Fraunhofer IPM

Leitprojekt TransHyDE

TransHyDE-Projekt Sichere Infrastruktur

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

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I: Kurzbericht

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. Ablauf des Vorhabens 7
IV. Wesentliche Ergebnisse 8
IV.1 Ultraschallsensor 8
IV.2 Entwicklung eines Wärmeleitfähigkeitssensors 9
IV.3 NH_3-Ferndetektion mittels Laserspektroskopie 9
IV.4 Farbumschlagssensorik 10
IV.5 Entwicklung eines selektiven Raman-basierten Wasserstoffsensors 11
V. Literaturverzeichnis 13

Abkürzungsverzeichnis

MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Foto des entwickelten Ultraschallsensors. 8
Abbildung 2: Foto des tragbaren Laserspektrometers zur Messung von Ammoniak. 10
Abbildung 3: Gasochromes Material zur Bestimmung von Wasserstoff. 10
Abbildung 4: Messprinzip und Realisierung des Wasserstoff-Raman-Aufbaus. 11
Abbildung 5: Charakterisierung des Raman-Messsystems. 12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gültigkeitsbereich des entwickelten Modells. 9

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 Wasserstoffkonzentrationen.

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 zu Projektbeginn 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 realisiert 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. Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben von Fraunhofer IPM befasste sich mit der Konzeptionierung, Entwicklung, Evaluierung und Bewertung von Gassensoren für eine stationäre und mobile Überwachung von wasserstoff-führenden Infrastrukturen. Das Gesamtprojekt TransHyDE Sichere Infrastruktur gliederte sich in 8 Arbeitspakete (AP). Der Arbeitsschwerpunkt von diesem Teilprojekt lag im AP 7 „Gassensorik für den sicheren Betrieb und die frühzeitige Erkennung von Leckagen“. Im Rahmen des AP 8 „Bestimmung der H_2-Qualität und Detektion von Fremdgasen“ wurden die Entwicklungen des Projektpartners Endress+Hauser unterstützt.

In AP 7.1 wurde eine ausführliche Recherche zu möglichen Sensorprinzipien für eine frühzeitige Erkennung von Leckagen von H_2 und NH_3 bei typischen Anwendungsszenarien durchgeführt. Diese lieferte die Grundlage für alle folgenden Sensorentwicklungen.

Ultraschallsensoren sind eine Möglichkeit zur Bestimmung von Wasserstoff. Aufgrund der geringen Moleküldichte erhöht H_2 die Schallgeschwindigkeit im Gegensatz zu Luft deutlich. Im AP 7.2 wurden zwei unterschiedliche Sensorprinzipien (offenes und geschlossen resonanten Messverfahren) entwickelt. Mit diesem Sensor wurden auch Feldmessungen am H_2-Loop der RMA durchgeführt.

In AP 7.3 wurde ein MEMS-basierter Wärmeleitfähigkeitssensor entwickelt und charakterisiert. Zur Realisierung der Vorgaben im Bereich Eigensicherheit (Functional Safety: Technologieunabhängige Redundanz durch den Einsatz zweier unterschiedlicher Messprinzipien) wurde dieser mit dem resonanten Ultraschallsensor fusioniert.

AP 7.4 befasst sich mit der Entwicklung einer kamerabasierten, laserspektroskopischen Ferndetektion von H_2. Da H_2 kein IR-aktives Gas ist, ist es über die klassische Laserspektroskopie nicht möglich H_2 zu detektieren. Auf Basis eines bestehenden IPM-Patentes (DE102013101610B4) wurde die Möglichkeit untersucht H_2 indirekt zu messen, in dem der durch den Wasserstoff verdrängte Sauerstoff spektroskopisch gemessen wird.

Parallel erfolgte in AP 7.5 die Entwicklung eines mobilen Laserspektrometers zur NH_3-Ferndetektion zur schnellen und gefahrlosen Lokalisierung von Leckagestellen.

Ein anderer Ansatz zur Detektion von H_2 wurde in AP 7.6 „Farbumschlagsbasierte Sensorik zur Erkennung von Leckagen“ untersucht. Es wurden gassensitive Materialien entwickelt und charakterisiert, die in Kontakt mit H_2 sichtbar ihre Farbe ändern.

In AP 8.1 wurde ein Raman-Messsystem zur quantitativen und querempfindlichkeitsfreien Detektion von geringen Wasserstoffkonzentrationen entwickelt.

IV. Wesentliche Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit entwickelte und charakterisierte Fraunhofer IPM eine Vielzahl von unterschiedlichen Messprinzipien und Sensoren zur Detektion von Wasserstoff. Diese besitzen unterschiedliche Eigenschaften mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen. Der Übersicht halber werden die wesentlichen Ergebnisse der entwickelten Sensoren in der Reihenfolge der Arbeitspakete aufgeführt.

IV.1 Ultraschallsensor

Die Charakterisierung des entwickelten Ultraschallsensors liefert folgende Ergebnisse: Die Sensorantwort verläuft linear zur Gaskonzentration (0 ppm 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 untersucht. Insbesondere in Innenräumen kann die Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO_2) unter Umständen höher sein. Da CO_2 die Schallgeschwindigkeit reduziert, zeigt der Sensor ein entgegengesetztes Verhalten. Daher sollte die CO_2-Konzentration zur Kompensation mitgemessen werden. Zudem haben Feuchteschwankungen einen erheblichen Einfluss auf das Messsignal, der zwingend kompensiert werden muss. Sonstige Querempfindlichkeiten liegen im Bereich der theoretischen Werte.

Abbildung 1: Foto des entwickelten Ultraschallsensors.

IV.2 Entwicklung eines Wärmeleitfähigkeitssensors

Im Rahmen des AP 7.2 wurde ein Wärmeleitfähigkeitssensor (WLD) zur Bestimmung von H_2 entwickelt. Dieser basiert auf bekannten MEMS-Strukturen von Fraunhofer IPM. Schwerpunkt des AP 7.2 lag auf der Umsetzung der Vorgaben zur Eigensicherheit sicherheitsrelevanter Sensoren. Daher wurde der Sensor zusammen mit dem Ultraschallsensor und kommerziellen Temperatur- und Feuchtesensoren zu einem Messsystem fusioniert. Die Datenauswertung erfolgte mithilfe eines neuronalen Netzes, das Wasserstoffkonzentrationen anhand der Daten des Sensorverbunds möglichst querempfindlichkeitsfrei detektiert. Der Gültigkeitsbereich des Messsystems ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Gültigkeitsbereich des entwickelten Modells.

H_2-Konzentration in N_2	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

IV.3 NH_3-Ferndetektion mittels Laserspektroskopie

Das entwickelte 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), tragbar (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.

Abbildung 2: Foto des tragbaren Laserspektrometers zur Messung von Ammoniak.

IV.4 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 3). Ist eine Leckage vorhanden, kann die Farbänderung der gasochromen Schicht mit dem bloßen Auge erkannt und bewertet werden. Mit diesem Messverfahren lassen sich Wasserstoffkonzentrationen im ppm-Bereich bis zu wenige % nachweisen.

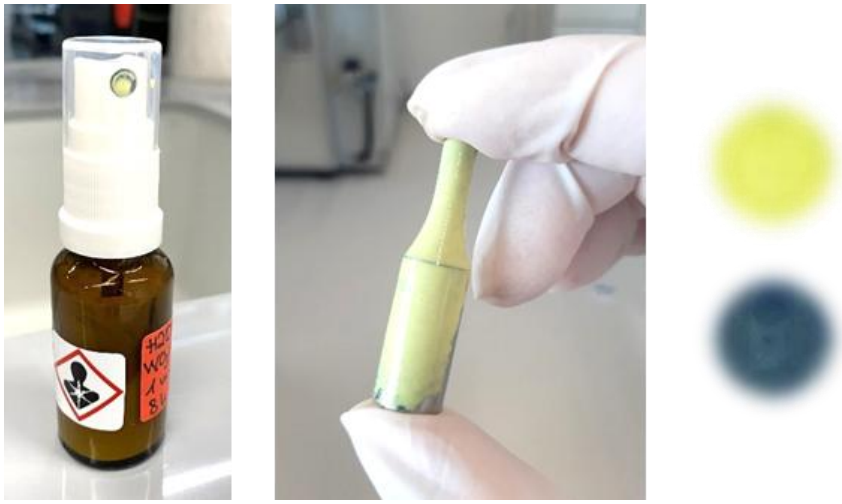

Abbildung 3: Gasochromes Material zur Bestimmung von Wasserstoff. Rechts: vor (gelb) und nach (blau) der H_2-Beaufschlagung.

IV.5 Entwicklung eines selektiven Raman-basierten Wasserstoffsensors

Die Raman-Spektroskopie ermöglicht 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 ist zudem vergleichsweise günstig in der Herstellung. 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, ermöglicht der neue Sensor eine kostengünstigere Lösung. Um die Messgenauigkeit weiter zu steigern, können Parameter wie Laserleistung, Messzeit oder Gasdruck angepasst werden.

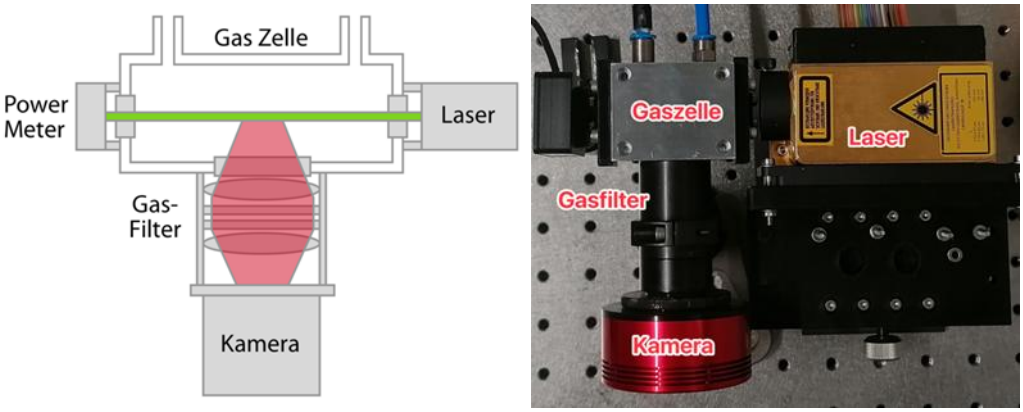

Abbildung 4: Links: Messprinzip und rechts: Realisierung des Wasserstoff-Raman-Aufbaus. Der Laser strahlt durch die Gas-Messkammer und der Strahl wird von der Kamera über einen Filtersatz beobachtet, der ausschließlich Wasserstoff-Raman-Licht durchlässt.

Mit dem Messsystem wurden gasabhängige Messungen durchgeführt. Die Abbildung 5 zeigt eine Stufenmessreihe, bei der Wasserstoff und Argon in unterschiedlichen Anteilen gemischt wurden. Über ein Kalibriermodell wird der Wasserstoffanteil bestimmt. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Wasserstoff-Messung: Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Referenzwerten überein. Darüber hinaus zeigen die Ramanmessung eine sehr gute Linearität sowie eine hohe Stabilität mit 1-σ-Werten von etwa 0,1 % auf den Plateaus. Weitere Messungen mit diversen Gasen, insbesondere den typischen Bestandteilen von Erdgas, bestätigten die querempfindlichkeitsfreie Messung von Wasserstoff.

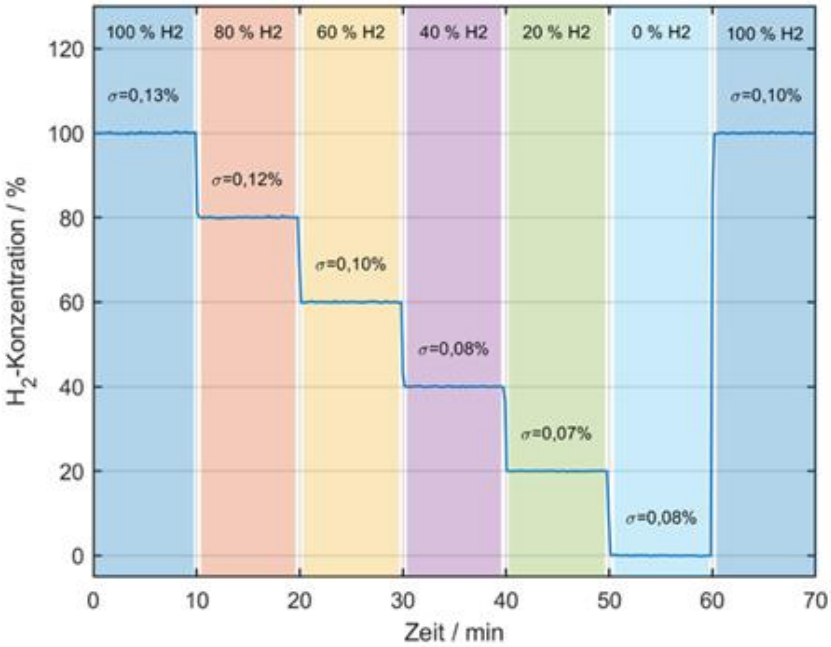

Abbildung 5: Charakterisierung des Raman-Messsystems im Konzentrationsbereich von 0 bis 100 % H_2 in 20 %-Schritten. Das erhaltene Messsignal (blau) zeigt eine exakte Übereinstimmung mit der eingestellten Wasserstoffkonzentration.

Die detaillierte Darstellung der Projektergebnisse ist dem Teil II: Langfassung zu entnehmen.

V. Literaturverzeichnis

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.

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.