Fraunhofer IPM

Leitprojekt TransHyDE

TransHyDE-Projekt FP2: Sichere Infrastruktur

Gassensoren zur Erkennung von Leckagen und H_2-Gas-Qualität „TransHyDE-Sens“

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Langfassung

Stand:	30.09.2025
Einreichungsdatum (TIB):	30.09.2025
Partner:	Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Autorin:	Dr. Carolin Pannek
Fördertitel:	Verbundvorhaben TransHyDE-Sichere Infrastruktur
Förderkennzeichen:	03HY202G
Disclaimer:	*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.*

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Finanziert von der Europäischen Union NextGenerationEU

Gefördert durch:

Leitprojekt TransHyDE

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Finanziert von der Europäischen Union NextGenerationEU

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis ... 3
Abbildungsverzeichnis ... 4
Tabellenverzeichnis ... 5
I. Ursprüngliche Aufgabenstellung ... 6
II. Vormaliger Stand des Wissens ... 6
III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten ... 7
III.1 HN_3-Ferndetektion mittels Laserspektroskopie ... 7
III.1.1 Messprinzip / Sensoraufbau ... 7
III.1.2 Erzielte Ergebnisse NH_3-Ferndetektion ... 8
III.2 Ultraschallsensorik ... 11
III.2.1 Messprinzip / Sensoraufbau ... 11
III.2.2 Erzielte Ergebnisse »Ultraschallsensorik« ... 12
III.3 Farbumschlagssensorik ... 14
III.3.1 Messprinzip / Sensoraufbau ... 14
III.3.2 Materialentwicklung ... 15
III.3.3 Erzielte Ergebnisse »Farbumschlagssensorik« ... 16
III.4 Sensorfusion: Wärmeleitfähigkeits- und Ultraschallsensor ... 17
III.4.1 Anforderungen ... 17
III.4.2 Messprinzip / Sensoraufbau ... 18
III.4.3 Modellbildung ... 19
III.4.4 Erzielte Ergebnisse »Sensorfusion Ultraschall und Wärmeleitfähigkeit« ... 23
III.5 Entwicklung eines selektiven Raman-basierten Wasserstoffsensors ... 25
III.5.1 Messprinzip / Sensoraufbau ... 25
III.5.2 Erzielte Ergebnisse »Raman-Wasserstoffsensor« ... 26
IV. Verwendung der Zuwendung ... 28
IV.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 28
IV.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten ... 28
V. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans ... 28
VI. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit ... 28
VII. Erfolgte Veröffentlichungen ... 29
VIII. Literaturverzeichnis ... 30

Abkürzungsverzeichnis

ATEX	ATmosphères EXplosives
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
UEG	untere Explosionsgrenze
UV/VIS	ultra-violett / visible
WMS	Wavelength Modulation Spectroscopy
WO_3	Wolframtrioxid

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Foto des entwickelten NH_3-Sensors. 8
Abbildung 2: Distanzmessung. 8
Abbildung 3: Lecksimulation. 9
Abbildung 4: Reflexionsstudie und Übersicht über unterschiedliche Rückstrahloberflächen. 10
Abbildung 5: H_2-Ultraschallsensor von Fraunhofer IPM und Schematische Darstellung der Zellanordnung. 12
Abbildung 6: Reaktion des Ultraschallsensors auf unterschiedliche H2-Konzentrationen zwischen. 12
Abbildung 7: Untersuchung von CO_2 und Feuchte auf das Messsignal. 13
Abbildung 8: Durchführung von Feldmessungen bei der Firma rma. 13
Abbildung 9: Pumpspray zur Abscheidung des gassensitiven Materials. 14
Abbildung 10: Bestimmung von Wasserstoff anhand der Farbeigenschaft eines gassensitiven Materials. 15
Abbildung 11: Wolframoxid-Synthese für einen kolorimetrischen Nachweis von Wasserstoff. 15
Abbildung 12: Homogenisierung des gassensitiven Materials in der Kugelmühle. 16
Abbildung 13: Messung der Farbänderung des Indikators mit Hilfe der UV/VIS-Spektroskopie. 16
Abbildung 14: Aufnahme der offenen Gasmesszelle mit den beiden Sensoren. 18
Abbildung 15: Grafische Oberfläch der Messsoftware. 19
Abbildung 16: Sensorreaktion des Ultraschallsensors und des Wärmeleitfähigkeitssensors. 20
Abbildung 17: Heatmap der Korrelationsmatrix. 21
Abbildung 18: Die verwendete MLP-Architektur zur Schätzung der Wasserstoffkonzentration. 22
Abbildung 19: Sensorreaktionen auf den Trainingsdatensatz zur Modellevaluierung. 22
Abbildung 20: Ergebnisse der Temperatur- und Feuchtekompensation. 23
Abbildung 21: Messprinzip und Realisierung des Wasserstoff-Raman-Aufbaus. 26
Abbildung 22: Typische Messergebnisse des Raman-Wasserstoff-Sensors. 27
Abbildung 23: Charakterisierung des Raman-Messsystems. 27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an den Detektor *17*
Tabelle 2: Ein Viertel des Trainingsdatensatzes am Beispiel für 25 % relative Feuchte. *20*
Tabelle 3: Gültigkeitsbereich des entwickelten Modells. *24*
Tabelle 4: Messbedingungen des Raman-Sensors *26*
Tabelle 5: Erfolgte Veröffentlichungen *29*

I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

In allen Bereichen der Wasserstoffwirtschaft, von der Erzeugung, über die Speicherung und den Transport bis hin zur Anwendung muss ein sicherer Betrieb gewährleistet sein. Dies gilt auch für die Transformation von vorhandener Erdgas- zu einer reinen Wasserstoff-Infrastruktur (Pannek et al. 2024). Die Gassensorik spielt dabei eine zentrale Rolle: Sensoren müssen Leckagen von Wasserstoff (H_2) und des Wasserstoffträgergases Ammoniak (NH_3) sicher erkennen und eine schnelle Lokalisierung ermöglichen. Darüber hinaus müssen unabsichtlich oder absichtlich im H_2 vorhandene weitere Gaskomponenten zuverlässig bestimmt werden.

Das Teilvorhaben von Fraunhofer IPM im Rahmen von TransHyDE-Sens zielte darauf ab, sowohl kostengünstige und zuverlässige Sensoren für die kontinuierliche Überwachung von H_2 in der Atmosphäre zu entwickeln (Stichwort Leckagendetektion) als auch ein Messsystem zur Bestimmung von Verunreinigungen in reinem Wasserstoff.

Zusammenfassung der ursprünglich geplanten Inhalte von Fraunhofer IPM:

1. Evaluierung unterschiedlicher kostengünstiger Messprinzipien zur kontinuierlichen Überwachung der H_2-Konzentration und von H_2-Leckagen. Entwicklung eines selbsttestfähigen Sensors durch die Kombination von zwei unabhängigen Messkonzepten (Stichwort „Funktionale Sicherheit“).
2. Entwicklung eines kostengünstigen Raman-basierten optischen Wasserstoffsensors zur quantitativen und querempfindlichkeitsfreien Bestimmung geringer Wasserstoff. Die Arbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit dem Partner Endress+Hauser durchgeführt.
3. Berührungslose, bildgebende H_2- und NH_3-Detektion mittels Laserspektroskopie zur Leckageerkennung.
4. Sensorik zur Überprüfung der Reinheit von H_2, kontinuierliche Bestimmung der Spurengase H_2O, NH_3, CO mit kompakten Messsystemen. Unterstützende Arbeiten für den Partner Endress+Hauser.
5. Entwicklung von farbumschlagsbasierten Sensoren für H_2 und/oder NH_3. Das Sensormaterial soll mit bloßem Auge einen sichtbaren Farbwechsel bei Kontakt mit dem Zielgas anzeigen.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Obwohl es prinzipiell vor 5 Jahren eine Reihe möglicher Sensorik-Lösungen für den Nachweis und die Bestimmung der Konzentration und der Reinheit von Wasserstoff gab, finden sich bis heute auf dem Markt sehr wenige Produkte, die die strengen Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit vollständig erfüllen. Die kommerziell verfügbaren H_2- und auch NH_3-Sensorsysteme weisen bis heute technische Kompromisse auf, teilweise mit stark verringerter Lebensdauer, sodass die Anforderungen nur durch spezifische Anpassungen an jede einzelne Anwendung eingehalten werden können. Dieser hohe Aufwand kann bei höheren Stückzahlen nicht mehr geleistet werden. Zudem übersteigt der Preis dieser Lösungen deutlich die Vorgaben des Marktes für die serienmäßige Verwendung.

Zu Projektbeginn hatte das Fraunhofer IPM bereits mehrjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Gaswarnsensorik, auch für Wasserstoffanwendungen. Es konnte auf die Erfahrung im Bereich der optischen Ferndetektion von Methan zurückgegriffen werden. Miniaturisierte Wärmeleitfähigkeitssensoren wurden bereits in Vorgängerprojekten prozessiert. Farbumschlagssensoren bilden bereits seit 10 Jahren einen festen Entwicklungsschwerpunkt, sodass bei der Charakterisierung und Handhabung neuer gasochromer Materialien Erfahrung vorhanden ist. Neu zu Projektbeginn war das Thema Ultraschallsensorik. Durch die Verwendung des photoakustischen Effekts zur verlustfreien Erzeugung der Ultraschallwelle konnte auch hier auf langjährige Erfahrung in der Photoakustik zurückgegriffen werden, auch wenn diese selbst zur Detektion von Wasserstoff ungeeignet ist.

III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

In diesem Kapitel sind die von Fraunhofer IPM im Projekt durchgeführten Arbeiten ausführlich dargestellt. Der Übersicht halber wurden die erzielten Ergebnisse nicht in separaten Kapiteln, sondern direkt in den Abschnitt der jeweiligen Sensoren behandelt.

III.1 HN_3-Ferndetektion mittels Laserspektroskopie

Im Rahmen von TransHyDE wurde ein tragbares Laserabsorptionsspektrometer zur Ferndetektion von Ammoniak (NH_3) entwickelt, mit dem Ziel die Arbeitssicherheit beim Umgang mit NH_3 zu erhöhen. Dazu zählt insbesondere die frühzeitige Erkennung von Leckagen in Transport- und Speicherinfrastrukturen, ohne in direkten Kontakt mit der potenziellen Leckstelle zu kommen. Das Messsystem basiert auf der *Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy* (TDLAS) und ermöglicht berührungslose Messungen über Distanzen von bis zu 60 Metern. Es ist kompakt (219×70×80 mm^3), leicht (800 g) und erzielt eine Nachweisgrenze von <1 ppm·m. Die Echtzeitmessung mit 10 Hz erlaubt eine schnelle Lokalisierung von Leckagen, auch bei Bewegung und im Außeneinsatz. Für eine präzise Konzentrationsbestimmung ist eine Kalibrierung erforderlich.

III.1.1 Messprinzip / Sensoraufbau

Das Messsystem nutzt die *Wavelength Modulation Spectroscopy* (WMS) zur Detektion von NH_3 bei 1512 nm. Ein 10 mW Laser wird sinusförmig mit einer Frequenz von 6 kHz moduliert. Das rückgestreute Licht wird über eine Sammellinse eingefangen und mittels digitalem Lock-in-Verstärker analysiert. Die Konzentration wird als Säulenkonzentration (ppm·m) bestimmt. Eine Querschnittsdarstellung und ein Foto des Sensors sind in Abb. 1 dargestellt.

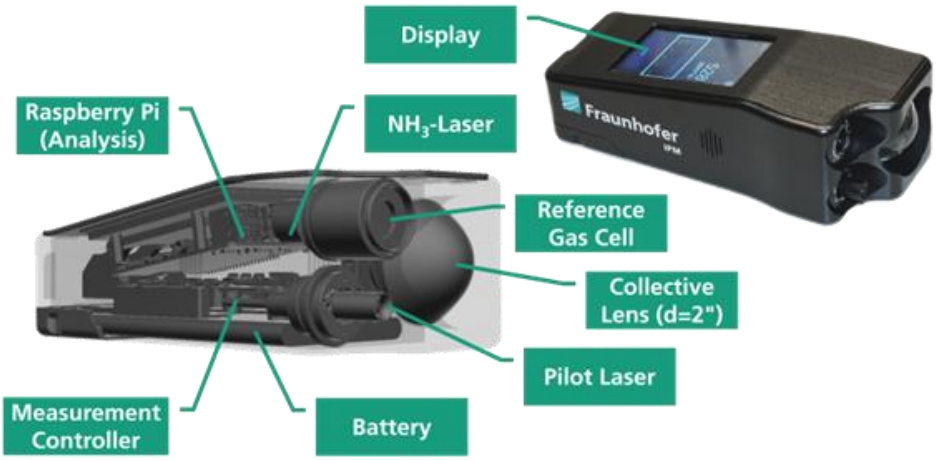

Abbildung 1: Foto des entwickelten NH_3-Sensors. Dieser besteht aus einem NH_3-Laser (10 mW @ 1512 nm), Pilotlaser zur Zielausrichtung, der Sammellinse (Ø 2"), der Referenzgaszelle und dem Detektor. Die Datenanalyse erfolgt auf einem Raspberry Pi, die NH_3-Konzentration wird auf einem Display angezeigt.

III.1.2 Erzielte Ergebnisse NH_3-Ferndetektion

Der Sensor wurde im Labor von Fraunhofer IPM ausführlich charakterisiert. Über Distanzmessungen konnte eine zuverlässige NH_3-Detektion bis zu einer Entfernung von 60 m nachgewiesen werden. Ab einer Entfernung von 60 m steigt das Rauschen so stark an, dass die Detektion nicht mehr zuverlässig möglich ist. Die Distanzmessung ist in Abb. 2 dargestellt. Neben der Bestimmung der Distanz ist die dynamische NH_3-Ferndetektion entscheidend. Dazu wurde der Sensor in Schwenkbewegungen aus einer Entfernung von 5 m über einen mit 1000 ppm NH_3 gefüllten Gasbeutel geführt. Die gemessene Gaskonzentration ist in Abb. 3 gezeigt.

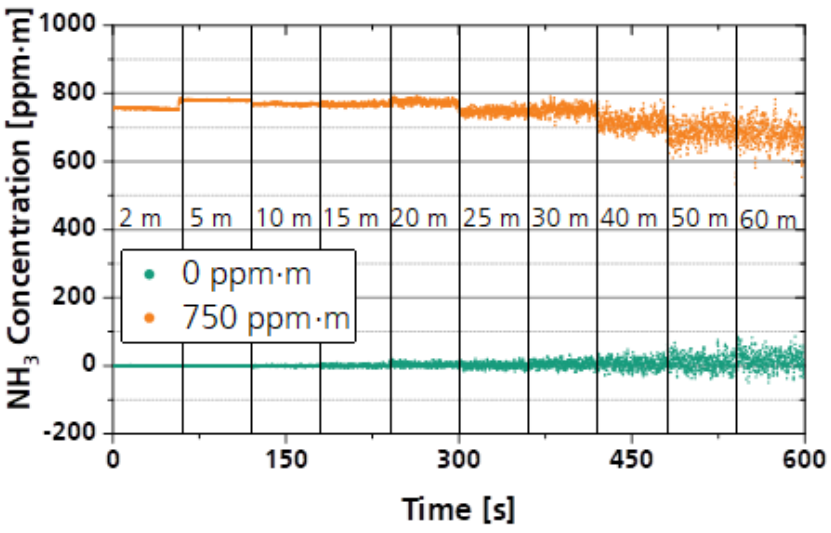

Abbildung 2: Distanzmessung: Erfolgreiche Detektion bis zu 60 m auf nicht-kooperativen Zielen (z. B. Holztür) mit und ohne Referenzgaszelle (0 bzw. 750 ppm·m Hintergrund).

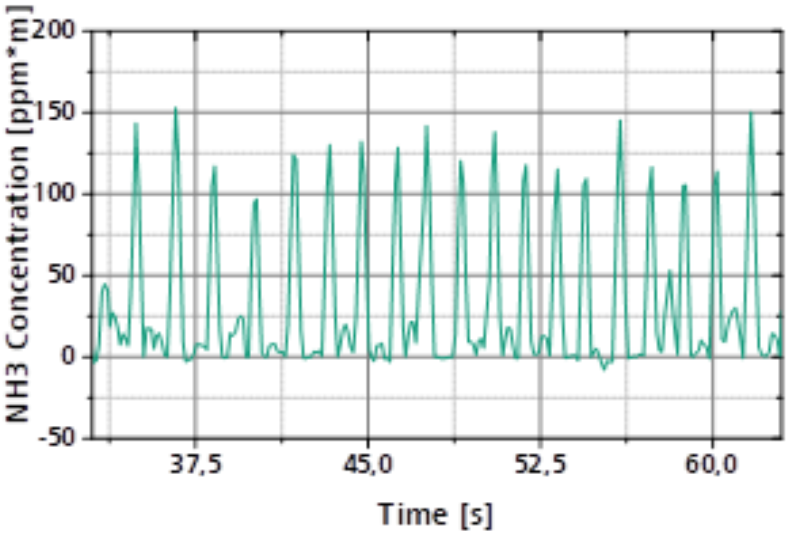

Abbildung 3: Lecksimulation: Manuelle Schwenkbewegung des Sensors über einen mit 1000 ppm NH_3 gefüllten Gasbeutel in einer Entfernung von 5 m. Es sind deutliche Konzentrationspeaks bei einer Messrate von 10 Hz messbar.

Im Labor wurde eine Reflexionsstudie zur Bestimmung des Einflusses der rückstrahlenden Oberfläche auf das Messsignal durchgeführt. In Abb. X4 sind unterschiedliche Rückstrahloberflächen (Aluminiumplatte, Edelstahlrohr, Kunststoff, Karton und Schrankwand) und deren Einfluss auf die Messung gezeigt. Die Reflexion an der Kunststoffoberfläche führt zu einem hohen Rauschen, was einem Messfehler von ~5 ppm·m entspricht. Die Fehler, die durch die Hintergrundmaterialien erzeugt werden, liegen bei ~0.2 ppm·m.

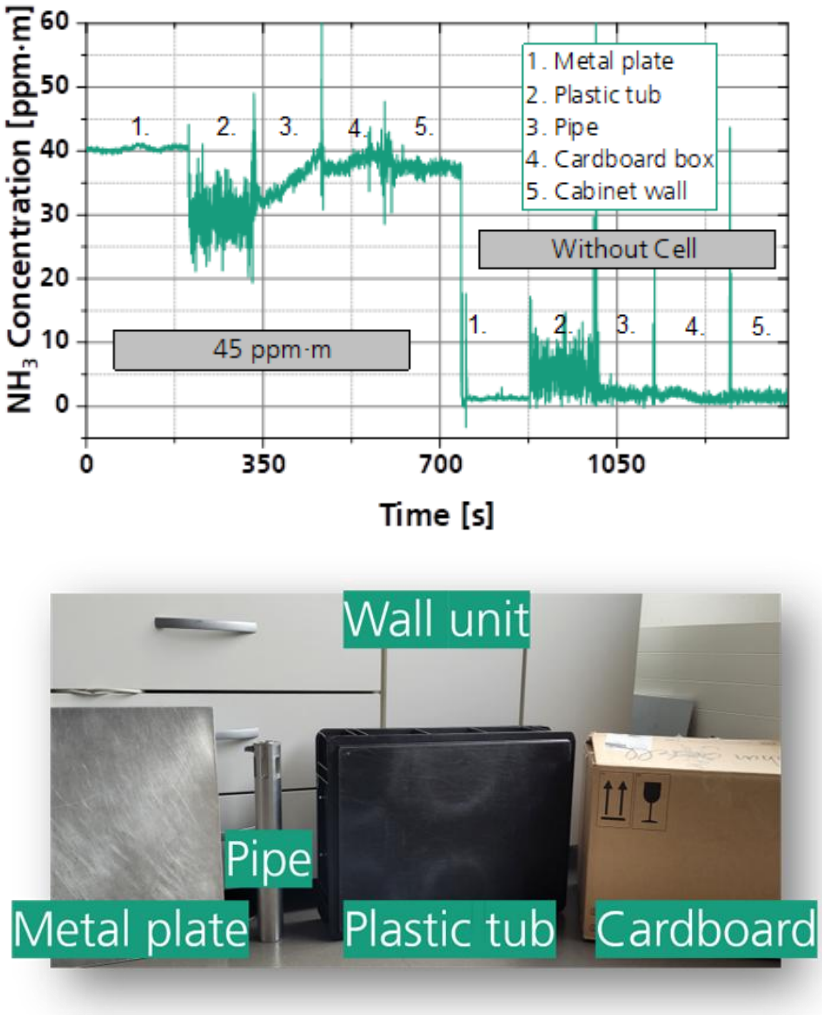

Abbildung 4: Oben: Reflexionsstudie: Aluminium und Metallrohr mit geringem Rauschen (~0.2 ppm·m), Kunststoff mit hohem Rauschen (~5 ppm·m). Unten: Übersicht über unterschiedliche Rückstrahloberflächen.

III.2 Ultraschallsensorik

Ultraschallsensoren sind Geräte, die Schallwellen mit einer Frequenz oberhalb des für den Menschen hörbaren Bereichs (normalerweise über 20 kHz) verwenden, um Entfernungen zu messen oder Objekte zu erfassen. Die Schallgeschwindigkeit von Wasserstoff beträgt 1280 m/s und unterscheidet sich damit erheblich von der Schallgeschwindigkeit in Luft (343 m/s bei 20 °C), im Gegensatz zu den meisten anderen Atmosphärengasen. Daher eignen sich Ultraschallsensoren zur Detektion von Wasserstoff. Bereits ein geringer Anteil Wasserstoff erhöht die Schallgeschwindigkeit merklich. Dies kann als quantitativer Messeffekt für die Bestimmung der Konzentration von Wasserstoff genutzt werden. Die Schallgeschwindigkeit kann entweder über ein Laufzeitverfahren oder über ein resonanzbasiertes Verfahren erfasst werden. Die Resonanzfrequenz eines akustischen Resonators ist zur Schallgeschwindigkeit proportional. Entsprechende probennehmende Messgeräte für Wasserstoff sind am Markt verfügbar. Darüber hinaus entsteht allgemein beim Ausströmen von Gas bei hohem Differenzdruck häufig ein charakteristischer Pfeifton im Ultraschallbereich, der zur Leckortung mit einem Mikrofon genutzt werden kann. Allerdings ist dieses Verfahren nur für größere Leckraten geeignet und versagt bei kleinen oder diffusiven Lecks. Beim Laufzeitverfahren befindet sich das zu messende Gas zwischen einem akustischen Sender und einem Empfänger. Je nach Wasserstoffkonzentration verzögert die Gasstrecke den Empfang des gesendeten Signals, was Rückschlüsse auf die Schallgeschwindigkeit erlaubt. Die Bestimmung der Verzögerung kann über die Gruppenlaufzeit eines gesendeten Schallpulses oder auch über die Phasenmessung eines Dauersignals erfolgen. Das resonanzbasierte Verfahren bestimmt die Schallgeschwindigkeit indirekt über die Verstimmung der Eigenmoden eines akustischen Resonators. Dabei befinden sich Schallsender und Schallempfänger in einem akustisch schwingfähigen Gasvolumen, wie beispielsweise einem geschlossenen Rohr. Über die akustische Anregung und die Messung der Schalldrucküberhöhung im Resonator lässt sich die Frequenz der Eigenmoden bestimmen. Diese Frequenzen hängen wiederum von der Schallgeschwindigkeit ab und erlauben so die Bestimmung der Wasserstoffkonzentration.

III.2.1 Messprinzip / Sensoraufbau

Abbildung 5 zeigt einen am Fraunhofer IPM entwickelten Ultraschallsensor. Dieser nutzt zur Erzeugung des Ultraschalls Licht (LED, $\lambda = 450$ nm), das von der Resonatorwand absorbiert und über den photoakustischen Effekt in Schallwellen umgewandelt wird. Die Schallerzeugung ist bei diesem Verfahren komplett frei von Transducer-Resonanzen und ermöglicht somit eine sehr genaue Bestimmung der Resonanzfrequenz im Resonator. Daneben wird auch das Gasvolumen wirksam von den elektronischen Komponenten getrennt, was Vorteile im Explosionsschutz bietet. Die Messdatenrate des Sensors beträgt etwa 1,1 Sekunden, was eine zeitnahe Erfassung von Veränderungen in der Umgebung ermöglicht. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt auf einer Microcontroller-Plattform. Zusätzlich sind außen an der Zelle Temperatursensoren angebracht. Die Abmessungen des Sensors sind kompakt und betragen 40x96x48 mm^3. Das aktive Element, die zylindrische Zelle zur Erzeugung der Radialmode hat die Maße 10x10x16 mm^3. Der Sensor arbeitet im Diffusionsmodus, wobei der Ein- und Austritt von Wasserstoff durch spezielle Löcher mit einem Durchmesser von 0,5 mm erfolgt. Der Stromverbrauch des Ultraschallsensors liegt bei etwa 0,5 Watt und kann über USB bereitgestellt werden.

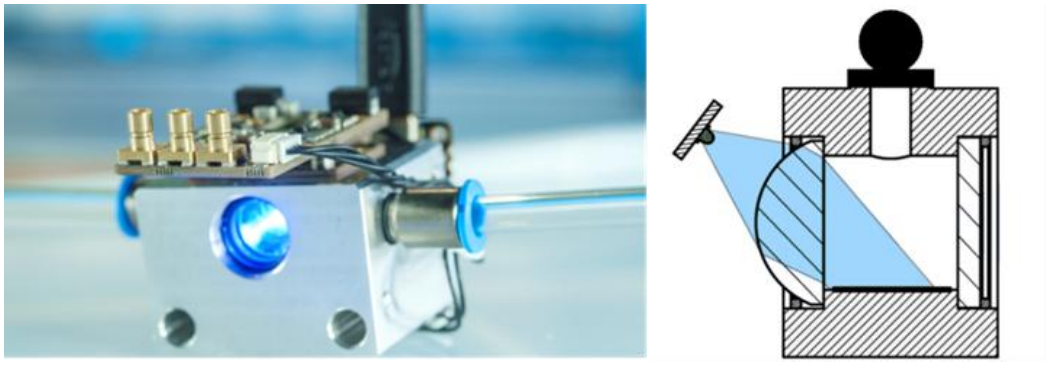

Abbildung 5: Links: H_2-Ultraschallsensor von Fraunhofer IPM. Die Wasserstoffkonzentration wird über die Verschiebung der Resonanzfrequenz bestimmt. Das System besteht aus einer zylindrischen Zelle (Durchmesser 10 mm; Länge 20 mm). Der Schall wird von außen optisch über eine LED mit λ = 450 nm angeregt. Die Schallaufnahme erfolgt mit einem MEMS-Mikrofon. Rechts: Schematische Darstellung der Zellanordnung (Weber).

III.2.2 Erzielte Ergebnisse »Ultraschallsensorik«

Der entwickelte Ultraschallsensor wurde am Gasmessplatz von Fraunhofer IPM ausführlich charakterisiert. Abb. 6 zeigt die Reaktion des Sensors auf steigende H_2-Konzentrationen zwischen 0,2- und 1,4 Vol.- %. Die Sensorantwort verläuft linear zur Gaskonzentration (bis 1,5 % H_2) mit einer Ansprechzeit von 800 ms. Es konnte eine Nachweisgrenze von 0,003 % H_2 (3σ) erzielt werden. Neben der H_2-Empfindlichkeit wurde auch die Reaktion auf potenzielle Störgase hin untersucht. Die Messung in Abb. 7 zeigt die Reaktion des Sensors auf unterschiedliche CO_2-Konzentrationen. Da CO_2 die Schallgeschwindigkeit reduziert zeigt sich ein entgegengesetztes Sensorverhalten. Besonders bei Messungen in Innenräumen sollte die CO_2-Konzentration zur Kompensation mitgemessen werden. Feuchteschwankungen haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Messsignal, was zwingend kompensiert werden muss. Sonstige Querempfindlichkeiten liegen im Bereich der theoretischen Werte.

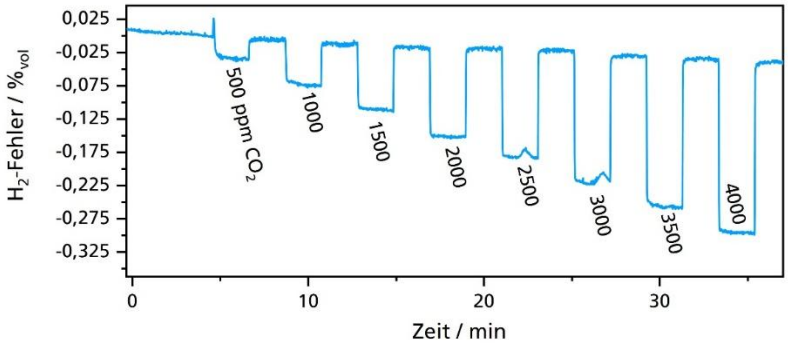

Abbildung 6: Reaktion des Ultraschallsensors auf unterschiedliche H_2-Konzentrationen zwischen 0,2 und 1,4 ppm. In diesem Konzentrationsbereich verläuft das Messignal linear zur Konzentration.

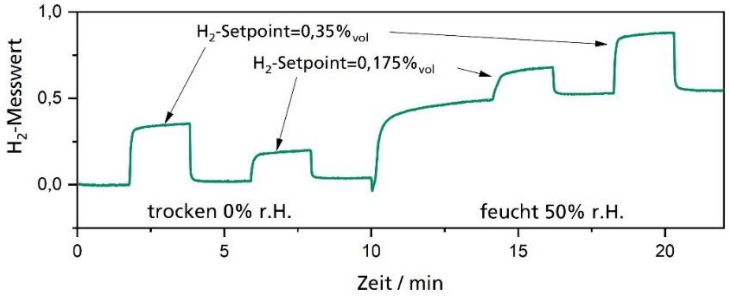

Abbildung 7: Untersuchung von CO_2 und Feuchte auf das Messsignal. CO_2 reduziert die Schallgeschwindigkeit, was dem eigentlichen Messsignal entgegenwirkt. Von zentraler Bedeutung ist die Feuchtekompensation der Messung.

Mit dem Ultraschallsensor konnten während der Projektlaufzeit Feldmessungen beim Projektpartner rma durchgeführt werden. Am Prüfstand (H_2-Loop (RMA Wasserstoffprüfstand 2025)) wurde ein Leck an der Wasserstoffleitung erzeugt, um somit die Lecksuchfähigkeit des Sensors zu untersuchen. Neben dem Ultraschallsensor kamen auch der Wärmeleitfähigkeitssensor und als Referenz ein kommerzieller Sensor der Fa. BOSCH (BOSCH BME 680) zum Einsatz. Der Sensor wurde an unterschiedlichen Positionen direkt an, bzw. auf der H_2-führenden Leitung angebracht (vgl. Abb. 8). Die Leckstelle befand sich am ersten Ventil, Position (a). Dies ist im Verlauf der Messung deutlich zu erkennen – je weiter der Sensor von der Leckagestelle entfernt wird, desto geringer ist die gemessene H_2-Konzentration. In der Raummitte lässt sich kaum noch Wasserstoff nachweisen.

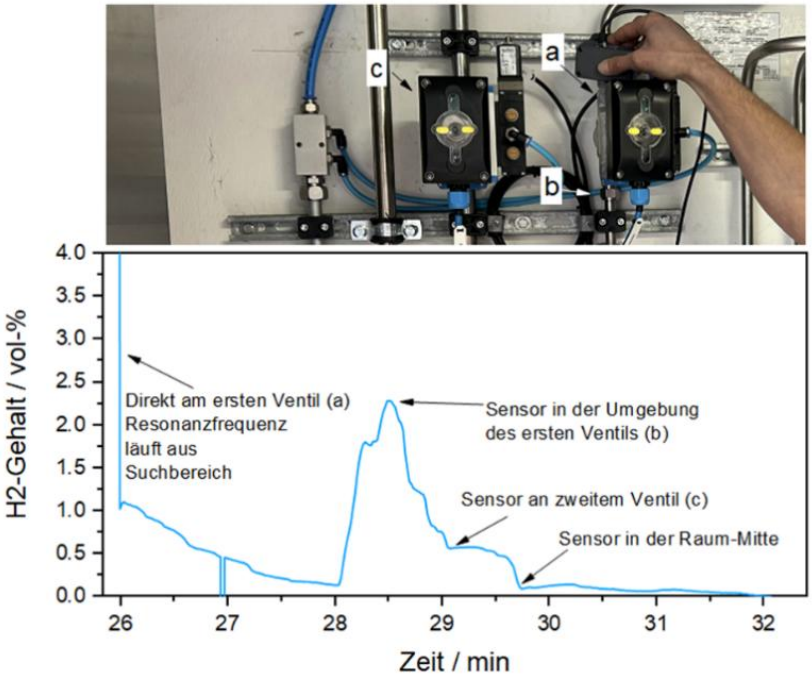

Abbildung 8: Durchführung von Feldmessungen bei der Firma rma. Der Ultraschallsensor misst die H_2-Konzentration an vier unterschiedlichen Positionen rund um die Leckagestelle.

III.3 Farbumschlagssensorik

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene gassensitive Materialien auf Basis von Wolframoxid (Zakirullin 2020) entwickelt, die sich direkt an eine kritische Stelle mithilfe eines einfachen Pumpsprays auftragen lassen (vgl. Abbildung 9). Ist eine Leckstelle vorhanden, kann die Farbänderung der gasochromen Schicht mit dem bloßen Auge erkannt und bewertet werden. Wolframoxid existiert in vier stabilen Formen: WO_3 (gelb), $WO_{2,9}$ (blau), $WO_{2,72}$ (lila) und WO_2 (braun). Wolframoxid (gelb) lässt sich bereits bei Raumtemperatur in seine blaue Form reduzieren, wobei die Reduktion mit Wasserstoff unter Verwendung eines Katalysators erfolgt. Zur Herstellung des gassensitiven Materials wurde eine niedrigviskose Dispersion ausfolgenden vier Komponenten hergestellt: Funktionaler Farbstoff (Wolframoxid), polymerbasierte Farbstoffmatrix, Lösungsmittel und Additive (Katalysator, Additive zur Homogenisierung der Dispersion). Die Charakterisierung der gasochromen Schichten erfolgte am UV/VIS-Spektrometer in Reflexion sowie durch die Auswertung von RGB-Werten aufgenommen mit einer Digitalkamera.

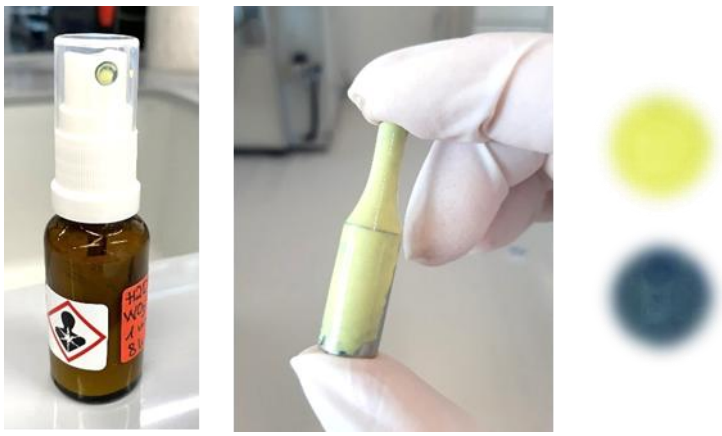

Abbildung 9: Links: Pumpspray zur Abscheidung des gassensitiven Materials. Mitte: mit WO_3 besprühter Gegenstand. Rechts: gasochrome Schicht ($WO_3 \cdot H_2O$) vor (gelb) und nach (blau) der Beaufschlagung mit dem Zielgas.

III.3.1 Messprinzip / Sensoraufbau

Farbumschlagssensoren beruhen auf dem Prinzip der Kolorimetrie: Ein in eine Trägermatrix integrierter funktionaler Farbstoff reagiert möglichst selektiv mit dem Zielgas und ändert proportional zur Gaskonzentration seine spektrale Absorption bzw. Reflexion. Zur Farbauswertung können unterschiedliche Detektionsprinzipien eingesetzt werden – von der visuellen Inspektion bis hin zur automatisierten Messung mit integrierter Signalaufbereitung (Gleichheits-, Spektral- und Helligkeitsverfahren). Im Rahmen des Projekts wurde ein gassensitives Material entwickelt, das zunächst konzentrationsunabhängig zum Einsatz kommen soll.

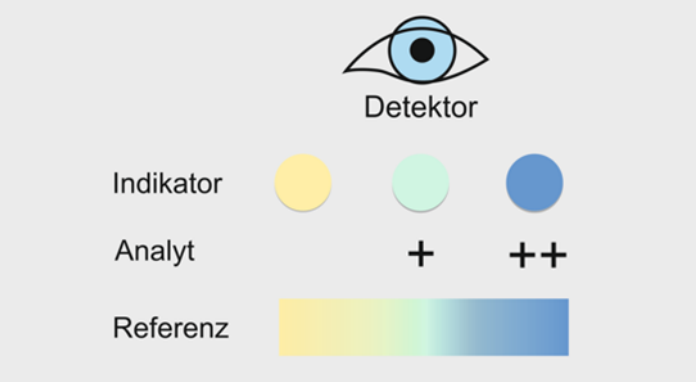

Abbildung 10: Bestimmung der Anwesenheit von Wasserstoff anhand der Farbeigenschaft eines gassensitiven Materials.

III.3.2 Materialentwicklung

Zur Entwicklung des gassensitiven Materials wurden kommerziell verfügbares Wolframoxid und Wolframsäure verwendet sowie Wolframoxid am Fraunhofer IPM synthetisiert. Die Wolframsäure wurde hierbei unter anderem aufgrund ihrer satteren Farbeigenschaft untersucht. Abbildung 11 zeigt das Produkt einer Wolframoxid-Synthese am Fraunhofer IPM aus Wolfram.

Abbildung 11: Wolframoxid-Synthese für einen kolorimetrischen Nachweis von Wasserstoff.

Zunächst wurde im Rahmen des Projekts ein wasserbasierter Dispersionsansatz verfolgt, wobei Wasser sukzessive durch schneller flüchtige Lösungsmittel ersetzt wurde. Zur Einstellung der gewünschten Partikelgrößenverteilung wurde der Indikator mithilfe einer Planetenkugelmühle mit Mahlbecher und Mahlkugeln aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid gemahlen. Die Bestimmung der PGV erfolgte mit Hilfe eines dynamischem Laserstreulichtspektrometer (D50). Zur Homogenisierung der Dispersion und Verteilung des Katalysators wurden zusätzlich Additive (Dispergiermittel, Netzmittel, usw.) verwendet, die die Stabilität der Dispersion erhöhen und die Agglomeration der Partikel verhindern. Abbildung 12 zeigt einen Materialansatz auf Basis von Wolframsäure (nach Entnahme des Materials aus dem Mahlbecher). Der Einbau der polymerbasierten Trägermatrix erfolgte nach der Filtrierung der Mahlkugeln. Vor dem Abfüllen wurde die Dispersion zusätzlich mit einem Dispergiergerät behandelt, um die Homogenität der Mischung zu gewährleisten und eine optimale Verteilung der aktiven Komponenten zu erreichen. Die Charakterisierung der rheologischen Eigenschaft erfolgte hinsichtlich Oberflächenspannung und Viskosität.

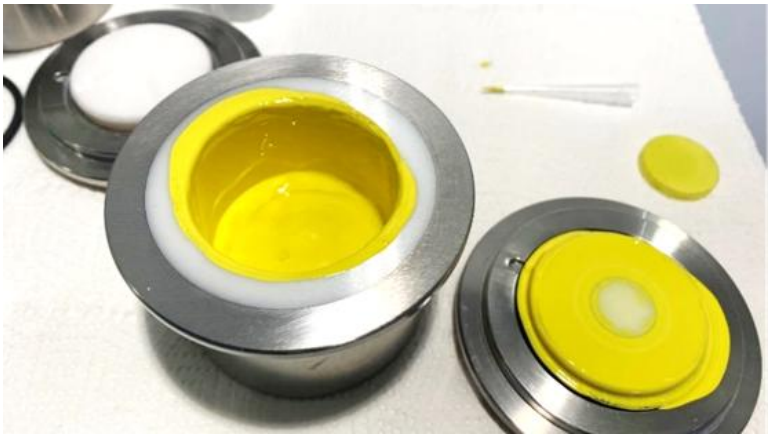

Abbildung 12: Homogenisierung des gassensitiven Materials (Wolframsäure) in der Kugelmühle.

III.3.3 Erzielte Ergebnisse »Farbumschlagssensorik«

Die Charakterisierung der gasochromen Schichten erfolge am UV/VIS-Spektrometer in Reflexion. Hierfür wurde das gassensitive Material in einer dünnen Schicht auf einen Glasobjektträger aufgesprüht. Abbildung 13 zeigt eine Messung am Beispiel eines Materialansatzes mit kommerziellen Wolframoxid gegenüber der Exposition von 1,4 % Wasserstoff für eine Stunde. Zur Charakterisierung der Farbänderung wurde alle fünf Minuten ein Spektrum im sichtbaren Bereich zwischen 400 und 800 nm aufgenommen.

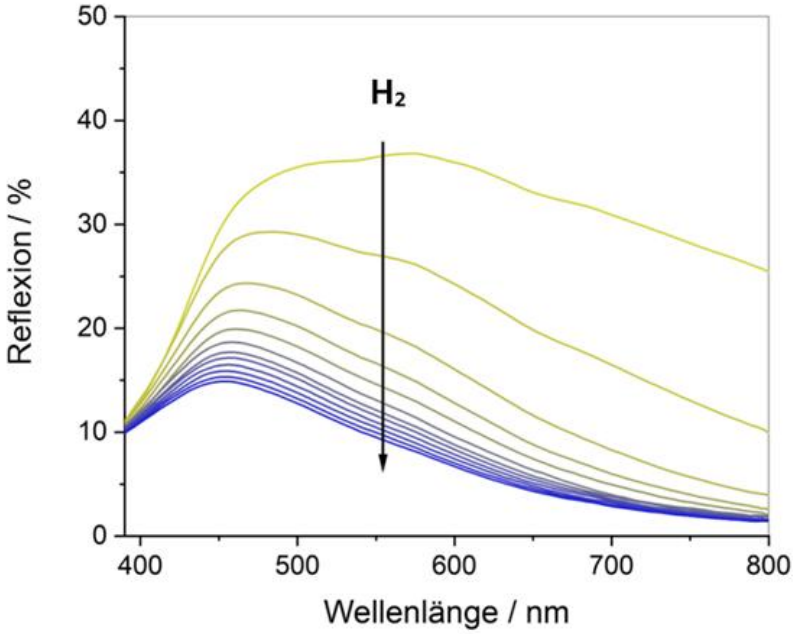

Abbildung 13: Messung der Farbänderung des Indikators mit Hilfe der UV/VIS-Spektroskopie. Beaufschlagung von 1,4 % Wasserstoff für eine Stunde. Aufnahme der Spektren in einem Abstand von 5 Minuten.

III.4 Sensorfusion: Wärmeleitfähigkeits- und Ultraschallsensor

Ein sicherer Nachweis von Wasserstoff muss frei von Querempfindlichkeiten wie Temperatur, Feuchtigkeit und Fremdgaseinflüssen sein. Zudem ist sicherheitstechnisch eine technologieunabhängige Redundanz durch den Einsatz zweier unterschiedlicher Messprinzipien gefordert (Stichwort „Functional Safety“). Vor diesem Hintergrund wurde in TransHyDE das Fusionierungspotenzial zweier Wasserstoffmessprinzipien (Ultraschall und Wärmeleitfähigkeit) untersucht. Grundlage bildeten zwei IPM-Gassensoren (Wärmeleitfähigkeits- und Ultraschallsensor) mit kommerzieller Begleitsensorik zur Bestimmung der Umgebungsfeuchte und -temperatur. Es wurde ein systematischer Datensatz erhoben, der verschiedene Wasserstoff-Stickstoff-Matrizen (H_2-N_2) bei unterschiedlichen Querempfindlichkeiten umfasst. Der bewusste Top-down-Ansatz von H_2-N_2-Matrizen schließt mögliche Wechselwirkungen mit in Luft enthaltenen Spurengasen aus und ermöglicht so die isolierte Analyse der Quereinflüsse. Es konnten ein hochgradig nicht-linearer Feuchte- und ein linearer Temperatureinfluss festgestellt werden. Aufgrund der komplexen, teils nicht-linearen Zusammenhänge zwischen den Modalitäten wurde ein neuronales Netzwerk eingesetzt.

III.4.1 Anforderungen

Typische Umgebungsbedingungen, die die Gasmessungen beeinflussen sind: Temperatur, Luftfeuchte sowie variierende Fremdgaskonzentrationen in der zu analysierenden Gasmatrix. Gemäß eines Warnsensors sollen bereits Wasserstoffkonzentrationen zehn Prozent der unteren Explosionsgrenze (UEG) von Wasserstoff in Luft nachgewiesen werden. Daraus ergibt sich der erforderliche Messbereich. Unter einer technologieunabhängigen Redundanz versteht man den Einsatz von mindestens zwei Sensoren basierend auf unterschiedlichen physikalischen Wirkprinzipien. Der Demonstrator hat nicht den Anspruch einen zuverlässigen, vollfunktionsfähigen Gaswarnsensor abzubilden. Er dient vielmehr als Sensorverbund zur Aufnahme erster simultaner Messwerte, auf deren Basis das Fusionierungspotenzial untersucht werden soll und eine erste Aussage hinsichtlich der Machbarkeit getroffen werden soll. Die eingesetzten Sensoren erfüllen die im Rahmen dieser Arbeit erforderlichen Eigenschaften wie Robustheit und Langzeitstabilität. Die Messwerte weisen jedoch die typischen Querempfindlichkeiten auf, die im angegebenen Konzentrationsbereich durch den Fusionierungsansatz kompensiert werden sollen

Tabelle 1: Anforderungen an den Detektor

Parameter	Anforderungen
Einsatzgebiet	feste Gasinstallation
Einsatzbedingungen	geringe Querempfindlichkeiten ggü. Umwelt-bedingungen
Messbereich	0,4 … 1 Vol. % H_2 in Luft
Messprinzip	technologieunabhängige Redundanz
Sensoreigenschaften	zuverlässig, robust, langzeitstabil

III.4.2 Messprinzip / Sensoraufbau

Bei dem entwickelten Demonstrator handelt es sich um eine Gasmesszelle, in der sich die beiden zu fusionierenden Sensoren integriert wurden (vgl. Abbildung 14). Die Gasmesszelle verfügt über einen Gaseinlass, einen Gasauslass sowie eine USB-Durchführung zur Datenübertragung zwischen Sensornetzwerk und Notebook. Die Gasmesszelle ist 119,5 mm × 94 mm × 57,99 mm groß. Abzüglich der Volumina der beiden Sensoren sowie der USB-Verkabelung beträgt das nutzbare Innenvolumen etwa ~230 ml.

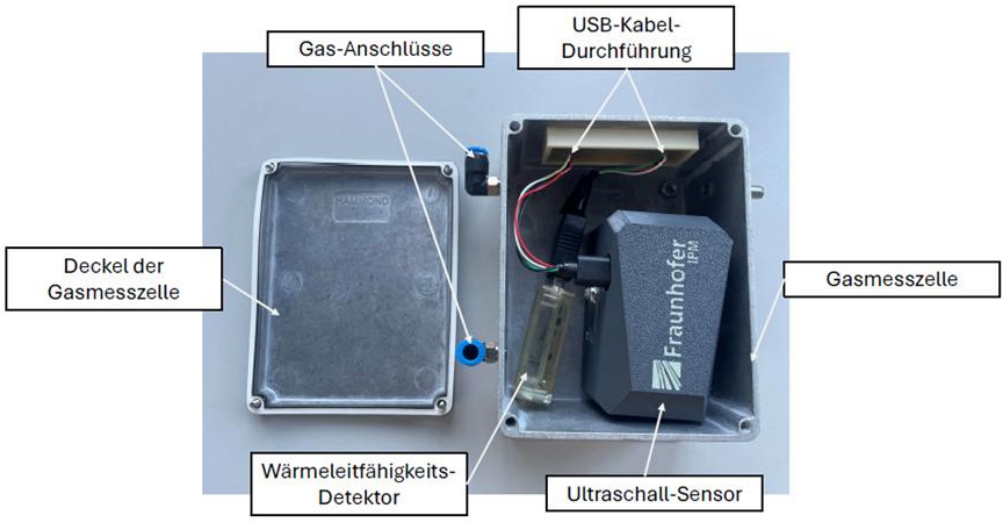

Abbildung 14: Aufnahme der offenen Gasmesszelle mit den beiden Sensoren (Wärmeleitfähigkeits- und Ultraschallsensor), Gasanschlüssen und USB-Kabeldurchführung.

Zur Steuerung der Software wurde eine grafische Benutzeroberfläche in Python unter der Verwendung der Bibliothek Tkinter realisiert. Die GUI ermöglicht die Ansteuerung der Sensoren und der Messroutine, sowie die Visualisierung und Speicherung der erfassten Messdaten. Abbildung 15 zeigt das Hauptfenster der entwickelten GUI. Auf der rechten Seite sind die Messdaten als Plots dargestellt. Hierbei repräsentieren die Farben Rot und Blau den Ultraschall- bzw. den Wärmeleitfähigkeitssensor.

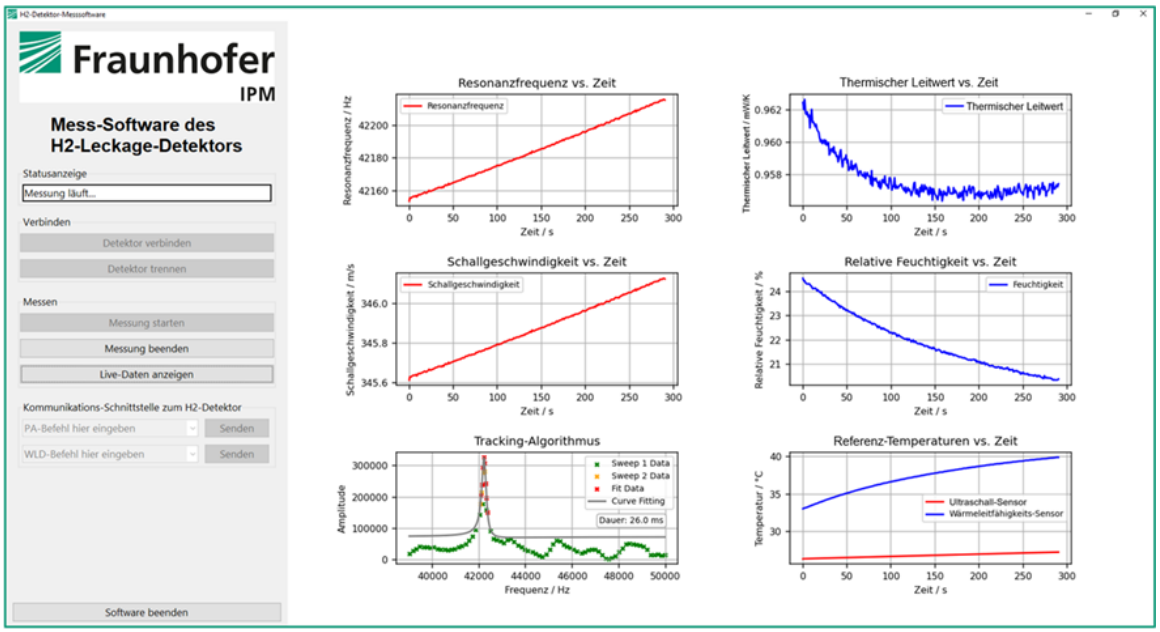

Abbildung 15: Die Messsoftware verfügt über eine zweigeteilte grafische Oberfläche. Im linken Bereich befinden sich die Bedienelemente zum Starten und Stoppen einer Messung sowie die Schnittstelle, zur Kommunikation mit den beiden Sensoren. Rechts befinden sich sechs Plots zur Anzeige der aktuellen Messwerte.

III.4.3 Modellbildung

Auf Basis des zu erfassenden Trainingsdatensatzes wurde ein Regressionsmodell entwickelt, das Wasserstoffkonzentrationen anhand der Daten des Sensorverbunds möglichst querempfindlichkeitsfrei detektiert. Die dem Modell zugrunde liegenden Messdaten müssen daher eine breite Variation aufweisen, insbesondere im Hinblick auf unterschiedliche Querempfindlichkeiten. Nur so lassen sich die Auswirkungen potenzieller Störgrößen auf das Sensorsignal untersuchen, mit Hilfe von Modellbildungsalgorithmen Muster erkennen und darauf aufbauend Kompensationsstrategien entwickeln. Die relevantesten variablen Komponenten in Innenräumen und Außenbereichen sind Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O). Ihre Konzentrationen ändern sich beispielsweise in Innenräumen durch menschliche Atmung rasch. Der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre steigt tendenziell durch Verbrennung fossiler Brennstoffe an, während der Wasserdampfgehalt stark von Temperatur und Feuchte abhängt und somit extrem variabel ist. Den zu analysierenden Gasmatrizen werden CO_2-Konzentrationen bis zu 800 ppm beigemischt. Die relative Luftfeuchtigkeit wird zwischen 0 und 75 % variiert. Neben CO_2 und relativer Luftfeuchte stellt die Temperatur eine weitere typische Störgröße in der Gassensorik dar. Bedingt durch den Versuchsaufbau wurde ein Temperaturbereich von 10 bis 60 °C untersucht. Die Tabelle 2 zeigt alle Variationen bei einer konstanten relativen Feuchte von 25 %. Die Wasserstoffmessungen (in N_2) wurden bei drei Temperaturniveaus (10 °C, 35 °C und 60 °C) durchgeführt. Innerhalb jedes Temperaturniveaus wurden zusätzlich konstante CO_2-Konzentrationen beigemischt, um den Einfluss von CO_2 zu untersuchen. Die gleichen Variationen wurden für 0 %, 50 % und 75 % relativer Feuchte durchgeführt. Zur Aufnahme des Messdatensatzes, der als Trainingsdatensatz für die Entwicklung eines Regressionsmodells in Form eines neuronalen Netzes diente, wurde eine Python-Software entwickelt. Diese Software ermöglicht das synchrone Auslesen der Signale des Sensorverbunds. Abb. 16 zeigt die Reaktion der Sensoren auf den Trainingsdatensatz.

Tabelle 2: Ein Viertel des Trainingsdatensatzes am Beispiel für 25 % relative Feuchte.

Gas	H_2	H_2	H_2	O_2	H_2	H_2		H_2	O_2	H_2	H_2	H_2	O_2
Temperatur [°C]	10	10	10	10	35	35		35	35	60	60	60	60
rel. Feuchte [%]	25	25	25	25	25	25		25	25	25	25	25	25
CO_2 [Vol. %]		0,04	0,08			0,04		0,08			0,04	0,08	

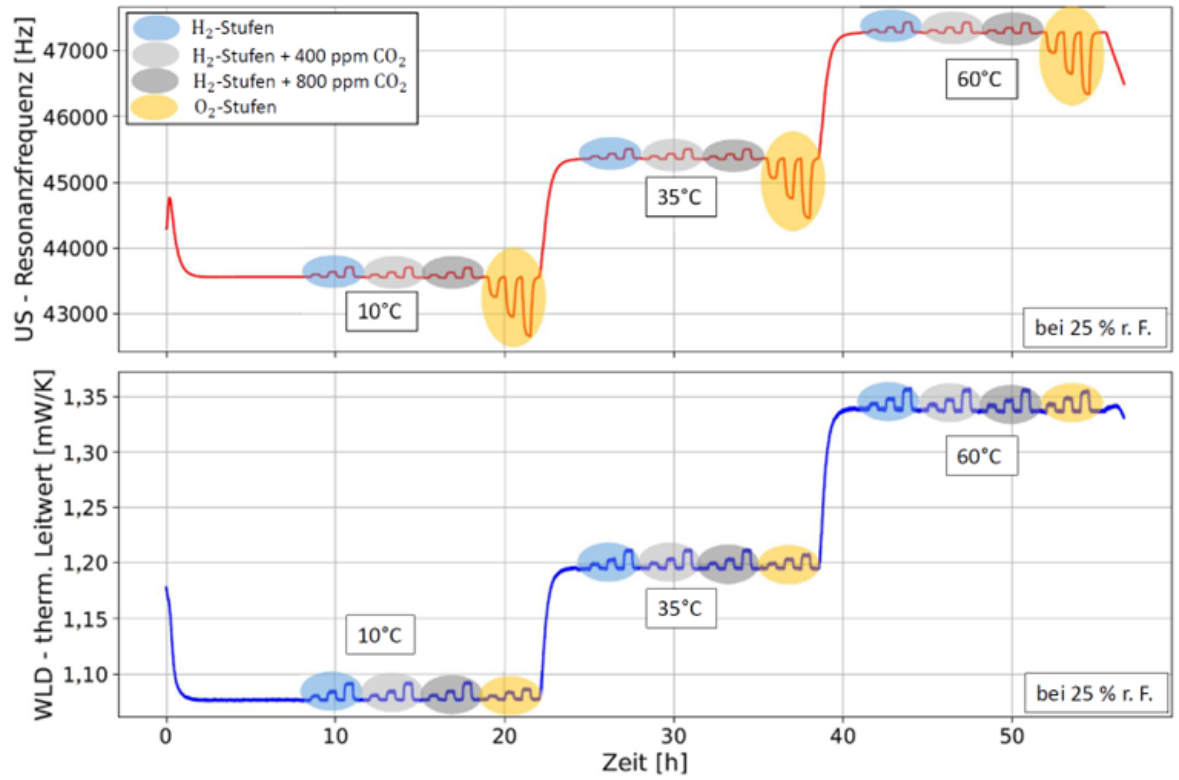

Abbildung 16: Sensorreaktion des Ultraschallsensors (Resonanzfrequenz in H_2) und des Wärmeleitfähigkeitssensors auf die Beaufschlagung mit dem Trainingsdatensatz, bei 25 % relativer Feuchte.

Die Sensorreaktionen auf den Trainingsdatensatz wurden eingehend analysiert, indem die Korrelationen zwischen den Messgrößen und der Wasserstoffkonzentration untersucht wurden. Hierfür wurde eine Korrelationsmatrix erstellt (vgl. Abb. 17), die die linearen Zusammenhänge zwischen den Features mittels des Pearson-Korrelationskoeffizienten darstellt. Werte nahe −1 bzw. +1 weisen auf eine starke Korrelation hin.

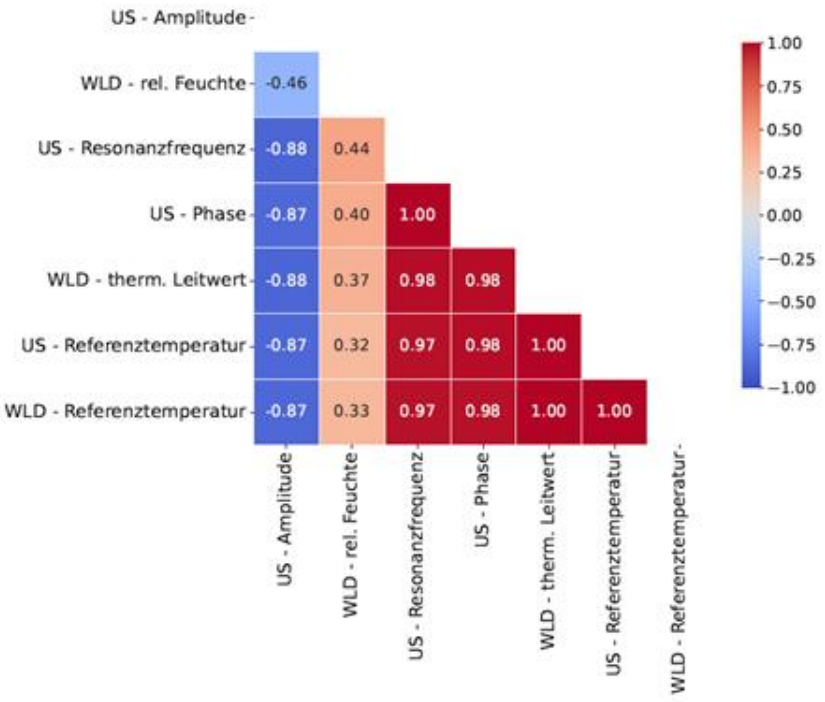

Abbildung 17: Heatmap der Korrelationsmatrix. Aus Symmetriegründen ist nur die untere linke Dreieckshälfte der Matrix abgebildet. Die einzelnen Kacheln repräsentieren die Pearson-Korrelationskoeffizienten der einzelnen Features untereinander.

Die Analyse ergab, dass zwischen den gasspezifischen Messgrößen US-Resonanzfrequenz, US-Phase und WLD-thermischer Leitwert ein hoher linearer Zusammenhang besteht. Insbesondere Resonanzfrequenz und Phase weisen mit einem Pearson-Korrelationskoeffizienten von 1 eine starke Korrelation auf. Auch der Wert von 0,98 zwischen Resonanzfrequenz und thermischem Leitwert deutet darauf hin. Diese Ergebnisse belegen, dass beide Messgrößen ähnliche Informationen liefern, obwohl sie unterschiedlich auf Sauerstoff reagieren. Die gasspezifischen Messgrößen zeigten einen linearen inversen Zusammenhang zur US-Amplitude, wobei der Wert von -0,87 auf zahlreiche Ausreißer in den gemessenen Amplitudenwerten zurückzuführen ist. Die Korrelationen mit den Messwerten des relativen Feuchtesensors sind hingegen niedriger (0,32 bis 0,44) und deuten auf nicht-lineare Zusammenhänge hin. Abschließend wurden die Pearson-Korrelationen zwischen den gassensitiven Messgrößen und der Wasserstoffkonzentration festgestellt. Alle vier Messgrößen reagierten unterschiedlich auf die Gaskonzentrationen und die Störgrößen. Die Korrelations-koeffizienten waren nahe 0, was auf hochgradig nicht-lineare Zusammenhänge hindeutet. Es wird deutlich, dass alle gassensitiven Messgrößen von der Feuchtigkeit und Temperatur beeinflusst werden, was die beobachteten, nicht-linearen Beziehungen zur Wasserstoffkonzentration erklärt. Auf Grundlage der Korrelationsanalyse, die auf das Vorliegen zahlreicher nichtlinearer Zusammenhänge unter den verschiedenen Messgrößen und der Zielgröße der Wasserstoffkonzentration hinweist, wurde ein künstliches neuronales Netz mit sieben Eingangsgrößen und drei Hidden Layer als Modellierungsansatz gewählt (Abb. 18).

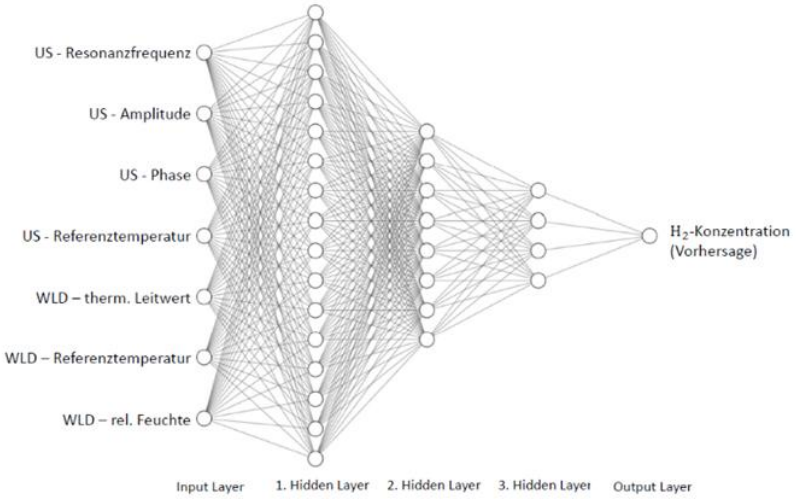

Abbildung 18: Die verwendete MLP-Architektur zur Schätzung der Wasserstoffkonzentration besteht aus einem Input Layer mit sieben Eingangsgrößen, drei Hidden Layers mit 16, 8 und 4 Neuronen sowie dem Output Layer für die Wasserstoffkonzentration.

Zur Modellevaluierung wurde ein Trainingsdatensatz erstellt, der H_2-Stufen von 0,3 bis 4,0 Vol.- % sowie O_2-Stufen von 15 bis 25 Vol.- % umfasst. Im Versuchsaufbau diente N_2 als Trägergas; H_2O, CO_2 und O_2 wurden als Fremdgase zugesetzt. Die Temperaturvariationen reichten von Raumtemperatur bis 45 °C bei relativen Feuchten zwischen 0 % und 60 % (vgl. Abb. 19). Der Testdatensatz weist im Vergleich zum Trainingsdatensatz deutlich abweichende Temperatur-, Feuchte- und Fremdgasszenarien auf.

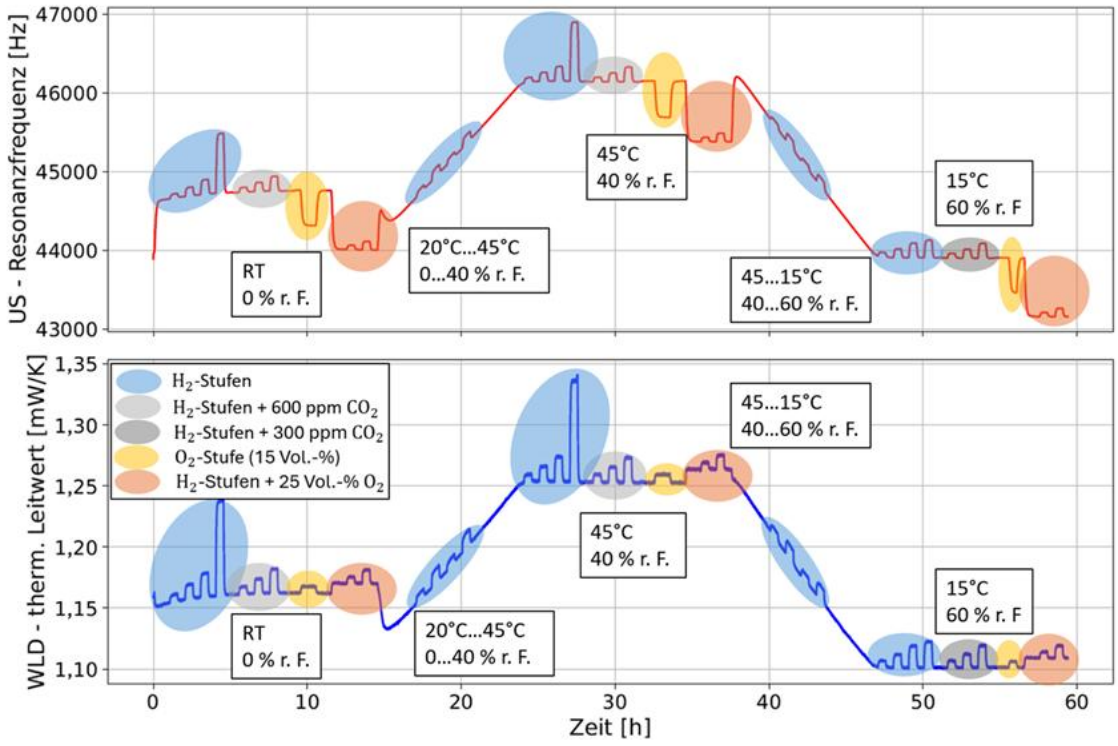

Abbildung 19: Sensorreaktionen auf den Trainingsdatensatz zur Modellevaluierung.

III.4.4 Erzielte Ergebnisse »Sensorfusion Ultraschall und Wärmeleitfähigkeit«

Um die Generalisierbarkeit des entwickelten Modells zu prüfen, wurde ein bislang unbekannter Testdatensatz herangezogen. Dieser beinhaltet nicht nur unterschiedlich angelegte Gasmatrizen, die unter verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen erstellt wurden, sondern berücksichtigt auch das spezifische Einschwingverhalten der jeweiligen Konzentrationsstufen im Vergleich zum Trainingsdatensatz. Aus den Evaluierungsergebnissen wurde abschließend der Gültigkeitsbereich des Regressionsmodells definiert. Dabei zeigte sich, dass das trainierte Modell insbesondere bei Wasserstoffkonzentrationen über 0,8 Vol.- % Schwierigkeiten hat, korrekte Vorhersagen zu liefern. Es ist bekannt, dass neuronale Netze, die mithilfe von Gradientenverfahren trainiert werden, oft ungenau und fehleranfällig in ihrem Extrapolationsverhalten sind. Dies führt dazu, dass Wasserstoffkonzentrationen oberhalb des im Training verwendeten Höchstwerts von 0,8 Vol.- % häufig unterschätzt werden. Für die Leckagedetektion ist jedoch entscheidend, dass Wasserstoff zuverlässig erkannt wird. Geringere H_2-Konzentrationen bis 0,6 Vol.- % kann das Modell auch unter unterschiedlichen Feuchte- und Temperaturbedingungen zuverlässig vorhersagen (vgl. Abb. 20). Der Gültigkeitsbereich des entwickelten Modells ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

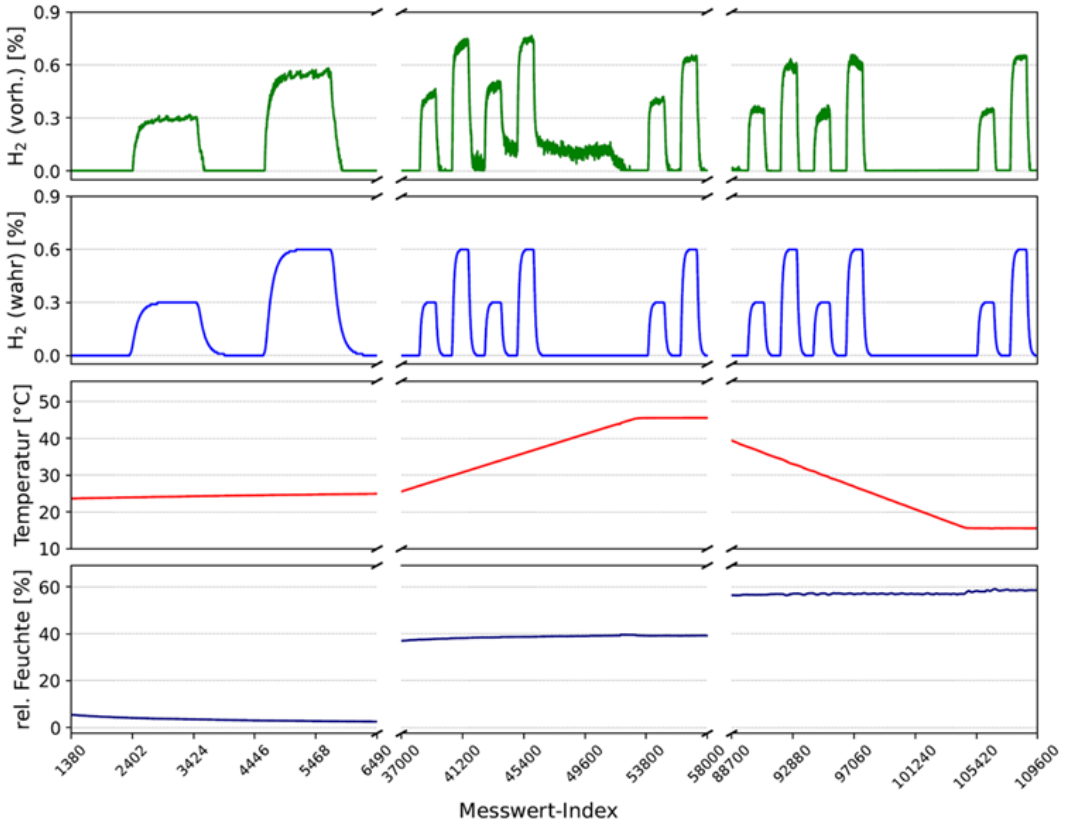

Abbildung 20: Ergebnisse der Temperatur- und Feuchtekompensation eines Ausschnittes des Testdatensatzes. Von oben nach unten: Die vorhergesagte Wasserstoffkonzentration, die tatsächliche Wasserstoffkonzentration, die Gastemperatur und die relative Feuchte des Gases.

Tabelle 3: Gültigkeitsbereich des entwickelten Modells.

H_2-Konzentration in N2	0 … 0,8 Vol. %
Temperaturbereich	• 10 … 60 °C (Steady State und Dynamic Case) • Steigende Temperaturrampe mit systematischer Überschätzung
Feuchtebereich	0 … 75 % rel. Feuchte
CO_2 im Trägergas	0 ... 800 ppm
Potenzial zur künftigen selektiven Gasunterscheidung	H_2 und O_2

III.5 Entwicklung eines selektiven Raman-basierten Wasserstoffsensors

Es gibt einfache und kostengünstige Methoden zur Detektion von Wasserstoff. Im Rahmen dieses Projekts wurden unter anderem die Messung der Wärmeleitfähigkeit und der Schallgeschwindigkeit untersucht. Diese Methoden basieren auf Summenparametern des Gases, die durch Wasserstoff signifikant beeinflusst werden. Beispielsweise ist die Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff etwa siebenmal größer als die der meisten Gase. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass diese Summenparameter auch von der Konzentration der anderen Gase in der Mischung abhängen. In Situationen, in denen die Gasmatrix nicht konstant ist und eine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung von Wasserstoff erforderlich ist, können diese einfachen Sensoren jedoch nicht eingesetzt werden. Die gängige Methode der Infrarot-Absorptions-Spektroskopie eignet sich ebenfalls nicht für Wasserstoff, da dieses Gas kein Dipolmoment besitzt und daher keine schwingungsspektroskopische Absorption zeigt.
Im Gegensatz dazu ermöglicht die Raman-Spektroskopie eine schwingungsspektroskopische Detektion und bietet eine vergleichbare Selektivität wie die Infrarot-Spektroskopie. Sie ist jedoch in der Regel aufwendiger und teurer. Im Rahmen des TransHyDE-Unterprojekts zur Entwicklung eines kostengünstigen Raman-Systems wurde ein Wasserstoff-Sensor auf Basis der Raman-Spektroskopie entwickelt. Dieser Sensor kann Wasserstoff sehr selektiv bestimmen, idealerweise ohne unerwünschte Querempfindlichkeiten, und zeichnet sich zudem durch eine vergleichsweise günstige Herstellung aus.
Die Anwendungen des neu entwickelten Ramen-basierten Wasserstoffsensors sind vielfältig und reichen von der quantitativen Bestimmung von Wasserstoff in komplexen und wechselnden Medien bis hin zur Analyse des Wasserstoffanteils in Erdgas. Darüber hinaus eignet sich der Sensor zur Überwachung von Elektrolyseuren.
Vorteil des Sensors ist die querempfindlichkeitsfreie Quantifizierung von Wasserstoff. Im Vergleich zu herkömmlichen Summenparameter-Sensoren bietet er eine deutlich verbesserte Genauigkeit. Zudem ist der Aufbau des Systems vergleichsweise preiswert, im Gegensatz zu vollwertigen Raman-Spektrometern, die bereits ab 50.000 Euro erhältlich sind, stellt der neue Sensor eine kostengünstigere Lösung dar. Um die Messgenauigkeit weiter zu steigern, können Parameter wie Laserleistung, Messzeit oder Gasdruck angepasst werden. Es sind auch einige Nachteile zu beachten. Der Preis des Sensors liegt im Vergleich zu den kostengünstigen Sensoren deutlich höher, was für einige Anwender eine Hürde darstellen kann. Zudem könnte der Aufwand zur Einhaltung der ATEX-Richtlinien steigen, abhängig von den verwendeten Lasertechnologien. Trotz dieser Herausforderungen bietet der Sensor eine vielversprechende Lösung für die präzise Wasserstoffbestimmung in verschiedenen industriellen Anwendungen.

III.5.1 Messprinzip / Sensoraufbau

Die folgende Abbildung 21 zeigt im linken Bereich das Messprinzip: Ein Laserstrahl wird durch eine Gasmesszelle geführt und der Strahl wird seitlich mithilfe einer optischen Abbildung auf eine Standardkamera abgebildet. Das Beobachtungslicht besteht aus Streulicht der Laserwellenlänge und aus Raman-Streulicht der im Gasgemisch enthaltenen Reingase. Ein Filtersystem im Beobachtungsarm unterdrückt mit spektralen Filtern alles Raman-Licht, das von anderen Gaskomponenten als Wasserstoff stammt (die Raman-Bande von H_2 liegt isoliert und weit entfernt von den meisten anderen Gasen), sodass die Kamera aus der empfangenen Lichtintensität die Wasserstoffkonzentration selektiv quantifizieren kann. Der großflächige Sensorchip erfasst viel Raman-Licht ein, so dass eine einfache, preiswerte Kamera genutzt werden kann.
Zur Datenauswertung wird die Lichtintensität eines Kamerabilds im Bereich des Strahls integriert und nach einer Kalibrierung bei den gegebenen Randbedingungen (Gasdruck, Laserleistung, Integrationszeit) kann eine Wasserstoff-Konzentration ausgegeben werden.

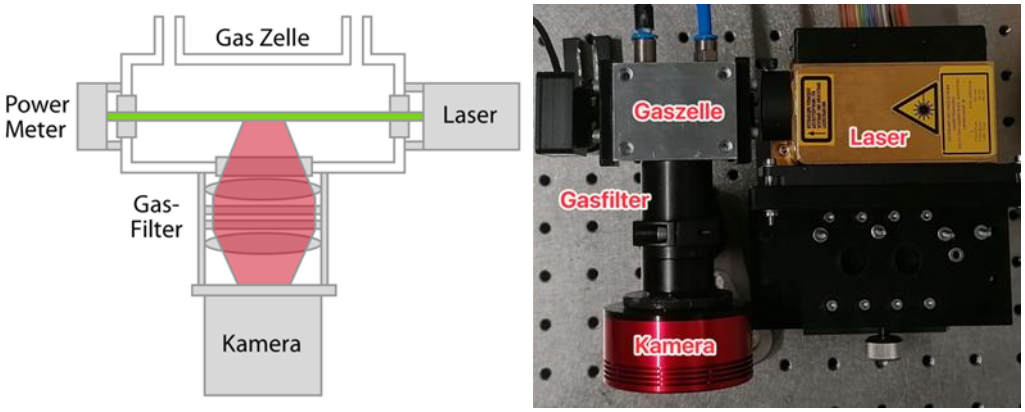

Abbildung 21: Links: Messprinzip und rechts: Realisierung des Wasserstoff-Raman-Aufbaus. Der Laser strahlt durch die Gas-Messkammer und der Strahl wird von der Kamera über einen Filtersatz beobachtet, der ausschließlich Wasserstoff-Raman-Licht durchlässt.

III.5.2 Erzielte Ergebnisse »Raman-Wasserstoffsensor«

Die Abbildung 22 zeigt exemplarische Messergebnisse. Im linken Bereich ist ein typisches Kamerabild dargestellt. Man erkennt – bei vorhandenem Wasserstoff – den Verlauf des Laserstrahls durch die Gaszelle. Die Lichtintensität im Strahlbereich wird integriert und durch Verrechnung mit Integralwerten aus den Hintergrundbereichen korrigiert. Dadurch lassen sich z. B. Schwankungen der Laserleistung sehr gut kompensieren. Nach der Kalibrierung lässt sich dem korrigierten Lichtintensitätswert eine Wasserstoffkonzentration zuordnen. Der rechte Teil der Abbildung zeigt eine Stufenmessreihe, bei der Wasserstoff und Argon in unterschiedlichen Anteilen gemischt wurden. Über ein Kalibriermodell wird der Wasserstoffanteil bestimmt. Die Messbedingungen sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Messbedingungen des Raman-Sensors

Integrationszeit pro Bild	10 s
Laserleistung	50 mW
Gasdruck	3 bar
Kalibriermodell	linear, mit Hintergrund-Korrektur

Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Wasserstoff-Messung: Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Referenzwerten überein. Darüber hinaus zeigt sich eine sehr gute Linearität der Ramanmessung sowie eine hohe Stabilität mit 1-σ-Werten von etwa 0,1 % auf den Plateaus. Weitere Messungen mit diversen Gasen, insbesondere den typischen Erdgas-Bestandteilen, bestätigten die querempfindlichkeitsfreie Messung von Wasserstoff.

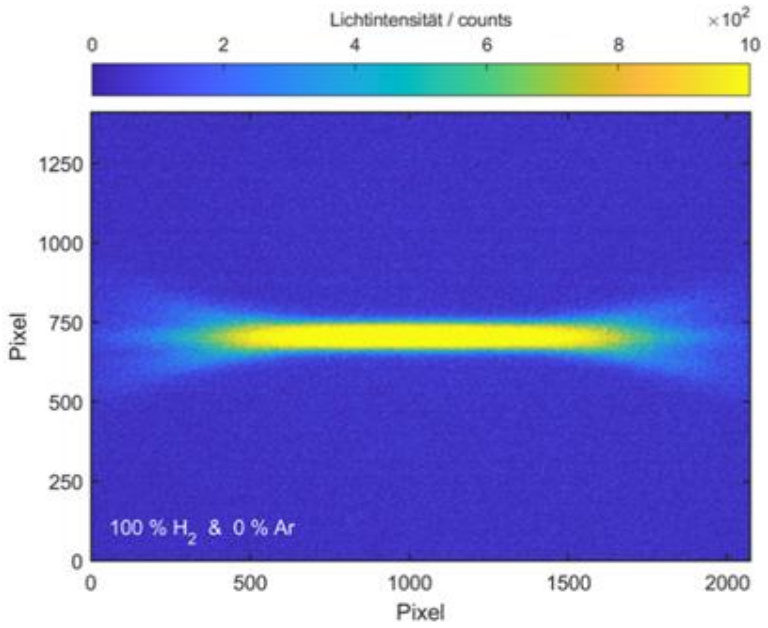

Abbildung 22: Typische Messergebnisse des Raman-Wasserstoff-Sensors. Gezeigt ist ein Kamerabild bei vorhandenem Wasserstoff, das den Laserstrahl durch die Gasmesszelle sichtbar macht. Grundsätzlich ergibt sich die Wasserstoff-Konzentration nach Kalibrierung aus der integrierten Intensität der Pixel im Strahlbereich.

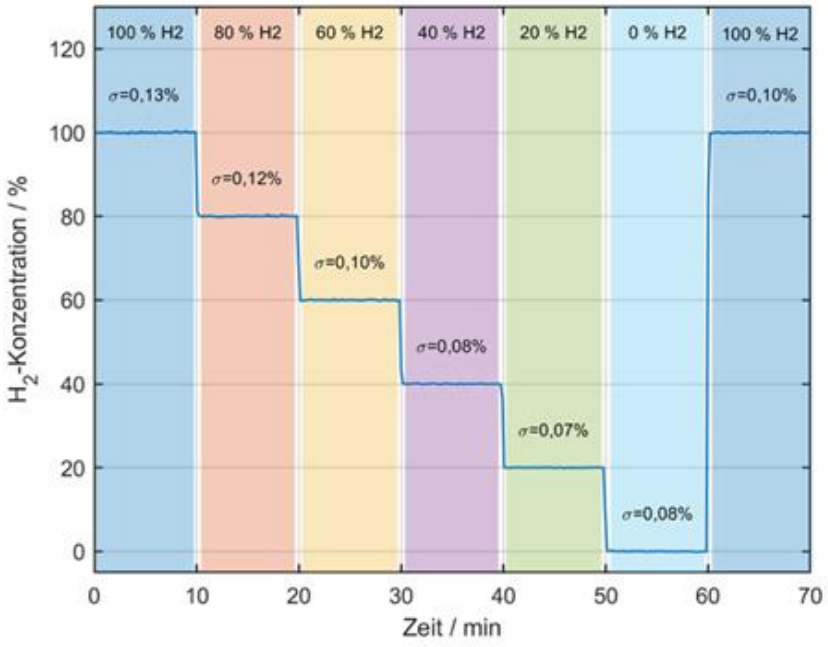

Abbildung 23: Charakterisierung des Raman-Messsystems im Konzentrationsbereich von 0 bis 100 % H_2 in 20 %-Schritten. Das erhaltene Messsignal (blau) zeigt eine exakte Übereinstimmung mit der eingestellten Wasserstoffkonzentration.

IV. Verwendung der Zuwendung

IV.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die in Kapitel 3 beschrieben Arbeiten wurden von erfahren wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern durchgeführt. Die eingesetzten Mittel dienten der Finanzierung von projektbezogenem wissenschaftlichen/technischem Personal zur Durchführung der oben beschriebenen Aufgaben. Zusätzlich wurden Sachkosten (u. a. Prüfgase, Elektronikkomponenten, Chemikalien, etc.) und Reisemittel verwendet. Investitionen wurden nicht getätigt.

IV.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Durchführung der Projektarbeiten im Rahmen von TransHyDE-Sens wäre ohne die bereitgestellte Förderung nicht realisierbar gewesen. Die Zuwendung ermöglichte die Entwicklung, Realisierung und Charakterisierung verschiedener Sensoren und Messprinzipien zur Erkennung von Wasserstoff und Wasserstoffverunreinigungen. Der Ressourceneinsatz orientierte sich an den im Antrag definierten Aufgaben und erfolgte effizient und zielgerichtet. Die eingesetzten Mittel dienten ausschließlich der Erreichung der Projektziele und wurden im vorgesehenen Umfang und Zeitrahmen abgerufen. Insgesamt war die Förderung notwendig, um die vorgesehenen/geplanten Arbeiten ordnungsgemäß umzusetzen.

V. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die große Reichweite des Projekts TransHyDE sowie die enge Zusammenarbeit mit vielen Partnern aus der Industrie haben nicht nur zu einer Vielzahl neuer Kontakte geführt, sondern auch bereits zu direkten Aufträgen. Die im Rahmen von TransHyDE erzielten Ergebnisse sind der Schlüssel für weiterführende Forschungsarbeiten und die Umsetzung in die Praxis. So fließt das gewonnene Know-how in neue Projekte ein und trägt zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Technologien zu praxistauglichen Lösungen bei.

Insbesondere im Bereich der Ultraschallsensorik konnte durch die Erfolge des Projekts ein neues und vielversprechendes Themengebiet für das Institut erschlossen werden. Ein entscheidender Schritt war die Patentierung des Resonanz-Trackings, mit der das neue Messprinzip geschützt wird. Durch die Patentierung ist die Weiterentwicklung gesichert, was dem Institut nicht nur einen Wettbewerbsvorteil verschafft, sondern auch die Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsziele bildet.

VI. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit

Während der Projektlaufzeit wurden die Entwicklungen im Umfeld der Wasserstoffwirtschaft aktiv verfolgt, beispielsweise durch die Teilnahme an Messen und Konferenzen. Dieser Bereich ist sehr dynamisch, bewegt sich jedoch noch etwas langsam vorwärts/entwickelt sich jedoch insgesamt noch recht langsam. In Deutschland und Europa bieten immer mehr Sensorhersteller Lösungen zur Erkennung von Wasserstoff an. Dabei stellt die Einhaltung der ISO-Norm 14687-2 aufgrund der geringen Konzentrationen von Fremdgasen eine große Herausforderung dar. Bislang gibt es keine kommerziell verfügbaren Lösungen auf dem Markt.

Ein ähnliches Problem besteht bei der kontaktlosen Erkennung von möglichen Leckagen. Hier hat Fraunhofer IPM bedeutende Fortschritte in der Technologie erzielt. Sobald Wasserstoff flächendeckend als Energieträger eingesetzt wird, wird die Sensorbranche einen weiteren Schritt in Richtung der Serienproduktion von Sensoren machen. Dies könnte zu zuverlässigeren und effektiveren Lösungen führen, die für die Sicherheit und Effizienz der Wasserstoffnutzung von entscheidender Bedeutung sind.

VII. Erfolgte Veröffentlichungen

Tabelle 5: Erfolgte Veröffentlichungen

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel	Autoren
01.08.2023	Konferenzbeitrag Optica Sensing Congress 2023	Mid-infrared gas imaging with direct absorption spectroscopy	T. Strahl, J. Herbst, J. Wöllenstein
03.2023	Zeitschriftenaufsatz	Werkstoffe und Sensoren für die Wasserstoffinfrastruktur	C. Pannek
05.2024	TransHyDE WhitePaper	TransHyDE. Die Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland: Sicher in die Zukunft	C. Pannek et. al.
11.06.2024	Konferenzbeitrag Achema 2024	Entwicklung eines Raman-basierten Sensors zur selektiven Wasserstoff-Bestimmung in komplexen Gasmischungen	G. Stiefvater, C. Bolwien
19.09.2024	Konferenzbeitrag FLAIR 2024	Handheld Laser Spectroscopic Device for Remote Detection of Ammonia	E. Maier, J. Herbst, S. Rademacher, T. Strahl, M. El-Safoury, J. Wöllenstein
07.2025	Masterarbeit	Untersuchung des Fusionierungspotenzials von Wärmeleitfähigkeits- und Ultraschallmesstechnik zur Wasserstoffleckagedetektion	Alexander Hein
03.2025	Video	TransHyDE – Gassensorik zur Erkennung von Leckagen bei Wasserstoff	Fraunhofer IPM

VIII. Literaturverzeichnis

BOSCH BME 680. Online verfügbar unter https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

Pannek, Carolin; Wanzenberg, Elke; Michler, Thorsten; Schweizer, Frank; Alms, Katharina; Hoefer, Ulrich et al. (2024): TransHyDE. Die Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland: Sicher in die Zukunft.

RMA Wasserstoffprüfstand (2025). Online verfügbar unter https://www.rma-armaturen.de/de/wasserstoff-rma/h2-loop/, zuletzt aktualisiert am 10.09.2025.

Weber, Christian: EP 4006506 B1. VERFAHREN ZUM BESTIMMEN EINER EIGENSCHAFT EINES PROBENFLUIDS ODER EINER RESONANZFREQUENZ EINER RESONATORZELLE - European Patent Office

Zakirullin, Rustam (2020): Grating optical filters for smart windows: Materials, calculations and prospects. In: *AIMS Materials Science* 7 (6), S. 720–771. DOI: 10.3934/matersci.2020.6.720.