt:

1. Rückrechnung des HGI-XL-Hubs aus vom Systemlieferant erhaltenen Messdaten für einen System-Dauerlauf unter worst case-Bedingungen hinsichtlich Lastwechseln.
2. Berechnung des HGI-XL-Hubs mit Hilfe der Gesamtsystem-Simulation eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs für unterschiedliche Lastzyklen (NEFZ, AMS-Zyklus, FTP-Zyklen, Artemis-Zyklen) und Hybridisierungsgrade (→ Kapazität des Traktionsakkus).

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die so erhaltenen Ergebnisse jeweils auf eine einheitliche Lebensdauer von 6000h skaliert.

Exemplarisch zeigt Abb. 2.2.2 a) das aus den erhaltenen Messdaten für Vordruck, Nachdruck und Ansteuersignal des HGI-XL simulierte Hubprofil über der Zeit. Die ausgeprägten Hubwechsel spiegeln die hier nicht dargestellten Lastwechsel des Dauerlaufs gut wider.

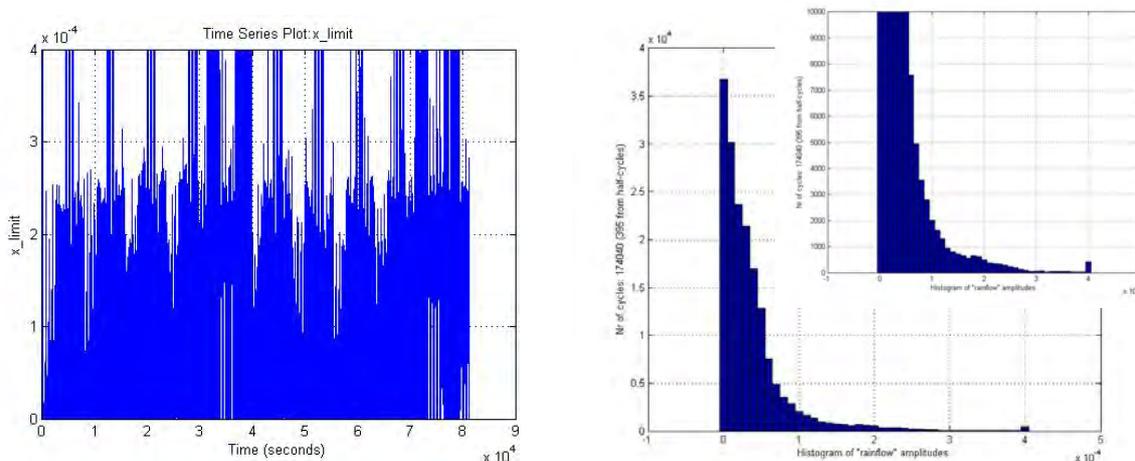


Abb. 2.2.2: a) Aus den System-Dauerlauf-Messdaten berechnetes Hubprofil des HGI-XL, b) Zugehörige Verteilung der Hubamplituden.

Die rechts dargestellten Histogramme (Abb. 2.2.1 b) zeigen die zugehörige Verteilung der Hubamplituden in 10 μm -Schritten. Der Hauptanteil der Ventilhübe liegt im Bereich von Hubamplituden deutlich unter 100 μm . Entsprechend konnten hier ca. 450 Vollhübe sowie ca. 35.000 Elastomerkontakte ermittelt werden. Skaliert auf eine Betriebsdauer von 6000h ergeben sich daraus ca. 120.000 Vollhübe sowie ca. 9,3 Mio Elastomerkontakte. Der gesamte Ventilweg wurde zu ca. 3700 m abgeschätzt.

Im Vergleich dazu erwiesen sich die meisten der mittels Gesamtsystem-Simulation hinsichtlich des HGI-XL-Hubverhaltens untersuchten Fahrzyklen weniger belastend für das HGI-XL (z.B. NEFZ, FTP-Zyklen). Die vergleichsweise höchste Belastung für das HGI-XL ergab sich im sogenannten Artemis Motorway-Zyklus. Hier ergaben sich bei hoher angenommener Batteriekapazität (0,94 kWh) jeweils auf 6000h skaliert ein Ventilweg von ca. 630 m, ca. 2,5 Mio Elastomerkontakte sowie ca. 100.000 Vollhübe. Demgegenüber erfordert eine deutlich verkleinerte Batteriekapazität (0,07 kWh), wie sie aus heutiger Sicht als nicht realistisch erscheint, einen stärker dynamischen Betrieb des Brennstoffzellen-Systems. Entsprechend ergeben sich für das HGI-XL im gleichen Zyklus ca. 2100 m Ventilweg, 5,4 Mio Elastomerkontakte sowie ca. 609.000 Vollhübe.

Die auf Basis der Messdaten ermittelte Ventilbelastung stellt somit einen worst case dar. Daher wurden die Daten als Basis für das Programm der Ventil-Dauerläufe herangezogen (s. AP 3).

Um die vordruckseitigen Randbedingungen für das HGI-XL in der Systemsimulation besser abbilden zu können, wurde ein in Brennstoffzellen-Fahrzeugen bereits eingesetzter H₂-Tank-Druckminderer im Hinblick auf den sich bei unterschiedlichen Tankdrücken und H₂-Mengenströmen stationär und dynamisch ergebenden HGI-XL-Vordruck vermessen. Auf Basis der so ermittelten Daten sowie weiterer Bauteildaten wurde ein in der Systemsimulation einsetzbares dynamisches Modell des Tank-Druckminderers erstellt, das auch bei der Simulation des HGI-XL-Hubverhaltens in den unterschiedlichen Fahrzyklen verwendet wurde.

Eine Funktion zur Kompensation des Einflusses von Spulenwiderstand und Batteriespannung auf das Ansteuersignal des HGI-XL wurde zunächst im Rahmen der Teilsystem-Simulation implementiert und getestet. Dabei sowie bei anschließend am Komponenten-Teststand durchgeführten Tests zur Druckregelbarkeit konnten Verbesserungen der Druckregelgüte nachgewiesen werden.

AP 2.3 Bestätigung und Qualifizierung Lösungskonzept

Am jeweils aktuellen Musterstand wurden Funktionsmessungen und Abschätzungen zu Lebensdauerwirkungen (z.B. Setzen Elastomer am Verschluss) sowie Bauteilstreuungen (insb. Magnetkraft, pneumatische Kraft) durchgeführt. Die im Kundenlastenheft spezifizierten Druckspreizung, innerhalb derer das HGI-XL zum einen den geforderten stationären Volllast-Durchsatz bei minimalem Vordruck und max. Nachdruck und zum anderen die geforderte Dichtigkeit bei max. Vordruck und min. Nachdruck erfüllen muss, stellt eine hohe Anforderung an die Entwicklung des HGI-XL dar.

Der im Lastenheft geforderte Druckarbeitsbereich des HGI-XL ist in Abbildung 2.3.1 veranschaulicht. Der auf der y-Achse aufgetragene geforderte Nachdruck liegt zwischen 0,3 und 3,5 bar_{abs}. Dabei treten Drücke unterhalb von 1 bar_{abs} nur bei abgeschaltetem Brennstoffzellen-System auf, Drücke oberhalb von 3 bar_{abs} nur kurzzeitig durch Überschwingen der Anodendruckregelung. Der geforderte Vordruck reicht von 4 bis 15,5 bar_{abs} und wird durch das Verhalten des dem HGI-XL vorgeschalteten H₂-Tank-Druckminderers bestimmt. Zwischen 4 und 8 bar wird die stationäre Volllastmenge nicht mehr gefordert, und das System wird in den Betrieb mit Leistungsbegrenzung überführt. Nach Auskunft des Systemherstellers beträgt der Druck-Sollwert des H₂-Tank-Druckminderers 10 bar.

Designmaßnahmen am inneren Magnetkreis (vgl. AP 2.1) konnte der Zielbereich für eine Druckspreizung von 8 ... 14,5bar_{abs} erreicht werden.

AP 2.4 Kostenbetrachtung

Damit die Komponente HGI zu marktfähigen Preisen gefertigt werden kann, wurde bereits in der frühen Projektphase kostenorientiert entwickelt.

Es wurden 2 Marktphasen berücksichtigt:

- (1) Markteintrittsphase: Die Komponente muss bereits bei geringen Stückzahlen wirtschaftlich fertigbar sein.
- (2) Marktdurchdringungsphase: Bei steigenden Stückzahlen müssen die Kosten der Komponente durch Skaleneffekte auf ein Niveau im Bereich bestehender Kraftstoffdosiersysteme (z.B. Benzindosierung) fallen.

Kostenmaßnahmen bei der Entwicklung HGI:

Wesentlicher Punkt für eine kostengünstige Fertigung ist die geeignete Planung der Automatisierungsstufen (siehe Abb. 2.4.1 Automatisierungsstufen nach Mike Rother). Der Markteintritt erfolgt mit Automatisierungsstufe 2. Das gesamte Handling geschieht hierbei manuell. Nur der Fertigungsprozess ist automatisiert. Grund für die Automatisierung des Fertigungsprozesses sind Qualitätsaspekte. Die anspruchsvollen Fertigungsprozesse wie Laserschweißen oder Durchfluss einstellen erfordern zwingend eine automatische Prozessführung. Eine manuelle Prozessführung ist nicht in der Lage, die engen Toleranzbereiche der Fertigungsparameter zu gewährleisten. In der Phase der Marktdurchdringung wird schrittweise zu Automatisierungsstufe 3, 4 und 5 übergegangen. Dies geschieht durch den Einsatz von Förderelementen wie bzw. Handlingsroboter. So kann der Fertigungstakt gesteigert werden ohne dass die Fertigungsprozesse geändert werden. Zur Realisierung dieses Vorgehens mussten bereits in der frühen Projektphase richtige Weichenstellungen vorgenommen werden. Zum Beispiel wird in der Designfindungsphase des HGI bereits berücksichtigt, dass die Einzelteile so gestaltet sind, dass später ein automatisches Handling möglich ist. Bei der Auswahl der Fertigungsprozesse wird auf geringe Taktzeiten Wert gelegt, damit hier später kein Engpass entsteht.

| | Maschine beladen | Prozess | Maschine entladen | Transport des Teils |
|--|---|---|---|---|
| 1 |  |  |  |  |
| 2 |  | Auto |  |  |
| 3 |  | Auto | Auto |  |
| Der große Schritt der Automatisierung | | | | |
| 4 | Auto | Auto | Auto |  |
| 5 | Auto | Auto | Auto | Auto |

Abb. 2.4.1: Automatisierungsstufen nach Mike Rother

Beim Design der Einzelteile muss die Formgebung eine wirtschaftliche Skalierung der Fertigung ermöglichen. Abbildung 2.4.2 zeigt dies am Beispiel der Ventildüse. Dieses Bauteil wurde so gestaltet, dass es zum Markteintritt bei kleinen Stückzahlen als Drehteil gefertigt werden kann, mit zunehmenden Stückzahlen kann die Geometrie alternativ durch Stanzen erzeugt werden.



Abb. 2.4.2: Design Ventildüse

Eine weitere Kostenmaßnahme ist die Verwendung von Gleichteilen von anderen Fahrzeugkomponenten. Für den Steckanschluss beispielsweise ist kein brennstoffzellenspezifisches Design erforderlich. Zur Nutzung von Skaleneffekten ist das HGI so konstruiert, dass der Steckanschluss einer bestehenden Serienkomponente verwendet werden kann.

AP 3 Prüfkonzept

Ziel des AP 3 war die Erstellung und Umsetzung eines geeigneten Prüfkonzepts zur Absicherung der Funktionalität des HGI-XL über der Betriebsdauer und unter den relevanten Systemrandbedingungen. Unter Anwendung von Standardprozessen (z.B. FMEA, ...) aus der automotiv Entwicklung wurden für die einzelnen Musterstände geeignete Erprobungsprofile entwickelt, um das Design des HGI-XL abzusichern (s. AP 3.1). Zur Erprobung der Muster wurden entsprechende Prüfeinrichtungen aufgebaut bzw. bestehende Einrichtungen erweitert (s. AP 3.3). Für die Funktionsprüfstände der Entwicklung und des Fertigungswerks beinhaltete dies auch den Nachweis der Messfähigkeit. Der Status zu vorhanden bzw. neuen Richtlinien zur Typzulassung automotiver H₂-Komponenten wurde laufend geprüft und soweit relevant bei der Umsetzung für das HGI-XL berücksichtigt (s. AP 3.2).

AP 3.1 Prüfkonzept und Erprobungsstrategie

Die jeweiligen Testparameter wurden entsprechend den Systemrandbedingungen und den zu erwartenden Bedingungen im Fahrzeugbetrieb festgelegt und in einer Erprobungsübersicht dokumentiert.

Das gesamte Erprobungsspektrum enthält folgende Tests, welche teilweise als Einzel und teilweise als Reihenprüfungen vorgesehen sind.

Dauerlaufprüfungen:

- Dauerlaufprüfung in H₂

Dynamische Prüfungen:

- Rausch- und Gleitsinusprüfung
- Rauschprüfung
- Schockprüfung
- Fallprüfung
- Druckschwellprüfung
- dynamische Bauteilprüfung in H₂ für Feder

Statische Prüfungen:

- Auslagerung in H₂ für Feder

Klimatische Prüfungen:

- Temperaturwechsel für Voralterung sowie Lebensdauer (Magnetgruppe und O-Ringe)
- Wärmelagerung (Dichtungen)
- Wärmelagerung unter Feuchte (Kunststoffteile)
- Medienbeständigkeit gegen Umwelteinflüsse
- Schutzklasseprüfung (Hochdruckreiniger IPX09K)
- Salznebel-/Feuchteprüfung
- Temperatur-/Feuchte-Zyklen (Korrosionsbeständigkeit für Ventilinnenraum)

- Heißbetrieb (Beständigkeit bei max. Strom und max. Temperatur)
- Temperaturschock

Elektrische Prüfungen:

- Isolationswiderstandsprüfung
- Durchschlagsfestigkeit
- Überspannungstest (vgl. auch AP 6.2)

Sonstige Prüfungen:

- Schmutzdauerlauf (Beständigkeit gegen Restschmutz)
- Absicherung zulässiger Lagerungszeitraum bis zu 6 Jahre

Funktionstests:

- Vollastdurchsatz
- interne Dichtheit
- externe Dichtheit
- Regelbarkeit
- Öffnungsverhalten bei Tieftemperatur (Kaltstart)
- Öffnungsverhalten bei Tieftemperatur und Feuchte (Gefrierstart)

AP 3.2 Typzulassung nach ECE

Durch die Mitarbeit in der „Hydrogen Working Group“ der EU und die Zusammenarbeit mit Prüfstellen (TÜV) wurde der Stand zur Erstellung einer EC-Richtlinie zur Typzulassung von H₂-Fahrzeugen laufend geprüft.

Bis zum Abschluss der Arbeiten im Förderzeitraum war für das HGI-XL keine Typzulassung nach ECE vorgesehen. Die in der ECE-Richtlinie vorgeschlagenen Prüfverfahren wurden im Rahmen der Absicherung und Prüfung des HGI-XL berücksichtigt.

AP 3.3 Auslegung, Aufbau und Erweiterung von Prüfeinrichtungen

Ziel Arbeiten des AP 3.3 war der Auslegung und der Aufbau bzw. Erweiterung von Einrichtungen zur Prüfung der Funktionalität sowie Absicherung des HGI-XL im Rahmen der Erprobung. Alle hierfür erforderlichen Maßnahmen wurden umgesetzt.

Dies umfasste im Wesentlichen:

Funktionsprüfstand für Durchsatz- und Dichtheitsmessung:

- Umzug, Anschluss und Inbetriebnahme eines vorhandenen Prüfstands inklusive Erweiterung der Laborinfrastruktur und Kalibrierung der Prüfstandssensorik.
- Aufbau spezifischer Adapter zur Aufnahme des HGI-XL konstruiert und aufgebaut.
- Erweiterung der Prüfstandssensorik für Druckmessung .
- Aufnahme der Meßmittel in Prüfmittelüberwachung und laufende Kallibrierung.
- Erweiterung um Druckabfallprüfung zur Messung der internen Leckage.
- Anpassung der Software zur Teilautomatisierung der Einstell- und Prüfvorgänge.
- Umbau der Adaption für schnellen Wechsel diverser Muserstände.
- Anpassung der Software zur Teilautomatisierung der Einstell- und Prüfvorgänge.
- Erweiterung um Sensorik zur Erfassung des Massenstromes für die interne Leckage.
- Optimierung der Vordruckregelung mit mechanischem Druckregler.
- Integration einer Festdrossel und zugehöriger Drucksensorik zur optimierten Durchsatzprüfung.
- Diverse weitere Anpassungen der Software bzgl. erweiterter Funktionalität und zur weiteren Automatisierung der Einstell- und Prüfvorgänge. Durch diese Maßnahmen wurde der Zeitaufwand bei der Messung von Durchsatzkennlinien um über 50% reduziert.
- Erweiterung Druckbereich und HGI-XL Ansteuerung für Prüfung unter Bedingungen für BZ-Systeme mit passiver Rezirkulation (Jet-Pump).

Prüfeinrichtung zur externen Leckagemessung:

- Umbau des bestehenden Prüfstands für Erdgasventile auf erweiterten Druckbereich.
- Aufbau spezifischer Adapter zur Aufnahme des HGI-XL.

H₂-Druckschwellprüfstand für Bauteilabsicherung:

- Anpassung Software und Steuerung eines bestehenden Prüfstands Prüfscheiben.
- Aufbau spezifischer Adapter zur Aufnahme von bis zu 6 HGI-XL verschiedener Musterstände.
- Aufnahme der Meßmittel in Prüfmittelüberwachung und laufende Kalibrierung.

Dauerlaufprüfstand:

Für die Dauererprobung der seriennahen Komponenten war eine umfassende Anpassung der Prüfeinrichtung erforderlich, um die aus den Anforderungen abgeleiteten Versuchsbedingungen des Dauerlaufs (vgl. AP 3.1) darstellen zu können.

Für den Umbau der bestehenden Prüfeinrichtung wurde deshalb zunächst eine Konzeptanalyse mit folgenden Inhalten durchgeführt:

- Ableitung verschiedener Lösungsansätze aus den Anforderungen in Zusammenarbeit mit dem Prüfstandshersteller.
- Durchführung einer Marktrecherche bzgl. geeigneter Kompressoren.
- Erstellung von Kostenschätzungen.
- Bewertung der Konzepte und Festlegung der bzgl. Funktionalität und Kosten optimalen Zielvariante.

Die bestehenden Prüfstände für H₂ bzw. CH₄-Einsatz wurden entsprechend auf- bzw. umgerüstet. Umfang der Arbeiten

- Erweiterung Kompressoranlage um eine zusätzliche Druckstufe.
- Integration eines zusätzlichen Thermokreislaufs zur Temperierung des Gases und der Einbauumgebung des HGI-XL.
- Aufbau temperierbarer Adapter für HGI-XL.
- Anpassung der Leitungen und Flansche auf erhöhte Durchsätze.
- Erweiterung der elektrischen Anlagen.
- Anpassung der Prüfstandssoftware.

Durch die Erweiterung wurde eine Prüfung von 5 HGI-XL parallel im betriebsrelevanten Druck- und Temperaturbereich möglich.

Tieftemperaturprüfstand für Kaltstart und Dichtheit bei Tieftemperatur:

Zur Prüfung und Absicherung der Kaltstartfähigkeit sowie der Dichtheitsanforderungen bei Tieftemperaturen war der Aufbau einer neuen Prüfeinrichtung erforderlich. Diese wurde in eine vorhandene Klimakammer integriert.

Testeinrichtung für Gefrierstart und Dichtheit unter Feuchte

Ziel der Arbeiten war es, die Randbedingungen beim Abstellen eines Fahrzeugs unter Kälte abzubilden, wenn im System befindliche Feuchte innerhalb des Ventils kondensiert. Durch Eisbildung im Bereich des Ventilsitzes kann es möglicherweise zu einem verzögerten Öffnungsverhalten bzw. zu Leckage kommen. Hierzu wurde in Abstimmung mit dem Systemhersteller ein geeignetes Prüfkonzept erarbeitet und umgesetzt.

Die Prüfeinrichtung ermöglicht folgenden Versuchsablauf:

- Klimatisierung (Temperatur/Feuchte) der Prüflingsumgebung
- Befüllen des Ventilinnenraums mit feuchter Luft
- Abkühlung unter Einschluss der Feuchte
- Durchführung Öffnungstest und Dichtheitsmessung @ -40°C

Anhand entsprechender Vorversuche wurde sichergestellt, dass beim Abkühlen der Prüfeinrichtung die Kondensation der Feuchte vorzugsweise innerhalb des Ventils stattfindet. Hierfür wurde die Vorrichtung in geeigneter Weise isoliert, so dass die am Ventil auftretende Temperatur immer niedriger liegt, als die der umgebenden Bauteile. Die Vorrichtungen wurden zunächst für manuellen Betrieb bzgl. Gaszuführung und Leckagemessung ausgeführt. Die Möglichkeit zur Automatisierung wurde vorgehalten, falls als Ergebnis von Fahrzeugtests eine entsprechende Absicherung der Lebensdauer über mehrere hundert Zyklen erforderlich werden sollte.

Sonstige:

Für die Lebensdauerabsicherung (klimatische/mechanische Prüfungen, Schutzklassetests, Demontageversuche, ...) wurden verschiedenste Prüflingsaufnahmen konstruiert und aufgebaut. Zur flexiblen und kostengünstigen Durchführung von Erprobungstests (z.B. Rausch-Schock-Prüfung mit aktivem Betrieb des Ventils) sowie weiterer Versuche für alternative Ansteuerkonzepte (z.B. Pulsbetrieb bei Jet-Pump-Systemen) wurde eine portable Ansteuereinheit mit rechnergestützter Messdatenerfassung aufgebaut. Mit der Einheit können bis zu 5 Ventile mit individueller Ansteuercharakteristik gesteuert oder geregelt betrieben werden.

Übertragung Funktionalität der Entwicklungsprüfstände auf die Fertigungsprüfstände

Zur Einstellung und Prüfung der HGI-XL im Fertigungswerk, wurden die relevanten Prüfabläufe der Entwicklungseinrichtungen auf die Fertigungsprüfstände transferiert. Hierbei handelt es sich um Prüfungen, die in der Serienfertigung bei jedem Teil serienbegleitend durchgeführt werden. In diesem Rahmen wurde ebenfalls die Korrelation zwischen den unterschiedlichen Prüfmedien (z.B. Stickstoff und Luft) umgesetzt.

AP 4 Werkstoffe

AP 4.1 Stahlwerkstoffe

Relevant für die Beständigkeit des HGI gegenüber H_2 sind die im Bauteil auftretenden Spannungen. Eine Schädigung des Materials durch H_2 ist nur dann zu erwarten, wenn Wasserstoff in das Material eintreten kann. Dies ist bei den für das HGI relevanten Temperaturen von $< 200^\circ\text{C}$ nur möglich, wenn an der Oberfläche plastische Verformung des Materials auftritt. Daher wurden zunächst die Werkstoffe und Konstruktionsmerkmale des HGI bezüglich des Risikos einer Schädigung durch H_2 bewertet und potenziell gefährdete Stellen identifiziert. In erster Linie betrifft dies die Verbindung von Ventilgehäuse, Zwischenring und Magnetkern. Das Ventilgehäuse des Ventils besteht aufgrund der erforderlichen magnetischen Eigenschaften aus einem ferritischen Werkstoff, der prinzipiell eine Empfindlichkeit gegenüber Wasserstoff aufweist. Der Zwischenring ist als austenitischer Werkstoff grundsätzlich als weniger anfällig gegenüber H_2 -Versprödung zu bewerten. Durch den Umformprozess (Tiefziehen) im Rahmen der Fertigung kann es allerdings zur Bildung von spannungsinduziertem Martensit kommen, wodurch die Sensibilität des Werkstoffes gegenüber Wasserstoffeinwirkung steigt. Die zu erwartenden montage- und betriebsbedingten Spannungen an diesen Stellen wurden mittels FEM-Berechnungen abgeschätzt (Grenzmaße für max. Pressung bzw. max. auftretende Druckbelastung).

Montagebedingte Spannungen:

Pressverbindung Ventilgehäuse / Zwischenring / Magnetkern (vgl. Abb. 4.1.1)

- plastisch/elastische Pressverbindung mit plastischer Verformung des Zwischenrings im Oberflächenbereich
- maximale Zugspannungen im Zwischenring liegen führt zur plastischen Verformung und Verfestigung des Werkstoffes

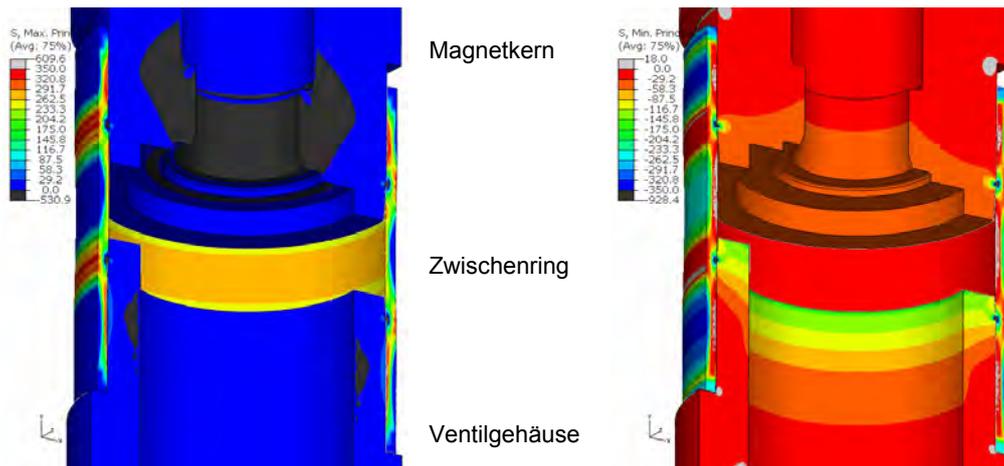


Abb. 4.1.1: Zug- (links) und Druck-Hauptspannungen (rechts) nach Montage

Betriebsbedingte Spannungen:

Schweißverbindungen Ventilgehäuse / Zwischenring / Magnetkern (vgl. Abb. 4.1.2)

- Spannungen sind signifikant kleiner als die Festigkeit
- Keine plastische Verformung im Betrieb im Bereich Schweißverbindung sowie im Bereich maximaler Belastung durch Pressverbindung

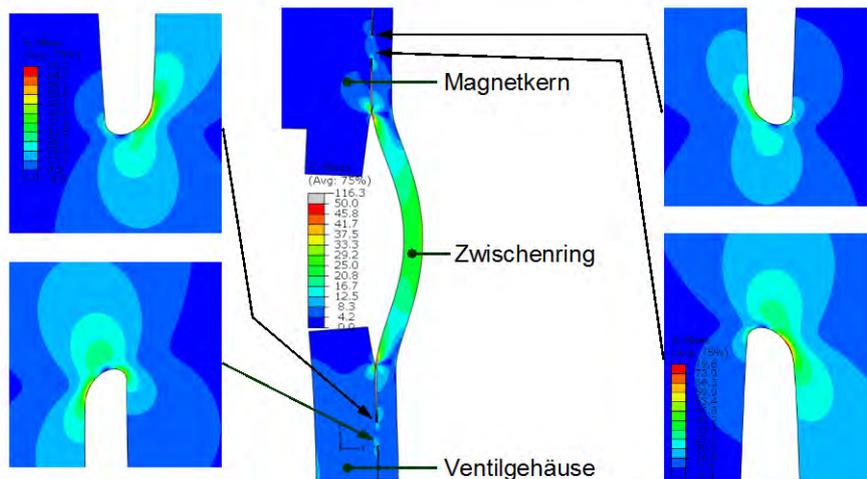


Abb. 4.1.2: Betriebsbedingte Spannungen in HGI-XL Schweißnähten

Entsprechende Berechnungen wurden für die Verbindungen von Düse und Ventilgehäuse sowie Magnetanker und Zylinderstift durchgeführt.

Auch an diesen Stellen handelt es sich um elastisch/plastische Pressverbindungen. Der Abstand zu auftretender plastischer Verformung durch die Druckbelastung im Betrieb liegt im Bereich der Düse bei einem Faktor von $> \text{ca. } 9$.

Trotz der vergleichsweise geringen betriebsbedingten Belastung der Bauteile können aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit oder bestehenden Mikrorissen lokal höhere Spannungen auftreten, die eine Schädigung durch den Wasserstoff begünstigen könnten. Daher wurden die konservativen Annahmen zur statistischen Bauteilabsicherung hinsichtlich Ihrer Sicherheit überprüft. Zur Abschätzung des Festigkeitsverhaltens im HCF-Bereich (High Cycle Fatigue) dieser Werkstoffe wurden anhand dynamischer Zugversuche Wöhlerlinien an Prüfkörpern in Luft und unter Wasserstoffatmosphäre ermittelt.

Für die untersuchten HGI-typischen Randbedingungen (Druck und Temperatur) zeigten die Proben keinen signifikanten Einfluss des Wasserstoffs auf die Festigkeit im Vergleich zu Luft. Mögliche Ursache hierfür ist, dass unter den Randbedingungen und der vergleichsweise geringen Belastung, Wasserstoff nicht in ausreichender Menge in das Material eingedrungen ist, um eine schädigende Wirkung hervorzurufen.

Qualifizierung der verwendeten Legierung bzgl. H_2 - und Korrosionsbeständigkeit

Zur Bewertung der Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit der im Ventil eingesetzten Legierung wurden Systemtests hinsichtlich der im Fahrzeug zu erwartenden Bedingungen durchgeführt. Die Messungen zeigten, dass sich nach Abstellen des Fahrzeugs feuchte Bedingungen im Ventil einstellen können. Das Prüfkonzept wurde dementsprechend ergänzt.

Im System ist nicht mit einem signifikanten Eintrag Korrosion förrender Stoffe wie beispielsweise Salzen zu rechnen. Das Korrosionsverhalten des Werkstoffs wurde daher zunächst im sogenannten Test „Feucht Wärme konstant“ nach EN 60068-2-78 untersucht.

Versuchsbedingungen: Temperatur: $40 \pm 2^\circ\text{C}$, rel. Feuchte: $93 \pm 3\%$, Prüfdauer: 35 Tage



Abb. 4.1.3: Korrosionsspuren am Magnetanker nach Feuchtetest

Aufgrund des Korrosionsbildes (Abb. 4.1.3) ist eine Beeinträchtigung der Funktion (z.B. durch Klemmen aufgrund des Eintrags von Material in die Lagerspalte) nicht auszuschließen.

Da die tatsächlich im Fahrzeug auftretenden Randbedingungen noch nicht bekannt waren mussten bei der Überarbeitung des Designs zunächst entsprechende Maßnahmen zur Sicherstellung der Korrosionsbeständigkeit vorgesehen werden.

Zur näheren Bewertung der Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit der im Ventil eingesetzten Legierung wurde zusammen mit dem Systemhersteller ein weiterer Test nach IEC 60068-2-38 Punkt 6.3.1.2 mit zyklischer Beanspruchung bei feuchter Wärme und anschließender Kälte festgelegt. Dieser kommt den tatsächlich zu erwartenden Bedingungen im Fahrzeug näher als der bereits durchgeführte Test, bei dem die oben abgebildeten deutlichen Korrosionsspuren am Magnetanker des Ventils auftraten.

Unter den neuen Testbedingungen tritt deutlich weniger Korrosion an diesem potenziell korrosionsanfälligen Bauteil auf (Abb. 4.1.4).

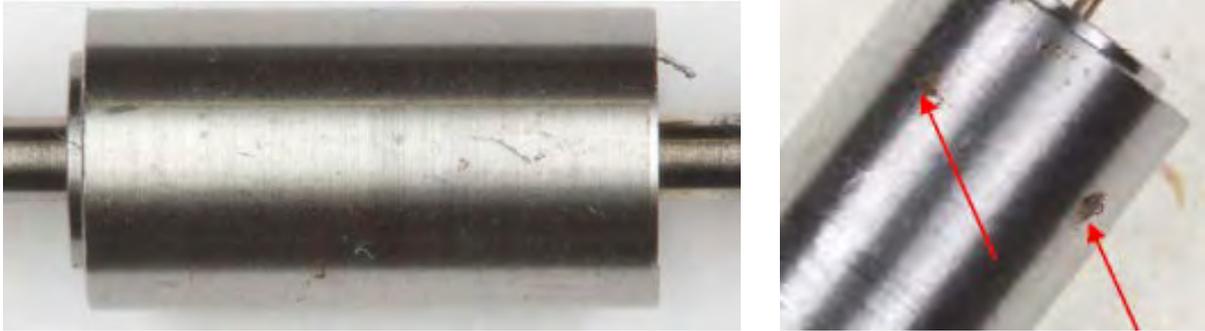


Abb. 4.1.4: Korrosionsspuren am Magnetanker nach neuem Feuchtetest.

Bei dem vorliegenden Korrosionsbild ist keine Beeinträchtigung der Funktion (z.B. durch Klemmen aufgrund des Eintrags von Material in die Lagerspalte) mehr zu erwarten. Daher wurden keine weiteren Maßnahmen (z. B. Beschichtung, Materialanpassung) zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit vorgesehen.

AP 4.2 Elastomerwerkstoffe

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Bewertung verschiedener Elastomer-Werkstoffe bzgl. der Anforderung Dichtheit über Druck- und Temperaturbereich
Für die Funktionsmuster wurde aufgrund der guten Eigenschaften bzgl. Gasdurchlässigkeit ein Kautschuk (A) gewählt. Der Elastomer für den Dichtsitz basiert ebenfalls auf einem Kautschuk, der hinsichtlich seiner elastischen Eigenschaften bei tiefen Temperaturen optimiert ist.
- Vermessung ausgewählter Werkstoffe hinsichtlich der H₂-Permeation bei Hochtemperatur bei einem externen Dienstleister.
- Am Funktionsmuster sowie an Probekörpern wurden Leckage-Messungen bei Hoch- und Tieftemperatur durchgeführt. Hierfür wurden spezifische Adapter aufgebaut.

Ergebnis:

Die Anforderungen an die Dichtheit konnten mit dem für die Funktionsmuster ausgewählten Werkstoff für die O-Ringe zunächst nicht erreicht werden. Für die nächste Mustergeneration wurde ein anderer Kautschuk (B) vorgesehen, der sowohl hinsichtlich der H₂-Permeation als auch des elastischen Verhaltens bei tiefen Temperaturen ein verbessertes Verhalten erwarten lässt. Zusätzlich wurde eine Beschichtung der O-Ringe hinsichtlich des Potenzials zur Verbesserung der Dicht- und Montageeigenschaften untersucht und bewertet.

O-Ringe:

Der für die erste Mustergeneration vorgesehene O-Ring-Werkstoff wurde hinsichtlich Material- und Dichteigenschaften (inkl. H₂-Permeation) sowie Montageverhalten an Dummy-Geometrien untersucht.

Die Untersuchungen umfassten:

- Ermittlung der Bauteil- und Werkstoffkennwerte (Härte, Zugfestigkeit, Reißdehnung, ...) im Rahmen der Werkstofffreigabe
Ergebnis: Härte und Zugfestigkeit geeignet für Niederdruckanwendungen bis 20 bara. Reißdehnung ermöglicht ausreichende Reserve für Dehnung bei Montage.
- Montage und Demontageversuche beschichteter und unbeschichteter O-Ringe sowie mit und ohne Schmierung bei Nenngeometrie mit Messung der Montagekräfte
Ergebnis: Montierbarkeit der O-Ringe grundsätzlich gegeben. Beschichtung führt zu signifikanter Verringerung der Montagekräfte. Verzicht auf Schmierung voraussichtlich möglich.

Oberflächenbeschichtung

Funktionstests am HGI unter Tieftemperatur zeigten ein deutlich verzögertes Öffnungsverhalten des Ventils. Dieses „Kleben“ resultiert aus Adhäsionseffekten des Elastomers an der Auflagefläche und ist von Serienventilen mit vergleichbarem Dichtkonzept bekannt. Um das Kaltstartverhalten zu verbessern wurde in Zusammenarbeit mit dem Zulieferer eine zusätzliche Oberflächenbehandlung des vulkanisierten Elastomers für den aktuellen Musterstand umgesetzt. Bei diesem Verfahren wird die Oberflächenstruktur des Elastomers derart verändert, dass eine Minderung der Adhäsionskräfte bei gleichzeitig verbesserter Verschleißfestigkeit erreicht werden kann.

Absicherung der Dichtfunktionalität des HGI unter Tieftemperaturbedingungen

Für die interne Leckage, d.h. insbesondere die Dichtheit im Ventilsitz lagen bislang Spezifikationen bis zu einer Temperatur von -25°C vor. Für den tatsächlichen Betriebtemperaturbereich von bis zu -40°C waren zunächst noch keine konkreten Grenzwerte definiert.

Funktionstests am aktuellen Musterstand zeigten, dass bei Temperaturen ab $< \text{ca. } -25^{\circ}\text{C}$ die geforderte Dichtheit nicht sicher erreicht wird. Nach zwischenzeitlicher Festlegung der unteren Temperaturgrenze auf -30°C wurde eine weiterführende Entwicklung zur Verbesserung des Dichtverhaltens erforderlich.

Hauptansatz hierbei war der Einsatz eines alternativen Elastomerwerkstoffs, welcher gegenüber dem bislang eingesetzten und aus einer Erdgasanwendung bekannten Kautschuk eine höhere Elastizität bei niedrigen Temperaturen aufweist. Neben dieser Eigenschaft müssen jedoch weitere Anforderungen wie Fertigbarkeit, Medien- und Temperaturbeständigkeit sowie ausreichende Festigkeit über Lebensdauer erfüllt werden.

Anhand dieser Kriterien wurde für weitere Untersuchungen eine Vorauswahl in Frage kommender Werkstoffe in Zusammenarbeit mit dem Zulieferer und internen Fachabteilungen erarbeitet. Dies sind spezielle Kautschuk-Werkstoffe („C“) und („D“) mit unterschiedlichen Härtegraden.

Zur Beurteilung der Elastizität unter Tieftemperatur wurden für diese Werkstoffe erste Muster aufgebaut und das Verformungsverhalten als Kraft in Abhängigkeit der Eindringtiefe der Elastomer-Flach-Dichtung in die Dichtkontur der Düse gemessen (vgl. Abb. 4.2.2).

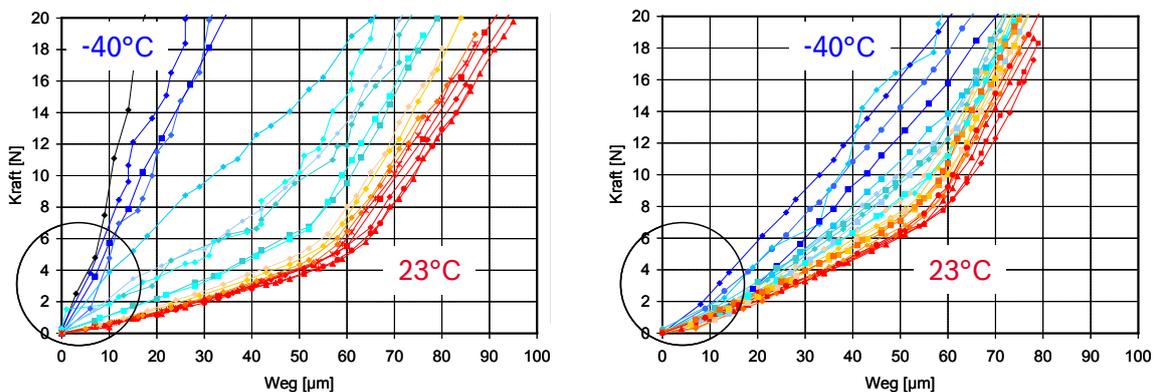


Abb. 4.2.2: Verformungsverhalten Elastomerwerkstoffe im Temperaturbereich
links: Werkstoff „A“ rechts: Werkstoff „C“

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass mit dem Werkstoff „C“ bei Temperaturen von -40°C bei gleicher wirkender Kraft eine höhere Eindringtiefe der Dichtkontur in die Dichtung erreicht wird (Kreise in der Abb.). Das Verformungsverhalten bei Temperaturen $> \text{ca. } 0^{\circ}\text{C}$ ist dabei vergleichbar. Einen ähnlichen Trend zeigte auch der untersuchte Werkstoff „D“. Erste Stichversuche an Schraubventilen bestätigten das Potenzial der beiden Werkstoffe zur Erfüllung der Dichtheitsanforderungen bei Temperaturen bis zu -30°C .

Aufgrund der positiven Ergebnisse wurden zur Qualifizierung der Werkstoffe hinsichtlich Funktionalität und Beständigkeit über der Lebensdauer vollwertige Musterteile aufgebaut. Mit diesen fanden umfangreiche Tests vor und nach thermischer Alterung inklusive mechanischer Belastung über dem betriebsrelevanten Temperaturbereich statt.

Abb. 4.2.3 zeigt die Ergebnisübersicht. Trotz der höheren Flexibilität konnte aufgrund unzureichender Fertigungsqualität (ungleichmäßige Oberfläche, unzureichende Haftung Elastomer auf Verschluss) und Alterungsbeständigkeit Werkstoff „C“ keine Verbesserung des Tieftemperaturverhaltens über Lebensdauer erreicht werden. Ebenso konnte eine Variante des Werkstoffs „D“ die Anforderungen nicht erfüllen.

| Werkstoff | Dichtheit (nach Alterung) | | Öffnung @ -40°C | Fertigungsprozess | Robustheit (Restverformung nach Alterung) |
|---|---------------------------|---------|-----------------|-------------------|--|
| | @20°C | @<-25°C | | | |
| Werkstoff „A“  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  |
| Werkstoff „C1“  | + | - | 0 | - (Haftung) → | n.a.  |
| Werkstoff „C2“  | - | - | 0 | - (Oberfläche) | -  |
| Werkstoff „D1“  | - | - | + | - (Oberfläche) | +  |
| Werkstoff „D2“  | + | + | + | 0 | +  |

Abb. 4.2.3: Vergleich Elastomerwerkstoffe für Ventildichtsitz

Durchweg positive Ergebnisse lieferte der Werkstoff „D2“. Bei gleicher Fertigungsqualität wird hiermit eine deutliche Verbesserung der Tieftemperatureigenschaften erreicht. Abb. 4.2.4 zeigt die erreichten Leckagedrücke der Neuteile sowie nach thermischer Alterung und mechanischem Dauerlauf im Vergleich zum Werkstoff „A“. Neben den Anforderungen an die Dichtheit wurde mit diesem Werkstoff auch das geforderte Öffnungsverhalten bis -40°C erreicht. Der Werkstoff „D2“ wurde somit als Dichtsitzwerkstoff für die nachfolgende Musterphase festgelegt.

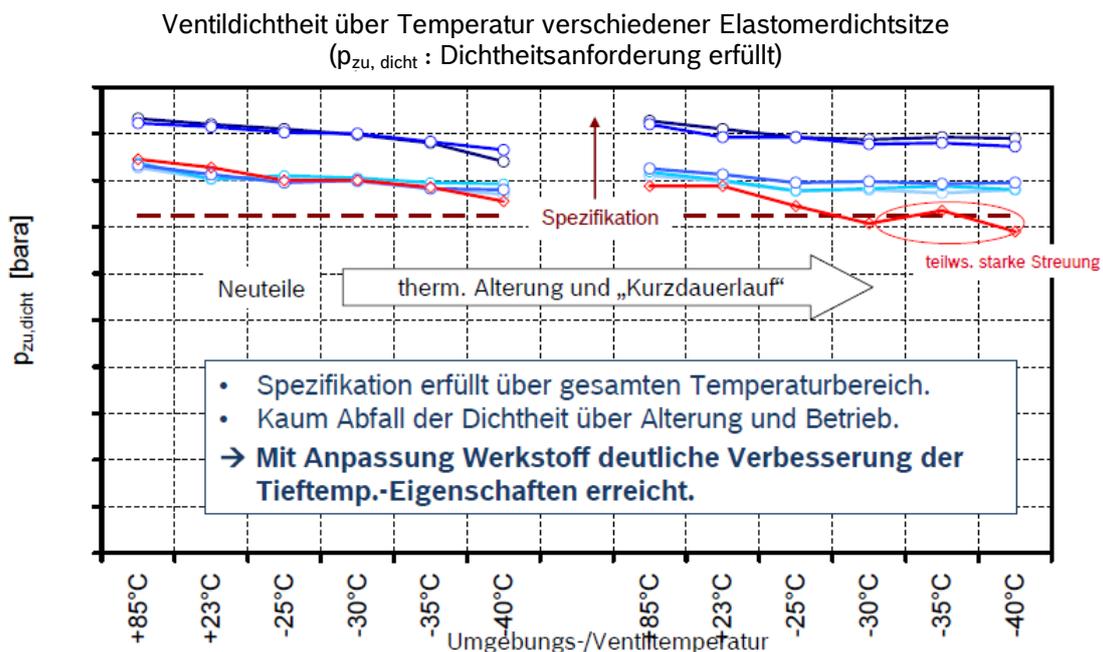


Abb. 4.2.4: Leckagedruck über Temperatur und Lebensdauer. Vergleich Werkstoff „D“ und „A“.

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt war die Weiterentwicklung und fortlaufende Absicherung des eingeführten Elastomerwerkstoffes. In Verbindung mit der Anpassung der Düsengeometrie auf einen Lochquerschnitt wurde zur Optimierung des Fertigungsprozesses auch das Design des Elastomerdichtsitzes angepasst. Durch den Entfall der zentrischen Bohrung im Verschluss war dadurch der Einsatz eines einteiligen Werkzeugs für den Vulkanisationsprozess möglich (vgl. Abb. 4.2.5).



Dichtverhalten bei Tieftemperatur: **(+)**
 Fertigungsprozess: **(-)**



Dichtverhalten bei Tieftemperatur: **(-)**
 Fertigungsprozess: **(+)**

Abb. 4.2.5: Elastomerdichtsitz mit und ohne zentrischer Bohrung

Bei der Umsetzung dieses Designs wurden negative Auswirkungen auf das Dichtverhalten insbesondere bei Temperaturen $< -20^{\circ}\text{C}$ festgestellt. Hierauf wurde eine umfangreiche Ursachenanalyse auf experimenteller und theoretischer Basis durchgeführt. Anhand der experimentellen Ergebnisse konnten Einflüsse des Fertigungsprozesses, insbesondere Schwankungen der Materialeigenschaften (z.B. lokale Härte) ausgeschlossen werden. Weitergehend konnte durch die Nachbearbeitung auffälliger Ventile im Bereich des Elastomers ein direkter Zusammenhang zwischen dem verschlechterten Dichtverhalten und dem Wegfall der zentrischen Bohrung nachgewiesen werden.

Im Hinblick auf die Erhaltung des positiven Dichtverhaltes und die Vereinfachung der Fertigung, mit der die Vulkanisation der Elastomerdichtung unter Verwendung eines einteiligen Werkzeugs möglich ist, wurde ein entsprechendes Konzept erarbeitet. Anschließend erfolgte anhand von Mustern eine Designbewertung hinsichtlich Funktionalität und Robustheit.

Die Eignung des innerhalb der B-Musterphase eingeführten Elastomerwerkstoffes wurde auch in der durchgeführten Erprobung bestätigt. Hinsichtlich einer Änderung des Werkstoffes waren daher keine weiteren Aktivitäten mehr geplant.

Die gesamtheitliche Bewertung der beiden Konzepte lieferte folgendes Ergebnis: Neben der verbesserten Fertigbarkeit hat das Konzept mit einer einteiligen Kavität aufgrund der flexibleren Gestaltung der Elastomerkontur Vorteile für den Einsatz in künftigen Varianten des HGI. Demgegenüber stehen die bislang positiven Erfahrungen bzgl. Funktion, Beständigkeit und Bauteilqualität mit dem bestehenden Konzept. Diesbezüglich bestehen beim Alternativdesign entsprechende Risiken aufgrund der Änderung der Verformungseigenschaften des Elastomers im Dichtbereich. Für die weiteren Musterstände des Serienventils wurde daher das bisherige Konzept beibehalten. Für künftige Ventilvarianten wird der Einsatz des Konzepts für ein einteiliges Werkzeug ggf. erneut geprüft und weiterverfolgt.

AP 4.3 Oberflächenschichten

Zur Sicherstellung der Korrosionsbeständigkeit der aktuell für den Magnetkern eingesetzten Legierung war nach damaligem Erkenntnisstand eine Beschichtung erforderlich.

Ausgehend von den Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit, Kosten und Prozesssicherheit in der Fertigung wurde eine Bewertung der in Frage kommenden Verfahren in Zusammenarbeit mit internen Stellen durchgeführt. Folgende Verfahren wurden als Favoriten identifiziert:

1. chemisch Vernickeln (Barrierschicht):

- Innenbeschichtung des Magnetankers einfach möglich
→ positiv für Korrosionsschutz mit Einfluss auf Fertigung (Einpressen des Zylinderstifts)
- Schichtdicken sehr homogen (+- ca. 1-2 µm)
→ Für Pressverbindung ggf. Vorhalt des Pressmaßes ausreichend
- Keine Aufdickung an Kanten (vgl. Bereich Grenzen E-Feld bei galvanischer Beschichtung)

2. galvanisch Zink o. Zink/Nickel

- Korrosionsschutz höherwertiger, da aktive Schutzwirkung → widerstandfähiger gegen Kratzer
- Gefahr der Entstehung von Korrosionsprodukten → Verschleiß, Verschmutzung (System Zink/Nickel mit Vorteilen bzgl. Korrosionsprodukte (feiner))
- Keine Beschichtung der Kernbohrung mit Risiko der Korrosion in diesem Bereich
Aufgrund guter Abschirmung der Kernbohrung voraussichtlich kein Einfluss auf Montageprozess.
- Aufdickung im Randbereich möglich (max. ca. 10% Schichtdicke)

Parallel zu den Entwicklungsaktivitäten wurde das Thema Beschichtung hinsichtlich eines potenziell kostengünstigeren Designs des Magnetankers (Werkstoff, Reduzierung Bauteilanzahl) untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass das Konzept im Wesentlichen tragfähig ist, zur sicheren Erfüllung der funktionalen Anforderungen jedoch zusätzliche Designmaßnahmen zur Optimierung des Magnetkreises erforderlich wären. Aufgrund des damit verbundenen Aufwands und Risiken war die Umsetzung dieses Konzepts im Hauptentwicklungspfad daher nicht geplant. Für Anwendungen mit modifizierten Anforderungen (z.B. innerhalb eines Variantenrahmens) bleibt dieses Konzept eine Alternative mit Potenzial.

AP 5 Funktion, Dauerhaltbarkeit

AP 5.1 Aufbau Funktionsmuster

Für Funktions- und Beständigkeitstests, sowie für Kundenbemusterung wurden folgende Prototypen aufgebaut bzw. untersucht.

| Interner Musterstand | Tests/Bemerkung |
|-------------------------|---|
| B1 | Funktionsanalyse vor und nach Alterung mit Kurzdauerlauf |
| B2 | Potenzialabschätzung Anpassung Verschluss/Düsengeometrie Festlegung B3-Design |
| B3 | Funktionsanalyse, Erprobung, Kundenbemusterung ab 01/2010 |
| B4.1 | Funktionsanalyse zur Qualifizierung der verwendeten Stahllegierung: → mit gezielter Legierung wurde Erhöhung der Druckspreizung um ca. 2 bar erreicht |
| B4.2 | Funktionsanalyse vor und nach Alterung mit Kurzdauerlauf und Kundenbemusterung (Hub ggü. B4.1-Muster um 50 µm erhöht) → geforderter max. Durchsatz erreicht |

Durch die Anpassung und Qualifizierung des Magnetwerkstoffes für eine höhere Magnetkraft ergaben sich in Verbindung mit einer weiteren Vergrößerung des Ventilhubes Vereinfachungspotenziale für das Design der Düse.

Zusätzlich wurden weitere Muster mit dem vorliegenden Magnetkreis in Ausführung eines Schraubventils aufgebaut. Bei diesen Ventilen besteht die Möglichkeit, Düse und Verschluss inklusive Dichtung zu wechseln, sowie den Hub des Ventils individuell einzustellen. Mit diesen Mustern wurden Tests zur Validierung des theoretischen Optimierungspotenzials einer vereinfachten Düsengeometrie in Bezug auf die Durchsatzcharakteristik des HGI durchgeführt und bestätigt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Anpassung der Düsengeometrie in Verbindung mit der Erhöhung des Ventilhubes eine höhere Robustheit der Ventile bei den Funktionsparametern stationärer und dynamischer Volllastdurchsatz sowie Regelbarkeit erreichbar ist.

Im weiteren Verlauf wurde dieser Designansatz an vollwertigen Ventilen weiter untersucht und aufgrund positiver Qualifizierung in der Musterphase umgesetzt.

B5-Muster Design

Für weitere Funktions- und Beständigkeitstests, sowie für die Kundenbemusterung erfolgte der Aufbau von Prototypen mit dem Musterstand B5.

Schwerpunkt der durchgeführten Tests war die Funktionsanalyse vor und nach einer thermischen Alterung mit Kurzdauerlauf.

Neben der Änderung des Dichtwerkstoffes wurden mit diesem Musterstand auch Anpassungen am Düsendesign an vollwertigen Ventilen untersucht. Die Ergebnisse bestätigten, dass durch die Anpassung der Düsengeometrie in Verbindung mit der Erhöhung des Ventilhubes eine höhere Robustheit der Ventile bei den Funktionsparametern stationärer und dynamischer Volllastdurchsatz sowie Regelbarkeit erreichbar ist.

Trotz der im Grundsatz verbesserten Kennliniencharakteristik traten bei einzelnen Ventilen erhöhte Hysterese und sogenannte Stick-Slip-Effekte auf. Im System kann dieses Verhalten zu Regelabweichungen führen. In Zusammenarbeit mit dem Systemhersteller wurden daher Tests mit auffälligen Ventilen im System durchgeführt. Unter den darstellbaren Randbedingungen konnte dabei ein ausreichend gutes Regelverhalten erreicht werden. Bei der weiteren Entwicklung der Systeme und der Implementierung in das Fahrzeug wurden jedoch noch Änderungen der Randbedingungen im System erwartet.

Ziel war daher, die Kennliniencharakteristik grenzgängiger Ventile weiter zu optimieren. Potenzielle Designmaßnahmen hierzu wurden identifiziert, theoretisch bewertet und als weiterer Entwicklungsschwerpunkt an aufgebauten Mustern verifiziert und abgesichert.

Dieser optimierte Musterstand wurde vorbereitend für die C-Musterphase aufgebaut und diente zur funktionalen Analyse und Absicherung des C-Muster Zieldesigns. Die wesentlichen Änderungen umfassen unter anderem die Neuauslegung des O-Rings für den Einstellbolzen, bei dem aus Gründen der thermischen Beständigkeit ein Materialwechsel vorgenommen wurde. Neben fertigungsoptimierten kleineren Änderungen, z.B. im Bereich des Verschlusses, lag der Fokus bei diesem Musterstand auf einer weiteren Optimierung des Regelverhaltens. Schwerpunkt dabei war die Reduzierung des stochastisch auftretenden Stick-Slip-Verhaltens, sowie eine weitere Verkleinerung der Kennlinienhysterese. Um das zu erreichen musste die Radialkraft mit möglichst geringem Einfluss auf die Axialkraft reduziert werden um einerseits den geforderten Durchsatz und andererseits den geforderten Druckbereich weiterhin sicher einhalten zu können. Abgeleitet aus der theoretischen Betrachtung und der Magnetkraftsimulation erfolgte eine Vergrößerung des Radialluftspaltes im Bereich des Magnetankers. Als weitere Maßnahme wurde eine optimierte Lagerbuchse mit reduzierter Lauffläche und kleinerem Lagerspiel eingeführt, um die zulässige Schiefstellung des Ankers einzuschränken. Das Änderungspaket hinsichtlich Regelbarkeit wurde mit der Einführung einer querkraftoptimierten Feder vervollständigt, ebenso mit dem Ziel die Radialkraftkomponente wirksam zu reduzieren. Seine positiven und robusten Eigenschaften galt es mit diesem Musterstand zu bestätigen. Schwerpunkt dabei war das Tieftemperaturverhalten und die Haltbarkeit.

Bei Vorabanalysen war es möglich, den Einfluss des Designs des Dichtwerkstoffes auf das Ventilverhalten bei Tieftemperatur und auf die Regelbarkeit nachzuweisen und zu definieren. Eine bereits eingeführte fertigungsoptimierte Designänderung des Elastomers musste in diesem Zusammenhang wieder zurückgenommen werden und konnte bei diesem Musterstand zur weiteren Bestätigung mit einfließen.

Der Aufbau der Muster in größerer Stückzahl erfolgte, wie auch in der Vergangenheit, im Musterbau mit Unterstützung der Entwicklung. Auffälligkeiten im Montage- und Schweißprozess konnten nicht festgestellt werden.

Aufgrund des geänderten Designs, mit Auswirkungen auf die Kräfteverhältnisse, war die Ableitung und Definition neuer Parameter für die Ventileinstellung erforderlich. In diesem Zusammenhang wurde auch das Einstellverfahren weiter entwickelt und grundlegend umgestellt. Von der bisherigen Einstellung auf Massenstrom ist man nun übergegangen auf eine Funktionseinstellung auf Gegendruck, die nun im Zuge der Einführung einer abströmseitigen Festdrossel (Blende) überhaupt erst möglich wurde. Diese Einstellmethode ist nicht nur systemrelevanter, sondern führt auch zu Fortschritten bei der Einstellgeschwindigkeit und vor allem bei der Einstellgenauigkeit. Auch im Hinblick auf eine spätere Automatisierung in der Serienfertigung ist diese Einstellmethode praktikabler, schneller und robuster.

Die Absicherung der Funktionalität und mechanischen Beständigkeit erfolgte mit einer vorangestellten elastomerspezifischen thermischen Alterung mit anschließendem Kurz- bzw. Labordauerlauf bei unterschiedlichen Temperaturen. Dieser Dauerlauf ersetzt nicht die eigentliche Mustererprobung bzw. den Erprobungsdauerlauf. Er deckt aber einen wesentlichen Anteil davon ab und ermöglicht in relativ kurzer Zeit eine fundierte Aussage und Ausblick auf das zu erwartende Verschleißverhalten. Die thermische Voralterung und der Labordauerlauf wurden im Erprobungszentrum der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen, in enger Zusammenarbeit mit der Entwicklungsabteilung, durchgeführt. Zur funktionalen Beurteilung wurden sowohl im Neuzustand, als auch nach der Voralterung und abschließend nach durchgeführtem Labordauerlauf die Ventile an den bereits etablierten Prüfständen mit den definierten Prüfungen nach TKU und Prüfvorschrift geprüft. Die Prüfungen erfolgten im Gegensatz zum Fahrzeug aus Kosten- und Sicherheitsgründen mit Stickstoff. Ausnahme dabei ist die Prüfung der externen Leckage die prinzipiell aus funktionalen Gründen mit Helium durchgeführt wird. Die Korrelation der Messergebnisse zur Prüfung und Betrieb mit Wasserstoff ist nachgewiesen und deren Übertragbarkeit sichergestellt.

Die Funktionsprüfung umfasste folgende Prüfschritte:

- Volllastdurchsätze (maximaler Durchsatz im stationären und dynamischen Fall)
- Leckagedruck (interne Leckage, maximaler Vordruck unter Einhaltung der Leckagegrenzwerte)
- Externe Leckage (Durchlässigkeit der Schweiß- und O-Ring Schnittstellen)
- p/l-Kennlinien mit unterschiedlichen Vordrücken (Regelbarkeit)
- Tieftemperaturverhalten:
 - Kaltstart (Öffnungsverhalten bei Tieftemperatur)
 - Leckagedruck (Verhalten der internen Leckage bei Tieftemperatur)

Nach der Einstellung der Ventile, sowie dessen Sicherung und Komplettierung durch die Montage der Magnetgruppe, konnte die volle Funktionalität des Neuteils positiv nachgewiesen werden. Sowohl bei Raumtemperatur, als auch bei Tieftemperatur wurden die Spezifikationswerte sicher erreicht. Speziell bei den Kennlinien erwiesen sich die regelbarkeitsoptimierenden Maßnahmen als wirksam und zielführend. Auch die Änderung des O-Rings am Einstellbolzen konnte bei der Ausgangsmessung durch die Prüfung der externen Leckage positiv verifiziert werden. Die Lage der Funktionswerte während der Absicherung bezogen auf die Spezifikation ist in Abb. 5.1.1 grafisch dargestellt. Unterschieden wird dabei zwischen der Messung als Neuteil (Ausgangsmessung – AM), der Messung nach der thermischen Voralterung (Zwischenmessung – ZM) und der Messung nach dem Labordauerlauf (Endmessung – EM). Dargestellt ist je Prüfung der Mittelwert aller Ventile als Messpunkt und der Spezifikationsbereich in dem die Messwerte liegen müssen als schraffiertes Rechteck.

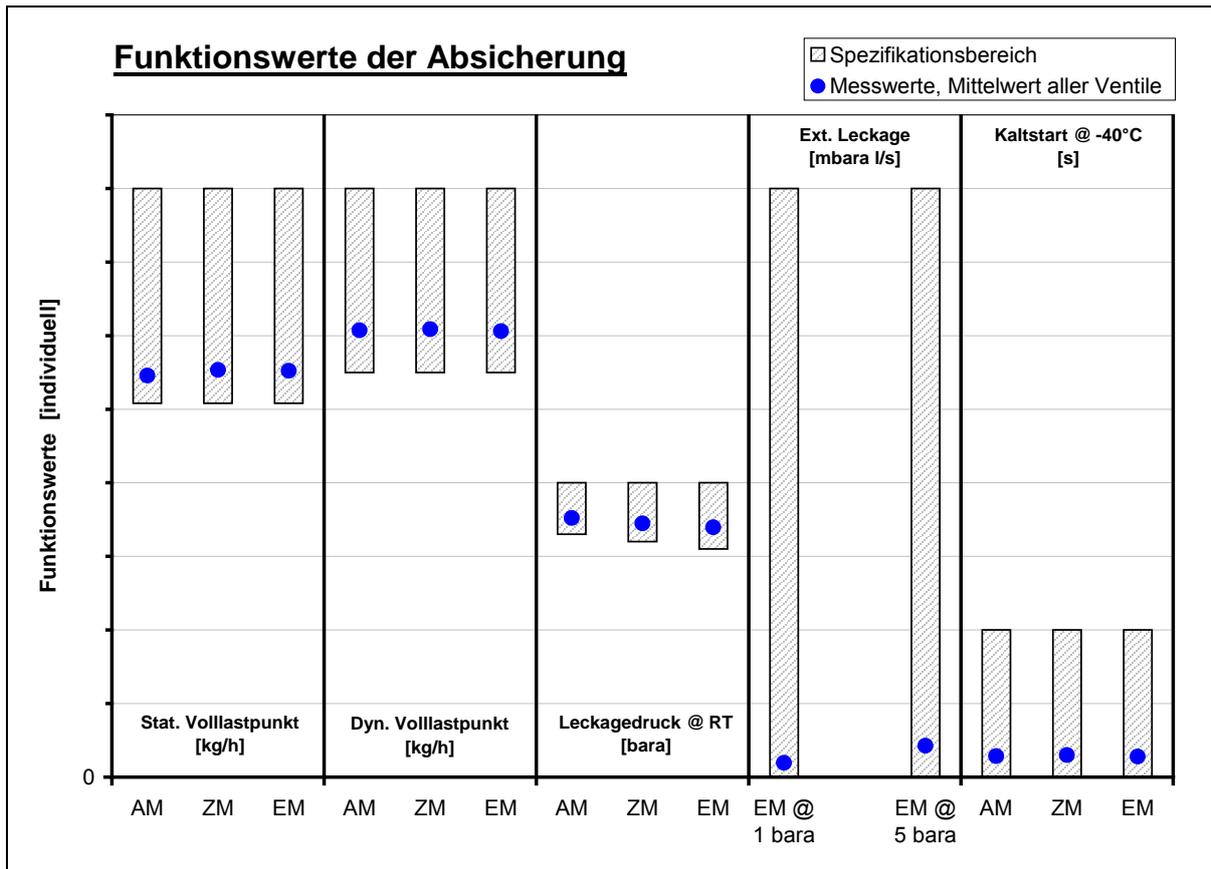


Abb. 5.1.1: Gemittelte Funktionswerte der Ausgangs-, Zwischen-, und Endmessung

Wie man der Auswertung entnehmen kann, bleiben die Volllastdurchsätze auch nach der Voralterung und dem Labordauerlauf nahezu unverändert innerhalb der Spezifikation. Beim Leckagedruck hingegen ist ein leichter, zulässiger Abfall des maximal möglichen Vordrucks erkennbar, begründet durch das Verschleißverhalten des Elastomers. Der alterungsbedingte Verschleiß führt zu einer plastischen Verformung des Elastomerwerkstoffes in Verbindung mit der Dichtkante im Sitzbereich und hat eine Hubvergrößerung zur Folge. Die Hubvergrößerung entspricht der Verschleißtiefe, so dass die Feder im geschlossenen Zustand um diesen Betrag entspannt wird und sich somit die Schließkraft verringert.

Bei der externen Leckage ist die Endmessung bei unterschiedlichen Prüfdrücken dargestellt. Auch hier liegen die Messwerte sicher innerhalb der Spezifikation, wodurch der neue O-Ring am Einstellbolzen für die nachfolgende Musterphase festgelegt werden konnte. Das Kaltstartverhalten ist mit dem neuen Elastomerwerkstoff auch weiterhin unauffällig und zeigt hier ein robustes Öffnungsverhalten bei -40°C. In Abb. 5.1.2 ist das Verhalten der internen Leckage indirekt mit dem Leckagedruck über dem Temperaturbereich dargestellt. Auch in diesem Zusammenhang werden die Auswahl des Elastomerwerkstoffes und dessen Design positiv bestätigt. Der minimale Abfall der Dichtheit über der Temperatur liegt im zulässigen Bereich und ist auf Temperatureinflüsse zurückzuführen. Im Vergleich zu alternativen Dichtwerkstoffen zeigt der verwendete Kautschuk hier wiederholt ein äußerst positives Verhalten. Durchweg positiv ist auch das Leckageverhalten über Alterung und Betrieb. Die leichte Verschlechterung der Dichtheit ist auf den Verschleiß zurückzuführen. Dennoch wird die Spezifikation sicher über den gesamten Temperaturbereich, sowie über Voralterung und Labordauerlauf eingehalten.

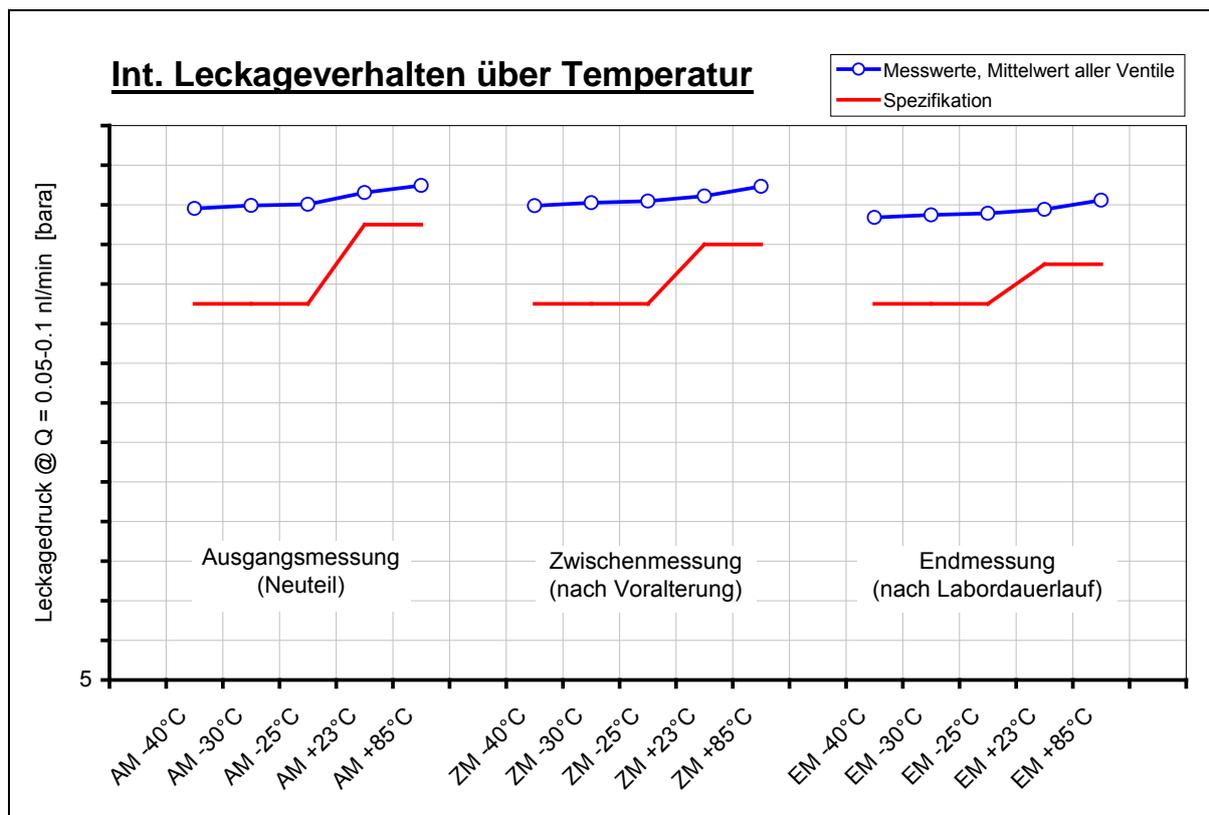


Abb. 5.1.2: Mittelwerte des Leckageverhaltens der Ausgangs-, Zwischen-, und Endmessung über dem Temperaturbereich

Abschließend erfolgte noch die Betrachtung der Regelbarkeit, beurteilt durch das Verhalten der p/l-Kennlinien, wie exemplarisch in Abb. 5.2.3 aufgezeigt. Hier sind die Kennlinien eines Ventils bei drei unterschiedlichen Vordrücken, jeweils im Neuzustand, nach Voralterung und Labordauerlauf grafisch dargestellt.

Die erkennbare Verschiebung der p/l-Kennlinien ist auf den bereits beschriebenen Elastomerverschleiß zurückzuführen.

Ausgewertet werden die Kennlinien hinsichtlich der Steigung einzelner Kurventeilstücke, Hysterese zwischen der ansteigenden und fallenden Kennlinie und dem partiellen Sprungverhalten, verursacht durch Stick-Slip-Effekte oder Instabilitäten. Auffallend sind die Unstetigkeiten beim Prüfdruck 1 im oberen Bereich der Kennlinien, die erstmals oder auch verstärkt nach der Alterung bzw. dem Betrieb auftreten. Alle Bewertungskriterien liegen dennoch innerhalb der Spezifikation. Im Vergleich zu Vorgängermusterständen zeigt sich, dass die eingeführten Optimierungsmaßnahmen bezüglich der Verbesserung der Regelbarkeit wirken. Auch wenn es nicht gelungen ist, die Stick-Slip-Effekte komplett zu beseitigen, so konnte zumindest in einem ersten Schritt die Auftretenswahrscheinlichkeit und Ausprägung signifikant reduziert werden.

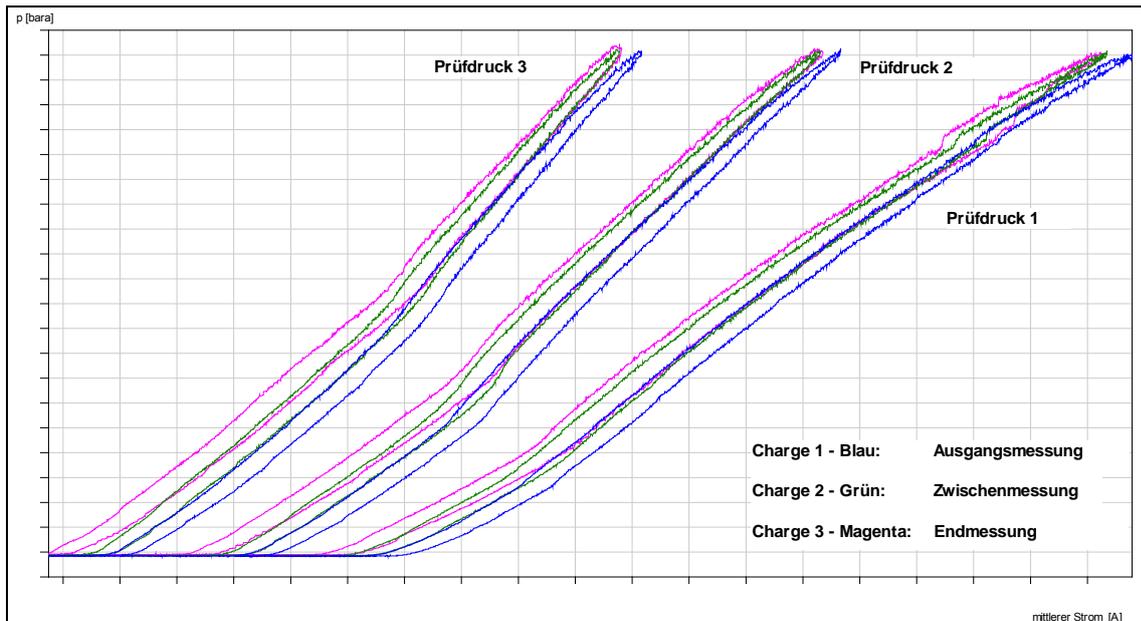


Abb. 5.1.3: Exemplarische Kennlinien eines Ventils der Ausgangs-, Zwischen-, und Endmessung, bei unterschiedlichen Vordrücken

C-Muster Design

In das C-Muster Design sind weitere fertigungsoptimierende Änderungen eingeflossen. Für die Lebensdauerabsicherung (Erprobung) wurden über 60 Funktionsmuster mit verschiedensten Tests geprüft. Abb. 5.1.4 zeigt beispielhaft das Zwischenergebnis zu den Funktionswerten Durchsatz und interne Dichtheit vor und nach der Absicherung. Aufgrund der, mit dem Kunden abgestimmten, Anpassung des Durchsatzgrenzwertes für Feld- bzw. Erprobungsteile werden die Spezifikationen über Lebensdauer sicher erfüllt. Für die interne Dichtheit stellen tiefe Temperaturen die kritischere Randbedingung dar. In Abb. 5.1.4 sind rechts die Dichtdrücke bei der unteren spezifizierten Grenztemperatur von $T = -30^{\circ}\text{C}$ eingetragen. Die Ergebnisse der übrigen Funktionswerte waren ebenfalls ohne Auffälligkeiten.

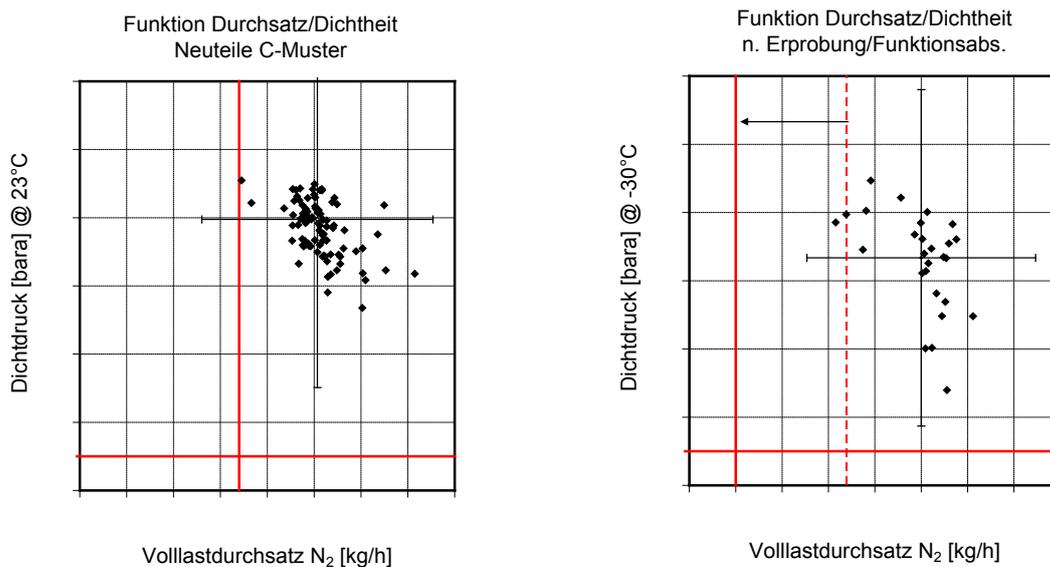


Abb. 5.1.4: Übersicht Funktionswerte Durchsatz und interne Dichtheit aus C-Muster Erprobung. links: Neuteile (Dichtheit @ RT); rechts: nach Erprobung (Dichtheit @ -30°C)

Design für Anwendung bei erhöhten Gegendrücken

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von BZ-Systemen ist eine weitere Reduzierung der Kosten erforderlich. Um das zu erreichen geht man vom bisherigen Systemansatz der aktiven H₂-Rezirkulation mittels Rückförderpumpe auf ein passives System über. Die Umsetzung erfolgt mittels einer Strahlpumpe. Dies hat zur Folge, dass aufgrund der sich ändernden Funktionsrandbedingungen die Anforderungen an das HGI für diesen Systemeinsatz neu definiert werden müssen. Die wesentliche Systemänderung ist die abströmseitige Druckerhöhung zwischen dem HGI und der Strahlpumpe. Beim ursprünglichen HGI-Design führte das zu negativen Auswirkungen hinsichtlich der Regelbarkeit. Zur Verbesserung der Kennliniencharakteristik waren daher zusätzliche Anpassungen erforderlich. Dazu wurden parallel zum Hauptentwicklungspfad des HGI Designkonzepte für den Elastomerdichtsitz entwickelt und deren Potenzial in Bezug auf Funktion, Belastbarkeit und Fertigbarkeit bewertet.

Design mit radial abgeschliffenem Verschluss

Untersuchungen am Standard Ventil zeigten, dass sich ein erhöhtes Nachdruckniveau negativ auf die Stetigkeit der Durchsatz-Kennlinie des Ventils auswirkt. In druckgeregelten Jet-Pump-Systemen ist dies problematisch, da sich die Robustheit für die Regelung reduziert bzw. ein zusätzlicher Applikationsaufwand erforderlich wird. Die Ursachen der Unstetigkeiten wurden theoretisch durch CFD Simulationen analysiert und anhand von Funktionsmustern verifiziert. Hierzu wurden Muster mit Verschlüssen unterschiedlicher Durchmesser aufgebaut (vgl. Abb. 5.1.5).

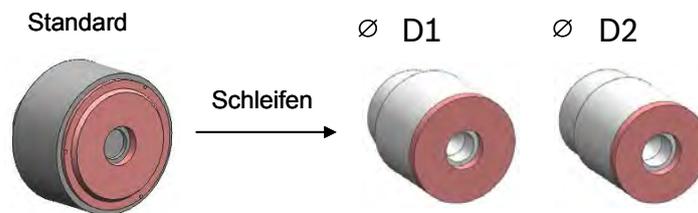


Abb. 5.1.5: Verschlussgeometrien für Funktionstests bei erhöhtem Nachdruck

Den Einfluss des Verschlussdurchmessers auf den Verlauf der Kennlinie zeigt Abb. 5.1.6. Die sprunghafte Änderung des Strömungszustands und damit der Druckverteilung unter dem Verschluss führt zu einer Änderung des Ventillhubes und damit des Durchsatzes. Die Auswirkung der Druckänderung ist dabei umso höher, je größer die wirksame Fläche d.h. der Durchmesser des Elastomers ist. Der Effekt ist quasi reversibel, d.h. beim Schließen des Ventils findet der Vorgang in umgekehrter Richtung an derselben Stelle statt. Die Kennlinie des Ventils mit reduziertem Elastomerdurchmesser zeigt einen stetigen Verlauf. Die Reduzierung des Durchmessers stellt damit eine wirksame Maßnahme zur Minimierung bzw. Beseitigung von Unstetigkeiten in der Kennlinie dar.

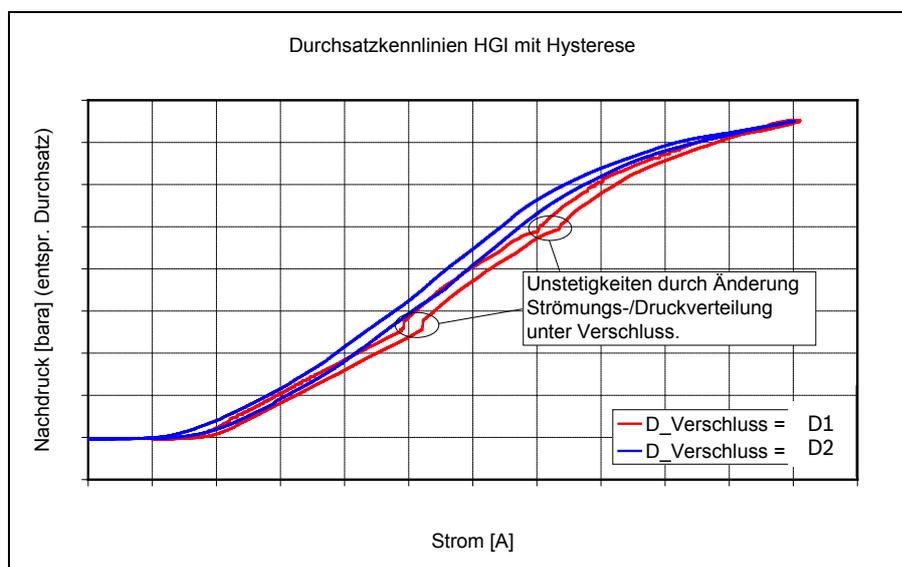


Abb. 5.1.6: Kennlinien von Funktionsmustern mit unterschiedlichem Verschlussdurchmesser.

Aufgrund der damit einhergehenden Erhöhung der Flächenbelastung des Elastomers ist die radiale Durchmesserverkleinerung jedoch nur eingeschränkt möglich. Die Funktionsmuster mit reduzierter Überdeckung zeigten einen unzulässig hohen Verschleiß des Elastomers aufgrund der verringerten Abstützfläche (vgl. Abb. 5.1.7.).

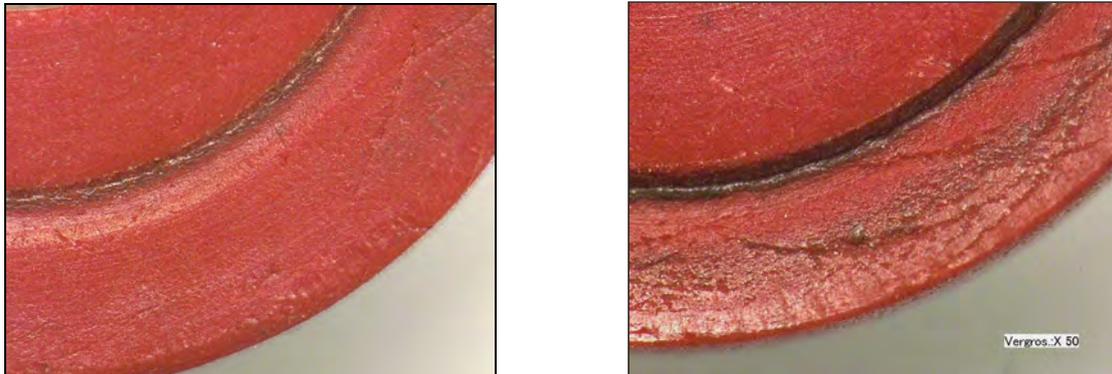


Abb. 5.1.7: Restverformung und Verschleiß am Elastomer nach Alterung und Dauerbelastung links: Durchmesser „D1“; rechts: Durchmesser „D2“

Theoretische Analyse

Zur theoretischen Analyse der teilweise sprunghaften Unstetigkeiten in den Kennlinien wurden CFD-Simulationen durchgeführt. Eine wesentliche Ursache der Unstetigkeiten sind demnach Strömungseffekte im Bereich zwischen dem dichtenden Elastomer und der Düse. In Abb. 5.1.8 ist dies anhand des Strömungsprofils bei zwei Ventilhuben und für unterschiedliche Geometrien der Elastomerdichtung dargestellt.

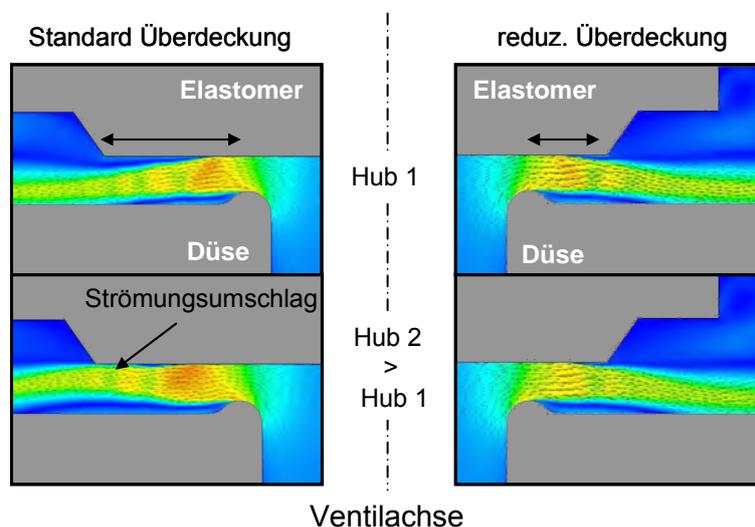


Abb. 5.1.8: Ergebnisse CFD-Simulation für verschiedene Überdeckungen Elastomer/Düse

Mit zunehmendem Hub löst sich die zunächst an der Düse anliegende Gasströmung ab (vgl. Abb. 5.1.8 links). Dieser Strömungsumschlag findet schlagartig statt und führt zu einer sprunghaften Änderung der am Verschluss wirkenden pneumatischen Kräfte. Bei einer Reduzierung der Elastomerüberdeckung (vgl. Bild 5.1.8 rechts) ändert die Strömung ihre Anlagefläche nur allmählich mit zunehmenden Hub. Zudem wirken die Druckänderungen auf eine kleinere Fläche. Dies führt zu einem Verlauf der Kennlinie ohne Unstetigkeiten. Die theoretischen Ergebnisse wurden anhand der zuvor beschriebenen Messungen bestätigt.

Im weiteren Verlauf der Entwicklungsaktivitäten wurden diese Untersuchungen weiter verfolgt um einen optimalen Kompromiss zwischen Regelgüte und Sitzverschleiß zu finden. Hierzu wurden

weitere Varianten mit unterschiedlichen Verschlussdurchmessern aufgebaut. Die Ergebnisse zeigten allerdings, dass ein Kompromiss bezüglich der Güte der Regelbarkeit nicht zielführend ist. Auf dieser Designbasis wurden keine weiteren Optimierungsmöglichkeiten mehr gesehen.

Design mit „innenaufliegender Düse“

Mit der Erkenntnis bezüglich der Einflussparameter auf die Güte der Regelbarkeit und dem Zielkonflikt hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit konnte eine weitere Designvarianten abgeleitet und definiert werden. Der Ansatz bestand darin, einerseits mit einer weitmöglichen Reduzierung des Elastomerdurchmessers bzw. des Überstands zwischen der Dichtkante und dem Außendurchmesser des Verschlusses die Regelbarkeit zu optimieren. Andererseits galt es mit einer zusätzlichen Auflagefläche im Bereich der Düse ausreichend Abstützfläche für die Belastung während der Lebensdauer zur Verfügung zu stellen.

Die für die Belastbarkeit notwendige Abstützfläche des Elastomers konnte düsenseitig zwischen der Zuströmbohrung und der Dichtkante bereitgestellt werden. Somit war es möglich, die für die Regelbarkeit erforderliche minimale Elastomerüberdeckung außerhalb der Dichtkante zu realisieren. Da durch diese Maßnahme mit einer Verringerung des maximal möglichen Massenstromdurchsatzes zu rechnen war, handelte es sich um eine Kompromisslösung. Die Auslegungsgrenze bestand hinsichtlich der Reduzierung des Innendurchmessers, so dass der geforderte Durchsatz noch erreicht wird.

Der Kompromiss galt auch für die Robustheit im Vergleich zur Standardauslegung. Um eine im Vergleich hierzu äquivalente Abstützfläche zu erreichen wäre die Vergrößerung des Dichtdurchmessers erforderlich gewesen. Dies hätte allerdings zur Folge, dass die druckbeaufschlagte Fläche im Ventilsitz größer wird und dadurch die Dichtheit negativ beeinflusst wird. Um dies zu vermeiden, wären eine höhere Federvorspannung und damit eine Verstärkung des Magnetkreises notwendig. Ventiltseitig ist dieser bereits durch spezielle Werkstoffe und angepasste Bauteilgeometrien weitestgehend optimiert, so dass hier kein nennenswertes Potenzial mehr bestand. Zudem wäre ebenfalls eine Anpassung der Magnetspule inklusive Umspritzung erforderlich. Eine solche Lösung wäre im angestrebten Variantenrahmen nicht umsetzbar und wurde aufgrund der zu erwartenden Kostensteigerung nicht weiter verfolgt.

Der Verschluss mit reduziertem Außendurchmesser wurde durch Nacharbeit eines verfügbaren Standardverschlusses realisiert. Dabei wurde der Außendurchmesser abgedreht und der Übergang zur Planfläche schräg angeschliffen, um der Geometrie eines fertigungsgerechten Designs möglichst nahezukommen und das Abstützverhalten des Zieldesigns abzubilden.

Die Funktionsabsicherung erfolgte mit aufgebauten HGI-Varianten, mit oben beschriebenen Designmerkmalen.

Design mit „asymmetrischer Verschluss“

Bei dieser Designvariante bestand der Ansatz darin die Überdeckung des Verschlusses bezogen auf die Dichtkante nicht umlaufend, sondern partiell zu realisieren und weiterhin die positive Auswirkung auf die Regelbarkeit aufrecht zu erhalten. Die notwendige Abstützfläche sollte flächenäquivalent bei einem größeren Radius zur Verfügung gestellt werden um trotzdem weiterhin die Anforderung hinsichtlich der Belastbarkeit zu erfüllen.

Auch bei diesem Konzept wurde funktional eine möglichst kleine Elastomerüberdeckung erreicht, jedoch partiell mit zusätzlicher Fläche außerhalb der Dichtkante. Diese dienen im geschlossenen Zustand zur Abstützung des Elastomers auf der Düsenoberfläche, mit dem Ziel, die Belastbarkeit über Lebensdauer zu erreichen. Der Kerndurchmesser entspricht dem Außendurchmesser eines radial abgeschliffenen Verschlusses mit optimaler Regelgüte (Kennlinienverlauf). Die Gesamtfläche zur Abstützung auf der Düsenoberfläche ist äquivalent zu einem radial maximal abgedrehten Standardverschluss, mit dem die Haltbarkeitsanforderung in vorangegangenen Untersuchungen nachgewiesen wurde. Aus strömungstechnischer Sicht sollten die zusätzlichen Flächen möglichst klein gehalten werden, damit diese keinen negativen Einfluss haben. Zur Einhaltung der Flächengleichheit war eine Anpassung des Gesamtdurchmessers erforderlich. Hier sind jedoch aufgrund der Außenmaße des Verschlussdesigns und der Fertigungsmöglichkeiten Grenzen gesetzt.

Für erste Untersuchungen wurde ein vorhandener Standardverschluss verwendet und durch Nacharbeit das Design des Elastomers angepasst. Bei diesem Prototyp entsprechen die zusätzlichen Flächen allerdings noch nicht der endgültigen Ausführung. Die Elastomerauflagefläche ist somit kleiner, im Vergleich zum maximal möglichen abgedrehten Verschlussdurchmesser des Standardventils, das die Haltbarkeitsanforderungen noch erreicht. Die Stichversuche mit dem

Prototypverschluss sahen insbesondere bezüglich der Regelbarkeit zielführend aus. Auch die restlichen Funktionswerte zeigten sich positiv.

Zur weiteren Bewertung der Wirksamkeit dieses Ansatzes im Hinblick auf die Verbesserung der Gasströmung wurden CFD-Simulationen an einer fertigungsgerechten Geometrie durchgeführt. Diese Geometrie zeigte noch keine umfassende Verbesserung der Strömungsverhältnisse. Weitere Optimierungsmaßnahmen mit Rückwirkung auf das Urformwerkzeug waren erforderlich, um einen stetigen Verlauf der pneumatischen Kraft über dem Ventilhub zu erreichen. Entsprechend den Simulationsergebnissen mit optimierter Geometrie treten keine signifikanten Strömungsablösungen und die damit verbundenen unerwünschten Drucksprünge mehr auf. Der stetige Verlauf der Pneumatikkraftkennlinie lässt somit eine robuste Regelgüte dieses Konzepts erwarten (vgl. Abb. 5.1.9).

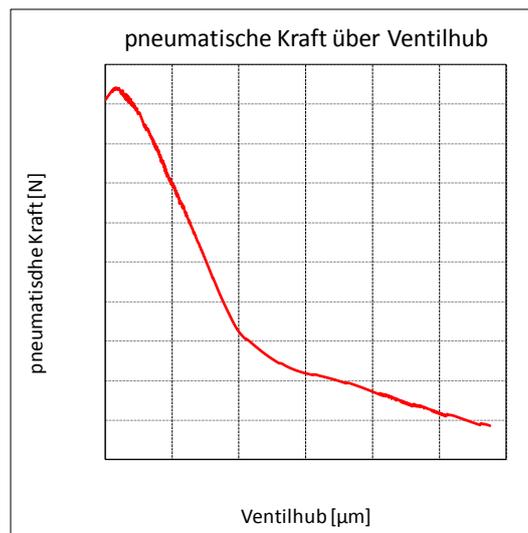


Abb. 5.1.9: CFD-Simulationsergebnisse für das Konzept „asymmetrischer Verschluss“. Verlauf der pneumatischen Kraft über dem Ventilhub

Ausgehend von den positiven Ergebnissen der theoretischen Betrachtungen wurde das Konzept konstruktiv in den Einzelteilzeichnungen umgesetzt. Im Rahmen einer Funktionsabsicherung mittels Labordauerlauf mit vorangestellter thermischer Voralterung wurden Funktionsmuster zur Untersuchung der Robustheit und Funktionalität bei Alterung und Dauerbelastung aufgebaut und untersucht.

AP 5.2 Funktionsanalyse

Funktionsanalyse B-Muster Komponente

Im Rahmen der Konzeptanalyse wurden auf Basis des B1- und B2-Musterstands umfangreiche Funktionstests durchgeführt. Diese umfassten:

Standardmessungen

- Statische Durchsatz-Kennlinie
- Leckage-/Öffnungsdruck @ RT, -25°C, -40°C
- externe Leckage
- Öffnungszeit bei Tieftemperatur (-25°C)

Funktionswerte

- Volllastdurchsatz / Stabilität / Hysterese
- interne Dichtheit
- externe Dichtheit
- Kaltstartfähigkeit

Zusätzliche Messungen als Basis für theoretische Potenzialanalyse

- Messung Magnetkraft, pneumatische Kraft, dynamischer Hub, Elastomerverformung, ...

Zur Abschätzung der erreichbaren Funktionswerte @ „End of Life“ wurden die Standardmessungen an den Neuteilen sowie nach thermischer Voralterung inkl. Schalldruckdauerlauf durchgeführt.

Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen ergaben für den B1-Musterstand folgendes Ergebnis:

- Die Anforderungen an Durchsatz und Dichtheit im Nenndruckbereich des DR (Neuteil) werden über Lebensdauer erfüllt (ohne Tieftemperatur).
- Der gesamte aktuell spezifizierte Druck- und Temperaturbereich (inkl. EOL bzw. defekt DR) kann nicht vollständig abgedeckt werden.

Schlussfolgerung:

- Die Umsetzung des aktuellen Konzepts in Serie erfordert die Anpassung der Spezifikation an den Betriebsgrenzen (Verringerung der Druckspreizung). Voraussetzung hierfür ist, dass eine Anpassung des Funktionsbereichs für das HGI keine Einschränkung der System- bzw. der Fahrzeugeigenschaften bewirkt.

Für die weiterführenden Arbeiten wurde gemeinsam mit Systemlieferanten folgendes Vorgehen festgelegt:

Prüfung der Maßnahmen/Aufwand/Kosten zur Erreichung der Druckspreizung durch Maßnahmen am HGI bzw. im System:

Maßnahmen HGI:

z.B. Düsendesign, innerer Magnetkreis, Magnetkreis inkl. Spule

Systemmaßnahmen:

z.B. Spezifikation SIV/Druckregler, Betriebsstrategie/Systemreaktion @ EOL/Fehlerfall
Druckregler

Funktionalität im System

Messung des Ventilhubes bei Druckregelung mit einem B3-Muster:

Zum besseren Abgleich von Ergebnissen aus der Simulation des Ventilverhaltens und experimentellen Ergebnissen wurden Versuche zur Druckregelung am Komponentenprüfstand bei gleichzeitiger Messung des Ventilhubes mittels eines Laservibrometers durchgeführt. Wesentliche zu klärende Aspekte stellten dabei die Fragen dar, inwiefern bei Druckregelung beobachtete Druckoszillationen mit Schwingungen im Ventilhub korrelieren und ob sich die bei der Messung der Ventilkennlinie und in der Simulation beobachteten Instabilitäten des Ventils im Hubverhalten bei der Druckregelung nachweisen lassen.

Abbildung 5.2.1 zeigt den Verlauf des Ansteuerstroms, des Ventilhubes, des Nachdrucks (Relativdruck) sowie des Vordrucks bei Lastsprüngen und Lastrampen bei einem definierten Prüfdruck. Bei den Lastsprüngen von 1,2 bar auf 2,8 bar und etwa halben Nenndurchfluss wird über den Regler kurzzeitig ein Strom von über 2 A am Ventil eingestellt. Dieser bewirkt ein schnelles, vollständiges Öffnen des Ventils auf einen Hubwert von knapp 450 µm. Dieser Wert ergibt sich, da der Nullpunkt des Laservibrometers nicht dem Hub entspricht, bei dem das Ventil gerade öffnet, sondern dem geschlossenen Ventil bei komprimierter Elastomerdichtung entspricht. Der P-Anteil des Reglers reagiert auf den Druckaufbau in ca. 0,5 s mit einem Absenken des Ansteuerstroms, das wiederum zur Reduzierung der Ventilöffnung auf einen Hub von ca. 120 µm. Bei konstantem Nachdruck und Durchfluss sind noch geringe Hubänderungen des Ventils zu beobachten, die zumindest teilweise auf den schwankenden Vordruck auf Grund der ungenügend parametrisierten Vordruckregelung des Prüfstands zurückzuführen sind.

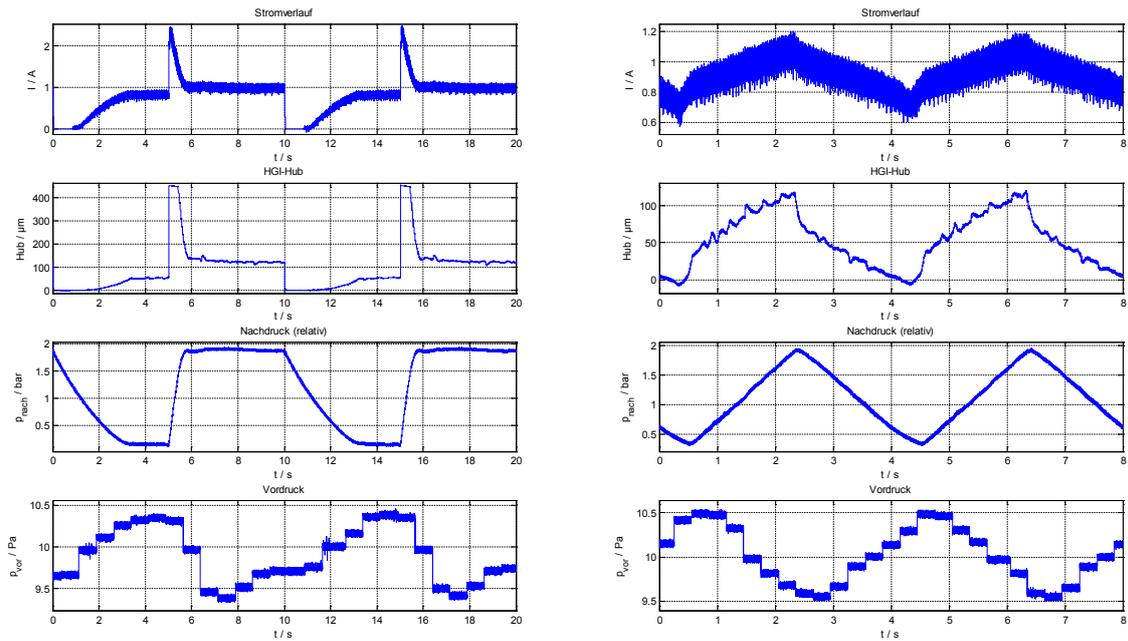


Abb. 5.2.1: Ventilhubverhalten bei Nenndruck. Lastsprünge (links) und Lastrampen (rechts).

Bei den rechts dargestellten langsamen Lastrampen ($f = 0,25$ Hz) mit denselben Werten für min. und max. Druck und Durchfluss ist zu erkennen, dass ein maximaler Hub von lediglich knapp über $100 \mu\text{m}$ erreicht wird, der dem sich nach einem Lastsprung stationär einstellenden Wert entspricht. Bei öffnendem und schließendem Ventil sind überlagerte Abweichungen im Ventilhub zu erkennen, die hier durch das Nachregeln des Druckreglers, teils als Reaktion auf den wiederum stark variierenden Vordruck, verursacht werden. Der im Diagramm stark verrauscht dargestellte Stromverlauf ergibt sich durch die PWM-Ansteuerung mit einer Frequenz von $1,5$ kHz wie bei einer höheren Auflösung der Zeitachse erkennbar wäre.

Zum Vergleich sind in Abb. 5.2.2 wiederum Lastsprünge und langsame Lastrampen bei einem erhöhten Vordruck dargestellt. Durch das frühere Öffnen des Ventils bei höherem Vordruck sind die Ströme am HGI zu geringeren Werten verschoben. Auch bei höherem Vordruck geht das Ventil bei einem Lastsprung kurzzeitig in den Vollhub.

Anschließend kann der für den stationären Zustand notwendige Hub nicht eingestellt werden, da das Ventil in diesem Bereich bei höherem Vordruck instabil ist. Die dadurch auftretenden Schwingungen sind sowohl im Hub als auch gedämpft im Nachdruck erkennbar. Dieses Verhalten zeigt sich auch bei der Messung der Lastrampen. Im Bereich niedriger Hübe kommt es auch hier zu starken Oszillationen im Ventilhub verursacht durch dessen Instabilität, die wiederum zu Schwingungen im Nachdruck führen. Das durch die Simulation vorhergesagte Verhalten konnte also qualitativ bestätigt werden.

Da instabiles Ventilverhalten außer zu Druckschwingungen auf Grund der hier nachgewiesenen Huboszillationen zu höherem Verschleiß des Ventils führen kann, wurden für das B4-Muster nochmals Designänderungen eingeführt mit dem Ziel, den Anstieg der pneumatischen Kraft über dem Ventilhub bei sich öffnendem Ventil zu reduzieren, um so bei noch akzeptabler Federsteifigkeit in einem möglichst großen Betriebsbereich des Ventils stabiles Verhalten zu erzielen.

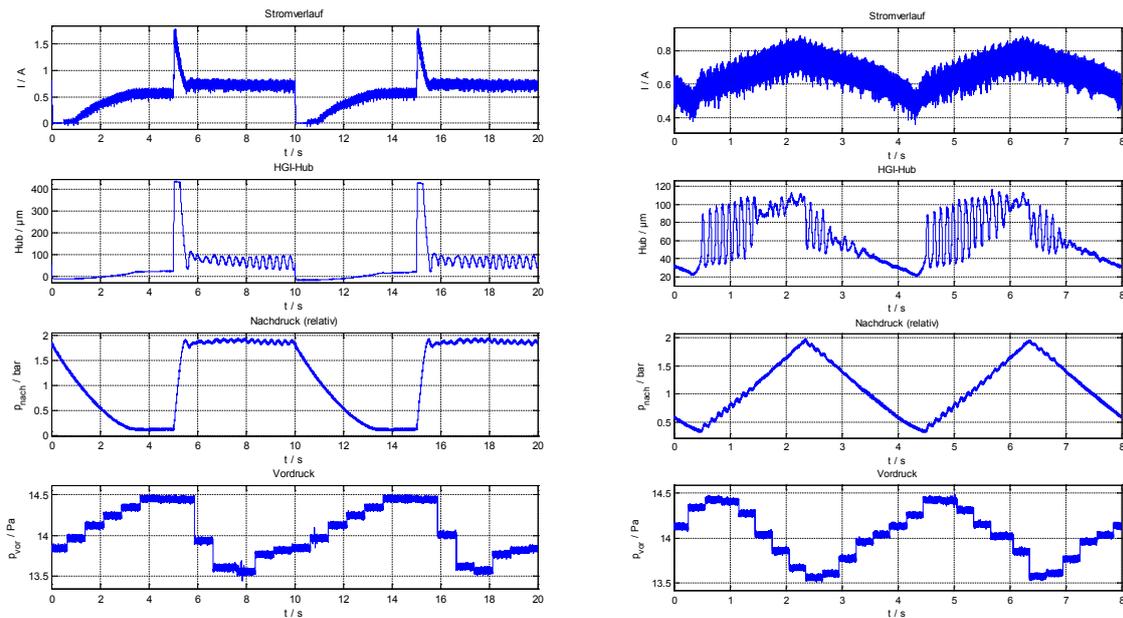


Abb. 5.2.2: Ventilhubverhalten bei erhöhtem Vordruck. Lastsprünge (links) und Lastrampen (rechts).

Druckregelung am 100 kW-Brennstoffzellen-Systemteststand:

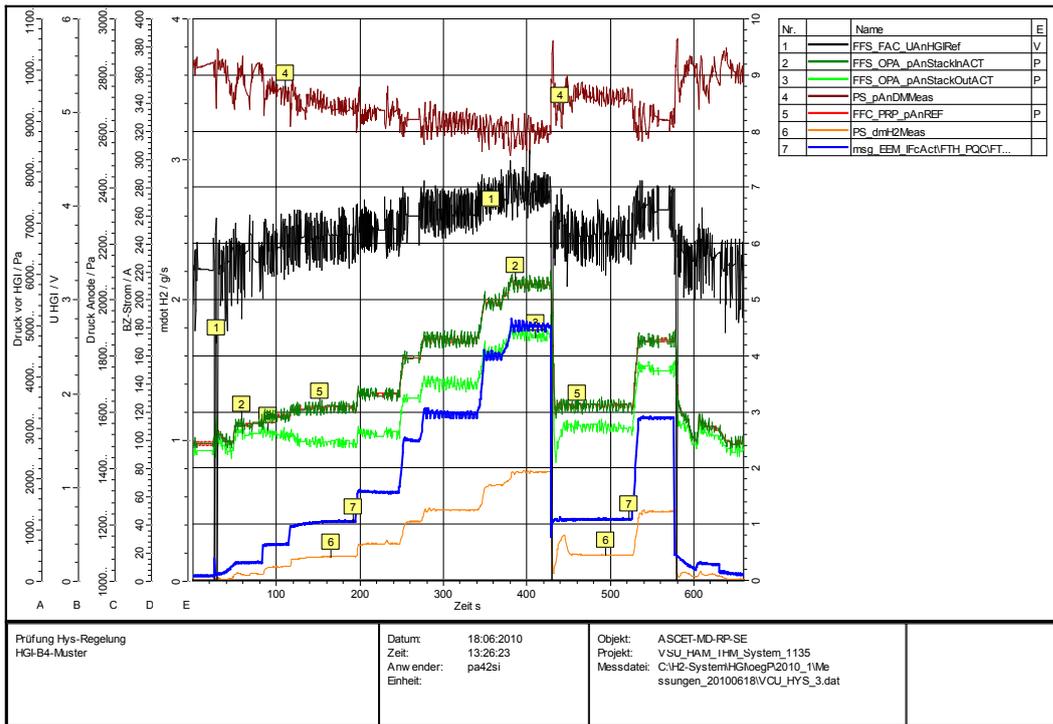
Im Rahmen der Funktionsvalidierung des HGI wurden Ventile unterschiedlicher Musterstände für die Anodendruckregelung am Bosch-eigenen BZ-Systemteststand eingesetzt. Der dort momentan eingebaute Brennstoffzellen-Stack hat eine elektrische Leistung von max. ca. 80 kW, so dass die auftretenden Betriebsrandbedingungen für das HGI hinsichtlich Durchfluss und Druck gut mit den Anforderungen im Fahrzeug-Zielsystem übereinstimmen und die vom Kunden gestellten Anforderungen überprüft werden können. Dazu wird auch ein für die Fahrzeuganwendung entwickeltes H2-Tank-Druckminderer-Muster der Firma Tescom am Prüfstand eingesetzt.

Abb. 5.2.3 zeigt beispielhaft ein Ergebnis der Anodendruckregelung am Systemteststand. Neben dem Solldruckverlauf (5, rot) sind der eingeregelt Istdruck (2, dunkelgrün) im Zulauf der Brennstoffzelle, der Druck im Austritt der Anode (3, hellgrün), der HGI-Vordruck (4, braun), die Ansteuerspannung (1, schwarz) sowie der Brennstoffzellen-Strom (7, blau) und der mit einem Massendurchfluss-Sensor gemessene H2-Strom durch das HGI (6, orange) dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass der eingeregelt Druck bei sprunghaften Laständerungen der Dynamik des Solldrucks sehr gut folgt. Auch die Schwankungen des Vordrucks werden gut ausgeglichen. Da sich das Solldruck-Signal aus dem Istdruck der Kathode der Brennstoffzelle ergibt, treten hier ebenfalls Schwankungen auf, die wiederum zu Schwankungen im eingeregelt Anodendruck führen.

Insgesamt konnte auf Basis der vorliegenden Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass die Anodendruckregelung der Brennstoffzelle mit dem HGI möglich ist. Dabei bereitete auch die Umstellung zwischen den Musterständen keine Probleme.

Simulative Ermittlung der Toleranz der HGI-Kennlinie:

Als erster Schritt zur Beantwortung der Frage nach der max. zulässigen Toleranz der Kennlinie des HGI wurden Simulationsstudien mit einer erweiterten Version des Modells für das HGI parametrisiert für den B3-Musterstand durchgeführt. Zur Variation des Ventilverhaltens wurde der sich bei einem Ventilhub ergebende Durchfluss bei gleichem maximalem Durchfluss mit einem jeweils konstanten Faktor multipliziert. Als Regler wurde ein einfacher PI-Regler mit Anti-Windup bzw. Winddown, Vorsteuerung des Öffnungsstroms und von der Druckdifferenz am HGI abhängigen Verstärkungsfaktoren verwendet.



21.07.2010 11:13:48

1/1

Abb. 5.2.3: Druckregelung am 100 kW-Brennstoffzellen-Systemteststand mit dem HGI-B4-Muster

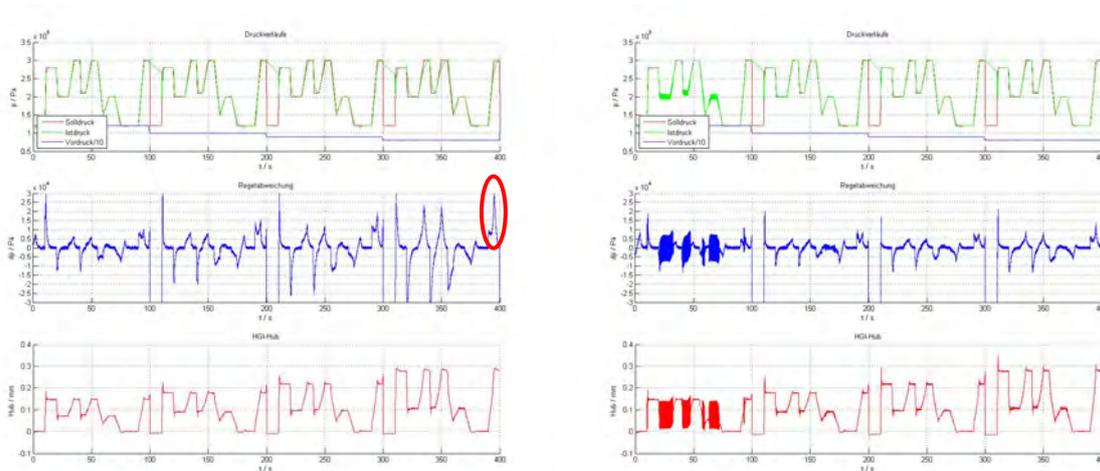


Abb. 5.2.4: Simulierte Druckverläufe und Hubverläufe des HGI bei Variation der Steigung der HGI-Kennlinie im Modell. Links: Faktor 0,8; rechts: Faktor 1,2

Bei den in Abb. 5.2.4 dargestellten Simulationen wurden scharfe Lastprofile (Vollast-Erreichung aus geringer Last innerhalb von 1-5 s) vorgegeben und bei Variation des Vordrucks simuliert. Im Ausgangszustand wurde der Regler mit den Vorgaben stabiles Regelverhalten im stationären Betrieb bei möglichst geringen positiven Regelabweichungen bei Lastanstiegen ($\ll 250$ mbar als zulässige Grenze) parametrisiert. Bei Multiplikation der Kennlinie mit einem Faktor von 0,8 (linkes Bild) treten bei steilen Lastgradienten auf Grund der durch die Magnetkraftschwächung bei hohem Ventilhub nur noch sehr flachen Kennlinie, positive Regelabweichungen von > 250 mbar auf (siehe rote Markierung). Andererseits kommt es bei einer Multiplikation mit dem Faktor 1,2 zwar zu deutlich geringeren Regelabweichungen, jedoch bei höherem Vordruck zu instabilem Druckregelverhalten. Bei einem Faktor von 1,4 (nicht dargestellt) ist dieses Verhalten im kompletten Vordruckbereich zu beobachten. Für die Variation der Steigung der Ventilkennlinie besteht also bei einem relativ einfachen

Regler nur ein kleiner zulässiger Bereich, in dem es nicht zu spürbar negativen Auswirkungen auf die Druckregelung kommt.

Druckregelung und zulässige Toleranz der HGI-Kennlinie

Ausgehend von den geleisteten Vorarbeiten war ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt, die Untersuchungen der mit den HGI-Prototypen realisierbaren Regelgüte. Dazu wurden verschiedene komplexere Ansätze mit erhöhtem Bedienungsaufwand getestet:

- 1) Vorsteuerung der kompletten HGI-Kennlinie abhängig von Druckdifferenz am HGI sowie Durchfluss (Strom der Brennstoffzelle)
- 2) Kompensation der insbesondere bei geringem Vordruck und hohem Nachdruck starken Nichtlinearität der HGI-Kennlinie durch von Druckdifferenz am HGI und Durchfluss (Strom der Brennstoffzelle) abhängigen Verstärkungsfaktoren für P- und I-Anteil des PI-Reglers
- 3) Kombination aus Varianten 1) und 2)

Im Rahmen der Validierung der unterschiedlichen Regleransätze wurden mit HGI-Prototypen Tests zur Druckregelung am Komponentenprüfstand durchgeführt. Abb. 5.2.5 zeigt für den bisherigen Regler den Druckverlauf bei einem Lastanstieg von Leerlaufdruck auf Volllast innerhalb von 1 s bei einem mittleren Vordruck. Mit steigendem Solldruck bzw. -durchfluss ergibt sich auf Grund der nichtlinearen HGI-Kennlinie eine Zunahme der positiven Regelabweichung bis auf einen Maximalwert von ca. 380 mbar. Im Vergleich dazu sind in Abb. 5.2.6 die entsprechenden Verläufe mit Reglervariante 3) dargestellt. Es ergibt sich ein deutlich verbessertes Führungsverhalten mit einer maximalen pos. Regelabweichung von ca. 210 mbar. Vorsteuerung bzw. höherer I-Anteil führen jedoch zu einem geringen Überschwinger im Istdruck-Verlauf von ca. 50 mbar.

Der insgesamt schnellere Regler macht sich auch durch etwas erhöhte Oszillationen im HGI-Stellsignal (Ansteuerstrom) bemerkbar, die sich in erster Linie durch das ungefiltert eingelesene Signal des Istdruck-Sensors ergeben.

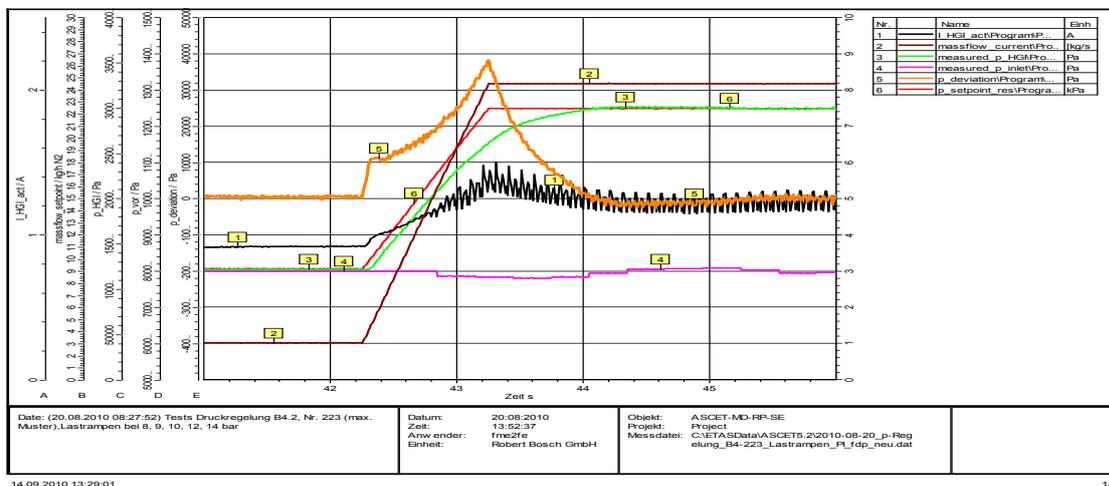


Abb. 5.2.5: Druckverlauf bei Lastanstieg mit bisherigem Regler, mittlerer Vordruck (rot: Solldruck, grün: Istdruck, orange: Regelabweichung, magenta: Zulaufdruck, braun: Sollmenge, schwarz: HGI-Ansteuerstrom)

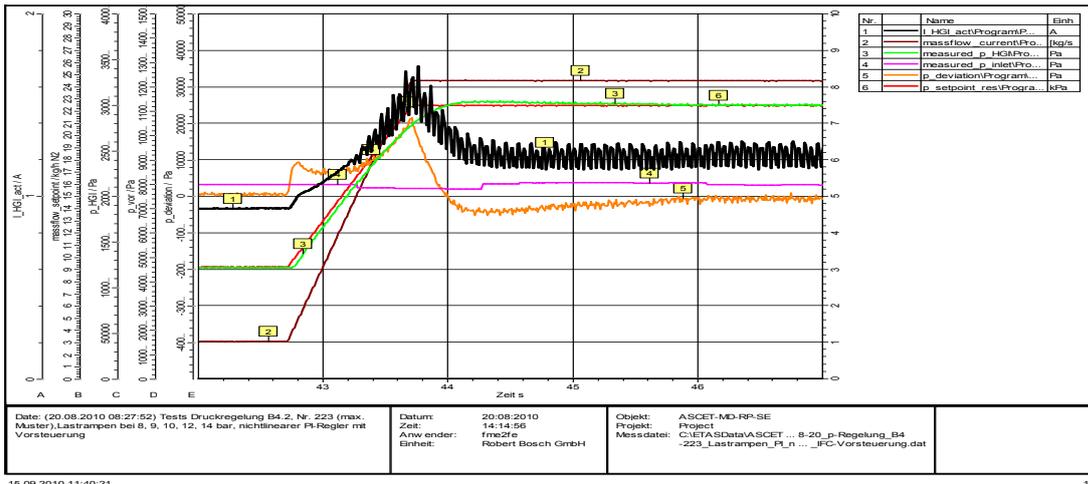


Abb. 5.2.6: Druckverlauf bei Lastanstieg mit Regleransatz 3), mittlerer Vordruck (rot: Solldruck, grün: Istdruck, orange: Regelabweichung, magenta: Zulaufdruck, braun: Sollmenge, schwarz: HGI-Ansteuerstrom)

Die Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Variation der Steigung der HGI-Kennlinie konnten nicht wie geplant durchgeführt werden, da in den Versuchen bei den zur Verfügung stehenden Prototypen noch unerwartete Probleme mit der Stabilität der Ventile auftraten.

Die bei konstanten Nachdrücken gemessenen Kennlinien, sowie die mit dem Ventil-Modell auf Basis von Messdaten für den Verlauf der pneumatischen Kraft auf den Verschluss simulierten Kennlinien zeigten keine Anzeichen von Stabilitätsproblemen. Bei den Versuchen zur Druckregelbarkeit traten jedoch insbesondere bei langsamen Lastrampen und erhöhtem Vordruck im Bereich mittlerer Durchflüsse und Nachdrücke deutliche Schwingungen auf, als deren Ursache eine Instabilität des Ventils infolge eines in diesem Betriebspunkt erhöhten Gradienten der pneumatischen Kraft identifiziert wurde.

Zur Veranschaulichung dazu zeigt Abb. 5.2.7 für dasselbe Ventil-Muster Kennlinien bei höherem Vordruck und bei einem konstanten Nachdruck, sowie bei über eine fix eingestellte Drossel variablem Nachdruck. Der sich über die Drossel einstellende HGI-Nachdruck entspricht in erster Näherung dem sich im Brennstoffzellen-System einstellenden Durchfluss/Nachdruck-Verlauf.

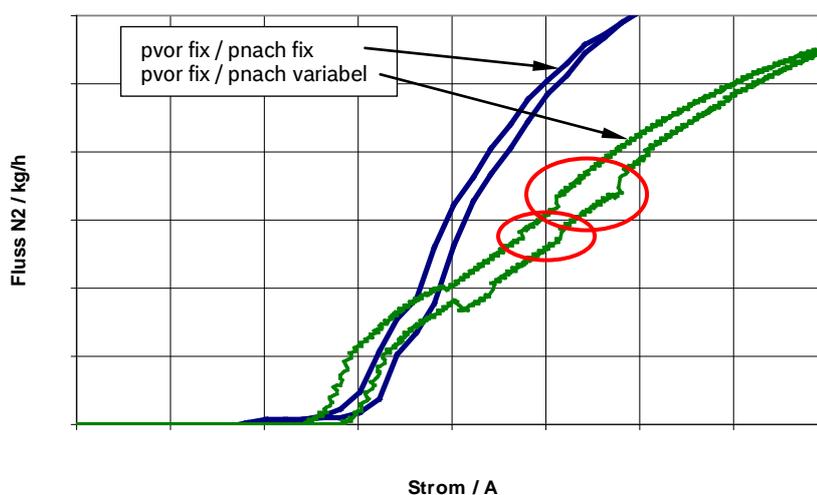


Abb. 5.2.7: B4.2-Muster-Kennlinien bei konstantem Vor- und Nachdruck (blau) sowie bei variablem Nachdruck (grün), selbes Ventil.

Die blaue Kennlinie weist keine für Instabilitäten typische Bereiche auf, in denen sie nahezu senkrecht ansteigt. Im Gegensatz dazu zeigt der Verlauf der bei variablem Nachdruck gemessenen Kennlinie deutliche Unstetigkeiten, die auf eine Instabilität hinweisen.

Abb. 5.2.8 zeigt beispielhaft ein zweites, bei mehreren Ventilen beobachtetes unerwünschtes Verhalten. Die ab ca. 123 s auftretende negative Regelabweichung (orange, zu hoher Istdruck) von ca. 5 mbar führt zu einem langsamen Absinken des I-Anteils (schwarz), der in der ebenfalls dargestellten langsamen Abnahme des HGI-Ansteuerstroms (blau) resultiert. Bei 131 s kommt es zu einem plötzlichen Druckeinbruch bis zu einer positiven Regelabweichung von knapp 90 mbar, die anschließend wieder ausgegeregelt wird, wie am Verlauf von P-Anteil (grau) und I-Anteil des Reglers zu erkennen ist.

Das beschriebene Verhalten weist auf einen Stick-Slip Effekt des Ventils hin. Es reagiert zunächst nicht auf die Absenkung des Ansteuerstroms zwischen 123 und 131 s. Dann reißt es sich los, schließt aber für den Lastpunkt zu weit, so dass der dadurch zu gering eingestellte Durchfluss zu dem beobachteten Druckeinbruch führt.

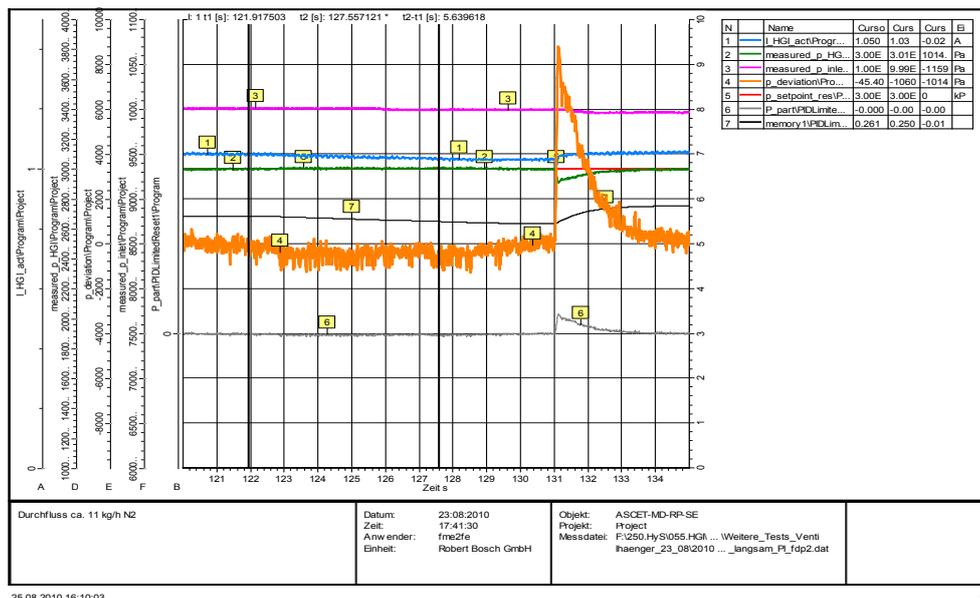


Abb. 5.2.8: Sprungartige Änderung Druckregelabweichung infolge „Stick-Slip“ des Ventils (rot: Solldruck, grün: Istdruck, orange: Regelabweichung, magenta: Zulaufdruck, blau: HGI-Ansteuerstrom, grau: P-Anteil Regler, schwarz: I-Anteil Regler)

Bei den weiter durchgeführten Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass eine Reduzierung der PWM-Ansteuerfrequenz, die zu Mikrobewegungen des Ventils führt, eine gewisse Verbesserung, jedoch kein vollständige Eliminierung des Effekts bewirkt.

Um die Auswirkungen dieses Verhaltens im Brennstoffzellen-Betrieb zu untersuchen, wurde ein Schlecht-Muster hinsichtlich „Stick-Slip“ am 100 kW-System-Teststand eingebaut. Abb. 5.2.9 zeigt einen Ausschnitt aus einer Messung im Brennstoffzellen-Betrieb mit einem zunächst langsamen Anstieg der Brennstoffzellen-Leistung im Bereich von ca. 35 kW mit einem anschließenden Sprung der Leistungsanforderung auf 40 kW und weiterem Anstieg. Der in rot dargestellte Solldruck im Anodenzulauf liegt zwischen 1,8 und 1,95 bar. Die unregelmäßigen Schwankungen im grün dargestellten Istdruck verbunden mit Peaks im Verlauf der blau dargestellten HGI-Ansteuerspannung sind insbesondere im Zeitbereich zwischen 456 und 462 s gut erkennbar.

Im Bereich des starken Last- bzw. Druckanstiegs sind darüber hinaus höher frequente Oszillationen im Istdruck und in der Ansteuerspannung zu erkennen, die auf die in diesem Bereich auftretenden Effekte des Ventils hindeuten. Auf Grund des vergleichsweise hohen am Teststand verbauten Gasvolumens sind die sich ergebenden Druckregelabweichungen von unter ca. 10 mbar vergleichsweise gering. Dennoch ist zu untersuchen, durch welche Maßnahmen auf der Ventilseite oder bei der Ansteuerung des Ventils Stick-Slip Effekte vermieden oder in ihrer Auswirkung auf das Systemverhalten limitiert werden können.

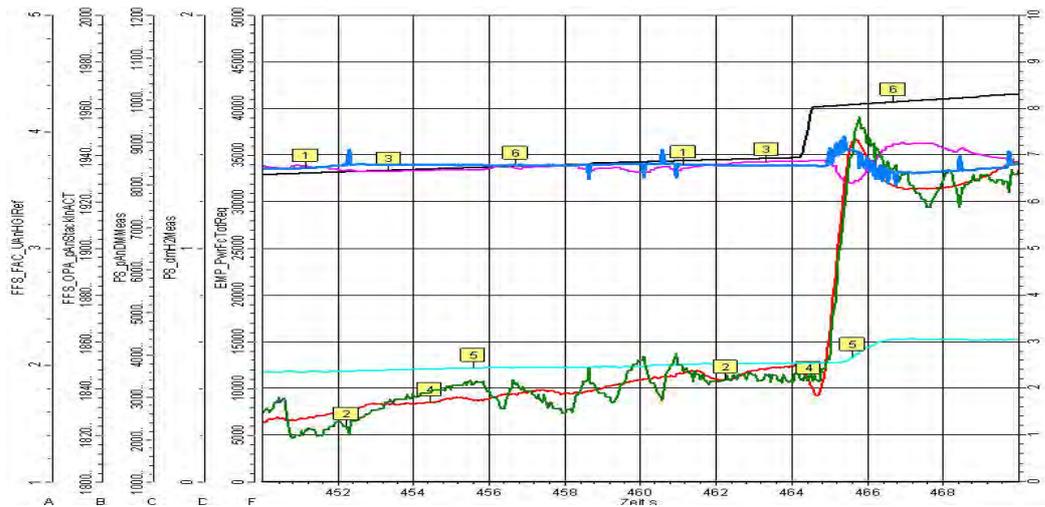


Abb. 5.2.9: Druckverläufe im Wasserstoff-Subsystem bei Brennstoffzellen-Betrieb mit HGI-Schlechtmuster hinsichtlich „Stick-Slip“ des Ventils (rot: Solldruck, grün: Istdruck, magenta: Zulaufdruck HGI, blau: HGI-Ansteuerspannung, hellblau: H2-Mengenstrom durch HGI, schwarz: Leistungsanforderung Brennstoffzelle)

Im Hinblick auf die Beantwortung der Frage nach der zulässigen Toleranz der HGI-Kennlinie konnte auf Basis von Ventiltests zum damaligen Zeitpunkt noch keine endgültige Aussage getroffen werden. Weitere Simulationsrechnungen mit den oben beschriebenen komplexeren Regleransätzen deuten weiterhin darauf hin, dass die zulässige Steigungstoleranz im Bereich von +/- 20-25 % liegt.

Funktion Muster mit modifizierter Düsengeometrie

Wie in AP 5.1 bereits erwähnt, bietet der mit dem B4-Muster eingeführte stärkere Magnetkreis weitere Optimierungspotenziale hinsichtlich Düsengeometrie und Ventilhub. Erste aufgebaute Schraubventil-Muster mit der modifizierten Düsengeometrie wurden auf Basis der Bewertung des Verlaufs der pneumatischen Kraft und der Kennlinie hinsichtlich Funktionalität bewertet.

Abb. 5.2.10 zeigt Strom/Nachdruck-Kennlinien für das B4.2-Muster und ein Schraubventil-Muster mit modifizierter Düsengeometrie bei einem definierten Vordruck. Die Kennlinie des Schraubventil-Musters steigt über den gesamten Bereich mit nahezu konstanter Steigung und deutlich flacher als beim B4.2-Muster an. In ihrem Verlauf treten keine Unstetigkeiten auf.

Auf Grund der sich abzeichnenden deutlichen Vorteile der neuen Muster wurden keine weiteren Tests zur Druckregelbarkeit auf Basis des B4.2-Musterstandes mehr durchgeführt.

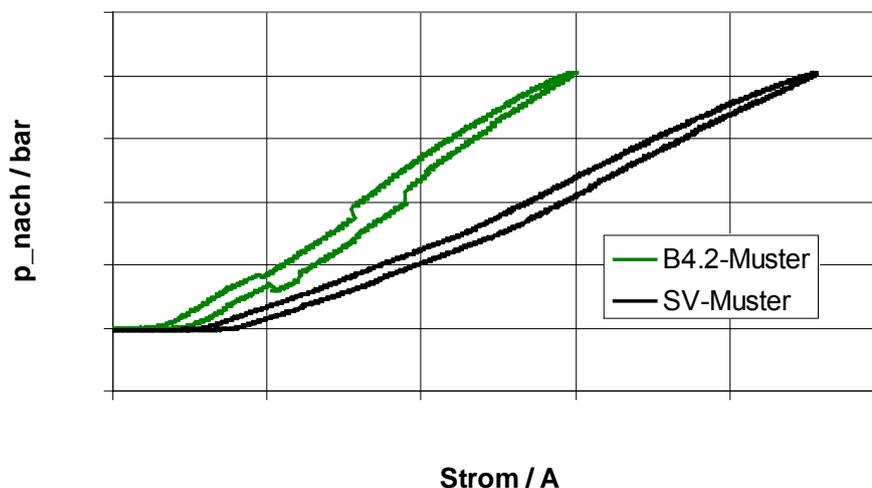


Abb. 5.2.10: Strom/Nachdruck-Kennlinien bei fixer Drossel für B4.2-Muster (grün) und Schraubventil-Muster (schwarz) mit modifizierter Düsengeometrie

Steigung und Druckspreizung für den maximal zulässigen Vordruck definiert. Bei der Auslegung selbst sollten möglichst nur einfach zu variierende Bauteile wie z. B. Ventildüse oder Einstellparameter wie Federvorspannung oder max. Ventilhub variiert werden. Im Hinblick auf die Bauteilvariation war eine weitere Vorgabe, den Variantenrahmen mit einer möglichst geringen Anzahl verschiedener Bauteile abzudecken. Für die praktische Validierung der Auslegungen wurden ausgewählte Varianten auf Schraubventil-Basis aufgebaut und in Stichversuchen vermessen. Abb. 5.2.13 visualisiert den Abdeckungsgrad der Haupt-Systemanforderungen. Dabei ist statt der System- bzw. Stack-Leistung der H₂-Nenndurchsatz über dem für eine Ventilauslegung minimal benötigten Vordruck aufgetragen. Der erreichbare maximale Nachdruck ist auf einer zweiten x-Achse oben aufgetragen. Zur Veranschaulichung ist die Erstanwendung eingetragen. Zur Bewertung der Realisierbarkeit wurde neben der Hauptfunktionalität auf Basis der momentan vorliegenden Erkenntnisse auch Faktoren wie Robustheit und Beständigkeit über Lebensdauer berücksichtigt. Der erstellte Variantenrahmen bildet somit eine sehr gute Basis für eine schnelle Einschätzung der Realisierbarkeit neuer Kundenanfragen. Die im Zuge seiner Erstellung erweiterten Tools bilden dafür ebenfalls eine sehr gute Ausgangsbasis.

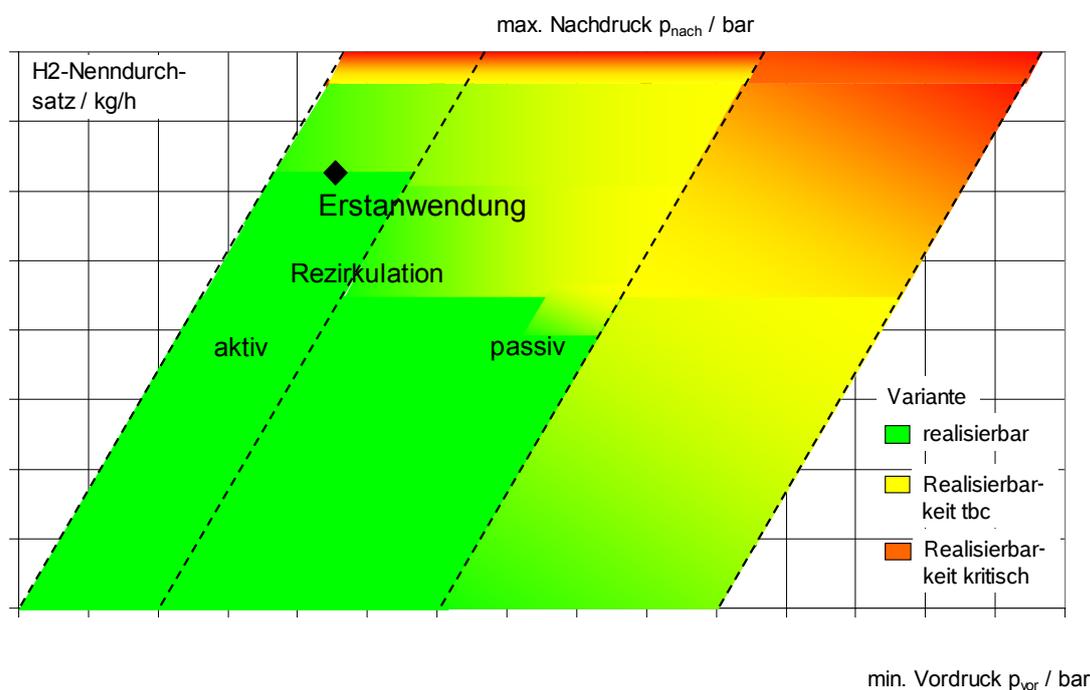


Abb. 5.2.13: Innerhalb des HGI-Variantenrahmens abgedeckte Haupt-Systemanforderungen

Stabilitätskriterium für die HGI-Kennlinie:

Im Zuge der Umstellung der Ventilprüfung von Durchsatz-Kennlinien bei konstantem Nachdruck auf eine Kennlinien-Prüfung bei variablem Nachdruck gegen eine fest eingestellte Drossel (Blende) war die Festlegung eines neuen Kriteriums zur schnellen Beurteilung der Ventilstabilität auf Basis der gemessenen Kennlinie erforderlich. Dabei zeigten die durchgeführten Simulationsstudien, dass die Definition eines Stabilitätskriteriums auf Basis der max. Steigung dp/dl_{max} der Nachdruck-Strom-Kennlinie leider nicht möglich ist, sondern lediglich die Definition eines Kriteriums auf Basis der max. Steigung dQ/dl_{max} der korrespondierenden Durchfluss-Strom-Kennlinie möglich ist. Die bekannte Charakteristik der verwendeten Drosselblende ermöglicht jedoch die schnelle Umrechnung der Nachdruck-KL in die Durchfluss-KL, so dass die Reduzierung der Prüfzeit gewährleistet bleibt. In diesem Zusammenhang führte die Einführung der Lochdüse zu einer im Vergleich zur Nierendüse deutlich verbesserten Ventilstabilität.

Einfluss Ansteuerung auf Kennlinien-Hysterese:

Im Zuge der weiteren Systemabsicherung des HGI wurde die Ansteuerung des Ventils mit einem Serien-Fahrzeugsteuergerät umgesetzt. Dabei wurden insbesondere der Einfluss der Steuergeräte-Implementierung der Ansteuerung auf die Ventulfunktionalität hinsichtlich der Variation der Frequenz der PWM-Ansteuerung sowie die Kompensation von Temperatureffekten, die in einer Variation des

Spulenwiderstands und damit des Ist-Stroms am Ventil resultieren, untersucht. Abb. 5.2.14 zeigt schematisch die momentan für die Ansteuerung realisierte Konfiguration. Die Generierung des Sollwerts für den HGI-Ansteuerstrom erfolgt extern, z. B. durch die Druckregelung, die Ansteuerung erfolgt durch ein Bosch-EDC17-Seriensteuergerät. Dabei wurde die in einem Common Rail-Diesel-Einspritzsystem zur Ansteuerung der Kraftstoff-Zumesseinheit eingesetzte Endstufe mit Erfassung des Strom-Istwerts verwendet.

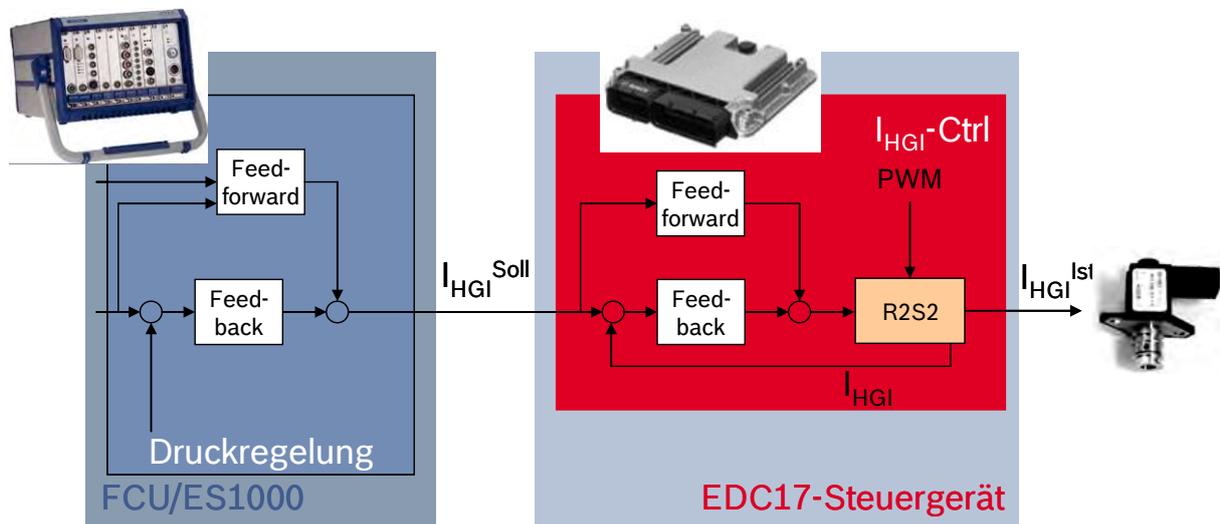


Abb. 5.2.14: Realisierte Konfiguration der HGI-Ansteuerung mit Serien-Steuergerät mit Ist-Strom-Erfassung als Leistungstreiber

Mit der bisher zur Ansteuerung des HGI verwendeten Laborendstufe lassen sich PWM-Frequenzen unterhalb von ca. 850 Hz nicht realisieren. Daher wurde zunächst der Einfluss der PWM-Frequenz auf die Hysterese der Kennlinie untersucht. Die in Abb. 5.2.15 dargestellten Nachdruck-Kennlinien zeigen eine deutliche Reduzierung der Hysterese bei Reduzierung der PWM-Frequenz von 5000 Hz auf 1000 Hz und weiter auf 666 Hz. Bei weiterer Reduzierung der Frequenz auf 500 Hz treten jedoch Resonanzeffekte auf, die den Verlauf der Kennlinie stark beeinflussen.

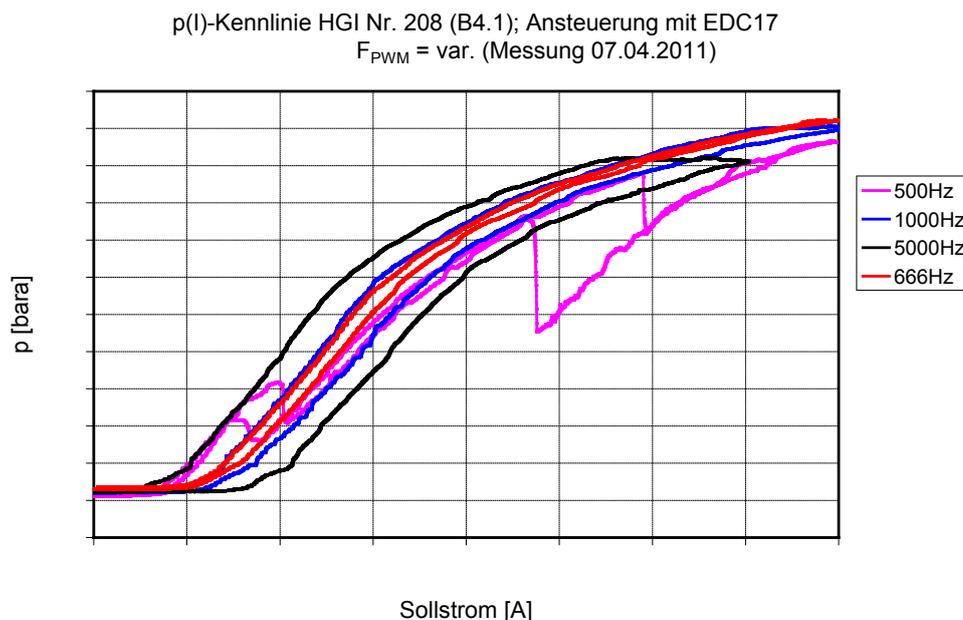


Abb. 5.2.15: HGI-Kennlinien bei Variation der PWM-Ansteuerfrequenz

Simulative Analyse der Auswirkungen der HGI-Kennlinien-Hysterese auf das Regelverhalten

Simuliert wurde die Systemauswirkung auf das Regelverhalten für unterschiedliche im Rahmen des HGI-Variantenrahmens festgelegte Eckvarianten. Dabei wurden sowohl Systeme mit aktiver Anodengas-Rezirkulation über ein HRB und infolgedessen geringem HGI-Nachdruck als auch Systeme mit passiver Rezirkulation und dadurch deutlich erhöhtem Nachdruck betrachtet. Ziel war dabei die simulative Ermittlung einer max. Hysterese der HGI-Kennlinie, bei der ein noch akzeptables Regelverhalten im System erreicht werden kann. Die ermittelten Werte bilden die Grundlage für das Prüfkriterium bei der HGI-Funktionsprüfung in der Fertigung.

Im Laufe der Untersuchungen stellte sich heraus, dass das bisher existierende Simulationsmodell für das HGI, in dem Reibungseffekte nur vereinfacht abgebildet waren, nochmals grundlegend überarbeitet werden musste. Für die Modellierung der Reibkraft wurden jetzt Haftreibung, Gleitreibung und viskose Dämpfung und ein Verhalten entsprechender der Stribeck-Kurve angenommen. Ein entsprechendes Modell stand im Rahmen der Simulink-Modellbibliothek bei Bosch zur Verfügung. Daneben zeigte sich, dass auch eine Hysterese der Magnetkraft berücksichtigt werden musste. Diese wurde auf Basis von experimentell ermittelten Daten im Modell abgebildet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sie für das dynamische Verhalten des Ventils von untergeordneter Bedeutung ist. Wie zuvor beschrieben, konnte bei Messungen ein deutlicher Einfluss der PWM-Ansteuerfrequenz des Ventils auf die Kennlinien-Hysterese beobachtet werden. Daher war es ebenfalls notwendig, die PWM-Ansteuerung im Modell abzubilden.

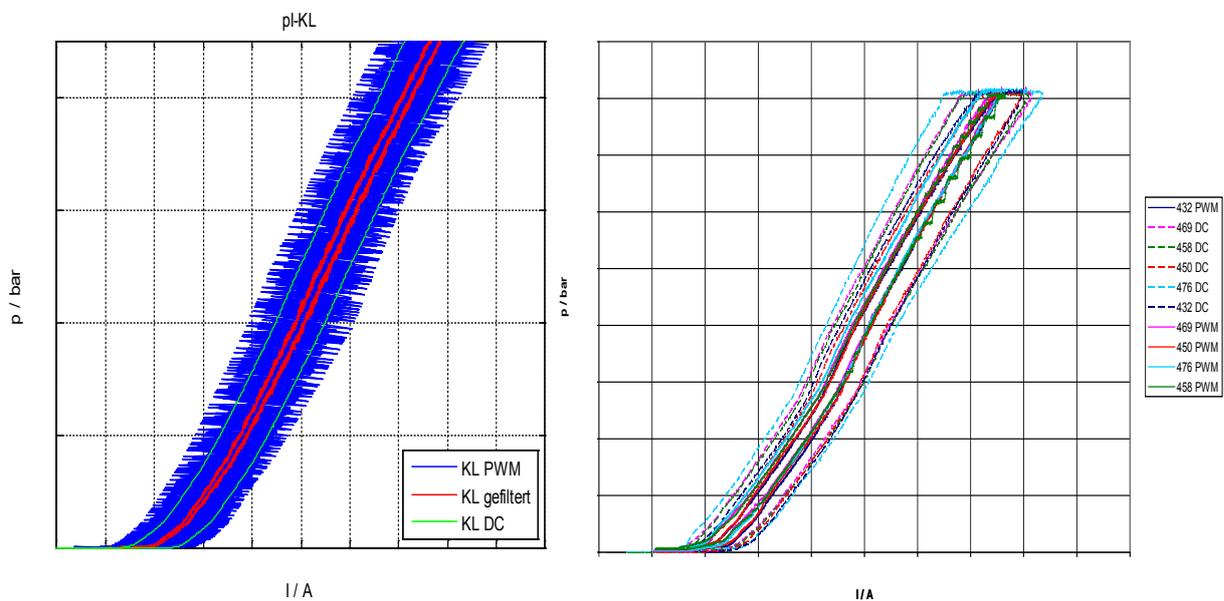


Abb. 5.2.16: Simulierte (links) und gemessene HGI-Kennlinien (5 Ventile, rechts) mit 1 kHz-PWM-Ansteuerung und DC-Ansteuerung bei mittlerem Vordruck.

Für die Ventilauslegung der Erstanwendung zeigt Abb. 5.2.16 einen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Kennlinien bei mittlerem Vordruck. Dabei wird das Stromsignal in der Messung mit einem 100 Hz-HW-Filter gefiltert dargestellt. Dies wurde auch bei der Simulation in der rot dargestellten Kennlinie berücksichtigt. Simulation und Messung stimmen sehr gut überein. Eine genauere Analyse zeigt, dass die Breite der Kennlinien-Hysterese hier in erster Linie von der Magnetkraft-Hysterese bestimmt wird. In der Messung streuen die mit DC-Ansteuerung gemessenen Ventilkennlinien etwas. Dies ergibt sich aus der bei den einzelnen Ventilen unterschiedlichen Reibung. Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigte, dass hier auf Grund der sehr geringen Ventilgeschwindigkeit die Breite der Hysterese von der Haftreibung bestimmt wird. Diese wurde in der Simulation in diesem Beispiel zu 0,7 N gewählt.

Für die Analyse der max. zulässigen Kennlinien-Hysterese wurde im Folgenden in der Simulation die Höhe der Haftreibung bei festem Verhältnis von Gleit- zu Haftreibung variiert. Das Simulationsmodell wurde hierzu um ein detailliertes Modell für den Druckverlust der Anode der Brennstoffzelle mit min. realistischen Volumen, den Druckregler sowie ein stark vereinfachtes Modell für die Anodenrezirkulation erweitert.

Als einzuhaltende Kriterien wurden für die durchgeführten Simulationsstudien eine max. stationäre Regelabweichung von 100 mbar sowie ein max. dynamischer HGI-Strom von 2 A lt. TKU definiert. Dabei wurde für das HGI berücksichtigt, dass Kennlinien-Toleranzen nicht nur durch Hysterese-Effekte, sondern auch durch Variation von Federsteifigkeit, Magnetkraft und Durchflussrate sowie durch eine variierende Gastemperatur hervorgerufen werden. Zusätzlich wurde der Vordruck variiert. Die Beurteilung des Regelverhaltens wurde anschließend in der Simulation an einem synthetischen Lastfall mit steilen Lastrampen vom Leerlauf-Betriebsbereich bis zur Volllast sowie anhand von Lastprofilen aus einem Systemtest beim Kunden durchgeführt.

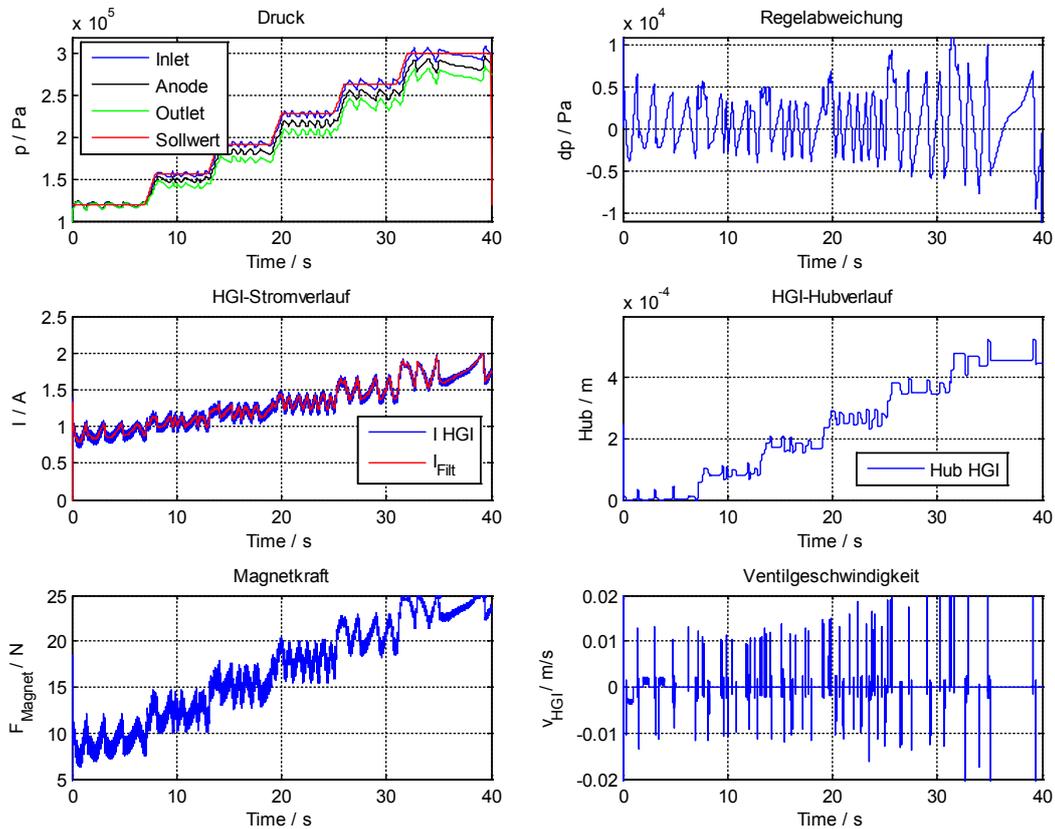


Abb. 5.2.17: Simulationsergebnisse für das Ventil mit min. Kennlinie und max. Hysterese bei mittlerem Vordruck und 85 °C Gastemperatur für den synthetischen Lastfall.

Abb. 5.2.18 zeigt von links oben nach rechts unten die Verläufe von Druck, Druckregelabweichung, HGI-Strom, HGI-Hub, Magnetkraft und Ventilgeschwindigkeit. Es werden hier bei Volllast sowohl die definierte max. zulässige stationäre Regelabweichung von 100 mbar als auch der max. zulässige dynamische HGI-Strom von 2 A erreicht.

In Ergänzung dazu zeigt Abb. 5.2.19 die Ergebnisse mit derselben Ventilkonfiguration für einen realen Lastfall bestehend aus Volllast (VL)-Beschleunigungen mit anschließenden unterschiedlich langen VL-Halte- und Schubphasen. Die definierten Kriterien wurden unter diesen wie unter allen anderen untersuchten Bedingungen eingehalten. Die in den Beschleunigungsphasen auftretenden erhöhten positiven Regelabweichungen sowie die im Schub bzw. bei Niedrigstlast beobachteten hohen negativen Regelabweichungen werden als zulässig angesehen.

Da die höchsten beobachteten Regelabweichungen am Volllast-Betriebspunkt bei min. spezifiziertem Vordruck auftraten, wurde auf Basis dieser Ergebnisse vorgeschlagen, das Prüfkriterium für die Teileprüfung entsprechend zu definieren. Die ermittelte max. zulässige Kennlinien-Hysterese liegt hier bei einer Breite von 250 mA.

Infolge der Erweiterung des HGI-Simulationsmodells sowie der Berücksichtigung der PWM-Ansteuerung in der Simulation konnte das Mikrohub-Verhalten des HGI-Ventils hier nochmals genauer untersucht werden. Dabei zeigte sich in der Simulation, dass die PWM-Ansteuerung über einen sehr weiten Bereich der PWM-Frequenz zu Mikroschwingungen des Ventils führt, die in dieser Form im Experiment noch nicht nachgewiesen werden konnten. Es wurden daher weitere Messungen der HGI-Mikroschwingungen mit einem optimierten Messaufbau für das Laservibrometer durchgeführt.

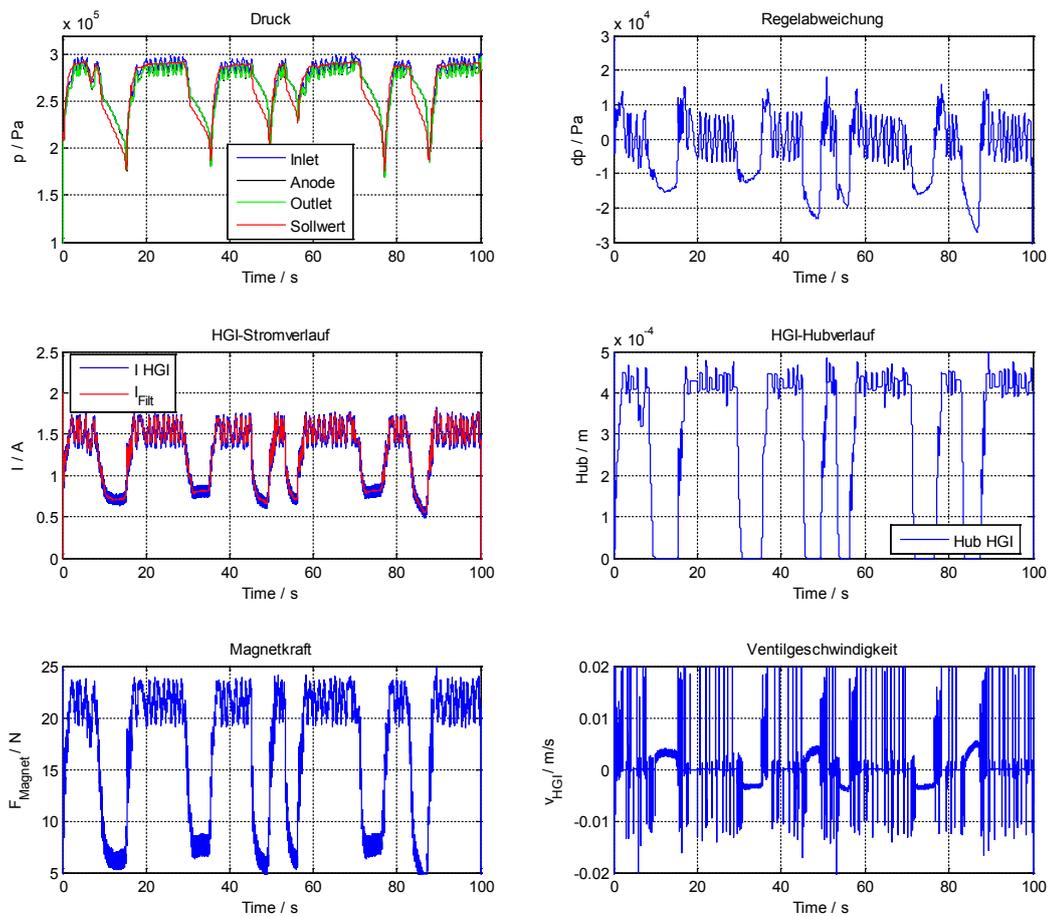


Abb. 5.2.19: Simulationsergebnisse für das Ventil mit min. Kennlinie und max. Hysterese bei mittlerem Vordruck und 85 °C Gastemperatur für einen realen Lastfall.

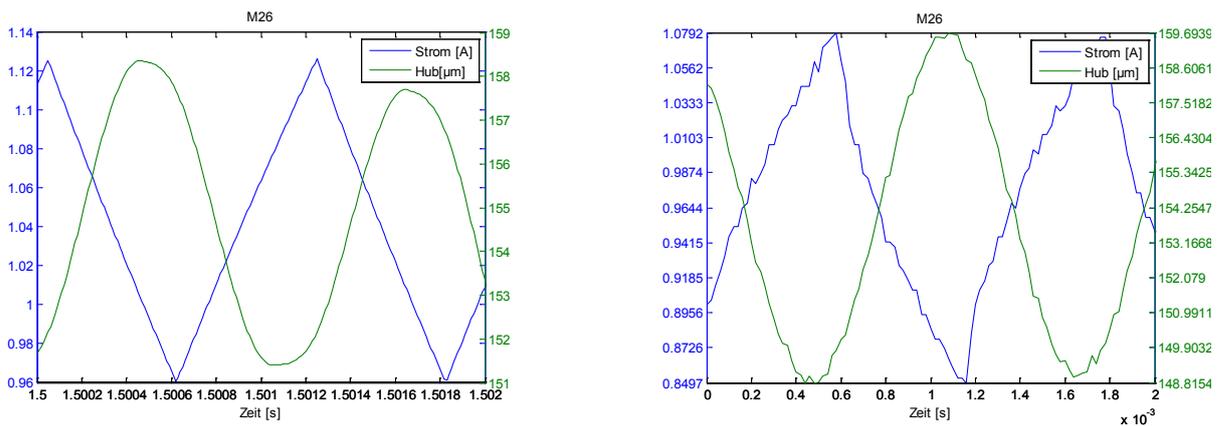


Abb. 5.2.20: Simulation (links) und Messung (rechts) der HGI-Mikrohübe bei mittlerem Vordruck, 833 Hz PWM-Frequenz und Sollstrom 1,04 A

Abb. 5.2.20 zeigt beispielhaft, dass im verbesserten Experiment im Vergleich zur Messung noch höhere Schwingungen von Strom und Hub auftreten. In der Simulation muss ggf. der Wert des Parameters für die Spuleninduktivität noch angepasst werden. Im Hinblick auf den Einsatz des HGI im Brennstoffzellen-System muss geprüft werden, ob die bei der in der Anwendung verwendeten PWM-Frequenz auftretenden Mikrohübe des HGI in der Komponenten- oder der Systemvalidierung des Ventils berücksichtigt werden müssen.

AP 5.4 Umweltprüfungen, Dauererprobung

Erprobung B-Muster

Mit dem internen B3-Musterstand wurden umfangreiche Dauer- und Umweltprüfungen durchgeführt. Die Prüfung und Befundung der insgesamt 56 Muster erfolgte anhand des gemeinsam mit dem Systementwickler definierten Erprobungsplans in Form von Einzel- und Reihenprüfungen.

Durchgeführte Tests:

- Temperatur-Wechsel -40°C/110°C für Voralterung
- Rauschprüfung (aktiver Betrieb unter dynamischer Belastung)
- Schockprüfung (passiv unter dynamischer Belastung)
- Prüfstandsdauerlauf (Dauererprobung Gesamtventil unter Wasserstoff)
- Konstante Feuchte Wärme (Absicherung der Kunststoffteile und Spulenumspritzung)
- Ein-/Untertauchschutzprüfung (Schutzklasseprüfung IPX7)
- Hochdruckreinigerprüfung (Schutzklasseprüfung IPX9K)
- Fallprüfung (Standardprüfung für Handling)
- Durchschlagsfestigkeit (Absicherung elektrische Kontaktierung)
- Isolationswiderstandsprüfung (Absicherung elektrische Kontaktierung)
- Temperatur-Wechsel (Lebensdauerabsicherung Spule mit Umspritzung)
- Wärmelagerung (Lebensdauerabsicherung Spule mit Umspritzung)
- Temperaturschock (Absicherung gegen extreme Temperaturgradienten im Betrieb)
- Salzsprühnebel/Feuchteprüfung (Korrosionsbeständigkeit gegen äußere Einflüsse)
- Druckschwelltest unter H₂ (H₂-Beständigkeit Ventilgruppe und Schweißnähte)
- Schaltdauerlauf in H₂ (Absicherung H₂- Beständigkeit Ventildfeder)
- Feder Auslagerungstest in H₂ unter Vorspannung (Absicherung H₂- Beständigkeit Ventildfeder)
- Wärmelagerung (Lebensdauerabsicherung O-Ringe)
- Temperatur-Wechsel (Lebensdauerabsicherung O-Ringe)

Die Darstellung aller Erprobungsinhalte und –ergebnisse würde den Rahmen des Berichtes übersteigen. Im Folgenden sind daher beispielhaft Auszüge aus den Erprobungsberichten für den Prüfstandsdauerlauf sowie den Druckschwellversuch dargestellt.

Prüfstandsdauerlauf (abgesicherte Betriebsdauer des Ventils 6.000 h):

- Versuchsbedingungen:
1. Voralterung der Prüflinge Temperaturwechsel IEC 60068-2-14-Na. Zyklen: 100, Temperatur: -40°C/+110°C
 2. Prüfstandsdauerlauf unter H₂ inkl. Funktions-Zwischenprüfungen und mit überlagertem Temperaturprofil von -40°C ... 85°C.
 3. Abschließende Funktionsprüfungen und Bauteilbefundung.



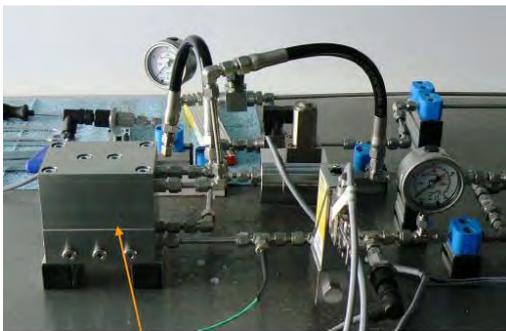
Abb. 5.4.1: links: Reibspuren im Verschluss an der Kontaktstelle zum Zylinderstift
rechts: „Verschleißbild“ Elastomerdichtsitz nach Dauerlauf

Ergebnisse:

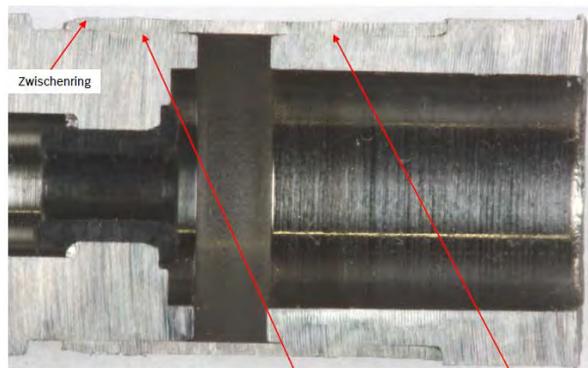
- Leichte Einlaufspuren in den Lagerbuchsen erkennbar.
→ Oberflächenglättung ohne Einfluss auf Funktion.
- Keine Federeinlaufspuren (Reibung) feststellbar.
- Elastomerdichtsitz mit bleibender plastischer Verformung (vgl. Abb. 5.4.1, rechts) ohne erkennbaren Einfluss auf Dichtfunktion.
→ Verformung liegt im zulässigen Bereich.
- Federkräfte vor/nach Erprobung unverändert.
- Negative H₂-Mediumeinflüsse (Versprödung) an den Komponenten sind nicht feststellbar.
- Für Demontage der Verschlussgruppe/Zylinderstift z. T. erhöhter Kraftaufwand erforderlich. Verschlussbohrungen zeigen teilweise Reibspuren (vgl. Abb. 5.4.1, links).
Potenzieller Einfluss auf interne Dichtheit infolge Klemmen bzw. Schiefstellung denkbar.
→ Aufweitung Durchmesser Verschlussbohrung für B4-Muster umgesetzt.
- Ansonsten keine Auffälligkeiten an den Bauteilen feststellbar.

Druckschwellversuch (H₂-Beständigkeit Ventilgruppe und Schweißverbindungen):

- Versuchsbedingungen: (6 Prüflinge)
1. Druckschwellbelastung Ventilinnenraum unter H₂.
20.000 Zyklen; Frequenz 2 ... 3 Zyklen/min; Raumtemperatur
untere Druckschwelle ca. 5 bara, obere Druckschwelle > 100 bara
 2. Funktionsprüfung auf externe Leckage.
 3. Berstdruckprüfung und Befundung der Ventilgruppen.



Prüfkammer (6 Prüflinge)



Ventilpatrone Nr.77: Schweißnähte Zwischenring/Magnetkern u. Zwischenring/Ventilgehäuse i.O.

Abb. 5.4.2: links: Versuchsaufbau mit Prüfkammer
rechts: „Schnitt“ eines HGI nach Druckschwellversuch und Berstdruckprüfung

Ergebnisse:

- Anforderungen an externe Dichtheit sind erfüllt, nahezu keine Unterschiede der Werte vor und nach Test bei allen 6 Prüflingen.
→ H₂-Beständigkeit Schweißnähte und O-Ring Abdichtung i.O.
- Visuell sind keine Auffälligkeiten an der Ventilpatronenoberfläche (Innen- und Außenkontur) feststellbar (vgl. Abb. 5.4.2 links).
- Bauteile Magnetanker, Lagerbuchsen, Einstellbolzen und Filtersiebe O-Ringe zeigen keine Auffälligkeiten.
- Versagensstelle bei Berstversuchen waren O-Ringe des Ventils (Berstdrücke > 500 bara).
→ Ausreichend hohe Bauteilfestigkeit für max. reguläre Betriebsdrücke von < 5 bara und einmalig zulässigem Maximaldruck im Fehlerfall von 21 bara.

Zusammenfassung der Erprobungsergebnisse:

Bei allen Prüfungen traten keine wesentlichen Einflüsse auf die Ventilfunktionen durch Alterung, Verschleiß oder Korrosion auf. Für teils aufgetretene Befunde wie Wassereintritt in Steckerraum, Beschädigung O-Ring Einstellbolzen, Schwergängigkeit bei Demontage Verschluss/Zylinderstift wurden Maßnahmen am Design vorgesehen bzw. umgesetzt.

Die ursprünglich vorgesehenen Prüfrandbedingungen der Temperaturschockprüfung waren in den vorhandenen Prüfeinrichtungen nicht vollständig erreichbar. Ein Stichversuch zur Optimierung der Versuchsführung zeigte keine Auffälligkeiten an den Ventilen.

Basierend auf diesen Ergebnissen sind keine erhöhten Risiken hinsichtlich der Dauerbeständigkeit des HGI zu erwarten. Die Absicherung der Erzeugnisfunktionalität im Gesamtsystem wurde in System- und Fahrzeugtests durchgeführt. Aufgrund der potenziellen und teilweise umgesetzten Designmaßnahmen zur Optimierung der Funktionalität und der damit veränderten Bauteilbelastung ergab sich die Notwendigkeit beim nachfolgenden Musterstand die relevanten Erprobungen zu wiederholen. Hierbei wurden die offenen Punkte aus der B-Muster-Erprobung sowie neue Erkenntnisse aus System- und Fahrzeugtests berücksichtigt.

Erprobung C-Muster

Im Rahmen der C-Mustererprobung wurden innerhalb des Berichtszeitraums folgende Erprobungen durchgeführt. Tests aus vorangegangenen Erprobungen, deren Prüfmerkmale nicht durch Designänderung betroffen waren (z.B. O-Ringabsicherung) wurden nicht wiederholt.

1. Rausch-/Gleitsinusprüfung inkl. thermischer Voralterung, Schockprüfung und Gefrierstartfähigkeit unter Feuchte.
Ergebnis: keine Auffälligkeiten; Test bestanden
2. Druckschwellprüfung in H₂.
Ergebnis: keine Auffälligkeiten; Test bestanden
3. Dauerlauf in H₂ (dynamischer Teil) inkl. thermischer Voralterung und Gefrierstartfähigkeit unter Feuchte.
Ergebnis: keine Auffälligkeiten; Test bestanden
4. Ein-/Untertauchprüfung (IPX7).
Ergebnis: Funktion i.O. aber z.T. Eindringen von Feuchte durch Gegenstecker in Steckerraum.
Maßnahmen: Da das HGI nicht Unterflur eingebaut wird, kann diese Prüfung entfallen
5. Hochdruckreinigerprüfung (IPX9K).
Ergebnis: Funktion i.O. aber z.T. Eindringen von Feuchte durch Gegenstecker in Steckerraum.
Maßnahmen: Wiederholung Test mit optimiertem Gegenstecker und Anpassung der Prüfrandbedingungen auf realistische Bedingungen (Wartungsfall)
6. Temperaturwechsel unter Feuchte.
Ergebnis: Volllastdurchsatz aufgrund reduzierter Magnetkraft z.T. unterhalb Spezifikation.
Maßnahmen: Anhebung zulässiger Dauerstrom (abgesichert). Reduzierung Spezifikationswert für Feldteile (o. Auswirkung auf System). Wiederholung des Tests.
7. Schmutzdauerlauf (Robustheit gegen Restschmutz im System).
Ergebnis: keine Auffälligkeiten; Test bestanden
8. E/E-Test (Robustheit gegen Fehlansteuerung).
Ergebnis: keine Auffälligkeiten; Test bestanden

Die entwicklungsbegleitende Überprüfung und Überarbeitung der Erprobungsinhalte erfolgte fortlaufend in enger Zusammenarbeit mit dem System- und Fahrzeughersteller.

Absicherung der „Pulsbetrieb“-Anwendung

Für die Druckeinstellung in Jet-Pump-Systemen gibt es hinsichtlich der HGI Ansteuerung prinzipiell zwei unterschiedliche Betriebsarten. Neben der bereits vorgestellten Regelfunktion kann die Einstellung des Anodendrucks auch über einen Pulsbetrieb erfolgen, dessen Ausführung von einem klassischen Schalten bis hin zu einem stromgeführten Öffnen gehen kann. Der Vorteil des

Pulsbetriebes gegenüber dem Regelbetrieb besteht u.a. darin, dass die Jet-Pump mit einem besseren Wirkungsgrad, speziell im kleinen Druckbereich, betrieben werden kann. Auch hinsichtlich des anodenseitigen Wasseraustrags zeigt der Pulsbetrieb Vorteile. Seitens der Systementwicklung gab es auch Überlegungen beide Betriebsarten abhängig vom Arbeitsbereich zu kombinieren. Der Hauptentwicklungspfad des HGI sah diesen neuen Anwendungsfall nicht vor. Um mit dem HGI aber auch zukünftige Systeme abdecken zu können wurde parallel dessen Eignung hinsichtlich eines Pulsbetriebes analysiert. Auf Grundlage dieser Ergebnisse können dann falls erforderlich geänderte Ansteuerstrategien oder auch eventuell notwendige Hardwareanpassungen definieren werden.

Für die Untersuchung wurden Muster mit aktuellem Design und für diesen Betriebsfall angepasster Federrate aufgebaut und mit worst case Bedingungen, d.h. im Schaltbetrieb, einen Dauerlaufversuch mit maximal 150 Mio. Schaltzyklen durchgeführt. Zur Beurteilung des Verschleißverhaltens erfolgten mehrere Zwischenprüfungen nach jeweils ca. 10 Mio. Schaltzyklen. Da der Fokus auf den stark belasteten Lagerbuchsen lag und ein vorzeitiger Ausfall des Elastomers zu erwarten war, stand der Funktionswert „Interne Leckage“ nicht im Vordergrund. Die schwerpunktmäßigen Bewertungskriterien waren der Volllastdurchsatz und die optische Befundung. Die Regelbarkeit gab zusätzliche Informationen bezüglich des Lagerbuchsenverschleißes, wurde aber nicht gewertet. Während den ersten 50 Mio. Schaltspielen konnte eine kontinuierliche Durchsatzzunahme in Folge des Elastomerverschleißes und der daraus resultierenden Hubzunahme beobachtet werden. Im restlichen Verlauf der Dauerläuferprobung blieb der Durchsatz innerhalb der üblichen Streuung auf gleichem Niveau. Ein Ausfall im Pulsbetrieb lag nicht vor, der geforderte Durchsatz wurde weiterhin erreicht. Wie erwartet zeigte der Elastomer im Sitzbereich eine signifikante plastische Verformung. Diese wirkte sich negativ auf die Dichtkante der Düse aus, die als Folge zunehmend abplattete. Neben Verschleißspuren an der Federaufnahme, Verschlussbohrung und Zylinderstift, konnten Abriebspuren in den Lagerbuchsen beobachtet werden. Der Lagerbuchsenanschlag selbst hatte die Belastung erfolgreich bestanden. In Abhängigkeit der zukünftigen Anforderung der OEMs bezüglich der Ansteuerung und der Anzahl der Schaltzyklen müssen die Ergebnisse bewertet werden. Für einen reinen Schaltbetrieb ist das vorliegende Verschlussdesign nicht zielführend.

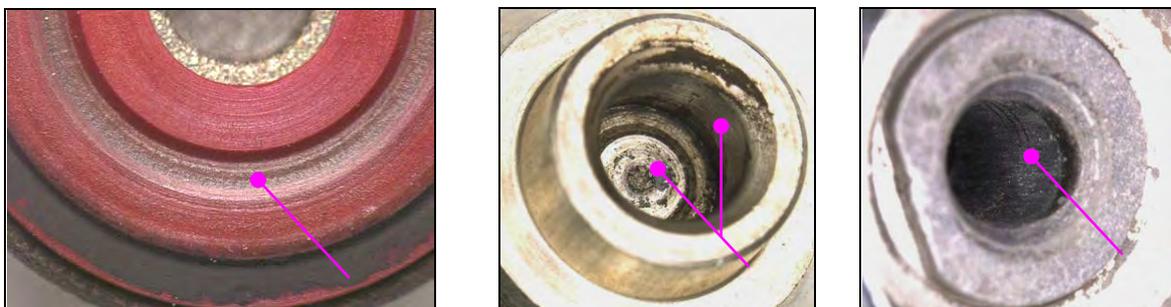


Abb. 5.4.3: Verschleißbilder der Einzelteile Elastomerdichtsitz, Verschlussbohrung und Lagerbuchse, mit Markierung der Verschleißstellen

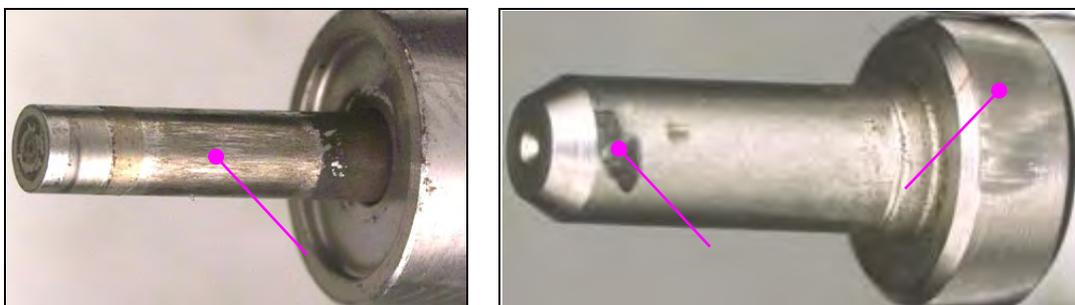


Abb. 5.4.4: Verschleißbilder der Einzelteile Zylinderstift und Federaufnahme

Absicherung für „Jet-Pump“ Systeme mit erhöhtem Gegendruck

Wie bereits in den vorangestellten Kapiteln erwähnt gab es neben dem Hauptentwicklungspfad des HGI für aktive Systeme mit Rezirkulationspumpe, Betrachtungen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeit des HGI in passiven Systemen, gekennzeichnet durch die Verwendung einer „Jet-Pump“.

Aufgrund der systembezogenen erhöhten Gegendrücken entstanden neue anwendungsspezifische Anforderungen hinsichtlich der Regelbarkeit. Deswegen wurden alternative Konzepte erarbeitet und deren Potenzial bezüglich Umsetzbarkeit und Funktionalität zunächst theoretisch bewertet.

Die Aussichtsreichsten Varianten wurden für den Aufbau von Prototypen vorgesehen und mit einem Labordauerlauf, mit charakteristischen Bedingungen für Strahlpumpensysteme und einer vorangestellten thermischen Alterung, vorab erprobt.

Der Fokus der Funktionsabsicherung lag hier auf der Analyse der Kennliniencharakteristik, als Maß für die Regelbarkeit der Ventile, sowie des Dichtverhaltens über dem Betriebstemperaturbereich, als Maß für die Robustheit des Elastomerdichtsitzes.

Ablauf der Funktionsabsicherung (Labordauerlauf):

1. Ausgangsmessung
2. Temperaturlagerung bei 150°C über 30 h
3. Zwischenmessung
4. Schaltdruckdauerlauf bei -40°C, 65°C, 95°C (entspricht ~6000 h kontinuierlicher Betrieb)
5. Endmessung

Konzept „innenaufliegende Düse“

Abb. 5.4.5. zeigt die Durchsatzcharakteristik der HGI in Form der Druck-Strom-Kennlinie. Im Hinblick auf eine hohe Regelgüte sollte der Verlauf stetig und idealerweise linear sein. Das Standarddesign zeigt unter den für Systeme mit Strahlpumpen typischen Betriebsbedingungen mehrere Stellen mit „Unstetigkeiten“, welche aus einem plötzlichen Umschlagen der Strömung und den sich damit veränderten Kraftverhältnissen am Ventilanker resultieren. Dadurch ändern sich spontan der Ventilhub und der Durchsatz in diesem Betriebspunkt. In diesem Bereich ist das Ventil kaum regelbar. Das Verhalten der Strömung wird durch die geometrischen Verhältnisse im Dichtsitz, insbesondere durch den Überstand des Elastomers gegenüber der Dichtlippe der Düse bestimmt. Der Effekt ist damit charakteristisch für das jeweilige Design. Die Ventilvariante mit dem innen auf der Düse aufliegenden Elastomer zeigt als Neuteil an den markanten auffälligen Kennlinienstellen des Standardventils eine signifikante Verbesserung bzgl. der Stetigkeit. Dennoch ist der Effekt noch erkennbar. Dies lässt darauf schließen, dass die instationären Änderungen der Strömung als Ursache der „Kennliniensprünge“ noch auftreten. Die Auswirkungen sind aufgrund der reduzierten druckwirksamen Elastomerfläche jedoch stark reduziert.

In Bezug auf die Regelbarkeit des Ventiles werden die verbleibenden leichten Wellen im Kennlinienverlauf nicht als kritisch bewertet. Lösungen, bei denen die negativen Strömungseffekte vermieden werden, sind diesem Konzept jedoch vorzuziehen.

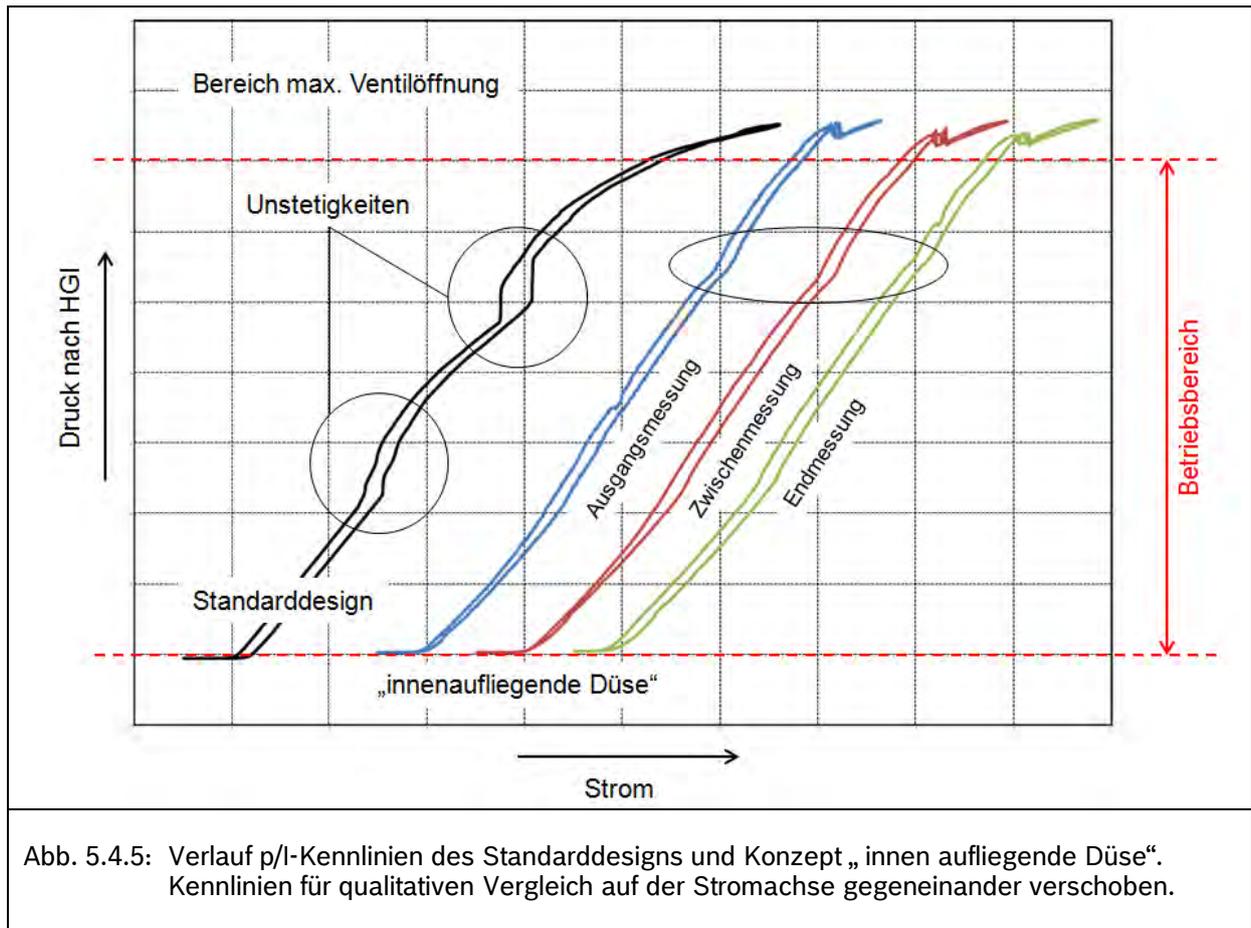


Abb. 5.4.5: Verlauf p/l-Kennlinien des Standarddesigns und Konzept „innen aufliegende Düse“. Kennlinien für qualitativen Vergleich auf der Stromachse gegeneinander verschoben.

Auffällig bei der Variante „innenaufliegende Düse“ ist im Verlauf der p/l-Kennlinie die Störung im oberen Druckbereich. Trotz Erhöhung des Ventilstroms nimmt der Gegendruck ab. D.h. der Strömungsquerschnitt im Ventil wird kleiner und als Folge nimmt der Massenstrom ab. Erklärbar wäre dieses Verhalten mit einem Zuziehen des Ventils im Sitzbereich. Aufgrund der Geometrieänderung wird bei diesem Design vermutlich die Strömung derart beeinflusst, dass sich oberhalb des Verschlusses ein Staudruck aufbaut. Dadurch wird das Schließelement auf dem Zylinderstift entgegen der Öffnungsbewegung in Richtung Sitz verschoben. Dieser Effekt tritt quasi außerhalb des regulären Betriebsbereichs des Ventils auf. Daher ist im System nicht mit einer Einschränkung der Funktionalität zu rechnen.

Ein positives Ergebnis ist weiterhin, dass beim Öffnen des Ventils kein sprunghafter Anstieg des Durchsatzes zu beobachten ist. Durch die zum Düseninneren verlagerte Auflagefläche wäre dieser Effekt zu erwarten gewesen, wenn die druckwirksame Fläche sich beim Öffnen schnell ändert. Im geschlossenen und bedruckten Zustand wird der Ventilsitz nicht nur an der Dichtkante, sondern aufgrund der Elastomerverformung auch an der weiter innen liegenden Bohrungskante abgedichtet. Während der Kennlinienprüfung wird der Ventilstrom rampenförmig erhöht. Zum Zeitpunkt des Öffnens liegt ein Kräftegleichgewicht zwischen der schließenden Kraft (Federkraft) und der öffnenden Kraft (Pneumatik- und Magnetkraft) vor. Wird der Strom nun weiter erhöht überwiegt die öffnende Kraft und der Elastomer hebt druckunterstützt vom Sitz ab. Während des Öffnens wird als erstes die Bohrungskante freigegeben, während der Elastomer ab der erhöhten Dichtlippe zunächst weiterhin abdichtet. Somit wird schlagartig die zusätzliche ringförmige Fläche zwischen der Kante der Düsenbohrung und der Dichtlippe frei, auf die der pneumatische Druck wirken kann. D.h. die öffnende Kraft erhöht sich sprunghaft und müsste im Kennlinienverlauf in Form einer Druckerhöhung zu Beginn der Kurve erkennbar sein. Da der Effekt in dieser Kennlinie nicht zu beobachten ist, wird keine umlaufende Abdichtung an der Kante der Düsenbohrung vermutet.

Das Konzept des innen aufliegenden Elastomers zeigt auch nach der Alterung eine nahezu unveränderte Regelgüte. Der charakteristische Kennlinienverlauf bleibt erhalten. Ähnlich ist es auch nach dem Dauerlauf. Zusätzlich tritt hier jedoch stochastisch ein Stick-Slip Effekt auf, der vom Standardventil her, ebenfalls nach Dauerlauf, bekannt ist und auf Verschleißerscheinungen zurück-

zuführen ist. Vorangegangene Systemversuche zeigten, dass Stick-Slip Effekte in geringem Ausmaß keine signifikante Auswirkung auf die Funktionalität im System haben.

Nach Abschluss der Messungen wurden die Ventile zerlegt und die verschleißkritischen Einzelteile, insbesondere der Dichtsitz, auf Verschleißspuren untersucht und bewertet. Abb. 5.4.5 zeigt die optische Befundung beispielhaft an ausgewählten Teilen.

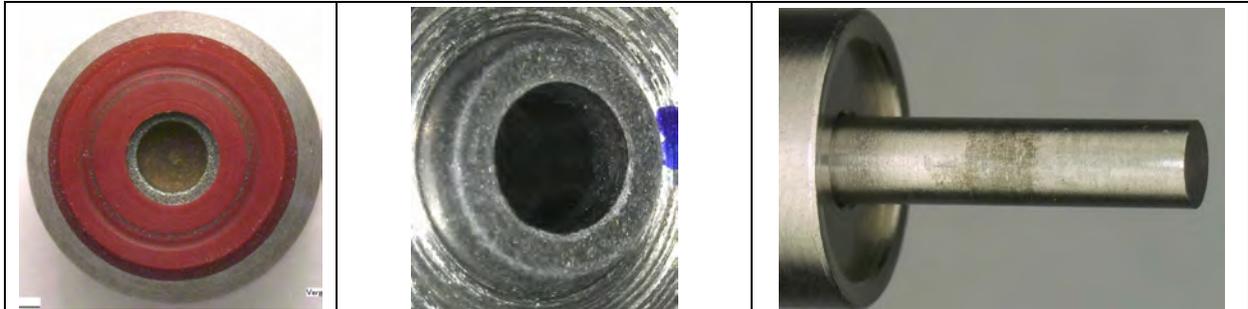


Abb. 5.4.5: Ergebnisse der Bauteil-Befundung.
von links nach rechts: Verschleißspuren am Elastomer, in der Lagerbuchsenbohrung und auf der Oberfläche des Zylinderstifts.

Die Befundung der Prüflinge nach dem Labordauerlauf zeigt die für diese Designvariante zu erwartenden Verschleißspuren. Insbesondere im Bereich des Elastomers. Im Bereich der Dichtlippe kommt es hier zu einer bleibenden plastischen Verformung. Im Vergleich zum Standardventil fällt diese breiter aus und bildet die innen liegende Auflagefläche zwischen der Dichtkante und der Düsenbohrung mit ab. Die Haftung des Elastomers auf dem Verschlussträger ist nicht eingeschränkt, Ausbrüche sind nicht zu erkennen. Weitere typische Verschleißstellen sind in den Bohrungen der Lagerbuchsen und auf der Oberfläche des Zylinderstifts, an der Kontaktstelle der Lagerbuchsenführung, vorhanden, die auch bei diesem Konzept Abriebspuren aufweisen. Ergänzende signifikante Verschleißspuren bzw. Beschädigungen, auch an anderen Bauteilen, konnten nicht beobachtet werden. Das Verschleißbild ist insgesamt als typisch zu bewerten.

Konzept „asymmetrischer Verschluss“

Abb. 5.4.6 zeigt die Ergebnisse der Funktionsmessungen des Konzepts mit „asymmetrischem Verschluss“. Die Kennlinien zeichnen sich durch einen stetigen Verlauf, ohne signifikante Instabilitäten aus. Die Hysterese zwischen der steigenden und fallenden Kennlinie ist unauffällig und liegt im typischen Bereich. Selbst nach der thermischen Alterung bleibt die Charakteristik der Kennlinie erhalten. Nach dem Dauerlauf treten vereinzelt die bereits erwähnten Stick-Slip-Effekte auf. Das Design zeigt damit eine weitere Verbesserung in Bezug auf die Regelgüte des HGI für kontinuierlich betriebene Brennstoffzellensysteme mit Strahlpumpe.

Die optimierte Geometrie des Elastomerverschlusses bewirkt eine gleichmäßige Strömung zwischen Verschluss und Düse ohne Diskontinuitäten. Im Betriebsbereich des Ventils ergibt sich dadurch auch eine Verbesserung der Linearität.

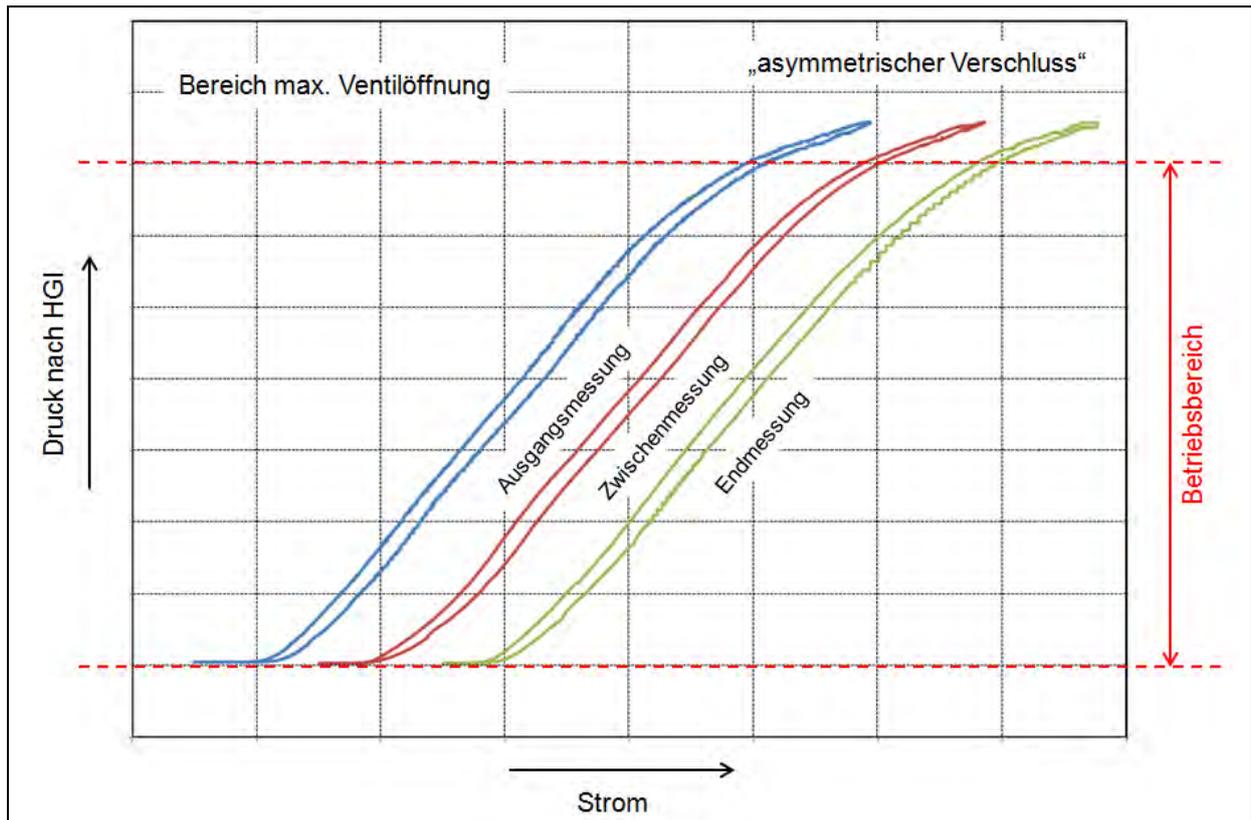


Abb. 5.4.6: Verlauf p/l-Kennlinien des Konzepts „asymmetrischer Verschluss“. Kennlinien für qualitativen Vergleich auf der Stromachse gegeneinander verschoben.

Die Ergebnisse der Befundung der Einzelteile sind in Abbildung 5.4.7. auszugsweise dargestellt. Der Elastomer zeigt vergleichbar mit dem Standardventil typische Verschleißspuren, aber keine Beschädigungen, wie z.B. Ausbrüche oder Elastomerablösungen. Weiterer Verschleiß lässt sich in den Lagerbuchsenbohrungen und auf der Oberfläche des Zylinderstifts, der die Schließbewegung auf den Verschluss überträgt und diesen formschlüssig aufnimmt, feststellen. Insgesamt liegt keine unzulässige Abnutzung vor. Die Ergebnisse lassen daher darauf schließen, dass dieses Konzept die mechanischen Anforderungen erreichen kann und die geforderte Dauerhaltbarkeit über Lebensdauer aufweist.

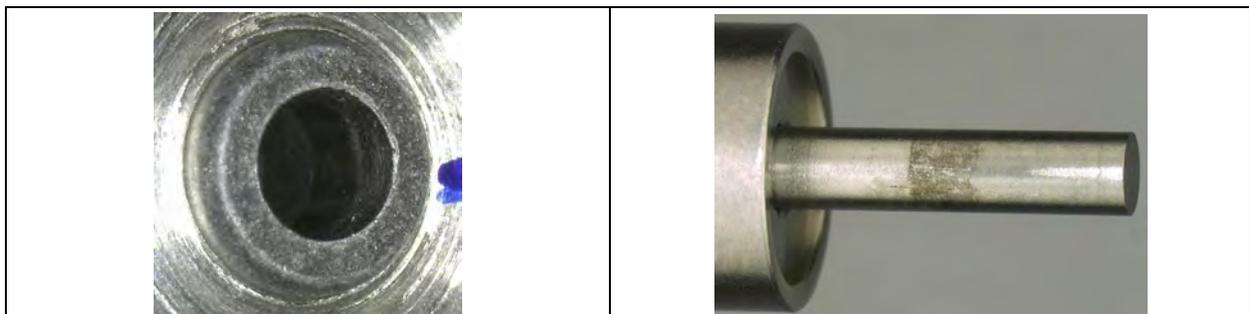
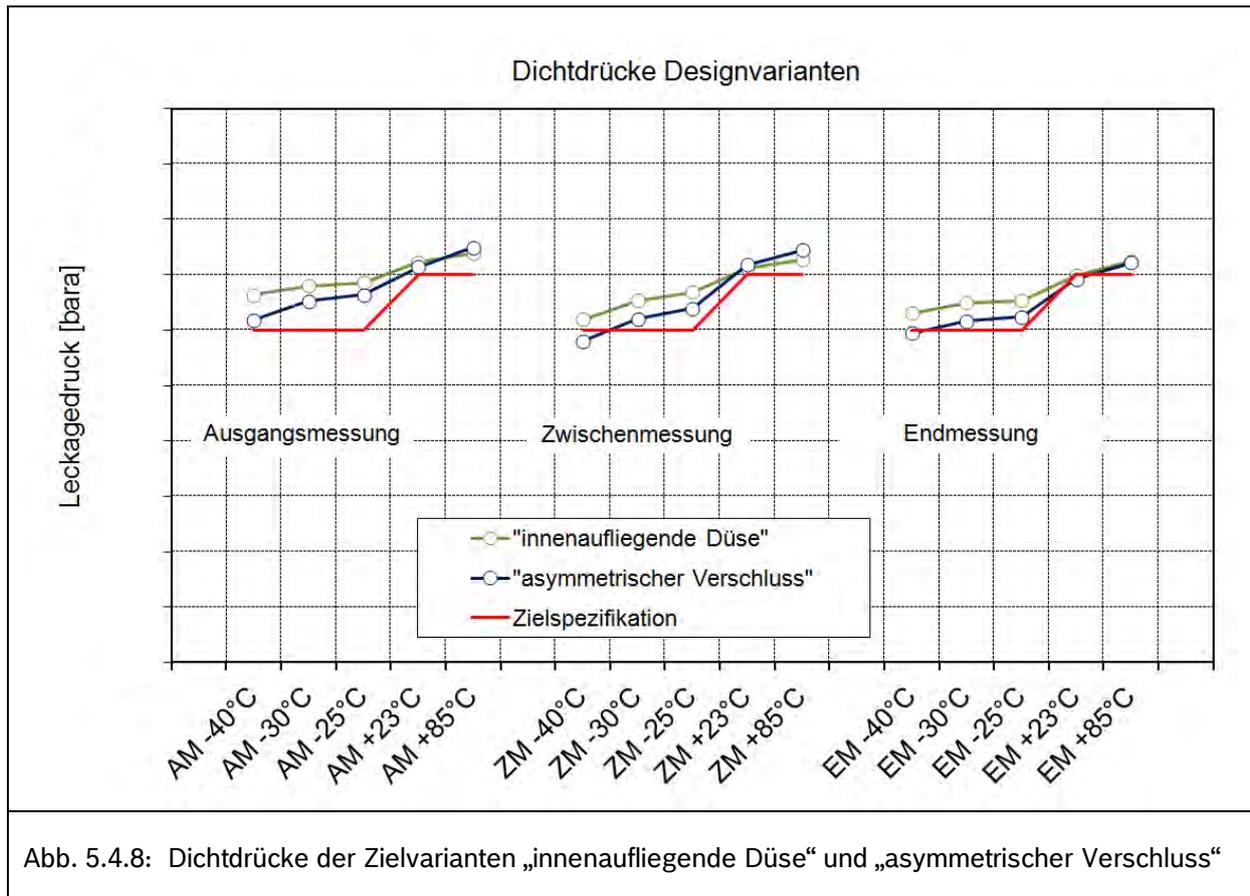


Abb. 5.4.7: Ergebnisse der Bauteil-Befundung: Verschleißspuren in der Lagerbuchsenbohrung und auf der Oberfläche des Zylinderstifts.

Generell zeigt diese Designvariante am Komponentenprüfstand in Bezug auf die Kennliniencharakteristik ein gutes Potenzial. Ein entsprechend positives Verhalten im System bzw. Fahrzeug ist zu erwarten, müsste aber für eine endgültige Aussage noch validiert werden.

Weitere Funktionsmerkmale und Designvarianten:

Neben der Durchsatzcharakteristik ist das Dichtverhalten eine weitere wesentliche Funktion des Ventils. Kritisch ist hier insbesondere die Dichtung bei Tieftemperatur. Zur abschließenden Bewertung der beiden Konzepte wurde daher auch das Dichtverhalten vor und nach Alterung und Pulsdauerlauf untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.4.8 dargestellt. Hierin sind die Mittelwerte der Dichtdrücke von jeweils 5 Einzelventilen eingetragen. Der Dichtdruck ist definiert als der Druck, bei dem die Leckage des Ventils sicher unter dem zulässigen Wert liegt. Die Zielspezifikationen entsprechen typischen Werten aus Systemen mit aktiver H₂-Rezirkulation. Endgültige Werte für Systeme mit Strahlpumpe lagen zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht vor. Die aktuellen Grenzen sind daher vorläufig und sind der laufenden Entwicklung anzupassen. Hierzu waren weiterhin die Zusammenarbeit mit OEMs und Systemlieferanten vorgesehen.



Das Dichtverhalten der beiden Konzepte ist im Wesentlichen vergleichbar und liegt nahe den aktuellen Anforderungen. Das Konzept mit „asymmetrischem Verschluss“ zeigt hin zu tiefen Temperaturen einen etwas höheren Abfall des Dichtdrucks. Eine mögliche Ursache sind Unebenheiten der Elastomeroberfläche. Die Vermessung der Verschlusseinzerteile hinsichtlich der Ebenheit ergab eine Abweichung von den Zeichnungsmaßen. Die Dichtfläche des Elastomers ist leicht konkav ausgeführt. Beim Schließen des Ventils führt das dazu, dass sich zunächst nur die äußeren Randbereiche des Elastomers auf der Düsenoberfläche abstützen. In weiterer Folge des Schließvorgangs muss die Federkraft zunächst diese Randbereiche verformen, damit die restliche Fläche auf der Düsenoberfläche aufliegt. Die für die Verformung notwendige Schließkraft steht als Dichtkraft nicht mehr zur Verfügung. Speziell unter Temperatur, wenn zusätzlich geometrische Effekte wie z.B. Längenausdehnung auftreten, kann sich ein Dichtkraftverlust spürbar auswirken. Die Verminderung des Leckagedrucks über Alterung und Belastung ist relativ gering und entspricht in etwa dem Verhalten der Standarddesigns. Dies deckt sich auch mit der Einschätzung der Verschleißbilder aus der Bauteilbefundung. Weitere Funktionsmerkmale wie Vollastdurchsatz und Kaltstartverhalten wurden ebenfalls untersucht. Die statischen und dynamischen Vollastpunkte, wurden erreicht. Das Öffnungsverhalten bei Tieftemperatur war bei beiden Varianten unauffällig. Verzögerungen beim Öffnen durch z.B. Elastomer-Klebeffekte konnten nicht beobachtet werden.

Neben den o.g. Varianten wurden stichversuchsartig weitere Elastomer-Varianten untersucht, um die theoretischen Annahmen bzgl. des Einflusses des Elastomerdurchmessers auf das Durchsatzverhalten und Beständigkeit zu validieren. Eine Gesamtübersicht der Geometrien zeigt Abb. 5.4.9. Bezüglich der detaillierten Beschreibung der einzelnen Konzepte, wird auf die vorangestellte Ausführung in diesem Bericht verwiesen und an dieser Stelle nicht wiederholend darauf eingegangen.

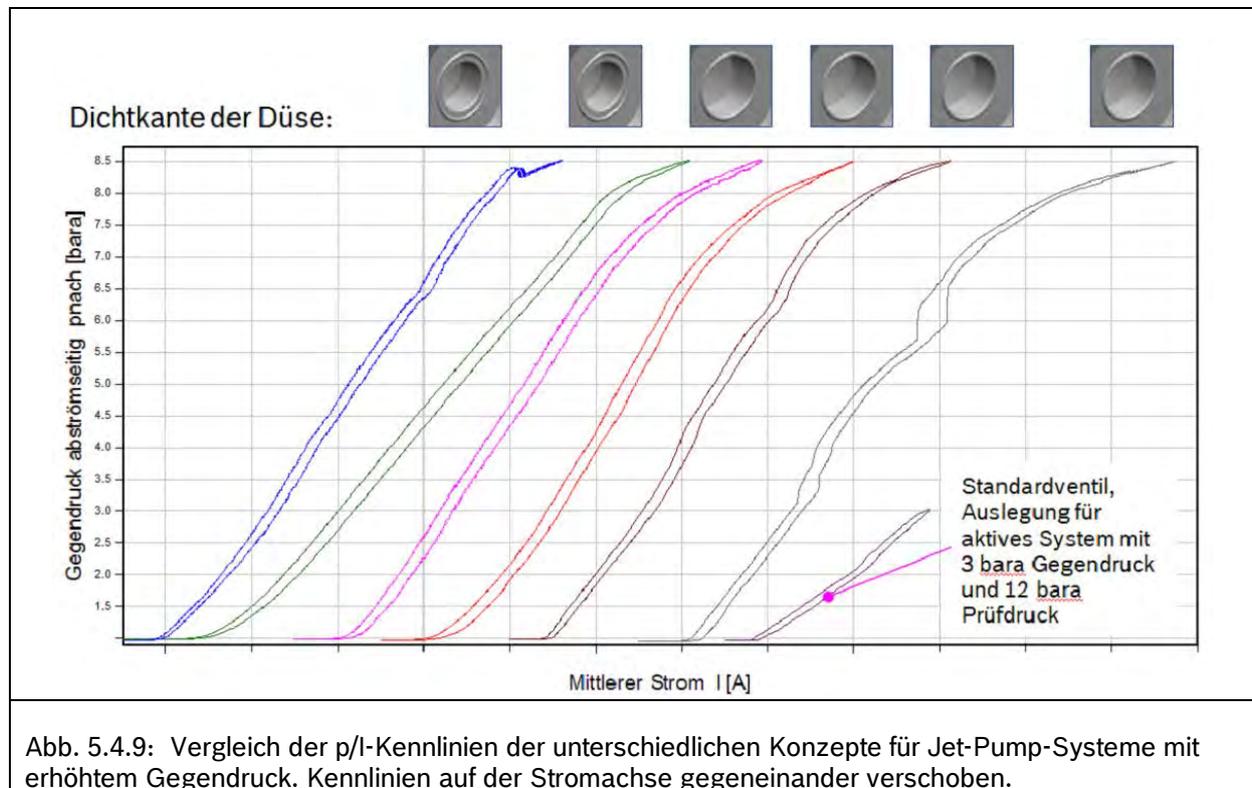


Abb. 5.4.9: Vergleich der p/I-Kennlinien der unterschiedlichen Konzepte für Jet-Pump-Systeme mit erhöhtem Gegendruck. Kennlinien auf der Stromachse gegeneinander verschoben.

Wie bereits vorangegangen dargestellt, verhält sich das Standardventil, ausgelegt für Systeme mit aktiver H₂-Rezirkulation, in Jet-Pump-Systemen mit erhöhtem Gegendruck entsprechend der zweiten Kennlinie von rechts (vgl. auch Abb. 5.4.5).

An den Kennlinien erkennt man die Abhängigkeit der Regelgüte vom Verschlussdurchmesser bzw. dem Überstand des Elastomers gegenüber der Dichtkante. Bei einem optimierten Durchmesser hinsichtlich Belastbarkeit treten noch leichte Unregelmäßigkeiten im Kennlinienverlauf auf. Ventile mit minimal möglichem Verschlussdurchmesser zeigen einen nahezu optimalen stetigen Verlauf der Kennlinie. Bei der Absicherung im Rahmen des Labordauerlaufs war diese Variante jedoch nicht ausreichend mechanisch belastbar.

Infolge der durchgeführten Untersuchungen konnte das theoretische Potenzial der beiden Zielvarianten („innen aufliegende Düse“ und „asymmetrischer Verschluss“) in Bezug auf ausreichende Regelgüte für kontinuierlich betriebene BZ-Systeme mit Strahlpumpe bestätigt werden.

Da der „asymmetrische Verschluss“ Vorteile sowohl bei der Regelgüte, als auch bei der mechanischen Beständigkeit während des Labordauerlaufs aufzeigte, wurde dieses Konzept als Zielkonzept weiter verfolgt.

In einer weiteren Labordauerlauf-Erprobung galt es dieses Design auch in Bezug auf Eignung für gepulst betriebene Systeme zu untersuchen und mit der Robustheit des Standarddesigns zu vergleichen.

Absicherung für gepulst betriebene Systeme

Der Anwendungsfall des Pulsbetriebs in Jet-Pump-Systemen, wurde in diesem Bericht anhand des Standarddesigns bereits vorgestellt. In der oben dargestellten Erprobung zeigte sich das Elastomerdesign „asymmetrischer Verschluss“ als zielführendes Konzept für den Einsatz bei erhöhten Gegendrücken mit geregelter Ansteuerung. Da man im Sinne der Gleichteilstrategie möglichst ein einheitliches Ventildesign für sämtliche Anwendungsfälle verwenden möchte, war es erforderlich das Zielkonzept auch auf Eignung in gepulst betriebenen Systemen zu untersuchen. Dazu wurde ein weiterer Labordauerlauf mit thermischer Voralterung durchgeführt. Für die Validierung der Funktionalität und mechanischen Beständigkeit über Lebensdauer erfolgte zum Vergleich der Aufbau von je 5 Ventilen, sowohl mit asymmetrischem Verschluss als auch in Standardausführung. Als Bewertungskriterium für die Konzeptegnung stehen der gepulste Volllastdurchsatz und das Verhalten des Leckagedrucks über Temperatur im Vordergrund. Das Verhalten der Regelbarkeit gibt zwar zusätzliche Hinweise über das Verschleißverhalten, ist aber für diesen Anwendungsfall nicht relevant und wurde daher nicht näher betrachtet und gewertet.

Abweichend zur Vollastprüfung des Standardventils für den Einsatz in aktiven BZ-Systemen mit Rezirkulationspumpe und geregelter Ansteuerung, ist für den Pulsbetrieb eine abgewandelte Prüfung erforderlich. Angepasst an die Ansteuerstrategie des Pulsbetriebs im Fahrzeug erfolgte die Durchflussermittlung am Prüfstand ähnlich einem Benzineinspritzventil schaltend, mit einer Ansteuerungszeit (t_i) von 5 bzw. 10 ms. Der sich dabei einstellende Massenstrom ist der gemittelte Volllastdurchsatz, dargestellt in Abb. 5.4.10. Im Vergleich zum Standardventil (blau, gestrichelt) zeigt sich der Volllastdurchsatz der Designvariante mit asymmetrischem Verschluss (grün, durchgezogene Linie) über der gesamten Laufzeit unauffällig, kontinuierlich stabil. Beim Standardventil hingegen weisen die signifikanten Massenstromerhöhungen auf einen übermäßigen Verschleiß bzw. auf einen Ausfall des Ventils hin. Diese auffallenden Ventile wurden zur vorzeitigen Befundung aus der Erprobung genommen und zur optischen Analyse vorbereitet. Lediglich ein Standardventil von fünf Prüflingen zeigt auch nach 130 Millionen Schaltzyklen ein zur Designvariante vergleichbares positives Durchsatzverhalten.

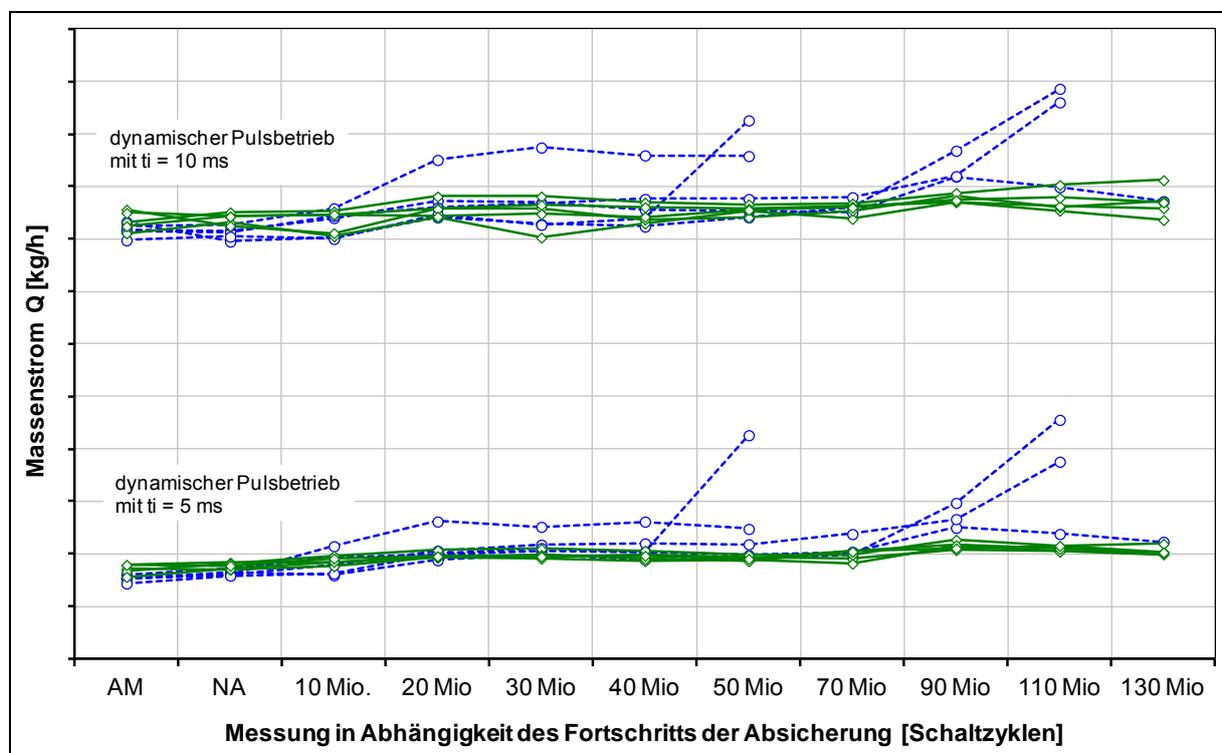


Abb. 5.4.10: Massenstrom in Abhängigkeit der Ansteuerzeit (t_i) und Anzahl der Schaltzyklen des Standardventils (blau, gestrichelt) und der Designvariante (grün, durchgezogen). AM = Ausgangsmessung; NA = Nach Alterung

Sowohl beim Volllastdurchsatz als auch beim Leckageverhalten lagen zum Zeitpunkt der Untersuchungen seitens der OEMs und Systementwicklung noch keine endgültigen Spezifikationswerte und fahrzeugspezifische Randbedingungen vor. Diese wurden aufgrund der zu erwartenden Werte und Erfahrungen entwicklungsseitig in Abstimmung mit dem Systembereich definiert und für die Komponentenerprobung und -prüfung zugrunde gelegt. Die Bewertung des Ventildesigns mit asymmetrischem Verschluss erfolgte in dieser prinzipiellen Betrachtung im relativen Vergleich zum Standarddesign.

Neben dem Volllastdurchsatz ist der Leckagedruck ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Eignung des Ventils in Systemen mit Pulsbetrieb. Der Leckagedruck eines Ventils ist, wie bereits in diesem Bericht erwähnt, ein indirektes Maß für das Leckageverhalten des Prüflings. Er gibt an, bei welchem Vordruck das Ventil einen definierten Leckagewert aufzeigt, der unterhalb der Spezifikationsgrenze liegt.

In Abb. 5.4.11 ist der Leckagedruck des Standardventils (blau, gestrichelt) und der Designvariante (grün, durchgezogen) in Abhängigkeit der Temperatur und Laufzeit (Schaltzyklen) der Laborerprobung dargestellt. Bereits als Neuteil zeigt die Designvariante einen unerwartet großen Leckagedruckverlust in Abhängigkeit der Temperatur. Wie auch bei den vorangegangenen, bereits vorgestellten Messungen, kann dieses Verhalten auf die Geometrie des Elastomers zurückgeführt werden, die bei diesen ersten Einzelteilen von den Zeichnungsmaßen abweicht. Im weiteren Verlauf des Dauerlaufs zeigt sich aber die Designvariante im Vergleich zum Standardventil hinsichtlich des Leckageverhaltens robuster. Während das Standardventil nach der Voralterung noch stabile Leckagedruckwerte aufzeigt, verschlechtert sich das Leckageverhalten signifikant bereits nach 10 Millionen Schaltzyklen. Im weiteren Verlauf der Dauerläuferprobung treten erste Ausfallanzeichen nach 30 Millionen Schaltzyklen auf und nach 50 Millionen kommt es zum Komplettausfall eines Standardventils. Weitere Prüflinge der Standardausführung fallen nach 110 Millionen Schaltzyklen aus. Die Designvariante hingegen zeigt überwiegend ein robustes Leckageverhalten. Eine leichte Verschlechterung während des Dauerlaufs ist erwartungsgemäß. Größere Einbrüche treten aber erst ab 70 Millionen Schaltzyklen auf, dennoch kommt es bei keinem der fünf Prüflinge zum Komplettausfall.

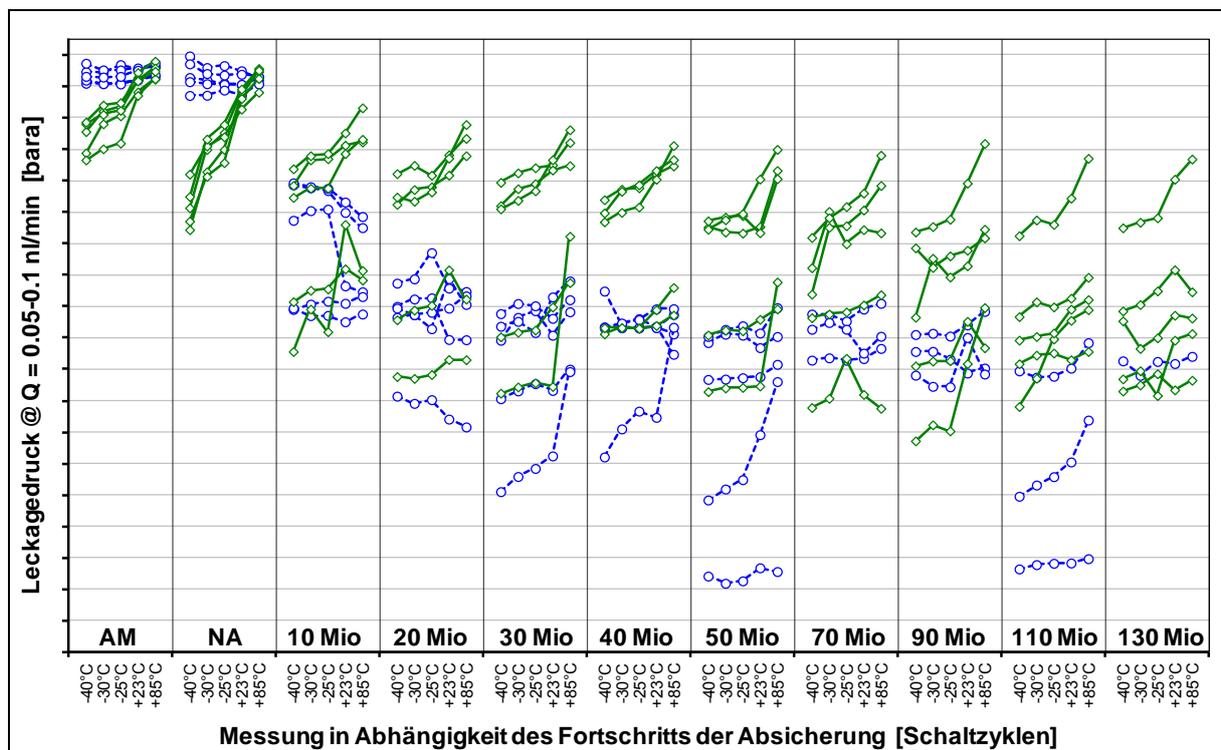


Abb. 5.4.11: Leckagedruck in Abhängigkeit der Temperatur und Anzahl der Schaltzyklen des Standardventils (blau, gestrichelt) und der Designvariante (grün, durchgezogen). AM = Ausgangsmessung; NA = Nach Alterung

Das hier nicht dargestellte Kaltstartverhalten der Ventile zeigte sich bei beiden Varianten vergleichbar unauffällig.

Bei weiterer Verfolgung des Einsatzes des HGI in gepulster Systemanwendung müssen die Ergebnisse anhand der konkreten Randbedingungen und Spezifikationen der OEMs bzw. der Systementwicklung neu bewertet werden.

Das Elastomerdesign mit asymmetrischem Verschluss zeigt gegenüber dem Standardventil, sowohl im Pulsbetrieb als auch im Regelbetrieb bei Anwendungen mit erhöhtem Gegendruck, deutliche Vorteile hinsichtlich Funktionalität und mechanischer Beständigkeit und ist diesbezüglich als Zieldesign weiter zu verfolgen. Dieses Elastomerdesign weist Potenzial auf, die systembedingten Anforderungen zu erreichen.

AP 6 Fertigungsprozesse, Industrialisierbarkeit

Ziel der Arbeiten des AP 6 war die Auswahl und Umsetzung geeigneter Fertigungsprozesse für die spezifischen Randbedingungen der automotiven BZ-Anwendung. Dies betrifft im Wesentlichen den Laserschweißprozess für H₂-beständige Stähle. Außerdem beinhaltete das Arbeitspaket den Nachweis zur Industrialisierbarkeit im Sinne einer Freigabe des Erzeugnisses für die automotive Anwendung. Hierfür wurde eine erweiterte Umweltprüfung durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Die erweiterten Umweltprüfungen wurden zeitlich mit grundlegenden Erprobungen durchgeführt. Deshalb sind diese Ergebnisse zum Teil unter AP 5.4 beschrieben.

AP 6.1 Auswahl Fertigungsprozesse für H₂-beständige Stähle

Ein wesentlicher Fertigungsschritt im HGI ist das Verschweißen der ferritischen Bauteile Magnetkern und Ventilgehäuse mit dem für die magnetische Trennung erforderlichen, austenitischen Zwischenring. Während austenitische Stähle im Allgemeinen unempfindlich gegenüber Wasserstoffeinwirkung sind, kann das Eindringen von H₂ in ferritische Stähle zur Versprödung und in Verbindung mit auftretenden Rissen zum frühzeitigen Bauteilversagen führen. Im Bereich der Schweißnähte sind geometrische Bedingungen vorhanden (z. B. Kerben), welche bereits unter vergleichsweise geringer Belastung zu lokal hohen Bauteilspannung führen und damit das Eindringen und Ausbreiten atomaren Wasserstoffs in das Material begünstigen können. Weiterhin besteht an diesen Stellen aufgrund des Schmelzvorgangs ein „Übergangsgefüge“, welches potenziell anfällig ggü. H₂-Versprödung ist. Für den Einsatz im HGI ist damit eine neue Qualifizierung des bei anderen Komponenten bereits in Serie eingesetzten Fertigungsprozesses Laserschweißen erforderlich.

Auf Basis von Systemmessungen im Fahrzyklus (vgl. Abb. 6.1.1) wurde das über die Betriebsdauer des HGI auftretende Lastkollektiv in Form einer Druckschwellbelastung im Ventil abgeleitet.

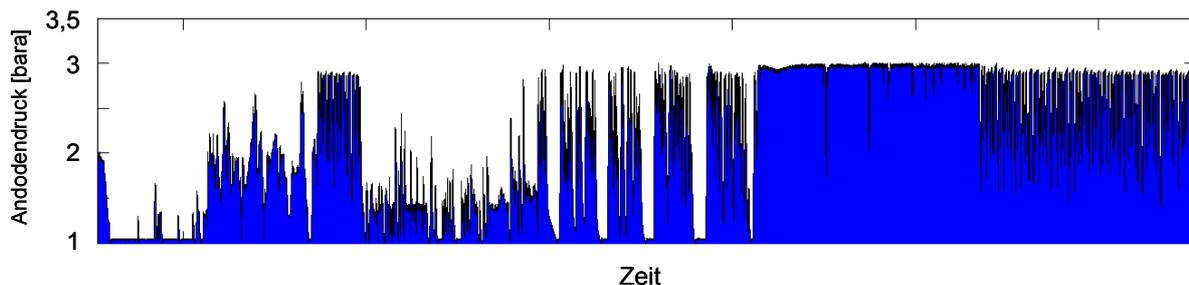


Abb. 6.1.1 gemessener Druckverlauf hinter dem HGI-XL im NLCT-Zyklus

Unter der Annahme von konservativen Werten für den Abfall der Festigkeit durch Lastwechsel und H₂-Einwirkung sowie die Streuung des Fertigungsprozesses Laserschweißen wurden eine Schwingfestigkeitsbewertung und eine Betriebsfestigkeitsrechnung durchgeführt. Als Ergebnis für das betrachtete Lastkollektiv ergab sich eine äußerst geringe Ausfallwahrscheinlichkeit von < 1ppm über der Betriebsdauer.

Zur Qualifizierung des Fertigungsschritts Laserschweißen wurden bestehende Prüfmethoden untersucht und erweitert. Nach Definition der Prüfkriterien wurden umfangreiche Schweißausproben mit unterschiedlichen Prozessparametern durchgeführt und die Ergebnisse anhand von Schlibbildern bewertet. Die Schlibbilder des Magnetkerns zeigten dabei Poren unterschiedlicher Ausprägung, die auf Legierungsbestandteile des Werkstoffs zurückzuführen sind. Das Auftreten von Poren in Schweißnähten vergleichbarer Komponenten ist prinzipiell nicht ungewöhnlich.

Die Anpassung des Laserschweißprozesses zur sicheren Vermeidung von Poren war nicht möglich. Obwohl eine Beeinträchtigung der Funktion bzw. Festigkeit der porenhaltigen Schweißnähte nicht beobachtet wurde, wurde zur Erhöhung der Robustheit sowie der Nachhaltigkeit dennoch ein alternativer Werkstoff ohne Bleianteil für den Magnetkern umgesetzt. Mit Einführung und Absicherung des neuen Werkstoffs über geeignete Simulationen und Funktionstests wurde das AP 6.1 abgeschlossen.

AP 6.2 Erweiterte Umweltprüfung, Dauerläuferprobung H₂

Für die erweiterten Umweltprüfungen zur Freigabe des HGI-XL wurden für die unter H₂ belasteten Schweißnähte die in AP 6.1 durchgeführten Schadensakkumulationsrechnungen aktualisiert bzw. erweitert. Es wurden dabei Rechnungen für erhöhte Drücke im Ventil durchgeführt, um die Bauteilfestigkeit des HGI auch für den Einsatz in Systemen mit passiver H₂-Rezirkulation (vgl. Variantenrahmen Kap. 5.2) zu bewerten.

Für das Prüfkonzept mit 10.000 Druckwechseln bei 100bar ergibt sich für das aktualisierte Lastprofil mit durch den Staudruck von 3bara auf 5bara erhöhten Innendruck weiterhin eine Ausfallwahrscheinlichkeit von << 1ppm. Um bei weiter erhöhtem Innendruck von bis zu 20bara (voraussichtlich liegt der tatsächliche Wert tiefer) eine vergleichbare Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. eine Ausfallwahrscheinlichkeit von ca. 1ppm zu erreichen, müsste der Prüfdruck auf ca. 550bara respektive 250bara erhöht werden (vgl. Abb. 6.2.1).

| Betriebsdruck | Prüfdruck Wöhlerlinie in bar | Lastwechselzahl bis Abbruch ohne Ausfall | Sicherheitsfaktor $j_{N, erf}$ | Sicherheitsfaktor j_N | Ausfallwahrscheinlichkeit P_A |
|---|------------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Originaldruck aus NCLT-Zyklus | 100,00 | 10 001 | 258,7 | 251 453 | << 1 ppm |
| NCLT-Zyklus proportional extrapoliert auf 5 bar | 100,00 | 10 001 | 258,7 | 9 754 | << 1 ppm |
| NCLT-Zyklus proportional extrapoliert auf 20 bar | 100,00 | 10 001 | 258,7 | 4,46 | 100 272 ppm |
| NCLT-Zyklus proportional extrapoliert auf 20 bar | 200,00 | 10 001 | 258,7 | 100,88 | 39,5 ppm |
| NCLT-Zyklus proportional extrapoliert auf 20 bar | 250,00 | 10 001 | 258,7 | 274 | 0,8 ppm |
| NCLT-Zyklus proportional extrapoliert auf 20 bar | 400,00 | 10 001 | 258,7 | 2 285 | << 1 ppm |
| NCLT-Zyklus proportional extrapoliert auf 20 bar | 550,00 | 10 001 | 258,7 | 9 597 | << 1 ppm |

Abb. 6.2.1: Ausfallwahrscheinlichkeiten für mit 10.000 Druckwechseln ohne Schädigung erprobte Ventile.

Mit den verfügbaren 300bara-Druckgasflaschen ist eine Erprobung bis zu Drücken von ca. 200bara sinnvoll möglich. Bei einer Reduzierung des abzusichernden Druckes auf voraussichtlich tatsächlich in passiv rezirkulierten Systemen auftretende Werte von ca. 15bara kann die vorhandene Prüfeinrichtung damit auch zur Absicherung von Ventilen für diese Anwendung eingesetzt werden.

Um die Auswirkungen möglicher Fehlerfälle (z. B. Kurzschluss) auf die Eigenschaften bzw. das Verhalten der Komponente abschätzen zu können wurden in Zusammenarbeit mit dem Systemhersteller geeignete Tests definiert. Die Erkenntnisse sind beispielsweise bei der Auslegung des Steuergerätes oder zur Beurteilung von Fehlerfolgen nutzbar.

Folgende Tests wurden durchgeführt:

- Langzeit Überspannung
Ermittlung des potenziellen Schadenverlaufs an der Komponente bei dauerhafter Überbestromung bzw. Überspannung.
- Lastabwurf
Erprobung der Komponente auf Festigkeit ggü. kurzen Spannungspulsen.

- Überlagerte Wechselspannung
Erprobung der Komponente auf mögliche akustische Emission durch überlagerte Wechselspannung.

Die Prüflinge wurden vor und nach den Tests auf die relevanten Funktionswerte getestet. Bei allen Tests traten keine signifikanten Beschädigungen oder Einschränkungen in der Funktion auf. Das HGI ist damit gegenüber eines potenziellen Fehlbetriebs im Fahrzeug als robust zu bewerten.

Für die abschließende Freigabeerprobung wurden die in AP 3 erarbeiteten und in AP 5.4 umgesetzten Erprobungsinhalte auf Basis neuerer Erkenntnisse bzgl. folgender Punkte überarbeitet:

- Anpassung des Dauerlaufprofils aufgrund veränderter Ventilcharakteristik des Zieldesigns.
- Aufteilung in dynamischen und stationären Anteil zur Absicherung von systemunabhängigen Mikroschwingungen der Ventilmadel.
- Anpassung des Belastungsprofils für die Vibrationsprüfung auf Basis aktueller Messungen des Systemlieferanten.
- Anpassung der Versuchsführung für Schutzklassetests zur Abbildung der realen Verhältnisse an der Steckerverbindung.

Die Fremdbezugsteile wurden dabei bereits auf Serien- bzw. seriennahen Einrichtungen und mit Serienprozessen gefertigt. Die Ventile selbst wurden im Werk auf den künftigen Serieneinrichtungen montiert, funktionseingestellt und geprüft (vgl. AP-D) und haben damit den Stand von Qualitätsprototypen. Die Umwelt- und Dauerlaufprüfungen wurden erfolgreich durchgeführt und damit die Gesamterprobung des HGI-XL positiv abgeschlossen (vgl. AP-D.2).

Eine Übersicht mit den wesentlichen Prüfergebnissen zeigt Tab. 6.2.1.:

| Erprobung | Prüfung / Beurteilungskriterium | Anzahl Prüflinge | Ergebnis / Bewertung | Bemerkungen / weiteres Vorgehen |
|-----------------|---|------------------|--|--|
| Reihenprüfungen | Voralterung: TW-Prüfung IEC 60068-2-14 Na (100 Zyklen, Temperatur: -40°C/110°C) | 10 | Prüfung bestanden Bericht EPR Nr. 12/1869 | Funktionswerte i.o. Festsitz Spule auf Ventiltrone i.o. Ventilbenummerung bzgl. Festsitz/Lesbarkeit i.o. |
| | Dynamische Prüfung: Rausch-/Gleitsinusprüfung und Schockprüfung ISO 16750-3 | 5 | Prüfung bestanden Bericht 12/040 | Funktion und Dauerhaltbarkeit i.o. |
| | Prüfstandsdauerlauf Absicherung 6000 Betriebsstunden | 5 | Prüfung bestanden Bericht 12/044 | robustes und zuverlässiges Design |
| Einzelprüfungen | Feuchte-/Korrosionsprüfung (Rückwirkungen aus der Brennstoffzelle) | 5 | Prüfung bestanden Bericht 12/040 | Funktion und Dauerhaltbarkeit i.o. |
| | Lagerung bis Einsatz (6 Jahre) | 10 | Prüfung bestanden Bericht 12/045 | Funktionsverhalten i.o. Beständigkeit der Zielverpackung i.o. |

Tab. 6.2.1: Abschließende Umweltprüfungen und Dauerproben Qualitätsprototyp.

Alle 35 Erprobungsmuster wurden im Neuzustand sowie nach Abschluss der Belastungstests auf alle spezifizierten Funktionswerte (Durchsatz, Dichtheit, Kaltstart, ...) geprüft. Bei den Reihenprüfungen wurden diese Funktionstests als Zwischenprüfung zusätzlich nach der Voralterung durchgeführt. Beim Dauerlauf in Wasserstoff erfolgte eine weitere Zwischenprüfung nach dem „dynamischen Teil“ des zweigeteilten Tests. Im Anschluss an alle Tests wurden die Ventile zerlegt und jedes Einzelteil visuell und messtechnisch bzgl. des Verschleißes oder anderer Auffälligkeiten untersucht.

Auf die Darstellung aller Ergebnisse dieser umfangreichen Prüfungen wird an dieser Stelle verzichtet. Die Ergebnisse inklusive der Funktionsprüfungen und der Befundung der zerlegten Prüflinge sind detailliert in den entsprechenden internen Berichten dokumentiert. Beispielhaft sind im Folgenden ausgewählte Ergebnisse aus der Dauerläuferprobung als repräsentativer Lebensdauerprüfung aufgeführt.

Testergebnisse H₂-Dauerlauf:

Abb. 6.2.1 zeigt die Prüfergebnisse zur „internen Dichtheit“ des Ventils. Darin ist unter anderem die Leckage über den Dichtsitz mit der Elastomerflachdichtung enthalten. Im Verlauf der Reihenprüfung nimmt die interne Dichtheit des Ventils ab. Dies ist im Wesentlichen auf Setz- und Verschleißeffekte am Flachdichtsitz zurückzuführen. Der Effekt ist schon nach der ersten thermischen Alterung bzw. Temperaturwechselbeanspruchung ohne Betrieb des Ventils erkennbar (erste Zwischenmessung). Die bleibende Verformung des Elastomers (vgl. Abb. 6.2.2.) führt zu einer Reduzierung der Federvorspannung und damit zum früheren „Öffnen“ des Ventils bei Druckbeaufschlagung. Zudem verringert sich die Dichtwirkung aufgrund der geringeren Verformung bzw. Anpresskraft im Bereich der Dichtlippe. Dieser Effekt verstärkt sich bei zunehmender Belastung des Ventilsitzes im Betrieb. Die Reduzierung der Dichtheit über Betrieb und Lebensdauer wird bei der Einstellung der Ventile in der Fertigungslinie entsprechend vorgehalten. Nach Abschluss des Tests erfüllen alle Prüflinge die geforderte Spezifikation über dem gesamten Betriebstemperaturbereich.

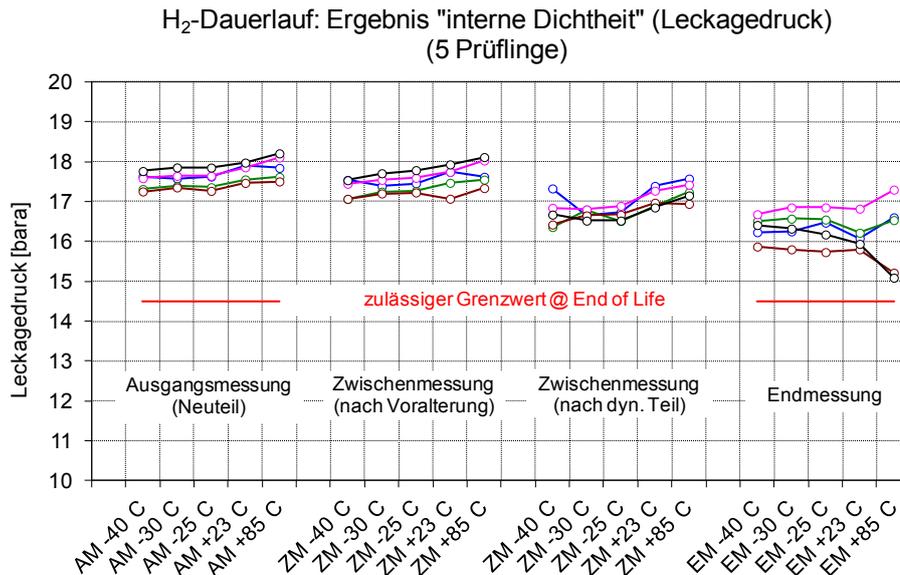


Abb. 6.2.1: Ergebnis H₂-Dauerlauf: Funktionswert „interne Dichtheit“.

Wie in AP3.3 beschrieben könnte für BZ-Systeme mit passiver H₂-Rezirkulation anstelle einer „proportionalen Ansteuerung“ ein „gepulster Betrieb“ des HGI von Vorteil sein. Der Durchsatz wird dann nicht mehr über den kontinuierlich eingestellten Ventilhub sondern die Schaltfrequenz und die Öffnungszeit eingestellt. Die Schaltfrequenzen liegen abhängig von der Betriebsstrategie der BZ bzw. Strömungspumpe im Bereich zwischen ca. 0,2Hz und 15Hz. Dies ist mit dem Design des HGI prinzipiell realisierbar. Die detaillierten Anforderungen und Randbedingungen dieser Anwendung sind aufgrund des Entwicklungsstands der OEMs noch nicht endgültig bekannt. Die laufenden Untersuchungen richten sich daher nach den verfügbaren Daten von Systemherstellern sowie eigenen Abschätzungen.

Im „gepulsten Betrieb“ ändert sich die Belastung des HGI wesentlich. Insbesondere betrifft dies den Elastomerdichtsitz, die Lager sowie den oberen Anschlag des Magnetankers, falls ein Kontakt an dieser Stelle durch eine geeignete Ansteuerung nicht mit vertretbarem Aufwand vermieden werden kann.

Um die Robustheit des HGI-Designs auch für diesen Einsatzfall zu bewerten wurde Dauerlauf mit angepasstem Ansteuerprofil durchgeführt. Die wesentlichen Bewertungskriterien waren Dichtheit und Bauteilverschleiß. Die Stetigkeit der Kennlinie spielt beim „geschalteten Betrieb“ eine untergeordnete Rolle (vgl. AP 5.2). Zur Verbesserung der Beständigkeit des Elastomers kann dessen Auflagefläche auf der Düse entsprechend erhöht werden.

Ergebnis nach Pulsbetrieb mit 22,5Mio Schaltzyklen:

- keine Einschränkungen bei Durchsatz
- Reduzierung interne Dichtheit --> Vorhalt für Neuteile erforderlich
- Verschleißbilder vergleichbar mit „Proportionalbetrieb“; kein Bauteilversagen

Das Design des HGI ist demnach nicht grundsätzlich ungeeignet für den Einsatz in BZ-Systemen mit passiver H₂-Rezirkulation. Zur weiteren Qualifizierung wurden zusätzliche Tests durchgeführt deren Ergebnisse zur besseren Darstellung der Zusammenhänge ebenfalls unter AP 5.4 beschrieben sind.

AP-D Fertigung und Gesamterprobung Qualitätsprototyp

AP-D.1 Aufbau Qualitätsprototypen

Voraussetzung für den Qualitätsprototypen ist, dass Fertigungs-, Montage-, Einstell- und Prüfprozesse den möglichst weitgehend den geplanten Serienprozessen entsprechen. Dies betrifft sowohl die Herstellung der Einzelteile bei den Zulieferern, als auch die Montage und Einstellung der Ventile im Fertigungswerk.

Innerhalb des AP-D.1 wurde das Design der Einzelteile final mit den Zulieferern abgestimmt und festgelegt.

Dies umfasste u.a. folgende Arbeiten:

- Überarbeitung der Einzelteilzeichnungen inklusive Prüfmaße in Abstimmung mit Lieferanten und Fertigungswerk.
- Festlegung und Abstimmung der Prüfstrategie sowie Erstellung von Prüfzeichnungen und Prüfvorschriften (z.B. Fehlerkataloge, ...).
- Qualitätsprüfung von Musterteilen und Optimierung der Fertigungsprozesse.

Die Abnahme der Einzelteile erfolgte nach Abschluss der Erstbemusterung und Qualitätsprüfung der Teile im Fertigungswerk. Dieser sogenannte PPAP (Production Part Approval Process) beinhaltet die Prüfung und Dokumentation aller Bauteilmaße durch den Lieferanten und Bestätigung durch den für die Qualität verantwortlichen Bereich des Fertigungswerkes. Der Prozess inklusive der Dokumentation mit Prüfberichten wurde für alle neuen Fremdbezugsteile des HGI abgeschlossen.

Fertigungseinrichtungen:

Schwerpunkt der Arbeiten im Fertigungswerk war der Aufbau der Fertigungseinrichtungen sowie der Qualifizierung und Etablierung der Fertigungs- und Prüfprozesse.

Unter anderem wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Anpassung von Werkstückträgern und Montagevorrichtung.
- Durchführung von Montagetesten zur Festlegung von Prüf- und Eingriffsgrenzen (z.B. min. und max. zulässige Einpresskräfte).
- Erstellung von arbeitsplatzbezogenen Fertigungs- und Prüfanweisungen.
- Inbetriebnahme und Test der Einrichtung zur Restschmutzanalyse an Bauteilen und Ventilen.
- Durchführung von Restschmutzanalysen zur Qualifizierung des Reinigungsprozesses der Einzelteile und zur Festlegung von Grenzwerten für den Fertigungsprozess.
- Programmierung der automatisierten Endprüfung.
- Analysen zur Prozess- und Messfähigkeit.
- Aufbau und Einstellung von Mustern (70 Stck.) für die Freigabeerprobung, für Prozess- und Messfähigkeitsanalysen sowie für Kundenlieferungen.
- Vorbereitung und Start PPAP zur Serienfreigabe der Zulieferteile.

Abb. D.1.1. zeigt die Montageeinrichtung. Sie ist aus einzelnen Arbeitsstationen aufgebaut:

1. Vormontage 1: Montage Einzelteile Ventilbaugruppe mit kraftüberwachter Handhebelpresse.
2. Hubeinstellen: Fügen Magnetanker und Einpressen Magnetkern sowie Messung und Einstellung Ventilhub.
3. Materialwagen: Zufuhr Einzelteile. Aus-/Einschleusen der montierten Ventilgruppe für Laserschweißen.
4. Vormontage 2: Montage O-Ringe und Einstellbolzen.
5. HGI Einstellen: Ventile über Federvorspannung auf Durchsatz einstellen.
6. He-Prüfung: Prüfung externe Dichtheit mit Helium-Vakuum-Prüfung.
7. Endprüfung: Fügen Magnetgruppe und automatisierte Endprüfung auf Durchsatz, Kennliniencharakteristik und interne Dichtheit.
8. Beschriftung*: Anbringen Serienetikett und Verpackung (* nicht mehr dargestellt).

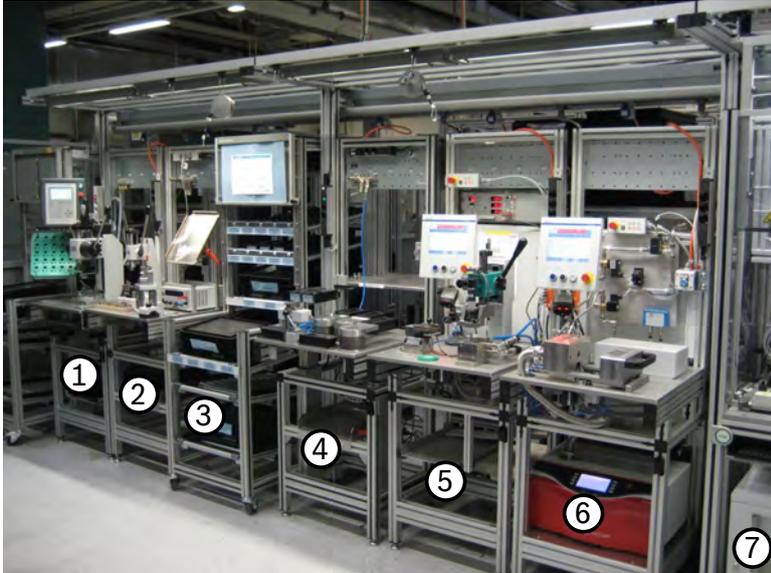


Abb. D.1.1: HGI Fertigungseinrichtung

AP-D.2 Laborerprobung

Die Entwicklung und Erprobung des Konzepts vom Prototypen über die einzelnen Musterphasen bis zum qualifizierten Prototypen mit abschließendem Zieldesign erfolgte laufend und unter Einbeziehung der jeweils neuen Erkenntnisse. Die einzelnen Phasen haben daher keine definierte Abgrenzung. Aus Gründen der besseren Darstellung der technischen Zusammenhänge und Entwicklungsschritte sind die Ergebnisse des AP-D.2 daher mit in den Arbeitspaketen AP 3, AP 5.4 und AP 6.2 enthalten.

AP-D.3 Fahrzeugerprobung, Messung, Analyse

Fertigungs- und Prüfprozessanalysen:

Für die einzelnen Fertigungs- und Prüfprozesse wurden Analysen zum Nachweis der geforderten Fähigkeiten durchgeführt. Für alle Fertigungsschritte wurde eine ausreichende Fähigkeit erreicht.

Systemtests:

Alle Tests im BZ-System beim Systemhersteller (inkl. Dauerlauf, Kaltstart, Gefrierstart, Funktionalität) waren ohne Auffälligkeiten bzgl. der Komponente HGI.

Fahrzeugtests:

Qualitätsprototypen des HGI wurden ebenfalls im Fahrzeug erprobt. Auch hier gab es keine Auffälligkeiten.

Berichtsblatt

| | |
|--|---|
| 1. ISBN oder ISSN Nicht zutreffend | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht |
| 3. Titel Abschlussbericht Wasserstoffdosierventil für die Anodengasversorgung von Kfz-Brennstoffzellensystemen | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] [Jung, Heiko] [Stier, Hubert] [Ilgner, Frank] [Schindler, Ralf] | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2013 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum Nicht zutreffend |
| | 7. Form der Publikation Bericht |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Robert Bosch GmbH GS-FI/PJ-ISE Robert-Bosch-Strasse 2 71701 Schwieberdingen | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution Nicht zutreffend |
| | 10. Förderkennzeichen 03BI101 |
| | 11. Seitenzahl - |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastrukturen Invalidenstrasse 44 10115 Berlin | 13. Literaturangaben - |
| | 14. Tabellen - |
| | 15. Abbildungen - |
| 16. Zusätzliche Angaben - | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Frau Dr. Sophie Haebel, Projektträger Jülich in Berlin, 30.05.2014 | |
| 18. Kurzfassung Das öffentlich geförderte Projekt „Wasserstoffdosierventil für die Anodengasversorgung von Kfz-Brennstoffzellensystemen - Hydrogen Gas Injector “ (FKZ: 03BI101) hatte zum Ziel, automobiltaugliche Qualitäts-Prototypen von elektromagnetisch betriebenen Wasserstoffdosierventilen zu entwickeln. Diese sollen geeignet sein, die Anforderungen an Funktionalität, Zuverlässigkeit und Sicherheit unter automobilen Einsatzbedingungen zu erfüllen. | |
| 19. Schlagwörter Brennstoffzellensystem - Anodengasversorgung - Wasserstoffdosierventil | |
| 20. Verlag Nicht zutreffend | 21. Preis Nicht zutreffend |

Document Control Sheet

| | |
|--|--|
| 1. ISBN or ISSN n/a | 2. type of document (e.g. report, publication) Final Report |
| 3. title Final Report Hydrogen Dosing Valve for Fuel Cell | |
| 4. author(s) (family name, first name(s)) [Jung, Heiko] [Stier, Hubert] [Ilgner, Frank] [Schindler, Ralf] | 5. end of project 31.12.2013 |
| | 6. publication date n/a |
| | 7. form of publication Report |
| 8. performing organization(s) (name, address) Robert Bosch GmbH GS-FI/PJ-ISE Robert-Bosch-Strasse 2 71701 Schwieberdingen | 9. originator's report no. n/a |
| | 10. reference no. 03BI101 |
| | 11. no. of pages . |
| 12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastrukturen Invalidenstrasse 44 10115 Berlin | 13. no. of references - |
| | 14. no. of tables - |
| | 15. no. of figures - |
| 16. supplementary notes - | |
| 17. presented at (title, place, date) Frau Dr. Sophie Haebel, Projektträger Jülich in Berlin, 30.05.2014 | |
| 18. abstract The target of the public funded project „Hydrogen Dosing Valve for the anode gas supply of automotive fuel cell systems – Hydrogen Gas Injector“ (FKZ: 03BI101) was, to develop automotive quality-prototypes of a solenoid driven Hydrogen Gas Injector. These had to be suitable and reliable for all common real automotive operational conditions in fuel cell prototype vehicles and test facilities. | |
| 19. keywords Fuel Cell System – Anode Gas Supply – Hydrogen Gas Injector | |
| 20. publisher n/a | 21. price n/a |