

# Entwicklung eines Hochdruckprüfstands für NDIR-Messungen zur Verunreinigungsbestimmung in Wasserstoff für Drücke bis 900 bar

Marco Schott<sup>1</sup>, Andreas Schütze<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*ZeMA - Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, Eschberger Weg 46, 66121 Saarbrücken, Deutschland*

<sup>2</sup>*Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik, Campus A5.1, 66123 Saarbrücken, Deutschland*

## Zusammenfassung

Um die Ziele der Energiewende und somit der globalen Reduktion von CO<sub>2</sub> zu erreichen, rückt Wasserstoff (H<sub>2</sub>) als Energieträger immer stärker in den Fokus. Mit Hilfe einer Brennstoffzelle wird die chemische Energie von H<sub>2</sub> direkt in elektrische Energie ohne Ausstoß von CO<sub>2</sub> umgewandelt. Dieses Antriebsverfahren wird bereits in Automobilen, Zügen oder auch Schiffen eingebaut. Kleinste Verunreinigungen des H<sub>2</sub>, je nach Schadstoff im ppm- oder sogar sub-ppm Bereich, können Schäden verursachen oder die Leistung der Brennstoffzelle reduzieren. Um die H<sub>2</sub>-Qualität im Feld zu überprüfen, wird derzeit ein online-fähiges Sensorsystem entwickelt, dass solche Verunreinigungen detektieren und identifizieren soll. Das Messsystem arbeitet in einem Druckbereich bis 900 bar und beruht auf der nicht-dispersiven Infrarot (NDIR)-Absorption. Der hohe Druck hat den Vorteil, dass sich die Empfindlichkeit verbessert, so dass eine optische Messweglänge von etwa 1 m auch für sehr kleine Schadstoffkonzentrationen ausreicht. Für die Auslegung des Systems spielen die einzelnen Absorptionsbanden der Verunreinigungen sowie des H<sub>2</sub> eine entscheidende Rolle. Auf Grund des hohen Drucks verschieben und verbreitern sich die einzelnen Absorptionsbanden, zudem wird H<sub>2</sub> selbst durch Stoßprozesse infrarotaktiv und kann die Erfassung der Schadstoffe stören. Um dieses Verhalten zu untersuchen, wurde ein Prüfstand entwickelt, bei dem eine Gasküvette in einem FTIR-Spektrometer mit definierten Schadstoff-H<sub>2</sub>-Gemischen bis zu einem Druck von 900 bar befüllt werden kann.

**Keywords:** Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Infrarot, Gasqualität, Hochdruckprüfstand, IR-Aktivität.

## Motivation

Um die Ziele des Pariser Übereinkommens aus dem Jahr 2015 und somit die Reduktion der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu realisieren, spielt Wasserstoff als Energieträger eine immer stärkere Rolle. Mit Brennstoffzellen kann die chemische Reaktionsenergie des Wasserstoffs direkt in elektrische Energie umgewandelt werden. Diese kann wiederum durch einen Elektromotor zur Fortbewegung genutzt werden. Der wesentliche Vorteil liegt darin, dass kein CO<sub>2</sub>-Ausstoß auftritt. Bereits jetzt stellen Brennstoffzellen-betriebene Elektrofahrzeuge eine interessante Alternative für den ÖPNV sowie den Individualverkehr dar. Am häufigsten werden Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC) eingesetzt, die eine hohe Leistungsdichte besitzen und aufgrund ihres großen Kostensenkungspotenzials favorisiert werden.

Aus einer Studie von Toyota aus dem Jahr 2015 geht hervor, dass Brennstoffzellen-

betriebene Autos eine deutlich günstigere Gesamt-CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweisen als Benzin- oder auch Hybrid-Fahrzeuge, siehe Abbildung 1 [1].

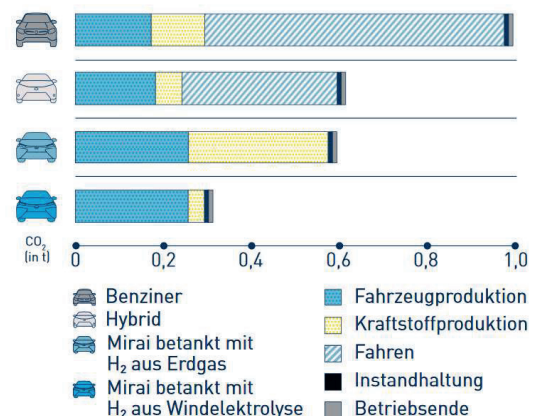


Abb. 1: Vergleich von verschiedenen Antrieben bzgl. ihrer CO<sub>2</sub>-Bilanz [1].

In Deutschland steigt die Zahl der Windenergieanlagen seit Jahren kontinuierlich an und aufgrund der temporär hohen Stromproduktion bei entsprechenden Wetterlagen steht zeitweise mehr Strom zur Verfügung als benötigt wird [2]. Dieser Strom kann zur Wasserstoffproduktion mit Hilfe eines Elektrolyseurs genutzt werden, der Wasserstoff kann dann in Hochdrucktanks gespeichert werden. Bei Bedarf kann daraus wieder elektrische Energie erzeugt werden. Wird ein Fahrzeug direkt mit  $H_2$  aus der Windelektrolyse betankt, reduziert das im Vergleich zu einer  $H_2$ -Betankung aus Erdgas den  $CO_2$ -Ausstoß nochmals um 50 %, siehe Abbildung 1.

Die Nachfrage nach Wasserstoff ist in Deutschland über die vergangenen Jahre kontinuierlich gestiegen. Abbildung 2 zeigt, dass sich die  $H_2$ -Nachfrage von Mitte 2016 bis März 2019 ungefähr vervierfacht hat [3]. Eine ähnliche Entwicklung zeigt sich auch beim Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur. So hat sich die Zahl der  $H_2$ -Tankstellen in den letzten 2,5 Jahren verdreifacht und liegt bei aktuell 66 öffentlichen Tankstellen in Deutschland [3]. Bis Ende 2019 ist ein weiterer Ausbau auf insgesamt 100 Tankstellen geplant [3].



Abb. 2: Wasserstoffnachfrage in Deutschland über die letzten drei Jahre [3].

Auch die Anzahl der entwickelten bzw. am Markt angebotenen Fahrzeuge zeigt eine deutlich steigende Tendenz. Diese positive Entwicklung wird auch in den kommenden Jahren weiter anhalten.

Vor allem im Hinblick auf die Funktion und Langzeithaltbarkeit der Brennstoffzellen ist die Reinheit des Wasserstoffs ein entscheidender Faktor. Je höher die Qualität ist, desto länger ist die Lebensdauer und desto größer die Leistung der Brennstoffzelle. Bereits kleinste Verunreinigungen können Membranschäden versuchen [4]. Kohlenwasserstoffe wie beispielsweise Methan, Ethan, Ethylen oder Propan führen zu einer starken Leistungs-

reduzierung und vorzeitigem Altern der Membran [4]. Kohlenmonoxid oder Ammoniak können eine Katalysatorvergiftung verursachen [4]. Daher wurde in der SAE-Norm J 2719 [4] festgehalten welche Verunreinigungen zu überwachen und welche Grenzwerte dabei einzuhalten sind, siehe Tabelle 1.

Tab. 1: Schadstoffgrenzwerte nach Norm SAE J 2719 [4].

Stoff	Verunreinigungs-grenzwert (ppmv)
Wasser	5,000
Kohlenwasserstoffe	2,000
Methan	0,100
Ethan	0,100
Ethylen	0,100
Propan	0,010
Sauerstoff	5,000
Stickstoff	100,000
Argon	100,000
Helium	300,000
Kohlenstoffdioxid	2,000
Kohlenstoffmonoxid	0,200
Schwefelverbindungen	0,001
Hydrocarbonsäure	0,200
Ammoniak	0,100
Formaldehyd	0,010
Halogenierte Stoffe	0,050

Für die Sicherstellung der  $H_2$ -Qualität ist daher ein online-fähiges Messsystem gefragt, das die relevanten Verunreinigungen im entsprechenden Konzentrationsbereich detektieren kann. Einzelne Stoffe lassen sich zwar über verschiedene Messverfahren wie IMS (Ionen-Mobilitäts-Spektrometer), PED (Plasma-Emissions-Detektor) oder WLD (Wärmeleitfähigkeitsdetektor) jeweils in Verbindung mit einem Gaschromatograph (GC) zur Erzielung einer ausreichenden Selektivität bzw. mittels IR-Laser messen [5]. Derzeit ist jedoch kein Messsystem am Markt verfügbar, das die meisten Verunreinigungen (abgesehen von Schwefelverbindungen) selektiv und mit einer sehr hohen Empfindlichkeit erfassen kann. Theoretische Überlegungen und Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein Messsystem basierend auf der nicht-dispersiven Infrarot (NDIR)-Absorption prinzipiell geeignet ist, die meisten relevanten Verunreinigungen zu detektieren [6]. Für die Auslegung des Messsystems sind Lage und Intensität der gasspezifischen Absorptionsbanden sowie deren Linienverbreiterung und -verschiebung aufgrund des hohen Drucks entscheidend. Zudem weisen bei derartig hohen Drücke auch normalerweise nicht-IR-aktive Gase wie der

Wasserstoff selbst, aber auch Stickstoff ( $N_2$ ) Absorptionsbanden auf, die berücksichtigt werden müssen [7]. Um dies zu untersuchen, wurde ein Hochdruckprüfstand konzipiert, der Drücke bis zu 900 bar und definierte Schadstoffkonzentrationen im (sub-)ppm-Bereich einstellen kann.

### Grundlagen

In [8] und [9] wurde bereits ein Messsystem entwickelt, das die Qualität von Schmierölen untersucht. Auch dieses System basiert auf NDIR-Absorption und soll nun auf die Wasserstoffqualitätsüberwachung übertragen werden. Obwohl die Grenzwerte für die Verunreinigungen im (sub-)ppm-Bereich liegen, können durch den hohen Druck, der z.B. in  $H_2$ -Tankstellen vorliegt, bereits mit einer Küvettenlänge von weniger als 1 m die erforderlichen Nachweisgrenzen erzielt werden.

Abbildung 3 zeigt eine Prinzipskizze des NDIR-Messsystems. Die IR-Quelle sendet Energie durch die IR-durchlässigen Fenster und die Gasküvette hindurch. Innerhalb der Küvette befindet sich das zu untersuchende Gasgemisch. Die absorbierenden Gasmoleküle nehmen Energie bei bestimmten Wellenlängen auf. Die nicht absorbierte Strahlung erreicht den IR-Detektor, wodurch die Transmission bestimmt wird. Durch passende statische oder auch variable Filter kann ein eingeschränkter Wellenzahlbereich betrachtet werden und einem bestimmten Gasmolekül zugeordnet werden. Je mehr Strahlung absorbiert wird, desto höher ist die jeweilige Konzentration. Üblicherweise können nicht alle Gasmoleküle erfasst werden, sondern nur solche, die ein permanentes oder induziertes Dipolmoment aufweisen und somit von der IR-Strahlung zu Schwingungen angeregt werden können.

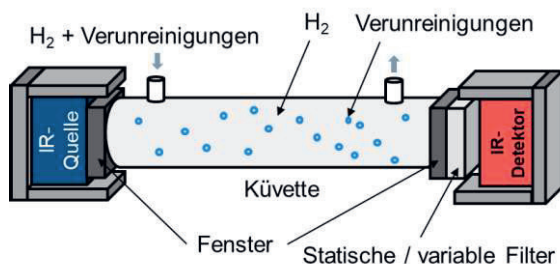


Abb. 3: Prinzipskizze des NDIR-Messsystems zur  $H_2$ -Qualitätsüberwachung [7].

Wasserstoff und Stickstoff sind homonukleare Moleküle und unter Normalbedingungen, d.h. bei Umgebungsdruck und Normaltemperatur, nicht IR-aktiv. Durch eine Druckerhöhung steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit von Stoßvorgängen, durch die kurzzeitig ein Dipol

induziert und letztendlich eine IR-Absorption angeregt wird. Die IR-Aktivität von  $H_2$  wurde bisher bis zu einem Druck von maximal 65 bar untersucht [7]. Für höhere Drücke finden sich auch in der Literatur keine Messergebnisse.

IR-Absorptionsspektren bestehen eigentlich aus einzelnen diskreten Peaks, da die einzelnen Molekülschwingungen nur durch ganz bestimmte Energien angeregt werden können. Neben der Schwingungsquantenzahl ändert sich auch die Rotationsquantenzahl, so dass sich die Absorptionsspektren aus einer Vielzahl eng zusammenliegender Peaks zusammensetzen, die jeweils eine sehr geringe Peakbreite besitzen.

Die Intensitätsverteilung um eine bestimmte Wellenzahl lässt sich durch Höhe, Breite, Form sowie eingeschlossene Fläche (Integral der Absorbanz über Wellenzahl) der einzelnen Linien charakterisieren. Zur Beschreibung wird insbesondere die Halbwertsbreite, d.h. die Breite der Linie bei halbem Maximum, als Beschreibungsmerkmal verwendet. Mit steigendem Druck erhöht sich die Halbwertsbreite. Dieser Effekt wird als Druckverbreiterung  $\Delta\nu_c$  beschrieben, die proportional zum Druck ist. Ein weiterer Effekt ist die Druckverschiebung  $\Delta\nu_0$ . Die Lage des Intensitätsmaximums der einzelnen Peaks verschiebt sich ebenso mit dem Druck. In Abbildung 4 sind beide Effekte dargestellt. Um eine genaue Identifikation und Quantifizierung von Verunreinigungen zu ermöglichen, müssen daher Referenzspektren bei hohen Drücken aufgenommen werden.

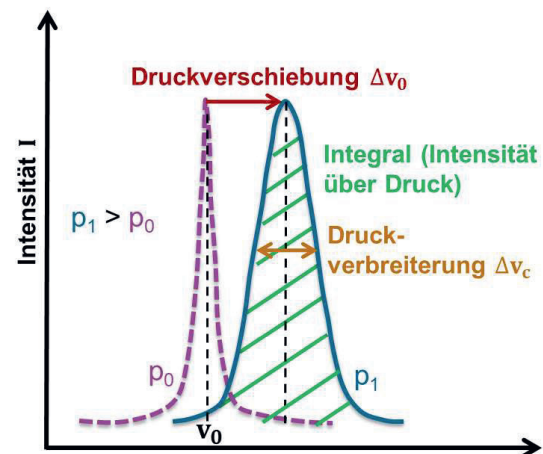


Abb. 4: Druckverbreiterung und Druckverschiebung bei erhöhtem Druck  $p_1$  nach [10].

### Messaufbau des Hochdruckprüfstands

Der Hochdruckprüfstand, siehe Abbildung 6, ist so konzipiert, dass zunächst der komplette Aufbau mit Argon gespült wird. Hierdurch werden Umgebungsluft bzw. andere Verun-

reinigungen entfernt. Danach wird  $H_2$  mit definierten Verunreinigungen in die Hochdruckkuvette eingebracht. Hierzu wird die Kuvette mit einem Prüfgas mit der gewünschten Verunreinigung auf einen definierten Druck, z. B. 9 bar, befüllt. Die im Prüfgas vorliegende Konzentration ist dabei typisch 100-mal so hoch wie der Grenzwert der Verunreinigung gemäß Norm. Anschließend wird die Kuvette mit einer zweiten Gasleitung mit reinem  $H_2$  auf den gewünschten Enddruck von z. B. 900 bar gebracht und dabei gleichzeitig die Verunreinigung verdünnt. Hierzu wird ein Druckverstärker (GPS 144, Firma Hydratron) verwendet. Die Hochdruckkuvette mit einer optischen Weglänge von 4 cm und einem Gasvolumen von 10 ml wird in ein hochauflösendes FTIR-Spektrometer (Vertex 80v, Bruker) eingebracht. Die an beiden Enden der Kuvette angebrachten IR-transparenten Germanium-Fenster sind 2 mm dick. Die Fenster sind im Wellenlängenbereich zwischen 1,85 bis 23  $\mu m$  transparent und decken damit den IR-Spektralbereich der meisten der in der SAE-Norm genannten Verunreinigungen ab. Die Germanium-Fenster haben ein Bruchmodul von 110 MPa und sind in der Kuvette so eingebaut, dass diese einem maximalen Druck von über 900 bar standhält. Zusätzlich ist an der Kuvette ein Temperatursensor (PT100) angebracht, um Temperatureinflüsse erfassen und später kompensieren zu können.

Am Ausgang der Kuvette befinden sich zwei Drucksensoren für Maximaldrücke bis 1000 bar bzw. 16 bar. Der Hochdrucksensor misst dauerhaft, der 16 bar Sensor wird über zwei Ventile (V3, V4) zur genauen Messung kleinerer Drücke zugeschaltet. Am Ende des

Leitungssystem befindet sich schließlich eine kaskadierte Ventilschaltung (V6, V7) mit der ein definiertes Volumen aus der Kuvette abgelassen werden kann, um den Druck schrittweise zu verringern.



Abb. 5: Hochdruckkuvette mit Germanium-Fenstern. Links Seitenansicht, rechts Frontalansicht.

Für Messungen, bei denen keine Verdünnung vorgesehen ist, z. B. bei reinem  $H_2$  oder  $N_2$  bzw. bei höheren Konzentrationen, kann die Prüfgasflasche direkt am Druckverstärker angeschlossen und die zweite Linie mit V1 abgeriegelt werden. Der Druckverstärker befüllt auf diese Weise die Küvette und bringt das Gasgemisch auf hohen Druck, ohne dass sich die Konzentrationen ändern. Die eingesetzten  $H_2$ -Prüfgasgemische weisen eine ca. 100-mal höhere Konzentration der Verunreinigungen im Vergleich zum Grenzwert gemäß SAE-Norm auf. Damit können die Absorptionspeaks zunächst eindeutig den Verunreinigungen zugeordnet werden. Abbildung 7 zeigt einige Fotos des Prüfstands.

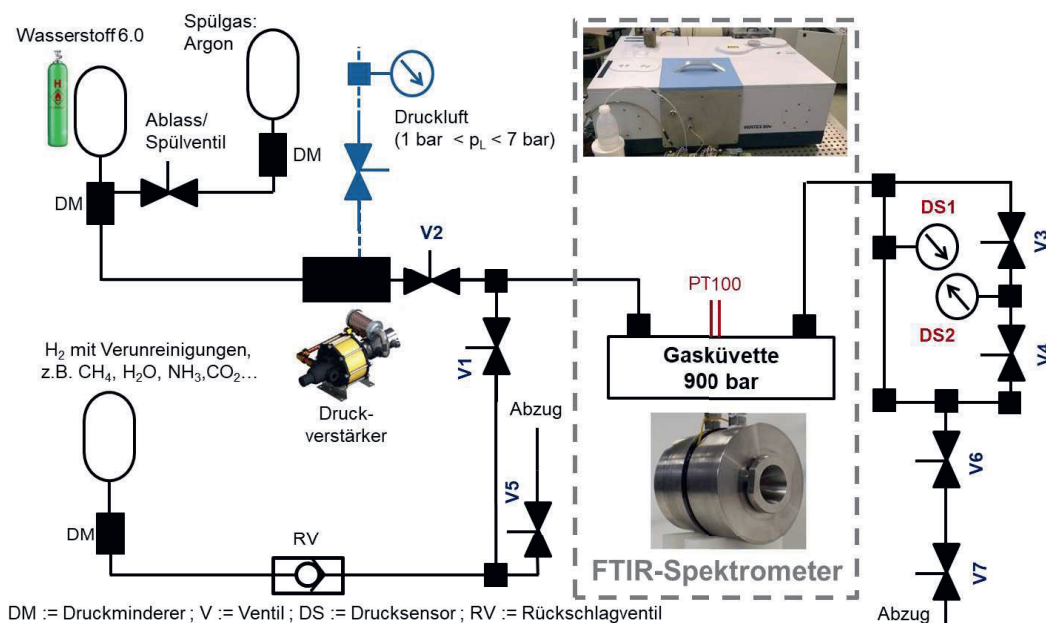


Abb. 6: Prinzipskizze des Hochdruckprüfstands.



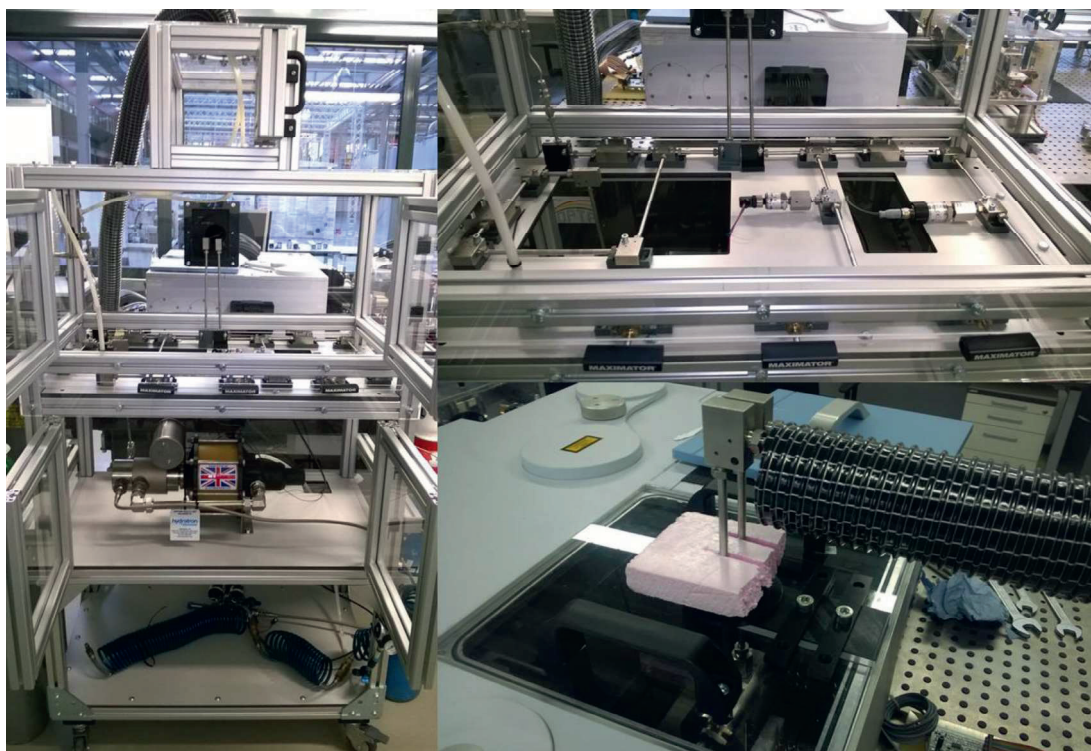


Abb. 7: Hochdruckprüfstand, links: Gesamtansicht, rechts oben: Ventilgruppe, rechts unten: Verbindung zum FTIR-Spektrometer.

### Messergebnisse und Analyse für Stickstoff

Untersucht wurde zunächst Stickstoff 6.0, um die IR-Aktivität bei hohem Druck zu prüfen sowie um Verunreinigungen zu charakterisieren. Dabei wurde das Gas mit Hilfe des Hochdruckprüfstands in die Küvette gebracht und mit dem FTIR-Spektrometer untersucht. Laut Datenblatt können die in Tabelle 2 aufgeführten Verunreinigungen auftreten.

Tab. 2: Datenblatt für Stickstoff 6.0 [11]

Bestandteil	Konzentration
CH <sub>4</sub> (Methan)	≤ 0,05 ppm
CO <sub>2</sub> (Kohlendioxid)	≤ 0,05 ppm
H <sub>2</sub> O (Wasser)	≤ 0,50 ppm
O <sub>2</sub> (Sauerstoff)	≤ 0,20 ppm
CO (Kohlenmonoxid)	≤ 0,05 ppm
H <sub>2</sub> (Wasserstoff)	≤ 0,10 ppm

Die Küvette wurde zunächst mit Stickstoff 6.0 bis zu einem Druck von 710 bar befüllt und dann das Absorptionsspektrum gemessen. Anschließend wird wiederholt etwas Druck aus der Küvette abgelassen und wieder gemessen, bis die Küvette schließlich wieder drucklos ist. Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 8 bis 10 dargestellt.

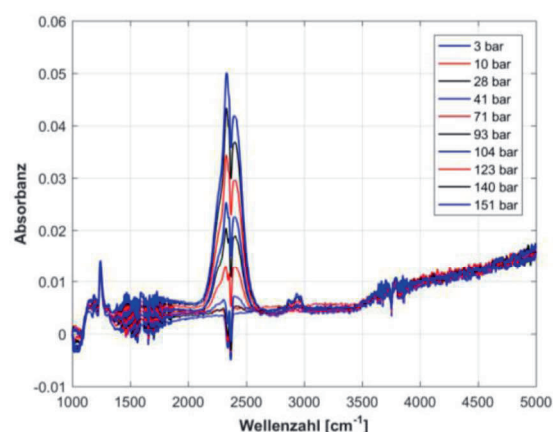


Abb. 8: N<sub>2</sub>-Absorptionsspektren (3 - 151 bar).

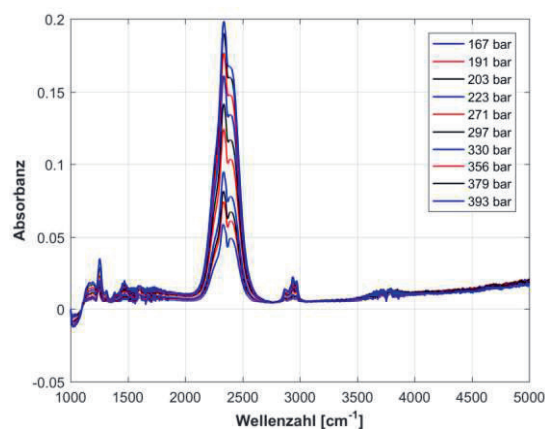


Abb. 9: N<sub>2</sub>-Absorptionssp. (167 - 393 bar).

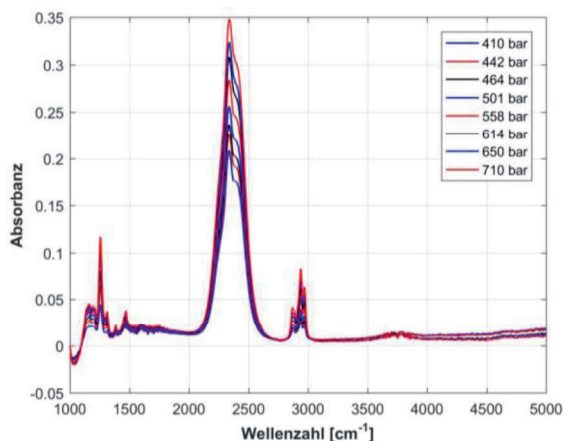


Abb. 10: Stickstoff 6.0-Absorptionsspektren im Druckbereich von 410 bis 710 bar.

Für die Zuordnung der Banden wurden die Datenbanken HITRAN on the Web [12], die IR-Spektrensammlung von Gasmet Ansyco [13] sowie das NIST Chemistry WebBook [14] verwendet. Bei der Analyse der Kurven lässt sich feststellen, dass sich bereits ab ca. 41 bar ein leichter Peak im Wellenzahlbereich  $\sim 2330 \text{ cm}^{-1}$  zeigt. Nach [15] handelt es sich um  $\text{N}_2$ . Dies bedeutet, dass auch Stickstoff bei höherem Druck IR-aktiv wird. Zudem sind in den Wellenzahlbereichen zwischen  $\sim 1630 \text{ cm}^{-1}$  und  $\sim 1830 \text{ cm}^{-1}$  sowie zwischen  $\sim 3500 \text{ cm}^{-1}$  und  $\sim 3900 \text{ cm}^{-1}$  Absorptionsbanden zu erkennen, die die Wasser-Bande darstellen. Die Banden zwischen  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$  und  $\sim 1300 \text{ cm}^{-1}$  sowie  $\sim 2840 \text{ cm}^{-1}$  und  $\sim 3000 \text{ cm}^{-1}$  sind den Kohlenwasserstoffen zu zuordnen. Das Integral der Absorbance für die  $\text{N}_2$ -Bande (Abb. 11) zeigt zu Beginn ein anwachsendes Verhalten und geht bei einem Druck von 100 bar in ein lineares Verhalten über. Ähnlich zeigt sich dies auch bei der Halbwertsbreite (Abb. 12). Das gleiche Verhalten zeigt sich auch für die Kohlenwasserstoff- und die  $\text{H}_2\text{O}$ -Banden.

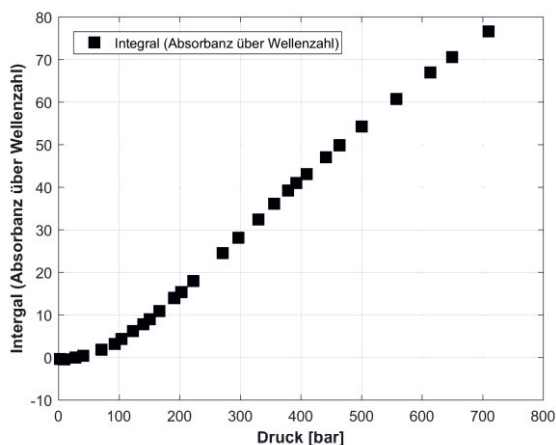


Abb. 11: Integral der Absorbance für  $\text{N}_2$  über den Druck von 0 bis 710 bar.

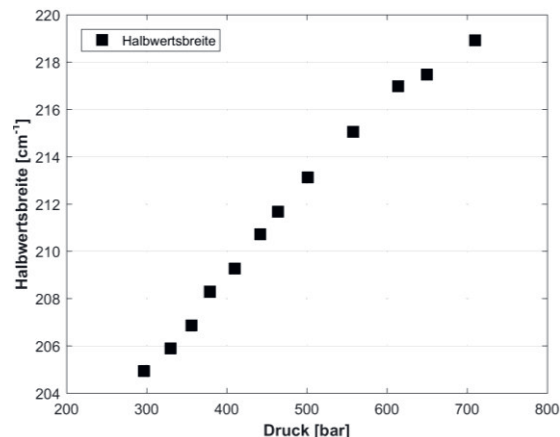


Abb. 12: Halbwertsbreite der  $\text{N}_2$ -Bande über den Druck von 300 bis 710 bar.

### Messergebnisse und Analyse für Wasserstoff

Anschließend wurden Messungen mit Wasserstoff 6.0 mit 10 ppm CO bis zu einem maximalen Druck von 555 bar durchgeführt. Vor den Messungen wurde das Rohrleitungssystem mit Stickstoff 6.0 gespült. Danach wurde das System mehrfach mit Wasserstoff 6.0 mit 10 ppm CO bis zu einem Druck von 50 bar befüllt und wieder auf einen Druck von rund 3 bar abgelassen, um weitere Verunreinigungen zu vermeiden. Der Druck wurde danach schrittweise bis zu einem Druck von 555 bar hochgefahren. Bei verschiedenen Drücken wurde dann eine FTIR-Messung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 13 und 14 dargestellt.

Dabei ist zu erkennen, dass es zwei markante Wasserstoffbanden gibt. Wie bereits in [7] gezeigt, befindet sich eine breite Absorptionsbande in einem Wellenzahlbereich von  $\sim 3550 \text{ cm}^{-1}$  bis  $\sim 5000 \text{ cm}^{-1}$ . Diese  $\text{H}_2$ -Bande tritt bei einem Druck von 33 bar zum ersten Mal deutlich auf. Dies deckt sich auch mit [15]. Eine weitere  $\text{H}_2$ -Bande beginnt unterhalb von  $\sim 2000 \text{ cm}^{-1}$  und geht über  $1000 \text{ cm}^{-1}$  hinaus. Diese zweite  $\text{H}_2$ -Bande tritt erst bei einem Druck von 63 bar deutlich auf und wird auch bei steigendem Druck in Ihrer Intensität nicht so stark wie die erste Bande im Bereich  $\sim 3550 \text{ cm}^{-1}$  bis  $\sim 5000 \text{ cm}^{-1}$ .

Positiv ist zu bewerten, dass die zwei relativ breiten  $\text{H}_2$ -Banden die Absorptionsbanden von Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Ammoniak nicht überdecken, so dass diese Verunreinigungen mit dem Sensorsystem empfindlich gemessen werden können. Ebenso wie bereits bei den Stickstoffmessungen befinden sich auch zwei leichte Wasserbanden im gemessenen Spektrum.

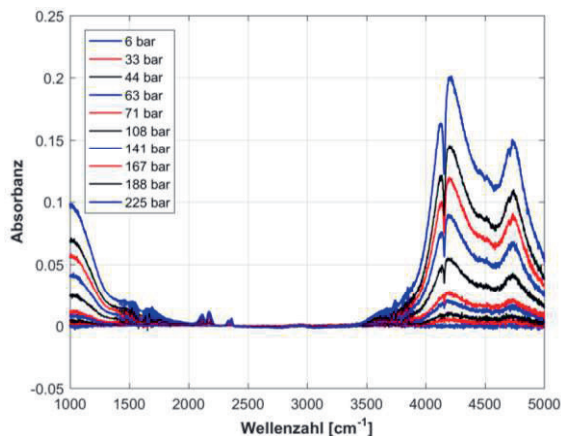


Abb. 13: Absorptionsspektrum von Wasserstoff mit 10 ppm CO im Druckbereich von 6 bis 225 bar.

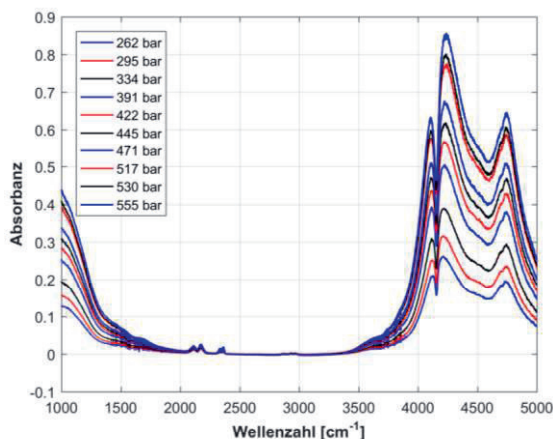


Abb. 14: Absorptionsspektrum von Wasserstoff mit 10 ppm CO im Druckbereich von 262 bis 555 bar.

Der CO-Peak ist im Bereich zwischen  $2050\text{ cm}^{-1}$  und  $2225\text{ cm}^{-1}$  zu erkennen und in Abbildung 15 dargestellt. Bei der Betrachtung der maximalen Intensität der CO-Banden aufgetragen über den Druck, zeigt sich, dass auch hier eine Proportionalität vorliegt.

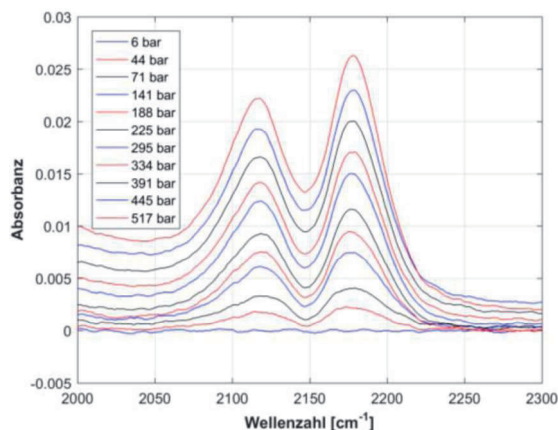


Abb. 15: CO-Bande für  $6\text{ bar} \leq p \leq 517\text{ bar}$ .

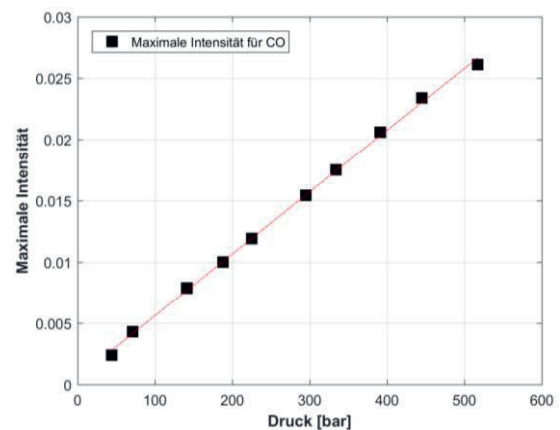


Abb. 16: Maximale Intensität der CO-Bande für Drücke von 44 bis 517 bar.

### Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass Verunreinigungen in Stickstoff und Wasserstoff mit einem Hochdruckprüfstand in einem FTIR-Spektrometer charakterisiert werden können.

Im Versuch wurde Stickstoff 6.0 auf einen Maximaldruck von 710 bar gebracht, der anschließend schrittweise heruntergefahren wurde, um die Absorptionsspektren bei verschiedenen Drücken zu bestimmen. Dabei zeigt sich, dass im Wellenzahlbereich von  $2150\text{ cm}^{-1}$  bis  $2540\text{ cm}^{-1}$  eine breite, druckinduzierte IR-Bande von Stickstoff ersichtlich ist. Diese ist bei  $\sim 41\text{ bar}$  zum ersten Mal zu erkennen und steigt mit zunehmendem Druck an. Auch zwei Kohlenwasserstoff-Banden sind in den Diagrammen zu erkennen. Sichtbar sind diese ab ca. 141 bar und steigen ebenfalls mit zunehmendem Druck weiter an. Die Intensität sowie die Halbwertsbreite dieser Banden steigen proportional zum Druck.

Bei den Wasserstoffmessungen wurden zwei intensive und spektral sehr breite  $\text{H}_2$ -Banden festgestellt. Diese überdecken allerdings keine Banden, die relevanten Verunreinigungen wie CO,  $\text{CH}_4$  oder  $\text{CO}_2$  zuzuordnen sind, so dass die angestrebte Funktion des IR-Messsystems nicht gestört wird. Insgesamt zeigt sich für alle Verunreinigungen, dass die Intensität, d.h. das Integral der Absorbanz, sowie die Halbwertsbreite der Banden ab einem gewissen Druck proportional mit dem Druck ansteigen.

Im nächsten Schritt sollen weitere Verunreinigungen untersucht werden. Zudem soll der Druck noch weiter gesteigert werden, um den Maximaldruck von bis zu 900 bar auszureizen. Damit soll untersucht werden, ob sich die Banden auch bei höheren Drücken weiterhin proportional zum Druck verhalten. Zudem sollen Konzentrationen entsprechend der in der SAE-Norm genannten Grenzwerte untersucht werden.



## Danksagung

Die zugrundeliegenden Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger PTJ im Rahmen des Projekts HAIMa (H<sub>2</sub>- und Kationen-Kontamination: Alterungseffekte, Material und Sensorentwicklung; Teilvorhaben: Entwicklung und Erprobung von Messprinzipien zur H<sub>2</sub>-Qualitätsüberwachung) gefördert.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Eliseo Pignanelli, der die Forschungsarbeiten für dieses Projekt maßgeblich vorbereitet hat.

Materials, Devices, and Applications IX,  
75820M (17 February 2010); doi:  
10.1117/12.842129

## Literaturnachweis

- [1] Life Cycle Assessment Report Toyota, 2015.
- [2] H.-W. Sinn, Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution, *European Economic Review* 99, 2017.
- [3] <https://h2.live/>, Stand 22.04.2019.
- [4] SAE J 2719: Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles.
- [5] Das H<sub>2</sub>-Messsystem zur Outdoormessung in Laborqualität, Produktflyer, Emcel GmbH, Hannover Messe 2019.
- [6] M. Schott, E. Pignanelli, S. Gratz-Kelly, A. Schütze: Modellierung und Simulation eines IR-Messsystems zur Optimierung der Strahlungsintensität für die Wasserstoffqualitätsüberwachung, ITG-Fachbericht 281: Sensoren und Messsysteme, VDE-Verlag Berlin (2018), S. 315-318.
- [7] M. Schott, E. Pignanelli, S. Gratz-Kelly, A. Schütze: Modulares IR-Messsystem zur Überwachung der Wasserstoffqualität für Brennstoffzellenfahrzeuge, Tagungsband 13. Dresdner Sensor-Symposium (2017), S. 34-39.
- [8] T. Bley, E. Pignanelli, A. Schütze: COPS - Combined Oil quality and Particle measurement System, *Proceedings ICST 2012 – The Sixth International Conference on Sensing Technology*, Kolkata, India, December 18-21, 2012; doi: 10.1109/ICSensT.2012.6461742
- [9] E. Pignanelli, T. Bley, A. Schütze: Modulares Condition Monitoring System zur Überwachung von Fluidqualität und Partikelkontamination am Beispiel von Öl, 11. Dresdner Sensor Symposium, Dresden, 9.-11. Dezember 2013; doi: 10.5162/11dss2013/E8
- [10] A. T. Brysch, Laser-Emissionsspektrometrie für die Partikelanalyse von Prozessgasen bei der Roheisenerzeugung, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 2004.
- [11] Produktdatenblatt für Stickstoff 6.0, Nippon Gases.
- [12] <http://hitran.iao.ru/bands/simlaunch?mol=5>
- [13] <http://www.ansyco.de/technologie/ir-spektren>
- [14] <https://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser/>
- [15] J. H. Odehner, D. A. Romanov, R. J. Levis, Filament-based stimulated Raman spectroscopy, *Proc. SPIE* 7582, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: