

Schlussbericht

WIPANO-Vorhaben

Normgerechte Feuchtemessung in CO₂ unter Berücksichtigung der Ablösung umweltschädlicher Gase in der Industrie" (NORFEUGA)

Zuwendungsempfänger	Mittelgeberzeichen (Förderkennzeichen)
dr. wernecke Feuchtemesstechnik GmbH	03TN0045A
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	03TN0045B
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	03TN0045C
Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)	03TN0045D

Bewilligungszeitraum: 01.10.2022 - 31.05.2025

Berichterstattende: Dr. Roland Wernecke, Dr. Andreas Lorek, Dr. Carlo Tiebe,
M. Sc. Sascha Dessel

Ort/Datum: Berlin/19.11.2025

Gefördert vom:



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

1 Kurzdarstellungen

1.1 Aufgabenstellung

Allgemein: Das Gas Schwefelhexafluorid (SF_6) ist eines der stärksten bekannten Treibhausgase und wird wegen seiner Isoliereigenschaften in Mittel- und Hochspannungsanlagen eingesetzt. Aufgrund seines hohen Treibhauseffekts ist es in den Fokus der Europäischen Union gerückt [1] und soll durch andere Gasgemische, die teilweise einen hohen CO_2 -Anteil enthalten, substituiert werden. Ein wesentlicher Punkt, um die Durchschlagsfestigkeit und Korrosion in SF_6 wie auch in den alternativen Gasen zu gewährleisten, ist die Sicherstellung eines geringen Wasserdampfgehaltes in diesen Gasen. Jedoch zeigen die bisher verwendeten Messmethoden zur Feuchtemessung in SF_6 (Taupunktspiegel [2] und kapazitive Polymerfeuchtesensoren) eine Querempfindlichkeit zu CO_2 . Etablierte, alternative Messmethoden existieren nicht, da die Spurenfeuchtemessung in CO_2 bisher keinen großen Stellenwert hatte. Für exaktere Messungen, zur Erhöhung der Messgenauigkeit und damit zur Qualitätssicherung der Ergebnisse besteht die Notwendigkeit, vorhandene Sensoren auf ihre Eignung und Kalibrierfähigkeit in CO_2 zu testen, weiterzuentwickeln und zuverlässige Messsysteme für die Feuchtigkeit in CO_2 herzustellen. Eine deutschland- oder europaweite Standardisierung der geeigneten Sensortypen ist notwendig.

Daraus ergaben sich folgende Aufgabenschwerpunkte:

- Auswahl geeigneter Sensoren und Referenzmesssysteme für Feuchtemessungen in CO_2
- Aufbau/Inbetriebnahme von Experimentaufbauten (Messzellen, Messsysteme, Gasaufbereitung etc.)
- Entwicklung und Prüfung geeigneter Messverfahren
- Recherche zu bestehenden Messverfahren/Messergebnissen/Publicationen/Standards
- Einbeziehung von Fachleuten aus Industrie/Forschung/Standardisierung in einer Arbeitsgruppe
- Zusammenfassung der Ergebnisse zu Publikationen und Erstellung eines Richtlinienentwurfs, der final deutschland- und europaweit Gültigkeit hat

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde von vier, nachfolgend aufgeführten, Projektpartnern gemeinsam durchgeführt. Zusammen verfügen sie über eine hohe Expertise hinsichtlich Experimentaufbau, Durchführung, Analyse und Standardisierung im Bereich der Gasfeuchte und speziell der Spurenfeuchte.

Es sind Verzögerungen im Vorhaben eingetreten, die vor allem durch unerwartet lange Lieferzeiten von Bauteilen bzw. Messgeräten verursacht wurden und zu einer kostenneutralen Verlängerung führten.

dr. wernecke Feuchtemesstechnik GmbH (dwF): Die seit 1991 bestehende Firma ist auf die Entwicklung, den Bau und die Vermarktung von Feuchtemesstechnik spezialisiert. Schwerpunkt ist die Entwicklung von Hard-, Software sowie von Messverfahren zur Bestimmung der Feuchte/Wassergehalt in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen. In den vergangenen Jahren wurden Spurenfeuchtemessgeräte für den industriellen Einsatz entwickelt, patentiert, in Serienfertigung gebaut und deutschlandweit sowie international vermarktet. Seit Jahren befasst sich die Firma mit der Weiterentwicklung von Sensoren zur coulometrischen Spurenfeuchtemessung. Eine Gerätefamilie, die auf diesem Messprinzip basiert, wird in Serie

gefertigt. Die Firma unterhält ein DAkkS-akkreditiertes Kalibrierlabor für die Messgrößen Gasfeuchte, Temperatur, Wasseraktivität. Die Kalibrierung von Messgeräten und die Rückführung von Messdaten auf den nationalen/internationalen Standard erfolgt mit den Sensoren aus eigener Fertigung. Ebenfalls wird die Kalibration von Messgeräten als Dienstleistung der Industrie angeboten. Seit mehr als 10 Jahren arbeitet die Firma in VDI/VDE Fachausschüssen (u.a. Fachausschuss Feuchte zur Erarbeitung von Richtlinien zur Feuchtemesstechnik) aktiv mit. Die VDI/VDE Richtlinie 3514 wurden inhaltlich 2019 fertig gestellt.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): Die BAM beschäftigt sich im Fachbereich 8.1 Sensorik, Mess- und Prüftechnische Verfahren mit Aufgaben der zerstörungsfreien Prüfung, um den sicheren, bestimmungsgemäßen Zustand von Material, Produkten, Anlagen und Systemen zu gewährleisten. Konkret werden Sensorik und messtechnische Verfahren in der Praxis eingesetzt, neue Verfahren und Technologien entwickelt und validiert, bestehende Verfahren und Technologien verbessert und die Entwicklung von Regelwerken dafür unterstützt. Durch langjährige Untersuchungen an Gas- und Feuchtesensoren verfügt der Fachbereich über eine gute experimentell-analytische Ausrüstung, die projektspezifisch durch gezielte Investitionen verbessert werden muss. Die Ergebnisse des Fachbereiches sind national und international bekannt und flossen in zahlreiche technische Entwicklungen und Richtlinien ein, die in kommerziellen Produkten genutzt werden.

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): Der VDI e.V. ist der drittgrößte technische Regelsetzer in Deutschland. Die technische Regelsetzung basiert auf der Mitarbeit von etwa 10.000 ehrenamtlichen Experten, die in 55 Fachbereichen und 12 VDI-Fachgesellschaften organisiert sind. Die konsensorientierte und unabhängige Arbeit in den technisch-wissenschaftlich neutralen Gremien mit ehrenamtlich tätigen Experten aus allen relevanten Fachkreisen ist Selbstverständnis des VDI. Die geplante Richtlinie soll im Fachbereich Prozessmesstechnik & Strukturanalyse der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) bearbeitet werden. Das Thema Gasfeuchtemessung hat den VDI schon seit längerem beschäftigt. Ab 2004 wurde in der GMA die Richtlinienreihe VDI/VDE 3514 „Gasfeuchtemessung“ erarbeitet.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): In der Abteilung „Planetare Labore“, im Labor PASLAB (Planetary Analog Simulation Laboratory) des DLR-Instituts für Weltraumforschung liegen über Jahrzehnte gewonnene Erfahrungen in der Feuchtemesstechnik vor. Insbesondere gibt es Expertisen in den Bereichen Feuchtemessung mit kapazitiven und coulometrischen Sensoren und in der Feuchtegenerierung bis in den Spurenfeuchtebereich. Für Experimente unter Marsbedingungen erfolgten Sensorentwicklungen und Experimentaufbauten, um unter extremen Bedingungen messen und simulieren zu können. Der Fokus liegt hier auf der präzisen Messung und Generierung geringer atmosphärischer Feuchte. Hierzu existiert eine langjährige Zusammenarbeit mit der Industrie mit daraus resultierenden Patenten und Patentanmeldungen im Bereich der Sensor- und Geräteentwicklung für die Gas- und Materialfeuchte. Von besonderem Interesse für das Labor ist die Messung der Gasfeuchte in CO₂, da dies für die Simulation der Marsatmosphäre mit einem Anteil von 96% CO₂ von großer Bedeutung ist. Hinsichtlich kapazitiver Polymersensoren wurde eine starke Querempfindlichkeit gegenüber CO₂ bereits nachgewiesen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für den Projektantrag wurden die einzelnen Arbeitspakete für die jeweiligen Projektpartner erstellt, die Verantwortlichkeiten festgelegt und der Zeitraum für die Abarbeitung definiert. Insgesamt gab es 6 Arbeitspakete:

- AP1 Design der Testeinrichtungen, Auswahl der Hardware, Aufbau
AP-Verantwortlicher (Dr. Lorek, DLR), beteiligte Partner DLR, dwF, BAM, VDI
- AP2 Auswahl der Messverfahren und Messmethodik
AP-Verantwortlicher (Dr. Wernecke, dwF), beteiligte Partner DLR, dwF, BAM, VDI
- AP3 Charakterisierung der Sensoren in gemischten CO₂-Atmosphären
AP-Verantwortlicher (Dr. Garland, DLR), beteiligte Partner DLR, dwF, BAM, VDI
- AP4 Validierung der Messungen
AP-Verantwortlicher (Dr. Tiebe, BAM), beteiligte Partner DLR, dwF, BAM, VDI
- AP5 Beschreibung/Erarbeitung der Messmethoden
AP-Verantwortlicher (Dr. Tiebe, BAM), beteiligte Partner DLR, dwF, BAM, VDI
- AP6 Erstellung einer Richtlinie und Verbreitung
AP-Verantwortlicher (Herr Dessel, VDI), beteiligte Partner DLR, dwF, BAM, VDI

Bei dem AP-Verantwortlichen lag der Schwerpunkt des Arbeitspaketes. Die Arbeitspakete AP1 und AP2 wurden, soweit möglich, im ersten Halbjahr des Projekts abgearbeitet. AP3 und AP4 starteten ca. 6 Monate nach Beginn des Projektes und waren für ca. 8 bis 10 Monate angesetzt. AP5 und AP6 wurden im Wesentlichen das ganze Vorhaben über bearbeitet.

Bei der Planung des Projektes waren einige nationale und weltwirtschaftliche Rahmenbedingungen, die das Projekt betrafen, noch nicht absehbar bzw. konnten noch nicht berücksichtigt werden:

- teilweise wesentlich längere Lieferzeiten von elektronischen Bauelementen und Baugruppen sowie Laborausrüstung (betrifft auch Standardbauteile mit Lieferzeiten bis 4-6 Monaten)
- teilweise dramatische Verteuerung von Bauteilen. Die Folge war unter anderem, dass Geräte- und Baugruppen-Lieferungen, die im Vorfeld in Angeboten zugesagt wurden, von einigen Lieferanten nicht mehr eingehalten wurden.
- Der Kauf eines optischen Referenzgerätes (CRDS-Prinzip) hielt die zugesagten technischen Daten nicht ein, sodass Ersatz dafür gefunden werden musste, was Verzögerungen in einzelnen Arbeitspaketen nach sich zog.
- Beim Aufbau von Test- und Experimentierplätzen kam es zu Verzögerungen.
- Weiterhin wurde Gerätetechnik, die als Kompletgerät bezogen werden sollte, nun als Einzelmodule zugekauft und in Eigenleistung an die Messplätze angepasst und aufgebaut.

Aus den genannten Gründen, die bei einzelnen Arbeitspaketen zu Verzögerungen führten, wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um 8 Monate beantragt und genehmigt.

1.4 wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

SF₆ ist ein chemisch nahezu inertes Gas und wird aufgrund seiner hohen Durchschlagsfestigkeit in Mittel- und Hochspannungsanlagen eingesetzt und mit den elektrischen Bauteilen in der Schaltungseinheit gasdicht verkapselt. Die Isolationsfestigkeit dieses Gases wird durch Verunreinigungen stark herabgesetzt, was die Durchschlagsspannung verringert und zu frühzeitiger Funkenbildung führt. Die problematischste Verunreinigung ist Wasser [3], welches die Rekombination von Schwefel und Fluorid zu Schwefelhexafluorid verhindert, eine saure Atmosphäre schafft und zudem Korrosion fördert und Leckagen verursacht. Diese Umstände sind für ca. 57 % aller Ausfälle in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) verantwortlich [4] und stellen ein hohes Sicherheitsrisiko für Personal und Umwelt dar. Speziell der Umweltaspekt wird von der Europäischen Union neu bewertet [1], da SF₆ eines der stärksten bekannten Treibhausgase ist und ein Treibhauspotenzial [5] verursacht, das 35000-mal größer ist verglichen mit CO₂ [6]. Aus diesem Grund soll der Einsatz von SF₆ in der EU soweit möglich verringert und durch andere Gase als Isoliermedium in Mittel- und Hochspannungsanlagen ersetzt werden [7, 8]. Die Industrie hat daher alternative Gase entwickelt wie z. B. - General Electric Company "Green Gas for Grid g³" (Mischung aus 3M's Novec 4710 und CO₂), - ABB Asea Brown Boveri Ltd "AirPlus" (Mischung aus O₂, N₂, CO₂ und C5-Fluoroketonen), - Siemens AG "Clean air" (80 % N₂ und 20 % O₂), wobei die genaue Zusammensetzung der Gasgemische teilweise noch nicht veröffentlicht ist bzw. noch weitere Gasgemische entwickelt werden könnten [7, 9]. Auch bei diesen Gasen ist die Feuchteüberwachung bei der Herstellung der elektrischen Baugruppen und teilweise auch während des Betriebes essenziell, um eine ordnungsgemäße Isolierung zu gewährleisten und die Korrosion von Komponenten zu minimieren. Problematisch ist jedoch, dass in den genannten Gasgemischen zum Teil CO₂ eingesetzt wird, was zu Messfehlern von 70 % und mehr führen kann [10]. Typische Technologien zur Feuchtigkeitserfassung bei SF₆ sind bisher das Taupunktspiegel-Verfahren und der kapazitive Polymersensor, wobei letzterer aufgrund seiner geringen Größe, niedrigen Kosten und in den meisten Fällen ausreichender Genauigkeit, am häufigsten eingesetzt wird. Aufgrund einer teilweise starken Querempfindlichkeit ist derzeit keine der beiden Technologien in der Lage, Feuchtigkeit in CO₂ präzise zu messen. Die Ursache könnte beim Taupunktspiegel in der Bildung von Hydraten auf der Sensorfläche liegen, da sich CO₂ in Wasser sehr gut löst [11] und es dadurch zu einer Taupunktverschiebung bei der Messung kommt [12]. Bei den kapazitiven Feuchtesensoren kann es zudem zu einer Wechselwirkung der CO₂-Moleküle mit den Adsorptionsstellen auf der Polymerschicht kommen, was ein Andocken der H₂O-Moleküle erschwert [10]. Die derzeit verfügbaren Feuchtesensoren sind in Luft und Stickstoff im Allgemeinen ausreichend getestet und qualifiziert und die theoretischen Grundlagen der Thermodynamik (Sättigungskurve von Wasserdampf; Berechnungsgrundlagen; Umrechnungsgleichungen zur Angabe von Wasserdampfkonzentrationen etc.) beziehen sich ebenfalls auf das Gasgemisch Wasserdampf in Luft/Stickstoff. Jedoch liegen kaum Daten für die Eignung dieser Sensoren in anderen Gasen vor. Zu finden sind lediglich vereinzelt Messkurven von Wasserdampf in bestimmten Gasen, dabei fehlen meist die thermodynamische Beschreibung sowie Angaben zur Temperatur- und Druckabhängigkeit. Die zwei oben genannte Messmethoden decken fast den gesamten Messbereich der Feuchte ab, von nahezu Sättigung des Gases mit Wasserdampf bis in den Spurenfeuchtebereich von weniger als 0,5ppm_v. Während für den höheren Feuchtebereich im Wesentlichen die kapazitiven Polymersensoren verwendet werden, ist das für den Spurenfeuchtebereich nicht möglich. Daher wird hier hauptsächlich der Taupunktspiegel eingesetzt. Ein Taupunktspiegel ist jedoch sehr kostenintensiv sowie nur bedingt im laufenden Prozess einsetzbar und aufgrund seiner Querempfindlichkeit in CO₂ nicht uneingeschränkt verwendungsfähig. Als Alternative bieten sich hier, von den Projektpartnern, neuentwickelte, coulometrische Sensoren an, die ebenfalls im Spurenfeuchtemessbereich einsetzbar sind.

Eine Recherche auf <https://foerderportal.bund.de/foekat/jsp/SucheAction.do> und <https://www.foerderdatenbank.de> mit den Suchbegriffen SF₆, Feuchtemessung, CO₂, Kohlendioxid, Standardisierung, Normung, standardization, humidity, carbon dioxide ergab keine Treffer auf ein laufendes bzw. ehemaliges gefördertes Vorhaben in Deutschland oder der EU. Der Durchführung des Projektes standen auch keine Schutzrechte bzw. Schutzrechtanmeldungen entgegen, da entweder freikäufliche Sensoren unter CO₂-Atmosphäre getestet bzw. eigene, durch Patente bzw. Patentanmeldungen [13, 14], gesicherte, Sensoren verwendet wurden. Eine Patentrecherche auf <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet> mit den Suchbegriffen CO₂, Feuchtemessung, humidity measurement, carbon dioxide lieferte keine relevanten Schutzrechte die der Ausführung des Projektes entgegenstehen.

Im Projekt wurde auf der bestehenden Richtlinienreihe VDI/VDE Richtlinie 3514 aufgebaut. Diese Reihe wurde um das Blatt 4 als Richtlinienentwurf erweitert [15].

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Richtlinienarbeit im Projekt wurde die Firma DILO eingebunden. Grundlage hierfür ist, dass gemäß den Grundsätzen der VDI-Richtlinienarbeit alle interessierten Kreise vertreten sein sollen (vgl. VDI 1000 [16]). Da die Richtlinie die Feuchtemessung in Kohlendioxid (CO₂), das als alternatives Isoliergas zu SF₆ in Mittel- und Hochspannungsanlagen eingesetzt werden soll, behandelt, war die Einbindung eines Herstellers von Schaltanlagen naheliegend. Durch die Mitwirkung eines Vertreters der Firma DILO konnte die erforderliche Praxisexpertise in den Erstellungsprozess der Richtlinie eingebracht werden.

2 Eingehende Darstellungen

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Gesamtziel des Vorhabens: Das Gas SF₆ wird wegen seiner Isoliereigenschaften in Mittel- und Hochspannungsanlagen eingesetzt. Als eines der stärksten bekannten Treibhausgase ist es in den Fokus der Europäischen Union gerückt [1] und soll durch andere Gasgemische, die teilweise einen hohen CO₂-Anteil enthalten, substituiert werden. Ein wesentlicher Punkt, um die Durchschlagsfestigkeit und Korrosion in SF₆ wie auch in den alternativen Gasen zu gewährleisten, ist die Sicherstellung eines geringen Wasserdampfgehaltes in diesen Gasen. Jedoch zeigen die bisher verwendeten Messmethoden zur Feuchtemessung in SF₆ eine Querempfindlichkeit zu CO₂. Etablierte, alternative Messmethoden existieren nicht, da die Spurenfeuchtemessung in CO₂ bisher keinen großen Stellenwert hatte. Für exaktere Messungen, zur Erhöhung der Messgenauigkeit und damit zur Qualitätssicherung der Ergebnisse besteht die Notwendigkeit, vorhandene Sensoren auf ihre Eignung und Kalibrierfähigkeit in CO₂ zu testen, weiterzuentwickeln und zuverlässige Messsysteme für die Feuchtigkeit in CO₂ herzustellen. Ein deutschland- oder europaweiter Standard für Messungen der Feuchte in CO₂ ist notwendig.

Ergebnisse: In Vorbereitung und während des Projekts wurden intensive Recherchen durchgeführt, um die Notwendigkeit der Feuchtemessung in CO₂ zu ermitteln, das vorhandene Wissen zu bündeln und das geeignete technische Equipment auszuwählen. Es wurden Experimentplätze aufgebaut, Messzellen aus Vakuumbauteilen entwickelt und gefertigt. Messsysteme/Geräte gekauft, programmiert und kalibriert.

Es erfolgten mehrmonatige Experimente mit ausgewählten Sensortypen, um einen großen Feuchtebereich abzudecken und deren Eignung im Temperaturbereich -20°C bis 50°C im Spurenfeuchtebereich von ca. 2 bis 400 ppm_v und im relativen Feuchtebereich von 5% bis 95% relativer Feuchte zu erfassen. Zudem erfolgte der Nachweis, dass der Taupunktspiegel als Referenzmesssystem auch unter CO₂ Atmosphäre zur präzisen Feuchtemessung geeignet ist. Die Ergebnisse und weiteren Arbeitsschritte wurden in mehreren Projektmeetings diskutiert und zusammengefasst. Zur Erstellung einer Richtlinie wurde ein Fachausschuss gegründet, in dem die Teilnehmer des Vorhabens und ein externer Industrievertreter die Erkenntnisse aus den Experimenten, das Wissen aus der Industrie in einen Richtlinienentwurf (VDI/VDE 3514 Blatt4 [15]) überführten. Der Richtlinienentwurf wurde am 01.08.2025 veröffentlicht. Damit wurde das Ziel, einen Entwurf eines deutschlandweiten Standards zu erstellen, vollständig erreicht. Eine Veröffentlichung der Messergebnisse ist zu Zeit in Arbeit.

Für die Durchführung des Projektes wurde unterschiedlichen Sensoren und Messverfahren untersucht. Die finanziellen Mittel wurden dementsprechend verwendet:

- Beschaffung von Sensoren
- Beschaffung von Prozessmesstechnik
- Zukauf von Komponenten für die Testaufbauten

Zu dieser Hardware erfolgten Entwicklungen, die Personalkosten beinhalteten:

- Softwareentwicklung zur Steuerung
- Softwareentwicklung zur Bedienung von Versuchstechnik.

Weitere Personalkosten wurden eingesetzt für:

- Entwicklung der Messmethoden
- Anpassung der unterschiedlichen Messaufbauten
- Auswertung von Messdaten
- Vergleich und Validierung der Messergebnisse
- Erarbeitung der Richtlinie [15]

2.1.1 Design der Testeinrichtungen, Auswahl der Hardware, Aufbau

In diesem AP wurden die Designs der Testaufbauten festgelegt und die spezifischen Feuchtesensoren sowie die Elektronikkomponenten ausgewählt und bestellt. Die Sensoren sollen die benötigten Gasfeuchtebereiche, von 0,5 ppm_v bis 400 ppm_v und 5 % bis 95 % rel. Feuchte und den Temperaturbereich -20°C bis 55°C abdecken. Die Steuerung und Datenerfassung wurde auf den parallelen Betrieb mehrerer Sensoren ausgelegt, um eine fundierte Datenbasis zu erhalten. Außerdem wird ein Feuchtereferenzsystem gekauft, aufgebaut und umfangreich getestet. Mit diesem muss die Feuchte gasartunabhängig gemessen werden können. Die Gasmischungen wurden festgelegt und die Gasmischsysteme am DLR und der BAM erweitert, um die Mischungen zu erzeugen.

In vorrausgegangenen Messungen mit einem Spurenfeuchtegenerator ergaben sich Hinweise, dass Messzellen mit einer Dichtung aus Kunststoff für Feuchtemessungen unter -70°C Frostpunkt (ca. 2,6 ppm_v) für Wasserdampf zu durchlässig sind und es zu einer Verschiebung der Kennlinie zu höheren Messwerten kommt. Aus diesem Grund wurde beschlossen, statt der vorhandenen Messzellen, neue Messzellen (Abbildung 1) zu konstruieren und fertigen zu lassen. Diese bestanden aus 26mm Edelstahlrohr mit verschweißten CF-DN 16 Stutzen für den Gas- ein und Ausgang Einem CF-DN25 Anschlussflansch für die Sensoreinbringung.

Diese Messzellen bestehen im Wesentlichen aus Vakuumbauteilen damit zur Abdichtung Kupferdichtungen verwendet werden können. Des Weiteren wurden vakuumdichte, 12-polige, elektrische Durchführungen in einem CF-DN25 Flansch verwendet, um die Sensoren anzuschließen und sie in die Messzelle zu bringen, Abbildung 1.



Abbildung 1: Messzelle mit 6 mm Gasanschlüssen, CF-Flanschen mit gasdichter Kontaktierung, der orange-gepunktete Rahmen stellt die Sensorposition innerhalb der Messzelle dar.

Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus einem Gasmischsystem (A1 in Abbildung 2), aus dem das definierte befeuchtete Gasgemisch über einen 6-Wege-Verteiler (A2) in eine Temperaturtestkammer (A3) geleitet wird. Diese enthält bis zu 5, mit den zu prüfenden Sensoren, bestückte Messzellen (A4). Nach dem Passieren der Messzellen läuft das Gasgemisch aus der Temperaturtestkammer zu einer 5-Wege-Massendurchflussmesser-Messstation (A5) und wird dann an die Umgebung abgegeben. Die Verbindung zwischen den einzelnen Systemen wird mit Edelstahlrohren und Swagelok Edelstahlrohrverbindungen hergestellt. Folgende (Mess)-systeme kamen zum Einsatz: Als Gasfeuchtereferenzsystem der MBW 373LX Taupunktspiegel (M1), 3Kanal-Multiplexer (M2 und ein Amperemeter Keithley 6485) für die drei planaren coulometrischen Sensoren, ein SHT85 Catcher (M4) von der Firma dwF für das Auslesen der SHT85 Sensoren sowie ein Keithley 2701 Multimeter für den Glasstabsensor und ein PC und NI DAQ-System zur Auslesung des Easidew, HC2A, FA545 und des Glasstabsensors sowie zur Kontrolle des gesamten Systems basierend auf einer LabVIEW Software.

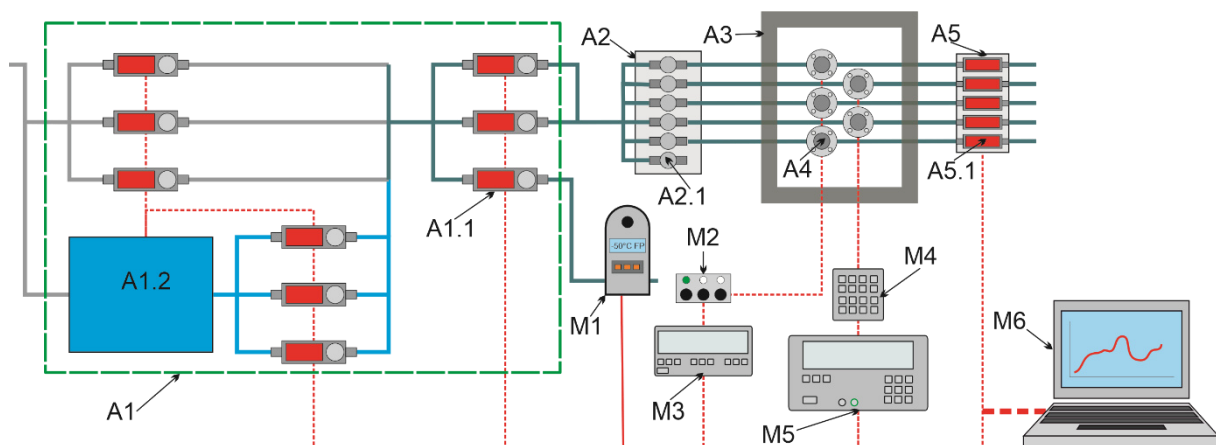


Abbildung 2: Rohrleitungs- und Instrumentierungsplan (RI) zur Erzeugung und Bestimmung von Gasfeuchten.

Zur Validierung der unter Laborbedingungen wurde das Befeuchtungsmodul des Gasmischsystems (GMS) verfahrenstechnisch weiterentwickelt [17]. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wurde in einer Masterarbeit validiert und zur Untersuchung des Degradationsverhaltens von Perovskit-Kristallen mit Spurenfeuchtegehalten in Stickstoff angewandt [18].

Mit dem Gas-Mischsystem (GMS) in Abbildung 3 lassen sich zertifizierte Prüfgase mit bekannten Stoffmengenanteilen aus Druckgasflaschen präzise mit einem Trägergas verdünnen und befeuchten. Dies erfolgt über eine Kombination aus pneumatischen Ventilen und thermischen Massendurchflussregler (MFR). Durch Anpassung des Mischungsverhältnisses ist eine Verdünnung der Prüfgase bis zu einem Verhältnis von 1:200 möglich. Zur präzisen Steuerung der Gasströme stehen Massendurchflussregler mit unterschiedlichen Regelbereichen zur Verfügung. Die gesamte Prozesssteuerung übernimmt ein zentraler Steuerrechner, der das vollständige Messplatzprogramm enthält. Dieser Rechner ermöglicht:

- eine manuelle oder automatisierte Steuerung des Messplatzes,
- den Ablauf automatisierter Messsequenzen,
- sowie Speicherung der Messdaten.

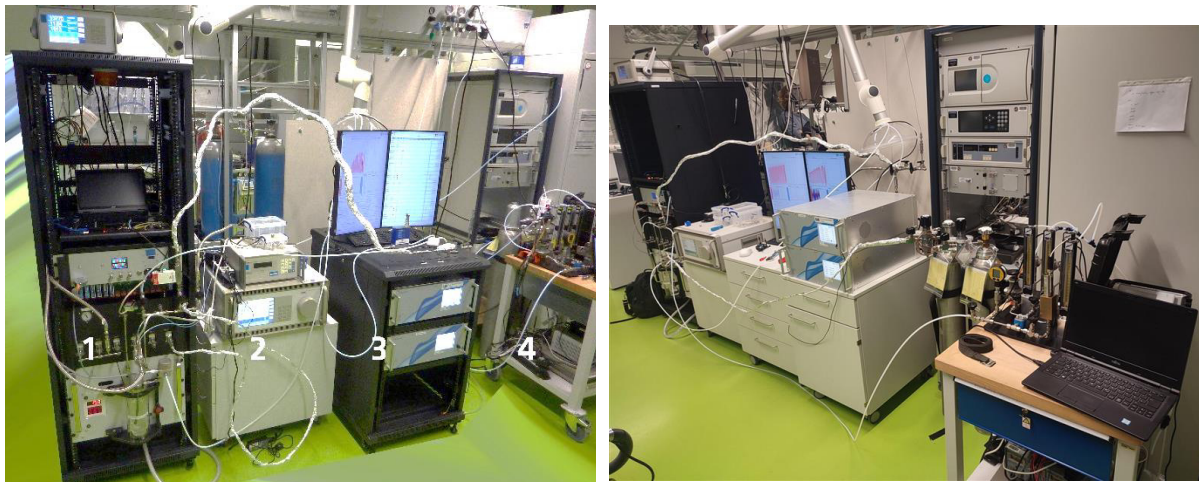


Abbildung 3: Linke Abbildung: Messplatz bestehend aus 1) Gasmischsystem, 2) Taupunkthygrometer, 3) Spektroskop und 4) Sensormessplatz
Rechte Abbildung zeigt den Messplatz aus einem alternativen Blickwinkel.

2.1.2 Auswahl der Messverfahren und Messmethodik

Dieses Arbeitspaket wurde gleichzeitig mit AP1 ausgeführt. Das Ziel ist eine detaillierte Messmethodik und -planung. Im Rahmen der Industrie-Anforderungen müssen die genauen Verfahren (Sensor-Spannungsamplitude und -form, Gasströmungsgeschwindigkeit, Systemabdichtung usw.) sowie die Methodik (Feuchte- und Temperaturstufen bei der Kalibrierung, Variation des CO₂-Gehaltes der Gase usw.) definiert werden. Außerdem wird eine Datenaustauschplattform errichtet, um die neuesten Daten zwischen den Partnern auszutauschen.

Es wurde mit Fokus auf H₂O in CO₂-haltigen Gasen geprüft, welche Messtechnik am Markt verfügbar ist, und ob diese für den Einsatzzweck online-Überwachung geeignet ist bzw. mit überschaubarem Aufwand geeignet ertüchtigt werden kann. Hierbei sind insbesondere die Bestimmungsgrenze (LOD) und Matrixtoleranz von Bedeutung. Insbesondere sollen die für die Messsysteme auf ihre Tauglichkeit zur Anwendung in CO₂ untersucht werden.

Zur Online-Erfassung der Gasfeuchte stehen grundsätzlich eine Vielzahl hygrometrischer Messtechniken zur Verfügung. Neben dem Kondensationsverfahren (Taupunkthygrometer) sind

eine Vielzahl kommerziell verfügbarer spektroskopischer Verfahren wie Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Tunable diode laser spectroscopy (TDLAS), Cavity-enhanced Ringdown spectroscopy (CRDS) und Optical Feedback Cavity-enhanced Absorption Spectroscopy (OFCEAS) und auch massenspektrometrische Verfahren (MS) einsetzbar.

In Mittel- und Hochspannungsanlagen mit SF_6 liegt der Grenzwert der Feuchtigkeit bei 200 ppm_v [19]. Das entspricht einer Frostpunktemperatur von -35,9 °C (t_f) oder 39,4 °C Taupunkt (t_d). Diese Luftfeuchtigkeit ist für viele kapazitive Polymersensoren die untere Grenze für die Messung, die in der Regel die relative Luftfeuchtigkeit (U_w) messen. Andererseits ist diese Feuchtigkeit gut zu messen für Spurenfeuchte-Sensoren wie Aluminiumoxid-Sensoren oder coulometrische Sensoren, die die absolute Luftfeuchtigkeit messen.

Für die Experimente wurden mehrere Sensoren ausgewählt. Die Auswahl basiert in erster Linie auf der Eignung für den Feuchtemessbereich, der weiten Verbreitung des Sensors und der Erfahrung mit diesen Sensoren.

kapazitive Polymersensoren

Sie basieren im Wesentlichen auf der Veränderung der hygroskopischen Polymere. Diese Veränderung kann z.B. kapazitiv, über Widerstand oder mechanisch (Piezo-Sensoren) erfasst werden [22].

HC2A-S3 rotronic messgeräte gmbh [20], (Abbildung 4-A)

Messbereich: 0 ... 100 % rh

Genauigkeit: $\pm 0,8$ %rF

FA545 CS INSTRUMENTS GmbH & Co. KG [21], (Abbildung 4-B)

Messbereich: -80 °C bis 20 °C t_d

Genauigkeit: ± 2 °C

Dieser Spezialsensor, für die DILO Armaturen und Anlagen GmbH, speziell gefertigt für schnelleres Ansprechen ist nahezu identisch mit FA515 von CS Instruments GmbH & Co. KG.

SHT85 Sensirion AG [23] (Abbildung 4-C)

Messbereich: 0 ... 100 % rh

Genauigkeit: $\pm 1,5$ %rF von 0 bis 80 %rh als Steigerung bis zu 2 % bei 100 %rh

Diese Sensoren wurden bereits unter extremen Bedingungen getestet [10, 24, 25].

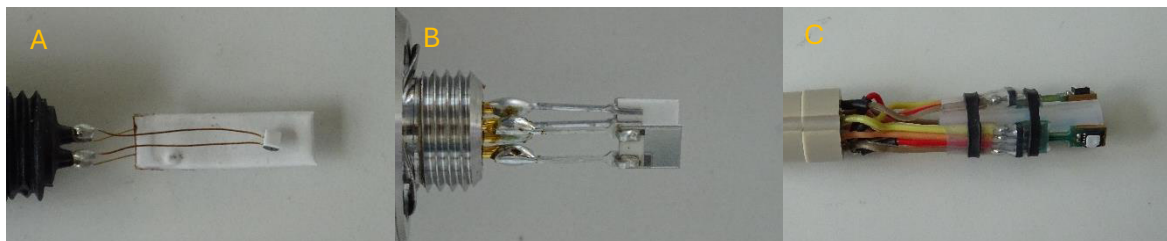


Abbildung 4: A) Rotronic Hygroclip, B) CS Instruments FA545, C) Sensirion SHT-85

Spurenfeuchtesensoren

keramischer Metalloxidsensor: Bei diesem Sensor befindet sich zwischen zwei Elektroden ein poröses Aluminiumoxid als Dielektrikum. Wassermoleküle dringen durch die obere, aufgedampfte Elektrode in das Dielektrikum ein und verändern die elektrischen Eigenschaften. Es wird der relative elektrische Widerstand gemessen, der im Verhältnis zum Wasserdampfdruck steht [26].

Easidew Michell Instruments Ltd [27]

Messbereich: -100 bis +20 °C t_d

Genauigkeit: ± 2 °C

coulometrischer Feuchtesensor (Abbildung 5): Je nach Ausführung misst dieser Sensortyp die Feuchtigkeit im Bereich von 0,1 bis 2000ppm_v [26]. Das stark hygroskopische Di-Phosphorpentoxid (P_2O_5) befindet sich auf der Oberfläche des Sensors. Dieses Oxid absorbiert den Wasserdampf aus dem durchströmenden Gas und wird in Phosphorsäure umgewandelt. Wenn ein elektrisches Feld angelegt wird, wird diese Verbindung elektrolytisch gespalten und wieder in P_2O_5 umgewandelt, wobei Sauerstoff und Wasserstoff freigesetzt werden. Pro gespaltenes Molekül werden zwei Elektronen freigesetzt. Der resultierende Elektrolysestrom ist direkt proportional zur Menge des absorbierten Wassers. Daraus ergibt sich für einen definierten Volumenstrom eine Kennlinie für den Sensor [26].

Für die Experimente wurden zwei Sensorvarianten ausgewählt. Bei der einen handelt es sich um einen Glasstabsensor, der seit Jahren von der dr. wernecke Feuchtemesstechnik GmbH in der Industrie eingesetzt wird, und bei der anderen um einen Planarsensor, der in Zusammenarbeit mit demselben Unternehmen entwickelt wurde.

Insgesamt wurden 100 coulometrische Feuchtigkeitssensoren für dieses Projekt und darüber hinaus hergestellt. Abbildung 6 zeigt ein zusammengesetztes Bild der visuellen Untersuchung eines der Sensoren. Die interdigitalen Strukturen stellen eine elektrische Verbindung zum feuchtigkeitsempfindlichen Material her, das zwischen ihnen blau dargestellt ist. Ein Sensorausschnitt mit höherer Vergrößerung ist in Abbildung -A) dargestellt. Abbildung -B) zeigt ein Höhenprofil zwischen den Elektroden.

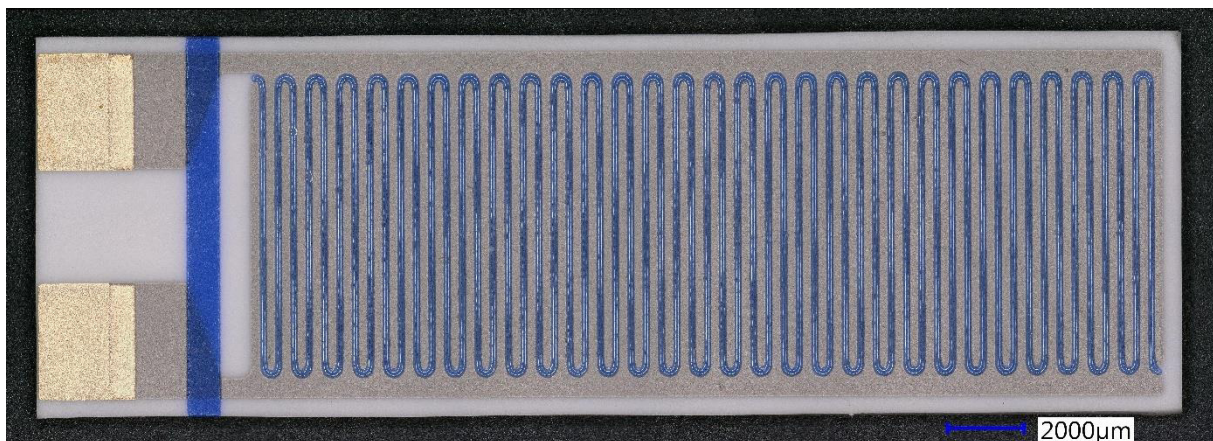
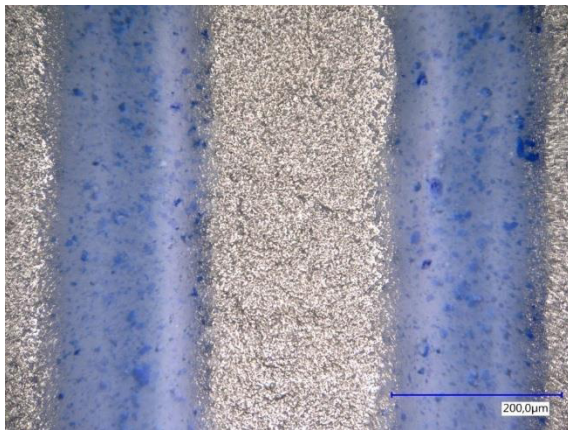
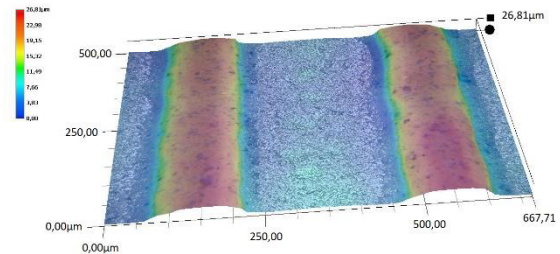


Abbildung 5: Draufsicht eines coulometrischen Feuchtesensors mit Goldkontakten und einer Interdigitalstruktur aus Platin.



A)



B)

Abbildung 6: A) Detailansicht der Interdigitalstruktur eines coulometrischen Sensors
B) Höhenprofil eines coulometrischen Sensors ohne Beschichtung.

Referenzhygrometer

Taupunktspiegelhygrometer

Tabelle 1: Referenzhygrometer nach dem Prinzip Kondensationsverfahren.

Parameter	Beschreibung
Name	373LX
Hersteller	MBW Calibrations AG
Prinzip	Kondensationsverfahren
Seriennummer	19-0416
Messtechnischer Einsatzbereich	-90 °C bis 20 °C Frost-/Taupunkt bei 1 atm Gasdruck
Name	S8000 Integrale
Hersteller	Michell Instruments
Prinzip	Kondensationsverfahren
Seriennummer	
Messtechnischer Einsatzbereich	-90 °C bis 20 °C Frost-/Taupunkt bei 1 atm Gasdruck

Spektrometer

Tabelle 2: Spark™ Spark H2O in CO2, wurde im Vorhaben nicht weiter angewandt wegen eines inkompatiblen Gasdrucks zum Gasmischsystem.

Parameter	Beschreibung
Name	Spark™ Spark H2O in CO2
Hersteller	Tiger Optics (ProcessInsights)
Prinzip	Cavity Ring Down Spektroskopie (CRDS)
Seriennummer	8754
Messtechnischer Einsatzbereich	0,5 ppbV bis 600 ppmV

Tabelle 3: LaserGas™-II MT (Ausleihe).

Parameter	Beschreibung
Name	LaserGas™-II MT
Hersteller	NEO Monitors
Prinzip	Multipass TDLAS Monitor
Seriennummer	19-0416
Messtechnischer Einsatzbereich	„0“ ppmV bis 100 ppmV

Tabelle 4: Fasergekoppelte Breitband-Absorptionsspektroskopie (Ausleihe)

Parameter	Beschreibung
Name	Fasergekoppelte Breitband-Absorptionsspektroskopie
Hersteller	Thorlabs
Prinzip	Breitbandlichtquelle und Absorptionsanalysator
Seriennummer	
Messtechnischer Einsatzbereich	„0“ ppmV bis ca. 2000 ppmV

2.1.3 Charakterisierung der Sensoren in gemischten CO₂-Atmosphären

Dieses Arbeitspaket enthält die Versuche und entsprechende Datenanalyse, die zu der Charakterisierung der Querempfindlichkeit der Feuchtesensoren gegen CO₂ führen werden. Die Messverfahren von Punkt 2.1.2 wurden implementiert.

Die jeweiligen Sensoren wurden unter Luft und CO₂ getestet. Unter CO₂ Atmosphäre erfolgten auch Experimente im Temperaturbereich -20°C bis 50°C. Als Referenzmesssystem dienten die Taupunktspiegel MBW 373LX und S8000 Integrale von Michell Instruments.

Bei den Diagrammen 1 bis 4 sind die sich ergebenden Kennlinien bei 20°C von Luft und CO₂ für die verschiedenen Sensoren aufgetragen. Im Idealfall, d.h. bei Übereinstimmung der Taupunktspiegelmessung und des Sensormesswertes sollten die Messwerte auf der Diagonalen liegen.

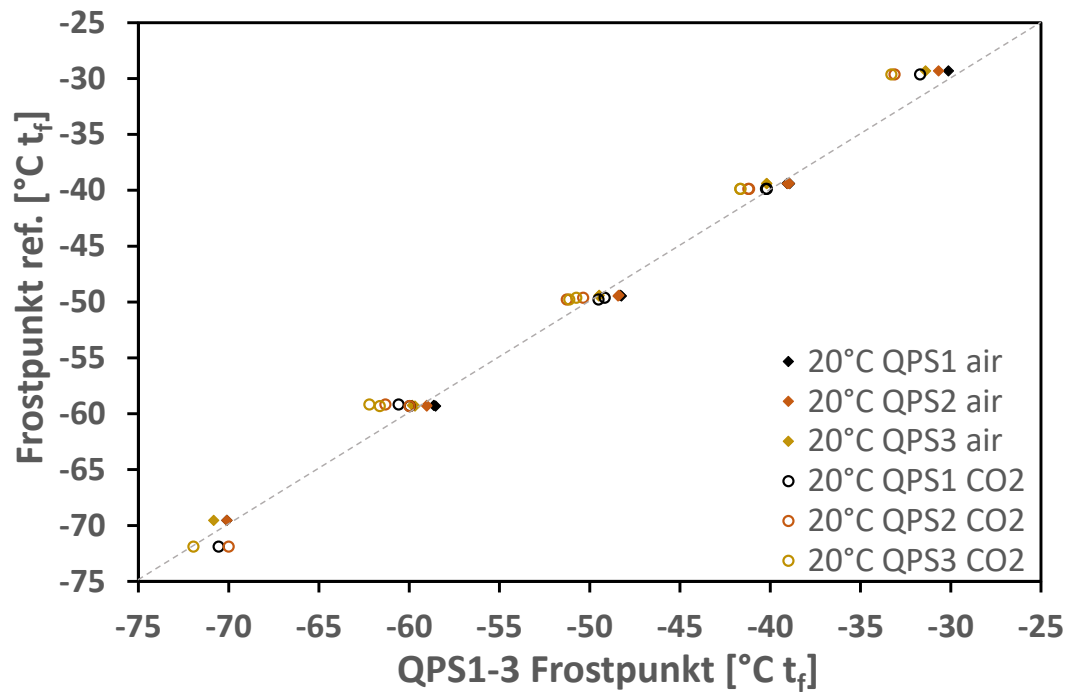


Diagramm 1: Kennlinien der 3 planaren coulometrischen Sensoren von Luft und CO₂ bei 20°C

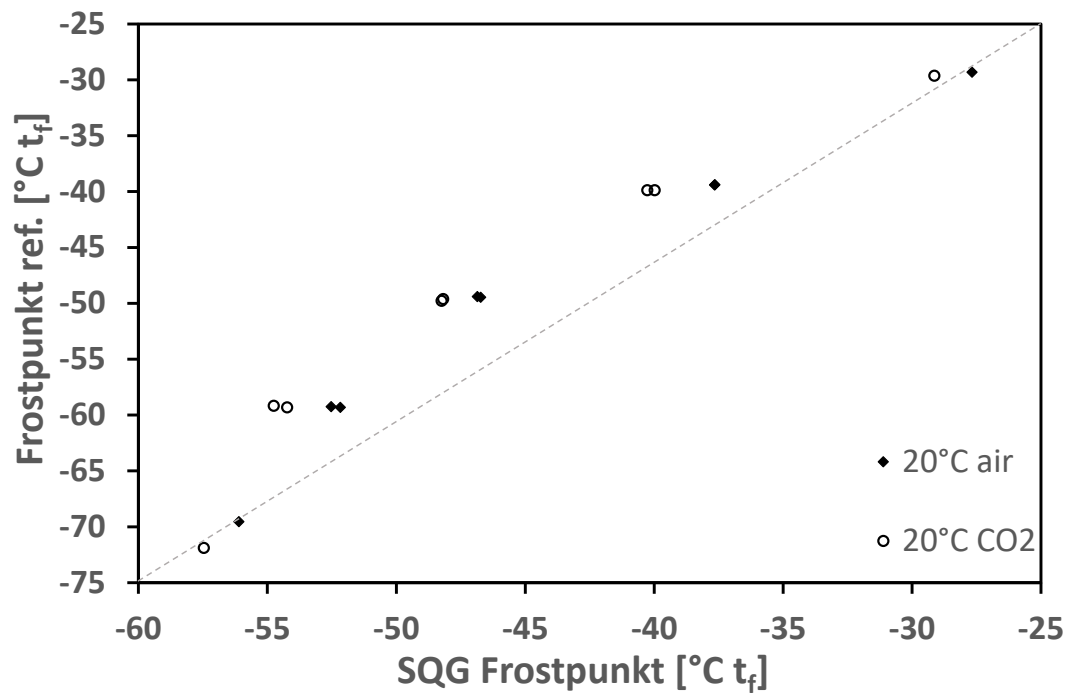


Diagramm 2: Kennlinien des Glasstabsensors von Luft und CO₂ bei 20°C basierend auf der firmeneigenen Kennlinie

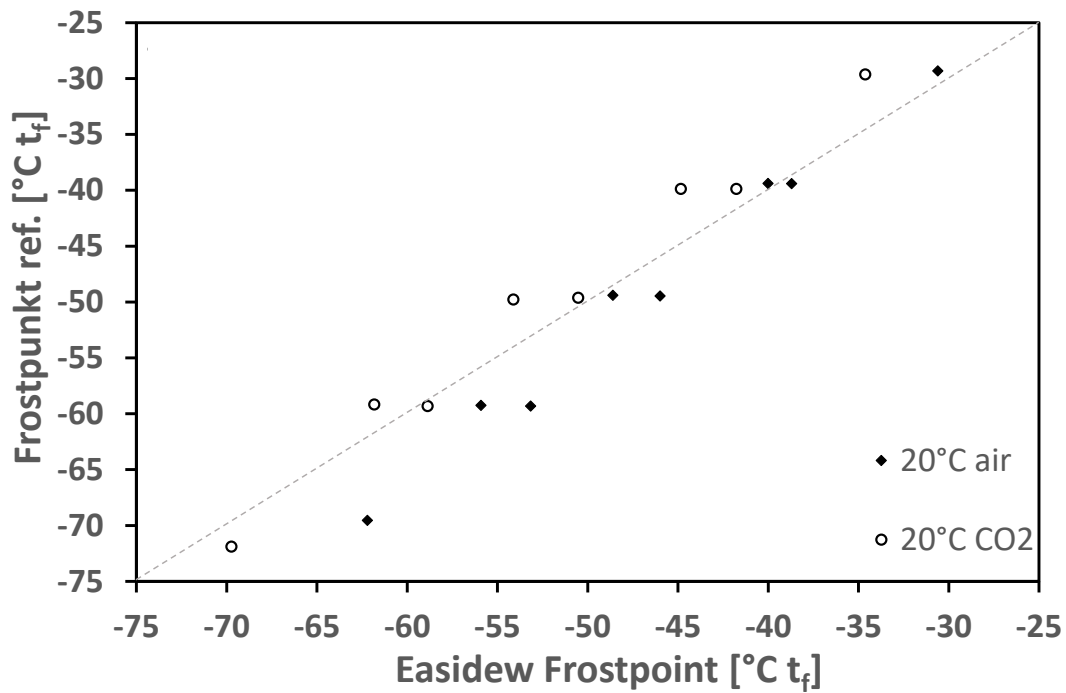


Diagramm 3: Kennlinien des Easidew Sensors von Luft und CO₂ bei 20°C basierend auf der firmeneigenen Kennlinie

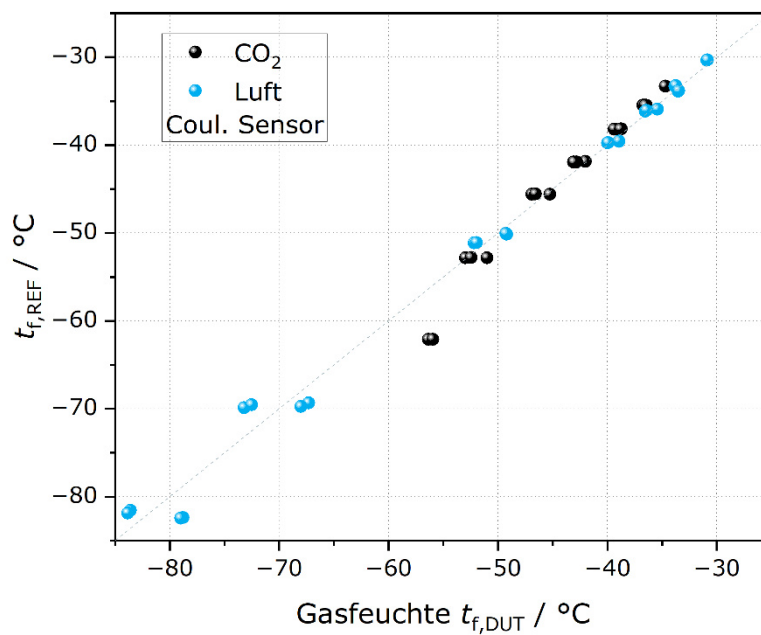


Diagramm 4: Ermittelte Gasfeuchtekenngößen mit coulometrischem Feuchtesensor in Luft und CO₂

2.1.4 Validierung der Messungen

In diesem Arbeitspaket werden die im AP 3 erhaltenen Ergebnisse am akkreditierten Prüflabor validiert. Zu diesem Zweck wird das gasartunabhängige Feuchtemesssystem angewandt. Die Ergebnisse dieses AP, in der Form von Kennlinien für die verschiedenen Sensoren, werden ein wichtiger Teil für den Normungsausschuss sein.

Für die Entwicklung und Validierung der Feuchtegenerierungsverfahren, siehe VDI/VDE 3514-3 [28], und insbesondere für die Vergleichsversuche werden Prüf- und Kalibriergase vorzugsweise bei Atmosphärendruck über dynamische Gasmischverfahren benötigt. Entsprechende Gasgemische müssen hergestellt, charakterisiert, auf dynamische Einflüsse geprüft und für nationale und internationale Vergleichbarkeit möglichst an die metrologische Messkette angeschlossen werden. Zusätzlich sind erforderliche Referenzmessverfahren bzw. instrumentelle Standards festzulegen, zu validieren und zu implementieren.

Der Messplatzaufbau (Abbildung 7) dient der präzisen Analyse des Wasserdampfgehalts in einem Gasgemisch. Als Transferstandard wird ein zertifiziertes Referenzmaterial mit bekanntem Stoffmengenanteil Wasser in CO₂ vorgelegt. Dieses Gas strömt durch einen Druckregler in einen Massendurchflussregler und danach zum Hygrometer, das den Feuchtegehalt im Gasstrom misst. Die erfassten Daten werden über eine Anzeige- und Datenerfassungseinheit visualisiert und gespeichert, sodass sie für die Auswertung zur Verfügung stehen. Abschließend wird das Gas über einen Gasauslass sicher abgeführt. Diagramm 5 zeigt die Ergebnisse zur Rückmessung des zertifizierten Referenzmaterials.

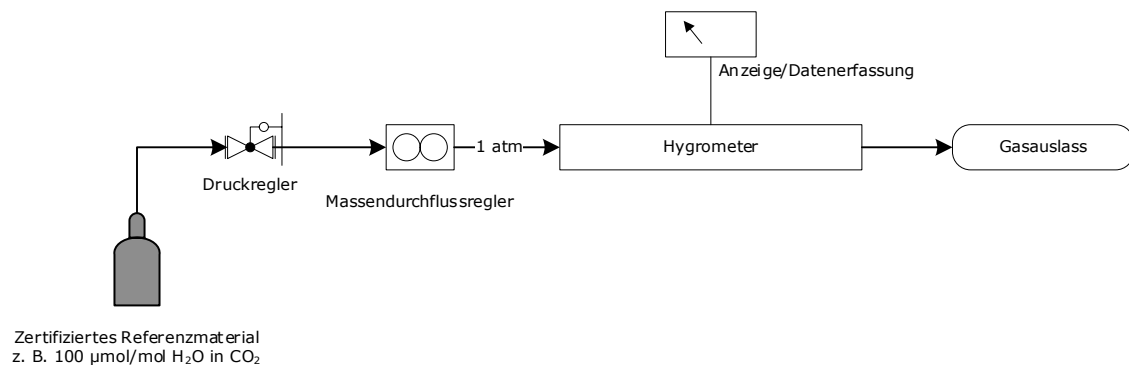


Abbildung 7: Rohrleitungs- und Instrumentierungsplan zur Ein-Punkt-Messung mit 100 $\mu\text{mol/mol}$ Wasser in Kohlendioxid.

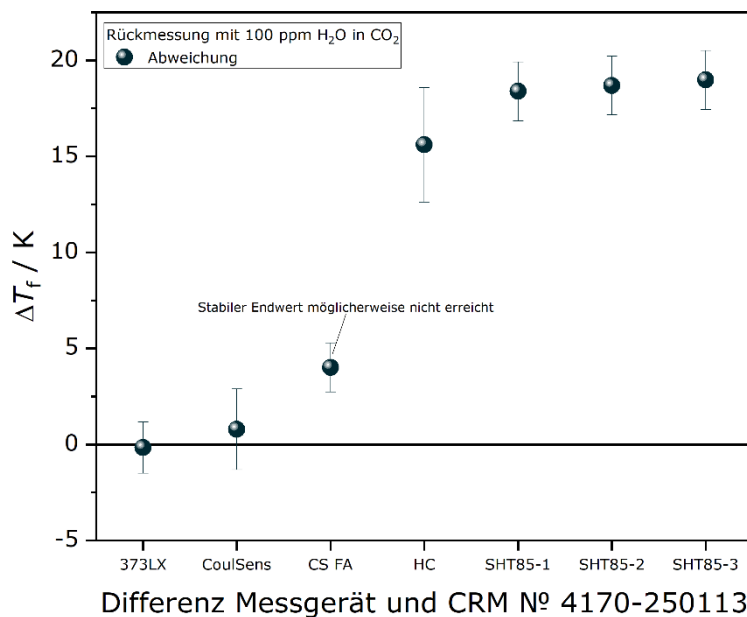


Diagramm 5: Ergebnisse der Rückmessung in Bezug auf den gravimetrisch hergestellten Gasstandard von 100 $\mu\text{mol/mol}$ H₂O in CO₂ [29] bei Atmosphärendruck.

2.1.5 Beschreibung/Erarbeitung der Messmethoden

In diesem AP wurden die Ergebnisse aus den AP 3 (Punkt 2.1.3) und AP4 (2.1.4) zusammengeführt, in einer Messmethode gebündelt und ein gemeinsames Dokument erstellt. Dieses Dokument wird dem Richtlinienausschuss bereitgestellt und über die Projektlaufzeit ständig aktualisiert. Dabei wurde das Feedback des Richtlinienausschusses berücksichtigt. Die Rückmeldungen waren ein wichtiger Teil für die Richtlinienarbeit in AP6 (Punkt 2.1.6). Die Ergebnisse wurden zusammengefasst und dem Richtlinienausschuss zugeleitet und während Ausschusssitzungen (online oder in Präsenz) beraten.

2.1.6 Erstellung einer Richtlinie und Verbreitung

In diesem Arbeitspaket wurde der Richtlinienentwurf VDI/VDE 3514 Blatt 4 [15] nach den Grundsätzen der VDI 1000 [16] ordnungsgemäß erstellt.

Zu Beginn des Projekts erfolgte eine Bedarfsprüfung und die Abstimmung mit anderen Organisationseinheiten im VDI. Der Antrag zur Erstellung der Richtlinie wurde dem zuständigen Fachbeirat vorgelegt und dort genehmigt.

Es folgte die öffentliche Bekanntmachung des Standardisierungsvorhabens über die VDI-Webseite und ein Aufruf zur Mitarbeit für die Einbindung der interessierten Kreise, so dass ein Ausschuss zur Erstellung der Richtlinie gegründet werden konnte.

Die bereits erzielten sowie die noch erwarteten Ergebnisse wurden zusammengefasst, vorgestellt und im Ausschuss beraten. Dazu fanden mehrere Ausschusssitzungen statt. Einen zentralen Beitrag dazu lieferte die Dokumentation aus Arbeitspaket 5 (AP5). Die Mitarbeit der Projektteilnehmer im Richtlinienausschuss erfolgte mit dem Ziel, zum Projektende einen Gründruck der Richtlinie zur Feuchtemessung in CO₂ unter Berücksichtigung des Ersatzes umweltschädlicher Gase in der Industrie zu veröffentlichen.

Das erhaltene Feedback des Richtlinienausschusses floss fortlaufend in die Arbeitspakete zurück. Dabei wurden die Verfahrensregeln und Prozesse für die Erstellung einer Richtlinie eingehalten.

Ergänzend erfolgte die Teilnahme an der Fachveranstaltungen Sensoren und Messsysteme um der Fachwelt frühzeitig Einblick in die Zwischenergebnisse des Projektes zu geben, Feedback zu sammeln und den interessierten Kreisen weiterhin die Möglichkeit zur Beteiligung an der Richtlinienarbeit zu geben. Darüber wurde einen Ansprechpartner für Fragen und Anregungen aus der Öffentlichkeit zum Richtlinienprojekt bereitgestellt.

So konnte ein konsistenter und qualitativ hochwertiger Entwicklungsprozess der Richtlinie gewährleistet werden, der die Einbindung aller relevanten Stakeholder ebenso berücksichtigte wie die Verankerung der erzielten Forschungsergebnisse sicherstellte.

Das inhaltlich verabschiedete Richtlinienmanuskript wurde anschließend gemäß dem Redaktionshandbuch für VDI-Richtlinien redaktionell aufbereitet, lektoriert und gesetzt. Die Veröffentlichung erfolgt am 01.08.2025 über DIN Media.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

VDI:

Plangemäß wurden die Zuwendungen für Personal und Reisen verwendet. Die Reisemittel wurden zur Teilnahme an der Tagung Sensoren und Messsysteme 2024 aufgewendet.

DLR:

Planmäßig wurden die Zuwendungen für Personal und Reisen verwendet. Die Sachmittel wurden planmäßig für den Aufbau und den Betrieb der Experimentssysteme (Edelstahlmesszellen mit zugehörigen vakuumtauglichen Komponenten wie Swagelok- und CF-Komponenten, coulometrische und kapazitive Feuchtesensoren, Druckgasflaschen mit CO₂) verwendet.

BAM:

Der größte Teil der Zuwendungen wurde planmäßig für Personalmittel aufgewendet. Verbrauchsmittel wurden für die Beschaffung von coulometrischen Sensorelementen, CF25-Bauteilen, Rohrsystemkomponenten, elektrotechnischen Anschlüssen, Kohlendioxid-Druckgasflaschen und Ausleihe von Hygrometern (

Tabelle 3) verausgabt. Reisemittel wurden zur Teilnahme an der Tagung Sensoren und Messsysteme 2024 aufgewendet.

dr. wernecke Feuchtemesstechnik GmbH (DWF):

Die wichtigsten Positionen für die Verwendung der finanziellen Mittel waren:

- Personalkosten
- Kosten für Material (elektronische, mechanische, gastechnische Komponenten und Baugruppen)
- Reisekosten, diese wurden zu einem großen Teil aus unterschiedlichen Gründen eingespart (Auslandsreisen). Zum einen ergab sich, dass die Durchführung der Reise in keinem Verhältnis zum Nutzen stand. Zum anderen wurden mehr Mittel für die Entwicklungsarbeit notwendig. Die Reisekosten wurden daher in Abstimmung mit dem Projektträger umgewidmet.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

VDI:

Alle durchgeführten Arbeiten und sonstige Aufwände waren zur Erreichung der Ziele notwendig. Die vom VDI übernommenen Tätigkeiten stellten sicher, dass die Erarbeitung der Richtlinie nach den Grundsätzen der VDI 1000 [16] ordnungsgemäß und unter Einbindung der interessierten Kreise durchgeführt wurde. Als neutraler Regelsetzer gewährleistete der VDI ein transparentes und qualitätsgesichertes Verfahren. Durch die aktive Beteiligung in den weiteren Arbeitspaketen wurde zudem sichergestellt, dass die Ergebnisse der Untersuchungen für die Richtlinienarbeit nutzbar waren und tatsächlich in den Erarbeitungsprozess eingeflossen sind.

DLR:

Alle durchgeführten Arbeiten und sonstige Aufwände waren zur Erreichung der Ziele des Teilvorhabens notwendig. Die eingesetzten Personal- und Verbrauchsmittel, sowie Unteraufträge sind für den Entwurf der Richtlinie, die Fertigung der coulometrischen Sensoren, sowie für den Aufbau der Messplätze und die Durchführung der Messungen eingesetzt worden.

BAM:

Alle durchgeführten Arbeiten und sonstige Aufwände waren zur Erreichung der Ziele des Teilvorhabens notwendig. Die eingesetzten Personal- und Verbrauchsmittel, sowie Unteraufträge sind für den Entwurf und die Fertigung der coulometrischen Sensoren, sowie für den Aufbau der Messplätze und die Durchführung der Messungen eingesetzt worden.

Wernecke:

Die durchgeführten Arbeiten für den Aufbau der Mess- und Versuchstechnik waren notwendig, da auf keine Vergleichbaren Messdaten zurückgegriffen werden konnte. CO₂ ist als Trägergas für Feuchte bisher wenig berücksichtigt worden und rückt nun mit der Ablösung umweltschädlicher Gase mehr und mehr in den Fokus. Dementsprechend sind Messungen bzgl. des Feuchteverhaltens und der Interaktion von CO₂ mit anderen Gasen notwendig. Die durchgeführten Arbeiten bezogen sich auf normale Druckverhältnisse. Hohe Drücke bzw. Unterdrücke wären ein weiteres Feld für Untersuchungen. Diese Untersuchungen wären im Zusammenhang mit der gestellten Aufgabe des Projektes nicht angemessen. In den durchgeführten Arbeiten wurde strikt darauf geachtet, dass nur die für die gestellte Aufgabe relevanten Messungen und Arbeiten durchgeführt wurden.

2.4 voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse zeigen, dass die sensorgestützte Gasfeuchtemessung in Kohlendioxid prinzipiell funktioniert. Mit den realisierten Messplätzen und Prüfbedingungen sind Voraussetzung geschaffen, diese und andere Gasfeuchtesensoren / Prototypen sowie kommerziell verfügbare Sensoren-/Sensorsysteme vergleichend zu testen und damit anschließende Produktentwicklungen oder Konformitätsaussagen zu unterstützen. Die erfolgreiche Fertigung der coulometrischen Sensoren zeigt, dass eine Volumenfertigung in Dickschichttechnik möglich ist.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen sind in den Entwurf der Richtlinie VDI/VDE 3514 Blatt 4 eingeflossen. Derzeit läuft das Einspruchsverfahren. Über das Einspruchsverfahren hat die breite Öffentlichkeit die Möglichkeit über Einsprüche an der Richtlinie mitzuwirken. Dies steigert einerseits die Qualität des Standards und fördert andererseits dessen Akzeptanz.

Mit der Richtlinie werden Hersteller und Anwender von Gasfeuchtemessmitteln, sowie Kalibrierlabore und –dienstleister auf die Besonderheiten der Feuchtemessung in CO₂ hingewiesen. Sie erhalten einen Überblick über geeignete Messprinzipien und Empfehlungen zu Vor-Ort- und Labormessungen. Ebenso werden geeignete Verfahren für die Rückführung von Hygrometern beschrieben. Somit werden die Anwender der Richtlinie in die Lage versetzt zuverlässige, rückgeführte Messungen der Feuchte in CO₂ durchzuführen. Dies ist ein wichtiger Schritt für den Ersatz von SF₆.

Nach Veröffentlichung der finalen Richtlinie besteht die Möglichkeit diese in die Internationale Normung einzubringen. Dazu unterhält der VDI grundsätzlich Kontakt zu den zuständigen nationalen Mitgliedsorganisationen von IEC (DKE) und ISO (DIN).

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Eine Literaturrecherche zu den Suchbegriffen „humidity AND carbon dioxide“ in Web of Science ergab zwar einige Treffer. Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem EMPIR-Projekt Metrology for Carbon Capture Utilisation and Storage (MetCCUS) [30-33]. Diese Ergebnisse sind insbesondere bei höheren Betriebsdrücken relevant. Abgesehen davon konnten keine weiteren nennenswerten Fortschritte auf diesem Forschungsgebiet Gasfeuchtebestimmung in CO₂ identifiziert werden.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Während des Vorhabens erfolgten Veröffentlichungen zu den Ergebnissen bzw. zur verfahrenstechnischen Entwicklung der Messplätze in Form eines Richtlinienentwurfs, einer Masterarbeit sowie eines Konferenzbeitrages. Es sind drei Veröffentlichungen nach Projektlaufzeit geplant.

Richtlinienentwurf

VDI/VDE 3514 Blatt 4 Gasfeuchtemessung - Feuchtemessung in Kohlendioxid (CO₂) [15]

Masterarbeit [18]

M. E. Bayat, Investigating the Effects of Trace Humidity on Back-Contact Metal Halide Perovskite Solar Cells: A Process Analytical Approach Master thesis - Humboldt-Universität zu Berlin 2023–07–07.

Konferenzbeitrag [34]

J. Davenport C. Tiebe, A. Lorek, S. Garland, V. Schwanke, R. Wernecke, Gasfeuchtemessung in der Normung GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2024 2024, 547 – 549, <https://www.doi.org/10.5162/sensoren2024/P32>.

Geplante Veröffentlichungen nach Projektlaufzeit

Gegenwärtig wird an weiteren Veröffentlichungen gearbeitet. Diese sind:

S. Garland, A. Lorek, C. Tiebe, Measurements with different kinds of humidity sensors under carbon dioxide atmosphere in a range from – 70°C frost point to 10°C dew point, Verlag: Science direct Zeitschrift: Sensors (Manuskript)

C. Tiebe, M. E. Bayat, D. Tuma, H. Kipphardt, Advancing Traceability of Humidity Sensors for CO₂-Based Applications Using Optical Feedback Cavity Enhanced Spectroscopy and Chilled Dew Point Hygrometers, GAS Analysis 2026, 27.-29.01.2026 (Vortrag).

Nach Beendigung des Einspruchverfahrens wird die finale Richtlinie VDI/VDE 3514 Blatt 4 als Weißdruck veröffentlicht.

3 Quellen

- [1] European Commission, Report from the commission assessing the availability of alternatives to fluorinated greenhouse gases in switchgear and related equipment, including medium-voltage secondary switchgear *Report 2020–09, C(2020) 6635 final*, https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-09/c_2020_6635_en.pdf.
- [2] VDI/VDE 3514 Blatt 2:2013–03, *Gasfeuchtemessung - Messverfahren*, DIN Media GmbH, Berlin.
- [3] Vaisala Corporation, Online-Taupunktüberwachung von Anlagen mit SF₆-Gasisolierung *White Paper 2012, B211198DE-A*, <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/TIA-Power-White%20Paper-B211198DE-A-LOW-v2.pdf>.
- [4] L. Lopez, Water: The Most Powerful Impurity in SF₆ Gas-Insulated Switchgear *Website 2018 (Accessed on 2021–02–15)*, <https://blog.wika.us/products/sf6-products/water-impurity-sf6-gas/>.
- [5] Wikipedia-Autoren, Treibhauspotential - Bedeutende Treibhausgase *Wikipedia 2025–10–08 12:09 UTC*, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Treibhauspotential&oldid=253138050>.
- [6] G. Myhre, D. Shindell, Anthropogenic and Natural Radiative Forcing - Supplementary Material **2013**, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WGI_AR5.Chap_8_SM.pdf.
- [7] H.-J. Ebeling, A. Richmann, E. G. Krubasik, B. Wilkes, Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland **2005**, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/sv_sf6_bf.pdf.
- [8] S. Jankowski, EU-Verordnung 517/2014 über fluorierte Treibhausgase *Umweltbundesamt Aufrufdatum: 2020–05–20 (2013)*, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgasefckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase>.
- [9] C. Franck, Department of Information Technology and Electrical Engineering Head of Power Systems and High Voltage Lab *Webseite 2025–10–08 (Aufrufdatum)*, <https://ee.ethz.ch/the-department/people-a-z/person-detail.MTcwMTEz.TGlzdC8zMjc5LC0xNjUwNTg5ODIw.html>.
- [10] A. Lorek, J. Majewski, Humidity Measurement in Carbon Dioxide with Capacitive Humidity Sensors at low Temperature and Pressure *Sensors 2018, 18, 8*, www.doi.org/10.3390/s18082615.
- [11] A. F. Hollemann, E. Wiberg, N. Wiberg, *Anorganische Chemie, 102. Auflage*, Walter de Gruyter, Berlin, **2007** ISBN 978-3-11-017770-1.
- [12] D. Mutter, Wenn beim Kalibrieren die Luft ausgeht – Erfahrungen bei der Kalibrierung der Feuchte in CO₂ und SF₆ 38. *DKD – Fachausschusssitzung „Temperatur und Feuchte“, Berlin 2019–05–08*, DOI/URL n/a.
- [13] A. Koncz, A. Lorek, R. Wernecke, V. Schwanke, Coulometrischer Feuchtesensor und entsprechendes Verfahren, *Patent EP 2264445 B1, 2017*.
- [14] A. Lorek, D. Wolter, Coulometrischer Feuchtesensor mit gelförmigem Elektrolyt und Herstellungsverfahren für einen Coulometrischen Feuchtesensor mit gelförmigem Elektrolyt *Patent 2018, EP000003232188A1*, <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=EP000003232188A1>.
- [15] VDI/VDE 3514 Blatt 4:2025–08 – Entwurf, *Gasfeuchtemessung - Feuchtemessung in Kohlendioxid (CO₂)*, DIN Media GmbH, Berlin.
- [16] VDI 1000:2021–02, *VDI-Richtlinienarbeit - Grundsätze und Anleitungen*, DIN Media GmbH, Berlin.

- [17] J. J. Davenport, C. Tiebe, Normgerechte Feuchtemessung in CO₂ unter Berücksichtigung der Ablösung umweltschädlicher Gase in der Industrie *BAM Zwischenbericht* **2023-07-27**, *NorFeuGa*,
- [18] M. E. Bayat, Investigating the Effects of Trace Humidity on Back-Contact Metal Halide Perovskite Solar Cells: A Process Analytical Approach *Master thesis - Humboldt-Universität zu Berlin* **2023-07-07**, DOI/URL n/a.
- [19] DIN EN IEC 60480:2020-06:2020, *Spezifikationen für die Wiederverwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) und seinen Mischungen in elektrischen Betriebsmitteln*, DIN Media, Berlin.
- [20] Rotronic AG, HC2A Humidity probes *Datasheet* **2025-06**, https://www.processsensing.com/docs/datasheet/59055E_HC2A_datasheet.pdf.
- [21] CS Instruments GmbH & Co. KG, Cagalogue 24/25 *Produktinformationen* **2024-08 (Aufrufdatum: 2025-06-24)**, <https://cs-instruments.1kcloud.com/ep1629600e5aaac6/epaper/ausgabe.pdf>.
- [22] R. Wernecke, *Industrielle Feuchtemessung: Grundlagen, Messmethoden, technische Anwendungen*, Wiley VCH, Weinheim, **2003** www.doi.org/10.1002/3527602690.
- [23] Sensirion AG, Datasheet SHT85 - Humidity and Temperature Sensor *Datasheet* **2021-12**, https://sensirion.com/media/documents/4B40CEF3/640B2346/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT85_Datasheet.pdf.
- [24] A. Lorek, S. P. Garland, Humidity measurements in carbon dioxide with Sensirion SHT85 humidity sensors under simulated Martian atmospheric conditions *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **2025**, 14, 1, 131–138, 10.5194/gi-14-131-2025.
- [25] A. Lorek, Humidity measurement with capacitive humidity sensors between –70°C and 25°C in low vacuum *J. Sens. Sens. Syst.* **2014**, 3, 2, 177–185, 10.5194/jsss-3-177-2014.
- [26] R. Wernecke, J. Wernecke, *Industrial Moisture and Humidity Measurement: A Practical Guide*, 1, Wiley, **2014** ISBN: 978-3-527-33177-2.
- [27] Michell Instruments, Easidew Transmitters Industrial Dew-Point Transmitters *Datasheet* **2024-04-25**, https://www.processsensing.com/docs/datasheet/Michell_Instruments_Easidew_Transmitters_EN_Datasheet.pdf.
- [28] VDI/VDE 3514 Blatt 3:2020-02, *Gasfeuchtemessung - Kalibrierung und Messunsicherheit*, DIN Media GmbH, Berlin.
- [29] BAM-Fachbereich 1.4 - Prozessanalytik, 100 µmol/mol Wasser (H₂O) in Kohlenstoffdioxid (CO₂) *Zertifikat - Primäres Referenzgasgemisch* **2025**, Fl.-Nr. 4170-250113, DOI/URL n/a.
- [30] METCCUS consortium, Metrology Support for Carbon Capture, Utilisation and Storage *Website* **2023-10-26**, *Seminar documents*, <https://metccus.eu/news-and-publications/metccus-seminar-on-metrology-support-for-carbon-capture-utilisation-and-storage-achieves-high-level-of-engagement-and-participation/>.
- [31] MetCCUS consortium, METCCUS Seminar on Metrology Support for Carbon Capture, Utilisation and Storage - Part 1 *Youtube* **2023-10-26**, <https://youtu.be/hfKnfqNidj8>.
- [32] MetCCUS consortium, METCCUS Seminar on Metrology Support for Carbon Capture, Utilisation and Storage - Part 2 *Youtube* **2023-10-26**, <https://youtu.be/nPoMCXSjqmo>.
- [33] C. W. Meyer, Dew-Point Measurements for Water in Compressed Carbon Dioxide of METCCUS seminar *Seminar documents* **2023-10-26**, Slides 177 to 195, https://metccus.eu/wp-content/uploads/2023/11/MetCCUS_Seminar_2023_Presentations.pdf.
- [34] J. Davenport C. Tiebe, A. Lorek, S. Garland, V. Schwanke, R. Wernecke, *Gasfeuchtemessung in der Normung GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2024* **2024**, 547 – 549, <https://www.doi.org/10.5162/sensoren2024/P32>.

