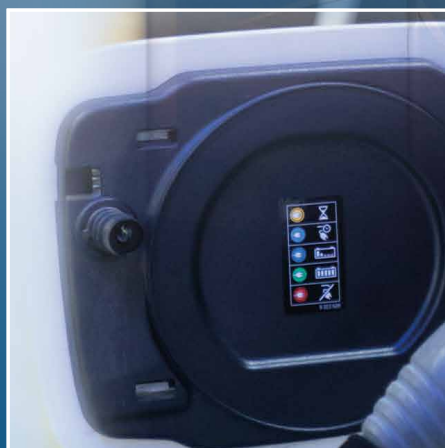
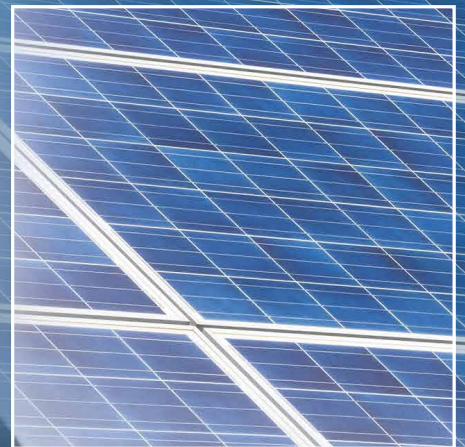


Metrologie für die Energiewende



**Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft, Amts- und
Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

132. Jahrgang, Heft 2, Dezember 2022

Metrologie für die Energiewende

Titelbild Quellen:
Yingyaipumi.Adobe Stock
Soonthorn.Adobe Stock
C.Snooprock.Adobe Stock

Inhalt

- Einleitung 7
Fabian Plag
- Metrologie für die Windenergie: Das neue PTB-Kompetenzzentrum für Windenergie (CCW)..... 9
Julia Hornig, Karin Kniel, Rolf Kumme, Frank Härtig
- Untersuchungen zur Wechselwirkung von Windkraftanlagen mit terrestrischen Navigationssystemen 31
Thomas Kleine-Ostmann, Thorsten Schrader
- Metrologie für die Photovoltaik 37
Stefan Winter, Ingo Kröger, Stefan Riechelmann
- Metrologie für die Integration erneuerbarer Energie in elektrische Energienetze 43
*Enrico Mohns, Johann Meisner, Stephan Passon, Matthias Schmidt,
Florian Schilling, Jannes Langemann, Christoph Leicht*
- Metrologie und Sicherheit für Batterien 55
*Burkhard Beckhoff, Stefan Essmann, Thomas Horn, Frank Lienesch,
Steffen Seitz, Stefan Sarge, Claudia Zech*
- Renewable and alternative fuels for a future energy system. 69
*Sumit Agarwal, Bert Anders, Stefan Essmann, Ravi Fernandes, Holger Grosshans,
Detlev Markus, Kai Moshhammer, Solmaz Nadiri, Bo Shu*
- Mengenummessung von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen 77
Helmut Többen, Rainer Kramer, Bodo Mickan, Hans-Benjamin Böckler
- Eichrechtskonforme Abrechnung von wasserstoffhaltigem Erdgas 85
Stefan M. Sarge

Einleitung

Fabian Plag¹

¹ Dr. Fabian Plag
Koordinator des
Lenkungskreises
„Energie“ und
Koordinator des
Lenkungskreises
„Umwelt und Klima“
E-Mail: fabian.plag@ptb.de

Mit der Energiewende hat Deutschland sich das Ziel gesetzt, innerhalb weniger Jahrzehnte ein grundlegend neues, nachhaltiges, dezentrales Energiesystem zu schaffen, das nahezu ohne CO₂-Emissionen auskommt. Diese Transformation vor dem Hintergrund aktueller geopolitischer Entwicklungen und seiner Auswirkung auf die Energiesicherheit in Deutschland und Europa ist eine Mammutaufgabe. Als nationales Metrologieinstitut will die PTB alle Akteure – von der Industrie über die Politik bis zum Verbraucher – dabei unterstützen. Denn verlässliche Messungen sind die Voraussetzung für Sicherheit, Effizienz und Verbraucherschutz.

Bereits heute hat die PTB Mess- und Kalibriermöglichkeiten im Bereich Solar- und Windenergie entwickelt, die zum Teil weltweit einmalig sind. Doch zu einer erfolgreichen Energiewende gehören auch leistungsfähige Übertragungs- und Verteilnetze, Batterien und andere Speicherelemente, der Aufbau von Wasserstofftechnologien sowie Energieeffizienz. Gemeinsam mit Industriepartnern entwickeln PTB-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch hier geeignete Messverfahren und Standards. Besonderes Augenmerk liegt auf der Kopplung von Energiesektoren, der Stabilisierung des Stromnetzes und dem Energieträger Wasserstoff, der eine Schlüsselrolle im Energiesystem der Zukunft spielen wird.

Neben allen Herausforderungen bietet die Energiewende die Chance, zur Bühne für klimafreundliche Technologien „Made in Germany“ zu werden. Doch das kann nur mit exzellenter Messtechnik gelingen. Sie ist eine Schlüsseldisziplin für den Umwelt- und Klimaschutz sowie für eine sichere, umweltverträgliche und wirtschaftliche Energieversorgung. Das hier vorliegende Heft der PTB-Mitteilungen bietet mit insgesamt acht ausgewählten Fachartikeln einen hervorragenden Überblick

über einzelne Aktivitäten und Ergebnisse aktueller Arbeiten der PTB für die Energiewende.

Den Auftakt bildet ein umfangreicher Beitrag über das neue PTB-Kompetenzzentrum für Windenergie (CCW). Es werden Messmöglichkeiten für die Koordinatenmesstechnik von Großbauteilen, Strömungsmesstechnik zur Rückführung von Windgeschwindigkeitsmessungen und die weltweit größte Drehmoment-Normalmesseinrichtung vorgestellt. Ein weiterer Artikel präsentiert die Ergebnisse eines Forschungsprojekts, dass sich mit der Wechselwirkung von Windenergieanlagen mit Navigationssystemen der Flugsicherung beschäftigt (Titelbild). Ein Resultat dieser Ergebnisse ist, dass die Deutsche Flugsicherung (DFS) ab dem 1. August 2022 die Anlagenschutzbereiche um sogenannte Drehfunkfeuer verkleinert und somit das nun zur Verfügung stehende Ausbaupotential für Windparks in Deutschland vergrößert.

Neben der Windenergie spielt die Metrologie für Photovoltaik eine große Rolle für die Energiewende, weshalb sie einem ausführlichen Beitrag vorgestellt wird. So werden Messfähigkeiten für die Kalibrierung von Referenzsolarzellen, Referenzmodulen, für die energiebasierte Bewertung von Modulen (Energy Rating) sowie ein Ausblick auf geplante Aktivitäten für das Monitoring von Solarparks vorgestellt. Die metrologischen Herausforderungen, sowie Lösungen zur Integration erneuerbarer Energie in elektrische Energienetze sind in einem separaten Artikel dargestellt. Er enthält die Entwicklung und Kalibrierung von Messeinrichtungen für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), Leistungs- und Energiemesstechnik und Metrologie für Schnellladesäulen in der Elektromobilität.

Neben der Energieerzeugung und Verteilung widmet sich ein weiterer Fachbeitrag der Speicherung

von elektrischer Energie in Batterien, sowie deren Sicherheit und Alterungsverhalten. Die Rolle der Metrologie für erneuerbare Kraftstoffe, wie Bio- und synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff mit Fokus auf verbrennungsmotorische Eigenschaften, wie Qualität, Reinheit und Brennwert sowie dem Verständnis physikochemischer Eigenschaften dieser Energieträger ist in einem englischsprachigen Artikel erläutert.

Den Abschluss dieses Hefts bilden zwei Artikel zur metrologischen Herausforderung in der Mengemessung von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen, sowie deren eichrechtskonforme Abrechnung.

Die PTB-Arbeiten auf Gebiet der Metrologie für die Energiewende tragen grundlegend zur weltweiten Harmonisierung und Standardisierung dieser Messmethoden bei. Sie bilden einen Vertrauensanker für die verlässliche Abrechnung von Energieträgern und deren sicherer Nutzung. Sie unterstützen Entscheidungsträger:innen dabei, die Wahl geeigneter Maßnahmen mit validen Zahlen, Daten und Fakten zu untermauern. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen einen informativen und spannenden Lesegenuss

P.S. Nehmen Sie bei Interesse an diesen spannenden Themen gerne Kontakt zu uns auf!

Metrologie für die Windenergie: Das neue PTB-Kompetenzzentrum für Windenergie (CCW)

Julia Hornig¹, Karin Kniel², Rolf Kumme, Frank Härtig³

Einen zentralen Wendepunkt in der deutschen Energiepolitik des 21. Jahrhunderts stellt die Nuklearkatastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi („Fukushima I“) im März 2011 dar. Beschloss doch der Deutsche Bundestag als Konsequenz aus dieser Katastrophe am 30. Juni 2011 mit der Verabschiedung des dreizehnten Gesetzes zur Änderung des Atomgesetzes [1] den sukzessiven Atomausstieg bis 2022 und verlieh damit der deutschen Energiewende eine neue Dynamik. Ziel der Energiewende ist die grundlegende Transformation des Energiesystems weg von der auf Kernenergie und fossilen Energieträgern beruhenden Energieerzeugung hin zu einer nachhaltigen und effizienten, auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung. So sollen auf Grundlage des im Juni 2020 verabschiedeten „Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan“ (*National Energy and Climate Plan (NECP)*) [2] bis zum Jahr 2030 u. a. die Treibhausgasemissionen Deutschlands um mindestens 55 % gegenüber 1990 gesenkt sowie der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch auf 30 % und am Bruttostromverbrauch auf 65 % ausgebaut werden. Als langfristiges europäisches Ziel soll bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasneutralität erreicht werden („Dekarbonisierung“).

Von entscheidender Bedeutung für das Gelingen der Energiewende ist also der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE), deren zentrale Säule die Windenergie ist. Sie hat sich in den vergangenen Jahren rasant entwickelt und leistet heute einen bedeutenden Beitrag zur deutschen Stromversorgung. So lag im Jahr 2020 der Anteil der Windenergie (onshore + offshore) an der Bruttostromerzeugung bereits bei 23,6 % (EE-Anteil insgesamt: 45,4 %) [3], womit sie im zweiten Jahr in Folge wichtigster Energieträger im deutschen Strommix war, vor Erdgas und Braunkohle. Und die EE insgesamt erzeugten 2020 erstmals mehr

Strom als alle fossilen Energieträger (Kohle, Gas und Öl) zusammen [3]. Zudem wurde mit der kürzlich verabschiedeten „Nationalen Wasserstoffstrategie“ [4], mit der die Bundesregierung „grünen“ Wasserstoff gezielt als „Schlüsselrohstoff“ der Energiewende etablieren will, diese ohnehin schon immense Bedeutung der Windenergie noch einmal explizit unterstrichen.

Um diese Entwicklung adäquat metrologisch begleiten und unterstützen zu können, hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt 2016 begonnen, das Kompetenzzentrum für Windenergie (CCW) aufzubauen. In diesem Zentrum werden die für die Windenergie wichtigsten Kompetenzen der PTB unter einem Dach gebündelt. Mit dem CCW erweitert die PTB in drei Fachdisziplinen ihr Leistungsangebot um eine weltweit einzigartige metrologische Infrastruktur für die Kalibrierung von großen Drehmomenten, von großen mechanischen Windenergieanlagen-Komponenten sowie von Wind-Lidar-Systemen. Das messtechnische Herzstück des CCW bilden drei neue Messgeräte, für jede der drei Fachdisziplinen Koordinatenmesstechnik, Strömungsmesstechnik und Drehmomentmesstechnik eines:

- ein Groß-Koordinatenmessgerät mit einem Messvolumen von 5 m × 4 m × 2 m für die Kalibrierung großer Antriebsstrangkomponenten,
- ein Windkanal für die Rückführung des neuartigen 3D-Wind-Lidar-Systems der PTB und die Kalibrierung von kommerziellen Windfernmesssystemen sowie
- eine Drehmoment-Normalmesseinrichtung für die Rückführung großer Drehmomente bis zu 5 MN · m und perspektivisch sogar bis zu 20 MN · m.

¹ Dr. Julia Hornig, Abteilung 1 Kompetenzzentrum für Windenergie (CCW), E-Mail: julia.hornig@ptb.de

² Dr. Karin Kniel, Fachbereich 5.3 Koordinatenmesstechnik, E-Mail: karin.kniel@ptb.de

³ Dr. Rolf Kumme, Fachbereich 1.2 Festkörpermechanik, E-Mail: rolf.kumme@ptb.de

⁴ Dr.-Ing. Prof. h. c. Frank Härtig, Vizepräsident, E-Mail: frank.haertig@ptb.de



Abbildung 1:
Das PTB-Kompetenzzentrum für Windenergie (CCW) – 2020 wurde der etwas zurückgesetzte Euler-Bau II mit seiner charakteristischen „Segel-Ecke“ fertiggestellt; im linken Teil des Bildes ragt der bereits seit 2017 fertige Euler-Bau I hervor.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) fördert den Aufbau des CCW im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung bis Ende 2022 mit insgesamt rund 9,5 Mio. Euro [5]. Erst hierdurch war es möglich, die drei neuen Messsysteme zu beschaffen und das zum Aufbau benötigte technisch-wissenschaftliche Personal zu beschäftigen. Für den Bau des Kompetenzzentrums „Wind“, das aus den beiden Gebäudekomplexen Euler-Bau I und Euler-Bau II besteht (s. Abbildung 1), und die Modernisierung der angebundenen Infrastruktur investierte die PTB zusätzlich Haushaltsmittel in Höhe von ca. 5,5 Mio. Euro.

Gemeinsames Ziel aller drei im Kompetenzzentrum für Windenergie zusammengefassten Fachdisziplinen ist es, mit ihrer Forschung, die Effizienz, Störungsfreiheit und Langlebigkeit von Windenergieanlagen (WEA), insbesondere im Hinblick auf deren ständig wachsende Größe, zu verbessern. In den folgenden drei Abschnitten stellen diese drei Bereiche jeweils ihre Arbeiten

vor und beschreiben die neuen Möglichkeiten, die ihnen das CCW dafür bietet.

1. Koordinatenmesstechnik – Sicherstellung der Rückführung von dimensionellen Messungen an Großbauteilen

Getriebebauteile, die in Windenergieanlagen (WEA) eingesetzt werden, sind extremen Kräften und Belastungen ausgesetzt und müssen daher höchste Genauigkeitsstandards mit Toleranzen z. T. im Bereich von 10–20 µm erfüllen. Das stellt die Qualitätssicherung, durch die eine qualifizierte und belastbare Aussage zur Einhaltung dieser in der Normung geforderten Fertigungstoleranzen erfolgen muss, vor große Herausforderungen. Es existieren zwar kommerzielle Messgeräte wie z. B. Groß-Koordinatenmessgeräte (Groß-KMG), Lasertracker, Messarme und photogrammetrische Messsysteme zur Messung großer Bauteile in Dimensionen mehrerer Meter, allerdings ist die Zuverlässigkeit und damit die erreichbare Messunsicherheit mit diesen Messsystemen häufig eine ungeklärte Frage. Vor dem Hintergrund der kleinen Fertigungstoleranzen gewinnt dies besondere Bedeutung, da die resultierenden aufgabenspezifischen Messunsicherheiten wiederum nur einen Bruchteil der Toleranzangaben betragen dürfen, um überhaupt eine Konformitätsaussage nach ISO 14253-1:2005 [6] treffen zu können.

Seit mehr als 10 Jahren unterstützt der Fachbereich „Koordinatenmesstechnik“ die WEA-Komponenten fertigende Industrie bei der Bewältigung dieser metrologischen Herausforderungen. Im Jahr 2017 wurde in diesem Zuge innerhalb des CCW ein Groß-KMG mit einem Messvolumen von 5 m × 4 m × 2 m installiert (s. Abbildung 2).

Abbildung 2:
Das neue Groß-KMG der PTB im CCW



Die wesentliche Zielsetzung war und ist es, Rückführungsmöglichkeiten auf die SI-Einheit „Meter“ für Messungen an Großbauteilen, insbesondere Getriebekomponenten, zu entwickeln. Darüber hinaus werden aber auch weitere Messeinflüsse untersucht, die sich beispielsweise durch Werkstückdeformationen aufgrund von Eigengewicht sowie der Bauteiltemperatur bzw. ihrer Homogenität ergeben. Es gilt, Einflüsse dieser Art quantifizieren und bestenfalls minimieren zu können, um eine möglichst kleine Messunsicherheit zu erzielen.

In mehreren großen nationalen und internationalen Drittmittelprojekten [7, 8, 5, 9, 10, 11] konnten in den letzten Jahren schon viele dieser Ziele aufgenommen und verfolgt werden. Einige der erzielten Ergebnisse und Aktivitäten werden im Folgenden vorgestellt.

1.1 Normale für große Getriebekomponenten

Das erste im Rahmen eines EU-Projektes in der PTB entwickelte Großverzahnungsnormal (2008 bis 2011) ist nur das Segment eines ganzen Zahnrades, wie in Abbildung 3 gezeigt [7, 12]. Diese besondere Ausführungsform ermöglichte es, das Normal, obwohl es ein großes Rad von 1 m Durchmesser verkörpert, gerade noch auf den etablierten Koordinatenmessgeräten (KMG) mit 1 m³ Messvolumen in der PTB kalibrieren zu können. Dies war entscheidend, da die PTB zu diesem Zeitpunkt noch über kein Groß-KMG verfügte. An dem Normal lassen sich sowohl Profil- als auch Flankenlinienmessungen durchführen. Unterschiedliche Steigungen und Steigungsrichtungen machen das Normal universell einsetzbar. Außerdem erlauben eingelassene Temperatursensoren die Temperaturüberwachung innerhalb des Normals.

Im Jahr 2016 folgte ein zweites, größeres Großverzahnungsnormal, das innerhalb eines nationalen Forschungsprojektes entwickelt wurde [8]. Hierbei handelt es sich um einen Verzahnungsring mit 2 m Durchmesser (Abbildung 4). Je drei Verzahnungsgruppen mit unterschiedlichen Schrägungswinkeln und Steigungsrichtungen sind über den kompletten Umfang des Rings gleichmäßig als Innen- und Außenverzahnung verteilt [13]. Darüber hinaus wurde auch dieses Normal mit tiefliegenden Temperatursensoren ausgestattet.

Wie ebenfalls in Abbildung 4 zu sehen ist, wurde eine spezielle 6-Punkt-Auflagevorrichtung gemeinsam mit dem Wissenschaftlichen Gerätebau der PTB für das Großverzahnungsringnormal konzipiert, um die Reproduzierbarkeit und Reduzierung von Durchbiegungseffekten durch das Eigengewicht des Normals zu gewährleisten [13]. Die Auflagevorrichtung besitzt sechs speziell ausgerichtete Winkelelemente, die mit

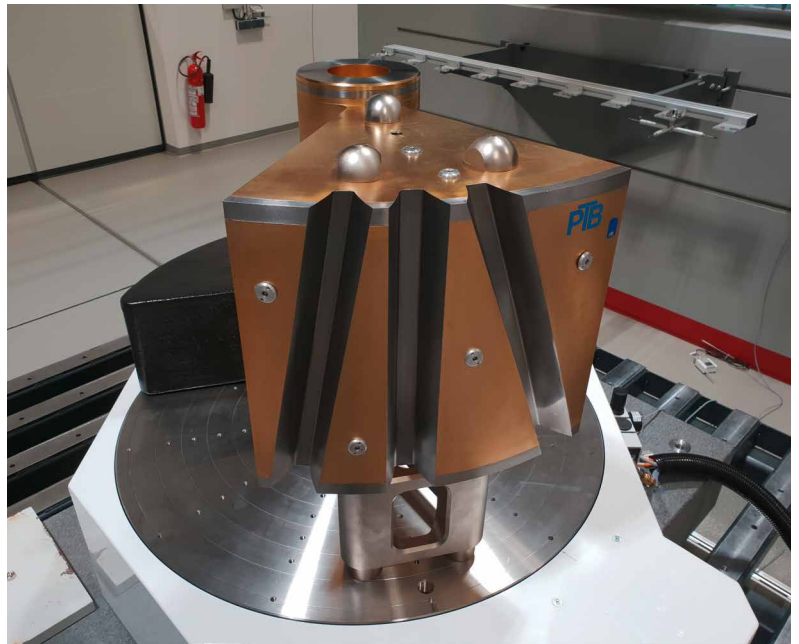


Abbildung 3: Großverzahnungsnormal mit drei verschiedenen Schrägungswinkeln

Querstreben sternförmig miteinander verbunden sind. Bis auf ein starres Winkelelement sind alle anderen beweglich mit einem Kreuzfedergelenk und einer Membranfeder ausgestattet. Auf diese Weise werden Zwangskräfte und Verspannungen ausgeglichen. Das starre Winkelelement sorgt für die notwendige Stabilität. An das Normal werden sechs entsprechende Winkelelemente angeschraubt, sodass das Normal momentensteif und durchbiegungsarm gelagert werden kann.

Beide Groß-Verzahnungsnormale waren bereits Gegenstand nationaler Ringvergleiche, die durch die PTB organisiert wurden und mit jeweils etwa zehn Teilnehmern aus Industrie und Wissenschaft wichtige weiterführende Erkenntnisse brachten [13]. Darüber hinaus wurden mit beiden Normalen erstmals weltweit das Thema Rückführung von Großverzahnungen aufgegriffen. Auch wenn diese Normale zunächst nur das untere Ende der Abmessungen von in WEA eingesetzten Getriebe-

Abbildung 4: Großverzahnungsringnormal mit 2 m im Durchmesser



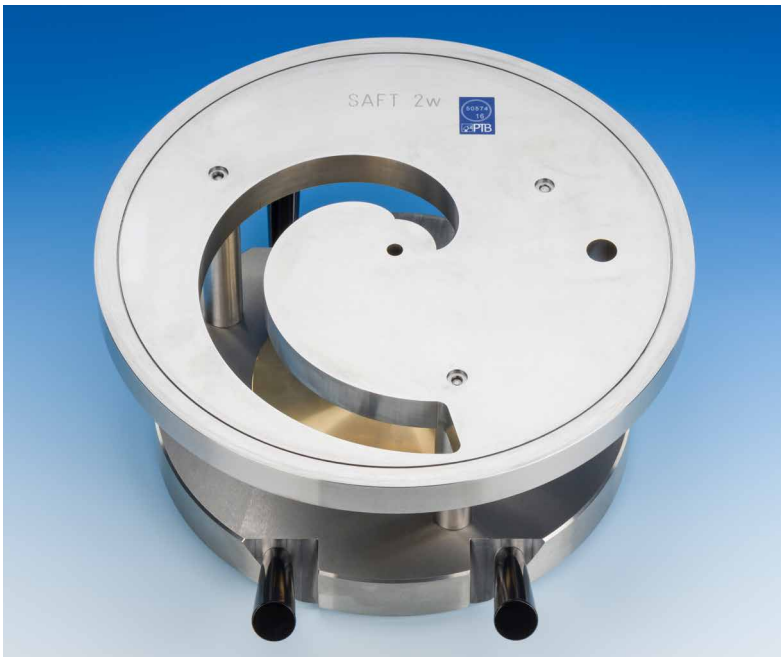


Abbildung 5:
Großes
Lagerringnormal

komponenten abdecken, so sind sie als wertvolle Grundlage für die Erreichung weitreichender Ziele zu sehen. Ein Beispiel ist ihr Einsatz in einem aktuellen europäischen Forschungsprojekt [11], in dem es auch um die Steigerung der Zuverlässigkeit und Effizienz von WEA geht. Ein Ziel der PTB ist hier u. a. die Untersuchung der Eignung optischer Sensoren an großen Koordinatenmessgeräten für die Messung mechanischer Komponenten von WEA. Hier gilt es die Vorteile optischer Sensoren, in kürzester Zeit viele Messdaten zu liefern, dem Nachteil der geringeren Genauigkeit gegenüberzustellen und ihren Einsatz im Sinne einer Genauigkeitssteigerung zu optimieren.

Im Zuge eines weiteren europäischen Projektes [9] sind ein großes Lagerringnormal und zwei evolventische Scanningnormale entwickelt worden [14]. Das Lagerringnormal hat einen Innen- bzw. Außendurchmesser von 600 mm bzw. 800 mm (siehe Abbildung 5). Auch dieser Ring ist mit einem Temperaturüberwachungssystem ausgestattet. Kalibrierte Größen sind Rundheit, Durchmesser, Geradheit und Parallelität.

Abbildung 6:
Evolventisches
Scanningnormal



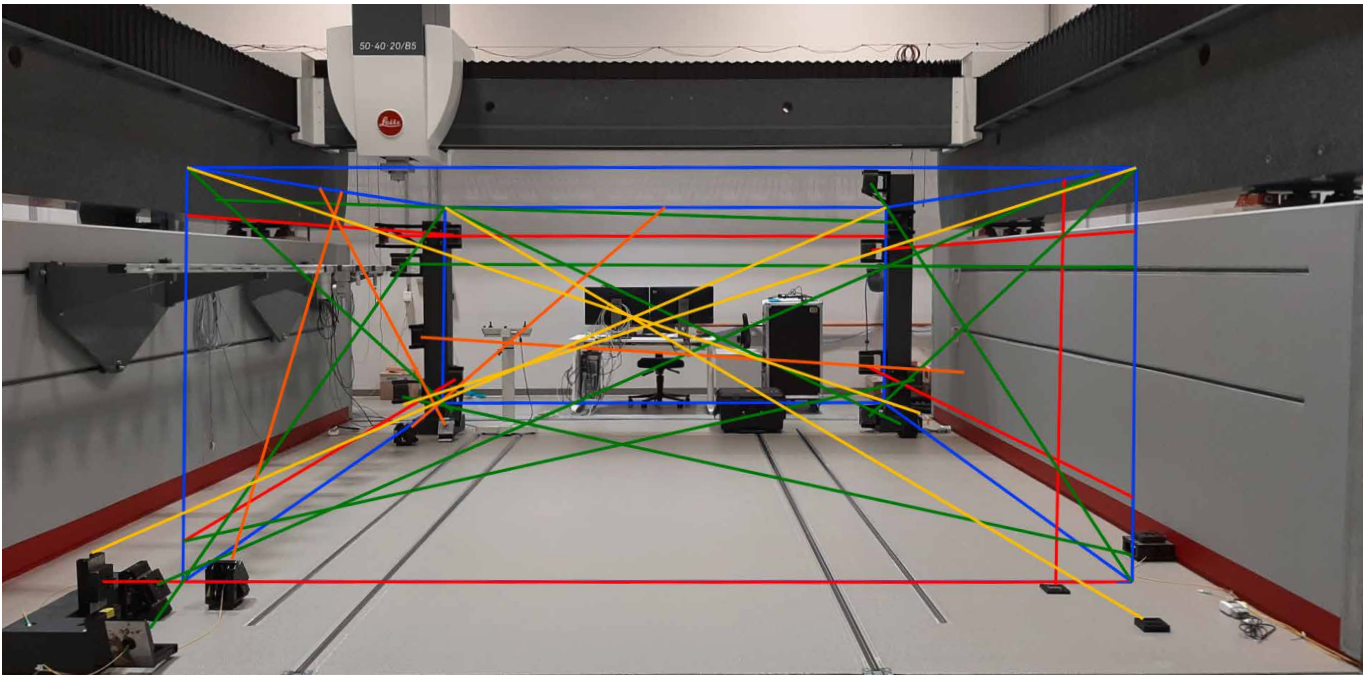
In demselben Projekt wurden auch noch zwei Scanningnormale entwickelt, die eine evolventische (typische Zahnprofilform) Innen- und Außenkontur (siehe Abbildung 6) verkörpern. Insbesondere bei der Messung großer Bauteile auf KMG bietet das Scannen erhebliche zeitliche Vorteile und ist daher wirtschaftlich wichtig. Durch die sich stetig ändernde Krümmung der Evolventenform können die gegebenenfalls die Messung beeinflussenden dynamischen Effekte gut erkannt und als Messunsicherheitseinfluss quantifiziert werden. Bei einem der beiden Normale wurde die Evolventenform zusätzlich mit einer Welligkeit überlagert, denn auch die Untersuchung von kurzweiligen Strukturen ist insbesondere bei Zahnrädern von großer Bedeutung, um Ursachen für Laufgeräusche, Verschleiß sowie Auswirkungen auf den Wirkungsgrad in Getrieben zu analysieren.

1.2 Geometriefehlererfassung am Groß-KMG des CCW

Die Genauigkeit eines KMG wird wesentlich durch die geometrischen Abweichungen beeinflusst, die die Messergebnisse systematisch und zufällig verfälschen [15]. Die geometrischen Abweichungen werden hauptsächlich durch Fertigungsabweichungen in den Führungen und den dazugehörigen Komponenten verursacht. Basierend auf dem Starrkörpermodell wirken auf die Geometrie des KMG insgesamt 21 positionsabhängige Fehlerinflüsse, die mithilfe verschiedener Verfahren ermittelt und dann numerisch korrigiert werden können [16].

Ein mittlerweile etabliertes Verfahren zur Erfassung systematischer Geometrieabweichungen an Groß-KMG basiert auf dem Einsatz eines LaserTracers [17]. Hierbei wird ein Retroreflektor mit dem KMG entlang eines vordefinierten Messpunktgitters bewegt, während mittels des LaserTracers an jedem Messpunkt Längenmessungen durchgeführt werden. Dieser Vorgang wird aus unterschiedlichen LaserTracer-Positionen wiederholt, sodass für jeden Messpunkt mehrere Längeninformationen vorliegen. Die Messpunktbestimmung geschieht nach dem mathematischen Prinzip der sequenziellen Multilateration. Die Messabweichungen des KMG ergeben sich jeweils aus den Differenzen dieser und der vom KMG angezeigten Messpunkte. Basierend auf einem kinematischen Fehlermodell lassen sich aus den Positionsdifferenzen die Komponenten der Geometrieabweichungen ermitteln.

Innerhalb des Aufbaus des CCW [5] wurde dieses Verfahren nochmals für das neue Groß-KMG optimiert, indem die Anzahl der Positionen, die Aufbauhöhen sowie die Reflektorausrichtungen bzw. der Reflektoroffset variiert und die Ergebnisse analysiert wurden. Die Untersuchungen



ergaben, dass das Messpunktegitter zur Aufnahme aller 21 Geometriefehleranteile bestenfalls in mindestens acht Durchläufen aus sechs definierten LaserTracer-Positionen gemessen werden sollte.

Eine neue Möglichkeit der geometrischen Überwachung von KMG ist das „Absolute Multiline System“ der Firma Hexagon [18], mit dem jüngst im Rahmen des CCW-Projekts [5] auch das neue Groß-KMG ausgestattet wurde (siehe Abbildung 7). Es ermöglicht interferometrische, absolute Längenmessungen entlang von 20 fest integrierten, verschieden orientierten Messlinien. Der überwiegende Teil der Messtechnik ist im Rechenzentrum der PTB untergebracht. Die Lasersignale werden über das vorhandene Glasfasernetz der PTB zu den optischen Sensoren im Messvolumen geleitet.

Eine „Absolute Multiline“-Messung läuft völlig automatisiert ab. Das KMG fährt einen Reflektor nach einem festen Programm die in die Maschinenstruktur integrierten 20 Messlinien ab. Aktuell laufen Untersuchungen zum Vergleich der Ergebnisse dieses Verfahrens mit denen des oben beschriebenen LaserTracer-Verfahrens, die bereits gute Übereinstimmungen zeigen.

1.3 Entwicklung und Optimierung des Kalibrierverfahrens M3D3

Mit der Entwicklung des M3D3-Kalibrierverfahrens (*3-Dimensional Mobile, Multilateration Measuring system*) wurden die zwei wesentlichen Ziele verfolgt, überhaupt auf einem Groß-KMG rückgeführte Messungen durchführen zu können sowie, insbesondere auf weniger genauen Groß-KMG, auch eine Verringerung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit zu erreichen. Das

Verfahren wurde in einem europäischen Forschungsprojekt [7] entwickelt und basiert auf der Integration eines unabhängigen Metrologierahmens in ein Groß-KMG, bestehend aus mindestens vier LaserTracern und dem Prinzip der Multilateration. Es ermöglicht die aufgabenspezifische, nahezu Abbefehler-freie Kalibrierung beliebiger Messaufgaben [19, 20].

Bei dem zweistufigen Verfahren werden in einem ersten Schritt die Geometriemerkmale des Messobjektes auf herkömmliche Weise durch eine taktile Messung erfasst (s. Abbildung 8, links). Im zweiten Schritt wird das Messobjekt aus dem Messvolumen entfernt, um bei der anschließenden Messung mit den LaserTracern Laserstrahl-Abschattungen zu vermeiden. Ein Reflektor wird nacheinander an die gleichen Positionen bewegt wie die Tastkugel bei der vorangegangenen taktilen Messung. Alle LaserTracer folgen den Bewegungen des Reflektors und führen Längenmessungen in den jeweiligen Messpunktpositionen aus (s. Abbildung 8, rechts). Für jeden Messpunkt ergeben sich somit mindestens vier Längeninformationen, mit denen die 3D-Messpunktkoordinaten sowie die LaserTracer-Positionen basierend auf dem mathematischen Prinzip der Multilateration ermittelt werden. Insbesondere für die stabile Bestimmung der LaserTracer-Positionen wird eine gute räumliche Verteilung der Messpunkte benötigt. Daher werden in den meisten Fällen im Vorfeld der Messung zusätzlich günstig verteilte Stabilisierungspunkte aufgenommen. Der Vergleich der Messpunkte mit der jeweiligen Positionsanzeige des KMGs ergeben Korrekturvektoren, mit denen die taktile Messung aus dem ersten Schritt Punkt für Punkt korrigiert wird.

Innerhalb des nationalen Forschungsprojektes

Abbildung 7: Anordnung der Multiline-Messlinien im Messvolumen des Groß-KMG

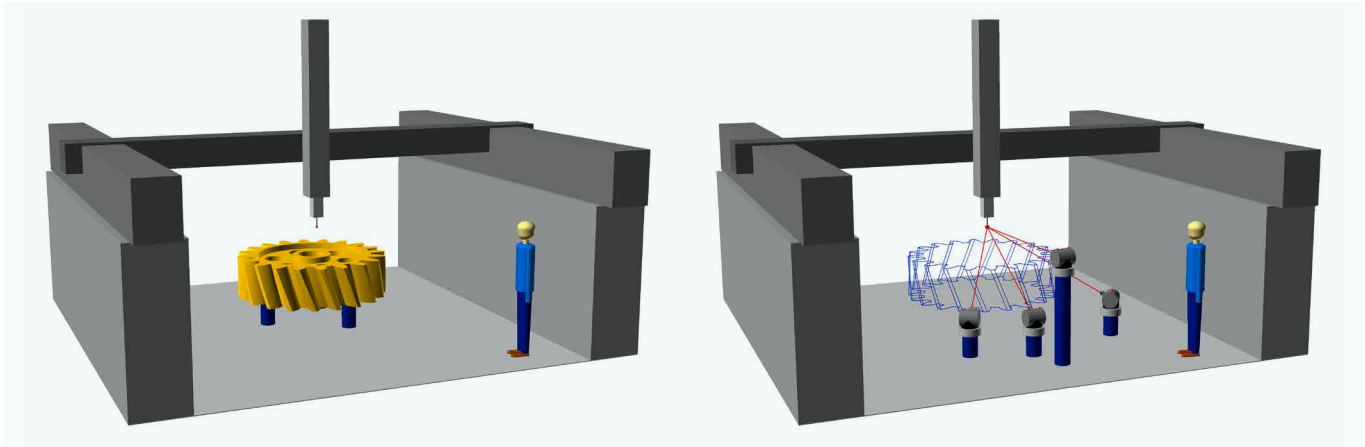


Abbildung 8:
Zweistufige M3D3-
Kalibrierung

[5] wurde dieses Verfahren weiterentwickelt. Ziel war es, die Einflüsse der Position und Anzahl der LaserTracer sowie der Stabilisierungspunkte auf die erreichbare Messunsicherheit zu identifizieren, zu analysieren und zu optimieren [21]. Während die Positionen der LaserTracer zueinander und zum Messobjekt einen deutlichen Einfluss zeigten, ergaben Simulationen, dass sich durch eine Erhöhung der LaserTracer-Anzahl auf mehr als vier nur eine geringe Verbesserung im Sinne einer genaueren 3D-Messpunktbestimmung erzielen lässt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Anzahl und die Lage der Stabilisierungspunkte entscheidend zur Lösbarkeit des mathematischen Gleichungssystems und zur Stabilität der Messergebnisse beitragen. Abschließend wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, die die Anwendung des M3D3-Verfahrens auch für komplexere Messaufgaben ermöglicht, die den Einsatz mehrerer Taster erfordern (wie z. B. bei Verzahnungsmessungen ohne Drehtisch).

1.4 Herausforderungen im Bereich der Digitalisierung

Das so genannte VCMM (*Virtual Coordinate Measuring Machine*) ist ein in der PTB entwickelter und in die Industrie transferierter digitaler metrologischer Zwilling zur Messunsicherheitsermittlung in der Koordinatenmesstechnik für Messvolumina bis ca. 1 m^3 . Die Grundlage des VCMM ist die Nachbildung des Messprozesses durch statistische Simulationen [22, 23]. Die Auswertung erfolgt mithilfe im Rechner durchgeführter „virtueller Experimente“. Dabei werden die real gemessenen Messpunkte von der Messgerätesoftware an den virtuellen Treiber übergeben und unter Beachtung der real vorliegenden Bedingungen mittels Monte-Carlo-Simulation verrauscht, sodass an einem Werkstück eine statistisch ausreichende Anzahl von „virtuellen“ Messungen unter sich ändernden Messbedingungen durchgeführt wird. Grundlage hierfür ist ein Fehlermodell des Messprozesses, das in Abhängigkeit der signifikanten

Einflussgrößen die Messpunkte verändert. Bislang sind u. a. Einflüsse durch das Tastsystem, die Geometriefehler, die Umgebungsbedingungen modelliert und berücksichtigt. Jede verrausste Messpunktewolke wird über definierte Schnittstellen an die Messgeräteherstellere Software zurückgegeben, sodass dort die Messgröße erneut ausgewertet werden kann. Das Ergebnis ist eine Anzahl von simulierten Messgrößen, die aufgrund zufälliger und systematischer Einflüsse voneinander abweichen und deren statistische Auswertung die Messunsicherheit des Messprozesses ergibt.

Um das VCMM zukünftig auch für die Messung auf Groß-KMG nutzen zu können, müssen die speziellen Unsicherheitseinflüsse bei der Messung größerer Bauteile ermittelt, quantifiziert und modelliert werden. Erste Untersuchungen hierzu wurden in einem europäischen Forschungsprojekt [9] und im CCW-Projekt [5] durchgeführt. Im Mittelpunkt dieser Betrachtungen standen die Einflüsse durch homogene sowie inhomogene Temperaturverteilungen innerhalb großer Bauteile sowie Durchbiegungseffekte aufgrund des Eigengewichts. Darüber hinaus wurde begonnen, die Modellierung der Geometrieabweichungen des Messgeräts auf weitere Gültigkeit im Vergleich zu kleineren KMG zu überprüfen.

In einem weiteren aktuell laufenden Verbundprojekt zur Digitalisierung in der Metrologie [10] geht es u. a. um die Entwicklung eines maschinenlesbaren Digitalen Kalibrierscheins (D-CC) und dessen Einbindung in das VCMM. Der D-CC soll hierbei zukünftig sowohl als Quelle für Eingangsinformationen als auch als Ausgabedokument anstelle des konventionellen analogen Kalibrierscheins dienlich sein. Hierfür müssen die für Kalibrierungen benötigten Ein- und Ausgabeparameter sowie die Schnittstellen zur Ein- und Ausgabe der ausgewählten Informationen definiert werden. Ein weiteres Ziel ist die digitale Übergabe der mit dem Absolute-Multiline-System (s. o.) erfassten Geometrieabweichungen des Groß-KMG an das VCMM zur direkten und aktuellen Parametrisierung des Modells. Dabei wird ein

zusätzlich installiertes Brechzahlkompensiertes Laserinterferometer in mindestens einer Messlinie des Absolut-Multiline-Systems zur Überwachung der korrekten rechnerischen Brechzahlkorrektur bei den interferometrischen Absolut-Multiline-Messungen eingesetzt werden. Auch soll die digitale Erfassung und Weitergabe der bereits angesprochenen Einflüsse durch Verformung der Großbauteile durch thermische und/oder Durchbiegungseffekte entwickelt werden.

1.5 Ausblick

Die dimensionelle Messung großer Bauteile ist eine Herausforderung, da die vielen verschiedenen Einflüsse auf das Messergebnis erkannt und quantifiziert werden müssen. Dies ist essenziell für die Etablierung von Rückführungsketten mithilfe von Normalen, wie es sie für viele kleinere Bauteilgeometrien gibt. Wie in diesem Beitrag dargestellt, konnten bereits innerhalb erster Forschungsaktivitäten viele Fragen geklärt werden. Es konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, die die Basis für neue Entwicklungen darstellen. Aktuell steht vor allem auch die Untersuchung neuer Technologien, die für die Messung großer Bauteile vorteilhaft sind, im Vordergrund.

Abgesehen von den vielen hier vorgestellten Forschungsaktivitäten steht der Industrie mit dem Groß-KMG der PTB erstmals die Möglichkeit offen, Großbauteile wie z. B. Getriebekomponenten für WEA rückführbar messen zu können, indem sie auch große Normale oder Master in der PTB kalibrieren lassen können. Auch die Etablierung von akkreditierten Kalibrierlaboratorien für z. B. Großverzahnungen durch die DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle) wird angestrebt.

2. Strömungsmesstechnik – Sicherstellung der Rückführung von Windgeschwindigkeitsmessungen

Nach der Windrichtung ist die Windgeschwindigkeit im Laufe der Zeit zu einer immer wichtigeren Messgröße geworden und ihre möglichst genaue Bestimmung ist heutzutage für vielerlei Fachdisziplinen und Anwendungen von immer dringender, zentraler Bedeutung. Stellt die Windgeschwindigkeit doch beispielsweise sowohl in der Meteorologie und Klimaforschung, wo sie zur Analyse der atmosphärischen Strömungs- und Windverhältnisse oder zur Verbesserung und Überprüfung von Wettervorhersagen und Klimamodellen benötigt wird [24, 25], als auch in der Windenergiebranche, wo sie u. a. für Standortbewertungen und die dabei durchzuführenden WindPotenzialanalysen [26] oder die Bestimmung des Leistungsverhaltens („power performance“) von WEA [27] unerlässlich ist, eine der wichtigsten Eingangsgrößen dar.

Die PTB ist seit vielen Jahrzehnten im Bereich der Strömungsmesstechnik aktiv und engagiert sich sowohl im Dienstleistungsbereich als auch in Forschung und Entwicklung, um den steigenden Bedarf nach immer genaueren rückgeführten Geschwindigkeitsmessungen bei Luftströmungen zu decken und metrologisch auf eine fundierte Basis zu stellen. Auf Bitten der Windenergiebranche wurde daher vor circa 10 Jahren damit begonnen, ein rückwirkungsfreies und rückführbares Windfernmesssystem zu entwickeln. In den folgenden Unterabschnitten wird skizziert, warum die bisherige Windgeschwindigkeitsmesstechnik zukünftig nicht mehr ausreichend ist, welches System die bestehenden Probleme lösen kann und welche Entwicklungsschritte zur Etablierung dieses Systems als neue Referenz für die Rückführung von Lidar-Systemen auf die SI-Einheiten bereits realisiert worden sind.

2.1 Status quo der Windgeschwindigkeitsmesstechnik in der Windenergie

Da die Leistung von WEA proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ist [28], sind kleine Messunsicherheiten für zuverlässige Windleistungsvorhersagen von besonderer Bedeutung. Bis dato ist es so, dass hierfür nach einem standardisierten Verfahren Windmessmasten mit Schalenstern- und Ultraschallanemometern eingesetzt werden [27]. Dieses Verfahren hat jedoch systembedingt einige Nachteile. Ökonomisch gesehen werden die mit den kontinuierlich größer werdenden WEA notwendigerweise auch höheren Messmasten immer teurer und übersteigen daher zukünftig mechanische und wirtschaftliche Limits [29]. Metrologisch betrachtet wirken sich vor allem zweierlei Aspekte negativ aus: Zum einen handelt es sich um ein invasives Verfahren, da die Anemometer samt Mast in der Strömung stehen, die sie messen sollen, wodurch es anfällig für Strömungsverzerrungseffekte ist [30]. Zum anderen werden diese Messungen an durch die Abmessungen des Mastes festgelegten diskreten Orten durchgeführt, deren Ergebnisse als repräsentativ für die gesamte von den Rotorblättern durchstrichene Fläche angenommen werden [31]. Zeitlich und örtlich hochaufgelöste nicht-invasive Messungen der Anströmung über den gesamten Rotorbereich einer Windenergieanlage würden daher einen wesentlichen Beitrag zur besseren Vorhersage der jährlichen Energieproduktion von Windenergieanlagen leisten.

Vor diesem Hintergrund hat sich in den letzten Jahren die Wind-Lidar-Technologie zu einer sinnvollen Alternative für Windmessmasten entwickelt [32, 33, 34]. Lidar steht für „light detection and ranging“ und ist ein bodenbasiertes und rückwirkungsfreies Fernmessverfahren, das die Bestim-

Abbildung 9: Prinzip des monostatischen Lidars: Das monostatische Lidar verfügt über eine kombinierte Sende- (TX) und Empfangseinheit (RX), wodurch zur Bestimmung des Windvektors auf der Mantelfläche des durch die Laserstrahlen aufgespannten - nach oben geöffneten - Kegels an mindestens drei verschiedenen Orten Einzelmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt werden müssen. Das Messvolumen des Strahls V_{Mi} ($i = 1, 2, 3$) kann dabei bis zu 30 m lang sein [39].

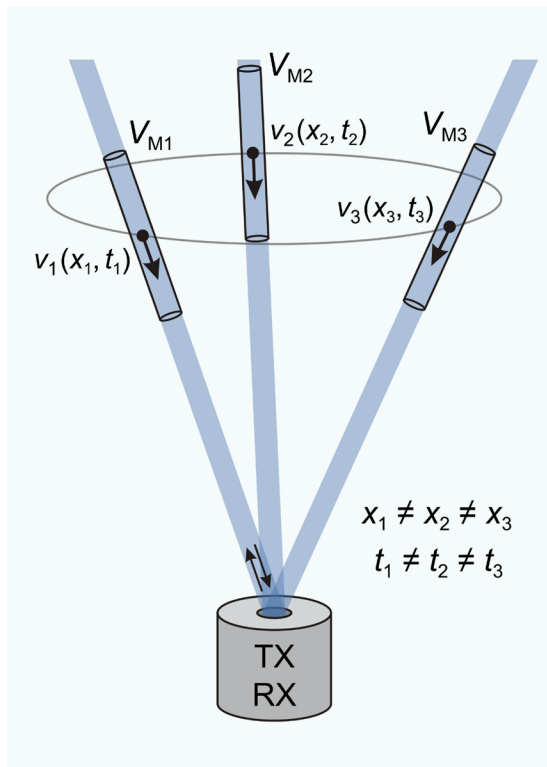
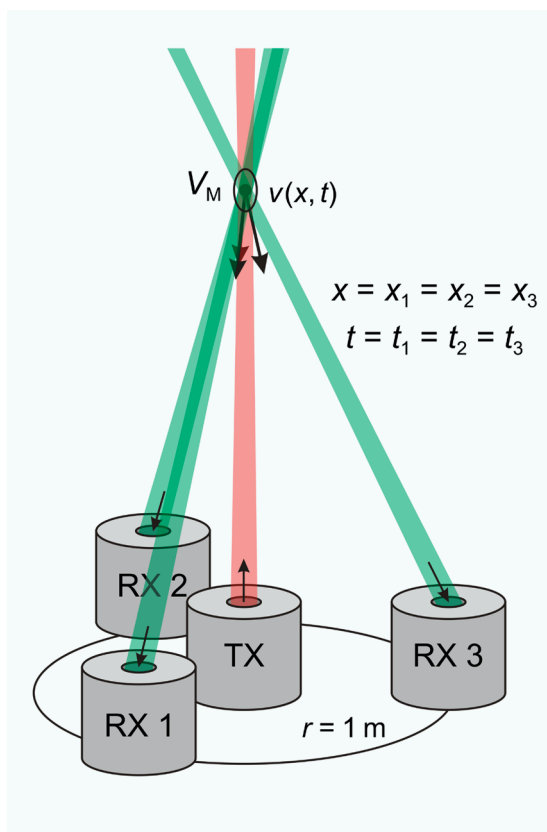


Abbildung 10: Prinzip des hochauflösenden bistatischen PTB-Lidars-Systems: Im Gegensatz zum herkömmlichen monostatischen Lidar verwendet das PTB-Lidar drei separate Empfänger (RX 1, RX 2 und RX 3), die in einem Radius r von 1 m um einen zentralen Sender (TX) angeordnet sind und alle auf dasselbe Messvolumen V_M fokussiert werden. Dies ermöglicht die gleichzeitige Messung der drei Windgeschwindigkeitskomponenten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Die Größe des Messvolumens V_M ist geometriebedingt abhängig von der Messhöhe und variiert von 300 μ m im Durchmesser und 2 mm in der Länge in 5 m Höhe bis zu einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 4 m in 250 m Höhe.



mung von Windgeschwindigkeiten in Messhöhen zwischen 40 m und 200 m ermöglicht. Die am häufigsten verwendeten Windfernmessgeräte sind konventionelle monostatische Wind-Lidar-Systeme. Diese Systeme messen die Windgeschwindigkeitskomponente in Richtung eines gemeinsamen Sende- und Empfangsstrahls, indem sie die Doppler-Verschiebung des Streulichts von Aerosolen bestimmen, die den Sendestrahls passieren [35]. Um alle drei Geschwindigkeitskomponenten und damit den gesamten Windvektor bestimmen zu können, muss dieser gemeinsame Strahl für (mindestens) drei Einzelmessungen in unterschiedliche Richtungen gekippt werden (s. Abbildung 9). Der während eines Messzyklus aus diesen Einzelmessungen ermittelte Windvektor ist ein theoretisches, rein rechnerisches Ergebnis aus zu unterschiedlichen Zeiten an unterschiedlichen Orten durchgeführten Messungen. Unter der Voraussetzung, dass das Windfeld innerhalb des gesamten Messzyklus homogen ist, liefern diese Systeme verlässliche Messergebnisse [36, 32]. Bei inhomogenen Windverhältnissen, wie sie über komplexem Gelände vorherrschen, oder in größeren Höhen, wo die Messvolumina der Einzelmessungen weit voneinander entfernt sind, ergeben sich jedoch signifikant größere Messunsicherheiten. Diese können in der Größenordnung von bis zu 10 % [32, 37] oder sogar bis zu 20 % [38] liegen. Daher ist die Genauigkeit der Messergebnisse von monostatischen Lidar-Systemen in komplexen Windfeldern kaum quantifizierbar, wenn nicht andere Referenzmessungen berücksichtigt werden. Aus diesem Grund schreibt die Norm IEC 61400-12-1 [27] einerseits vor, dass Fernmesssysteme bei der Leistungskurvenbestimmung von WEA durch parallele Messungen mit einem Windmessmast überwacht werden müssen. Andererseits lässt sie die Nutzung von Fernmesssystemen für die Bewertung des Leistungsverhaltens grundsätzlich nur für flaches Gelände zu.

Es existieren zwar Ansätze, die prinzipbedingten Nachteile der monostatischen Lidar-Systeme auszugleichen, doch auch damit sind wiederum Nachteile verbunden. So werden z. B. hochauflösende numerische Strömungssimulationen eingesetzt, um die Messfehler in komplexem Gelände kompensieren zu können. Diese sind jedoch sehr kostspielig und zeitaufwendig [40]. Ein anderer Ansatz zur präzisen Bestimmung der Windgeschwindigkeit in komplexem Gelände basiert auf der Kombination mehrerer monostatischer Lidar-Systeme, die alle auf einen Punkt fokussiert werden [41, 42]. Mit dieser sogenannten Multi-Lidar-Technik kann zwar potenziell eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden, der Messaufbau, in dem die unabhängig voneinander arbeitenden Systeme aufgestellt werden, benötigt jedoch viel Platz und die exakte Überlagerung der einzelnen

Messvolumina in einem Punkt ist sehr diffizil. Aufgrund der Abhängigkeit der Messunsicherheit von den Strömungsverhältnissen am Messort sind monostatische Lidar-Systeme überdies bis dato nicht auf die SI-Einheiten rückführbar.

2.2 Neueste Entwicklungen in der Windgeschwindigkeitsmesstechnik für die Windenergie

2.2.1 PTB-Wind-Lidar-System

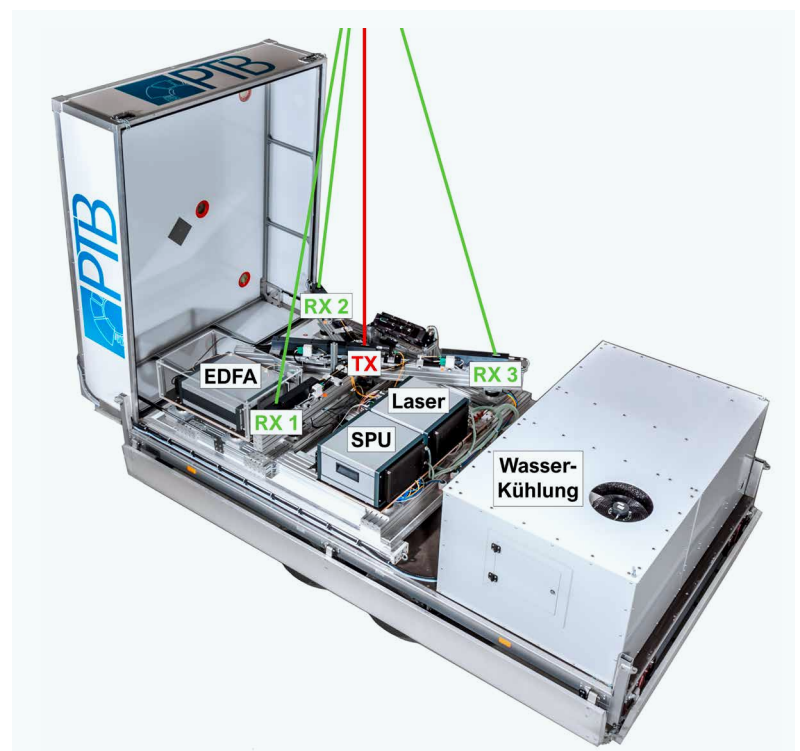
Um die vorstehend beschriebenen Einschränkungen der kommerziell verfügbaren Windfernmesssysteme zu überwinden und reproduzierbare Windgeschwindigkeitsmessungen mit geringen Messunsicherheiten in jedem Gelände zu ermöglichen, wurde vor 10 Jahren in der PTB-Arbeitsgruppe 1.41 „Strömungsmesstechnik“ ein neuartiges Dreikomponenten-Lidar-System konzipiert [43], das zukünftig als Bezugsnormal eingesetzt werden soll. Um die dafür nötige praktische Einsetzbarkeit zu Mess- und Kalibrierzwecken gewährleisten zu können, wurde dieses weltweit einzigartige Messsystem, das einen neuen wissenschaftlichen Standard auf dem Gebiet der Windfernmessstechnik setzt, sukzessive aufgebaut und erprobt, weiterentwickelt und evaluiert [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 23, 51, 52, 53, 54, 55]. Die Grundidee dieses neuartigen Systems beruht auf einem bistatischen Messaufbau [56], bei dem Sendeeinheit(en) räumlich voneinander getrennt sind. Mithilfe eines sendenden Laserstrahls und dreier Detektionsoptiken, die simultan das an einzelnen mit der Luftströmung mitgeführten Aerosolen gestreute Licht des Sendestrahls detektieren können, ist es mit außergewöhnlich hoher räumlicher Auflösung möglich, gleichzeitig die drei Komponenten des Windvektors zu bestimmen. Auf diese Weise ist die Messunsicherheit des bistatischen Lidar-Systems weitgehend unabhängig von den Strömungsverhältnissen am Messort, wodurch eine Rückführung auf die SI-Einheiten möglich wird. Abbildung 10 zeigt das Messprinzip des hochauflösenden bistatischen PTB-Wind-Lidar-Systems und verdeutlicht im direkten Vergleich mit dem in Abbildung 9 dargestellten Prinzip des herkömmlichen monostatischen Lidars die Unterschiede in der Funktionsweise der beiden Lidar-Technologien.

Basierend auf der Konzeption des bistatischen Systems wurde 2011 damit begonnen, einzelne Komponenten des Systems auf einem optischen Tisch aufzubauen, auf ihre Funktionsfähigkeit hin zu untersuchen und Schritt für Schritt zu einem Gesamtsystem weiterzuentwickeln. Bereits 2012 konnte so eine Geschwindigkeitskomponente gemessen werden [44, 45]. 2013 gelang erstmals

die Messung eines kompletten Geschwindigkeitsvektors [46]. Mit diesem damaligen noch sehr rudimentären System wurde 2014 ein erster Vergleich mit einem konventionellen Lidar bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen durchgeführt. Während zwischen den Ergebnissen der zwei Systeme bei homogenen Windverhältnissen über flachem Gelände nur geringe Abweichungen auftraten, nahmen bei böigen Windverhältnissen die Abweichungen erheblich zu [47]. Diese größeren Abweichungen bestätigten nicht nur die systembedingten Nachteile der monostatischen Lidar-Systeme, sondern untermauerten vor allem das große Potenzial des bistatischen PTB-Konzepts für Messungen in komplexem Gelände oder bei inhomogenen, turbulenten Strömungsverhältnissen. Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Messaufbau des PTB-Wind-Lidars noch auf einem kleinen Handwagen und war völlig ungeschützt den jeweiligen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Daher wurde das System 2015 in ein wetterfestes und klimatisiertes Gehäuse eingebaut, das eine für die genaue und reproduzierbare Ausrichtung der Empfangsoptiken erforderliche konstante Temperierung gewährleistet. Ebenfalls in jenem Jahr wurde zur Verbesserung der Mobilität des mittlerweile recht großen Aufbaus das gesamte System auf einen Anhänger montiert. Abbildung 11 zeigt den heutigen Entwicklungsstand des bistatischen PTB-Wind-Lidars auf eben jenem Anhänger.

Nachdem bis zur Integration des Systems in den Anhänger ausschließlich kurzzeitige Tests auf dem PTB-Gelände stattgefunden hatten, wurden 2015 und 2016 die ersten längeren Messkampagnen unter realen Einsatzbedingungen durchge-

Abbildung 11: Das bistatische PTB-Wind-Lidar-System ist auf einem eigens angefertigten Anhänger montiert. Unter dem im Messbetrieb geschlossenen Deckel befindet sich der luftgefederte optomechanische Messaufbau mit der zentralen Sendeoptik (TX) und den drei darum herum angeordneten Empfangsoptiken (RX 1, RX 2, RX 3) sowie der Laser (infraroter Bereich), der Faserverstärker (EDFA) und die zentrale Signalverarbeitungseinheit (SPU). Der Anhänger ist insgesamt gut 2 m breit und 4 m lang und hat bei geschlossenem Deckel eine Höhe von rund 1,5 m. Das zulässige Gesamtgewicht beträgt 3 t.



führt [48, 49]. Hierbei wurde das System auf dem Testfeld der Deutschen WindGuard Consulting GmbH in Aurich durch Vergleichsmessungen mit kalibrierten Schalenanemometern eines 135 m hohen Windmessmastes eingehend validiert. Parallel hierzu fanden auch Messungen mit einem konventionellen monostatischen Lidar-System statt, deren Daten für einen zusätzlichen Quervergleich herangezogen wurden. Für eine einheitliche Analyse wurden die während der Messungen kontinuierlich aufgezeichneten Daten nach dem in der IEC 61400-12-1 [27] standardisierten Verfahren über verschiedene lange Zeitintervalle gemittelt (10 Minuten, 1 Minute, 1 Sekunde) und die jeweils berechneten mittleren Geschwindigkeiten in Geschwindigkeitsklassen mit einer Segmentbreite von 0,5 m/s eingeteilt. Abbildung 12 fasst die bei dieser Vergleichsmessung vom bistatischen PTB-Lidar (blaue Punkte) und dem als Referenz definierten Top-Anemometer (rote Linie) ermittelten Windgeschwindigkeiten zusammen. Berechnet man aus diesen Werten die ebenfalls dargestellten Messabweichungen zwischen Lidar und Mast (Referenz) wird deutlich, dass diese Abweichungen (schwarze Punkte) in einem großen Geschwindigkeitsbereich von 6 m/s bis 13 m/s mit < 0,5 % so klein sind, dass sie innerhalb der Messunsicherheit des Messmast-Schalensternanemometers (gestrichelte Linien) liegen [54]. Dieses Ergebnis war ein großer Erfolg, konnte damit doch auf Anhieb gezeigt werden, dass das bistatische PTB-Lidar-System mindestens genauso gute Ergebnisse liefern kann, wie das etablierte Messmast-Verfahren.

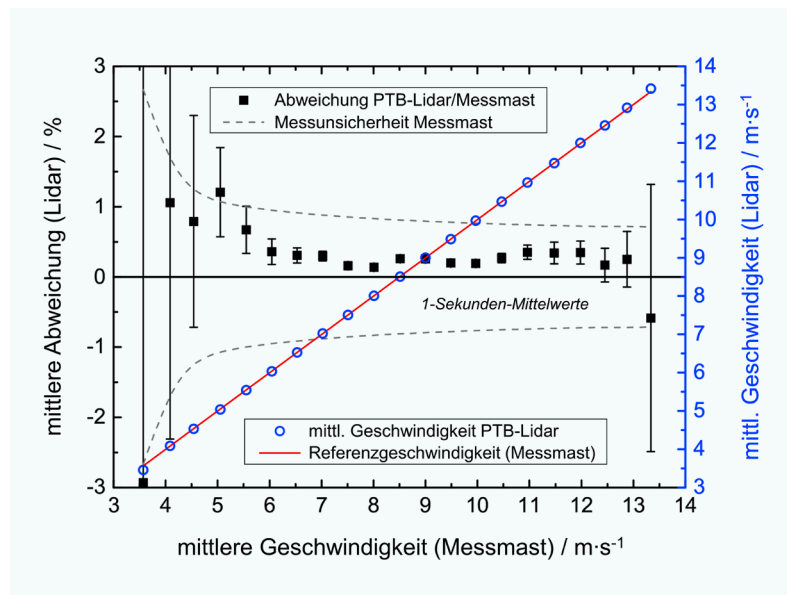
Darüber hinaus konnte durch den zusätzlichen Vergleich mit den parallel zur Vergleichsmessung aufgezeichneten WindCube-Daten das Potenzial des PTB-Lidars noch einmal unterstrichen werden. Dies zeigt Abbildung 13 eindrücklich, indem für drei unterschiedliche zeitliche Mittelungsdauern (10 Minuten, 10 Sekunden, 1 Sekunde) die

errechneten mittleren Abweichungen von PTB-Lidar (schwarze Punkte) und monostatischem Lidar (rote Punkte) in Bezug auf die als Referenz definierten Messmastwerte des Top-Anemometers dargestellt sind. In dieser Gegenüberstellung wird deutlich, dass für lange zeitliche Mittelungen (s. Abbildung 13 a, 10-Minuten-Mittelwerte) sowohl das bistatische als auch das monostatische Lidar-System zuverlässige Messergebnisse liefern. Allerdings sind die Abweichungen des PTB-Lidars hier bereits erkennbar kleiner als die des WindCubes. Während die Abweichungen des PTB-Lidars in einem großen Geschwindigkeitsbereich unabhängig von der Mittelungszeit nahezu konstant unter 0,5 % liegen (s. Abbildung 13 a-c), nehmen die Abweichungen des WindCubes gegenüber dem Messmast zu kürzeren Mittelungszeiten hin weiter zu und erreichen Werte von gut 3 % (s. Abbildung 13 c). Diese Ergebnisse belegen, dass bereits in ungestörten Windfeldern normale Windböen bei konventionellen Lidar-Systemen aufgrund der räumlichen und zeitlichen Mittelung des monostatischen Prinzips zu erheblichen Abweichungen bei den Windgeschwindigkeitsmessungen führen.

Durch die Vergleichsmessungen mit dem 135 m hohen Messmasten konnte somit zum einen nachgewiesen werden, dass das bistatische PTB-Lidar aufgrund seiner hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung grundsätzlich eine geringere Messunsicherheit als konventionelle Lidar-Systeme aufweist – unabhängig von der Mittelungszeit und den Strömungsverhältnissen (s. o.). Zum anderen belegten die Ergebnisse die Vermutung, dass das PTB-Lidar grundsätzlich eine mindestens genauso gute Messunsicherheit wie Messmasten haben müsse – unabhängig von der Mittelungszeit (s. o.) und den Strömungsverhältnissen [54]. Aufbauend hierauf konnte 2019 bei einem Vergleich mit einem für meteorologische Untersuchungen üblicherweise genutzten Ultraschall-Anemometer zudem die besondere Eignung des bistatischen PTB-Lidars für Messungen in turbulenten atmosphärischen Strömungen (zur Bestimmung vertikaler Austauschprozesse) festgestellt werden [51, 24]. Hierbei erwiesen sich sowohl das Ultraschall-Anemometer als auch das PTB-Lidar als präzise Messgeräte zur Bestimmung turbulenter Messgrößen. Aufgrund seines nicht-invasiven Messprinzips lieferte das Lidar jedoch insbesondere bei der Messung der Schubspannungsgeschwindigkeit, die eine wichtige Größe in vielen meteorologischen Modellen ist, etwas genauere Ergebnisse.

Einen umfassenden chronologischen Überblick über alle bisher zur Charakterisierung des PTB-Wind-Lidar-Systems durchgeführten Vergleichsmessungen bietet eine kürzlich erschienene Veröffentlichung [57]. Darin wird zudem der aktuelle Entwicklungsstand des Systems detailliert beschrieben (inkl. Details zu faseroptischem

Abbildung 12: Ergebnisse der 2016 in ungestörter Strömung durchgeführten Vergleichsmessung zwischen dem bistatischen PTB-Lidar und einem 135 m hohen Windmessmast. Dargestellt sind die mittleren Abweichungen zwischen Lidar und Top-Anemometer, ausgewertet nach IEC 61400-12-1 mit Mittelungsintervallen einer Länge von 1 Sekunde.



Aufbau und Signalverarbeitung) sowie die noch ausstehenden finalen Arbeiten zur Realisierung eines autarken Messbetriebs skizziert.

2.2.2 CCW-Windkanalmesseinrichtung

Die ersten detaillierten Vergleichsmessungen mit dem bistatischen PTB-Lidar hatten wie beschrieben bereits zeigen können, dass die Abweichung der gemessenen Windgeschwindigkeiten innerhalb der Messunsicherheit von kalibrierten Messmast-Schalenanemometern und damit innerhalb der bisherigen messtechnischen Referenz liegen. Für eine weiterführende, genauere Analyse der Grenzen seiner Leistungsfähigkeit, also für eine exakte messtechnische Validierung des PTB-Wind-Lidars war es somit notwendig, Vergleiche mit einem Bezugsnorm durchzuführen, das noch kleinere Messunsicherheiten aufweist als Schalensternanemometer. Idealerweise sollten diese Vergleichsmessungen zudem unter definierten und reproduzierbaren Strömungsbedingungen stattfinden, um zufällige Einflüsse wie bei natürlichen Witterungsbedingungen ausschließen zu können. Aus diesem Grund wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt, der im Rahmen des CCW-Projekts [5] 2017 im neu errichteten Euler-Bau I, dem ersten Bauabschnitt des CCW, realisiert werden konnte. Diese einmalige Windkanalmesseinrichtung (WKME), die aus einem Windkanal und einem als Bezugsnorm für die Rückführung der Strömungsgeschwindigkeit verwendeten Laser-Doppler-Anemometer (LDA) besteht, befindet sich auf einer Plattform in 8 Metern Höhe. Auf diese Weise ist es möglich, das PTB-Lidar direkt unterhalb der Windkanal-Messstrecke zu positionieren. Die Fotos in Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die WKME kurz nach deren Inbetriebnahme Anfang 2018.

Der speziell für die Anwendung im CCW konstruierte Windkanal der Deutschen WindGuard Wind Tunnel Services GmbH wurde während seiner Inbetriebnahmephase Ende 2017 aufwändig laseroptischen Untersuchungen zur Charakterisierung seines Strömungsfeldes unterzogen. Hierbei wurden entlang der Windkanalmessstrecke (z -Achse) mit einer Schrittweite von 10 mm detaillierte Strömungsprofilmessungen auf der gesamten Windkanal-Querschnittsfläche (xy -Ebene) von $50 \times 50 \text{ cm}^2$ durchgeführt und sowohl die Homogenität der Strömung als auch deren Turbulenzgrad bestimmt. Insgesamt attestierten diese Untersuchungen der neuen CCW-Windkanalmesseinrichtung in der vorderen Hälfte der Messstrecke, die für alle Messungen und Kalibrierungen genutzt wird, eine hohe Strömungsfeldhomogenität sowie eine niedrige Turbulenzintensität. Diese Eigenschaften sind essenziell für eine metrologische Validierung des Wind-Lidar-Systems.

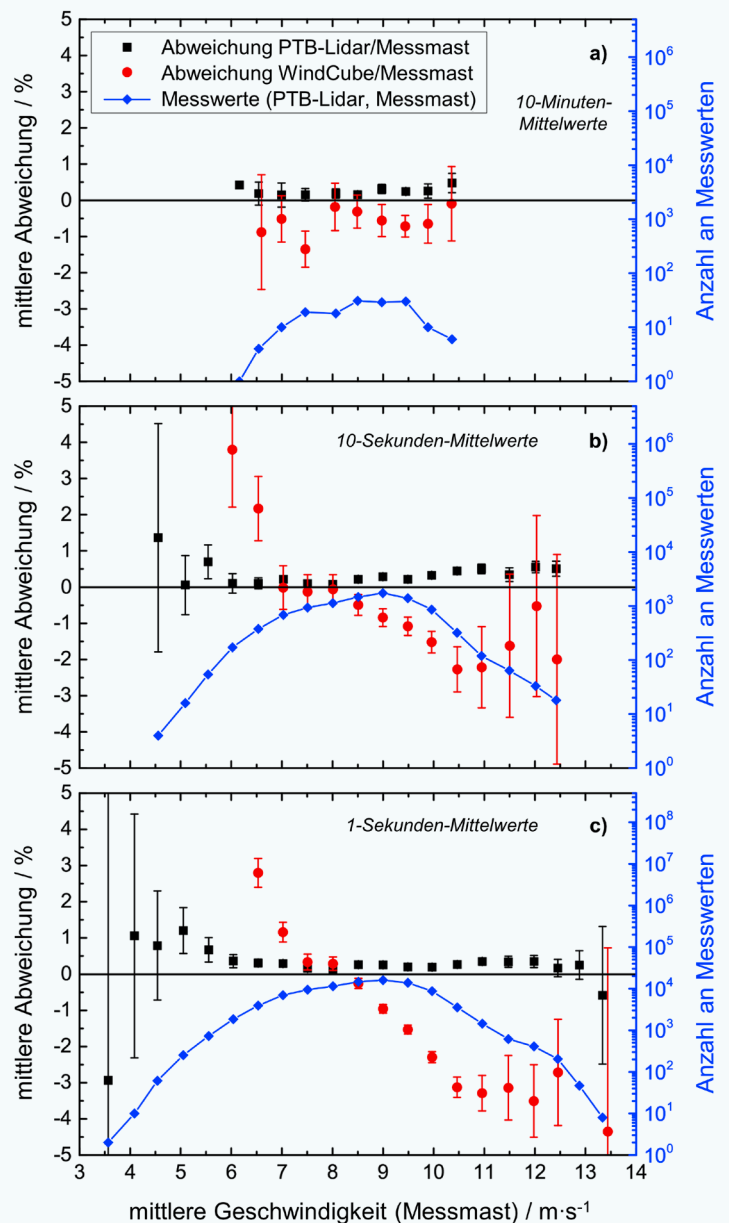


Abbildung 13: Ergebnisse der in ungestörter Strömung zwischen dem Top-Anemometer eines 135 m hohen Messmasts und dem bistatischen PTB-Lidar (schwarze Punkte) bzw. einem monostatischen Lidar (WindCube, rote Punkte) durchgeführten Vergleiche, ausgewertet nach IEC 61400-12-1 mit kürzer werdender zeitlicher Mittelungsdauer von a) 10-Minuten-Intervallen, b) 10-Sekunden-Intervallen und c) 1-Sekunden-Intervallen. Zusätzlich angegeben ist die Anzahl an Messwerten, die der jeweiligen Mittelung zugrunde liegen (blaue Punkte).

Abbildung 14: Ansichten der auf einer Plattform in 8 Metern Höhe installierten Windkanalmesseinrichtung des CCW. Das obere Bild erlaubt einen frontalen Blick durch die offene Windkanalmessstrecke auf das nahe des Düsenaustritts installierte LDA (schwarz). Das untere Bild zeigt von der Plattform aus gesehen die komplette O-förmige Rohrstrecke des Windkanals, das in die Messstrecke gerichtete LDA (Bezugsnormal) sowie dessen Mess- und Steuerungsrechner.



Abbildung 15: Die neue Windkanalmesseinrichtung des CCW wurde extra so konzipiert, dass das PTB-Wind-Lidar unterhalb der Messstrecke des Windkanals positioniert werden kann.



Eine detaillierte Beschreibung und Analyse der WKME-Charakterisierung findet sich in [50] und [54]. Die zwei grafischen Darstellungen in Abbildung 16 und Abbildung 17 fassen die Ergebnisse anschaulich zusammen.

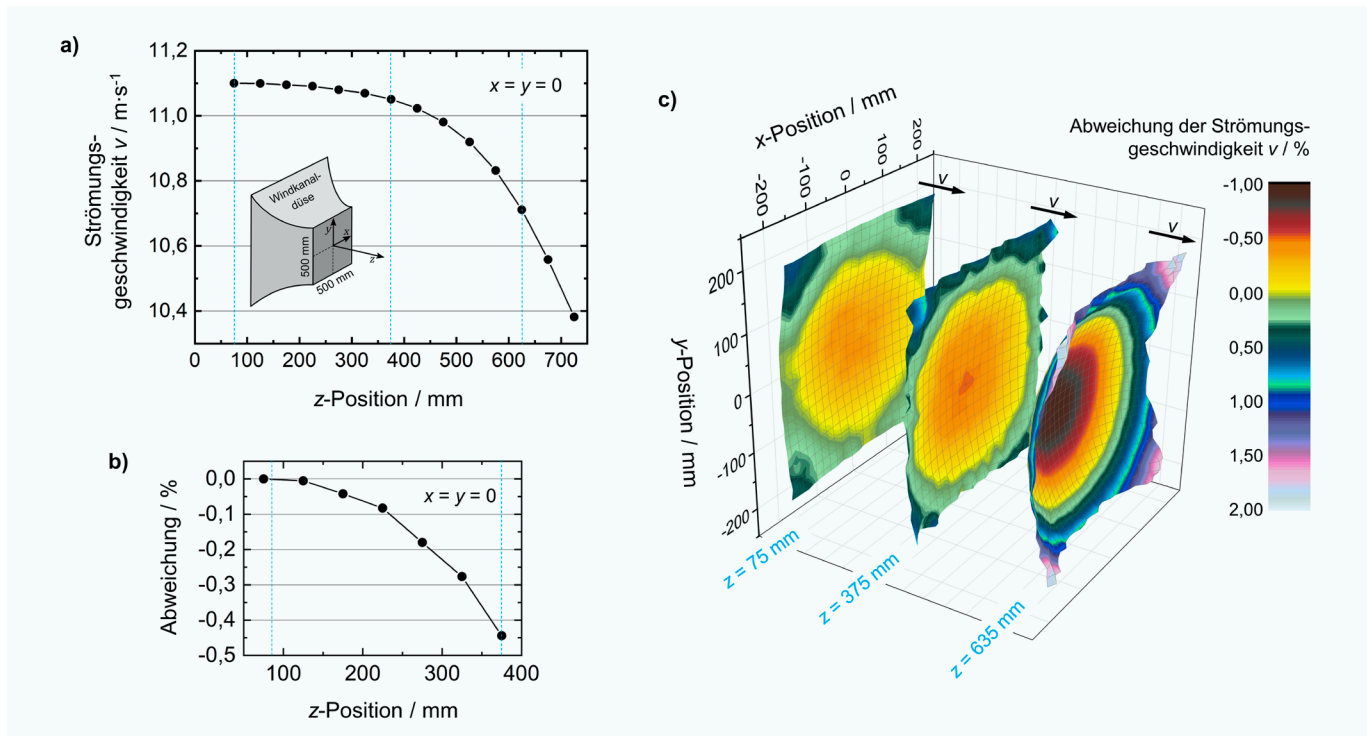
Die hohe Homogenität der Windkanalströmung verdeutlicht Abbildung 16, indem sie exemplarisch für eine konstante Strömungsgeschwindigkeit am Austritt der Windkanaldüse von 11,1 m/s drei über eine Querschnittsfläche von 400 mm × 400 mm aufgenommene Strömungsprofile zeigt (c), die aus einzelnen Messreihen entlang der z-Achse in Strömungsrichtung (a, b) zusammengesetzt wurden.

In den Einzelmessungen zeigte sich deutlich, dass die Strömungsgeschwindigkeit in der ersten Hälfte der Messstrecke ($z < 375$ mm) nur sehr langsam und mit einer Abweichung von weniger als 0,15 % pro 100 mm abfällt (vgl. Abbildung 16 a und b). Für die laterale Homogenität in der vorderen Hälfte der Messstrecke ergaben sich im Kernbereich der Strömung ($-100 \text{ mm} \leq x, y \leq 100 \text{ mm}$) Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeit von 0,01 % auf 10 mm [54].

Bei den Untersuchungen zur Turbulenz zeigte sich bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 20 m/s eine bauartbedingte Resonanz, die zu einem deutlich erhöhten Turbulenzgrad von 1,6 % führte. Durch das nachträgliche Einbringen eines geeigneten Lufteinlasses in einer Ecke des Windkanals konnte dieser Wert auf 0,3 % reduziert werden. Und auch im übrigen Geschwindigkeitsbereich zwischen 1 m/s und 30 m/s konnte so der Turbulenzgrad weiter optimiert und um ca. 0,1 bis 0,2 Prozentpunkte gesenkt werden. Abbildung 17 veranschaulicht diese Strömungsoptimierung auf Werte $\leq 0,35$ % im gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich, indem sie die vor und nach dem Einbringen des Lufteinlasses in der Mitte der Messstrecke und 375 mm vom Düsenaustritt gemessenen Turbulenzgrade des Windkanals in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit zeigt.

Die Windkanalmesseinrichtung des CCW zeichnet sich durch eine hohe Homogenität und geringe Turbulenz seines Strömungsfeldes aus. Zudem verfügt sie über zwei 3D-Traversiereinheiten zur exakten Positionierung des LDA-Messvolumens und Lokalisierung des Lidar-Messvolumens. Die technischen Eigenschaften des Windkanals und dessen Strömungskennwerte im Kernbereich der Strömung (innerer Querschnittsbereich von $20 \times 20 \text{ cm}^2$) für die vordere Hälfte der Messstrecke ($z \leq 375$ mm) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Windkanal (Göttinger Bauart):
 - ▷ Düsenquerschnitt: $50 \times 50 \text{ cm}^2$
 - ▷ Messstreckenlänge: 80 cm (offene Messstrecke)
 - ▷ Geschwindigkeitsbereich: 1 m/s bis 30 m/s
 - ▷ Homogenität: 0,01 % Abweichung auf 10 mm (vgl. Abbildung 16)
 - ▷ Turbulenzgrad: $\leq 0,35$ % (vgl. Abbildung 17)
 - ▷ Beruhigungskammer mit Wabengleichrichter und 7 Sieben
 - ▷ Kontraktionsverhältnis: 1:5,7



- LDA-Bezugsnormal:
 - ▷ LDV-Sonde „fp50-unshift-532nm“ (ILA R&D GmbH)
 - ▷ Messunsicherheit: 0,18 % (rückgeführt am nationalen Normal der PTB)

Nach der erfolgreichen Validierung der WKME wurde 2018 die erste Vergleichsmessung mit dem PTB-Lidar durchgeführt. Hierbei wurden Lidar-Messvolumen (Durchmesser: $400 \mu\text{m}$, Länge: 4 mm) und LDA-Messvolumen (Durchmesser: $300 \mu\text{m}$, Länge: $2,5 \text{ mm}$) so ausgerichtet, dass sie sich beide innerhalb des Kernströmungsbereichs ($x = y = 0$; $z \approx 250 \text{ mm}$) in demselben Volumen von etwa 1 cm^3 und somit in dem Bereich der Messstrecke mit hoher Homogenität und geringem Turbulenzniveau befanden [53]. Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs, der über einen Geschwindigkeitsbereich von 4 m/s bis 16 m/s und Messzeiten von jeweils einer Stunde mit Mittelungszeiten von 1 Sekunde durchgeführt wurde. Bereits die vom Lidar-System gemessenen mittleren Geschwindigkeiten bezogen auf das LDA (blaue Punkt) zeigen eine verblüffende Genauigkeit (die rote Linie entspricht der Identität). Noch deutlicher wird das Ergebnis, betrachtet man die mittleren Abweichungen zwischen beiden Systemen (schwarze Punkte). Hier zeigt sich, dass die Abweichungen über den gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich $< 0,5 \%$ sind. Um eine eventuelle Winkelabhängigkeit des Lidars auszuschließen, wurde bei einer Geschwindigkeit von 10 m/s eine zusätzliche Messung durchgeführt,

nachdem der Lidar-Anhänger um 90° gedreht worden war (magentafarbener Punkt). Da beide Werte bei dieser Geschwindigkeit (schwarz und magenta) innerhalb der jeweiligen gemessenen Standardabweichungen liegen, konnte dies als ein konsistentes Ergebnis bezüglich der Messgeometrie des Lidar-Systems betrachtet werden. Insgesamt betrug die mittlere Abweichung aller Messungen $0,37\% \pm 0,06\%$ (gestrichelte Linie) [53]. Der kleine systematische Fehler ließ sich darauf zurückzuführen, dass die Messhöhe des Lidar-Systems in der Windkanal-Messstrecke zum damaligen Zeitpunkt nicht exakt bestimmt werden konnte. Neuere Messergebnisse, bei denen mit erheblichem Aufwand die Messhöhenbestimmung verbessert wurde, zeigen Abweichungen zwischen Lidar und LDA von etwa $0,2\%$, was im Bereich der Messunsicherheit des LDAs, dem genauesten Messgerät zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten, liegt.

2.3 Ausblick

Die eingehende messtechnische Validierung des neuartigen bistatischen PTB-Wind-Lidars konnte zeigen, dass das bistatische System sowohl gegenüber herkömmlichen monostatischen Systemen eine deutlich geringere Messunsicherheit aufweist als auch im Vergleich zu Schalensternanemometern, den momentanen Referenzmessgeräten, mindestens genauso gute Ergebnisse bei der Bestimmung der Windgeschwindigkeit liefert. Neueste Ergebnisse erhärten sogar die Vermutung, dass das bistatische Wind-Lidar in seiner Genauigkeit mit LDAs vergleichbar ist. Auf Basis seiner exakt

Abbildung 16: Homogenität der Strömung des CCW-Windkanals: a) Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeit entlang der z-Achse ($x = y = 0$) bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit des Windkanals von $11,1 \text{ m/s}$ mit b) den dazugehörigen Abweichungen in % für $z \leq 375 \text{ mm}$ sowie c) Entwicklung der lateralen Homogenität entlang der Teststrecke ($z = 75 \text{ mm}$ (Anfang), 375 mm (Mitte), 635 mm (Ende)) auf einer Querschnittsfläche von $400 \times 400 \text{ mm}^2$.

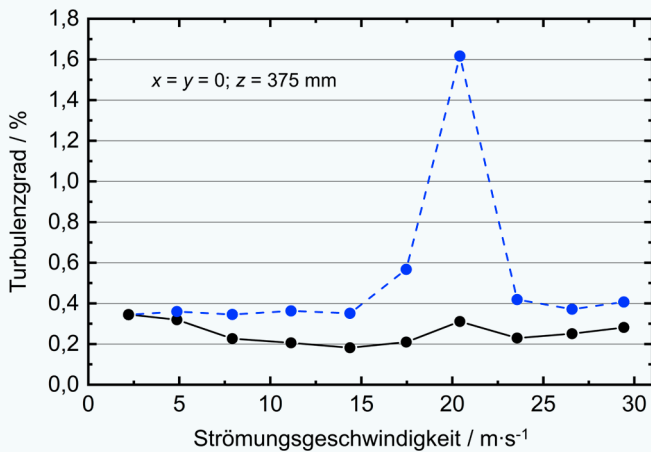


Abbildung 17: Turbulenzgrad des CCW-Windkanals in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit – die anfänglich infolge einer Resonanz erhöhte Turbulenz (blaue Punkte) konnte mithilfe eines zusätzlichen Lufteinlasses deutlich reduziert werden (schwarze Punkte).

bestimmbaren Geometrie, der bekannten Wellenlänge und der präzisen Frequenzauswertung hat das System das Potenzial, erstmals rückführbare Windgeschwindigkeitsmessungen zu ermöglichen –

sowohl in flachem auch als auch in komplexem Terrain. Hierdurch ist das bistatische Wind-Lidar-System der PTB hervorragend geeignet, die Genauigkeit von Standortbewertungen, Windpotenzialanalysen und Leistungskurvenmessungen zu verbessern sowie Kalibrierungen von konventionellen Lidar-Systemen durchzuführen oder auch die Meteorologie und Klimaforschung bei der Ermittlung von atmosphärischen Kenngrößen zu unterstützen. Um diese Messungen uneingeschränkt als Dienstleistungen anbieten zu können, stehen noch zwei letzte Entwicklungsschritte aus: Das Softwaresystem aus Steuerung und Signalauswertung sowie der optomechanische Aufbau müssen noch so weit ertüchtigt werden, dass sowohl eine automatisierte Messvolumenpositionierung als auch eine autarke und unterbrechungsfreie Betriebsführung im Feld garantiert ist. So kann

mit dem bistatischen Wind-Lidar-System der PTB als zukünftigem Bezugsnormale für die Windgeschwindigkeit der weitere Ausbau der Windenergie auch an Standorten in komplexem Gelände nachhaltig unterstützt werden.

3. Drehmoment-Normalmessenrichtung – Sicherstellung der Rückführung großer Drehmomente

In den letzten 10 Jahren ist der Ausbau der Windenergieanlagen und deren Anzahl und Größe stark gestiegen. So erzeugt heute eine Windenergieanlage an Land Leistungen von bis zu ca. 5 MW und auf See sogar bis zu 10 MW und die Tendenz ist steigend.

Während die Windgeschwindigkeiten bei den im Feld aufgebauten Windenergieanlagen gemessen werden, erfolgt die Optimierung und der Test von Prototypen von Windenergiegondeln auf großen Prüfständen wie sie z. B. an der RWTH Aachen für Windenergieanlagen bis 4 MW (s. Abbildung 19) oder am Fraunhofer IWES bis 10 MW zur Verfügung stehen [58, 59]. In diesen Anlagen werden Drehmomente im MN·m-Bereich bei unterschiedlichen Drehzahlen bis zu 20 Umdrehungen pro Minute erzeugt und die mechanischen Belastungen im Feld wie auftretende Windlasten und Biegemomente werden simuliert.

Um den Wirkungsgrad von Windenergieanlagen zu bestimmen, ist das wirkende Drehmoment $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$, welches als Kreuzprodukt aus dem durch den Hebelarm bis zum Kraftangriffspunkt festgelegten Ortsvektor \vec{r} und dem am Hebel angreifenden Kraftvektor \vec{F} definiert ist, eine wichtige messtechnische Größe, um die mechanische Leistung P zu bestimmen. Diese ist gegeben durch:

$$P = \vec{M} \cdot \vec{\omega} = \pi \cdot M \cdot n/30$$

Dabei ist ω die Winkelgeschwindigkeit in s^{-1} und n die Drehzahl in min^{-1} . Bei einer Drehzahl von

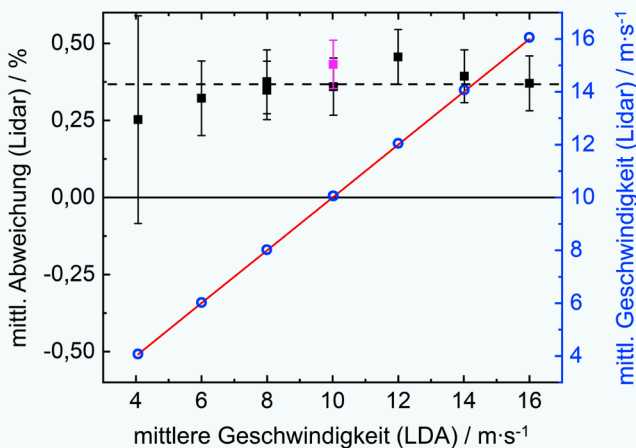


Abbildung 18: Ergebnisse der ersten Vergleichsmessung zwischen dem PTB-Wind-Lidar-System und dem LDA der CCW-WKME (Referenz): Über den gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich von 4 m/s bis 16 m/s beträgt die durchschnittliche mittlere Abweichung des Lidars vom LDA 0,37 % (gestrichelte Linie). Um eine eventuelle Winkelabhängigkeit des Lidars auszuschließen, wurde bei einer Geschwindigkeit von 10 m/s eine zusätzliche Messung durchgeführt, nachdem der Lidar-Anhänger um 90° gedreht worden war.



10 U/min entspricht die Leistung von 1 MW einem Drehmoment von ca. 1 MN. Bei den heute gängigen Typen von Windenergieanlagen mit Leistungen ab 3 MW betragen die Rotordrehzahlen ca. 5 bis 18 Umdrehungen pro Minute.

Die metrologische Rückführung des Drehmoments in Windenergieanlagenprüfständen ist mit großen Drehmomentaufnehmern möglich, die auf nationale Normale rückgeführt sind. Einer der größten in der PTB derzeit zur Verfügung stehenden Drehmomentaufnehmer ist der 5-MN·m-Drehmomentaufnehmer. Dieser Aufnehmer, von dem ein Foto in Abbildung 20 zu sehen ist, wurde bisher im Teilbereich bis 1,1 MN·m auf der 1,1-MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB kalibriert [60]. Bei dieser Anlage handelt es sich um eine Referenzanlage, bei der das Drehmoment auf die Kraftmessung und die Messung der Hebellänge rückgeführt ist und es werden erweiterte relative Messunsicherheiten von 0,08 % erreicht [61]. Im Rahmen des EMPIR-Forschungsprojektes „MN·m Torque“ [62] wurde der 5-MN·m-Aufnehmer im Teilbereich umfangreich untersucht und es wurden Verfahren entwickelt zur Drehmomentkalibrierung von Windenergieprüfständen unter Rotation [63]. Bis 5 MN·m erfolgte die Extrapolation, da bisher keine größeren Normal-Messeinrichtungen zur Verfügung stehen [64]. Für die Wirkungsgradbestimmung von Windenergieanlagen benötigt man sowohl die mechanische als auch die elektrische Leistung. Die

zur metrologischen Rückführung erforderlichen Verfahren werden in dem neuen EMPIR-Projekt „WindEFCY“ [65] entwickelt. Im Rahmen dieses Projektes wurde für die mechanische Leistungsmessung der 5-MN·m-Drehmomentaufnehmer der PTB jetzt mit einem Drehzahlmesssystem erweitert. Damit kann der Aufnehmer zukünftig als Transfornormal für Drehmoment und für mechanische Leistung eingesetzt werden [66].

3.1 5-MN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Um zukünftig auch größere Drehmomente kalibrieren zu können, ist der Aufbau einer größeren Anlage erforderlich. Daher wurde im Rahmen des CCW-Projekts [5] eine neue Drehmoment-Normalmesseinrichtung (DM-NME) für Drehmomente bis 5 MN·m entwickelt, mit der Option, diese Anlage auf 20 MN·m erweitern zu können. Die Gesamtkonstruktion (siehe Abbildung 21) dieser weltweit größten Anlage ist eine hundertprozentige PTB-Eigenkonstruktion und die einzelnen Komponenten der Maschine werden nach Vorgaben der PTB überwiegend extern gefertigt und von Mitarbeitern der PTB im CCW zusammengebaut. Messtechnische Detailkomponenten werden durch den wissenschaftlichen Gerätebau der PTB gefertigt. Die Maschine wird auf einem auf 60 Luftfedern gelagerten 1650 t schweren Fundament von 17 m Länge und 9 m Breite aufgebaut, welches mit

Abbildung 19: Gondelprüfstand des CWD Aachen mit eingespannter Gondel – zwischen der Lasteinleitungseinheit (links) und der Gondel (rechts) ist der 5-MN·m-Drehmomentaufnehmer der PTB eingebaut (Quelle: CWD Aachen)



Abbildung 20:
5-MN·m-Drehmomentaufnehmer der PTB

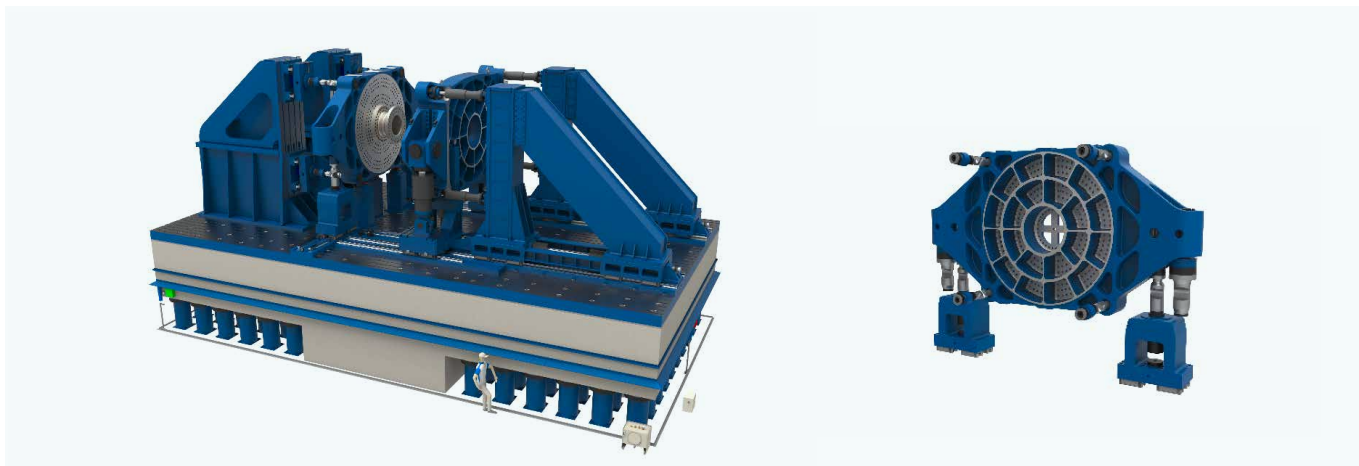
einem T-Nutenfeld die Montageplattform für alle Maschinenkomponenten bildet und als Teil des Maschinenrahmens auch die auftretenden Kräfte und Momente aufnimmt [67]. Das T-Nutenfeld ermöglicht eine modulare Bauweise und somit bei Bedarf auch zukünftig noch Anpassungen und Erweiterungen. Das Gesamtgewicht der Maschine beträgt ca. 350 t. Das Drehmoment wird in dieser Anlage über zwei Hydraulikzylinder erzeugt, die an dem Aktorhebel (rechts in Abbildung 21) angekoppelt werden. Das erzeugte Drehmoment setzt sich damit zusammen aus den Kreuzprodukten der effektiven Hebellänge und der durch jeden Zylinder jeweils erzeugten Kraft. Mit einer Hebellänge von ca. 6 m werden für die erste Ausbaustufe bis 5 MN·m zwei 1-MN-Zylinder zur Drehmomenterzeugung eingesetzt. Um eine schnelle präzise Regelung der Kräfte und damit des Drehmoments zu gewährleisten, werden die Kräfte bereits am Aktorhebel durch zwei an den Zylindern angeflanschte Kraftaufnehmer gemessen.

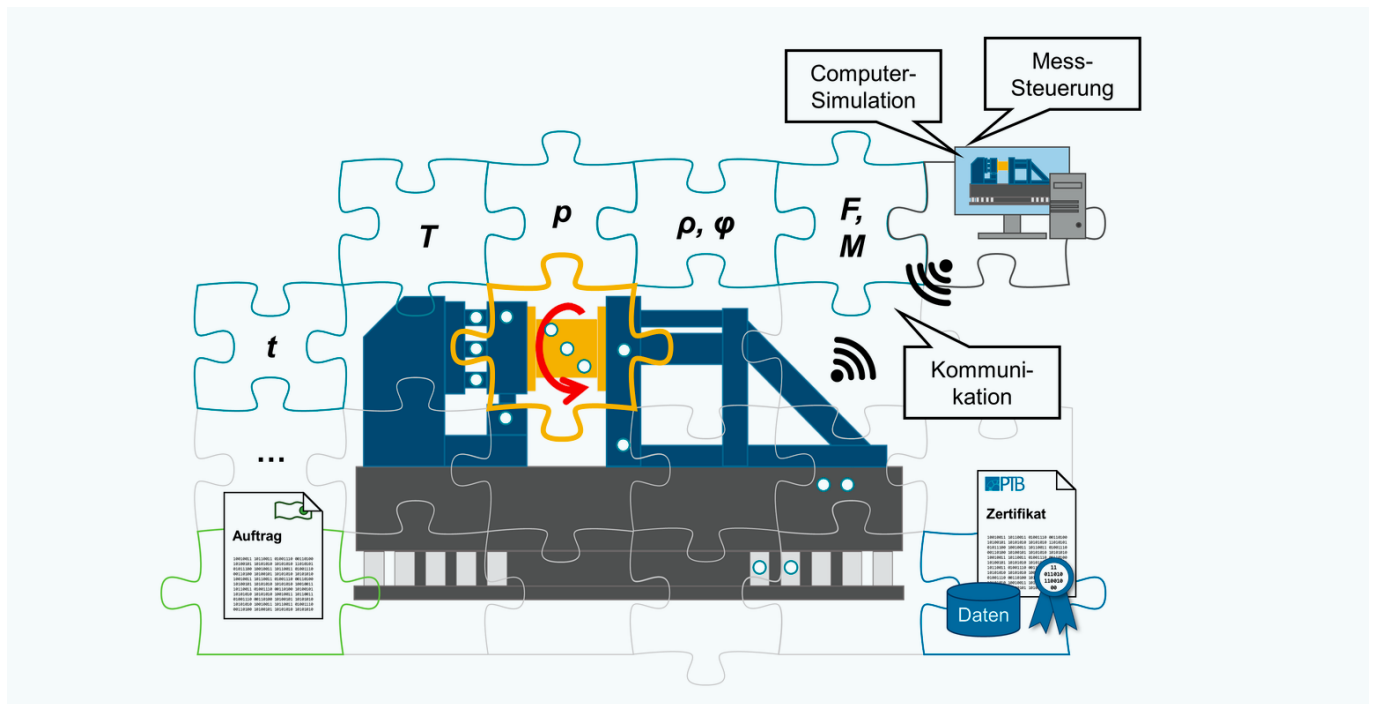
Abbildung 21:
Die neue 5-MN·m-Drehmoment-Normalmessenrichtung des CCW; als Detailbild (rechts) ist der Messhebel dargestellt

Der zu kalibrierende Drehmomentaufnehmer wird in der Mitte der Anlage zwischen den beiden Hebeln – Aktorhebel (rechts) und Messhebel (links) –, die jeweils ca. 32 t wiegen, montiert. Es können Drehmomentaufnehmer bis maximal 3,2 m Durchmesser und bis 2,7 m Länge eingebaut werden. Die Montage erfolgt dabei über die durch die Konstruktion festgelegten Teilkreise von 1,45 m bis 3,125 m Durchmesser mit M-48-Verschraubungen. Es wird empfohlen, die Abmessungen zukünftig zu kalibrierender Drehmomentaufnehmer und die Montagedetails und gegebenenfalls notwendigen Adapter frühzeitig mit der PTB abzustimmen.

Die metrologische Rückführung des Drehmoments erfolgt über die Messung der Reaktionskräfte am Messhebel mit geeigneten Präzisionskraftaufnehmern, die in den Kraft-Normalmessenrichtungen der PTB mit direkter Massewirkung bis 2 MN mit einer rel. erweiterten Messunsicherheit von 0,002 % und über 2 MN mit einer rel. Messunsicherheit von 0,01 % kalibriert werden können, sowie über die geometrische Vermessung der Länge des Messhebels. Für die Drehmomentkalibrierung bis 5 MN·m wird in der im Aufbau befindlichen Anlage eine rel. erweiterte Messunsicherheit von $\leq 0,5$ % angestrebt, um den Anforderungen an die Drehmomentmessung in Prüfständen zur Wirkungsgradbestimmung von Windenergieanlagen gerecht zu werden. Die Hebellänge und die zusätzlich einwirkenden parasitären Kräfte und Momente bestimmen dabei die Messunsicherheit.

Auf den zuvor erwähnten Windenergieprüfständen werden die Windenergiegondeln aber nicht nur mit reinem Drehmoment getestet, sondern es werden auch Untersuchungen mit zusätzlichen Axialkräften und Biegemomenten durchgeführt, um die Windlasten und auftretende Biegebelastungen zu simulieren. Da der Einfluss solcher Belastungen auf die Sensorik im Prüfstand weitgehend ungeklärt ist, wird die neue im Aufbau befindliche Drehmoment-Normalmessenrichtung als Mehrkomponentenanlage ausgeführt. Dazu





befinden sich am Aktochebel neben den beiden 1-MN-Hauptzylindern, die das Drehmoment M_z erzeugen, noch 4 kleinere 100-kN-Zylinder, die es in der ersten Ausbaustufe ermöglichen, Axialkräfte F_z von bis zu ca. 400 kN und bei einem Zylinderabstand von 4,5 m Biegemomente M_x und M_y von bis zu ca. 900 kN·m aufzubringen.

Die Maschinenkomponenten sind weitgehend fertiggestellt und werden jetzt im CCW im Euler-Bau II auf dem Maschinenfundament aufgebaut. Bis Ende 2022 soll die Fertigstellung und Inbetriebnahme der Anlage bis 5 MN·m erfolgen und ab 2023 sollen dann Untersuchungen und Kalibrierungen an größeren Drehmomentsensoren bis 5 MN·m folgen.

3.2 Mögliche Erweiterung der DM-NME auf 20 MN·m

Der Ausbau der Windenergie führt auch zu immer größeren Windenergieanlagen und damit zu Drehmomenten > 5 MN·m. Daher wurden sowohl der Aktochebel als auch der Messhebel bereits so ausgelegt, dass im Rahmen eines Folgeprojektes ein späterer Ausbau bis 20 MN·m möglich ist. Dazu sind allerdings die beiden 1-MN-Zylinder am Aktochebel durch zwei 3,5-MN-Zylinder zu ersetzen und die Leistung der Servohydraulik entsprechend zu erweitern und die Kraftmesstechnik auf größere Kräfte bis 3,5 MN auszulegen. Um in einer weiteren Ausbaustufe auch die Mehrkomponentenmesstechnik auf eine Axialkraft von bis zu 1,4 MN und auf Biegemomente von bis zu 1,5 MN·m zu erweitern, wäre ein Austausch der 100-kN-Zylinder durch 350-kN-Zylinder notwendig. Der Ausbau der Anlage ist somit in mehreren

Stufen möglich. Zunächst sollen aber ab 2023 erste Kalibrierungen bis 5 MN·m durchgeführt werden, bevor die Anlage auf größere Drehmomente und Kräfte umgebaut wird. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten können aber auch bereits jetzt größere Drehmomentenaufnehmer bis 20 MN·m eingebaut werden, die dann im Teilbereich zunächst bis 5 MN·m untersucht und kalibriert werden und für größere Drehmomente extrapoliert werden.

3.3 Digitalisierung der Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Parallel zum Aufbau der Maschine wird bereits im Rahmen des Forschungsprojektes „GEMIMEG-II“ [10] an dem digitalen Zwilling der Drehmoment-Normalmesseinrichtung und des 5-MN·m-Drehmomentenaufnehmers gearbeitet. Abbildung 22 zeigt das Prinzip der zu entwickelnden digitalen Messtechnik-Plattform der neuen Drehmoment-Normalmesseinrichtung. Finite-Element-Berechnungen der Maschine zusammen mit einem Netzwerk von Sensoren mit realen Messdaten und maschinenlesbaren digitalen Kalibrierscheinen als metrologische Rückführung bilden dabei die Grundlage für einen digitalen Zwilling der Maschine.

Abbildung 22: Prinzip der zu entwickelnden digitalen Messtechnik-Plattform am Beispiel der neuen Drehmoment-Normalmesseinrichtung des Kompetenzzentrums für Windenergie.

4. Referenzen

- [1] Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2011 Teil I Nr. 43 vom 05.08.2011, S. 1704
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): *Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan*; beschlossen: 10. Juni 2020. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/necp.html> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [3] Umweltbundesamt (Hrsg.): *Erneuerbare Energien in Deutschland 2020 – Daten zur Entwicklung im Jahr 2020*, Stand: Februar 2021. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2020> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): *Die Nationale Wasserstoffstrategie*; beschlossen: 10. Juni 2020. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [5] BMWi-Projekt „PTB Wind“ (FKZ 0325945): *Aufbau eines Kompetenzzentrums ‚Wind‘ zur Verbesserung der Metrologie für die Effizienzsteigerung von Windenergieanlagen*. Laufzeit: 01.01.2016–31.12.2022. URL: <https://www.ptb.de/cms/ptb/kompetenzzentren/windenergie.html> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [6] DIN EN ISO 14253-1:2018: *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen*
- [7] EMRP Project T3.J2.2 „NIMTech“: *Metrology for New Industrial Measurement Technologies*. URL: <https://www.nimtech.ptb.de/> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [8] BMWi-Projekt „EVeQT“: *Erhöhung der Verfügbarkeit und Qualitätsoptimierung von Triebstrangkomponenten und Verzahnungen für Windenergieanlagen*. URL: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=AGO%20AG%20Energie%2BAnlagen&v=10&s=2&id=659455> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [9] EMRP Project ENG56 „Drivetrain“: *Traceable measurement of drive train components for renewable energy systems*. URL: <https://www.ptb.de/emrp/drivetrain.html> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [10] BMWi-Projekt „GEMIMEG II“: *Sichere und robuste kalibrierte Messsysteme für die digitale Transformation*. URL: <https://www.gemimeg.ptb.de/startseite/> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [11] EMPIR Project 19ENG07 „Met4Wind“: *Metrology for enhanced reliability and efficiency of wind energy systems*. URL: <https://www.ptb.de/empir2020/met4wind/home/> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [12] Härtig, F.; Rost, K.; Goch G.: *Large gear material standard for the traceability of gears for transmission manufacturing*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2010 (VDI reports: 2108), S. 991–1004
- [13] Wiemann, A.; Stein, M.; Kniel, K.: *Rückführung von Verzahnungsmessungen für Großgetriebe*. In: *6. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik 2017*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2017 (VDI-Berichte: 2316), S. 205–216
- [14] Wiemann, A.; Stein, M.; Kniel, K.; Jusko, O.; Fritsche, J.: *Koordinatenmesstechnik für Großgetriebebauteile in Windenergieanlagen*. In: *GETPRO – 6. Kongress zur Getriebeproduktion*, Band 1. Frankfurt: FVA, 2017, S. 265–278
- [15] Busch, K.; Kunzmann, H.; Wäldele, F.: *Numerical error correction of a coordinate measuring machine*. In: *Proceedings of IMEKO TC14, International Symposium on Metrology for Quality Control in Production (ISMQC)*, Tokyo, Japan, 1984
- [16] Neumann, H. J. et al.: *Koordinatenmesstechnik*. Ehningen: expert verlag, 1993
- [17] Schwenke, H.; Franke, M.; Schneider, C.-T.; Hannaford, J.: *Calibration of CMMs and Machine Tools by Parametric Multilateration*. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production*, Erlangen, 2004, ISBN 3-18-091860-8
- [18] Hexagon AICON ETALON GmbH: *Etalon Absolute-Multiline Technology: Revolution in der Längenmesstechnik*. URL: <https://www.etalonproducts.com/produkte/absolute-multiline-technologie/> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [19] DE Patent 10 2010 035 870 B4: *Verfahren zur Genauigkeitssteigerung einer positionierenden Maschine und positionierende Maschine*, 2012
- [20] Wendt, K.; Franke, M.; Härtig, F.: *Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers*. In: *Measurement*, 45 (2012) Nr. 10, S. 2339–2345
- [21] Rafeld, E.; Koppert, N.; Franke, M.; Keller, F.; Heißelmann, D.; Stein, M.; Kniel, K.: *Recent developments on an interferometric multilateration measurement system for large volume coordinate metrology*. In: *Measurement Science and Technology*: 33 (2021), 3, S. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac407c>
- [22] Trapet, E.; Franke, M.; Härtig, F.; Schwenke, H.; Wäldele, F.; Cox, M.; Forbes, A.; Delbressine, F.; Schellekens, P.; Trenk, M.; Meyer, H.; Moritz, G.; Guth, Th.; Wanner N.: *Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine*. In: *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.): PTB-F-35*, Braunschweig, 1999, ISBN 3-89701-330-4

- [23] Heißelmann, D.; Franke, M.; Kistner, T.; Schwehn, C.: Das virtuelle Koordinatenmessgerät VCMM. In: *Tagungsband der DIN-Tagung Koordinatenmesstechnik 2018 – Technologien und Anwendung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018, S. 10–22
- [24] Mauder, M.; Eggert, M.; Gutsmuhs, C.; Oertel, S.; Wilhelm, P.; Voelksch, I.; Wanner, L.; Tambke, J.; Bogoev, I.: Comparison of turbulence measurements by a CSAT3B sonic anemometer and a high-resolution bistatic Doppler lidar. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 13 (2020) Nr. 2, S. 969–983. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-13-969-2020>
- [25] Kanitz, T.; Lochard, J.; Marshall, J.; McGoldrick, P.; Lecrenier, O.; Bravetti, P.; Reitebuch, O.; Rennie, M.; Wernham, D.; Elfving, A.: Aeolus first light: first glimpse. In: Sodnik, Z. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Space Optics – ICSSO 2018*. S. 659–664. SPIE, 2019 DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2535982>
- [26] MEASNET Procedure: *Evaluation of Site-Specific Wind Conditions*. Version 2, April 2016. URL: http://www.measnet.com/wp-content/uploads/2016/05/Measnet_SiteAssessment_V2.0.pdf (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [27] IEC 61400-12-1:2017: *Wind energy generation systems – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, 2. Auflage
- [28] Kalmikov, A.: *Wind Power Fundamentals*. In: Letcher, T. M. (Hrsg.): *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. London: Academic Press, 2017, S. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809451-8.00002-3>
- [29] Emeis, S.; Harris, M.; Banta, R. M.: Boundary-layer anemometry by optical remote sensing for wind energy applications. In: *Meteorologische Zeitschrift* 16 (2007) Nr. 4, S. 337–347. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2007/0225>
- [30] Lindelöw, P. J. P.; Friis Pedersen, T.; Gottschall, J.; Vesth, A.; Wagner, R.; Schmidt Paulsen, U.; Courtney, M.: Flow distortion on boom mounted cup anemometers. Roskilde: DTU, Risø National Laboratory, 2010, Risø-R No. 1738(EN). URL: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/flow-distortion-on-boom-mounted-cup-anemometers> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [31] Scheurich, F.; Enevoldsen, P. B.; Paulsen, H. N.; Dickow, K. K.; Fiedel, M.; Loeven, A.; Antoniou, I.: Improving the Accuracy of Wind Turbine Power Curve Validation by the Rotor Equivalent Wind Speed Concept. In: *Journal of Physics: Conference Series* 753 (2016) Nr. 7, S. 72029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/7/072029>
- [32] Courtney, M.; Wagner, R.; Lindelöw, P.: Testing and comparison of lidars for profile and turbulence measurements in wind energy. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1 (2008) Nr. 1, S. 12021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1/1/012021>
- [33] Albers, A.; Janssen, A. W.; Mander, J.: *How to gain acceptance for lidar measurements*. URL: https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2010/LIDAR%20Acceptance.pdf (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [34] Slinger, C.; Harris, M.: Introduction to continuous-wave Doppler lidar. In: *Proceedings of Summer School in Remote Sensing for Wind Energy*. Boulder, Colorado, USA, 2012. URL: http://breeze.colorado.edu/ftp/RSWE/Chris_Slinger.pdf
- [35] Drain, L. E.: *The Laser Doppler Technique*. Chichester u. a.: Wiley, 1980
- [36] Peña, A.; Hasager, C. B.; Gryning, S.-E.; Courtney, M.; Antoniou, I.; Mikkelsen, T.: Offshore wind profiling using light detection and ranging measurements. In: *Wind Energy* 12 (2009) Nr. 2, S. 105–124. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.283>
- [37] Bingöl, F.; Mann, J.; Foussekis, D.: Conically scanning lidar error in complex terrain. In: *Meteorologische Zeitschrift* 18 (2009) Nr. 2, S. 189–195. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0368>
- [38] Bradley, S.: Wind speed errors for LIDARs and SODARs in complex terrain. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1 (2008), S. 12061. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1307/1/1/012061>
- [39] Ando, T.; Kameyama, S.; Hirano, Y.: All-fiber coherent Doppler LIDAR technologies at Mitsubishi Electric Corporation. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1 (2008) Nr. 1, S. 12011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1/1/012011>
- [40] Bradley, S.; Strehz, A.; Emeis, S.: Remote sensing winds in complex terrain – a review. In: *Meteorologische Zeitschrift* 24 (2015) Nr. 6, S. 547–555. DOI: <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0640>
- [41] Pauscher, L.; Vasiljevic, N.; Callies, D.; Lea, G.; Mann, J.; Klaas, T.; Hieronimus, J.; Gottschall, J.; Schwesig, A.; Kühn, M.; Courtney, M.: An Inter-Comparison Study of Multi- and DBS Lidar Measurements in Complex Terrain. In: *Remote Sensing* 8 (2016) Nr. 9, S. 782. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8090782>
- [42] Sørensen, S. T.; Warden, M.; Macarthur, J.; Silver, M.; Holtom, T. C.; McDonald, C.; Clive, P.; Bookey, H. T.: Advances in Doppler Lidar for Accurate 3D Wind Measurements. In: *Imaging and Applied Optics 2018 (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP)*, Optical Society of America, 2018, Paper AM2A.3. DOI: <https://doi.org/10.1364/AIO.2018.AM2A.3>

- [43] Eggert, M.; Müller, H.; Többen, H.: Konzeption eines Doppler-Lidar-Transfornormal zur Windgeschwindigkeitsmessung. In: Thess, A.; Resagk, C.; Ruck, B. et al. (Hrsg.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik: 19. Fachtagung, Ilmenau, 2011*. Karlsruhe: GALA e. V., 2011, 45.1.–45.6. URL: https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202011/pdf/Nr_p45.pdf (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [44] Eggert, M.; Müller, H.; Többen, H.: Doppler-Lidar-Transfornormal zur Windgeschwindigkeitsmessung: Aktueller Entwicklungsstand. In: Leder, A. et al. (Hrsg.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik : 20. Fachtagung, Rostock, 2012*. Karlsruhe: GALA e. V., 2012, 10.1–10.6. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202012/pdf/10.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [45] Eggert, M.; Müller, H.; Többen, H.: Doppler-Lidar-Transfornormal zur ortsaufgelösten, vektoriellen Windgeschwindigkeitsmessung. In: Kähler, C.J. et al. (Hrsg.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik: 21. Fachtagung, München, 2013*. Karlsruhe: GALA e. V., 2013, 43.1–43.7. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202013/pdf/43.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [46] Eggert, M.; Gutsmuths, C.; Müller, H.; Többen, H.: Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-Lidar-Transfornormal der PTB und einem Referenz-Ultraschallanemometer. In: Ruck, B. et al. (Hrsg.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik: 22. Fachtagung, Karlsruhe, 2014*. Karlsruhe: GALA e. V., 2014, 11.1–11.8. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202014/pdf/11.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [47] Gutsmuths, C.; Eggert, M.; Müller, H.; Többen, H.: Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-LIDAR-Transfornormal der PTB und konventionellen LIDAR-Systemen. In: Czarske, J. et al. (Hrsg.): *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik : 23. Fachtagung, Dresden, 2015*. Karlsruhe: GALA e. V., 2015, 65.1–65.7. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202015/pdf/65.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [48] Eggert, M.; Gutsmuths, C.; Müller, H.; Többen, H.: Zeitaufgelöste, vektorielle Vergleichsmessungen zwischen dem Doppler-LIDAR-Transfornormal der PTB und einem 135 m hohen Windmessmasten. In: Egbers, C. et al. (Hrsg.): *Experimentelle Strömungsmechanik : 24. Fachtagung, Cottbus, 2016*. Karlsruhe: GALA e. V., 2016, 3.1–3.7. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202016/pdf/3.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [49] Eggert, M.; Gutsmuths, C.; Oertel, S.; Müller, H.; Többen, H.: Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von instantanen Strömungsgeschwindigkeitsmessungen des bistatischen Doppler-Lidars der PTB und trägheitsbehafteten Messungen eines Schalensternanemometers. In: Ruck, B. et al. (Hrsg.): *Experimentelle Strömungsmechanik : 25. Fachtagung, Karlsruhe, 2017*. Karlsruhe: GALA e. V., 2017, 54.1–54.7. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202017/pdf/54.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [50] Oertel, S.; Eggert, M.; Gutsmuths, C.; Wilhelm, P.; Müller, H.; Többen, H.: Windkanalmesseinrichtung für die Validierung des bistatischen PTB-Wind-Lidars als Bezugsnormale. In: Grundmann, S. et al. (Hrsg.): *Experimentelle Strömungsmechanik : 26. Fachtagung, Rostock, 2018*. Karlsruhe: GALA e. V., 2018, 48.1–48.7. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege%202018/pdf/48.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [51] Eggert, M.; Tambke, J.; Gutsmuths, C.; Oertel, S.; Wilhelm, P.; Müller, H.; Többen, H.: Vergleich des bistatischen Doppler-Lidars der PTB und eines Ultraschall-Anemometers zur Messung von Turbulenzspektren. In: Delgado, A. et al. (Hrsg.): *Experimentelle Strömungsmechanik : 27. Fachtagung, Erlangen, 2019*. Karlsruhe: GALA e. V., 2019, 29.1–29.9. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege2019/pdf/29.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [52] Wilhelm, P.; Eggert, M.: Entwicklung einer hardwarebeschleunigten LDA-Messdatenauswertung. In: Delgado, A. et al. (Hrsg.): *Experimentelle Strömungsmechanik : 27. Fachtagung, Erlangen, 2019*. Karlsruhe: GALA e. V., 2019, 30.1–30.8. URL: <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege2019/pdf/30.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [53] Oertel, S.; Eggert, M.; Gutsmuths, C.; Wilhelm, P.; Müller, H.; Többen, H.: Bistatic wind lidar system for traceable wind vector measurements with high spatial and temporal resolution. In: *Proceedings of the 18th International Flow Measurement Conference – FLOMEKO 2019*, Lissabon, 2019. URL: <https://www.imeko.org/publications/tc9-2019/IMEKO-TC9-2019-052.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [54] Oertel, S.; Eggert, M.; Gutsmuths, C.; Wilhelm, P.; Müller, H.; Többen, H.: Validation of three-component wind lidar sensor for traceable highly resolved wind vector measurements. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 8 (2019), Nr. 1, S. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.5194/jsss-8-9-2019>

- [55] Oertel, S.; Eggert, M.; Wilhelm, P.; Hornig, J.: Vergleich des hochauflösenden bistatischen PTB-Wind-Lidars mit dem 200 m hohen Windmessmast des Fraunhofer IEE am Rödeseer Berg. In: Fischer, A. et al. (Hrsg.): *Experimentelle Strömungsmechanik : 28. Fachtagung, Bremen, 2021*. Karlsruhe: GALA e. V., 2021, 52.1–52.8.
- [56] Harris, M.; Constant, G.; Ward, C.: Continuous-wave bistatic laser Doppler wind sensor. In: *Applied Optics* 40 (2001) Nr. 9, S. 1501–1506. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.40.001501>
- [57] Wilhelm, P.; Eggert, M.; Hornig, J.; Oertel, S.: High Spatial and Temporal Resolution Bistatic Wind Lidar. In: *Applied Sciences* 11 (2021) Nr. 16, S. 7602. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167602>
- [58] Center for Wind Power Drives (CWD), RWTH Aachen: *4 MW-Systemprüfstand für On-Shore-WEA*. URL: <https://www.cwd.rwth-aachen.de/cms/CWD/Das-Center/Infrastruktur/~mqjnf/4-MW-Systempruefstand/> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [59] Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES): *Gondelprüfung und Untersuchung der elektrischen Eigenschaften*. URL: <https://www.iwes.fraunhofer.de/de/testzentren-und-messungen/gondelpruefung.html> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [60] Schlegel, C.; Kahmann, H.; Kumme, R.: MN-m torque calibration for nacelle test benches using transfer standards. In: *ACTA IMEKO* 5 (2016), Nr. 4, S. 12–18. DOI: http://dx.doi.org/10.21014/acta_imeko.v5i4.414
- [61] Peschel, D.; Mauersberger, D.; Schwind, D.; Kolwinski, U.: The new 1.1 MNm Torque Standard Machine of the PTB Braunschweig/Germany. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Force, Mass and Torque, IMEKO TC 3, Cairo, Egypt, 2005*, S. 40. URL: <https://www.imeko.org/publications/tc3-2005/IMEKO-TC3-2005-KL-001u.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [62] EMPIR Project 14IND14 “MN·m Torque”: *Torque measurement in the MN·m range*, URL: <https://www.ptb.de/emrp/ind14-home.html> (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [63] Weidinger, P.; Foyer, G.; Kock, S.; Gnauert, J.; Kumme, R.: Calibration of torque measurement under constant rotation in a wind turbine test bench. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 8 (2019), Nr. 1, 149–159, DOI: <https://doi.org/10.5194/jsss-8-149-2019>
- [64] Weidinger, P.; Foyer, G.; Ala-Hihiro, J.; Schlegel, C.; Kumme, R.: Investigations towards extrapolation approaches for torque transducer characteristics. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1065 (2018), S. 42057. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/4/042057>
- [65] EMPIR Project 19ENG08 “WinDEFcy”: *Traceable mechanical and electrical power measurement for efficiency determination of wind turbines*. URL: <https://www.ptb.de/empir2020/windefcy/home/>. (letzter Aufruf: 23.11.2022)
- [66] Song, Z.; Weidinger, P.; Eich, N.; Zhang, H.; Yogal, N.; Kumme, R.: 10 MW mechanical power transfer standard for nacelle test benches using a torque transducer and an inclinometer. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1065 (2018), S. 42057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100249>
- [67] Kahmann, H.; Schlegel, C.; Kumme, R.; Röske, D.: Principle and Design of a 5 MN·m Torque Standard Machine. In: *Proceedings of the IMEKO TC 3 Conference, Helsinki, Finland, 2017*. URL: <https://www.imeko.org/publications/tc3-2017/IMEKO-TC3-2017-037.pdf> (letzter Aufruf: 23.11.2022)

Untersuchungen zur Wechselwirkung von Windkraftanlagen mit terrestrischen Navigationssystemen

Thomas Kleine-Ostmann¹, Thorsten Schrader²

Flugsicherheit vs. Energiewende

Die Energiewende in Deutschland erfordert den Bau zahlreicher neuer Windkraftanlagen. Neben dem Ausbau von Windparks vor der Küste gewinnt auch das sogenannte *Repowering* an Bedeutung, bei dem alte, kleinere Windkraftanlagen durch neue, große ersetzt werden. Im Jahr 2019 wurden trotz des riesigen Bedarfs in Deutschland nur 35 neue Windkraftanlagen genehmigt. Die geringe Anzahl an Baugenehmigungen resultierte dabei nicht nur aus der Berücksichtigung von Umweltaspekten (z. B. Vogelschutz) und Akzeptanzproblemen bei der Bevölkerung (Mindestabstände zur Wohnbebauung, Infra-schall) sondern vor allem aus den Schutzanforderungen für terrestrische Navigationssysteme und Radaranlagen der Luftfahrt.

Insbesondere die 59 in Deutschland betriebenen Drehfunkfeuer verhindern oftmals die Genehmigung der Bauanträge. Die Drehfunkfeuer (engl. *Very High Frequency Omnidirectional Radio Range – VOR*) strahlen Funksignale im Frequenzbereich zwischen 108 MHz und 117,95 MHz ab, aus deren Empfang das Luftfahrzeug den Richtungswinkel zur Sendeanlage ableiten kann. Beim Standard-VOR (engl. *Conventional VOR – CVOR*) ist die Richtungsinformation in der Differenzphase zwischen einem mit 30 Hz frequenzmoduliertem omnidirektional abgestrahlten Referenzsignal und einem mit 30 Hz auf einem Antennenkreis umlaufend abgestrahlten Signal kodiert. Beim DopplervOR (engl. *Doppler VOR – DVOR*) ist das 30 Hz Referenzsignal amplitudenmoduliert und das auf dem Antennenkreis umlaufend abgestrahlte Signal erzeugt durch den Doppler-Effekt eine Frequenzmodulation, deren Phase von der Richtung des Empfängers im Flugzeug zum Standort des DVOR abhängt.

Zum Schutz der Drehfunkfeuer vor Störungen des Signals durch Windkraftanlagen betrachtet

die Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) den Anlagenschutzbereich in 15 km Umkreis, wenn neue Windkraftanlagen genehmigt werden sollen. Dazu setzt sie ein einfaches Bewertungstool auf Basis von Formeln für CVOR und DVOR ein, die in einem stark vereinfachten zweidimensionalen Modell die Winkelfehler infolge gestreuter Signale der einzelnen Windkraftanlagen überlagern. Die dabei getroffenen stark vereinfachenden Annahmen und die unzureichende Validierung der Ergebnisse haben immer wieder zu Rechtsstreitigkeiten geführt. Ziel der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten und unter Leitung der PTB realisierten Projekte WERAN und WERAN+ ist und war es, eine wissenschaftliche Grundlage für die quantitative Bewertung der Störwirkung zu schaffen.

1. Entwicklung fliegender Messplattformen zur Erfassung der Signalstörungen

An der PTB werden seit über 10 Jahren Modifikationen kommerziell erhältlicher Multikopter eingesetzt, um elektromagnetische Messungen an Punkten im Raum durchführen zu können, die anders nicht zugänglich sind. Gemäß dem Regelwerk der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (engl. International Civil Aviation Organization – ICAO) ICAO DOC 015 [1], ist der Betrieb ferngesteuerter Flugmessplattformen in der Umgebung eines aktiv betriebenen Flughafens nicht ohne Weiteres möglich. Dank einer Kooperation mit der Deutschen Flugsicherung GmbH (DFS) konnte im Rahmen des U:CON-Projektes mittels Mobilfunk eine Einspeisung der Position des UAS (engl. Unmanned Aerial System) in die Flugüberwachung der DFS realisiert werden, sodass die Lotsen die PTB-Kopter im Luftraum erkennen und somit Start- und Landegenehmigungen erteilt werden konnten.

Im WERAN-Projekt wurden Oktokopter der

¹ PD Dr.-Ing. Thomas Kleine-Ostmann, Leiter des PTB-Fachbereichs „Hochfrequenz und Felder“, E-Mail: thomas.kleine-ostmann@ptb.de

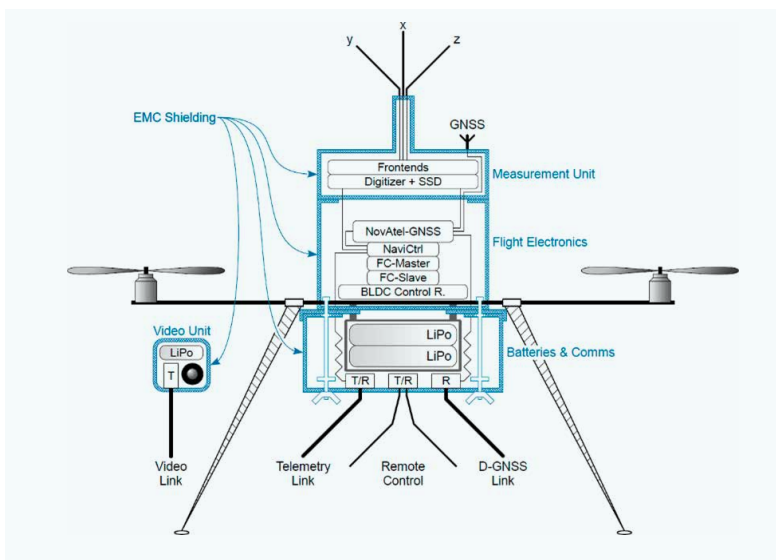
² Dr.-Ing. Thorsten Schrader, Leiter der PTB-Abteilung „Mechanik und Akustik“, vormals Leiter des PTB-Fachbereichs „Hochfrequenz und Felder“, E-Mail: thorsten.schrader@ptb.de

Abbildung 1:
Modifizierter Okto-
kopter zur Messung
des Winkelfehlers
beim CVOR und
DVOR.



Firma HiSystems, Moormerland inklusive der verfügbaren Steuersoftware für Flugplanung und Programmierung als Basis für eine Messplattform zur Erfassung von VOR-Signalen eingesetzt. Zusätzlich zur Implementierung einer Präzisionslokalisierung auf Basis globaler Navigationssatellitensysteme (engl. *global navigation satellite systems* – GNSS), einer Schirmung gegen starke elektromagnetische Felder und einer FPGA (engl. *Field Programmable Gate Array*) basierten Datenerfassungselektronik, wurden die Kopter mit verschiedenen Hochfrequenz-Frontends und Antennen ausgestattet [2–4]. Die Abbildung 1 und 2 zeigen einen modifizierten Kopter mit einer integrierten Messantenne für den VHF/UHF-Frequenzbereich (engl. *very high frequency / ultra high frequency*) von 108 MHz bis 117,95 MHz, in dem VOR betrieben werden. Flugsteuerung und Messelektronik sind separiert. Die Messelektronik kann mithilfe eines Tabletcomputers in Echtzeit hinsichtlich Datenerfassung, Frequenzumschaltung und Pegelanpassung gesteuert werden und wesentliche Messdaten können angezeigt werden. Der Oktokopter hat den Vorteil, dass für Start und Landung nur eine kleine ebene Fläche benötigt wird. Aufgrund der acht symmetrisch auf einem Kreis von etwa 1 m Durchmesser angeordneten Rotoren ist eine stabile Fluglage auch bei stärke-

Abbildung 2:
Schematische
Darstellung des
Aufbaus des modifi-
zierten Oktokopters,
der als fliegende
Messplattform
eingesetzt wird.



rem Wind möglich. Flughöhe und Entfernung zum Piloten sind auf etwa 600 m bei einer maximalen Flugdauer von etwa 12 min begrenzt. Die maximal erreichbare Geschwindigkeit liegt bei etwa 15 m/s. Bei Änderung der lateralen Position neigt sich der Kopter in Flugrichtung.

Die Antenne wurde speziell für diese Messaufgabe entworfen und mithilfe numerischer Simulationsrechnungen optimiert. Die Schirmung wurde herangezogen, um die komplexe Geometrie der Messelektronik und der Batterien für die Nachbildung in der Simulation zu vereinfachen. Abbildung 3 zeigt das simulierte Antennendiagramm bei 110 MHz. Da das Phasenzentrum der Antenne im geometrischen Zentrum des Kopters liegt, ist das empfangene Signal weitgehend unabhängig vom Neigungswinkel des Kopters.

2. Vollwellensimulationen zur Berechnung der Störwirkung von Windkraftanlagen auf Drehfunkfeuer

Um Messergebnisse mit der zu erwartenden Störwirkung der Windkraftanlagen auf das VOR vergleichen zu können, wurden elektromagnetische Simulationsrechnungen verschiedener Szenarien mithilfe der Simulationssoftware Altair FEKOTM zunächst für das DVOR durchgeführt [5–7]. Die Rechnungen wurden vom Projektpartner Leibniz Universität Hannover mithilfe der Methoden MLFMM (engl. *Multi Level Fast Multipole Method*) und PO (engl. *Physical Optics*) auf dem Rechencluster des Norddeutschen Verbunds für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) umgesetzt.

2.1 Modellierung der Drehfunkfeuer und der Windkraftanlagen

Alle Simulationen basieren auf der Modellierung eines DVOR im Koordinatenmittelpunkt in 5 m Höhe über einer ideal leitfähigen Ebene. Das eigentliche Drehfunkfeuer besteht aus einer leitfähigen Gitterplattform und 51 Alford-Loop-Antennen, von denen 50 kreisförmig um die im Mittelpunkt der Plattform platzierte Referenzantenne angeordnet sind. Die Simulation der Windkraftanlagen erfolgt mit einem detaillierten geometrischen Modell, das dem Typ E82 der Firma Enercon nachempfunden ist und hinsichtlich der Parameter Rotorwinkel, Turmhöhe, Rotordurchmesser und -ausrichtung variiert werden kann.

2.2 Extraktion der Winkelfehler

Die Berechnung der Winkelfehler am Ort eines Luftfahrzeugs erfordert prinzipiell die Berechnung der Felder der einzelnen Alford-Loop-Antennen [8]. Um Rechenzeit zu sparen, werden nicht diese,

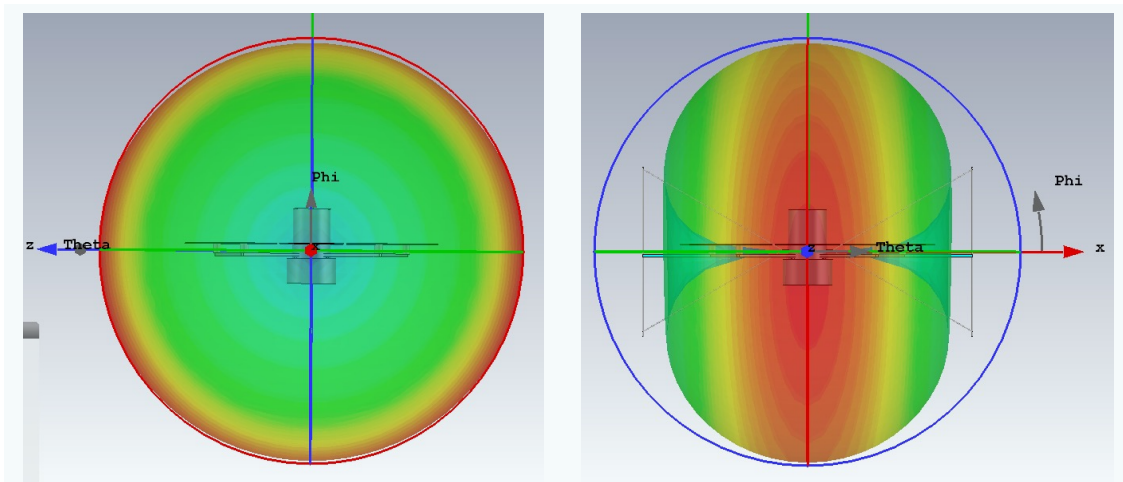


Abbildung 3: Antennendiagramm bei 110 MHz (CST-Simulation). a) E-H-Ebene, b) E-S-Ebene.

sondern eine Antenne am Ort des Luftfahrzeugs als Feldquelle verwendet und die induzierten Ströme im Fußpunkt der Alford-Loop-Antennen betrachtet. Aus den so berechneten Transferimpedanzen im Zeitbereich lässt sich das Empfangssignal im Fußpunkt der Antenne eines Luftfahrzeuges rekonstruieren und mit einem digitalen Empfängermodell in einen Winkelfehler übersetzen [7].

3. Weiterentwicklung der Prognosetools der Deutschen Flugsicherung (DFS)

Die DFS benutzt in der Genehmigungspraxis ein selbstentwickeltes Prognosetool [9], das auf einem einfachen Zweipfad-Ausbreitungsmodell in der Ebene von Anderson und Flint [10] und einer Publikation von Morlaas [11] basiert, in der für eine Windkraftanlage in einem bestimmten Abstand ein Winkelfehler von 0,08° für einen Elevationswinkel von 1° numerisch berechnet wurde. Die ursprünglich von der DFS benutzte Formel zur Vorhersage des Effekts von Windkraftanlagen auf den DVOR-Winkelfehler [9] ist in Gleichung (1) gegeben:

$$\epsilon_{Test} = \sum_1^{n_{Test}} \left\{ \epsilon_{Ref} \cdot \frac{h_{Test} - \frac{d_{Test}^2}{d_{Ref}^2} \cdot d_M}{h_{Ref}} \cdot \frac{d_{Ref}^u}{d_{Test}^u} \cdot \frac{1}{max_{Bessel}} \cdot \left| \frac{2A}{\beta r} \cdot J_1 \left[2\beta r \sin \left(\frac{\varphi_{Test} - \varphi}{2} \right) \right] \right| \cdot \left| \cos \left(\frac{\varphi_{Test} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos(\beta(r_0 - r_1) - \delta) \right| \right\} \quad (1)$$

Es gilt:

- n_{Test} Anzahl der betrachteten Windkraftanlagen,
- ϵ_{Test} DVOR-Winkelfehler verursacht durch alle Windkraftanlagen (in Grad),
- ϵ_{Ref} DVOR-Winkelfehler einer Referenz-Windkraftanlage (0,08 Grad)
- h_{Test} Gesamthöhe der einzelnen Windkraftanlage relative zur Höhe der DVOR-Antenne
- h_{Ref} Gesamthöhe der Referenz-

- Windkraftanlage (95 m)
- d_{Test} Distanz der einzelnen Windkraftanlage zum DVOR
- d_{Ref} Distanz der Referenz-Windkraftanlage zum DVOR (4000 m),
- d_M empirischer Skalierungsfaktor für die Distanz (0,952 m); *man beachte, dass dieser Faktor nicht in [9] auftaucht, sondern von der PTB eingeführt wurde, um ein dimensionelles Problem in Gleichung (1) zu lösen*
- ϕ DVOR-Radial für die Prognose (in Radiant)
- ϕ_{Test} DVOR-Radial der einzelnen Windkraftanlage (in Radiant)
- r Radius des DVOR-Antennenkreises (6,75 m)
- r_0 Pfadlänge des direkten Signals in m
- r_1 Pfadlänge des reflektierten Signals in m (*Vereinfachung der DFS: $r_0 = r_1$*)
- u empirischer Skalierungsfaktor ($\lg(1,6)/\lg(1,36)$)
- β Wellenzahl ($2\pi/\lambda$, wobei λ die Wellenlänge des Trägers ist)
- J_1 Besselfunktion der ersten Art, erster Ordnung
- A Verhältnis des reflektierten Signals zum einfallenden Signal (0,1),
- δ Phasensprung des Hochfrequenzsignals am Reflektor (180 Grad),



Abbildung 4: Messort M1 in der Nähe der Windkraftanlagen beim DVOR Hehlingen (Quelle: Google Earth).

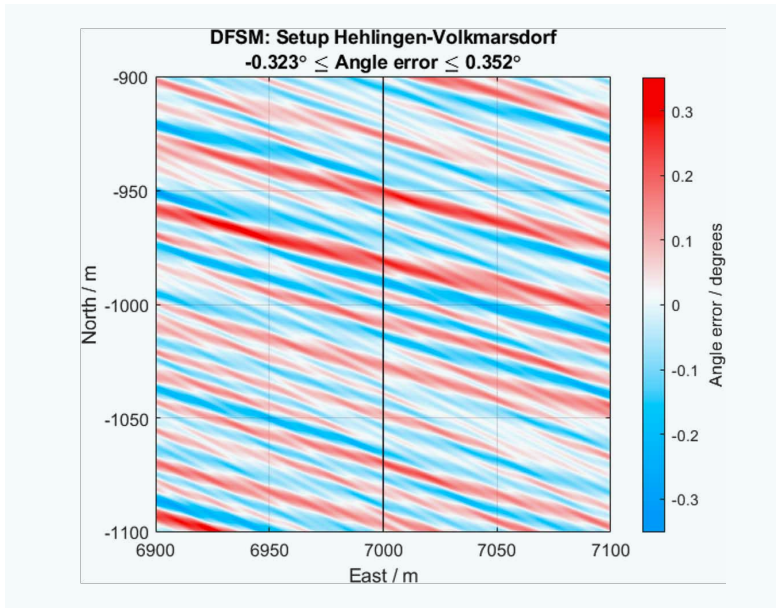


Abbildung 5: Vorhersage des Winkelfehlers am Messort M1 beim DVOR Hehlingen mithilfe der DFSM-Methode.

und

$$max_{Bessel} = \max_{0 \le \varphi < 360^\circ} \left\{ \left| \frac{2 \cdot A}{\beta \cdot r} \cdot J_1 \left[2 \beta r \sin \left(\frac{\varphi_{Test} - \varphi}{2} \right) \right] \right| \cdot \left| \cos \left(\frac{\varphi_{Test} - \varphi}{2} \right) \cdot \cos (\beta (r_0 - r_1) - \delta) \right| \right\} \quad (2)$$

Gleichung (1) addiert die Beträge der Winkelfehlerbeiträge einzelner Windkraftanlagen linear. Anders als beispielsweise die elektrische Feldstärke, verhält sich der Winkelfehler jedoch nicht-linear, sodass eine einfache Superposition von Winkelfehlern eigentlich nicht möglich ist. Für kleine Winkelfehler in der Größenordnung von 1°, wie sie in der Praxis auftauchen, stellt die lineare Addition eine mögliche Näherung dar.

Die Addition von Beträgen überschätzt den Gesamtfehler (insbesondere bei größeren Windparks), da sich positive und negative Fehlerbeiträge nicht kompensieren können. Dementsprechend wird in der von der PTB vorgeschlagenen Modifikation der Formel auf die Addition von Beträgen verzichtet [12]. Weiterhin wurde vor-

Abbildung 6: T-Profil des Fluges am Messort M1 in der Nähe der Windkraftanlagen beim DVOR Hehlingen (Quelle: Google Earth).



geschlagen, die Vereinfachung $r_0 = r_1$ nicht zu verwenden, da sonst der Winkelfehler nur vom Radial ϕ abhängt und die geometrischen Fluktuationen der Winkelfehler (*Bends* und *Scallops* gemäß ICAO-Definition) nicht betrachtet werden können. Die dritte vorgeschlagene Modifikation betrifft eine Optimierung der Berechnungsvorschrift. Die Ermittlung des Maximalwertes der Besselfunktion max_{Bessel} erfordert die numerisch aufwändige Berücksichtigung aller Radiale. Es lässt sich jedoch zeigen, dass für eine in der Genehmigungspraxis üblicherweise immer gegebene Entfernung $d_{Test} > 400$ m

$$\max_{\substack{0 \le \varphi < 2\pi \\ 0 \le r_0 < \infty}} \left| J_1 \left[2 \beta r \sin \frac{\varphi}{2} \right] \cos \frac{\varphi}{2} \cos (\beta (r_0 - r_1) - \delta) \right| = \quad (3) \\ = 0.580899617$$

gilt, sodass die Berechnung beträchtlich vereinfacht werden kann. Eine Korrektur der verwendeten Einheiten wurde ebenfalls vorgenommen.

4. Vergleich zwischen Messergebnissen, Vollwellensimulationsergebnissen und Prognoseergebnissen

Messungen im Luftraum vor Ort sind unverzichtbar, um das DVOR-Signal (*signal in space* gemäß ICAO-Definition) zu bewerten, da alle Fehlerinflüsse inhärent enthalten sind. Die Messungen können mit der in [7] dargestellten Methode mit Vollwellensimulationen und mit den Ergebnissen des Prognosetools verglichen werden.

Als ein Beispiel wurde das DVOR in Hehlingen (HLZ) betrachtet. Abbildung 4 zeigt einen Windpark 5 km östlich des DVOR bei Volkmarsdorf, der aus 15 Windkraftanlagen mit Höhen zwischen 53,5 m und 113 m besteht. Mithilfe des modifizierten Prognosetools wurde ein geeigneter Bereich für eine Validierung identifiziert. In Abbildung 5 ist der prognostizierte Winkelfehler am Messort M1 gezeigt (Radial 98°), der Fehlerwerte bis etwa $\pm 0,3^\circ$ erreicht. Um die Winkelfehler zu messen, wurde ein T-förmiger Messflug wie in Abbildung 6 gezeigt durchgeführt. Die maximale Flughöhe von 125 m entspricht einer Elevation von 1° vom DVOR aus gesehen.

Die Ergebnisse der Messung in Form der gemessenen FM-Phase und der aus dem Vergleich zur erfassten GNSS-Position resultierende Winkelfehler sind in Abbildung 7 gezeigt. Während des Messfluges wurde das Radial 98° mehrmals gekreuzt. Der Verlauf des gemessenen Winkelfehlers auf der Nord-Süd-Achse der Messung wird in Abbildung 8 mit den Ergebnissen des modifizierten und unmodifizierten Prognosetools sowie der Vollwellensimulation verglichen. Wie man leicht sieht, überschätzt die unmodifizierte

DFS-Prognose den Winkelfehler systematisch. Die Vollwellensimulation überschätzt den Winkelfehler immer noch leicht, vermutlich aufgrund idealisierter Randbedingungen für leitfähige Strukturen. In dem hier betrachteten Szenario ohne Hochspannungsleitungen und in flachem Terrain liefert die modifizierte Prognose (DFSM) eine gute Prognose für den maximal zu erwartenden Winkelfehler.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Genehmigungsprozesses muss die Störwirkung von Windkraftanlagen auf das terrestrische Navigationssystem DVOR mit praktikabel anzuwendenden Prognosetools untersucht werden. Im Rahmen des WERAN-plus-Projektes konnten Verbesserungen des Prognosetools erarbeitet werden. Um die Aussagekraft der vereinfachten Prognosemodelle bewerten zu können, ist ein Vergleich der Prognose mit Messungen und sehr aufwändigen Vollwellensimulationen unumgänglich. Mit der hier vorgestellten drohnenbasierten Messtechnik und umfangreichen FEKO-Berechnungen konnten die Prognoseberechnungen in einem einfachen, aber realen Szenario validiert werden.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Projekte *WERAN* (Förderkennzeichen 0325644) und *WERAN plus* (Förderkennzeichen 0324252) finanziert. Die Autoren bedanken sich bei ihren Kooperationspartnern Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Bredemeyer, Mitarbeiter der FCS Flight Calibration Services GmbH und Herrn apl. Prof. Dr. rer. nat. Harald Löwe, Mitarbeiter der TU Braunschweig, für ihre substanziellen Beiträge zum Gesamtkonzept, zur Messdatenerfassung und -auswertung sowie zur mathematischen Betrachtung der Prognosetools. Bei Herrn Dr.-Ing. Marius Mihalachi, ehemals Mitarbeiter der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, bedanken sich die Autoren für wesentliche Arbeiten im Bereich der Präzisionslokalisierung, der Datenerfassung und der Durchführung von Messkampagnen. Weiterhin gilt der Dank der Autoren Herrn Dipl.-Ing. Sergei Sandmann für die Durchführung der Simulationsrechnungen und Herrn B. Sc. David Ulm, Herrn M. Sc. Ulrich Schumann und Frau Dr.-Ing. Nora Meyne für die weitere technisch-wissenschaftliche Betreuung der Messplattformen und der entstandenen Software.

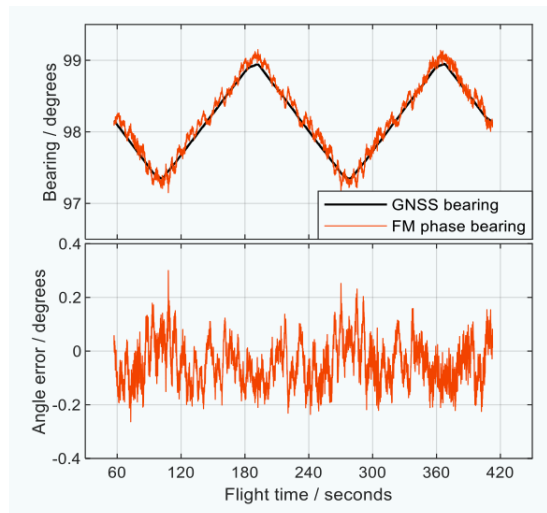


Abbildung 7: Flugrichtung zum DVOR Hehlingen (Bearing) aus GNSS-Daten und aus der gemessenen FM-Komponente des DVOR ermittelt im Vergleich.

Literatur

- [1] International Civil Aviation Organization, ICAO EUR DOC 015: European Guidance Material on Managing Building Restricted Areas, Third Edition, 2015.
- [2] Schrader, T., Bredemeyer, J., Mihalachi, M., Rohde, J., and Kleine-Ostmann, T.: Concept and design of a UAS-based platform for measurements of RF signal-in-space, *Adv. Radio Sci.*, 14, S. 1–9, <https://doi.org/10.5194/ars-14-1-2016>, 2016.
- [3] Schrader, T., Bredemeyer, J., Mihalachi, M., Ulm, D., Kleine-Ostmann, T., Stupperich, C., Sandmann, S., and Garbe, H.: High-resolution signal-in-space measurements of VHF omnidirectional ranges using UAS, *Adv. Radio Sci.*, 17, S. 1–10, <https://doi.org/10.5194/ars-17-1-2019>, 2019.
- [4] Schrader, T., Bredemeyer, J., Kleine-Ostmann, T., Mihalachi, M., *Advanced Remote-Controlled Airborne Sensor Systems*, 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2021.

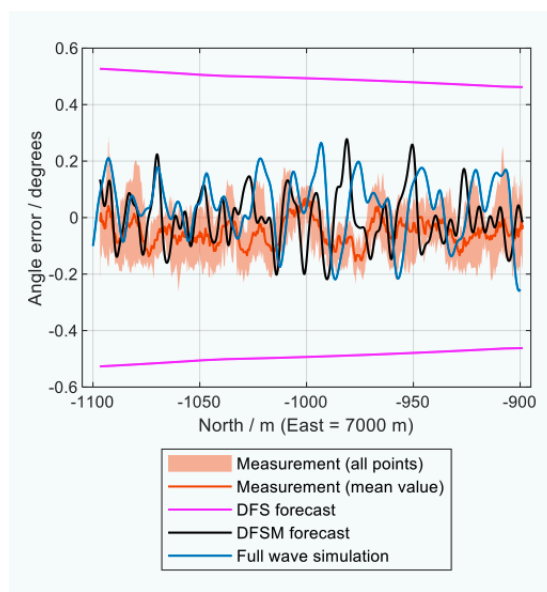


Abbildung 8: Winkelfehler der Flugrichtung zum DVOR Hehlingen. Vergleich zwischen Messwerten, den Prognosen DFS und DFSM sowie den Werten aus der Vollwellensimulation.

- [5] T. Schrader, „WERAN Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation“, Abschlussbericht, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-221/forschungsaktivitaeten.html>, 2018.
- [6] Sandmann, S., Divanbeigi, S., and Garbe, H.: Reflexionseigenschaften von Windenergieanlagen im Funkfeld von Funknavigations- und Radarsystemen, Adv. Radio Sci., 13, S. 9–18, <https://doi.org/10.5194/ars-13-9-2015>, 2015.
- [7] Sandmann, S.; Bredemeyer, J.; Schrader, T.; Garbe, H.: Numerical time domain method for calculation of the indicated DVOR bearing in dynamically disturbed scenarios. IET Microwaves, Antennas & Propagation, DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5591>, August 2019.
- [8] Ben-Hassine, S., Multipath and receiver models for assessing the VOR bearing error: application to wind farms, Dissertation, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2020.
- [9] Deutsche Flugsicherung DFS GmbH, „Bewertungsmethodik der DFS zur VOR-Beeinflussung durch Windenergieanlagen, 04.03.2016,“ 2016.
- [10] S. R. Anderson and R. B. Flint, „The CAA Doppler Omnirange“ in the Proceedings of the IRE, May 1959, S. 808–821.
- [11] C. Morlaas M. Fares B. Souny, „Wind Turbine Effects on VOR System Performance, „IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 44, No.4, S. 1464–1475, October 2008.
- [12] Schrader, T., Bredemeyer, J., Kleine-Ostmann, T., Mihalachi, M., An Improved Forecast Method for the Interaction of Wind Turbines with Doppler VOR, 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2021.

Metrologie für die Photovoltaik

Stefan Winter¹, Ingo Kröger², Stefan Riechelmann³

Die Photovoltaik wird eine tragende Säule der zukünftigen Energieversorgung Deutschlands und der Welt sein [1]. Derzeit werden jedes Jahr weltweit rund 120 Mrd. in photovoltaische Einrichtungen investiert [2], jedes Prozent Messunsicherheit in der Bestimmung der Modulleistung resultiert daher in einer finanziellen Unsicherheit von rund 1,2 Milliarden Euro pro Jahr. Finanzielle Unsicherheiten stellen jedoch ein Hemmnis bei Investitionen dar, denn aufgrund des hohen Konkurrenzdrucks bei Ausschreibungen für große Solarparks liegt deren Gewinnmarge im unteren einstelligen Prozentbereich. Eine Rückführungskette mit möglichst niedrigen Messunsicherheiten führt daher zu einer geringeren finanziellen Unsicherheit beim Aufbau von solaren Kraftwerken. Zur metrologischen Absicherung dieses Teils der Energiewende sowie zur Unterstützung der in den Bereichen Kalibrierdienstleistung und PV-Messtechnik auf dem Weltmarkt weiterhin führenden deutsche Firmen baut die PTB daher ein Kompetenzzentrum PV-Metrologie auf. Es erweitert den seit den 80er Jahren an der PTB ansässigen und seit Jahren weltweit führenden Bereich der Solarzellenkalibrierung um umfassende Kalibrierdienstleistungen für ertragsrelevante Größen von Solarmodulen. Perspektivisch soll mit einer Erweiterung auf Solarparks die gesamte Kalibrierkette von der Solarzelle über das Solarmodul zum PV-System metrologisch abgedeckt werden.

Der wirtschaftliche Aspekt der Metrologie kommt besonders an den Schnittstellen zum Tragen, an denen etwas verkauft wird und der Kaufpreis von der Menge und Qualität abhängt. Im Bereich der Photovoltaik gibt es drei wesentliche Schnittstellen:

1. Solarzellen werden an die Modulhersteller verkauft.
2. Die Solarmodule werden an den Solarparkbetreiber verkauft.
3. Der Solarparkbetreiber verdient mit der Einspeisung der elektrischen Energie in das Stromnetz Geld und möchte wissen, ob sein Park noch ordnungsgemäß funktioniert.

Alle drei Fälle erfordern Messungen nach dem gleichen Messprinzip: Es wird die einfallende optische Strahlung mit der erhaltenen elektrischen Leistung verglichen. Da der aufwändigere Teil davon die Messung der optischen Strahlung ist, sind bei der PTB diese Messungen in der Abteilung Optik angesiedelt. Die Messungen zu Wechselrichtern und Auswirkungen auf das Stromnetz als Ganzes erfolgen in der Abteilung Elektrizität (siehe Beitrag „Metrologie für die Integration erneuerbarer Energie in elektrische Energienetze“ auf Seite 43).

Aufgrund der großen Bedeutung der Qualitätssicherung hat sich deshalb im Bereich der Photovoltaik eine Stückprüfung durchgesetzt, d. h. die relevanten Eigenschaften jeder hergestellten Solarzelle wird am Ende ihres Produktionsprozesses mit einem Sonnensimulator gemessen und aufgrund der Messergebnisse wird sie klassiert und sortiert. Weil eine Solarzelle vom Aufbau her aus Halbleiterphysikalischer Sicht eine Diode ist, würde bereits eine „schlechte“ Solarzelle dazu führen, dass der Strom aller in Serie geschalteten Solarzellen im Solarmodul limitiert werden würde. Das heißt die „schlechteste“ Solarzelle entscheidet, wie gut ein Modul bzw. ein Bereich innerhalb des Moduls ist. Deshalb ist eine genaue und reproduzierbare Messung bei der Qualitätskontrolle von Solarzellen so wichtig. Aber nicht nur die Solarzellen werden stückgeprüft, sondern auch die daraus hergestellten Solarmodule. Mit einer kleinen Übersichtsrechnung kann man sich den Umfang der Messungen klar machen. Es werden pro Jahr

¹ Dr. Stefan Winter, Fachbereich 4.5 Angewandte Radiometrie, E-Mail: stefan.winter@ptb.de

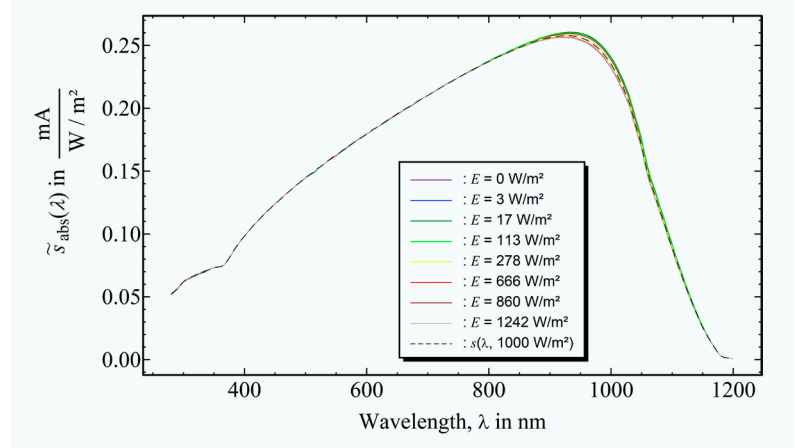
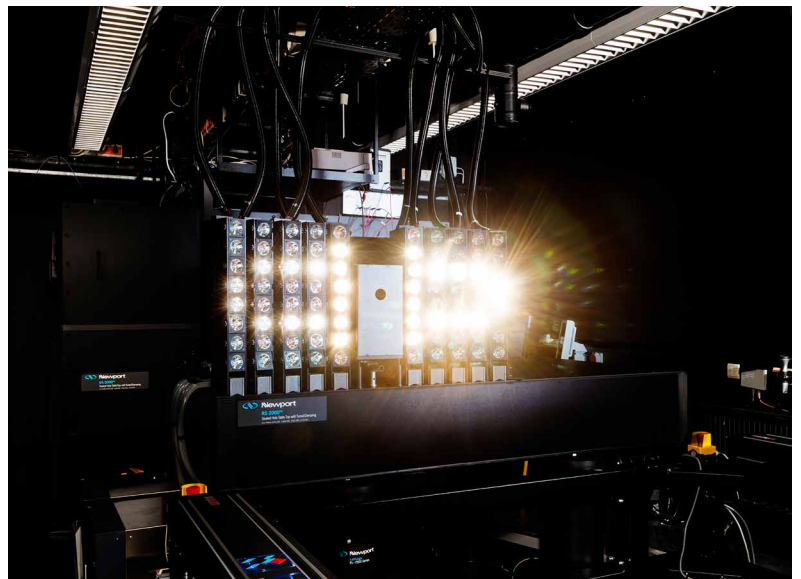
² Dr. Ingo Kröger, Arbeitsgruppe 4.52 Solarzellen, E-Mail: ingo.kroeger@ptb.de

³ Dr. Stefan Riechelmann, Arbeitsgruppe 4.53 Solarmodule, E-Mail: stefan.riechelmann@ptb.de

gungen kalibriert werden, bzw. werden i. A. nur unter diesen Bedingungen betrieben. Solarmodule hingegen werden in einem viel breiteren Anwendungsbereich eingesetzt. Solarmodule im Solarpark werden im Laufe eines Tages und eines Jahres ganz unterschiedlichen Einstrahlungs- und Umgebungsbedingungen ausgesetzt. So variieren die Bestrahlungsstärke, die Temperatur, der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung und auch das Spektrum ist z. B. abends rötlicher als zur Mittagszeit. Deshalb interessieren sich Solarparkbetreiber bei Solarmodulen nicht nur für die Standardtestbedingungen, sondern wollen zusätzlich wissen, wie sich die Solarmodule unter allen typischen in ihrer Klimazone vorkommenden Messbedingungen verhalten, um so zielgerichtet das geeignetste Modul herausfinden zu können. Hierfür existiert die Energy-Rating Normenreihe IEC 61853, die typische Jahresverläufe von Einstrahlungs- und Umgebungsbedingungen aus 6 Klimazonen zur Verfügung stellt. Sogar die Windgeschwindigkeit ist in den Klimadaten enthalten, da diese die Modultemperatur und damit den Wirkungsgrad des Solarmoduls beeinflusst. Damit die Hersteller diese Informationen in ihrem Datenblatt angeben können, lassen sie die benötigten Eigenschaften der Solarmodule durch Kalibrier- oder Prüflaboratorien bestimmen. Diese wiederum benötigen Referenzmessungen, die sie von der PTB erhalten. Deshalb baut die PTB Referenzmessplätze auf, mit denen die genannten Moduleigenschaften mit höchster Genauigkeit bestimmt werden können.

Neuer Messplatz „Solarmodul-Tubus“

Da die Standardtestbedingungen auch bei Modulen den Ausgangspunkt für alle Messungen darstellen, wird ein Messplatz aufgebaut, der eine deutlich genauere Bestimmung der Leistung unter Standardtestbedingungen zulässt als dies bisherige Ansätze ermöglichen und der somit zu einer signifikant verbesserten Investitionssicherheit führt. Im Bereich von Solarzellen liefert das weiter oben beschriebene DSR-Verfahren (*Differential spectral responsivity*) mit monochromatischer Strahlung die geringsten Messunsicherheiten, was sich aber kaum auf große Modulflächen skalieren lässt. Das zweitgenaueste primäre Verfahren für Referenzsolarzellen verwendet direkte natürliche Sonnenstrahlung (*Direct Sunlight Method, DSM*). Die Referenzsolarzelle befindet sich dabei in einem ca. 70 cm langen, innen schwarzen Tubus, der die gesamte diffuse Strahlung des Himmels ausblendet. Die Messungen werden rückgeführt auf ein sog. Cavity-Radiometer (ein elektrisches Substitutionsradiometer, das ein radiometrisches Normal darstellt), mit dem sich die direkte Sonnenstrahlung auf 0,2 % genau messen lässt. Insgesamt kann man bei genauer Charakterisierung aller Kompo-



nenten mit diesem Verfahren eine Messunsicherheit von 0,6 % erreichen. Jedoch ist dieses Verfahren aufgrund der dann benötigten viel größeren Abmessungen bislang noch nie für Solarmodule eingesetzt worden. Genau dieses Verfahren wird gerade an der PTB für Solarmodule aufgebaut, um eine deutlich geringere Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Referenzmodulen zu erhalten als dies bislang der Fall ist (0,85 % statt 1,3 %). Dazu wurde vom wissenschaftlichen Gerätebau der PTB ein Solarmodultubus konstruiert und aufgebaut, der bis zu 2 Solarmodule der Größe $2,5 \times 2,5 \text{ m}^2$ aufnehmen kann (oder entsprechend mehr kleinere Module). Der Tubus selbst ist 7,2 m lang und besitzt eine lichte Öffnung von $4 \times 4 \text{ m}^2$, die durch Blenden derart verkleinert wird, dass kein streifender Lichteinfall auf die schwarzen Innenseiten der Wände fällt. Der Innenraum kann auf eine gewünschte Temperatur stabilisiert werden. Ein schnell öffnendes Roll-Lauftor wird als Shutter dienen, damit zur Messung eine besonders homogene Temperaturverteilung über das Modul eingestellt werden kann. Während der Tubus computergesteuert der Sonne im Tagesverlauf nachfährt, kann das Modul mit seiner Halterung um beide

Abbildung 2: Die spektrale Empfindlichkeit kann an der PTB an einem Monochromator- sowie einem Laser-basierten Messplatz bestimmt werden. Hier ist die sonnenähnliche Biasstrahlung am Laser-basierten Messplatz zu sehen [7]. Der aufgeweitete und homogenisierte Laserstrahl gelangt durch das mittige Loch auf die Solarzelle, die sich je nach Größe in einem Abstand von 1 bis 3 Metern davon befindet. Unten wird das Ergebnis einer Messung der differentiellen spektralen Empfindlichkeit bei verschiedenen Bias-Strahlungsstärken dargestellt.

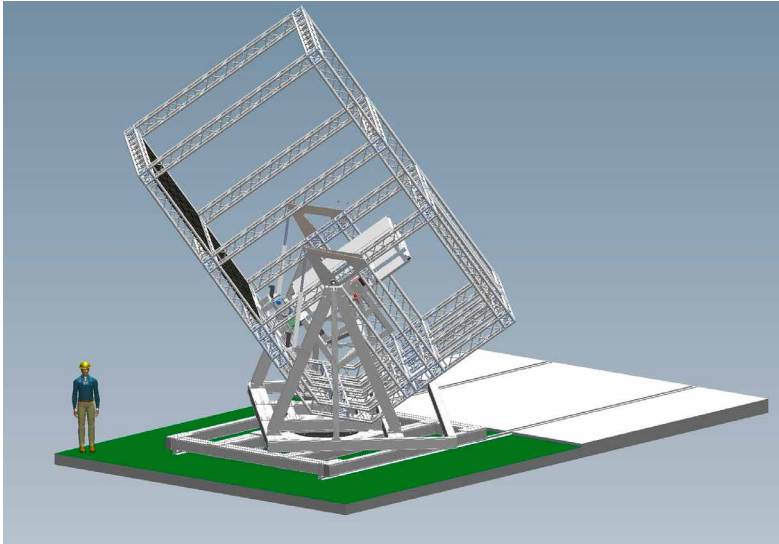
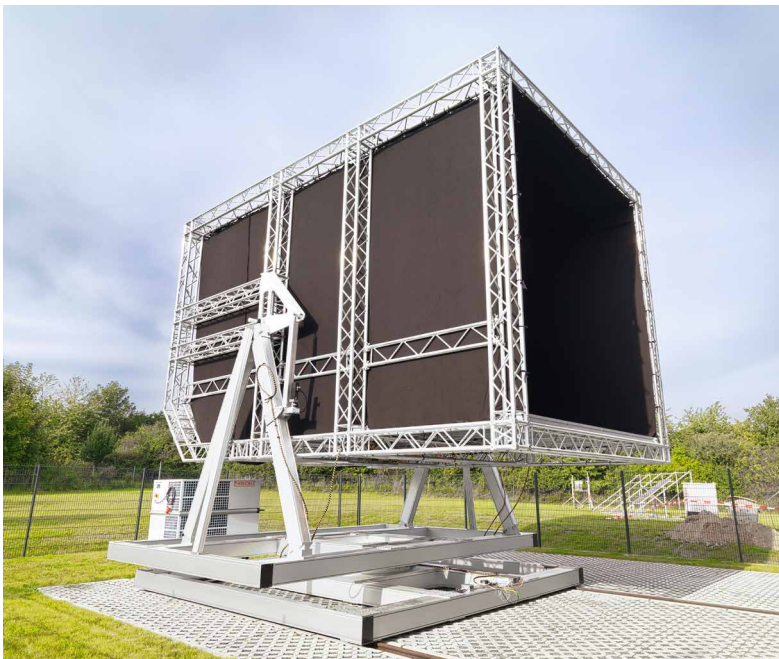


Abbildung 3:
Konstruktionszeichnung
des Solarmodultubus

Achsen gedreht werden, sodass jeder beliebige Einstrahlungswinkel eingestellt werden kann. So kann auch die Winkelabhängigkeit von Modulen im homogenen und parallelen Sonnenlicht gemessen werden. Aufgrund der nur bei diesem Ansatz idealen Lichtbedingungen können sogar gekrümmte Flächen, wie sie für die VIPV (*Vehicle integrated PV*) eingesetzt werden, absolut und in Abhängigkeit vom Einfallswinkel gemessen werden. Ebenso ist es möglich die Winkelabhängigkeit von Halbzellen-Modulen zu bestimmen, was aufgrund ihrer internen Verschaltung mit allen bislang bestehenden Verfahren nicht oder nur mit hoher Messunsicherheit möglich war. Die Messapparatur wiegt insgesamt 7 Tonnen und kann auf Schienen in eine Halle gefahren werden, die als Schutz vor Wind und Regen dient.

Abbildung 4:
Foto des aufgebauten Solarmodultubus. Es fehlen noch die äußere Hülle, der Anschluss des Klimaaggregats sowie die Blende an der Öffnung.

An einem weiteren Freifeld-Messplatz wird die Modultemperatur in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, der Einstrahlung und der

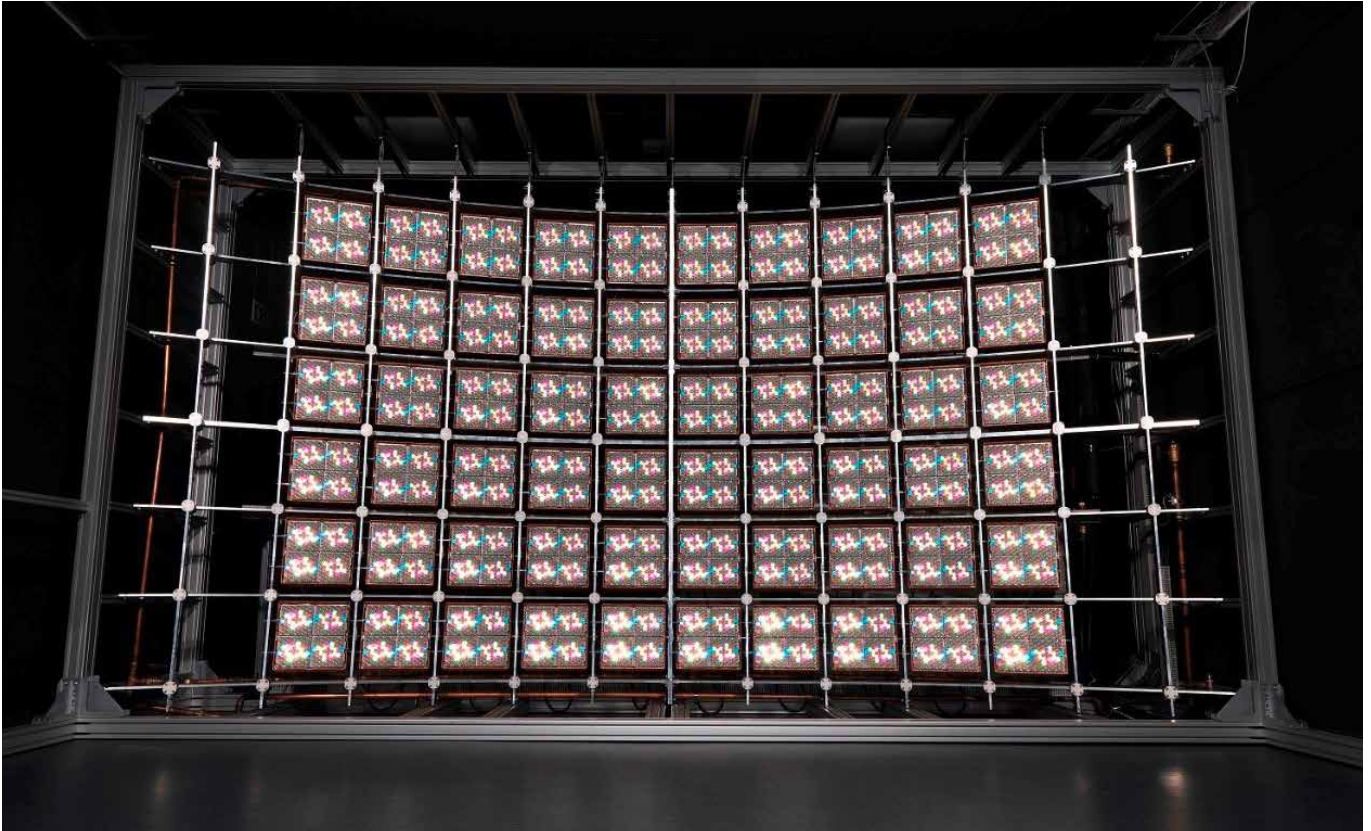


Windgeschwindigkeit sowie weiteren Parametern gemessen.

Die Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Modultemperatur und der Bestrahlungsstärke wird mit einem LED-basierten Sonnensimulator in Kombination mit einer Klimakammer bestimmt. Da sich die 18 verschiedenen Farbgruppen der insgesamt über 16.000 LEDs auch einzeln ansprechen lassen, kann an diesem Messplatz auch die spektrale Empfindlichkeit von Solarmodulen gemessen werden. Damit lassen sich mit den PTB-Messplätzen alle für das Energy-Rating benötigten Parameter bestimmen.

Monitoring für PV-Systeme

So wie es z. B. im Bereich Erdgas selbstverständlich ist, die importierte Ware kontinuierlich auf ihre Qualität zu überprüfen, ist es in der Photovoltaik notwendig, Solarmodule kontinuierlich auf ihre Qualität und Leistungsfähigkeit zu überprüfen. Sobald die Module im Solarpark eingebaut sind, können sie allerdings nur noch mit großem Aufwand einzeln kalibriert werden. Dann kann nur noch über ein Monitoring des Kraftwerkparcs als Ganzes kontrolliert werden. Während die Messung der erzeugten elektrischen Leistung vergleichsweise einfach ist, ist die genaue Messung der optischen Einstrahlung besonders herausfordernd, da es hier viele Variablen gibt: das Spektrum, die Einfallrichtung und z. B. bei Verschattungen auch der Ort. Für eine genaue Berücksichtigung aller Umgebungsbedingungen muss ein Modell für einen digitalen Zwilling des Solarparks erstellt werden. Dieses Modell benötigt als Eingabeparameter einerseits ein hochgenaues und umfangreiches Monitoring aller Umgebungsbedingungen (neben den mehrdimensionalen Einstrahlungsbedingungen die Temperatur und die Windgeschwindigkeit) und andererseits eine genaue Charakterisierung der Solarmodule. Das Modell berechnet dann für die jeweiligen Umgebungsbedingungen die zu erwartende elektrische Leistung, die mit der tatsächlich erzeugten elektrischen Leistung verglichen wird. Bei einem ausgereiften Modell des digitalen Zwillinges des Solarparks lassen Abweichungen Rückschlüsse auf Fehlfunktionen und Alterungseffekte zu. Es ist geplant einen Forschungssolarpark auf dem PTB-Gelände zu errichten, und das zu entwickelnde Modell des digitalen Zwillinges an diesem zu validieren.



Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten im Bereich Solarmodule werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Projektes MetroKomPV – Aufbau eines ‚Metrologie-Kompetenzzentrums Photovoltaik‘ für die präzise Bestimmung und Validierung des Normjahresertrags photovoltaischer Anlagen (Förderkennzeichen 03EE1024) gefördert.

Literatur

- [1] „Solar becomes the new king of electricity...“ in <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020?mode=overview>
- [2] <https://www.statista.com/statistics/186823/global-investment-in-solar-technology-since-2004/>
- [3] <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [4] IEC International Standard 60904-1 Ed. 2: „Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics“, Geneva 2020
- [5] IEC International Standard 60904-3 Ed. 2: „Photovoltaic Devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data“, Geneva 2019
- [6] J. Metzdorf, Calibration of solar cells. 1: The differential spectral responsivity method, Appl. Opt. 26 (1987) 1701.
- [7] Winter, S., Fey, T., Kröger, I., Friedrich, D., Ladner, K., Ortel, B., Pendsa, S., Witt, F., 2014. Design, realization and uncertainty analysis of a laser-based primary calibration facility for solar cells at PTB. Measurement 51, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.12.001>

Abbildung 5: LED-basierter Sonnensimulator zur Messung von spektraler Empfindlichkeit und temperatur- und bestrahlungsstärkeabhängigem Wirkungsgrad von Solarmodulen.

Metrologie für die Integration erneuerbarer Energie in elektrische Energienetze

Hinweis: Autoren in den jeweiligen Kapiteln genannt

1. Einleitung

Dr. Enrico Mohns¹

Auf das Elektrizitätsnetz mit seinen derzeitigen, noch überwiegend fossilen oder nuklearen Kraftwerken, aber auch den bisher installierten erneuerbaren Energiequellen, wie Windkraft, Photovoltaik, Biomasse oder im geringeren Umfang auch der Wasserkraft, kommt im Rahmen der Energiewende eine neue zentrale Rolle zu. Getrieben von den Erfordernissen den CO₂-Ausstoß zukünftig über alle Sektoren stark zu reduzieren und ab 2045 Klimaneutralität zu erreichen, werden erzeugerseitig zentrale Großkraftwerke auf Basis fossiler oder nuklearer Energieträger durch eine Vielzahl kleinerer dezentraler Erzeuger auf Basis erneuerbarer CO₂-neutraler Energien ersetzt werden. Die größte Rolle bei den erneuerbaren Energiequellen spielen Windkraftanlagen und Photovoltaik. Auf der Verbraucherseite sind ebenfalls größere Änderungen zu erwarten. Die stark vorangetriebene Elektrifizierung der Mobilität wird perspektivisch dafür sorgen, dass der Energieverbrauch steigt. Auch ist zu erwarten, dass beispielsweise für die Erzeugung von Wärme zunehmend Wärmepumpen zum Einsatz kommen, um den Verbrauch von Öl und Gas weiter verringern zu können.

Dabei zeichnet sich jedoch ein Dilemma ab. Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien – auch mit stark ausgebauten Kapazitäten von Wind oder Photovoltaik – ist naturgemäß volatil und zudem von der Jahreszeit abhängig. Grundlastfähige fossile Kraftwerke werden jedoch in den nächsten Jahren zunehmend vom Netz genommen. Eine Schlüsseltechnologie kann dabei die Wasserstoffherstellung mit Elektrolyse spielen, da diese dann abhängig vom Dargebot erneuerbarer elektrischer Energie in Wasserstoff umgewandelt wird, und zum Beispiel in das existierende Gasnetz, oder einem eigenen Gasnetz eingespeist werden kann. Die damit verbundene Einspeiche-

rung grün erzeugter, elektrischer Energie erlaubt es, neue Wege zu denken und zu gehen, u. a. die Erzeugung von Stahl, Wasserstoffantriebe, oder eben auch die Rückverstromung mittels Brennstoffzellen in Zeiten mit geringem Dargebot an erneuerbaren Energien. Diese Verkopplung der verschiedenen Sektoren (Sektorkopplung) ist neben dem massiv voranzutreibenden Ausbau des Elektrizitätsnetzes bzw. dem massiven Ausbau von Erneuerbaren Energien der Schlüssel zum Gelingen der Energiewende. Damit zeichnet sich ab, dass auch auf die Elektrizitätsmesstechnik und die zugehörigen Rückführungsmöglichkeiten an der PTB neue Herausforderungen zukommen werden.

So wandelt sich das elektrische Verbundnetz dahingehend, dass Regionen, in denen vermehrt Energie erzeugt wird, beispielsweise durch Windparks, von solchen getrennt sind, in denen vorwiegend Energie verbraucht wird. Dazu ist der Netzausbau, das heißt der Ausbau von Stromtrassen erforderlich, der zum Teil auch auf neuartigen Technologien wie der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) basiert und mit einem Vorrang für die Erdverkabelung realisiert werden sollen. Hier ist Metrologie bei der Schaffung von Dienstleistungen bei den sehr hohen Gleichspannungen, den hohen Gleichströmen und auch der Leistungs- bzw. Energiemessung unter diesen Bedingungen gefragt.

Daneben ist der Einsatz von Umrichtertechnologien zwingend erforderlich, um Erneuerbare in das 50-Hz-Verteil- oder -Übertragungsnetz einzubinden. Dadurch gewinnt nicht nur das Thema Versorgungssicherheit an Bedeutung, sondern auch die Netzspannungsqualität, da Umrichter leitungsgebundene Störungen aussenden. Die kurzzeitige Stabilität des elektrischen Verbundnetzes wird klassischerweise durch die Schwungmassen der Synchrongeneratoren in den Kraftwerken gewährleistet, die für die Systemdienstleistungen „Frequenz- und Spannungshaltung“, „Vorsor-

¹ Dr. Enrico Mohns, Leiter Fachbereich 2.3 Elektrische Energiemesstechnik, E-Mail: enrico.mohns@ptb.de

² Dr. Johann Meisner, Arbeitsgruppe 2.31 Messwandler und Hochspannungsmesstechnik, E-Mail: johann.meisner@ptb.de

³ Dr. Stephan Passon Arbeitsgruppe 2.32 Zeitsynchronisierte Messsysteme und Sensoren, E-Mail: stephan.passon@ptb.de

gungswiederaufbau“ und „Betriebsführung bzw. Netzengpassmanagement“ entscheidend sind. Auf einer etwas längeren Zeitskala wird zusätzliche Regelleistung von dafür vorgesehenen Generatoren bereitgestellt. In Zukunft müssen intelligent gesteuerte Wechselrichter diese Aufgaben mit übernehmen. Auch der Stromverbrauch wird erheblich zunehmen. Dafür sorgt verbraucherseitig die Elektromobilität mit einer Vielzahl an noch zu schaffenden Ladepunkten im einfacheren Szenario, und im noch komplexeren Fall die Sektorkopplung, in der dann Elektrizität zum Hauptenergieträger wird.

In den letztgenannten Anwendungen wird die Metrologie zukünftig nicht nur Messtechnik für die Rückführung der elektrischen Leistung in einem breiteren Frequenzbereich beitragen, sondern auch unterstützen bei der Rückführung der die Spannungsqualität bestimmenden Parameter. Auch sind mindestens im Rahmen entsprechende Forschungsprojekte wichtige Vorarbeiten zum Thema Wirkungsgrad vorzusehen. Im Bereich der gesetzlichen Metrologie ist der Ausbau der Dienstleistungen für Ladesäulen, insbesondere für die mit Gleichstrom arbeitenden Schnellladesäulen voranzutreiben. Dabei gilt es, sowohl die Gleichstromzähler als auch die Ladesäulen selbst zu bewerten. Daneben ist auch die Digitalisierung der Verbrauchsmessgeräte mit den Smart Meter Gateways zu beachten. Energieflüsse werden zukünftig hinreichend zeitaufgelöst gemessen und übertragen. Die metrologische Aufgabe ist hier die Richtigkeit der mit den Gateways übertragenen Messwerte und deren zeitlichen Zuordnung zu überprüfen und damit sicherzustellen. Unterstützend zu den zu schaffenden Dienstleistungen oder Forschungen muss die Metrologie auch in den relevanten Gremien vertreten sein, um hier die metrologischen Interessen der PTB mit den Interessen anderer Stakeholder in Einklang zu bringen.

In den folgenden Beiträgen ist der derzeitige Fortschritt bei den Entwicklungen zu einigen der oben genannten metrologischen Herausforderungen aus den verschiedenen Arbeitsgruppen des Fachbereichs „Elektrische Energiemesstechnik“ dargestellt.

2. Entwicklung und Kalibrierung von Hochspannungsmesseinrichtungen für die HGÜ

Dr. Johann Meisner²,
Dr. Stephan Passon³

Im Zuge der Energiewende wird Strom zukünftig nicht mehr nur mit etablierter Wechselstromtechnik transportiert, sondern zunehmend auch mit der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)-Technologie. In Deutschland ist geplant, mit den Nord-Süd-Trassen Energie verlustärmer

und in größerer Menge vom windreichen Norden in den industriellen Süden und Westen zu bringen.

Moderne Energienetze sind äußerst komplexe Systeme mit einer wachsenden Anzahl dezentraler, regenerativer Stromproduzenten. Dieses stets schwankende Angebot der elektrischen Energie führt zu einem erhöhten Regelaufwand durch die Energieversorger und Netzbetreiber. Die dadurch verringerte Spannungsqualität sorgt für mehr Instabilität im Übertragungsnetz – ein Stresstest für viele Komponenten und damit ein Risiko für die Versorgungssicherheit. Bisher fehlen noch einheitliche Normen, nach denen Netzkomponenten auf ihre Tauglichkeit unter diesen speziellen neuen Bedingungen geprüft werden. Im Rahmen von zwei europäischen Forschungsprojekten [1], [2] werden dafür die messtechnischen Grundlagen geschaffen, dass Netzkomponenten standardisiert auf ihre Eignung bei neuartigen Bedingungen geprüft werden können. Die PTB baut momentan Kalibrierdienstleistungen für die Industrie bei überlagerten Hochspannungsformen, wie z. B. Blitz- und Schaltstoßspannungen auf hohen Gleich- oder Wechselspannungen, auf. Die genaue Messung solcher Hochspannungsformen hat einen erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer von Komponenten im Stromnetz. Gleichzeitig sind die Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten die Basis für eine grundlegende Überarbeitung der internationalen Hochspannungsnormenreihe IEC 60060, die weltweit die Prüfung von Hochspannungsmesstechnik regelt. Weiterhin steht in den genannten europäischen Forschungsprojekten die Messung der Übertragungsverluste im Mittelpunkt. Denn trotz Gleichstromtechnik geht bei langen Stromtransportwegen Energie verloren. Diese Verluste beziffern zu können, ist insbesondere im Hochspannungsbereich für die Abrechnung von Kosten notwendig.

Im Rahmen dieser Projekte entwickelt die PTB unter anderem zwei Hochspannungsmesssysteme – eines für Messungen von einzigartiger Genauigkeit bis 1,2 Millionen Volt und ein zweites für Messungen sogar bis 2 Millionen Volt. Mit Letzterem haben die Forscher bereits äußerst erfolgreich Testmessungen durchgeführt (Abbildung 1). Mithilfe dieser Messsysteme und Spannungsteiler soll in der PTB ein Standard aufgebaut werden, mit dem die rückgeführte Kalibrierung von Gleichspannungsmesseinrichtungen und die Prüfung von Systemkomponenten bis 2 Millionen Volt möglich wird, wie sie in zukünftigen Hochspannungsnetzen weltweit eingesetzt werden sollen. Die Genauigkeit dieser Messungen ist somit entscheidend für den verlässlichen Betrieb von HGÜ-Leitungen und damit für die Versorgungssicherheit des gesamten europäischen Verbundnetzes.

2.1 Aufbau des Hochspannungsteilers

Der an der PTB konzipierte und aufgebaute Gleichspannungsteiler soll auch gleichzeitig transiente und alternierende Spannungen erfassen können. Dies dient dem Zweck der Messung von Blitzstoß- oder Schaltstoßvorgängen, wie sie in einer HGÜ-Übertragungsstrecke auftreten könnten. Zudem sollen auch mögliche Wechsellagerungen mitgemessen werden. Die Primäranwendung ist die Gleichspannungsmessung und damit wird die Konzeptionierung bezüglich Genauigkeit an dieser Spannungsform erfolgen. Weiterhin ist für externe Messungen die Mobilität eines solchen Spannungsteilers erforderlich. Aus diesem Grund ist dieser Teiler in mehreren Stufen zu je 400 kV (modular) aufgebaut worden.

Der aufgebaute Hochspannungsteiler für eine Nennspannung von 1600 kV soll eine erweiterte Messunsicherheit von maximal $100 \mu\text{V/V}$ für Gleichspannungsmessungen aufweisen. Diese Präzision kann nur durch präzise Widerstände erreicht werden. Der Temperaturkoeffizient hat dabei, neben der Linearität, den größten Einfluss auf die Messunsicherheit. Eine Korrektur mithilfe des Temperaturkoeffizienten und der Umgebungstemperatur im Labor kann dabei nur eingeschränkt durchgeführt werden. Die Selbsterwärmung durch den Messstrom und die ungleiche Wärmeverteilung bei einem Teiler dieser Baugröße lässt keine zuverlässige Temperaturmessung zu.

Zum Erreichen eines Messstrom von $0,1 \text{ mA}$ bei 1600 kV ist ein Widerstand des Messteilers von $16 \text{ G}\Omega$, bzw. $4 \text{ G}\Omega$ pro Modul notwendig. Die Anforderungen an die Einzelwiderstände sind ein möglichst hoher Widerstandswert und ein geringer Temperaturkoeffizient. Der Maßstabsfaktor pro Modul liegt bei $40000:1$. Um vor allem für Transiente ein umgebungsunabhängiges Teilungsverhältnis darzustellen, wird eine Feldsteuerung um den Präzisionsteiler verbaut. Der niederinduktive Aufbau der Feldsteuerung besteht aus insgesamt 600 Kondensatoren (je 100 nF und 3 kV) und Widerständen ($33 \text{ M}\Omega$ und $3,3 \text{ kV}$) mit einem Gesamtwert von 666 pF bzw. $4950 \text{ M}\Omega$ pro Modul.

Der Teiler ist, wie in Abbildung 2 dargestellt, aufgebaut. Der hohe Kapazitätswert der Feldsteuerung gegenüber der Kapazität des Präzisionsteilers mit 125 pF sorgt dafür, dass parasitäre Kapazitäten keine wesentlichen Einflüsse ($< 0,2 \%$) auf das kapazitive Teilungsverhältnis des Präzisionsteilers aufweisen.

Der Gesamtteiler besteht aus vier Modulen (PT400) mit einer Höhe von je 2 m. Um die Module einfach verbinden zu können, wird eine Isoliermantelbauweise gewählt. Der Isoliermantel besteht aus Polypropylen und ist am oberen und unteren Ende mit Aluminiumflanschen versehen. Polypropylen wird verwendet, da dieses den



Abbildung 1: Die Messeinrichtung auf dem Freifeld der PTB besteht aus einem Hochspannungserzeuger (im Vordergrund), der Gleichspannungen von bis zu 2 Millionen Volt erzeugen kann. Im Hintergrund steht der Messteiler, welcher diese Spannung präzise erfasst. (Foto: PTB)

geringsten $\tan-\delta$ Wert aller Kunststoffe zeigt. An den Flanschen ist eine Dichtung vorhanden, sodass eine Füllung mit Isoliergas möglich ist. Als Füllgas wird für Hochspannungsteiler in der Metrologie standardmäßig Schwefelhexafluorid (SF_6) verwendet. Dieses sollte jedoch nach der Verordnung für fluorierte Treibhausgase (F-Gas-V) aufgrund der Treibhauschädlichkeit durch umweltfreundlichere Gase ersetzt werden [3]. Das Treibhauspotenzial von SF_6 liegt bei einem GWP (global warming Potenzial) von 22.800 [4]. Um die Eigenschaften von SF_6 mit herkömmlichen Gasen wie z. B. Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid zu erreichen, muss ein deutlich höherer Druck verwendet werden. Stickstoff benötigt einen dreifach höheren Druck für gleiche Isolationseigenschaften. Ein Überdruck über $0,5 \text{ Bar}$ wird für diesen Teiler nicht angestrebt, da bei höherem Druck die EU-Richtlinie für Druckbehälter beachtet werden müsste [5]. Dies würde einen Transport des gefüllten Teilers für Kundenkalibrierungen vor-Ort unmöglich machen. Als Alternative kommen nur Gasgemische mit Luft- SF_6 oder $\text{N}_2\text{-SF}_6$ in Betracht [6] und neuere Gasgemische,

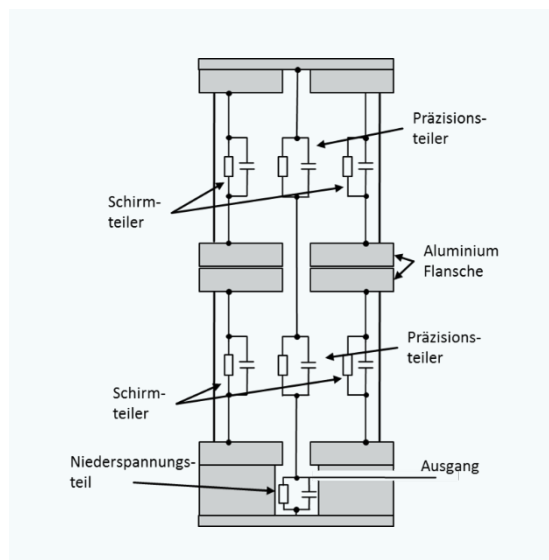


Abbildung 2: Elektrisches Design des Hochspannungsteilers mit zwei Modulen

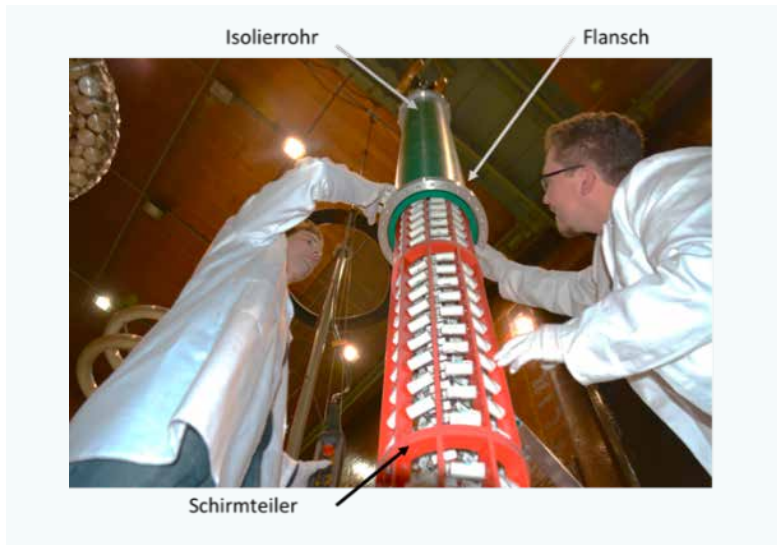
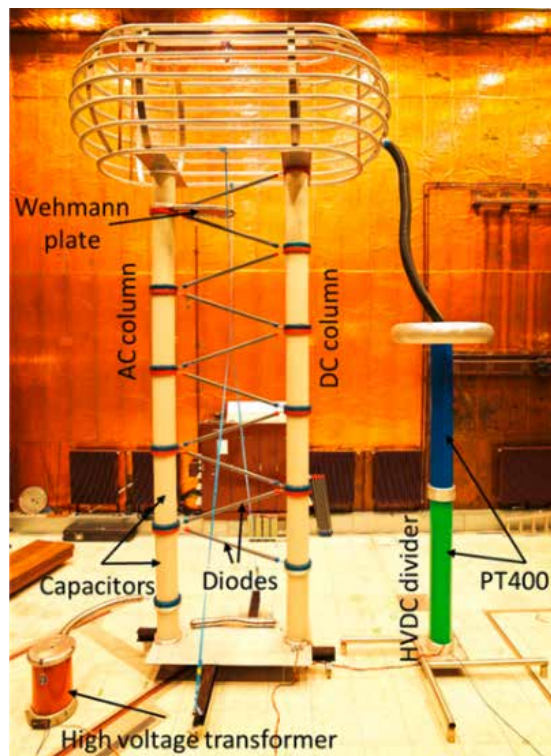


Abbildung 3:
Zusammenbau
des Teilers

wie CO₂ mit Dodecafluoro-2-methylpentan-3-on [7]. Neben der Isolationsfestigkeit hat die Gasfüllung die Aufgabe das Innere des Teilers vor Feuchtigkeit sowie weiteren Verunreinigungen zu schützen. Feuchtigkeit könnte ansonsten in die Widerstände diffundieren, den Widerstandswert verändern und somit die Langzeitstabilität des Teilers beeinflussen.

Die Feldsteuerung verläuft zylindrisch um den Präzisionsteiler und schirmt diesen gegen äußere Felder ab. Eine Verbindung zwischen Schirm- und Präzisionsteiler gibt es nur am obersten Punkt sowie am Masseanschluss des Hochspannungsteilers. In Abbildung 3 ist die Feldsteuerung und die zylindrische Anordnung des Schirmteilers im unteren Bereich des Bildes zu erkennen. Über die Feldsteuerung wird das Isolierrohr geschoben.

Abbildung 4:
Vervielfachungs-
schaltung für
1000 kV positive
Gleichspannung
und 800 kV Mess-
teiler



2.2 Gleichspannungserzeugung

Hohe Gleichspannungen können über verschiedenste Verfahren erzeugt werden. Die bevorzugte Methode der Erzeugung wird dabei durch die Anforderungen bestimmt. Diese können z. B. die Höhe der Gleichspannung, derer Restwelligkeit, Stabilität, sowie der Stromfluss bzw. die Gesamtleistung sein. Die einfachsten Generatoren zum Erzeugen hoher Gleichspannungen sind elektrostatische Generatoren. Dabei werden Ladungsträger durch Reibung erzeugt und über bewegliche Scheiben oder Bänder transportiert. Bekannte Vertreter dieser Maschinen sind z. B. die Whimshurstmaschine, der Van de Graaff Generator oder auch der Kelvin Generator. All diese Generatoren haben jedoch den Nachteil, dass sie sich schlecht regeln lassen und zudem nur kleine Ströme im Bereich einiger μA liefern [8]. Die Spannungshöhe kann sich jedoch bis in den Megavolt-Bereich erstrecken, was für Teilchenbeschleuniger oft ausgenutzt wird, um entsprechend hohe Teilchenenergien zu erreichen. Eine bessere Regelmöglichkeit und größere Leistungen können über eine transformatorische Gleichrichtung und Vervielfacherschaltungen erreicht werden. Die Greinacher Vervielfacherschaltung ermöglicht es, ein Vielfaches der Transformatorscheitelspannung als Gleichspannung zu erzeugen. Dieses Konzept ist an der PTB bis zu 10 Stufen mit jeweils 200 kV umgesetzt worden. In Abbildung 4 ist diese Erzeugeranlage mit 5 Stufen und einer Gleichspannung von bis zu 1000 kV dargestellt.

2.3 Leistungsfähigkeit des Messteilers

Der Messteiler wurde im Hinblick auf die Kurzzeitstabilität, die Linearität, die Frequenz sowie das Temperatur- und Näherungsverhalten geprüft. Alle Module des Teilers wurden einzeln geprüft. Exemplarisch werden hier die Linearität und Spannungsstabilität beschrieben.

Linearität

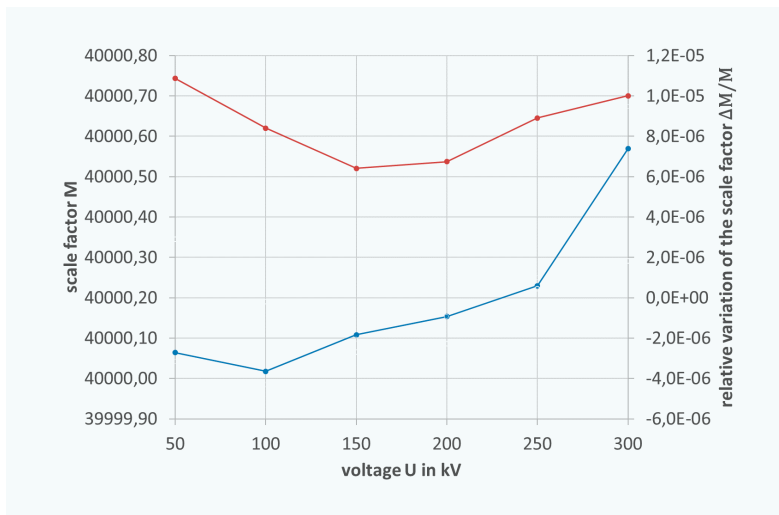
Mit der Linearitätsprüfung wird der Spannungsteiler auf seinen Spannungskoeffizienten hin überprüft. Aufgrund der Dünnschichtcharakteristik der Präzisionswiderstände ist im Hochspannungszweig eine Nichtlinearität in der Größenordnung von $2 \cdot 10^{-8}/\text{kV}$ zu erwarten. Andere Einflüsse wie Koronaentladungen oder parasitäre Leckströme können einen zusätzlichen Einfluss haben. Die Linearitätsprüfung wurde mit dem 300 kV-Referenzteiler der PTB durchgeführt. Er ist mit drahtgewickelten Widerständen ausgestattet, was zu einem Spannungskoeffizienten von weniger als $1 \cdot 10^{-8}/\text{kV}$ führt. Außerdem ist der gesamte Teiler auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) temperiert. Als Spannungsmesser für

das Niederspannungssignal des Teilers werden die Spannungsmesser Fluke 8508A und HP 3458A verwendet. Diese Voltmeter werden hinsichtlich ihrer Verstärkung auf der Grundlage eines Fluke 732A Gleichspannungsreferenzstandards sowie der Offsetspannung korrigiert. Die Bestimmung der Offsetspannung umfasst alle Komponenten des Messsystems wie den Spannungsteiler, alle Hochspannungsanschlüsse, Masseverbindungen, Messkabel und Adapter.

Die Spannung wird in 50-kV-Schritten von 50 kV bis 300 kV erhöht, wobei die Messzeit bei jedem Spannungsschritt 3 min beträgt. Die Ergebnisse in Abbildung 5 zeigen, dass die Spannungsabhängigkeit des Skalierungsfaktors von 50 kV bis 300 kV ungefähr 5 ppm ist, was mit den spezifizierten Daten der Hochspannungswiderstände übereinstimmt.

Stabilität

Die Stabilitätsprüfung gibt Aufschluss über die Selbsterwärmung aufgrund von ohmschen Verlusten sowie über die Wärmeabgabe im Inneren des Teilers. Aufgrund des modularen Life-Tank-Designs ist es nicht möglich, eine aktive Temperaturkontrolle im Inneren des Teilers zu integrieren, um ihn auf einer konstanten Temperatur zu halten, wie es bei der PTB Referenz der Fall ist. Daher muss die gesamte abgeleitete Wärme durch die isolierende Säule und die Aluminiumflansche geleitet werden. Aufgrund dieses eingeschränkten Wärmeübergangs dauert es mehrere Stunden, bis nach Anlegen der Hochspannung ein konstanter Skalierungsfaktor erreicht wird. Um diese Messung unabhängig von der Eigenerwärmung des PTB Referenzteilers zu machen, wurde dieser einige Stunden vor der eigentlichen Messung an die Hochspannung angeschlossen. Die Stabilitätsmessungen wurden bei 200 kV durchgeführt, um die zusätzliche Verwendung des Präzisionsteilers HVDC 2.1 als zweiten Prüfling zu ermöglichen. Dieser Teiler ist in Bezug auf seine Leistung ebenfalls gut bekannt [9]. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse des Stabilitätstests über einen Zeitraum von 3 Stunden. Die oberen Punkte zeigen den Trend des neu entwickelten Messteilers (PT400) im Vergleich zum HVDC 2.1 (untere Punkte). Das selbstgesetzte Ziel einer Messeinrichtung für 1600 kV und einer erweiterten Messunsicherheit von unter 100 µV/V konnte somit erreicht werden.

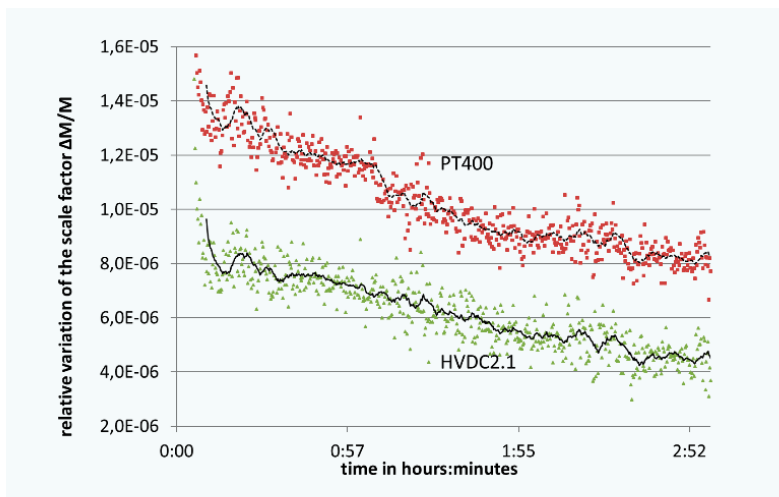


2.4 Zusammenfassung

Eine Metrologie-Infrastruktur für HVDC und überlagerte Impulsspannungen ist aufgebaut worden. Dies beinhaltet eine geeignete Hochspannungsquelle für die Kalibrierung von Geräten oberhalb von mehreren hundert Kilovolt. Die in diesem Artikel vorgestellte Quelle ist in der Lage, Spannungen bis zu 2000 kV mit einer hohen Stabilität und einem Ripple im Promillebereich zu erzeugen. Im Bereich der Gleichstrommesstechnik wurde ein neuer ultrastabiler Spannungsteiler konstruiert, der zusätzlich für Hochfrequenz- und Transientenmessungen geeignet ist. Das verwendete treibhausfreundliche Isoliergas reduziert im Vergleich zu SF6 sowohl die Umweltbelastung als auch die Kosten. Darüber hinaus ermöglicht der niedrige Druck im Inneren des Teilers den Transport per Flugzeug, um Kalibrierungen weltweit durchzuführen. Aufgrund des modularen Aufbaus kann der Teiler Spannungsbereiche bis 1600 kV abdecken. Für die Zukunft ist geplant, das Kalibrierdienstleistungsangebot auf mindestens 1600 kV zu erweitern. Die Kalibrierung umfasst die Linearität, Stabilität, Frequenz, das Temperaturverhalten und die Druckabhängigkeit.

Abbildung 5: Linearitätstest eines Teilermoduls

Abbildung 6: Spannungsstabilität PT400 und HVDC2.1 bei 200 kV



⁴ Matthias Schmidt, Leiter Arbeitsgruppe 2.33 Leistung und Energie, Prüfstellenwesen, E-Mail: matthias.schmidt@ptb.de

⁵ Dr. Florian Schilling, Leiter Arbeitsgruppe 2.35 Netzintegration, erneuerbare Energien und Speicher, E-Mail: florian.schilling@ptb.de

Literatur

- [1] EMPIR-Forschungsprojekt 19NRM07 HV-com²: Support for standardisation of high voltage testing with composite and combined wave shapes <https://www.ptb.de/empir2020/hv-com2/home/>.
- [2] EMPIR-Forschungsprojekt 19ENG02 FutureEnergy: Metrology for future energy transmission <https://www.ptb.de/empir2018/futureenergy/project/>.
- [3] Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de. [Online] 12. Dezember 2016. [Zitat vom: 04. April 2017.] <http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase>.
- [4] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. 2012, „Climate Change 2007: The physical basis“, Großbritannien, Cambridge University Press, 2012.
- [5] EU, Richtlinie 2014/29/EU des europäischen Parlaments und des Rates. 26. Februar 2014.
- [6] Haddad, A. und Warne, D. 2004, *Advances in High Voltage Engineering*. London, UK : Institution of Engineering and Technology, 2004. ISBN 978-0-85296-158-2.
- [7] 3M. 2009, *3M Novac 649 Engineered Fluid*. Minneapolis, USA, Electronics Markets Materials Division, 2009.
- [8] M. Beyer, W. Boeck, K. Möeller, W. Zaengl. 1986. *Hochspannungstechnik*. Heidelberg : Springer Verlag, 1986. ISBN 3-540-16014-0.
- [9] A.-P. Elg, J. Hällström, and A. Bergman, “Optimization of the design of a wideband 1000 kV resistive reference divider,” 17th 8th International Symposium on High Voltage Engineering, paper H-013, Hannover, Germany, 2011.

3. Breitbandige Leistungsmesstechnik

Matthias Schmidt⁴,
Florian Schilling⁵

3.1 Einleitung

Das exakte Messen elektrischer Leistungen und Energiemengen wird wegen der steigenden Energiepreise und der vermehrten Verwendung elektrischer Energie als primärer Energieträger immer wichtiger. Gleichzeitig wird es für Leistungs- oder Energiemessgeräte durch die Zunahme der Oberschwingungsbelastung im Netz immer schwieriger die Energien bzw. deren Leistung mit einer geringen Messunsicherheit zu messen. Hinzu kommt, dass die vorhandenen Oberschwingungen durch den Einsatz moderner Leistungselektronik auch ein immer höheres Frequenzspektrum als früher aufweisen und dementsprechend schwieriger von

der Messtechnik aufzunehmen und zu verarbeiten sind. Das Vorhandensein solcher Oberschwingungen ist unter anderem auf den Einsatz von Wechselrichtern in Speicher-, Wind- und Photovoltaikanlagen zurückzuführen. Außerdem erfordern neue Technologien wie dem induktiven Laden von Fahrzeugen die Messung der Leistung von Signalen mit hohen Grundschwingungsfrequenzen. Die Aufgaben, die mit diesen Technologien verbunden sind, reichen von der Abrechnung und Charakterisierung von Komponenten und Systemen bis hin zur Überprüfung der Einhaltung von in Normen vorgeschriebenen Grenzwerten.

Im Rahmen einer bereits abgeschlossenen Masterarbeit und noch laufenden Promotionsforschungen wird eine rückgeführte Normalmess-einrichtung für Wechselleistungen bis zu einer Frequenz von 150 kHz an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelt und aufgebaut. Der Fokus der Arbeit ist es, eine Möglichkeit zur Rückführung von Leistungsmessgeräten mit einem erweiterten Frequenzbereich auf nationale Normale anbieten zu können, um das gesetzliche Messwesen sowie die korrekte Messung und Abrechnung der übertragenen elektrischen Energie im Verteilnetz sicherzustellen.

In Abbildung 1 ist der derzeit abgedeckte Bereich für Spannung, Strom und Frequenz, für die rückgeführte Messung der elektrischen Leistung, dargestellt. Für den in blau dargestellten Bereich besitzt die PTB derzeit CMC-Einträge. Für den in der Abbildung dargestellten orangenen Bereich, befinden sich die CMC-Einträge gerade in der Genehmigungsphase. Der in Gelb dargestellten Bereich, soll mit zukünftigen Weiterentwicklungen des Mess- und Erzeugungssystems realisiert werden. Hier stellt aktuell die Erzeugung der höherfrequenten Ströme bzw. die Verfügbarkeit des benötigten Transkonduktanzverstärkers die Herausforderung dar.

3.2 Konzept

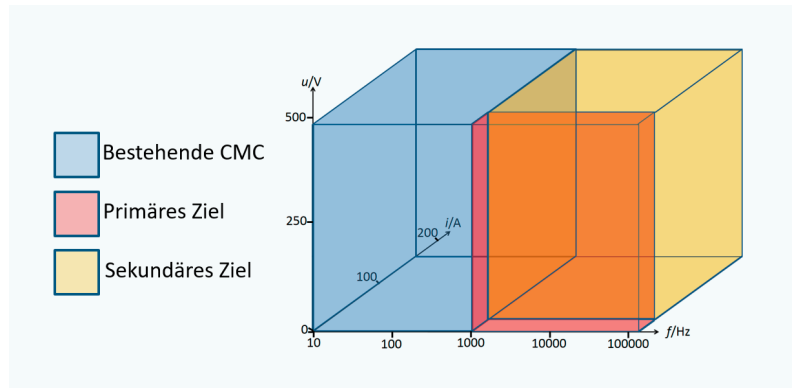
Basierend auf dem Prinzip des 1999 von der PTB vorgestellten [1] und in den Folgejahren weiterentwickelten Leistungsnormalen für Frequenzen bis 1 kHz [2], [3] wurde ein breitbandiges Messsystem zur Kalibrierung von elektrischer Wirkleistung, Blindleistung und Scheinleistung bis 150 kHz aufgebaut. Dieses hochgradig modulare Messsystem bildet eine funktionale Basis für weitere Entwicklungen und zur Verbesserung der Messunsicherheit.

Das neue Messsystem soll für die rückgeführte Messung rein sinusförmiger Größen dienen, die mit einer Phantomleistungserzeugung mit Frequenzen bis 150 kHz erzeugt und mit einer relativen Messunsicherheit ab $1 \cdot 10^{-4}$ gemessen werden können. Phantomleistungserzeugung bedeutet,

dass der Strompfad und der Spannungspfad voneinander getrennt sind und für ein zu kalibrierendes Messgerät (DUT) es lediglich so erscheint, als würde eine reale Leistung anliegen.

Hierdurch wird die tatsächlich benötigte Leistung sehr gering und es kann sehr einfach jeder beliebige Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung erzeugt werden. Jedoch hat dieses Messprinzip den Nachteil, dass bei späteren Kalibrierungen nur Messgeräte untersucht werden können, die auch eine physikalische Trennung von Strom- und Spannungspfad ermöglichen.

Abbildung 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Messsystems. Die Trennung von Spannungspfad (oben) und Strompfad (unten) ist hier gut zu erkennen. Die verwendete LWL-Kommunikation stellt sicher, dass ein Übersprechen durch eine galvanische Verbindung der beiden Systeme, insbesondere bei höheren Frequenzen möglichst minimiert wird. Die beiden Kanäle besitzen einen sehr ähnlichen Aufbau. Zuerst werden die beiden Signalforen synchron mittels eines Digital-Analog Wandlers (DAC) im Spannungsbereich von $\pm 10\text{ V}$ erzeugt und gefiltert. Die Signale werden für die Erzeugung des Strom- und Spannungsverlaufs mit einem entsprechend breitbandigen Spannungs- und Transkonduktanzverstärker auf die gewünschte Spannung U und den Strom I gebracht. Diese Signale werden anschließend von dem DUT und der Sensorik des Messsystems gemessen. In dem Block der Signalerfassung werden die Eingangssignale in Messsignale mit maximalen Amplituden von $\pm 5\text{ V}$ umgewandelt. Dies geschieht mit einem aufgebauten aktiven Spannungsteiler [4] sowie einem für die jeweilige Stromstärke geeigneten Shunt. Deren Ausgangsspannungen werden anschließend jeweils von einem zweikanaligen Analog-Digital Wandler (ADC) differenziell erfasst. Die Software zerlegt diese Signale nun via Fouriertransformation (FFT) in diskrete Frequenzkomponenten. Diese werden



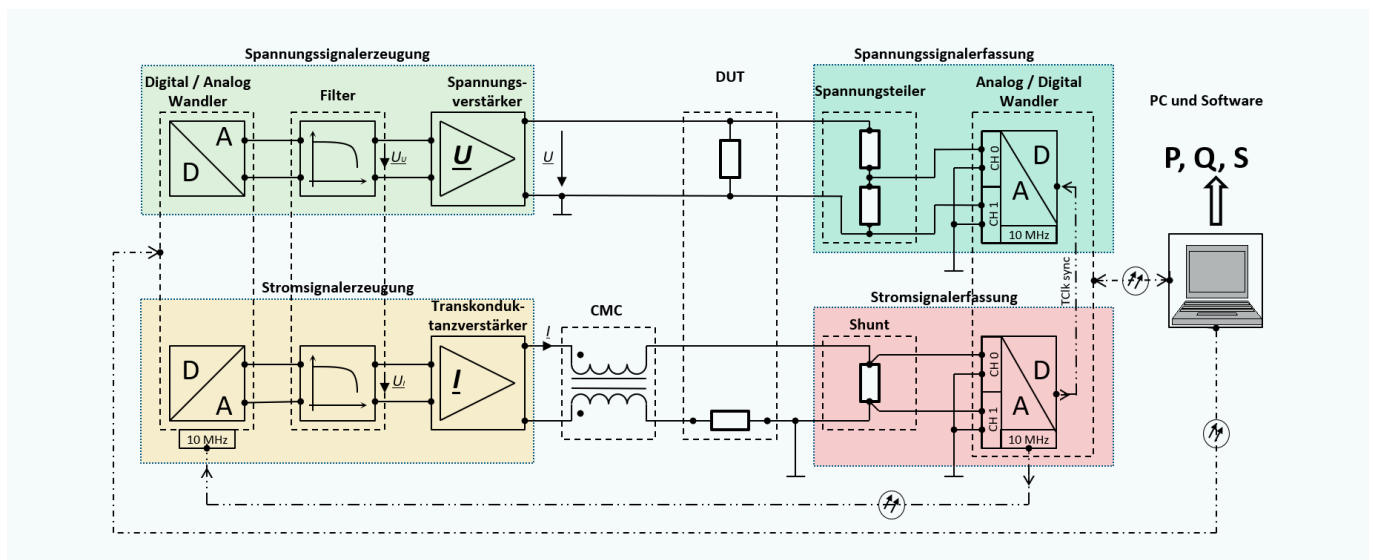
entsprechend den kalibrierten frequenzabhängigen Eigenschaften der Sensorik und des Digitizers, in ihrer Amplitude und Phase korrigiert. Die frequenzspezifisch korrigierten Strom- Spannungspaare werden zu einer spektral aufgelösten Wirkleistung (P), einer Blindleistung (Q) und einer Scheinleistung (S) verrechnet und anschließend der Gesamtwert von P , Q und S ermittelt. Die sich so ergebenden Messwerte können nun mit denen des DUT verglichen und ausgewertet werden.

Abbildung 1: Darstellung der frequenzabhängigen Wertebereiche für die Spannungen und Ströme bei der Planung des breitbandigen Messplatzes für die Kalibrierung der elektrischen Leistung.

3.3 Ergebnisse

Um den Aufbau des Messsystems zu testen, wurden Vergleichsmessungen mit zwei kommerziell verfügbaren Leistungsanalytoren durchgeführt: dem Zimmer LMG 671 und dem Yokogawa WT 3000. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte gemäß den Herstellerangaben und kam zu vergleichbaren Ergebnissen. In Abbildung 3 sind die Messergebnisse für die Wirkleistung des LMG 671 für eine Spannungs-Strom Kombination von 230 V und 1 A , sowie bei einer Variation des Phasenwinkels dargestellt. Die ermittelten Messabweichungen liegen bei beiden Messgeräten deutlich unter der in den Spezifikationen möglichen Messabweichung des jeweiligen Messgeräts. Die unkorrelierten Messergebnisse der beiden

Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Kalibrier-einrichtung für die elektrische Leistung im Frequenzbereich bis 150 kHz .



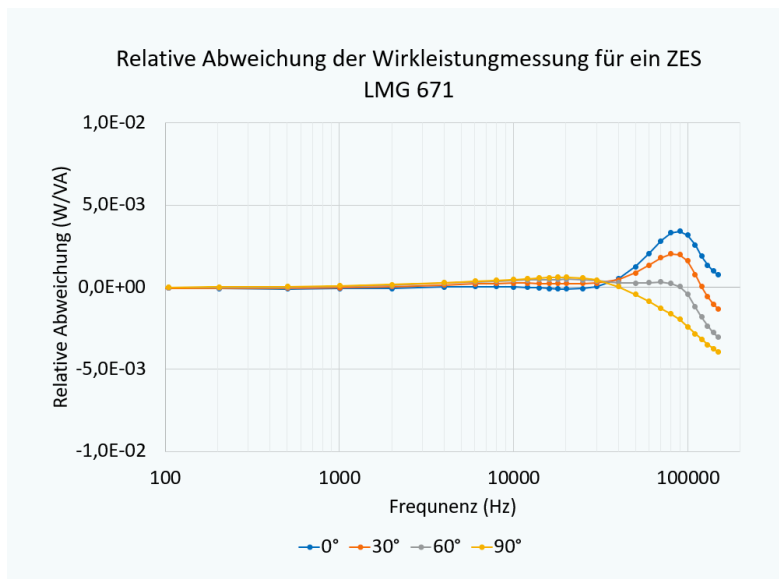


Abbildung 3: Relative Messabweichung des kommerziellen Leistungsmessgerätes LMG 671 für die elektrische Wirkleistung bei 230 V, 1 A im Frequenzbereich bis 150 kHz.

Leistungsmessgeräte lassen den Schluss zu, dass das neue Messsystem keine systematische Abweichung in der Größenordnung der hier untersuchten Genauigkeit aufweist. Die Unsicherheitsbalken sind in der Grafik zur besseren Darstellung nicht eingezeichnet worden da diese insbesondere bei den höheren Frequenzen außerhalb des abgebildeten Bereichs liegen würden.

Die mit dem Messsystem erzielbare erweiterte Messunsicherheit wurde zur einfachen Abschätzung in der folgenden zugeschnittenen Größen Gleichung (Formel 1) zusammengefasst. Bei der Ermittlung der Formel ist darauf geachtet worden, dass sich keine kleinere Messunsicherheit, als die Messunsicherheit bei der exakten Messunsicherheitsbetrachtung ergeben kann. Diese Überabschätzung liefert also immer einen Wert für die Messunsicherheit, der größer oder gleich der exakten Messunsicherheitsbetrachtung ist.

$$\delta P \frac{W}{VA} = \left(9.6 \cdot 10^{-5} + 2.7 \cdot 10^{-9} \frac{1}{Hz} \cdot f \right) + 4.5 \cdot 10^{-8} \frac{1}{Hz} \cdot |\sin\varphi| \cdot f \quad (1)$$

Die Formel für die Messunsicherheit der Wirkleistung veranschaulicht gut die Eigenschaften des neuen Messsystems. Für eine bessere Lesbarkeit befindet sich der Teil der die Amplitudenabhängigkeiten des Systems, sowie die zugehörige Frequenzabhängigkeit in Klammern. Der frequenzabhängige Kalibrierparameter innerhalb der Klammer ist dabei etwa 10^4 kleiner als die Grundunsicherheit von $96 \mu W / VA$. Dementsprechend wird dieser Wert ab ca. 10 kHz bedeutsam. Beide Werte zusammen bilden den Unsicherheitswert für die Scheinleistung.

Der hintere Teil der Formel stellt den Einfluss der Unsicherheiten der ermittelten Phasen in Abhängigkeit des Phasenwinkels φ zwischen Spannung und Strom auf die Messunsicherheit der Wirkleistung dar. Der frequenzabhängige Unsicherheitsanteil ist um den Faktor Tausend kleiner

als die Grundunsicherheit der Amplitudenmessung des Messsystems. Das bedeutet, dass dieser Wert einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtunsicherheit ab ca. 1 kHz haben kann. Wie stark dieser Einfluss tatsächlich ist, hängt vom Phasenwinkel ab. Je größer die Steigung der zugrundeliegenden Winkelfunktion desto größer ist auch der Einfluss einer konstanten zeitlichen Unsicherheit.

Mit dem so aufgebauten Messplatz können Spannungen bis 480 V und Ströme bis 14 A erzeugt und gemessen werden. Dabei werden die Spannungen und Ströme zunächst sinusförmig erzeugt und gemessen. Die typischen, von den Herstellern angegebenen Fehlergrenzen der Leistungsanalytoren liegen im unteren Frequenzbereich bis hoch zu einigen kHz bei etwa $200 \dots 300 \mu W / VA$. Die mit dem vorgestellten Messsystem erzielten Messunsicherheiten sind dabei etwa um den Faktor 3 geringer. Es ist geplant, in einem zukünftigen weiteren Schritt die Kurvenformen der Signale auch verzerren, d. h. die Grundschwingungen inklusive Oberschwingungen zu erzeugen. Die vorgestellten Komponenten sind grundsätzlich dafür geeignet. Damit ließen sich zukünftig alle relevanten Netzsituationen oder spezielle Anwendungen, wie z. B. die mit Leistungsumrichtern ins Netz gespeisten Leistungen auch im Laborbetrieb nachzubilden und entsprechende Messgeräte unter solchen Bedingungen zu charakterisieren.

Literatur

- [1] G. Ramm, H. Moser, A. Braun, „A new scheme for generating and measuring active, reactive and apparent power at power frequencies with uncertainties of 2.5×10^{-6} “, IEEE Trans. IM 48, S. 422–426, Apr. 1999
- [2] K. Ihlenfeld, E. Mohns, K. Dauke, „Classical Nonquantum AC Power Measurements With Uncertainties Approaching 1 uW/VA“, IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, Vol. 56, No. 2, April 2007
- [3] E. Mohns, G. Ramm, W. G. Kürten Ihlenfeld, L. Palafox, H. Moser: „PTB primary sampling standard for electrical AC Power,“ 7th International Conference on Advances in Metrology (AdMet – 2009), New Delhi, 18–20, February 2009
- [4] F. Schilling, M. Schmidt, M. Meisner, S. Passon, „Active voltage divider with low phase uncertainties.“, 21st International Symposium on High Voltage Engineering 2019, Budapest, Hungary, 26–30, August 2019

4. Metrologie für Schnellladesäulen und DC-Elektrizitätszähler für den Anwendungsbereich Elektromobilität

Jannes Langemann⁶,
Dr. Christoph Leicht⁷

4.1 Einleitung

Um die Akzeptanz der Elektromobilität in der Bevölkerung weiter zu steigern, soll das Elektrofahrzeug auch für lange Strecken praktikabel genutzt werden können. Dafür sind viele Schnellladesäulen, oder präziser Schnellladeeinrichtungen, vor allem an Autobahnen notwendig, die Elektrofahrzeuge innerhalb kurzer Rastpausen wieder für mehrere hundert Kilometer aufladen können. Um diese hohen Energiemengen zwischen der Ladeeinrichtung und dem Elektrofahrzeug innerhalb kurzer Zeitspannen übertragen zu können, sind hohe elektrische Gleichspannungen und Gleichströme notwendig. Herausfordernd hierbei ist, dass hohe Ladeströme sehr große Leiterquerschnitte erfordern, die jedoch dementsprechend schwere Leitungen zur Folge haben. Bei größeren Ladeleistungen werden deshalb die Leitungen bewusst dünner gestaltet und die dann entstehende hohe Verlustleistung aktiv mit Wasser oder Öl gekühlt. Ein Elektrofahrzeug während des Ladevorgangs wird in Abbildung 1 dargestellt.

Hohe elektrische Leistungen müssen aber nicht nur übertragen werden, sondern auch im Rahmen der rechtlichen Vorgaben korrekt gemessen und abgerechnet werden. Aus diesem Grund müssen die Schnellladeeinrichtungen und die integrierten Gleichstrom- (DC-)Elektrizitätszähler nationalen Konformitätsbewertungsverfahren nach den Rechtsnormen Mess- und Eichgesetz (MessEG) sowie Mess- und Eichverordnung (MessEV) unterzogen werden. Diese bestehen jeweils aus einer Baumusterprüfung (Modul B) und einer Qualitätssicherung der Produktion (Modul D) bzw. einer Produktprüfung (Modul F). Bei Ersterem wird das Baumuster nicht nur auf Einhaltung der

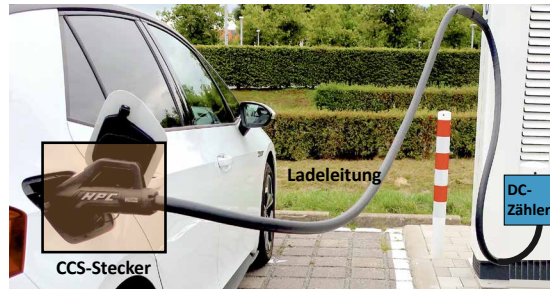


Abbildung 1: Elektrofahrzeug während eines Schnellladevorgangs

Fehlergrenzen geprüft, sondern auch EMV- und Umwelanforderungen, funktionale Prüfungen einschließlich Fehlerfälle, äußere Beschaffenheit, Software- und Dokumentationsanforderungen betrachtet. Damit nach Abschluss der Baumusterprüfung auch entsprechend dem Baumuster die Produkte hergestellt werden, wird im zweiten Schritt entweder der Produktionsprozess beim Hersteller im Rahmen von Modul D betrachtet oder die einzelnen hergestellten Produkte im Rahmen von Modul F auf Konformität mit dem Baumuster geprüft.

4.2 Schnellladeeinrichtungen

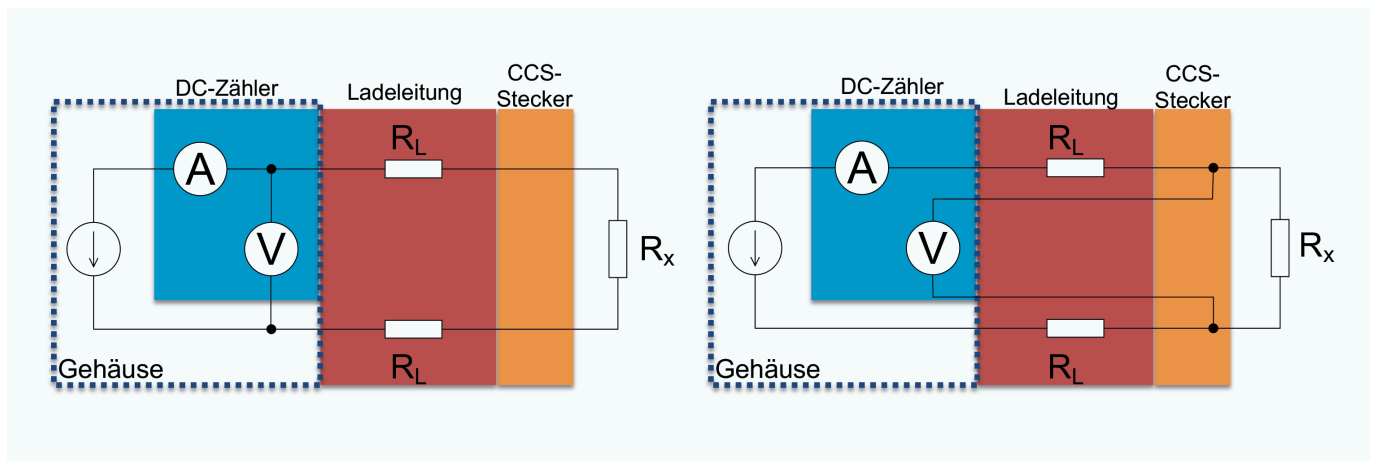
Eine Schnellladeeinrichtung (REA Geräteart 6.8) muss die Anforderungen des MessEG und der MessEV einhalten, wenn mit ihr die bei einem Ladevorgang abgegebene Energie abgerechnet werden soll. Bei den aktuellen Konzepten bietet der DC-Elektrizitätszähler (REA Geräteart 6.5) mit ggf. weiteren mess- und eichrechtlich relevanten Komponenten, die zusammen als Messkapsel bezeichnet werden, die grundlegende Vertrauenswürdigkeit der Messung.

Es ist daher notwendig, dass diese Messkapsel bei unterschiedlichen klimatischen, sowie weiteren Umwelt- und EMV-Einflüssen wie beispielsweise eingestrahlt elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern weiterhin innerhalb seiner Fehlergrenzen arbeitet. Die hierfür relevanten Prüfungen, die an DIN EN 50470 [1] angelehnt sind, werden vom Fachbereich 2.3 und von entsprechend zertifizierten Prüflaboratorien durch-

⁶ Jannes Langemann, Arbeitsgruppe 2.34 Messeinrichtungen und -systeme für Elektrizität, E-Mail: jannes.langemann@ptb.de

⁷ Dr. Christoph Leicht, Leiter Arbeitsgruppe 2.34 Messeinrichtungen und -systeme für Elektrizität, E-Mail: christoph.leicht@ptb.de

Abbildung 2: Messung im Gehäuse mit Kompensation der Leitungsverluste (links) und direkte Messung der abgegebenen Energie mittels Spannungsmessung im CCS-Stecker (rechts)



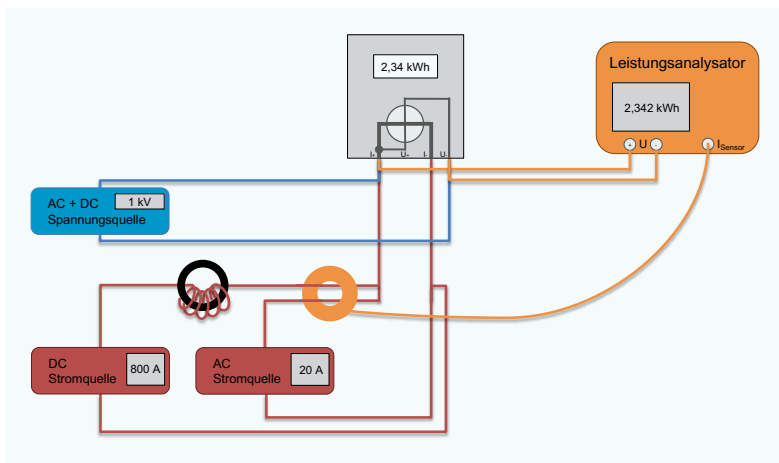
¹ Ein Backend bezeichnet die im Hintergrund laufenden Prozesse wie beispielsweise den Empfang, die Speicherung und ggf. das Zur-Verfügung-Stellen der Messwerte auf einem Server.

geführt. Der messtechnische Teil der Messkapsel ist in der Regel ein DC-Elektrizitätszähler, dessen Messgenauigkeit in Anlehnung an die Richtlinie 2014/32/EU (MID) [2] geprüft und im Kapitel 4.3 näher betrachtet wird.

Es ist gängige Praxis, dass ein eigenständig zertifizierter DC-Elektrizitätszähler der Genauigkeitsklasse B mit einer maximalen Messabweichung von 2 % in einer Ladeeinrichtung verbaut wird. Gefordert ist, dass die gesamte Ladeeinrichtung nur die Anforderungen der Klasse A mit einer maximalen Messabweichung von 3,5 % einhalten muss. Diese maximale Fehlergrenze gilt dabei für die tatsächlich an den Kunden abgegebene Energie und daher für den Energieabgabepunkt, d. h. bei einer Schnellladeeinrichtung am CCS-Stecker, und nicht unbedingt am Messpunkt des verbauten DC-Elektrizitätszählers. Dies wird üblicherweise erreicht, indem die Energieverluste des langen Ladekabels herausgerechnet werden oder mit einer speziellen Spannungsmessung im CCS-Stecker, die als 4-Punkt-Messung bezeichnet wird, direkt die abgegebene Energie gemessen wird. Beide Messverfahren sind in Abbildung 2 skizziert.

Bei der Prüfung der gesamten Ladeeinrichtung stellen die hohen Ladeleistungen von aktuell bis zu 350 kW die Prüfaufbauten vor großen Herausforderungen: Es müssen spezielle hohe Strom- und Spannungspunkte angefahren werden, die nur über ein entsprechendes Kommunikationsmodul angefordert werden können und nicht mittels eines herkömmlichen Elektrofahrzeugs. Darüber hinaus muss auch die von der Ladeeinrichtung während der Prüfung abgegebene Ladeleistung in entsprechende Prüflasten aufgenommen werden, was unter Umständen sehr teuer (einige 100 k€) und Raum-große Leistungssenken zur Folge hätte. Zum Nehmen dieser Hürden, auch im Hinblick auf noch größere Ladeleistungen, wird daher aktuell ein Phantom-Leistungsmessplatz in der AG 2.34 der PTB entwickelt. Angedacht ist dabei ein Messaufbau, bei dem der Prüfstrom und die Prüfspannung getrennt voneinander auf den

Abbildung 3: Messaufbau zur Prüfung von DC-Elektrizitätszählern bezüglich Beeinflussung von höherfrequenten Störsignalen



Prüfling (d. h. die Ladeeinrichtung) einwirken. Vorteilhaft ist dabei vor allem der um ein Vielfaches geringere Energie- und Leistungsbedarf des Messplatzes. Dies ermöglicht es, dass trotz geringem Leistungsaufwand Ladeeinrichtungen mit sehr hohen Ladeleistungen im Labor, aber auch im Feld geprüft werden können. Das grundsätzliche Messverfahren ist ähnlich dem, das aktuell schon bei der Prüfung von DC-Elektrizitätszählern (siehe Kapitel 4.3) verwendet wird.

Wichtig bei der Baumusterprüfung einer Ladeeinrichtung sind zudem die funktionalen Prüfungen. Diese beinhalten u. a. die Prüfung von Fehlerfällen wie beispielsweise dem Kommunikationsausfall zum Backend¹, aber auch die Kontrollierbarkeit der Abrechnung sowie der Inhalt und die Verfügbarkeit des dauerhaften Nachweises des Ladevorgangs. Denn es reicht nicht aus, dass die Ladeeinrichtung innerhalb der Fehlergrenzen korrekt misst, sondern es muss auch sichergestellt sein, dass das Messergebnis dem Kunden vor-Ort angezeigt wird und für die nachträgliche Überprüfung der Rechnung auf dem dauerhaften Nachweis für den Kunden steht. Dieser dauerhafte Nachweis ist als Ausdruck auf dem Bon aus der Zapfsäulen-Welt bekannt, aber kann auch als digitale Repräsentation mittels eines kryptografisch gesicherten Datenpakets dem Kunden zur Verfügung gestellt werden. Die kryptografische Sicherung kann dabei mit einer Prüfsoftware validiert werden. Dieser Mechanismus wird auch bei der Softwareprüfung kontrolliert, bei der die PTB-Arbeitsgruppe 8.51 „Metrologische Software“ unterstützt und die zusammen mit der Dokumentenprüfung die Modul-B-Konformitätsbewertung vervollständigt. Insgesamt wird vermutet, dass die Ladeeinrichtung eichrechtskonform ist, wenn die im Dokument 6-A [3] und der PTB-Anforderung 50.7 [4] adressierten Anforderungen des MessEG und der MessEV erfüllt werden. Zusätzlich könnte auch die noch nicht vom Regelermittlungsausschuss (REA) ermittelte Anwendungsregel VDE-AR-E 2418-3-100 [5] herangezogen werden.

4.3 DC-Elektrizitätszähler

Die grundlegende messtechnische Vertrauenswürdigkeit bietet der DC-Elektrizitätszähler (REA Geräteart 6.5), der aktuell eine eigenständige Zertifizierung nach MessEG/MessEV besitzt. Umfangreiche Messgenauigkeitsprüfungen, die sich grob an der Wechselstromzählernorm DIN EN 50470 orientieren, stellen sicher, dass der Elektrizitätszähler in allen Betriebsbereichen und auch bei der Wiederholung von Messungen innerhalb der zulässigen Grenzwerte misst. Die Grenzwerte für die einzelnen Prüfungen aus der DIN EN 50470 müssen dabei genauso eingehalten werden wie insgesamt die übliche Genauigkeitsklasse B

mit einer maximalen Messabweichung von 2 % in Anlehnung an die Genauigkeitsklassen der Richtlinie 2014/32/EU (MID). Die Messgenauigkeitsprüfungen werden in einer Klimakammer bei unterschiedlichen Temperaturen mit getrennten Spannungs- und Strompfaden durchgeführt, die in Abbildung 3 gezeigt werden.

Am Spannungsmesspunkt des Elektrizitätszählers wird eine DC-Spannung angelegt, die je nach Prüfung zusätzlich mit einer AC-Spannung unterschiedlicher Frequenzen überlagert wird. Dies ist notwendig, um die Messrichtigkeit des Zählers sicherzustellen, auch wenn Überlagerungen mit höherfrequenten Störsignalen, z. B. durch die Gleichrichter in der Ladeeinrichtung, auftreten. Je nach Aufbau des DC-Elektrizitätszählers wird für den Strompfad eine DC-Stromquelle entweder direkt an den Strommessshunt des Elektrizitätszählers oder mittels einer Leitung durch den Stromwandler des Zählers angeschlossen. Für die Prüfungen mit zusätzlichem AC-Strom wird entweder eine weitere Leitung durch den Stromwandler gelegt oder die AC-Stromquelle direkt am Shunt des Prüflings mit angeschlossen. Damit der AC-Strom dennoch nicht über die DC-Stromquelle fließt, wird mittels einer Spule der DC-Strompfad spektral gefiltert. Diese Vorgehensweise hat gegenüber einer echten Leistungsübertragung ohne Auftrennung des Strom- und Spannungspfades den Vorteil, dass viel geringere Anschlussleistungen für die Prüfungen benötigt werden. Aktuell können mit diesem Messaufbau DC-Zähler mit einem DC-Spannungsbereich von bis zu 1500 V und einem DC-Strombereich von bis zu 1200 A geprüft werden. Die vorhandenen Messaufbauten erreichen hierbei für die Überprüfung der DC-Energiemessung des Zählers eine Messunsicherheit $< 0,1\%$.

Zusätzlich zu leitungsgebundenen Umwelt- und EMV-Einflüssen muss der Elektrizitätszähler auch innerhalb von eingestrahlt elektromagnetischen Feldern oder in unterschiedlichen Temperaturbereichen innerhalb seiner Toleranz messen. Bei letzterem wird sowohl die eigene Erwärmung des Zählers als auch der äußere Temperaturbereich betrachtet. Darüber hinaus wird von einem Elektrizitätszähler auch erwartet, dass die gezählte Gesamtenergiemenge nur in positiver Richtung immer weiter steigt und nicht zurücklaufen kann (Rücklaufsperr). Dies ist wichtig, damit vor einem Ableszeitpunkt die gemessene Energiemenge nicht unzulässig zurückgesetzt werden kann. Weitere Betrachtungen der äußeren Beschaffenheit wie beispielsweise Aufschriften und Plombierungen, Dokumenten- und Softwareprüfung ergänzen diese Prüfungen. Insgesamt vermutet die Einhaltung der Anlage 20 Abschnitt 1 Teil 2 der Eichordnung, die PTB-Anforderungen 20.1 [6] und 50.7 [4] die Erfüllung der entsprechenden Anforderun-

gen des MessEG und der MessEV. Zusätzlich beinhalten auch der Entwurf der DIN EN 62053-41 [7] und die Anwendungsregel VDE-AR-E 2418-3-100 [5] weitergehende konkretisierte Anforderungen. Bisher sind diese beiden Dokumente allerdings noch nicht vom REA ermittelt worden.

Literatur

- [1] DIN EN 50470: „Wechselstrom-Elektrizitätszähler“. Teil 1 Stand August 2019, Teil 2 Stand August 2020, Teil 3 Stand März 2020. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Berlin.
- [2] Richtlinie 2014/32/EU: „Richtlinie 2014/32/EU des Europäischen Parlaments und des Rates“. Stand 26. Februar 2014. Amtsblatt der Europäischen Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/32/oj>
- [3] Dokument 6-A: „Regeln und Erkenntnisse des Regelermittlungsausschusses nach § 46 des Mess- und Eichgesetzes für Messgeräte und Zusatzeinrichtungen im Anwendungsbereich der E-Mobilität“. Stand: 16. März 2017. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. <https://doi.org/10.7795/510.20170316B>
- [4] PTB-Anforderungen PTB-A 50.7: „Anforderungen an elektronische und softwaregesteuerte Messgeräte und Zusatzeinrichtungen für Elektrizität, Gas, Wasser und Wärme“. Stand: April 2002. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. <https://doi.org/10.7795/510.20150728F>
- [5] VDE-AR-E 2418-3-100: „Elektromobilität – Messsysteme für Ladeeinrichtungen“. Stand: August 2021. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Berlin.
- [6] PTB-Anforderungen PTB-A 20.1 „Messgeräte für Elektrizität; Elektrizitätszähler und deren Zusatzeinrichtungen“ (12/2003). Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. <https://doi.org/10.7795/510.20150728H>
- [7] DIN IEC 62053-41 (Entwurf): „Gleichstrom-Elektrizitätszähler – Besondere Anforderungen – Teil 41: Elektronische Zähler für Gleichstrom (Genauigkeitsklassen 2,0, 0,5 und 1)“. Stand Mai 2015. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Berlin.

Metrologie und Sicherheit für Batterien

Burkhard Beckhoff¹, Stefan Essmann², Thomas Horn³,
Frank Lienesch⁴, Steffen Seitz⁵, Stefan M. Sarge⁶, Claudia Zech⁷

1. Einleitung

Batterien werden in Deutschland und weltweit milliardenfach genutzt. Im Bereich der portablen elektrischen Geräte haben sich Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihrer hohen Energiedichte und der großen nutzbaren Zyklenanzahl vorerst durchgesetzt. Durch das Ziel der Europäischen Union, die Treibhausgasemissionen stark zu reduzieren [1], wird die Elektromobilität weiter an Bedeutung gewinnen [2]. So hat die Europäische Kommission im Juli 2021 im Rahmen des „Fit-for-55“-Pakets zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen beschlossen, dass Neuwagen ab 2035 emissionsfrei sein müssen [3]. Das Ziel der Null-Emissionen im gesamten Energiemix kann nur erreicht werden durch einen massiven Ausbau an regenerativen Energien. In einem intelligenten Energienetz der Zukunft mit einer großen Menge an fluktuierenden Stromproduzenten werden stationäre Batteriespeicher eine wichtige Rolle spielen. Insgesamt wird damit der Bedarf an Batterien weiter steigen. In diesem Zusammenhang sieht die Europäische Kommission einen großen Bedarf an Forschung und Standardisierung zur Verbesserung der Leistung, Sicherheit und Nachhaltigkeit von Batterien [4]. Dies wird sich auch in der Neufassung der Batterie-Richtlinie der EU widerspiegeln [5]. Zusätzlich wird strategisch der Auf- und Ausbau einer europäischen Batterieproduktion gefördert [6]. Hier ist verlässliche Messtechnik notwendig, um die knappen Ressourcen für Batterien bestmöglich zu nutzen und hochqualitative Produkte auf dem Markt anzubieten. Die Bundesregierung fördert außerdem Grundlagenforschung für die Batterien der Zukunft, die wahrscheinlich auf eine andere Zellchemie setzen werden als Lithium-Ionen-Batterien [7]. Die politischen Vorgaben werden von der europäischen Forschungsgemeinschaft in einer Vielzahl von Projekten umgesetzt [8].

Die PTB wirkt an einigen Stellen bei der Umset-

zung der ambitionierten Ziele mit. Zum einen werden Lithium-Ionen-Batterien aus E-Autos hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für einen zweiten Einsatz in einem stationären Batteriespeicher charakterisiert. Hier sind die Anforderungen an die Energiedichte weniger groß als bei E-Autos, sodass damit gerechnet wird, dass ein großer Markt für diese sog. Second-Use-Speicher entstehen könnte [4]. Neben der Kenntnis über die Restkapazität ist hier aber auch eine Bewertung der Sicherheit elementar wichtig für ein hohes Maß an Akzeptanz bei der Bevölkerung [3]. Um dieses Ziel zu erreichen, werden rückgeführte Messtechnik und genormte Messverfahren benötigt. Hierbei entwickelt die PTB auch für die operando Analytik von Batterien röntgenspektrometrischen Messtechnik, welche die Korrelation der Batteriefunktionalitäten wie der Kapazität mit den ihnen zugrunde liegenden chemischen und physikalischen Eigenschaften in Hinblick auf die Identifizierung der Ursachen von Degradationsprozessen gestattet.

Zu den Nachteilen von Lithium-Ionen-Batterien gehört, dass sie thermisch durchgehen können. In diesem Fall werden hohe Temperaturen erreicht und schädliche Stoffe freigesetzt, sodass eine Gefahr für Mensch und Umwelt besteht. Solche Situationen frühzeitig zu erkennen und die Nutzer rechtzeitig zu warnen ist ein weiteres wesentliches Ziel der Arbeiten in der PTB. Auch hier ist Messtechnik nötig, um die Veränderungen an Batterien und Batteriesystemen zu erkennen, zu verstehen und einzuschätzen. Eine besondere Relevanz hat das Thema Batteriesicherheit für den Einsatz von batteriebetriebenen Geräten in explosionsgeschützten Bereichen. Hier gelten entsprechend höhere Anforderungen an den sicheren Betrieb von Geräten. Die PTB beschäftigt sich daher auch mit den Folgen von durchgehenden Batterien und entsprechenden Schutzkonzepten.

¹ Dr. Burkhard Beckhoff, Arbeitsgruppe 7.24 Röntgenspektrometrie, E-Mail: burkhard.beckhoff@ptb.de

² Dr. Stefan Essmann, Arbeitsgruppe 3.55 Regenerative Energieträger und -speicher, E-Mail: stefan.essmann@ptb.de

³ Dr. Thomas Horn, Arbeitsgruppe 3.61 Eigensicherheit, E-Mail: thomas.horn@ptb.de

⁴ Dr. Frank Lienesch, Abteilung 9 Gesetzliche und internationale Metrologie, E-Mail: frank.lienesch@ptb.de

⁵ Dr.-Ing. Steffen Seitz, Arbeitsgruppe 3.13 Elektrochemie, E-Mail: steffen.seitz@ptb.de

⁶ Dr. Stefan M. Sarge, Arbeitsgruppe 1.44 Kalorische Größen, E-Mail: stefan.sarge@ptb.de

⁷ Dr. Claudia Zech, Arbeitsgruppe 7.24 Röntgenspektrometrie, E-Mail: claudia.zech@ptb.de

⁸ Oft wird auch der Begriff „Second-Life“ verwendet.

2. Metrologie für Batterien

2.1 Messen der Alterung von Lithium-Ionen-Batteriezellen mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie

Lithium-Ionen-Batterien altern im Laufe der Zeit, d. h. sie können mit der Zeit immer weniger elektrische Ladungen speichern und als nutzbaren Strom wieder abgeben [9]. Im Wesentlichen stehen Lithium-Ionen aufgrund diverser Alterungsmechanismen für den Lade- und Entladeprozess nicht mehr zur Verfügung, weil sie in inaktiven Bereichen der Zelle feststecken. Einerseits werden sie durch irreversible chemische Reaktion gebunden. Andererseits werden die aktiven Materialien, d. h. die Komponenten, die die Lithium-Ionen aufnehmen und wieder abgeben, durch das permanente Laden- und Entladen mechanisch beansprucht, wodurch sie zunehmend zerstört werden. Die Alterung von Lithium-Ionen-Batterien, der sogenannte *State-of-Health* (SOH), wird dementsprechend über das Verhältnis der zum Laden/Entladen noch zur Verfügung stehenden Lithium-Ionen, der sogenannten Kapazität, zu deren Menge im Neuzustand definiert.

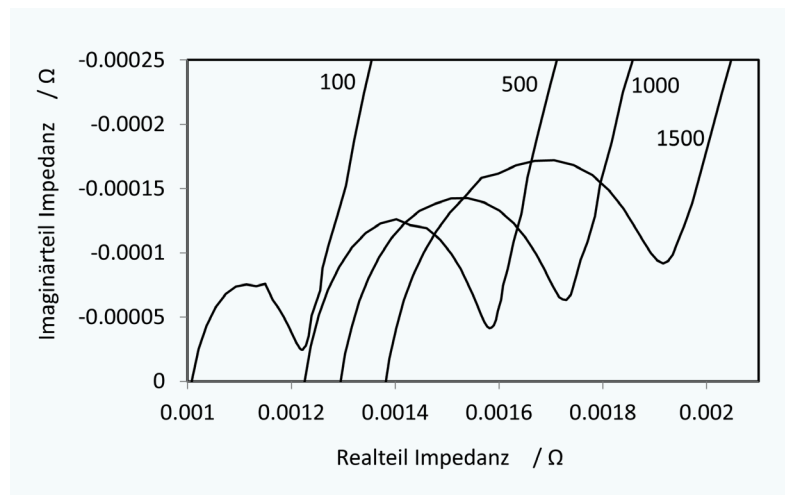
Mit der zunehmenden Alterung der Batterie geht natürlich eine geringere Nutzbarkeit einher. Mobilfunkgeräte entladen sich schneller und Elektrofahrzeuge haben eine zunehmend geringere Reichweite. Die tatsächliche Alterung hängt dabei stark von der Art der Nutzung ab. Eine Lithium-Ionen-Batterie mag es in jeder Hinsicht moderat. Hohe und niedrige Temperaturen, große Ströme, komplette Ladungen/Entladungen oder Lagerung im vollen Zustand lassen sie schneller altern. Die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien im Bereich der Elektromobilität wird allerdings inzwischen immer besser und überdauert die übliche Nutzungsdauer von Autos, solange die genannten abträglichen Bedingungen vermieden werden. Da dies nicht immer möglich ist und verschiedene

Typen von Lithium-Ionen-Batterien auch unterschiedlich altern, ist die Überwachung des Alters durch geeignete Messungen gerade für Elektrofahrzeuge trotzdem wichtig, um nicht mit leerer Batterie irgendwo unerwartet stehen zu bleiben. Die Messung der Restkapazität ist außerdem wichtig, wenn Batterien nach ihrem „ersten Leben“ in einem Elektrofahrzeug in sogenannten *Second-Use*⁸-Anwendungen wiederverwendet werden sollen, etwa als gebrauchte Energiespeicher für die Speicherung regenerativ erzeugter Energie [10]. Ob sich dies ökonomisch rechnet, bleibt abzuwarten. In jedem Fall ist die weitere Nutzung aber ökologisch höchst erstrebenswert, da ansonsten in einigen Jahren Energiespeicherkapazitäten für viele TWh Energie ungenutzt bleiben, obwohl sie noch lange genutzt werden können, nachdem die zugehörigen Elektrofahrzeuge ausgedient haben.

Konventionell kann man die Kapazität messen, indem man eine volle Batterie komplett entlädt, dabei den Strom und die Zeit misst und daraus die zur Verfügung stehende Ladungsmenge berechnet. Diese Methode ist allerdings für die Praxis wenig geeignet, weil sie sehr zeitaufwändig ist. Indirekte Messmethoden sind erheblich schneller und zielen darauf ab, einen schnell zu messenden Parameter zu erfassen, der vom Alter der Batterie abhängt. Eine vielversprechende Messmethode ist diesbezüglich die elektrochemische Impedanzspektroskopie [11]. Die Impedanz, also der Wechselstromwiderstand, einer Lithium-Ionen-Batterie wird durch die elektrochemischen Prozesse in der Batterie bestimmt, also z. B. durch den Durchtritt der Lithium-Ionen in das aktive Material. Die Impedanz hängt von der verwendeten Frequenz des Wechselstroms ab, weil die diversen Prozesse unterschiedlich schnell ablaufen. Die Impedanz von schnellen Prozessen kann man nur mit großen Frequenzen messen und die von langsamen nur mit kleinen. Abbildung 1 zeigt die typische Veränderung von solchen Impedanzspektren in Abhängigkeit der Lade-/Entladezyklen. Verringert sich beispielsweise mit der Zeit die Oberfläche des aktiven Materials aufgrund dessen o. g. Zerstörung, dann erhöht sich die Impedanz in dem Frequenzbereich, in dem der Durchtritt abläuft, weil dieser wegen der kleineren Oberfläche zunehmend erschwert wird. Im Spektrum zeigt sich dies durch eine Vergrößerung des Halbkreisbogens, den man in Abbildung 1 sehen kann. Korreliert man diese Änderung der Impedanz mit konventionell gemessenen Kapazitäten, dann lässt sich prinzipiell das Alter einer Lithium-Ionen-Batterie schnell mit einer Impedanzmessung im geeigneten Frequenzbereich messen. Tatsächlich existieren auf dem Markt auch schon Batterietestgeräte, die auf diesem Prinzip basieren.

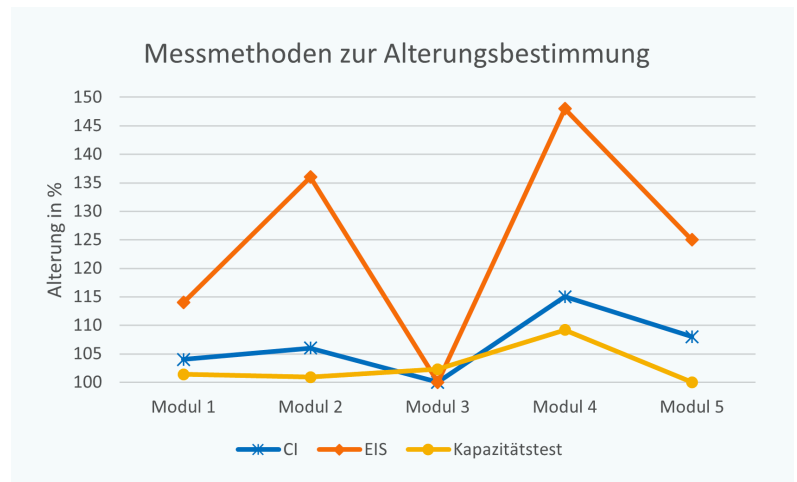
Allerdings ist die Methode mit etlichen Schwierigkeiten verbunden [11,12]. Die Frequenzbereiche

Abbildung 1: Typische Abhängigkeit von Impedanzspektren von der Alterung einer Hochenergie Lithium-Ionen-Batteriezelle. Impedanzspektren sind komplexwertig und werden oft in Form des negativen Imaginärteils gegen den Realteil angezeigt. Der Frequenzbereich der gezeigten Spektren reicht von einigen hundert Hz bis zu 10 mHz, wobei die hohen Frequenzen von rechts nach links entlang der Spektren zunehmen. Die Zahlen geben die Anzahl der Lade-/Entladezyklen an. Der Durchmesser des Bogens kann grob als die Größe des Durchtrittswiderstandes in das aktive Material verstanden werden.



der verschiedenen Prozesse überlagern einander. Impedanzen sind daher nicht so einfach den unterschiedlichen Prozessen zuzuordnen. Die Alterung hängt außerdem davon ab, wie die Batterie benutzt wurde und die gemessene Impedanz ist nicht nur von der Alterung abhängig, sondern auch vom Ladezustand und der Temperatur. Die Korrelation der gemessenen Impedanz mit der Kapazität ist daher nicht eindeutig und hängt zudem vom Batterietyp ab, d. h. von der genauen Zellchemie, den verwendeten Materialien und dem Aufbau. Zu guter Letzt liegen die Impedanzen im $m\Omega$ -Bereich, in dem sie wegen induktiver Einflüsse und, je nach Messstrom, kleiner Messspannungen nur schwer zu messen sind. Obwohl die elektrochemische Impedanzspektroskopie schon seit vielen Jahren in der Batterieforschung eingesetzt wird, wird sie aufgrund dieser Schwierigkeiten eher als ungenau und wenig vorhersagekräftig angesehen. Viele dieser Schwierigkeiten lassen sich aber durch gut definierte Messbedingungen ausreichend reduzieren.

Die Arbeitsgruppe 3.13 „Elektrochemie“ der PTB hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Messung des Alters von Batteriezellen mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie metrologisch fundiert zu etablieren. Im Rahmen mehrerer metrologischer Forschungsprojekte mit Partnern aus anderen AGs der PTB (AG 2.13 „Wechselstrom-Gleichstrom Transfer, Impedanz“, sowie AG 8.42 „Datenanalyse und Messunsicherheit“), der Industrie und anderen europäischen metrologischen Instituten und Forschungseinrichtungen wurden eine Vielzahl von Lebensdauertests an unterschiedlichen Typen von Lithium-Ionen-Batterien durchgeführt und ausgewertet. Auf dieser Datenbasis wurden genau definierte Referenzbedingungen für die Messung von Impedanzspektren von Lithium-Ionen-Batterien und die Durchführung von Lebensdauertests festgelegt und die entsprechenden Messunsicherheiten bestimmt, die im Bereich von ca. einem Prozent liegen. Dazu gehörte auch die Entwicklung zweier Verfahren für die Charakterisierung von Referenzimpedanzen, die für die Kalibrierung von Impedanzspektrometern im $m\Omega$ -Bereich benötigt werden. Fernerhin wurde ein Verfahren samt Software entwickelt und validiert, um den SOH für einen Typ Lithium-Ionen-Batterie aus gemessenen Impedanzspektren abzuleiten. Im Rahmen des europäischen metrologischen Forschungsprojekts „EMPIR-17IND10/LiBforSecUse“ [13] wurden derzeit Impedanzbasierte Messmodelle entwickelt und verglichen, um die Restkapazität von gebrauchten Batteriezellen und Modulen für Second-Use Anwendungen zu messen. Das Projekt wurde im Februar 2022 abgeschlossen.



2.2 Charakterisierung von Lithium-Ionen-Batterie-Modulen für den Einsatz in Second-Use-Speichern

Das grundlegende Verständnis des Alterungsverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen bildet die Basis für die Beurteilung von Modulen, in denen mehrere Zellen parallel und/oder seriell verschaltet werden. Auch hier stellt sich die Frage nach einer Weiterverwendung im Anschluss an den ersten Lebenszyklus der Module. Effiziente Second-Use-Speicher können hergestellt werden, indem möglichst gleichartige (und damit gleich gealterte) Module kombiniert werden. Werden sehr unterschiedlich gealterte Module kombiniert, so kann das elektrochemische Potenzial zur Speicherung von Energie nur teilweise genutzt werden, da ansonsten einzelne Module überladen bzw. überentladen würden. Dies kann zwar mit einem Batteriemanagementsystem behoben werden, führt aber zu einer schnelleren Alterung des Gesamtsystems, da zusätzliche Entladebelastungen auftreten.

Zur Charakterisierung von Batteriezellen gibt es verschiedene Charakterisierungsmethoden, die sich hinsichtlich ihrer Sensitivität und somit auch hinsichtlich der Kosten unterscheiden. Eine einfache Charakterisierungsmethode stellt die Kapazitätsanalyse dar, welche die Ladungsmenge durch Integration des Entladestromes ermittelt. Diese Methode ist kostengünstig umzusetzen, benötigt jedoch einen kompletten Entladezyklus und ist somit zeitintensiv und anfällig gegenüber Messunsicherheiten des Stromes. Eine schnellere Charakterisierungsmethode ist die Strompulscharakterisierung (Current-Interrupt-Methode, CI) bei der ein Lade- bzw. Entladepuls genutzt wird, um einen Spannungssprung hervorzurufen. Der Spannungssprung und das anschließende Relaxationsprofil ermöglichen es, die Innenwiderstände und das Diffusionsverhalten, bzw. die Ladungsdurchtritt- und Doppelschichteffekte der elektrochemischen Speicher zu vergleichen und Aussagen bezüglich der Alterung zu treffen. Für die Charakterisierung der Impedanz wird die elektro-

Abbildung 2: Vergleich verschiedener Messmethoden zur Altersbestimmung von Batteriemodulen. Das am stärksten gealterte Modul (4) wird zuverlässig von allen Messmethoden erkannt. Der Trend der Methoden CI und EIS ist fast identisch.

chemische Impedanzspektroskopie (EIS) angewandt. Hierbei wird entweder ein sinusförmiger Wechselstrom (galvanostatisch: Spannung wird geregelt) oder eine sinusförmige Wechselspannung (potentiostatisch: Strom wird geregelt) vorgegeben und die jeweilige Antwort der Zelle ausgewertet. Im Rahmen einer Untersuchung von Batteriemodulen aus dem Automobilbereich wurden fünf Module mittels der CI-, EIS- und Kapazitätsmethode untersucht [14]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt. Auf Basis derartiger Messungen für eine größere Zahl an Modulen können Module, die für eine zweite Verwendung in Frage kommen, identifiziert und optimal kombiniert werden.

2.3 Schnelle und genaue Zustandsbestimmung von Lithium-Ionen-Batterien

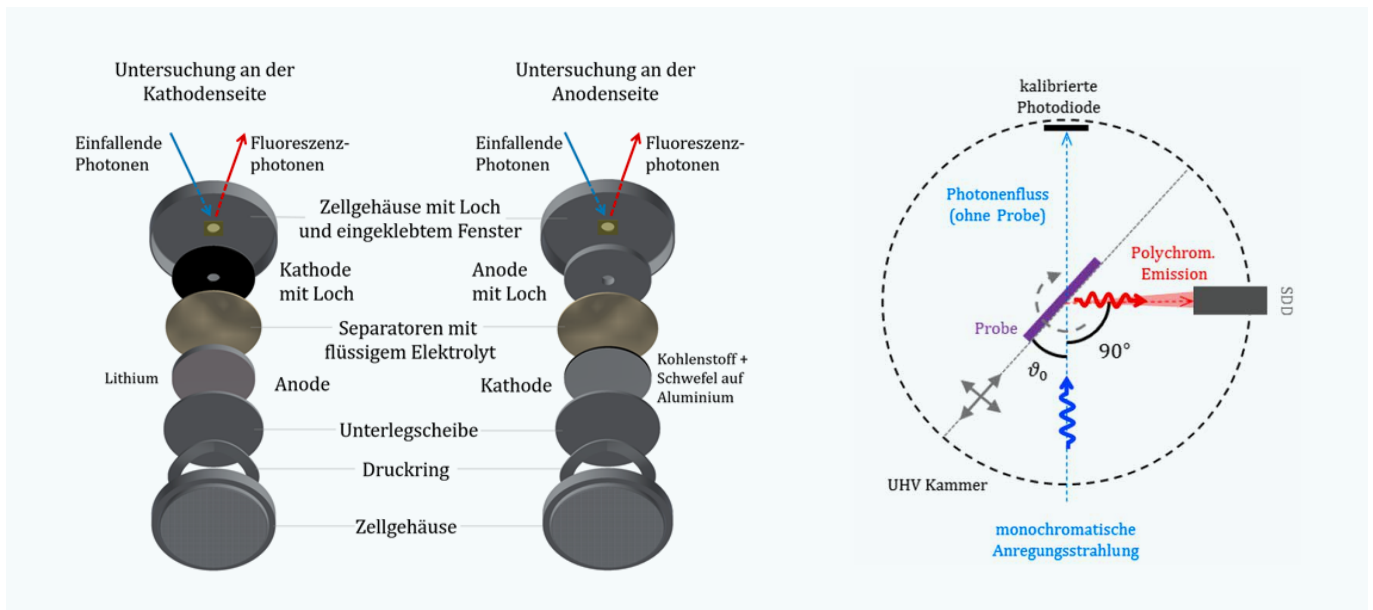
Die Bestimmung des Zustands von Lithium-Ionen-Batterien ist nicht trivial. Es handelt sich um nicht-lineare, hochkomplexe Systeme, die sich zeitlich variant verhalten. Die genaue und schnelle Zustandsbestimmung (SOH, SOC, SOS) ist aber an vielen Stellen im Lebenszyklus von Batterien erforderlich: Bei der Fertigung von Batteriemodulen (bestehend aus mehreren Zellen) und Batterie-Packs (bestehend aus mehreren Modulen) müssen möglichst gleichartige Zellen kombiniert werden, um die wertvollen Rohstoffe effizient zu nutzen und eine lange Lebensdauer der Batteriesysteme sicherzustellen. Während des Betriebs, beispielsweise in E-Autos, muss der Zustand der Batterie hinreichend genau und mit hinreichender Zeitauflösung gemessen werden. Zum einen ist eine genaue Messung des Ladezustands (SOC) nötig, um die verbleibende Reichweite seriös angeben zu können. Zum anderen müssen der Gesundheitszustand (SOH) und der Sicherheitszustand (SOS) bekannt sein, um im Fall von Problemen durch eine intelligente Steuerung eingreifen zu können bzw. die Insassen zu warnen. Nach dem ersten Lebenszyklus können Batteriemodule in stationären Speichern weiterverwendet werden, da hier die Anforderungen an die Energiedichte weniger hoch sind. Allerdings müssen die gebrauchten und gealterten Module zwingend einer Sicherheitsprüfung unterzogen werden, mit der die Eignung festgestellt und die verbleibende Lebensdauer abgeschätzt wird. Die elektrochemische Impedanzspektroskopie und verwandte Methoden sind sehr vielversprechend zu Erreichung dieser Ziele, wurden bisher aber häufig nur für einfache Systeme (wie einzelne Zellen) angewendet. Darüber hinaus fehlt derzeit noch die Verknüpfung zwischen den gemessenen Spektren und den tatsächlichen chemischen und physikalischen Prozessen in der Batterie. Zu diesem Thema wollen AG 3.13 und AG 3.55 in den kommenden Jahren gemeinsam mit europäischen Partnern forschen.

2.4 Rückführbare Analytik von Batterien durch Röntgenspektrometrie

Zur erfolgreichen Begegnung der mit dem Klimawandel verbundenen Herausforderungen spielen Batterien eine Schlüsselrolle, da sie zum einen als stationäre Zwischenspeicher für Energie aus erneuerbaren Energiequellen dienen, und zum anderen durch den Einsatz in Elektroautos die fossilen Energieträger im Verkehrssektor verdrängen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es neuer Batterien mit besonders hoher Energiedichte und langer Lebensdauer. So sollen zum Beispiel Batterien für Elektroautos mindestens 1000 bis 2000 Ladezyklen durchlaufen, ohne dass die Kapazität der geladenen Batterie unter 80 % der initialen Kapazität liegt. Jede Batterie unterliegt Alterungsprozessen, die zum unerwünschten Rückgang der Kapazität führen, und die somit so gut wie möglich verstanden werden müssen. Alterungsmechanismen entstehen durch unerwünschte Nebenreaktionen, für die die Anzahl an beteiligten Elementen, ihr Oxidationszustand und der Ort der Reaktion entschlüsselt werden soll. Während etablierte elektrische Messmethoden, die neben der Batterieentwicklung auch zur Diagnostik eingesetzt werden, häufig nur integrale Aussagen über die Lade- und Kapazitätszustände der Batterien erlauben, gestattet die Röntgenspektrometrie die Beantwortung vieler analytischer Fragen und hat somit eine wichtige Bedeutung für die Untersuchung insbesondere neuer Batterien. Ein übergeordnetes Ziel aller Charakterisierungsmethoden ist den Übergang von empirischen Kenntnissen zu fundiertem Wissen, beispielsweise die quantitative Beschreibung von Transport- und Konversionsprozessen betreffend, zu erlangen. In der Arbeitsgruppe Röntgenspektrometrie der PTB in Berlin wurden in DFG- und Promotionsvorhaben analytische, röntgenspektrometrische Methoden für Nickel-Mangan-Cobalt Lithium-Ionen Batterien (NMC LIB), als auch Lithium-Schwefel-Batterien (Li/S) entwickelt, um die den Degradationsmechanismen zugrunde liegenden chemischen Vorgänge quantitativ untersuchen zu können.

Operando Charakterisierung von Alterungsmechanismen in Lithium-Schwefel Batterien

Im Rahmen des DFG Projekts ISIBAT (Sta 324/54) wurde eine Echtzeitanalyse des Polysulfidshuttles in Lithium-Schwefel Batterien entwickelt. Diese Post-Lithium-Ionen-Batterie ist ein vielversprechender Kandidat für Speicheranwendungen, da aufgrund der Verwendung leichter Aktivmaterialien eine hohe gravimetrische Energiedichte vorliegt. Bei diesem Batterietyp bestehen die Aktivmaterialien für den Minuspol aus Lithium und für den Pluspol aus Schwefel, welcher aufgrund



seiner isolierenden Eigenschaften in Kohlenstoff eingebettet vorliegt. Die Alterung dieser Post-Lithium-Ionen-Batterie wird maßgeblich durch die im Elektrolyten löslichen Zwischenprodukte, den Polysulfide, verursacht, die zum Aktivmaterialverlust und somit zum Kapazitätsrückgang und einer geringeren Lebensdauer führen. Hier konnten sowohl die initiale Formation der Polysulfide, aber auch ihre Bewegung zwischen den Elektroden im Elektrolyten (Shuttleeffekt), sowie die absolute Menge und ihre elektrochemische Umwandlung quantitativ untersucht werden, was zu einem tieferen Verständnis der Alterungseffekte führt. Um diese Konversions- und Transportprozesse während der Lade- und Entladevorgänge zu studieren, wurden die Untersuchungen im Operando-Modus durchgeführt. Dabei wird die Messung durchgeführt, während die Zelle kontinuierlich geladen und entladen wird. Diese zeitaufgelösten Unter-

suchungen ermöglichen eine Zuordnung von Veränderungen auf atomarer Ebene zu verschiedenen Ladezuständen und Gesundheitszuständen der Batterie. Sie erfordern zwar einen hohen experimentellen Aufwand, verhindern aber gleichzeitig experimentelle Artefakte durch das Öffnen einer Zelle, die zu einer Fehlinterpretation von Messereignissen führen könnten. Die bei der PTB entwickelte und verwendete Operando-Messzelle zur Untersuchung der Lithium-Schwefel-Batterie ist auf der linken Seite in Abbildung 3 dargestellt.

Durch die Verwendung von wohlbekannter, monochromatisierter Synchrotronstrahlung und die Kombination aus operando Nahkanten-Absorptionsfeinstruktur-Analyse (NEXAFS) und referenzprobenfreier Quantifizierung mit durch kalibrierte Instrumentierung rückgeführter Röntgenfluoreszenzanalyse wurde für drei vollständige Lade-Entladezyklen erstmalig die absolute Menge

Abbildung 3: Verwendete Operando-Messzelle für die Untersuchung von Polysulfiden an beiden Elektroden-seiten (links) sowie schematischer Messaufbau für quantitative Röntgenfluoreszenzanalyse und Röntgenabsorptionsspektrometrie (rechts)

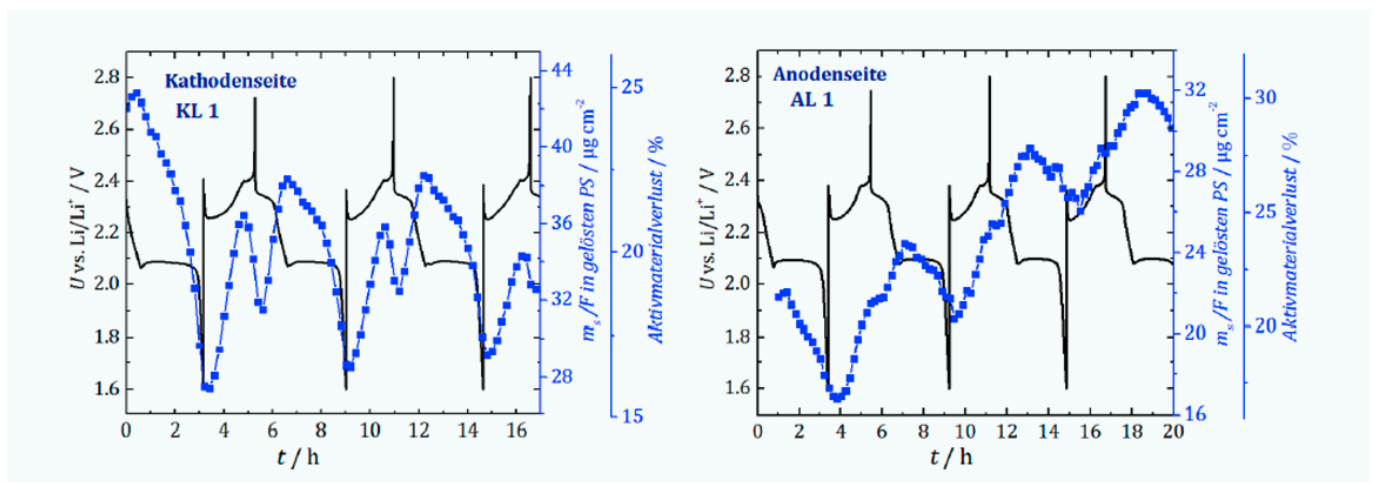


Abbildung 4: Vergleich der Massendeposition von Schwefel in gelösten Polysulfiden (blaue Kurve) auf der Kathodenseite (links) und Anodenseite (rechts) für drei volle (Ent-)Ladezyklen. In schwarz ist jeweils die Strom-Spannungslinie dargestellt, die minimal ist, wenn die Zelle vollständig entladen ist und maximal ist, wenn die Zelle komplett aufgeladen ist. Die zusätzliche y-Achse gibt den prozentualen Wert des Kathodenschwefels an, der sich in gelöste Polysulfide umgewandelt hat.

von Schwefel in Polysulfiden im Elektrolyten bestimmt. Damit konnte der prozentuale Verlust des kathodischen Aktivmaterials Schwefel für verschiedene Ladezustände angegeben werden, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Durch die Untersuchung an beiden Elektroden-seiten konnte der Polysulfid-Shuttleeffekt, sowie die Akkumulation der Polysulfide am Minuspol, die während des Endes jedes Ladevorgangs stattfindet, beobachtet werden. Somit konnte gezeigt werden, dass nicht primär die Bildung der Polysulfide, sondern ihre Bewegung und Ablagerung für den Rückgang der Zellkapazität verantwortlich ist. Dies führt zu neuen Strategien im Zelldesign, zum Beispiel den Einsatz von polysulfid-undurchlässigen Separatoren.

Weiterhin konnte die Veränderung der Moleküllänge bestimmt werden, die sowohl Löslichkeit als auch Reaktivität maßgeblich beeinflusst. Die von uns entwickelte Operando-Messzelle kann dabei sowohl für andere Messverfahren, als auch andere Zellchemien adaptiert werden kann. Dies wurde durch Ramanspektrometrie-Messungen und die Operando-NEXAFS-Analyse von Magnesium-Schwefelbatterien gezeigt. Auch die Kombination unterschiedlicher Messverfahren, sogenannte hybride oder multimodale Ansätze, lassen sich mit der Operando-Messzelle realisieren. Somit werden Informationen unterschiedlicher Techniken miteinander kombiniert, die gemeinsam mehr Aufschluss über die zugrundeliegenden Prozesse geben können, als jede Technik gesondert für sich alleine. Diese Arbeiten zu LiS Batterien [15] wurden gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden sowie dem Helmholtz-Zentrum Berlin durchgeführt.

Charakterisierung von Metallabscheidungen in NMC-Lithium-Ionen-Batterien

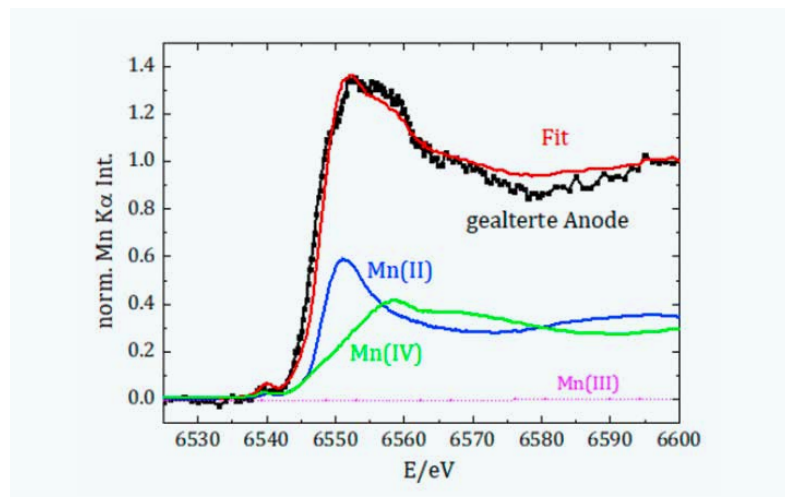
Lithium-Ionen-Batterien mit Interkalationsmechanismus, wie Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) Lithium-Ionen-Batterien, haben im Gegensatz

zu Lithium-Ionen Batterien mit Konversionsprozessen (wie die Lithium-Schwefel-Batterie) oder Legierungsbildung eine sehr lange Lebensdauer und sind dadurch der am häufigsten eingesetzte Zelltyp in den derzeitigen Elektroautos. Während der Ladung werden dabei Lithium-Ionen (Li^+) von der Lithium-Metalloxid-Kathode bereitgestellt, welche zur Anode wandern und dort Gitterplätze in der Graphit-Anode einnehmen, aber die Struktur nicht wesentlich verändern. Beim Entladen werden die Li^+ wieder in die Kristallstruktur der Kathode eingebaut. Da bei der Interkalation reine Festkörperreaktionen und keine chemischen Umwandlungen wie bei Konversionsbatterien auftreten, können hohe Lade- und Entladeraten verwendet werden, was bedeutet, dass die Batterie schnell wiederaufgeladen werden kann. Mit zunehmender Zahl an Zyklen unterliegen Lithium-Ionen-Batterien verschiedenen Alterungseffekten, insbesondere bei Anwendung hoher Potenziale von über 4,4 V vs. Li/Li^+ . Eine Ursache des *capacity fading* liegt in der Zersetzung der Metalloxid-Kathode. Ein Teil der kathodischen Übergangsmetalle (Mn, Ni, Co) löst sich dabei ab und kann in den Elektrolyten, bis hin zur Anode gelangen und dann nicht mehr zur Interkalation und Energiespeicherung beitragen. Darüber hinaus können die Metallablagerungen die auf der Anode befindliche SEI-Schutzschicht (solid electrolyte interphase) angreifen und dadurch zur Zersetzung des Elektrolyten führen, was zusätzlich zum Kapazitätsverlust führt. Dabei haben insbesondere Manganablagerungen schädliche Auswirkungen. Zur Charakterisierung dieses Alterungsmechanismus sollte die Menge des auf der Anode abgelagerten Mangans nach 50 Zyklen bestimmt werden und in Bezug zum Kapazitätsverlust gesetzt werden. Dabei wurde eine Ladeschlussspannung von 4,6 V verwendet und während der post mortem ex-situ Untersuchung befand sich die Zelle im entladenen Zustand. Mit referenzprobenfreier Röntgenfluoreszenzanalyse wurde über kalibrierte Instrumentierung und bekannten Fundamentalparametern der Manganengehalt über die Mangan K_{α} Fluoreszenzlinie bestimmt.

Nach 50 Zyklen wurde eine Manganablagerung auf der Anode von $0,14 \mu\text{g cm}^2$ bestimmt, was 1,6 ‰ des ursprünglichen Manganengehalt in der Kathode entspricht. Der Kapazitätsrückgang wurde auf 12,5 % bestimmt.

Da unterschiedliche Spezies unterschiedlich reaktiv sind, wird mit Mn-NEXAFS der Oxidationszustand des abgelagerten Mangans an der K-Absorptionskante bestimmt. Dazu werden Spektren der NEXAFS-Referenzproben für di-, tri- und tetravalentes Mangan aufgenommen, aus denen über Linearkombination die beste Anpassung für das Spektrum der gealterten Anode gefunden wird, siehe Abbildung 5. Die Messungen ergaben, dass

Abbildung 5: Bestimmung der Manganspezies auf der gealterten Graphitanode einer NMC-Batterie über Absorptionsspektrometrie an der Mangan K-Kante durch Linearkombination von NEXAFS-Referenzproben bekannter Spezies.



die Abscheidungen zu 59 % aus divalentem und zu 41 % aus tetravalenten Mangan zusammensetzen. Trivalentes Mangan, was als besonders reaktiv gilt, wurde nicht detektiert. Diese Arbeiten zu NMC-Batterien [16] wurden gemeinsam mit dem Batterieforschungsinstitut MEET der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster durchgeführt.

Zukünftige Arbeiten zu analytischen Batteriecharakterisierungen

Der zunehmende Bedarf für rückführbare ex-situ-, in-situ- und operando-Analytik an verschiedenen Batteriesystemen wird auch die methodischen Entwicklungen in der PTB mitbestimmen dürfen. Die Politik fordert derzeit eine Technologieoffenheit gegenüber unterschiedlichen Batterietypen, da sich derzeit zum einen noch nicht auf eine bestimmte Zellchemie festgelegt werden soll, und zum anderen je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Zelleigenschaften benötigt werden. Die momentan vielversprechendsten Batterietypen sind NMC-Lithium-Ionen-Batterien, wobei in Zukunft der Anteil an Mangan und Cobalt stückweise reduziert und der Anteil an Nickel zugunsten der Kapazität erhöht wird. Weiterhin wird auf der Anodenseite dieses Batterietyps der Graphit mit bis zu 20 % Silizium angereichert. Auch Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Batterien werden als Zukunftskandidaten für spezielle Einsatzgebiete gesehen. An Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) wird aufgrund ihrer langen Lebensdauer weiterhin intensiv geforscht. Zusätzlich dazu wird für alle genannten Batterietypen auch nach festen Elektrolyten gesucht, sodass die Batterien dann als Festkörperbatterien vorliegen und verbesserte Energiedichte und Sicherheit aufweisen sollen.

Der Zugang der Arbeitsgruppe Röntgenspektrometrie zu mehreren Strahlrohren an der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II ermöglicht die Untersuchung der relevanten Elemente Mn, Ni, Co, C, Na, Mg, Si, Fe, P und S, sodass es möglich ist, Untersuchungen an allen derzeit diskutierten Zellchemien durchzuführen. Neben der eingangs beschriebenen quantitativen Röntgenfluoreszenzanalyse und der Röntgenabsorptionsspektrometrie können in der Arbeitsgruppe auch Experimente zu hochaufgelöster Röntgenemissionsspektrometrie (XES) und resonanter, inelastischer Röntgenstreuung (RIXS) durchgeführt werden. Dazu wurde in der Arbeitsgruppe ein von-Hamos-Spektrometer aufgebaut und charakterisiert. Darüber hinaus wird angestrebt, die bestehende Instrumentierung zur Analyse von Energiematerialien unter besonderen Betriebsbedingungen als auch zur Untersuchung von Photokatalyse- und Elektrolyseprozesse zu ergänzen.

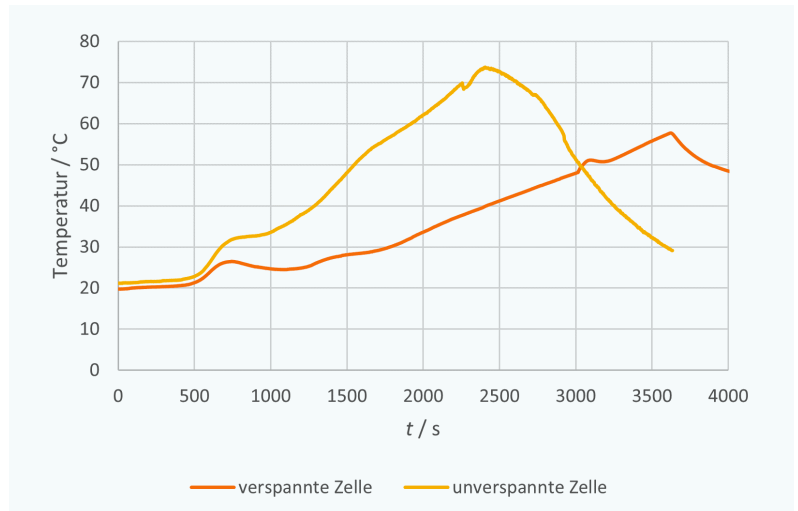


Abbildung 6: Temperaturverlauf bei einer 1C-Überladung einer verspannten und unverspannten Zelle

3. Sicherheit für Batterien und Charakterisierung in der Praxis

3.1 Standardisierung von Format und Prüfverfahren für Pouch-Zellen

Lithium-Ionen-Batterien sind in vielen verschiedenen Formaten und Zellchemien erhältlich. Weit verbreitet sind die sog. NMC-Zellen mit Anteilen an Nickel, Mangan und Cobalt. Bei den Formaten wird zwischen zylindrischen, prismatischen und sog. Pouch-Zellen unterschieden, wobei die Pouch-Zellen (engl. *pouch* = Beutel) aufgrund der möglichen hohen Packungsdichte eine weite Verbreitung im Bereich der Elektromobilität finden. Die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten erlauben es, Zellen für verschiedene Anwendungen maßzuschneidern um bestimmte Eigenschaften wie Energiedichte, Leistung, mechanische Stabilität oder das Temperaturverhalten zu optimieren. Aus Sicht der Sicherheitstechnik erschwert die Variantenvielfalt allerdings die Bewertung einzelner Designs. Deshalb wurde im Projekt BaSS – BatterieSicherheitsStandardisierung an der Standardisierung der Pouchzellformate durch einheitliche Anforderungen geforscht. Zusätzlich wurden vergleichende Untersuchungen zwischen der Vielzahl an möglichen Sicherheitsprüfungen durchgeführt.

Es wurden Prüfungen aus geltenden Normen mit unterschiedlichen Kriterien angewendet. Dabei wurden Zellen einer geringen Überladung ausgesetzt und die resultierenden Wärmeleistungen analysiert. Es wird deutlich, dass eine Überladung auf 4,4 V bereits eine Gasentwicklung und eine veränderte Wärmeleistung zeigt. Zum Ende des Ladeschritts wird bei 4,4 V und 4,5 V eine einsetzende exotherme Nebenreaktion abgebildet. Die Zellen blähen sich durch die Gasentwicklung auf und

³ Die C-Rate setzt den Lade-/Entladestrom mit der Kapazität einer Batterie ins Verhältnis. Eine Rate von 1 C lädt die Batterie in einer Stunde, eine Rate von 2 C innerhalb von einer halben Stunde.

die Pouchfolie wird plastisch verformt. Es wurden auch Überladungen mit Zellen durchgeführt, die in einer Edelstahlpresse verspannt waren. Durch die Verspannung wird die Verformung der Pouchfolie verhindert. Die Verspannung wurde mit einem Druck von 0,08 MPa realisiert. Bei den Überladungen wurden der Spannungs- und Temperaturverlauf (Abbildung 6) aufgezeichnet. Zu Beginn der Überladung verhalten sich die Zellen noch gleich. Doch im Verlauf (ab ca. 110 % SOC) steigt die Spannung der unverspannten Zelle stärker an. Hier kam es früher zur Zellöffnung, die durch einen kleinen Temperatureinbruch angezeigt wird, der durch die Entspannung des Gases in der Zelle entsteht. Darüber hinaus ist der Anstieg der Temperatur bei der unverspannten Zelle deutlich stärker. Da die Zellchemie sich durch die Einspannung nicht verändert, liegt der Grund für die stärkere Wärmeentwicklung in einem Anstieg des ohmschen Widerstands der Zelle. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass der flüssige Elektrolyt gasförmig wird und aus der Schichtstruktur wandert. Somit steht weniger Elektrolyt innerhalb der Schicht zur Verfügung und der Widerstand steigt. Optisch ist dies durch das Aufblähen der Zelle gut zu erkennen.

Im weiteren Vorgehen wurden nur verspannten Zellen verwendet, da die Ergebnisse eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit aufzeigten. Die Überladungen in den ausgewählten Normen verwenden entweder eine Überladung mit einer C-Rate³ von 1 C oder 2 C. Die Versuche wurden bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C durchgeführt. Erneut wurden der Spannungs- und Temperaturverlauf aufgezeichnet. Die Zellen gerieten bei keinem der Versuche in Brand, jedoch öffnete sich die Pouchfolie, sodass die Zellen ausgasen. Die Ausgasung bei einer 1C-Überladung tritt bei einem SOC von 182 % und einer Temperatur von 47 °C ein. Bei einer 2C-Überladung liegen die Werte bei 175 % SOC und 56 °C. Somit ist der Ausgasungszeitpunkt nicht allein von einem dieser Parameter abhängig.

Schließlich wurden die Normanforderungen des Kurzschluss-tests an Zellen verglichen. Hier wiesen die Normen einen großen Unterschied bei den Umgebungstemperaturen auf. Daher wurden die Kurzschlussversuche bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und bei 50 °C vorgenommen und verglichen. Für diese Versuche wurde ein eigens entwickelter Kurzschlusschalter aufgebaut. Dieser ist entprellt und hat einen Widerstand von ca. 180 $\mu\Omega$. Der Kurzschlusswiderstand für den gesamten Aufbau wurde mit 66 m Ω realisiert. Der Kurzschlussstrom ist bei einer Umgebungstemperatur von 50 °C um ca. 6 % höher als bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Trotz des höheren Kurzschlussstroms ist die Erhitzung der Zelle aufgrund der Kühlung durch die Umgebung

geringer als bei 20 °C.

3.2 Kalorimetrie als Untersuchungsverfahren in der Batterieforschung

Die Untersuchung und Überwachung von Batterien mithilfe von Temperaturmessungen ist weit verbreitet. Die gemessene Temperaturänderung ist jedoch mit ihrer Ursache, der Wärmefreisetzung oder Wärmeaufnahme, nur schwach gekoppelt, da aufgrund von Wärmeleitung die gemessene Temperatur dem tatsächlichen Geschehen hinterherhinkt und ein Teil der Wärme von der Wärmekapazität der umgebenden Konstruktionsmaterialien aufgenommen oder abgegeben wird und somit nicht zur Temperaturänderung beiträgt.

Die geeignete Technologie zur quantitativen Bestimmung von Wärmen Q und Wärmeströmen Φ ist die Kalorimetrie, die auf die Werkstoffe und Konstruktionsmaterialien einer Zelle, auf die Zelle selbst oder auf komplette Batteriemodule angewandt werden kann. Entsprechend der Fragestellung lassen sich drei Kalorimeter-Technologien identifizieren, die sich in Hinsicht auf die Größe und die Quelle des zu messenden Wärmestroms unterscheiden:

1. Hochempfindliche Kalorimeter mit isothermer Umgebung für Wärmeleistungen im Mikrowatt-Bereich zur Bestimmung der Selbstentladung, der Optimierung der elektrochemischen Reaktionen und zur Analyse von Nebenreaktionen, die die Leistungsfähigkeit eines Akkus langfristig beeinträchtigen.
2. Kalorimeter mit isothermer Umgebung für Leistungen im Milliwatt- bis Watt-Bereich, die den Reaktionswärmestrom aufgrund der elektrochemischen Prozesse und den Joule'schen Wärmestrom aufgrund Ohm'scher Verluste beim Laden/Entladen quantitativ bestimmen.
3. Kalorimeter mit adiabatischer Umgebung und Druckbehälter für Leistungen bis in den Kilowatt-Bereich, die die Reaktionswärme beim „Durchgehen“ des Akkus und die Joule'sche Wärme bei Kurzschluss bestimmen.

Im Rahmen der für die Entwicklung von Batteriesystemen notwendigen Untersuchungen zum Wärmemanagement und zur sicherheitstechnischen Auslegung sind insbesondere Kalorimeter des Typs 2 und 3 relevant. Für die Auslegung des Wärmemanagements-Systems eines Fahrzeugs ist die Wärmeproduktionsrate Φ im Normalbetrieb von Bedeutung, anhand derer der über das Kühlsystem abzuführende Wärmestrom (Leistung) quantitativ beschrieben wird [17]. Für die Analyse und Optimierung des den Akku bildenden elektrochemischen Systems aus Elektroden, Elektrolyt

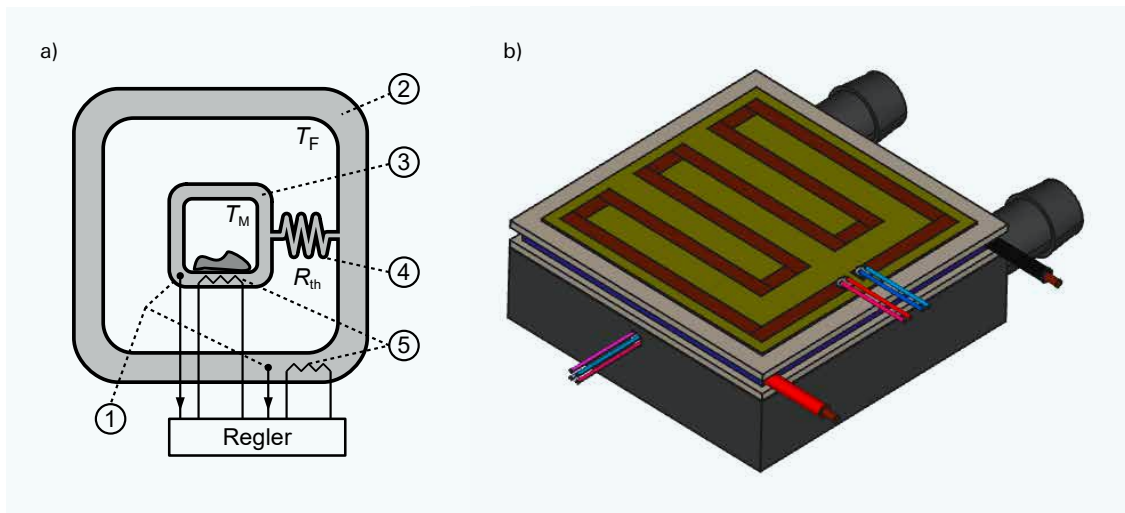


Abbildung 7: Kalorimeter:
a) Grundsätzlicher Aufbau eines Kalorimeters [20]
b) Wiederholungseinheit eines skalierbaren Batterie-Kalorimeters. Erläuterung s. Text.

und Separator werden ebenfalls kalorimetrische Untersuchungen angestellt [18].

Als besondere Herausforderung bei der kalorimetrischen Untersuchung kompletter Zellen ist die große Vielfalt der Bauformen zu nennen [19]. Kommerzielle Batterie-Kalorimeter sind in der Regel teuer und decken nicht den gesamten Bereich von Einzelzellen hin zu großen Modulen bei hinreichender Genauigkeit ab. Aus diesen Gründen wurde in der PTB ein neuartiges, modulares und skalierbares Kalorimeter entwickelt, das die genannten Nachteile vermeiden soll. Insbesondere durch die einfache Konstruktion und die Verwendung kommerzieller Standardkomponenten aus der Computer-Industrie sollten die Kosten so niedrig gehalten werden, dass auch der Verlust eines Kalorimeters aufgrund des Durchgehens eines Akkus hinnehmbar würde.

Das Kalorimeter besteht aus einer Anzahl von Wiederholungseinheiten, die jeweils für sich als Kalorimeter dienen können und aneinandergereiht das Kalorimeter in der gewünschten Größe ergeben.

Abbildung 7 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Kalorimeters und seine Umsetzung. Dieses besteht aus einer Umgebung ②, an die über eine Wärmeleitstrecke R_{th} ④ die Probenaufnahme ③ angeschlossen ist. Probenaufnahme und Umgebung sind mit einem Differenztemperatursensor ① und ggf. mit Heizelementen ⑤ ausgestattet. Nach Kalibrierung kann aus der Temperaturdifferenz der Wärmestrom zwischen Umgebung und Probenaufnahme quantitativ bestimmt werden. Dazu verfügt das Kalorimeter weiterhin im allg. über eine Kalibriereinrichtung und ein Thermometer zur Bestimmung der Absoluttemperatur. Die Temperatur der Umgebung kann

- konstant gehalten werden (R_{th} ist klein und konstant, isotherme Betriebsart),
- der Proben temperatur nachgeführt werden

(R_{th} ist groß, adiabatische Betriebsart) oder

- mit konstanter Geschwindigkeit geändert werden (R_{th} ist endlich und konstant, dynamische Betriebsart).

Das hier beschriebene Kalorimeter besteht aus n Wiederholungseinheiten der Größe $40 \times 40 \text{ mm}^2$ (s. Abbildung 7b). Als isotherme Umgebung dient ein wasserdurchströmter Kühlkörper, in den ein Pt-100-Widerstand als Thermometer eingelassen ist. Ein Peltier-Element dient gleichzeitig als Wärmewiderstand zwischen Probe und Umgebung und Differenztemperatursensor (Nutzung des Seebeck-Effektes). Auf dem Peltier-Element ist eine Heizfolie als Kalibriereinrichtung angebracht, auf die die Probe aufgelegt wird.

In der Praxis besteht das Kalorimeter aus je $\frac{1}{2} n$ Wiederholungseinheiten in 2 Ebenen, zwischen denen sich sandwichartig die Pouch-Zelle als Probe befindet. Dies dient zur Sicherstellung einer homogenen Umgebung, zur Erhöhung der kalorimetrischen Empfindlichkeit und zur Minimierung der Wärmeverluste nach außen.

Als Peripherie werden mindestens ein Thermostat zur Gewährleistung einer konstanten Umgebungstemperatur, ein Digitalvoltmeter mit Scanner zur Erfassung der diversen Spannungen und Widerstände, eine regelbare Stromquelle/-senke zum Laden/Entladen des Akkus sowie ein Rechner zur Steuerung und Datenerfassung benötigt.

Diese Kalorimeter erlauben die Messung des Wärmestromes beim Laden und Entladen bei verschiedenen Temperaturen mit einer Unsicherheit in der Größenordnung von 5 %. Auch die Wärmekapazität der Batteriezellen ist mit geringer Unsicherheit, ca. 2 %, zu bestimmen. Aufgrund ihres Aufbaus aus diskreten Wärmestromsensoren lässt sich die Wärmeproduktion einer Zelle auch orts aufgelöst bestimmen. Dazu wird bei den größeren Kalorimetervarianten jedes Peltierelement mit einem eigenen Analog/Digital-Wandler

ausgerüstet. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Elektrodenanschlüsse besonders wirksame Wärmeleitpfade darstellen.

Abbildung 8 zeigt eine typische Messkurve einer kommerziellen Lithium-Ionen-Pouchzelle mit einer nominellen Kapazität $C_{nom} = 37 \text{ Ah}$, aufgenommen bei $\vartheta = 23 \text{ °C}$ und einem Lade- bzw. Entladestrom $I = \pm 3,7 \text{ A}$.

Neben qualitativen Aussagen über den Spannungs- und Wärmestromverlauf über die Zeit lassen sich quantitative Angaben über die unterschiedlichen Wärmeströme in der Zelle machen. Grundsätzlich lassen sich die in einer Zelle auftretenden Wärmeströme auf vier Ursachen zurückführen [21]:

- elektrische Verluste Q_{irrev}
- Reaktionsenthalpie der elektrochemischen Reaktion $\Delta_{rev}H$, oft auch „reversible Wärme“ oder „Entropieterm“ $\Delta S/T$ genannt (T : Temperatur)
- Mischungsenthalpie $\Delta_{mix}H$
- Reaktionsenthalpie der Nebenreaktionen (Alterungsprozesse) $\Delta_{side}H$

Die Mischungsenthalpie ist klein gegenüber den elektrischen Verlusten und der Reaktionsenthalpie der elektrochemischen Reaktion. Der Umfang der Nebenreaktionen und damit ihre (absoluten) Reaktionsenthalpien sollten ebenfalls klein sein, um eine hohe Zyklenfestigkeit der Zelle zu erreichen. Das hier vorgestellte Kalorimeter ist insbesondere zur Erfassung der ersten beiden Phänomene geeignet.

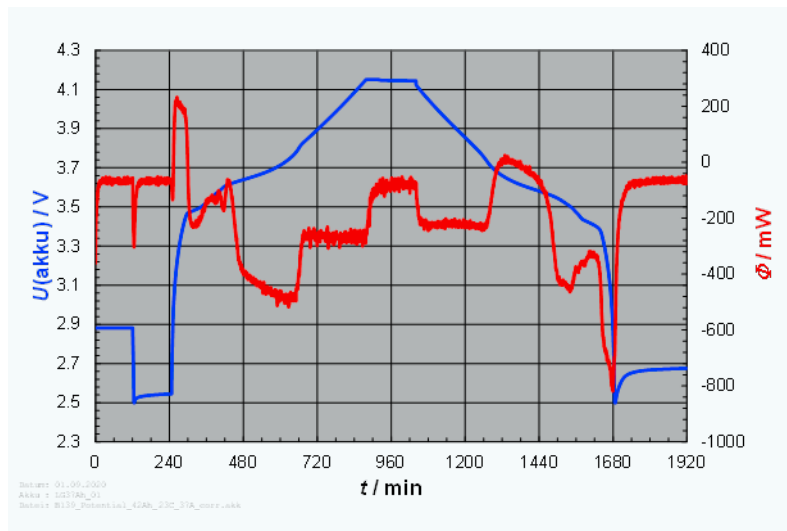
Abbildung 9 zeigt die aus obiger Messung ermittelten Wärmeströme aufgrund Ohm'scher Verluste (Joule'sche Wärme) und aufgrund der elektrochemischen Reaktion. Letztere kehren beim Wechsel von Laden zu Entladen ihr Vorzeichen um, erstere nicht.

Aktuelle Untersuchungen haben das Ziel, den Alterungsprozess einer kommerziellen Batteriezelle, wie sie derzeit im Elektrofahrzeug eingesetzt wird, in Abhängigkeit von der Belastung zu verfolgen und dessen Einfluss auf die Wärmefreisetzung zu quantifizieren. Die Belastung wird dabei durch Aufprägen eines Temperaturgradienten und wiederholtes Laden/Entladen über den gesamten Kapazitätsbereich aufgebracht.

3.3 Alterung von E-Fahrzeug-Batterien in Abhängigkeit von der Temperaturverteilung

Ihre höchste Bedeutung erfahren Lithium-Ionen-Batterien derzeit wohl bei der Verwendung in der E-Mobilität. Hier leistet die Technologie einen immensen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und damit zu den Anstrengungen, den Klimawandel zu stoppen. Neben dem Klimaaspekt ist für E-Fahrzeug-Batterien auch das Thema Langlebigkeit und Alterung von Bedeutung. Aufgrund der begrenzten Ressourcen und der problematischen Bedingungen, unter denen sie abgebaut werden, müssen sie möglichst effizient genutzt werden. Dazu gehört vor allem eine Optimierung der Nutzungsphase. Lithium-Ionen-Batterien erreichen viele äquivalente Ladezyklen, wenn sie bei Raumtemperatur genutzt werden und möglichst geringen Ladehuben ausgesetzt werden. In der Praxis sind diese Bedingungen allerdings nur selten gegeben. Vielmehr müssen E-Autos sowohl im Sommer bei hohen Temperaturen von über 40 °C als auch im Winter bei -20 °C die Nennleistung erbringen. Das Thermomanagementsystem des Fahrzeugs muss dabei akzeptable Temperaturen sowohl für das Batteriesystem als auch in der Fahrgastzelle sicherstellen. Die Alterung von Lithium-Ionen-Batterien bei unterschiedlichen, inhomogenen Temperaturverteilungen wird in AG 3.55 experimentell untersucht. Die Ergebnisse fließen in ein thermodynamisches Modell ein, mit dem die Alterung der Batterie in Abhängigkeit der thermischen Bedingungen hervorgesagt werden kann. Damit das Thermomanagementsystem im Betrieb optimiert so regeln kann, dass die Alterung der Batterie minimal wird, muss diese Vorhersage in Echtzeit auf einem Steuergerät erfolgen. Dazu wird das thermodynamische Modell so reduziert, dass der numerische Aufwand für ein Steuergerät praktikabel ist, die Alterungseigenschaften aber noch mit annehmbarer Genauigkeit abgebildet werden. Hier wird sich der Eigenschaft bedient, dass sich die Systemtrajektorie hochdimensionaler dynamischer Systeme oft nur in einem niederdimensionalen Unterraum bewegt. Durch die Projektion der geltenden Erhaltungsgleichungen in den Unterraum entsteht schließlich ein hybrides Modell für eine

Abbildung 8: Rohsignale des Kalorimeters mit $n = 54$ bei $\vartheta = 23 \text{ °C}$, $C_{nom} = 37 \text{ Ah}$, $I = \pm 3,7 \text{ A}$ vor der Basislinien-subtraktion, Glättung und Entfaltung. Rot: Wärmestromsignal ϕ , blau: Klemmenspannung der Zelle U_{akku} .



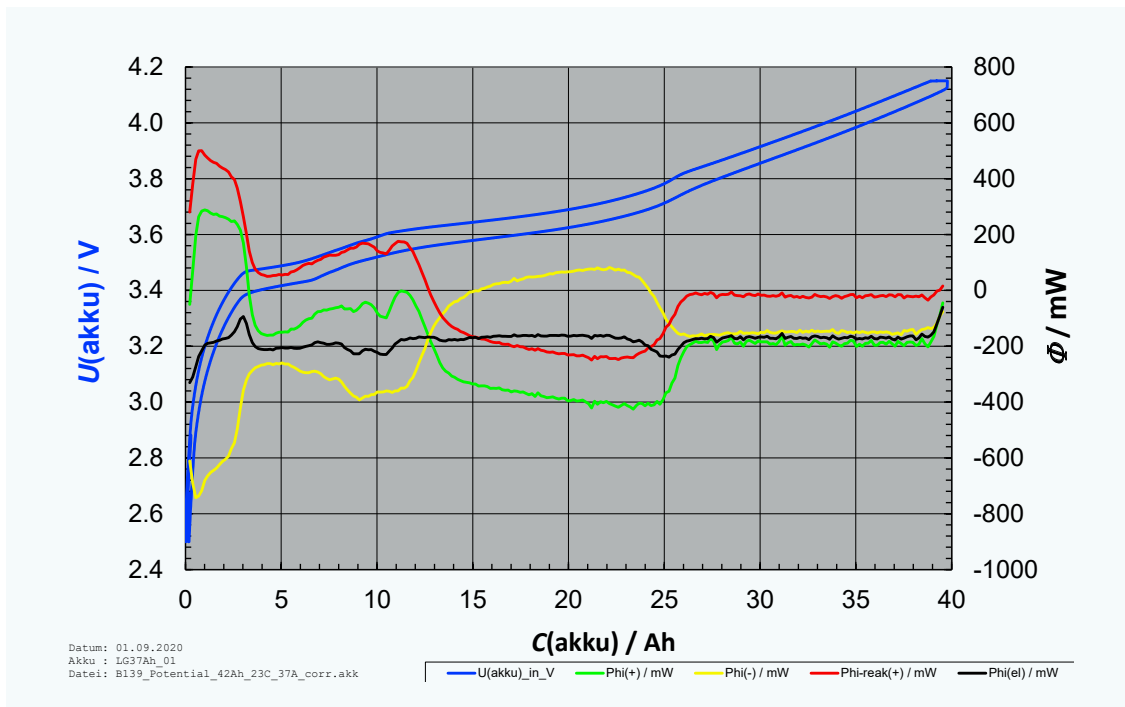


Abbildung 9: Kalorimetrisch ermittelte Wärmeströme beim Laden und Entladen einer Zelle mit $C_{nom} = 37 \text{ Ah}$, $I = \pm 3,7 \text{ A}$, $\vartheta = 23 \text{ °C}$. Blau: Klemmenspannung der Zelle U_{akku} , grün: Gesamtwärmestrom beim Laden ϕ_{tot+} , gelb: Gesamtwärmestrom beim Entladen ϕ_{tot-} , schwarz: Wärmestrom aufgrund Ohm'scher Verluste ϕ_{irrev} , rot: Reaktionswärmestrom der elektrochemischen Reaktion ϕ_{rev} .

kontinuierliche Betrachtung der interessanten Größen.

Die Integration des Batteriesystems in ein Fahrzeug führt zu einem komplexen System bestehend aus zahlreichen Rück- und Querkopplungen. Diese gilt es bereits bei der Auslegung des Batteriesystems und des dazugehörigen Thermomanagementsystems unter realen Betriebs- und Extrembedingungen zu untersuchen. Abbildung 10 zeigt den Aufbau eines modularen Gesamtfahrzeugmodells und deren physikalische Verschaltung. Unter Verwendung solcher Modelle und geeigneter Alterungsmodelle können Betriebsstrategien und Topologien bewertet und optimiert werden. Den Nutzen zeigt beispielhaft Abbildung 11. Dargestellt ist die Performance verschiedener Heizkonzepte bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen im Winter.

3.4 Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in explosionsgeschützten Bereichen

3.4.1 Schutz durch Gehäuse der Zündschutzart „druckfeste Kapselung“

Aufgrund ihrer hohen Energiedichte und der langen Lebensdauer sind Lithium-Ionen-Batterien auch für die Anwendung in explosionsgeschützten Bereichen attraktiv, z. B. für Flurförderzeuge, Elektrowerkzeuge oder Beleuchtungen. Allerdings würde ein thermisches Durchgehen der Batterie in einem explosionsgefährdeten Bereich eine wirksame Zündquelle darstellen und könnte katastrophale Auswirkungen haben. Daher untersucht AG 3.55 in einem Forschungsvorhaben gemeinsam

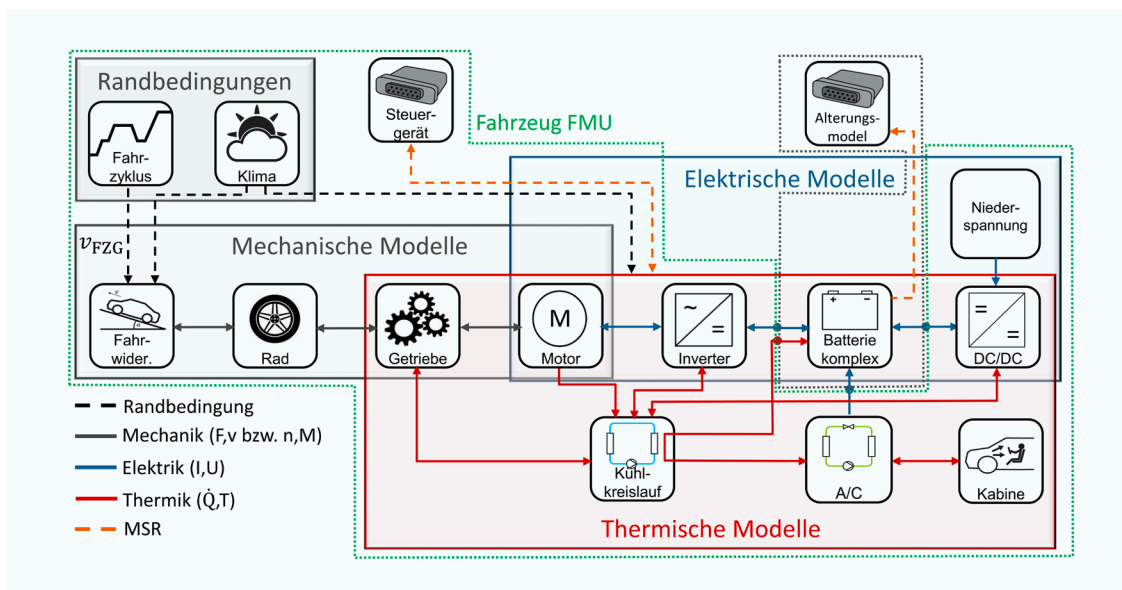


Abbildung 10: Modularer Aufbau eines Gesamtfahrzeugmodells eines batterieelektrischen Fahrzeuges.

Abbildung 11: Alterung/SOH-Verlust (oben) und Restreichweite (unten) für eine Fahrt von Braunschweig nach Wolfsburg und zurück bei definierten Winterfällen und Heizkonzepten. Ungeheizt: Kein Heizkonzept, Bypass: Heizung durch Bypass aus Leistungselektronikkreislauf, Extern: Wärmepumpe, Intern: Selbstheizende Strukturen in den Batteriezellen, Kombination: Wärmepumpe und selbstheizende Strukturen in Batteriezellen, Standard: Hochvoltheizer.



mit einem Hersteller von explosionsgeschützten Geräten den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien für explosionsgeschützte Bereiche in Gehäusen der Zündschutzart „druckfeste Kapselung“. Im Rahmen der Untersuchungen werden zunächst die maximal auftretenden Drücke und Temperaturen im Falle einer durchgehenden Batterie bestimmt. Auf dieser Basis werden Richtlinien für die Konstruktion druckfester Gehäuse erarbeitet, die den Bedingungen standhalten sollen. Die Zulassung derartiger Gehäuse erfordert Prüfungen nach der Normenreihe EN IEC 60079-0 ff., die nach Möglichkeit nicht mit tatsächlich durchgehenden Batterien durchgeführt werden sollen. Daher ist ein wesentlicher Teil des Projekts, eine alternative Zulassungsprüfung auf Basis einer Gasexplosion zu entwickeln, die vergleichbare Ergebnisse liefert. Somit wären viele Labore weltweit in der Lage, entsprechende Gehäuse für den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien zu zertifizieren.

3.4.2 Medizinprodukte in explosionsgeschützten Bereichen

Innerhalb explosionsgefährdeter Bereiche sind wirksame Zündquellen zu vermeiden, wenn das Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre nicht sicher verhindert werden kann. Hier können beispielsweise heiße Oberflächen, elektrische Funken oder mechanische Schlag- und Reibfunken eine wirksame Zündquelle für eine explosionsfähige Atmosphäre darstellen. Um diese zu vermeiden, dürfen nur Produkte einer entspre-

chenden Kategorie gemäß geltender europäischer Richtlinie [22] in explosionsgefährdeten Bereichen (Ex-Bereich) eingesetzt werden. Medizinprodukte sind jedoch vom Geltungsbereich dieser gesetzlichen Vorgabe ausgenommen und werden in explosionsgeschützter Ausführung nicht angeboten. Die Bedienung dieser Marktnische ist aufgrund geringer Stückzahlen für Hersteller wirtschaftlich nicht interessant.

Für betroffene Personen ist das Tragen von Medizinprodukten in Ex-Bereichen jedoch teilweise zwingend erforderlich, um Tätigkeiten ausführen zu können. Dies betrifft z. B. Geräte zur Aufrechterhaltung des Hörsinns (Hörgeräte), des Herz-Kreislauf-Systems (Herzschrittmacher) oder des Blutzuckerspiegels (Insulinpumpe).

Im Falle medizinischer Produkte obliegt die Beurteilung, ob der Betrieb von medizinischen Geräten innerhalb explosionsgefährdeter Bereiche eine wirksame Zündquelle darstellt, dem Arbeitgeber. Für die Problemstellung sind bisher keine aktuellen Handlungshilfen veröffentlicht, und aufgrund mangelnder Kenntnis des konstruktiven Aufbaus von Produkten des medizinischen Bereiches kann die sicherheitstechnische Bewertung insbesondere bei der u. U. notwendigen Berücksichtigung von Gerätefehlern und Funktionsstörungen eine Herausforderung darstellen.

Einen Schwerpunkt bei der Bewertung stellen dabei die eingesetzten elektrochemischen Energiespeicher dar. Für die elektrische Versorgung von beispielsweise Hörgeräten und Insulinpumpen werden bereits wiederaufladbare Lithium-Ionen-

Batterien eingesetzt. Sie bieten gegenüber anderen Batterietypen Vorteile wie z. B. hohe Energiedichte und zyklische Lebensdauer. Zellen und Batterien auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie können jedoch bei verschiedenen Fehlerszenarien (thermisch, elektrisch, mechanisch) zu unkontrollierbaren exothermen Reaktionen neigen [23–25], die im Ex-Bereich eine wirksamen Zündquelle darstellen und verhindert werden müssen.

In Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BGRCI) werden spezifische Medizingeräte untersucht. Die Ergebnisse sollen Betreiber bei ihrer Risikobeurteilung unterstützen. Nach Möglichkeit sollen Bedingungen erarbeitet werden, unter denen Träger von medizinischen Geräten im Ex-Bereich tätig sein dürfen.

4. Zusammenfassung

Elektrochemische Speicher werden auch in der Zukunft eine große Rolle beim Umbau des Energie- und des Mobilitätssektors spielen. Aufgrund ihrer Eigenschaften bleiben Lithium-Ionen-Batterien für viele Anwendungen interessant. Die Herausforderungen für die Metrologie liegen in einer schnellen und genauen Bestimmung der Zustände (Gesundheitszustand SOH, Ladezustand SOC, Sicherheitszustand SOS) von Zellen, Modulen und Packs, wobei die Komplexität immer weiter zunimmt. Für Batteriezellen wurde die SOH-Bestimmung unter Laborbedingungen in mehreren Projekten bereits erfolgreich gezeigt. Auch die vergleichende Beurteilung von Modulen wurde demonstriert. Allerdings müssen die Methoden robuster werden und mit den tatsächlich ablaufenden chemischen und physikalischen Prozessen hinterlegt werden. Dabei geht es um die Charakterisierung im Betrieb, z. B. in einem E-Auto, aber auch um die Bewertung von Batterien am Ende des ersten Lebenszyklus. Die Alterung von Lithium-Ionen-Batterien ist von den Betriebsbedingungen, insbesondere der Temperatur abhängig. In der E-Mobilität kann durch eine entsprechendes Thermomanagement die Alterung minimiert und die Reichweite erhöht werden. Damit dies im Betrieb erreicht werden kann, müssen die thermodynamischen und Alterungsmodelle auf ein Maß reduziert werden, das von einem Steuergerät verarbeitet werden kann.

Ein besonderer Fokus liegt bei den Arbeiten der PTB auf dem Thema Sicherheit. Fehlerzustände müssen frühzeitig erkannt und gemeldet werden, damit entsprechende Maßnahmen ergriffen werden können. Neben den elektrischen und elektrochemischen Messmethoden liefert die Kalorimetrie wichtige Werkzeuge, die ein Verständnis der ablaufenden Prozesse und ihre Vorhersage ermöglichen. Die gemessenen Wärmemengen sind dabei für das Verhalten der Batterie unter den ein-

gestellten Betriebsbedingungen eine viel aussagekräftigere Größe als die Temperatur selbst.

Für die Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien in explosionsgeschützten Bereichen ist die Kenntnis des thermischen Verhaltens noch wichtiger, da hier drastische Folgen drohen. Die Auswirkungen des thermischen Durchgehens von Batterien hinsichtlich der erreichten Drücke und Temperaturen werden daher analysiert. Darauf aufbauend werden Schutzkonzepte entwickelt.

Literatur

- [1] Europäische Kommission, Der europäische grüne Deal, COM (2019) 640.
- [2] Europäische Kommission, Europa in Bewegung: Nachhaltige Mobilität für Europa: sicher, vernetzt und umweltfreundlich, COM (2018) 293.
- [3] European Commission, Proposal for a regulation of the European parliament and of the council amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition, COM (2021).
- [4] European Commission, Draft standardisation request to the European standardisation organisations as regards performance, safety and sustainability requirements for batteries, 2020.
- [5] European Commission, Proposal for a regulation of the European parliament and of the council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, COM (2020) 798.
- [6] Europäische Kommission, Aufbau einer strategischen Wertschöpfungskette für Batterien, COM (2019) 176.
- [7] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Technologisch souverän die Zukunft gestalten: BMBF-Impulspapier zur technologischen Souveränität, 2021.
- [8] K. Edström, R. Dominko, M. Fichtner, S. Perraud, Battery 2030+ Roadmap, Uppsala University, 2020.
- [9] M.A. Danzer, V. Liebau, F. Maglia, Aging of lithium-ion batteries for electric vehicles, in: *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, Elsevier, 2015, S. 359–387.
- [10] S. Fischhaber, A. Regett, S.F. Schuster, H. Hesse, Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen: Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen, 2016.
- [11] N. Meddings, M. Heinrich, F. Overney, J.-S. Lee, V. Ruiz, E. Napolitano, S. Seitz, G. Hinds, R. Raccichini, M. Gaberšček, J. Park, Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review, *Journal of Power Sources* 480 (2020) 228742. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228742>.

- [12] W. Waag, C. Fleischer, D.U. Sauer, Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles, *Journal of Power Sources* 258 (2014) 321–339. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.02.064>.
- [13] <https://www.ptb.de/empir2018/de/libforsecuse/home/>.
- [14] D. Kehl, T. Jennert, F. Lienesch, M. Kurrat, Electrical Characterization of Li-Ion Battery Modules for Second-Life Applications, *Batteries* 7 (2021) 32. <https://doi.org/10.3390/batteries7020032>.
- [15] C. Zech, P. Hönicke, Y. Kayser, S. Risse, O. Grätz, M. Stamm, B. Beckhoff, Polysulfide driven degradation in lithium–sulfur batteries during cycling – quantitative and high time-resolution operando X-ray absorption study for dissolved polysulfides probed at both electrode sides, *J. Mater. Chem. A* 9 (2021) 10231–10239. <https://doi.org/10.1039/D0TA12011A>.
- [16] C. Zech, M. Evertz, M. Börner, Y. Kayser, P. Hönicke, M. Winter, S. Nowak, B. Beckhoff, Quantitative manganese dissolution investigation in lithium-ion batteries by means of X-ray spectrometry techniques, *J. Anal. At. Spectrom.* 36 (2021) 2056–2062. <https://doi.org/10.1039/D0JA00491J>.
- [17] S. Madani, E. Schaltz, S. Knudsen Kær, Heat Loss Measurement of Lithium Titanate Oxide Batteries under Fast Charging Conditions by Employing Isothermal Calorimeter, *Batteries* 4 (2018) 59. <https://doi.org/10.3390/batteries4040059>.
- [18] L.E. Downie, J.R. Dahn, Determination of the Voltage Dependence of Parasitic Heat Flow in Lithium Ion Cells Using Isothermal Microcalorimetry, *J. Electrochem. Soc.* 161 (2014) A1782–A1787. <https://doi.org/10.1149/2.0301412jes>.
- [19] S.M. Sarge, Ein skalierbares Kalorimeter für die Bestimmung thermodynamischer, kinetischer und sicherheitstechnischer Kenngrößen elektrochemischer Energiespeicher, in: „Würzburger Tage 2019. Innovative Materialcharakterisierung in Forschung & Technik“, Hrsg.: W. Künze, Eschborn: TA-Instruments
- [20] S.M. Sarge, G.W.H. Höhne, W. Hemminger, *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim, 2014.
- [21] D. Bernardi, E. Pawlikowski, J. Newman, A General Energy Balance for Battery Systems, *J. Electrochem. Soc.* 132 (1985) 5–12. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>.
- [22] Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung).
- [23] F. Larsson, B.-E. Mellander, Abuse by External Heating, Overcharge and Short Circuiting of Commercial Lithium-Ion Battery Cells, *J. Electrochem. Soc.* 161 (2014) A1611–A1617. <https://doi.org/10.1149/2.0311410jes>.
- [24] J.C. Hewson, S.P. Domino, Thermal runaway of lithium-ion batteries and hazards of abnormal thermal environments, in: 9th US National Combustion Meeting, Cincinnati, Ohio, 2015.
- [25] C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White, R.T. Long, *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment: Final Report*, 2011.

Renewable and alternative fuels for a future energy system

Sumit Agarwal¹, Bert Anders², Stefan Essmann³, Ravi Fernandes⁴, Holger Grosshans⁵, Detlev Markus⁶, Kai Moshhammer⁷, Solmaz Nadiri⁸, Bo Shu⁹

1. Introduction

The Paris Climate Agreement of 2015 specifies a global framework to combat climate change. Global warming is to be kept well below 2 °C; the temperature rise is to be limited to 1.5 °C through further measures. The nearly 190 parties to the Paris Agreement include the EU and its member states. In June 2021, Germany raised its climate targets and adopted binding emissions targets for the years up to 2045 – instead of 2050 as previously planned. To achieve these climate targets, a significant reduction in CO₂ emissions is necessary. Much has already been achieved in the energy sector as a result of the decarbonization of power generation through greater expansion of capacities for renewable primary energy sources and the accelerated phase-out of coal-fired power generation. Thus, in contrast to the heat supply, mobility or industry sectors, the energy sector is making a disproportionate contribution to the reduction of greenhouse gas emissions to date. To achieve this in the other sectors as well, a further increase in the share of renewable primary energy sources and the integration of the sectors are required. For storage and transport of the electrical power generated by energy conversion, various utilization paths within the different sectors are possible, taking advantage of the existing electricity and gas grids. The necessary coupling of the sectors can be achieved by various technologies, whereby the conversion of electrical energy to hydrogen will be of particular importance in the future. On the one hand, surplus primary energy can thus be stored in the medium and long term. Furthermore, hydrogen offers various utilization paths. Hydrogen can be distributed as an admixture via the existing gas infrastructure and stored in salt caverns. The direct use of hydrogen in the industrial sector can help achieve climate targets, particularly

in the steel, cement, and chemical industry. However, hydrogen can also be used in fuel cells, combustion engines or gas turbines in mobility as well as in small or large cogeneration plants. The Sabatier process also enables the methanation of CO₂ by hydrogen. The methane obtained in this way can be used directly or further processed into liquid fuels. These so-called electro fuels or e-fuels can thus be used in a carbon-neutral manner like the conventional biofuels, which can be produced from biomass as a regenerative source.

At PTB, many departments are dealing with the metrological and safety-related issues a changeover to a hydrogen economy raises. Departments 3.3 and 3.5 focus on the application of hydrogen, hydrogen-based energy carriers and biofuels in mobility. The study of ignition and combustion of these fuels aims to provide a deeper understanding of the interaction of the turbulent flow with the chemical reactions. In addition, the most important physico-chemical properties of regenerative energy carriers as well as the necessary purity requirements of hydrogen for operation with fuel cells are determined. Moreover, the combustion properties of liquefied natural gas (LNG) are being studied. The following sections review our recent research activities.

2. Biofuels

The worldwide demand to increase the bio-content of fuels poses severe challenges to the engines of vehicles currently on road, which were designed for fossil fuel only. Due to its vast availability, biodiesel based on vegetable sources, like Indian-origin Karanja and Jatropha oils, is an attractive renewable and carbon neutral replacement to fossil fuels. In fact, biodiesel is a multi-component mixture of long chain mono-alkyl esters of fatty acids. Thus, the performance and emission characteristics of biofuels used

¹ Dr.-Ing. Sumit Agarwal, Arbeitsgruppe 3.34 Reaktionskinetik, E-Mail: sumit.agarwal.ext@ptb.de

² Dr. Bert Anders, Arbeitsgruppe 3.31 Brenngasanalytik, E-Mail: bert.anders@ptb.de

³ Dr.-Ing. Stefan Essmann, Arbeitsgruppe 3.55 Regenerative Energieträger und -speicher, E-Mail: stefan.essmann@ptb.de

⁴ Prof. Dr. Ravi Fernandes, Fachbereich 3.3 Physikalische Chemie, E-Mail: ravi.fernandes@ptb.de

⁵ Dr. Holger Grosshans, Arbeitsgruppe 3.51 Analyse und Simulation im Explosionsschutz, E-Mail: holger.grosshans@ptb.de

⁶ Dr.-Ing. Detlev Markus, Fachbereich 3.5 Explosionsschutz in der Energietechnik, E-Mail: detlev.markus@ptb.de

⁷ Dr. Kai Moshhammer, Arbeitsgruppe 3.32 Flüssigkeitseigenschaften, E-Mail: kai.moshhammer@ptb.de

⁸ Solmaz Nadiri, Arbeitsgruppe 3.34 Reaktionskinetik, E-Mail: solmaz.nadiri@ptb.de

⁹ Dr. Bo Shu, Arbeitsgruppe 3.34 Reaktionskinetik, E-Mail: bo.shu@ptb.de

in existing engines is less optimized compared to conventional fuels. These discrepancies are probably due to biodiesel being produced from different vegetable oil feedstocks and, therefore, the lack of understanding of the role of the biodiesel molecular structure and composition on its atomization and combustion kinetics. Also, corresponding modeling studies are very limited. The research project BioCFD explored the production, characterization, chemical kinetic modeling, and applications of Jatropha and Karanja biodiesel fuels in a typical automotive engine operated under conventional high-temperature combustion conditions as well as in advanced low-temperature combustion. For this project, we formed a research consortium consisting of partners from India (Indian Institute of Technology Madras, Goa University) and Europe (University of Helsinki, Université catholique de Louvain, Physikalisch-Technische Bundesanstalt). In this project, which began in 2017 and concludes in 2021, biodiesel was produced from non-edible oils of Indian origin, namely Karanja and Jatropha by using the transesterification process. The fuels were optimized and characterized in terms of their composition and engine fuel-related properties. Experiments on reaction kinetics were performed by PTB and the experimental data could reveal a better understanding of the low-temperature combustion chemistry. Taking these data for model validation, a detailed reaction mechanism was developed. The reduction of this mechanism together with accurate determination of the thermophysical biodiesel properties, i.e., the viscosity, density, calorific value, and vapor pressure, served as a basis for the development of our CFD tool. Also, we improved the numerical

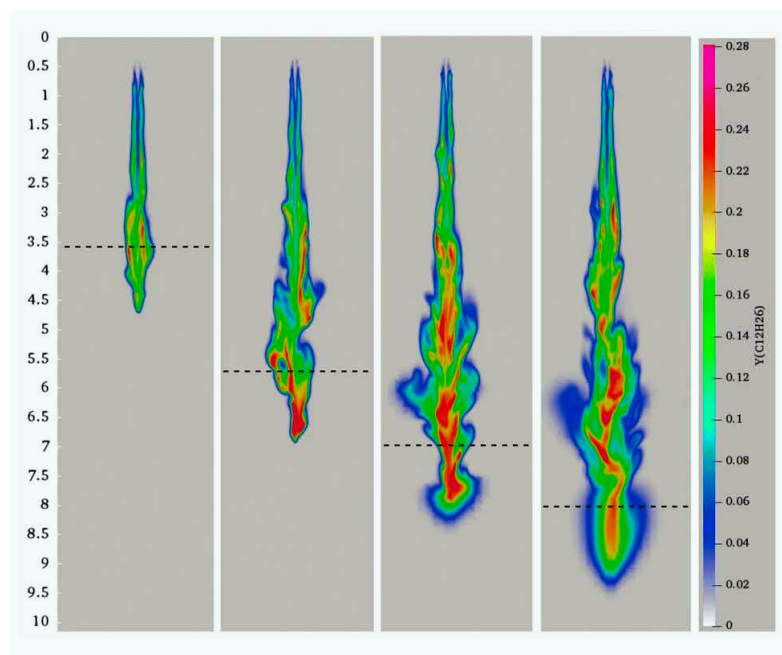
modeling of the break-up of fuel droplets. Such a model is of importance for engine simulations since the liquid fuel first breaks up and then evaporates and reacts with the surrounding air. Figure 1 depicts the fuel vapor field close to the injection nozzle predicted by our simulations. This CFD tool can be used in engine and fuel design toward higher efficiencies and lower emissions.

Biomass is of great importance in biofuel usage and can be produced through contemporary biological processes. However, so far, the use of biomass as a surrogate for fossil fuels in power plants has mainly been carried out by modifying coal-fired combustion plants but without taking the nature or quality of biofuel into consideration. This missing information is important as a traceable material analysis would support the optimization of biofuel combustion with respect to higher efficiencies and lower emissions and also enable fair accounting or taxation based on their energy content. Long-term reliability and global comparability of analytical data must be guaranteed, and complete knowledge of the traceability chain is required to enable the establishment of traceability to the International System of Units (SI) for online measurement results from liquid and solid biofuel analyses.

These challenges are addressed in the EMPIR project BIOFMET, which started in summer 2020 with a term of three years and involves multiple European partners from different NMIs, academia and industries. One goal of this project is the optimization of energy production based on solid and liquid biofuels through a faster and more accurate determination of key biofuel parameters. In this context, it explores more precise metrological methods and the development of advanced traceable measurement standards for the determination of the energy content, impurities, and ash content as well as the development of new moisture transfer standards, calibration systems and reference materials.

Department 3.3 considers the metrological framework conditions for energy content measurements by means of bomb calorimetry to ensure traceability of newly developed methods for energy content measurements in the field. Specifically, this involves the measurements of the calorific values of different types of solid (high- and low-quality wood chips, wood pellets) and liquid biofuels (bioethanol and biodiesel), which are compared in an interlaboratory comparison with other National Metrology Institutes. Besides, a detailed uncertainty budget for bomb calorimetry is developed that takes into account the instrumental uncertainties but also the biofuel related challenges like the inhomogeneities of the samples through for example, different wood origins.

Figure 1: Fuel vapor mass fraction near the injection point, computed via the TAB model, at times $t=0.02, 0.05, 0.075$ and 0.1 ms. The horizontal dashed line shows the location of the liquid penetration distance (reprinted with permission [1])



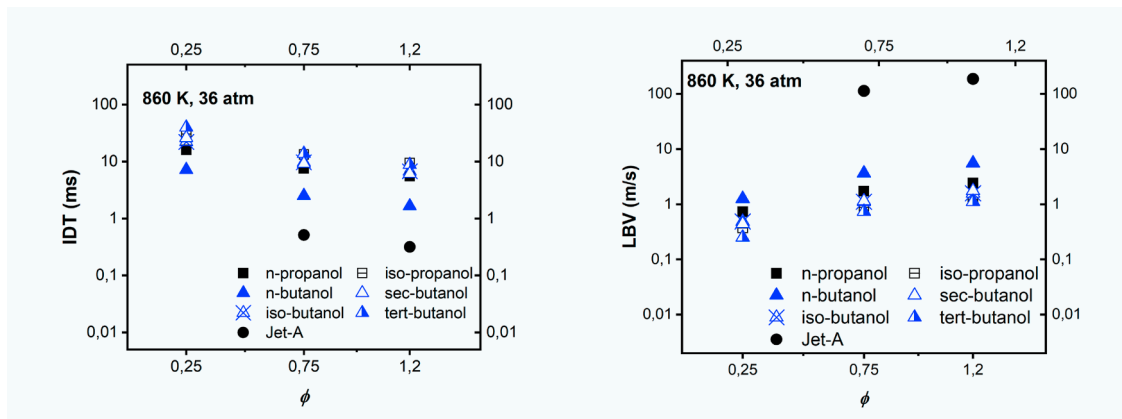


Figure 2: Model prediction for A) IDT and B) LBV of the propanol and butanol isomers, and the Jet-A surrogate at 860 K, 36 atm and equivalence ratios of 0.25, 0.75 and 1.2 (reprinted with permission [2])

3. Electrofuels

The globally stringent carbon dioxide (CO_2) emissions regulation has led to the investigations, development, and establishment of new energy conversion concepts and carbon-free alternative fuels for future mobility systems. Although the light-duty vehicles for road transportation have a trend to be fully electrified, the heavy-duty road transportation, marine, and aviation applications will continue to rely on the propulsion concepts via combustion. The high demand and development in the mobility sector showed an exponential increase of commercial transport by approx. 4 to 5% per year in the last six decades. Considering only the air transportation sector, this increased potential will result in a worldwide fleet of approx. 43,000 aircraft by 2028, which is double the current scenario. The most problematic issue, along with the increasing demand on mobility, is the carbon footprint. There have been continued efforts to reduce the total CO_2 emissions by developing new combustion technologies and improving the efficiency of the combustors. However, considering an improvement of 20% in system efficiency for new generations of cars, ships, and aircraft, still more CO_2 emissions will be produced in 2050 than today.

One promising path for carbon footprint reduction and sustainable mobility is expected to be based on the utilization of synthetic fuels (e-fuels), which are produced from renewable sources such as wind and solar through green hydrogen from water electrolysis and CO_2 from emission points and are therefore CO_2 neutral. One way to achieve carbon neutrality is to synthesize e-fuels having similar properties to the current fuels like kerosene, where the combustion properties are very close to the current ones, and CO_2 neutrality is assured from the fuel production step. An alternative is to produce fuels with selected molecular structures that result in totally different combustion properties such as pre-ignition and knock tendency as well as different physical properties like boiling point and viscosity.

These synthetic fuels are also called tailor-made e-fuels as they have specified target properties. For the purpose of soot and NO_x reduction, the lean prevaporized premixed (LPP) burner concept has been proposed, as prevaporization of liquid fuels and premixing with the combustion air allow to prevent any soot formation, and for lean mixtures it reduces the combustion temperature that leads to significant reduction of NO_x emissions.

The project ‘Synthetic Fuel Combustion for Aviation Applications’ of Department 3.3 is a sub-project within the DFG funded Cluster of Excellence ‘Sustainable and Energy-Efficient Aviation (SE²A)’, a collaborative project with Technical University of Braunschweig, Leibniz University of Hannover, German Aerospace Center, and Braunschweig University of Art. In this project, fundamental studies have been carried out to explore the combustion properties of the selected E-fuels, namely, alcohols and furans combined with the LPP concept for aviation applications. The ignition delay, flame propagation, and emission potential of those fuels has been experimentally and numerically investigated (Figure 2). Comprehensive chemical kinetics mechanisms have been developed for predicting the performance of the E-fuels in aviation engines that is crucial for the development of advanced propulsion technology.

Out of the conventional hydrocarbon fuels, nitrogen-based fuels such as ammonia have attracted increasing interest of the energy and transport sectors due to its non-carbon nature. On one hand, ammonia is the most heavily chemical produced on the planet, the infrastructure for its storage and transportation has been well established; on the other hand, the energy density of ammonia is comparable to the favorable alcohol methanol. Moreover, ammonia can be synthesized directly from wet air applying renewable energy sources as well. Therefore, a number of studies have been conducted to study the potential of ammonia as fuel. Department 3.3 is part of the research line ‘Mobilise’, a collaboration project between the Technical University of Braunschweig

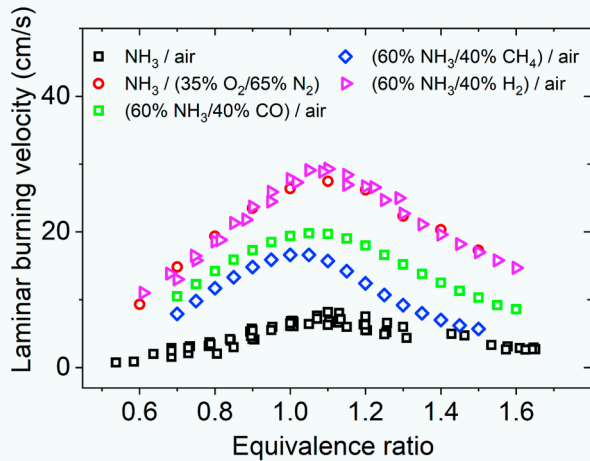
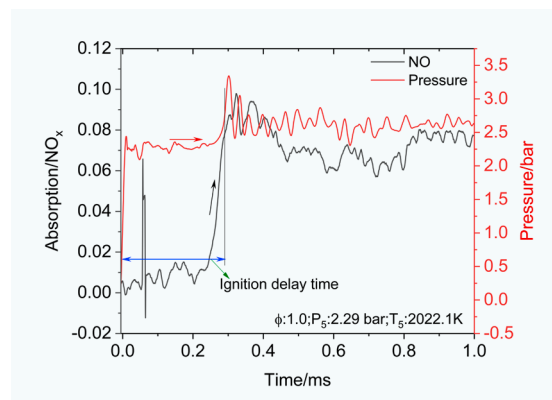


Figure 3: Summary of the laminar burning velocity of mixtures containing ammonia (reprinted with permission [3])

and Leibniz University of Hannover. In the research area ‘Energy Transformation in Aviation’ within ‘Mobilise’, Department 3.3 focuses on research concerning the application of ammonia in heavy-duty transport and aviation. The combustion chemistry of neat ammonia and ammonia-fuel mixtures such as ammonia-hydrogen and ammonia-methane have been systematically investigated for various propulsion scenarios (Figure 3). Detailed chemistry of ammonia combustion has been explored and understood. The co-firing concept for ammonia combustion has been proposed, the emission of pollutants has been carefully analyzed. In addition, under the project with the AvH foundation, it is proposed to profoundly investigate the potential of ammonia as an energy source, unravel the underlying chemical mechanisms for high temperature ignition, and determine the reaction rates of crucial elementary reactions using the shock tube technique, coupled with in-situ time-resolved measurements. A few preliminary studies have been attempted where the real-time measurement of NO_x was carried out using the Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) technique. The detection of NO_x species was measured for the first time (Figure 4). Those scientific findings are essential for the technical application of ammonia as a future fuel for marine and aviation applications.

Figure 4: Typical pressure and NO signal captured during the oxidation of ammonia in shock tube at equivalence ratio 1.0.



4. LNG

Liquified natural gas (LNG) has become an important energy resource worldwide. Its use as an alternative, clean and environmentally friendly fuel in the transport sector, especially in the heavy-duty sector and for transport ships, is becoming increasingly popular. Since the development of LNG as a transport fuel is clearly gaining momentum, commonly agreed measurement strategies and a metrological framework need to be created. However, depending on the origin, the chemical composition of LNG, its chemical and physical properties as well as its energy content might vary and provide challenges for many measurement techniques. The roll-out of LNG requires traceable reference methods and standards that regulate the physical and chemical measurements to accurately define LNG mixtures and their related properties as well as to enable measurement methods to be setup in the field. From 2010 until 2020, these challenges were processed in the three EMRP/EMPIR research projects LNG, LNG2 and LNG3 and involved scientists from different European National Metrology Institutes, universities, and industries.

In addition to calculations and uncertainty considerations on the calorific value and the enthalpy of LNG, Department 3.3 dealt with the issue of the knock resistance of LNG in gas engines. Knocking in engines is a phenomenon that is caused when part of the fuel spontaneously ignites ahead of the flame front and burns in an uncontrolled manner, leading to severe damage of the engine. Therefore, in order to operate an engine in the most efficient way, it should be run as close as possible to its knocking point. Typically, the knocking properties of gases are characterized by the so-called methane number (MN). It is defined by the methane content in a gas mixture of methane and hydrogen which then serves as a reference system when determining the knocking propensity of a gaseous fuel (similar to *n*-heptane and iso-octane for the well-known octane number for gasoline). The methane number was originally defined by the Anstalt für Verbrennungsmotoren Prof. List (AVL) in 1971 as part of a large experimental research project [4, 5]. The measured values were found to be dependent on the test engine, the operating conditions and more importantly on the fuel composition. Unfortunately, the equipment used by AVL is no longer available, thus “the” MN cannot longer be measured according to the original definition. Since the MN must be accurately known, a variety of algorithms have been developed to predict the methane number based on the gas composition partially taking the original measured data from AVL into consideration. However, these algorithms

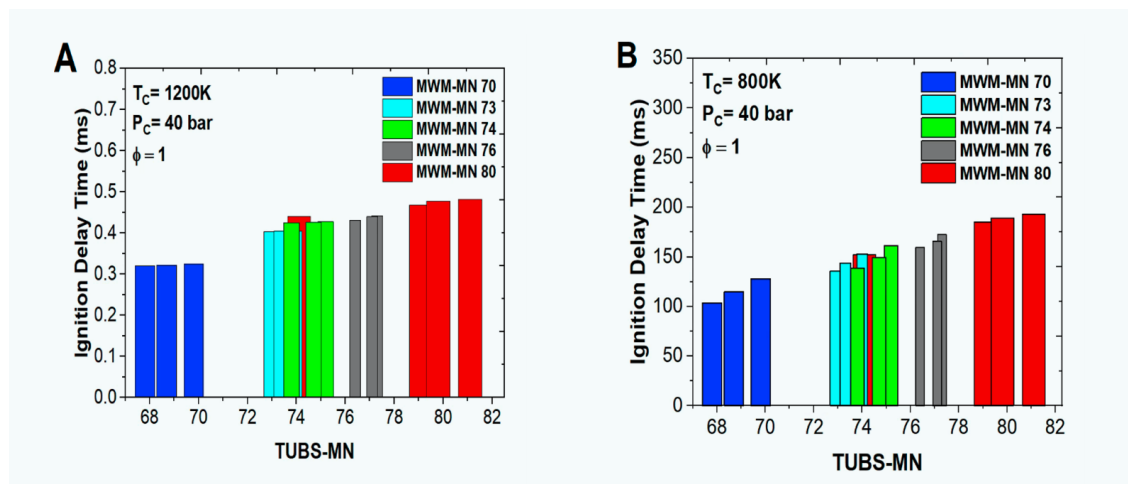


Figure 5: Correlation between IDTs and MNs from MWM and TUBS algorithm of LNG mixtures at 40 bar, $\phi = 1$ and **A)**1200 K, **B)**800 K (reprinted with permission [9]).

can deliver considerably different results. Currently, a calculation method is included into Annex 2 of DIN EN 16726, but an international ISO standard does not exist for the calculation of the MN and previous experimental work does not adequately cover LNG mixtures as they contain higher levels of hydrocarbons which can have disproportionally large effects on the MN.

Newer approaches try to calculate the methane number on the basis of simulations of the auto-ignition process with the help of chemical computer models [6]. The reason behind is that the composition of the LNG mixtures has a direct effect on the chemical reactions that take place during ignition and thus significantly determines the knocking properties.

In this context, the shock tube and rapid compression machine facilities in Department 3.3 were used to measure ignition-delay times (the time between the heating of the fuel by compression and starting chemical pre-reactions up to spontaneous ignition) of several different LNG mixtures with varying composition for characterizing their ignition properties [7, 8, 9]. The experimental setups designed and optimized over several years allowed measurements close to engine conditions, i. e., with temperatures ranging from 700 K up to 1500 K and for pressures up to 40 bar. The obtained data (Figure 5) were finally used to successfully develop a predictive chemical kinetic mechanism that is validated for LNG fuels up to C5 components and can be used for 0D engine simulations [9].

5. Hydrogen Quality and Utilization

As a carrier of renewable energy, hydrogen is a key element of the energy transition, linking the areas of electricity, heat, transport, and industry. It can be used pure or in a mixture with natural gas in households and industry for heating and in mobility as a fuel. Especially the feed-in of regeneratively produced hydrogen for example

from power-to-gas plants, into the existing natural gas networks seems attractive since the existing infrastructure can continue to be used. The gas grids can thus act as a huge clean energy storage.

However, gas quality measurement is required by law in Germany to achieve a fair billing of the amount of energy supplied. While typical natural gases have calorific values of 8 to 14 kWh/m³, the calorific value of hydrogen is significantly lower at 3.5 kWh/m³. According to current regulations, admixtures to natural gases of up to 10 % hydrogen are possible if no special infrastructure, for example natural gas filling stations, is affected. In the future, also 20 % is targeted, even 30 % seems possible in German gas grids.

The latest approved process gas chromatographs (PGC) can already analyze these mole fractions and calculate the calorific values. PTB has proven the correctness of this technology for the PTB conformity assessment body and, in cooperation with the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), provides traceable calibration and test gases for the operation of these devices. Figure 6 shows the analysis of a hydrogen-enriched natural gas.

Figure 6: Separation of hydrogen-enriched natural gas with a 3-channel GC analyzer

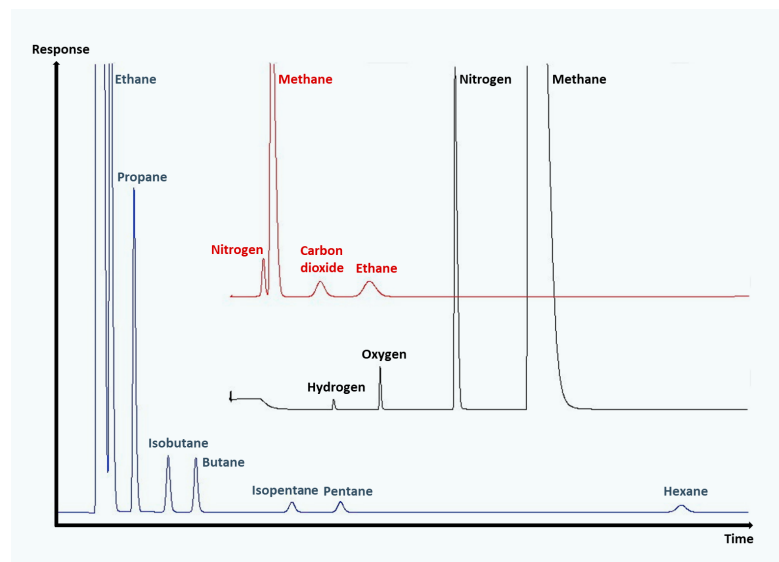
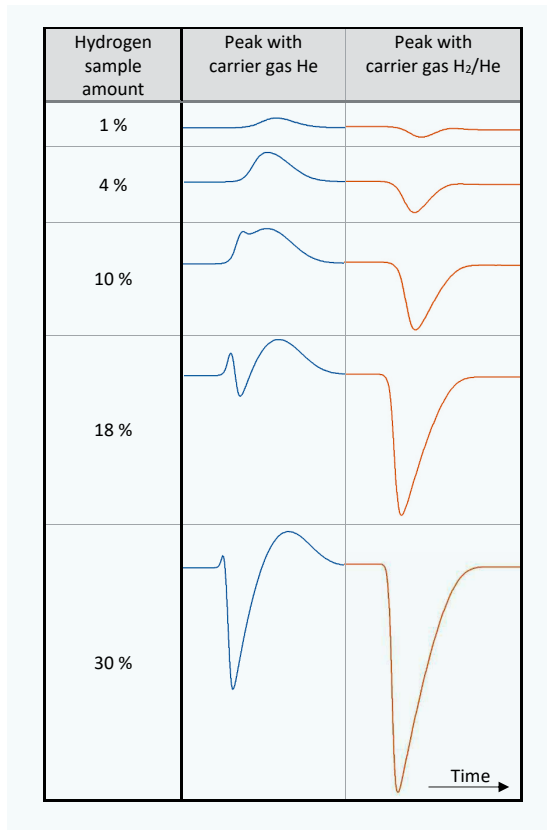


Figure 7:
Comparison of the
hydrogen signals
of the PGC with
helium and H_2 / He
carrier gas



For the measurement of hydrogen content of more than 5 %, it is currently necessary to use a second carrier gas in addition to the standard gas helium. The reason for this is the abnormal behavior of hydrogen-helium mixtures at the thermal conductivity detector, which is used in all gas quality measuring devices in the field. Figure 7 shows the increasing signal deformation when measuring more than 5 % hydrogen. The integration of these signals provides no longer a calibratable relationship between the signal area and the amount of substance.

By using argon or nitrogen as a carrier gas for hydrogen measurement, this effect can be avoided. But no sufficient sensitivity for the other natural gas components will be achieved. Therefore, used PGC require two carrier gases, which means considerable additional effort in the measuring stations. Often, there is simply no space in the gas transfer stations for a second gas supply. PTB is looking for alternative solutions to measure higher hydrogen contents of more than 5 % with just one carrier gas. For example, it has been shown that a conventional PGC can measure up to 30 % hydrogen in natural gas with a carrier gas mixture of 10 % hydrogen in helium. Figure 7 shows the negative signal which, however, increases steadily with the hydrogen content.

This modification of the carrier gas ensures that the natural gas components can be detected well. Only the sensitivity to hydrogen is slightly lower. Nevertheless, hydrogen mole fractions can be

quantified up to the maximum permissible error limit of 0.2% in Germany without any problems. The limit of quantification has not yet been determined. However, further investigations have shown that the PGC then must be calibrated with a polynomial 3rd order. The further development of this GC application and the improvement of the linearity is subject of research activities in the EMPIR project “Metrology for decarbonising the gas grid”, started in summer 2021 and involving several European partners from different NMIs and the gas industry.

If hydrogen cannot be obtained via gas grids especially for mobility purpose, its low energy density by volume is a challenge. It must be stored either as a fuel under very high pressure (up to 700 bar) or as liquid hydrogen at very low temperature (< -252 °C) to be sufficiently efficient as a fuel. In addition, it has a very low minimum ignition energy, so that corresponding systems must be designed in terms of safety in order that, for example, even untrained persons can safely handle hydrogen at a hydrogen filling station. Therefore, hydrogen-based fuels, which are also carbon-neutral but safer and easier to handle and require less safety effort, are also being investigated. These include ammonia, methane, higher hydrocarbons, and oxygenated hydrocarbons.

The use of carbon-neutral fuels in transport makes sense if the direct use of electricity generated from renewable primary energy sources has disadvantages in terms of efficiency due to the low storage density and the associated high weight of the accumulators. This is especially the case in air traffic and in heavy-duty engines in ships and trucks. However, pollutants must be avoided in the combustion of carbon-neutral fuels. This must be achieved by optimized combustion processes or suitable exhaust gas aftertreatment. Direct combustion of hydrogen does not produce soot particles, but nitrogen oxide can be produced if the flame temperature is too high. For this reason, Departments 3.3 and 3.5, together with partners from Leibniz Universität Hannover and TU Braunschweig, are investigating the ignition processes when a pre-chamber ignition is used as the ignition source in an innovation laboratory (WaVe) funded by the Ministry for Science and Culture of Lower Saxony. Either very lean hydrogen/air mixtures are used or mixtures with high exhaust gas recirculation or water injection. This reduces the flame temperature and thus the nitrogen oxide production. As the dilution of the mixture increases, ignition under turbulent flow conditions becomes increasingly difficult. Therefore, a pre-chamber arrangement is chosen [10]. In the pre-chamber, an optimized hydrogen-air mixture can be ignited by an electric spark.



Figure 8: High-speed laser induced fluorescence facility used to investigate ignition processes of hydrogen mixtures such as turbulent hot jet ignition

This causes a pressure rise in the pre-chamber, and hot turbulent free jets thus enter the main chamber due to the pressure difference. Because of the large-volume and rapid turbulent flame propagation, the necessary high output can be achieved even with the dilute mixtures used. The dependence of the ignition process on various parameters is investigated under near-engine conditions using optical measurement techniques. Thus, information on the mixing process by laser-induced fluorescence (LIF) of added tracers as well as on the ignition by LIF of hydroxyl radicals is obtained with high temporal resolution (Figure 8). In addition, reaction kinetics must also be optimized under special conditions. For example, the main elementary reactions in the combustion of hydrogen are well known, but the reaction rates are calculated with high uncertainty. It is therefore important to carefully validate and improve the hydrogen chemistry by comparing it with our own investigations in a rapid compression machine.

6. Outlook

Carbon free and carbon neutral energy carriers will play a significant role in the future energy system. In some applications they will serve as a temporary drop-in fuel to replace fossil fuels until more energy efficient options become available. For example, running Diesel engines on carbon neutral fuels will immediately cancel their CO₂ emissions while replacing all engines with electrified powertrains will require substantial

investments and time. In other application, biofuels, e-fuels and hydrogen will be used as a long-term option. This applies to, for instance, aviation and long-haul trucking where high-energy densities are required. Regardless, due to the limited supply of these energy carriers in the foreseeable future, energy efficiency is key to enable a maximum leverage on CO₂ emission reduction [11]. Therefore, PTB Departments 3.3 and 3.5 will continue their research activities towards safe and efficient use of renewable and alternative energy carriers. Reaction kinetics experiments at engine conditions are needed to properly characterize the fuels. This information is vital to designing efficient thermochemical energy conversion processes and apparatuses. It is also required to guarantee virtually pollutant-free operation which will be important for the societal acceptance. Further, the ignition and combustion process need to be investigated in order to optimize their efficiency and reliability. Here, laser-based experimental studies as well as numerical simulations will be applied to gain a detailed conception of the underlying physicochemical processes. The research goal is to enable energy and cost-effective use of energy carriers. The use of hydrogen in internal combustion engines poses challenges due to its different combustion properties compared to hydrocarbon fuels [11]. New hydrogen storage media, e.g. in the form of liquid organic hydrogen carriers (LOHC), present new challenges with regard to their thermophysical properties and

their long-term stability, which must be precisely determined. Moreover, a rapidly growing supply and usage of green hydrogen requires research and standardization regarding safety issues along the whole value chain.

References

- [1] C. Sula, H. Grosshans, and M.V. Papalexandris, [Assessment of Droplet Breakup Models for Spray Flow Simulations](#), *Flow, Turbulence, and Combustion*, 105, 889–914, **2020**
- [2] S. Nadiri, P. Zimmermann, L. Sane, R. Fernandes, F. Dinkelacker, B. Shu, *Kinetic modeling study on the combustion characterization of synthetic C3 and C4 alcohols for lean premixed prevaporized combustion*, *Energies*, **2021**
- [3] A. Valera-Medina, F. Amer-Hatem, A.K. Azad, I.C. Dedoussi, M. de Joannon, R.X. Fernandes, P. Glarborg, H. Hashemi, X. He, S. Mashruk, J. McGowan, C. Mounaim-Rousselle, A. Ortiz-Prado, A. Ortiz-Valera, I. Rossetti, B. Shu, M. Yehia, H. Xiao, M. Costa, *A review on ammonia as a Potenzial fuel: from synthesis to economics*, *Energy & Fuels*, 35, 6964–7029, **2021**
- [4] M. Leiker, W. Cartellieri, K. Christoph, U. Pfeifer, et al., *Evaluation of Antiknocking Property of Gaseous Fuels by Means of Methane Number and its Practical Application to Gas Engines*, ASME-paper 72-DGP-4, **1972**
- [5] W. Cartellieri, and U. Pfeifer, *Erweiterung der Energieerzeugung durch Kraftgase*, Forschungsberichte Verbrennungskraftmaschinen, Heft 120, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Frankfurt/Main, **1971**
- [6] S. Gersen, M. Essen, H. Levinsky, G. Dijk, *Characterizing gaseous fuels for their knock resistance based on the chemical and physical properties of the fuel*, *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 9(1), 1–13, **2016**
- [7] S.K. Vallabhuni, A.D. Lele, V. Patel, A. Lucassen, K. Moshhammer, M. Abbad, A. Farooq, R.X. Fernandes, *Autoignition studies of Liquefied Natural Gas (LNG) in a shock tube and a rapid compression machine*, *Fuel*, 232, 423–430, **2018**
- [8] P. Eilts, S. Vallabhuni, L. Klare, K. Moshhammer, *Untersuchungen zum Klopfverhalten von LNG*, Kraftstoffe für die Mobilität von morgen, Cuvillier Verlag Göttingen, **2018**
- [9] S. Nadiri, S. Agarwal, X. He, U. Kühne, R. Fernandes, B. Shu, *Development of the chemical kinetic mechanism and modeling study on the ignition delay of liquefied natural gas (LNG) at intermediate to high temperatures and high pressures*, *Fuel*, 302, 423–430, **2021**
- [10] E. Toulson, H.J. Schock, W.P. Attard, *A Review of Pre-Chamber Initiated Jet Ignition Combustion Systems*, SAE, Technical Paper 2010-01-2263, doi: <https://doi.org/10.4271/2010-01-2263>, **2010**
- [11] A. Dreizler, H. Pitsch, V. Scherer, C. Schulz, and J. Janicka, *The role of combustion science and technology in low and zero impact energy transformation processes*. *Applications in Energy and Combustion Science*, 7, 100040, **2021**

Acknowledgements

Part of this work was funded by the INNO INDIGO Partnership Programme (IPP) within the research project BioCFD. The projects 19ENG09 BIOFMET, ENG60 LNGII and 16ENG09 LNGIII have received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. Further funding from DFG Excellence Cluster SE2A-EXC 2163/1, the Alexander von Humboldt (AvH) Foundation and the Ministry of Science and Culture in Lower Saxony (MWK) for the Innovation Laboratory WaVe "Nachhaltige Wasserstoff-Verbrennungs-Konzepte", are greatly acknowledged.

Mengenmessung von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen

Helmut Többen¹, Rainer Kramer²,
Bodo Mickan³, Hans-Benjamin Böckler⁴

Einleitung

Nationale und internationale Bestrebungen zielen auf eine deutliche Reduzierung der Emissionen des bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden klimaschädlichen Kohlenstoffdioxids ab. So sehen die Nationale Wasserstoffstrategie [1] und der European Green Deal [2] im Zentrum eines Maßnahmenpaketes zur Umgestaltung der nationalen und europäischen Energiesysteme die stoffliche und energetische Nutzung von grünem Wasserstoff mit seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in der Energieversorgung, der Industrie und der Mobilität.

Grüner Wasserstoff wird per Elektrolyse und regenerativ erzeugtem Strom hergestellt, kann direkt vor Ort genutzt oder mittels LKW-Trailer oder über Pipelines zum Endabnehmer transportiert werden. Für den Pipelinetransport eignen sich sowohl reine Wasserstoffnetze, wie bspw. beim GET H2 Nukleus-Projekt im Emsland [3], oder das von den Fernleitungsnetzbetreibern vorgeschlagene europäische Netz namens „European Hydrogen Backbone“ [4], als auch die Einspeisung und Beimischung in das vorhandene Erdgasnetz. Bisher galt die Regel, dass im deutschen Erdgasnetz Beimischungen von bis zu 10 % überall dort erlaubt sind, wo es keine Einschränkungen durch spezifische Anwendungen gibt. Diese Regel wurde mit der Veröffentlichung des neuen DVGW-Arbeitsblattes G 260 ohne explizite Nennung einer neuen Obergrenze gelockert [5]. Basierend auf den Erfahrungen aus Forschungs- und Pilotprojekten wird aber im Rahmen der Regelsetzung eine schrittweise Erhöhung des Wasserstoffanteils im Erdgasnetz verfolgt. Als nächste, technisch sichere Zielgröße wurde vom DVGW eine Beimischung von 20 % adressiert [6].

Die Abrechnung über verbrauchte bzw. gehandelte Gasmengen in der Gaswirtschaft erfolgt über die Bestimmung des Energiegehaltes, der über

die gemessene Gasmenge im Betriebszustand mit Umrechnung in den Normzustand und über den für den Abrechnungszeitraum gültigen Brennwert ermittelt wird. Das DVGW-Arbeitsblatt G 685 „Gasabrechnung“ beschreibt hierzu die Anforderungen an die eichrechtskonforme Messung und regelt die Verfahren zur Energieermittlung und Abrechnung von Gasen an den Ein- und Ausseispunkten [7]. Die im vorliegenden Beitrag beschriebenen Sachverhalte fokussieren sich auf die Mengenmessung von Gasen und hier im Besonderen auf die Messung von Wasserstoff und von Wasserstoff-Erdgas-Gemischen. Die Brennerwertermittlung wird hingegen Schwerpunkt eines anderen Beitrages in diesem Heft sein [8].

In Deutschland werden in sehr großer Stückzahl Balgengaszähler für Abrechnungszwecke eingesetzt. Über 10 Mio. Haushaltanschlüsse sind mit diesem Zählertyp ausgestattet. In den vorgelagerten Verteilnetzen sowie bei Kunden mit größeren Abnahmemengen sind vorwiegend Drehkolbengaszähler verbaut. In den großen Pipeline-Transportnetzen kommen Turbinenrad- und Ultraschallgaszähler zum Einsatz. Zur Feststellung der Messrichtigkeit und Messbeständigkeit werden diese Geräte i. d. R. mit den Prüfmedien Luft und/oder Erdgas untersucht. Da sich neben den verbrennungstechnischen auch die physikalischen Eigenschaften (Dichte, Viskosität, Schallgeschwindigkeit) von Wasserstoff stark von denen von Luft und Erdgas unterscheiden, ist von einem veränderten Messverhalten der Gaszähler auszugehen. Die metrologisch abgesicherte Übertragbarkeit der mit Luft oder Erdgas generierten Messergebnisse auf einen Betrieb der Geräte mit Wasserstoff-Erdgas-Gemischen bzw. reinem Wasserstoff ist über die Breite der möglichen Betriebsbedingungen u. a. auch wegen noch aufzubauender Rückführungsketten bisher nicht gegeben.

Die PTB verfolgt deshalb in ihrem Fachbereich Gase verschiedene Ansätze zur Wissens-

¹ Dr.-Ing. Helmut Többen, Fachbereich 1.4 Gase, E-Mail: helmut.toebben@ptb.de

² Dr.-Ing. Rainer Kramer, Arbeitsgruppe 1.42 Gas-messgeräte, E-Mail: rainer.kramer@ptb.de

³ Dr.-Ing. Bodo Mickan, Arbeitsgruppe 1.43 Hochdruck-Gas, E-Mail: bodo.mickan@ptb.de

⁴ Dr.-Ing. Hans-Benjamin Böckler, Arbeitsgruppe 1.45 Wasserstoffmengenmessung, E-Mail: hans-benjamin.boeckler@ptb.de

melgaszähler als Sekundärnormale eingesetzt. Diese Zähler zeigen ein weitgehend gasartenunabhängiges Verhalten, sofern die Löslichkeit des Messgases in der Sperrflüssigkeit gering ist. I.d.R. kommt hierfür ein Spindelöl zum Einsatz. Mit dem zur Verfügung stehenden Trommelgaszähler mit $Q_{\max} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$ lassen sich Untersuchungen mit Luft, Methan und Wasserstoff unter Umgebungsdruck durchführen. Die erreichbare Messunsicherheit liegt bei $U = 0,2 \%$ (95 % Überdeckungswahrscheinlichkeit).

Die Verwendung von Wasserstoff in der Industrie wird in den nächsten Jahren stark zunehmen. Als Prozessgas wird Wasserstoff bereits heute vielfältig eingesetzt. Um Einsatzerfahrungen bzgl. der industriellen Anwendungsfelder zu sammeln, wird aktuell in Kooperation mit der Salzgitter-Flachstahl GmbH eine Erprobungsmessstrecke in DN 50, PN 16 und bis ca. $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ im Normzustand aufgebaut, bei der eine Blendenmessstrecke mit verschiedenen anderen Zählertechnologien in Reihenschaltung betrieben werden soll. Es ist vorgesehen, die Messstrecke zunächst mit Luft und Erdgas zu kalibrieren, um sie dann anschließend mit Wasserstoff zu betreiben. Da Blendenmessstrecken grundsätzlich für alle Gase einsetzbar sind, sofern die entsprechende Zustandsgleichung des eingesetzten Gases bekannt ist, können aus den Vergleichsergebnissen Schlüsse auf die Messrichtigkeit der verschiedenen Messgerätetechnologien gezogen werden.

Wasserstoff in Transportnetzen

Für die Mengenmessgeräte in den Transportnetzen ist seitens der PTB die Messrichtigkeit durch eine Rückführung aller Kalibrierungen auf die SI-Einheiten mit möglichst geringer Messunsicherheit sicherzustellen. Dies geschieht für Erdgas derzeit im Wesentlichen in Kooperation mit anderen europäischen Nationalen Metrologie-Instituten (NMIs) unter dem Titel [EuReGa](#) (*European Reference for Gas Metering*) [9]. Vor dem Hintergrund des Projektes „[European Hydrogen Backbone](#)“ [4] auf europäischer Ebene und des Leitprojektes des BMBF „[TransHyDE](#)“ [10] auf nationaler Ebene ist nunmehr eine steigende Nachfrage nach rückführbaren Messungen für Erdgasgemische mit bis zu 30 % Wasserstoffzumischung und reinem Wasserstoff entstanden, die aus Sicht der Industrie (sowohl Netzbetreiber als auch Messgerätehersteller) kurzfristig bedient werden muss.

In den zurückliegenden 10 Jahren hat der Fachbereich Gase in der PTB die Entwicklung physikalisch basierter Modelle der messtechnischen Eigenschaften für den Einsatz kritisch betriebener Düsen soweit vorantreiben können, dass diese Technologie für eine große Bandbreite von Gasen für die Rückführung auf die SI-Einheiten mit

geringen Messunsicherheiten eingesetzt werden kann [11]. Zusätzliche Vorteile liegen dabei in der Rückführbarkeit über die geometrische Messung der Düsen, mechanischen Langzeitstabilität und einem (im Vergleich zu konventionellen Primärnormalen) geringen Investitionsaufwand sowie einfacher Handhabung. Als Arbeits- bzw. Sekundärnormale in Kalibriereinrichtungen werden weiterhin Turbinenradgaszähler favorisiert, für die ebenfalls eine Erweiterung der Anwendungsbereiche hinsichtlich der Gaseigenschaften durch eine physikalische Modellierung erreicht werden konnte [12].

Ein erster Härtetest in der Praxis stellte ein aktuelles Verbundprojekt der Industriegruppe DNV [13] dar, bei dem Messgerätehersteller die Gelegenheit erhielten, ihre Produkte mit verschiedenen Gasen, insbesondere 30 % H_2 -angereichertes Erdgas, auf Messrichtigkeit zu überprüfen. Die Rolle der PTB in diesem Verbundprojekt war, die Sicherstellung und Bewertung der Rückführung der Messungen auf die SI-Einheiten. Die Planung und der Aufbau der notwendigen Anlagen beim DNV erfolgte 2020 und die Durchführung des Projektes in 2021. Detaillierte Beschreibungen und Ergebnisse wurden auf dem *North Sea Flow Workshop* (NSFW) im Oktober 2021 präsentiert. Die zentrale Einheit für diese Rückführung war ein Modul mit insgesamt drei verschiedenen Technologien in Reihenschaltung (Abbildung 3): Corioliszähler, Turbinenradgaszähler und kritische Düsen. Abbildung 4 zeigt die Verknüpfung der verschiedenen Kalibriertechnologien sowie die erreichten erweiterten Messunsicherheiten. Ein entscheidender Punkt für den Erfolg bei dem Projekt war die Verwendung von drei Technologien mit drei unabhängigen Rückführungsketten. Während die kritischen Düsen geometrisch vermessen und der Kalibrierwert für den Anwendungsbereich des Projektes nach den in [11] beschriebenen Prinzipien bestimmt wurde, sind die Turbinenradgaszähler mit Erdgas in Bezug auf den harmonisierten Erdgaskubikmeter [9] sowie zwei Zusatztests kalibriert worden [12]. Die als dritte Technologie verwendeten Coriolis-Zähler haben von einem akkreditierten Labor den Kalibrierwert mit Wasser sowie eine herstellerepezifizierte Korrektur für die Verwendung mit Gas erhalten. Entsprechend der grundlegenden Regeln für Vergleichsmessungen konnten die drei Technologien auf die Äquivalenz im Rahmen der jeweiligen Messunsicherheiten bewertet werden. Die Abbildung 5 zeigt den Box-Plot der erreichten Äquivalenzwerte für alle Messpunkte (≈ 500). Die Äquivalenz von mehr als 95 % aller Messwerte demonstriert die Zulässigkeit des gewählten Ansatzes.

Im Rahmen des Leitprojektes [TransHyDE](#) [10] des BMBF hat die Firma RMA Rheinau damit begonnen, eine Kalibriereinrichtung für Gasmess-

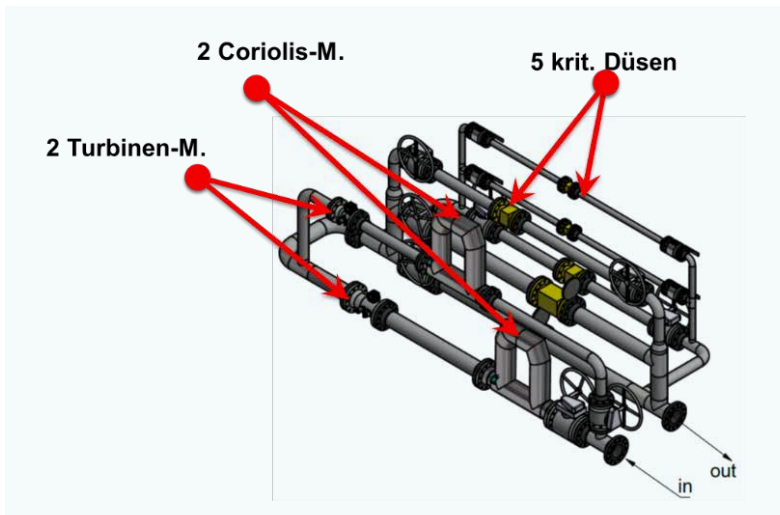
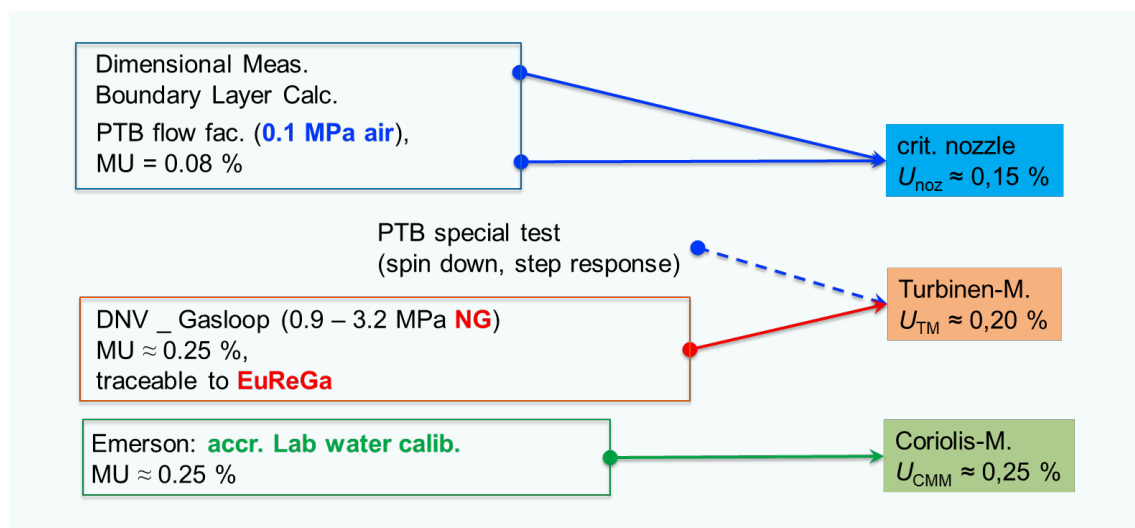


Abbildung 3:
DNV-Joint industry project (JIP) "Assessment of renewable gases influence on gas flow meters": Modul mit verschiedenen Messgerätechnologien in Reihenschaltung zur Bestimmung des Referenzmassstromes.
Anwendungsbereich Durchfluss 16 bis 1000 m³/h; Druck 1,6 bis 3,5 MPa; Gase: N₂, CH₄, Erdgas (Groningen), **Erdgas + 30 % H₂**, Erdgas + 20 % CO₂.

geräte im Bereich von 5 bis 6500 m³/h sowie 0,8 bis 5,2 MPa für reinen Wasserstoff aufzubauen. Die Inbetriebnahme des Prüfstands ist für Juni 2022 geplant. Die PTB hat sich im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung mit der Firma RMA verpflichtet, Auswahl, Auslegung und Kalibrierung der Arbeits- und Sekundärnormale vorzunehmen. Der Prüfstand wird als Closed-Loop-System realisiert, in dem es zwei miteinander verkoppelte Loop-Systeme gibt: Einen für den täglichen Kundenservice mit Turbinenradgaszählern als Arbeitsnormale und einen zweiten mit einer integrierten Düsenstaffel als Referenzeinheit zur Rückführung der Arbeitsnormale, siehe Abbildung 6. Der Einsatz der kritischen Düsen verringert auf längere Sicht sowohl für die PTB als auch für die Firma RMA insgesamt den zeitlichen und technischen Aufwand für die Erstellung und Aufrechterhaltung der Rückführung. Damit der Prüfstand auch für die Untersuchungen im Rahmen von Konformitätsbewertungen verwendet werden kann, wird eine erweiterte Gesamtmessunsicherheit von 0,2 % für die Durchfluss- und Mengenbestimmung von reinem Wasserstoff angestrebt.

Abbildung 4:
DNV-JIP "Assessment of renewable gases influence on gas flow meters": Rückführung der einzelnen Technologien im Modul für Referenzmassstrom mit den erreichten Unsicherheiten (erweiterte Messunsicherheit, Durchschnittswerte).



EMPIR-Projekte zur Wasserstoffmengenmessung

Im Rahmen des Europäischen Metrologieprogramms für Innovation und Forschung (EMPIR) werden Forschungsprojekte koordiniert, um insbesondere metrologische Beiträge zur Lösung der großen Herausforderungen der heutigen Zeit zu liefern. Der Fachbereich Gase der PTB bearbeitet aktuell zwei EMPIR-Projekte „NewGasMet“ und „MetHyInfra“, die im Folgenden vorgestellt werden.

Gase wie Biogas, Biomethan, Wasserstoff oder Synthesegas, die sich in ihren Eigenschaften von denen des Erdgases unterscheiden, erfahren eine immer größer werdende Anwendung. Die messtechnischen Auswirkungen dieser Gase auf die kommerziell verfügbaren Gaszähler sind allerdings noch nicht einschlägig untersucht und dokumentiert. So ist das Ziel des Projektes „NewGasMet“ (*Flow metering of renewable gases*) [14], verlässliche Daten der Industrie und der Metrologie-Community zur Verfügung zu stellen sowie Empfehlungen zur Messung mit erneuerbaren Gasen auszusprechen und, soweit erforderlich, Anpassungsbedarf der bestehenden Normen zu identifizieren.

Das Projekt „NewGasMet“ unterteilt sich in drei technische Arbeitspakete, von denen das erste Arbeitspaket im Rahmen einer Literaturstudie den Einfluss erneuerbarer Gase auf die Genauigkeit und Lebensdauer von Gaszählern untersucht. Für diese Studie wurden Daten aus öffentlich zugänglichen Dokumenten sowie einer Umfrage bei Forschungsinstituten, Normungsgremien, Laboren und Herstellern zusammengetragen. Neben der Literaturstudie wurden zudem Berichte über relevante Gaszusammensetzungen erarbeitet, die bei der Konformitätsbewertung von Gaszählern zu betrachten sind, sowie über bestehende und gegebenenfalls zusätzlich benötigte Tests für jede Zählerart und Gaszusammensetzung.

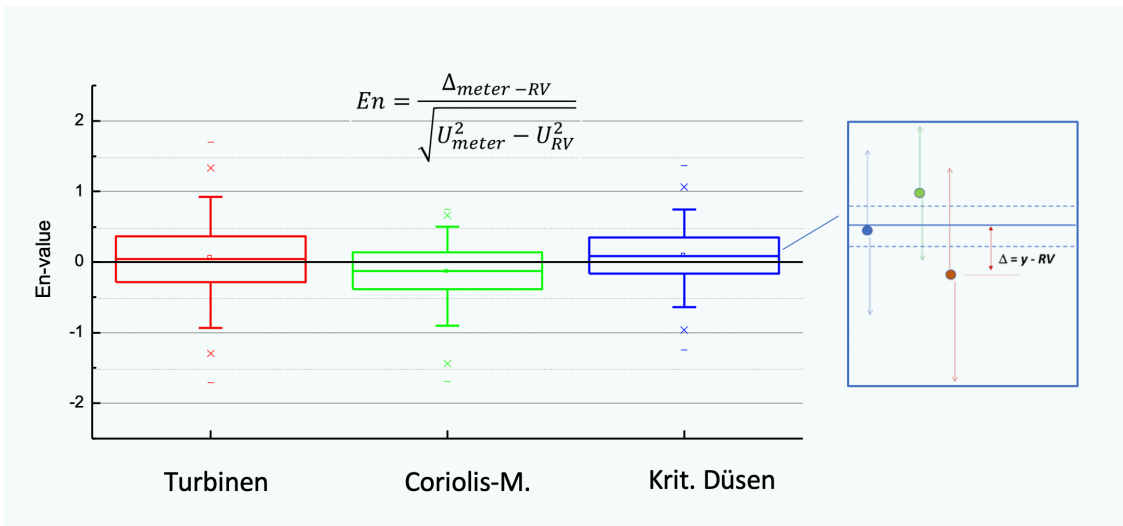


Abbildung 5: DNV-JIP "Assessment of renewable gases influence on gas flow meters": Box-Plot aller Äquivalenzwerte im Referenz-Modul für den gesamten Anwendungsbereich (≈ 500 Einzelwerte)

Das zweite Arbeitspaket widmet sich den Gaszählern selbst. Neben Empfehlungen zur Überarbeitung der relevanten Normen werden rückführbare Methoden für die Typprüfung und für die Verifizierung von Durchflussmessgeräten entwickelt, mit Blick auf die Einhaltung der von der MID 2014/32/EU [15] gesetzten Anforderungen. Darüber hinaus wurde gasartenabhängig auch die Eignung der internen Komponenten des Zählers, die Haltbarkeit der Materialien, die Isolierung der elektronischen Bauteile und andere mögliche technische Herausforderungen untersucht und bewertet. Im entsprechenden Laboratorium der PTB wurde dafür u. a. die Dichtheit der Zähler bei Beaufschlagung mit Wasserstoff geprüft, indem der jeweilige Zähler in einer gesicherten Atmosphäre mit Wasserstoff beaufschlagt wurde, siehe Abb. 7. Während der Messungen wurden sowohl der Druck im Zähler als der Druck der Behälter sowie die Temperatur überwacht.

Zur Feststellung der Messbeständigkeit unter Wasserstoffeinfluss ist geplant, dass nach dem

erfolgreich bestandem Lecktest mehrere Zähler einer Gerätefamilie einen Dauertest mit Wasserstoff durchlaufen. Zur Überprüfung der o. g. Kriterien sollen dann nach einer Betriebsdauer von 3, 6 und 12 Monaten jeweils ein Zähler der Gerätefamilie ausgebaut und erneut kalibriert werden. Zudem sollen im Rahmen dieses Dauertests auch Drucksensoren gängiger Mengenumwerter untersucht werden. In ähnlicher Weise werden bei einem Projektpartner relevante Gaszähler für ein Jahr mit Biogas beaufschlagt. Für die Dauerversuche liegen erst nach dem Veröffentlichungszeitpunkt dieses Fachartikels die entsprechenden Untersuchungsergebnisse vor.

Das dritte Arbeitspaket wird von der PTB geleitet und widmet sich Kalibriernormalen, Vergleichsmessungen und Messkampagnen zur Prüfung der Messrichtigkeit mit dem Schwerpunkt auf die Rückführung. Es wird die Literatur hinsichtlich der Messung von Wasserstoffmengen und Wasserstoffdurchflüssen mit verschiedenartigen Messgeräten/Normalmessgeräten gesichtet und

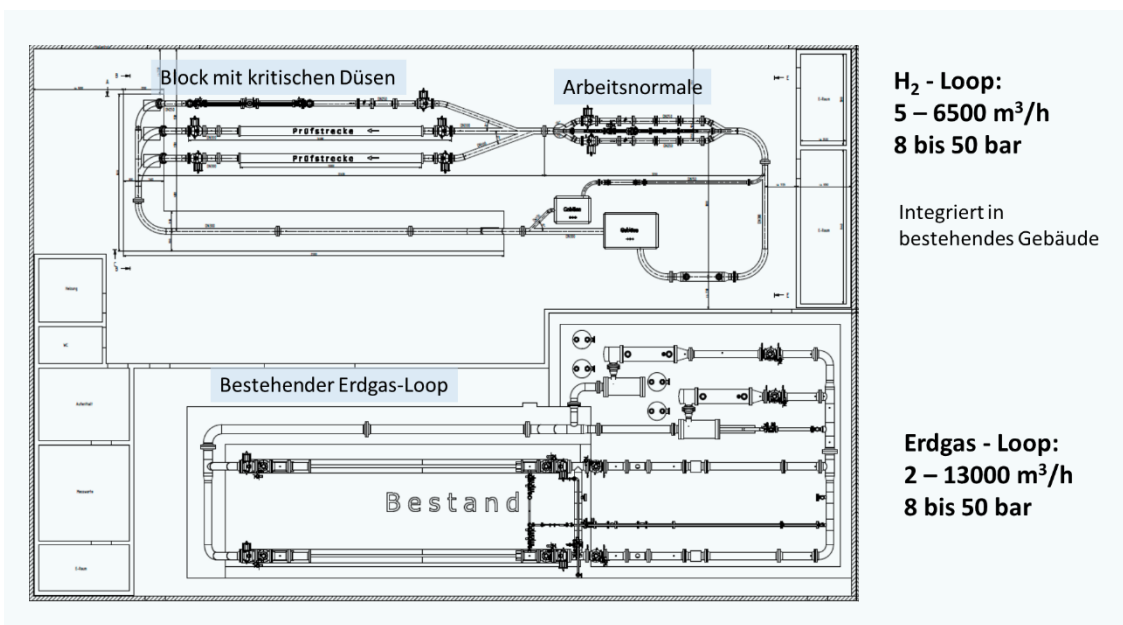


Abbildung 6: Erweiterung der bestehenden staatlich anerkannten Prüfstelle der Fa. RMA für Hochdruck-Erdgas um eine neue Closed-Loop-Anlage für reinen Wasserstoff bis Juni 2022 im Rahmen des Leitprojektes des BMBF „TransHyDE“. Die PTB ist für die Auswahl und Kalibrierung der Normale zuständig.

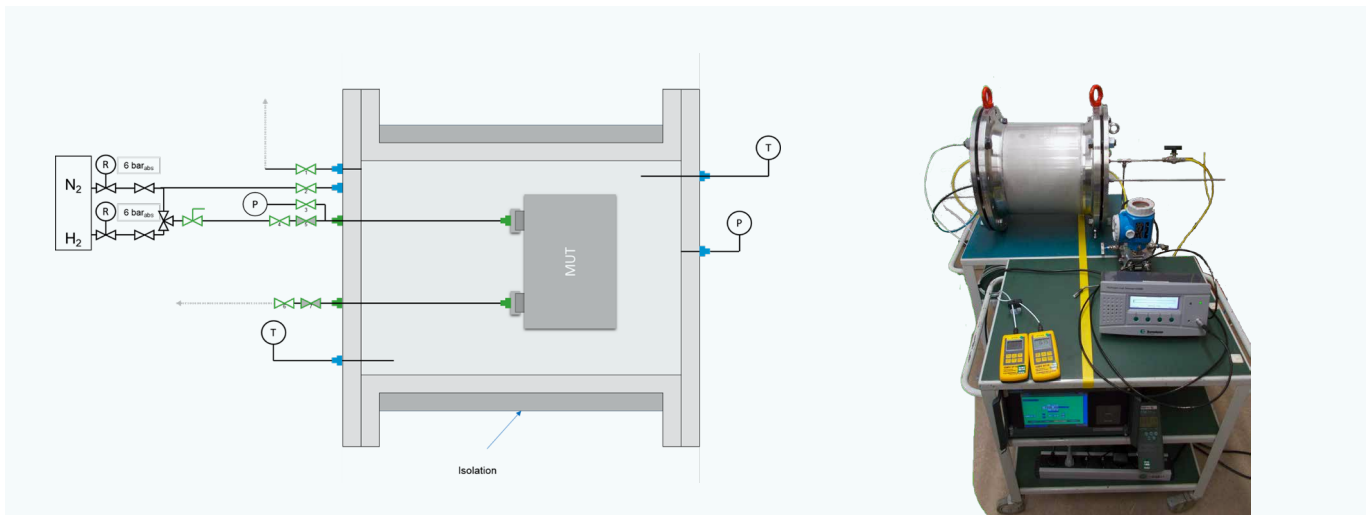


Abbildung 7:
Schema des PTB-Dichtheitsprüfstands für Hausgaszähler (li.); Foto des Messaufbaues (re.)

eine Matrix von potentiell geeigneten Bezugsnormalen mit Angabe der jeweiligen Messunsicherheit generiert.

Ein wichtiger Teil zur zukünftigen Qualitätssicherung für die Messung von erneuerbaren Gasen sind Ringvergleiche. Dafür wurde in der PTB eine Transfermessstrecke aufgebaut und erprobt. Je nach Durchflussbereich kommen kritisch betriebene Düsen, Drehkolbengaszähler oder Laminar Flow Elemente sowie Sensoren für die Temperatur- und Druckmessung zum Einsatz. Exemplarisch zeigt Bild 8 die Messstrecke für den Durchflussbereich von 1,1 bis 9 m³/h.

An den Ringvergleichen werden fünf Laboratorien teilnehmen, und es wird das Messverhalten der Geräte mit Wasserstoff, Methan, Stickstoff und Luft in einem Messbereich von 0,025 bis 9 m³/h untersucht.

Das EMPIR-Projekt „*Metrology infrastructure for high-pressure gas and liquified hydrogen flows*“ (**MetHyInfra**) [16] hat zum Ziel, Rückführungsmöglichkeiten für eine Vielzahl von Anwendungsfällen im Bereich der Wasserstoff- und Wasserstoff-Erdgas-Messung zu schaffen. Hierbei stehen Hochdruckanwendungen bis 100 MPa sowie die Messung von flüssigem Wasserstoff im Vordergrund. Die Gesamtkoordination des Projektes liegt bei der Arbeitsgruppe Wasserstoffmengenmessung des Fachbereichs Gase der PTB.

Das erste Arbeitspaket von insgesamt vier technischen Arbeitspaketen konzentriert sich auf die Messung von Wasserstoff bis 100 MPa und bis 10 kg/min. Hierfür muss sowohl ein nach den Vorgaben der Explosionsschutzrichtlinie (ATEX) und der *Pressure Equipment Directive (PED)* entsprechender Prüfstand aufgebaut, als auch ein für die Rückführung geeignetes Bezugsnormal identifiziert werden. Für Letzteres ist geplant, einen Corioliszähler unter Hochdruckbedingungen über ein gravimetrisches Primärnormal an das SI-Einheitensystem anzuschließen. Ein solches Verfahren ist aus vorangegangenen Projekten

[17] hinreichend bekannt. Mit dem Corioliszähler als Bezugsnormal werden dann im nächsten Schritt kritisch betriebene Düsen kalibriert, die die Arbeitsnormale in dem geplanten Prüfstand darstellen sollen.

Das zweite Arbeitspaket widmet sich der Übertragbarkeit von Messergebnissen auf andere Medien, d. h. es soll eine Übertragung des Messverhaltens von einem anderen Prüfmedium als Wasserstoff auf eine Messung mit Wasserstoff untersucht werden. Letztendlich soll eine kosten- und zeitsparende Alternative zur direkten Kalibrierung mit Wasserstoff gefunden werden. Hierbei ist geplant, unterschiedliche Düsen (Bauform, Halsdurchmesser, Rauigkeit), die zuvor dimensionell vermessen worden sind, auf verschiedenen Prüfständen mit unterschiedlichen Prüfbedingungen in Europa zu testen. Zudem soll in diesem Arbeitspaket über die Bestimmung der Virialkoeffizienten die Zustandsgleichung für Wasserstoff für den Hochdruckbereich angepasst werden. Hierfür sind Schallgeschwindigkeitsmessungen in Wasserstoff bei Drücken bis 100 MPa erforderlich.

Ziel des dritten Arbeitspaketes ist die Entwicklung eines CFD-Modells in OpenFOAM für Hochdruck-Wasserstoffströme in kritisch betriebenen Düsen. Durch den vorgesehenen Druckbereich bis 100 MPa ändern sich die physikalischen Eigenschaften des Gases erheblich und Realgas-effekte werden wichtiger. Diese sind in einem geeigneten CFD-Modell umzusetzen. Hierbei werden die Rauigkeiten der Düsenoberflächen sowie die nicht-adiabatischen Wände bei transsonischen Strömungen berücksichtigt. Auf Basis der dimensionellen Kalibrierung werden zudem digitale Abbilder der real vermessenen Düsen entwickelt, die in das Modell einfließen. Über die Implementierung der neuen Zustandsgleichung sollen zudem die Ergebnisse der Messungen aus dem ersten Arbeitspaket mit den Simulationsergebnissen abgeglichen werden.

Das vierte Arbeitspaket teilt sich in zwei Bereiche. Im ersten Teil wird eine rückgeführte Messeinrichtung für Durchflüsse bis 4 kg/h und für Drücke bis 3 MPa (gasförmig) aufgebaut. Dies beinhaltet die Entwicklung geeigneter Primärnormale für die Kalibrierung kritischer Düsen, die als Transfornormale eingesetzt werden sollen, sowie die Identifikation geeigneter Bezugsnormale für die Wasserstoffdurchflussmessung. Der zweite Teil widmet sich der Messunsicherheitsbestimmung für die Durchflussmessung von Flüssigwasserstoff. Hierbei soll auch auf die Erfahrungen zurückgegriffen werden, die bei der Kalibrierung von Gasmessgeräten mit anderen verflüssigten Gasen generiert wurden.

Zusammenfassung

Die Reduzierung der klimaschädlichen CO₂-Emissionen steht im Vordergrund vieler nationaler und internationaler Bemühungen. In diesem Zusammenhang ist die Nutzung von Wasserstoff und hier insbesondere von regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Prozessgas und als Energieträger in den Fokus vieler Anwendungsfälle gerückt. Zur Sicherstellung einer metrologisch abgesicherten Mengen- und Durchflussmessung von Wasserstoff und von Wasserstoff-Erdgas-Gemischen bedarf es allerdings sowohl für den Niederdruck- als auch für den Hochdruckbereich neben dem Aufbau von entsprechenden Rückführungsketten auch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um über die große Breite der in der Praxis vorzufindenden Betriebsbedingungen valide Aussagen zur Messrichtigkeit und Messbeständigkeit der zum Einsatz kommenden Gaszähler zu erhalten. Der hier vorgestellte Beitrag liefert einen Überblick über entsprechende Aktivitäten, die unter Beteiligung der PTB durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Die Nationale Wasserstoffstrategie; <https://tinyurl.com/suw755zj>
- [2] Europäischer Grüner Deal; <https://tinyurl.com/4crethz2>
- [3] Projekt GET H2 Nukleus; <https://www.get-h2.de/>
- [4] European Hydrogen Backbone; <https://gasforclimate2050.eu/ehb/>
- [5] DVGW Arbeitsblatt G 260: 2021-09: Gasbeschaffenheit
- [6] DVGW Pressemitteilung, 9.4.2019 „Mehr Wasserstoff sicher verankern“, <https://tinyurl.com/3h6ujcah>
- [7] DVGW G 685 Teil 1-7:2020-08: Gasabrechnung
- [8] Stefan Sarge, Eichrechtskonforme Abrechnung von wasserstoffhaltigem Erdgas, PTB-Heft 2/22, Seite 85
- [9] European Reference for Gas Metering (EuReGa), <https://tinyurl.com/2mjsh5r>
- [10] BMBF Leitprojekt TransHyDE: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/transhyde>
- [11] B. Mickan, J. v. d. Grinten, T. Kappes: Primary and secondary flow standards for a wide variety of gas compositions – a solid base for reliable traceability facing the energy transition. 38th North Sea Flow Measurement Workshop, Virtual Conference, 27–29, October, 2020, <https://tinyurl.com/fyrb9zh5>
- [12] Jos G.M. van der Grinten, Arnthor Gunnarsson, Mijndert van der Beek and Bodo Mickan (2019): An intercomparison between primary high-pressure gas flow standards with sub-permille uncertainties, 37th International North Sea Flow Measurement Workshop, Tønsberg, Norway, 22 – 24 October 2019, <https://tinyurl.com/2rjcm57h>
- [13] DNV-Projekt: Influence of renewable gases on gas flow meters; <https://tinyurl.com/kkvx8r2m>
- [14] Euramet EMPIR-Projekt „NewGasMet“, <https://newgasmet.eu/>
- [15] Directive 2014/32/EU, <https://tinyurl.com/yd8jmpne>
- [16] Euramet EMPIR-Projekt „MetHyInfra“, <https://MetHyInfra.ptb.de/>
- [17] Euramet EMPIR-Projekt „MetroHyVe II“, <https://www.sintef.no/projectweb/metrohyve-2/>

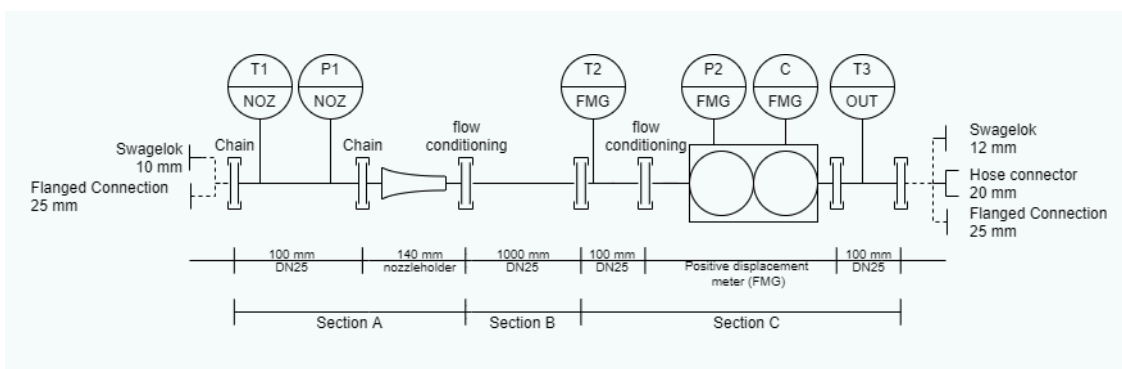


Abbildung 8: PTB-Transfermessstrecke für die oberen Durchflusspunkte.

Eichrechtskonforme Abrechnung von wasserstoffhaltigem Erdgas¹

Stefan M. Sarge²

Zusammenfassung

Eine unregelmäßige Einspeisung von Wasserstoff in ein Verteilnetz führt zu Problemen bei der eichrechtskonformen Bestimmung der dem Endverbraucher gelieferten Energiemenge. Dies betrifft insbes. die Bestimmung des Brennwertes, da die derzeit geltenden Technischen Regeln für reines Erdgas entwickelt wurden und für stark wasserstoffangereichertes Erdgas nur beschränkt anwendbar sind. Gasbeschaffenheits- und Brennwertmessgeräte für einen Wasserstoffanteil bis 20 % sind Stand der Technik. In Verteilnetzen mit Mehrseiteneinspeisung, in denen eine Brennwertmessung wirtschaftlich unzumutbar ist, führt die Beschränkung der Bandbreite für den Brennwert der eingespeisten Gase auf 4 % (sog. 2%-Grenze) zu einer Begrenzung der einzuspeisenden Menge Wasserstoff auf ca. 5 %. Es besteht zusätzlicher Forschungsbedarf, um den Einsatzbereich von Gasbeschaffenheitsverfolgungs- und ähnlichen Verfahren auf stark vermaschte, bei geringem Druck betriebene Verteilnetze auszuweiten.

Einleitung

Wasserstoff soll einen wesentlichen Beitrag bei der Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem liefern, um das Klima vor dem menschengemachten Wandel zu retten. Dazu soll Wasserstoff durch Wind- oder Solarenergie erzeugt und u. a. in Erdgasnetze eingespeist, zwischengelagert und zum Endkunden transportiert werden. Die dabei entstehenden Kosten sollen gerecht auf alle Abnehmer verteilt werden. In der Gasbranche ist entsprechend den gesetzlichen Vorgaben [1, 2] die Abrechnung des gelieferten Brenngases nach seinem Energiegehalt seit Jahrzehnten Stand der Technik [17]³ und soll auch für wasserstoffhaltige Gase Anwendung finden.

Die aktuelle Ausgabe des DVGW Arbeitsblattes G 260 vom September 2021 [15] erlaubt die Einspeisung von Wasserstoff als Zusatzgas (DVGW: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.). Ein Maximalwert wird nicht angegeben, er ergibt sich aus den gegebenen Grenzwerten für Wobbe-Index und Brennwert. Diese Anforderung führt zu sehr geringen zulässigen Wasserstoffanteilen, da der aus den Grenzwerten für Dichte und Wobbe-Index resultierende Brennwertbereich schnell überschritten wird, s. Abbildung 1, obwohl für typische Erdgase der Wobbe-Index im gesamten Konzentrationsbereich innerhalb der heute gegebenen kombinierten Grenzen von L- und H-Gas liegt, s. Abbildung 2.

Als Maximalwert für den Wasserstoffanteil wird derzeit häufig ein Wert von 20 % genannt, dieser entspricht der vom DVGW 2019 verkündeten Wasserstoffeinspeisestrategie [14, 20]. Mittlerweile ist diese Grenze gefallen, beispielsweise wird im Rahmen der Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes G 685-6 [19] zur Berechnung der Kompressibilitätszahl ein Maximalwert von 30 % diskutiert, und das DVGW Arbeitsblatt G 260 [15] erlaubt in abgetrennten Netzbezirken die Einspeisung erneuerbarer Gase mit beliebigen Eigenschaften und Anteilen, sofern die Abrechnung gemäß DVGW Arbeitsblatt G 685 [17] gewährleistet ist und keine verwendungs- oder sicherheitstechnischen Randbedingungen verletzt werden.

Weiterhin wird im DVGW Arbeitsblatt G 260 Wasserstoff als Grundgas in die Norm aufgenommen. Dazu wird eine neue 5. Gasfamilie eingeführt, die von zwei Wasserstoffbeschaffenheiten ausgeht, die sich in ihrem Reinheitsgrad unterscheiden.

¹ Die folgenden Darstellungen stellen den aktuellen Stand der Diskussionen in verschiedenen Gremien und Arbeitskreisen im Juli 2021 dar und können sich von den letztlich verabschiedeten Regelungen unterscheiden.

² Dr. Stefan M. Sarge, Arbeitsgruppe 1.44 Kalorische Größen, E-Mail: stefan.sarge@ptb.de

³ Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Quellen hier thematisch geordnet.

⁴ Gehaltsangaben x sind hier immer Stoffmengenanteile in Prozent.

Bestimmung des Energiegehalts

Wenn hier – umgangssprachlich – vom Energiegehalt einer Brenngasmenge gesprochen wird, ist immer die Verbrennungsenthalpie der Gasmenge (Stoffmenge n , Masse m) gemeint [2, 8].

Die Menge des Gases wird im allg. bestimmt, indem sein Volumen mittels Gaszählern gemessen und mithilfe der Zustandszahl z auf einen Normzustand umgerechnet wird. Das so berechnete Volumen im Normzustand V_n ist proportional zur Stoffmenge n und zur Masse m des Gases. Die eichrechtskonforme Bestimmung dieser Menge ist

an anderer Stelle dieser Zeitschrift erläutert.

Die Ermittlung des Energiegehalts E erfolgt bei gemessenem Volumen des Gases im Betriebszustand V_b und seinem volumenbezogenen Abrechnungsbrennwert $H_{s,eff}$ nach [16, 17, 18, 19] über seine Zustandszahl z :

$$E = V_n \times H_{s,eff} = V_b \times z \times H_{s,eff} \quad (1)$$

Die Zustandszahl z ermittelt sich aus den Realgasfaktoren, die mit den einschlägigen Zustandsgleichungen SGERG-88 [11] oder AGA8-92DC [10] berechnet werden. Da diese üblicherweise verwendeten Zustandsgleichungen für Erdgas entwickelt wurden, ist ihr Anwendungsbereich auf $x(H_2) \leq 10\%$ beschränkt. Weitere Beschränkungen bestehen in der relativen Dichte d_{rel} , im Brennwert H_s und im Methangehalt $x(CH_4)$. Umfangreiche Vergleichsrechnungen [24, 25] mit der umfassenden Zustandsgleichung GERG-2008 [13] haben gezeigt, dass eine Erweiterung des Anwendungsbereichs bis auf $x(H_2) = 100\%$ möglich ist.

Der Abrechnungsbrennwert $H_{s,eff}$ wird auf der Basis von eichrechtskonformen Messungen und Rechnungen ermittelt. Brennwertmessgeräte messen diesen Brennwert direkt, Gasbeschaffenheitsmessgeräte bestimmen ihn aus der gemessenen Zusammensetzung $x(j)$ und dem gegebenen molaren Brennwert $H_{s,m}(j)$ sowie dem gegebenen Summationsfaktor $s(j)$ der k reinen Komponenten [9].

Stand der Technik

Eine Untersuchung des Einflusses einer Wasserstoffbeimischung von 10 % auf die Messabweichung und Messunsicherheit der Energiemenge ergab einen Wert von bis zu 7 %, wobei die Brennwertmessung einen Anteil von 1,1 % bis 1,3 % hatte [28]. Hierbei wurde von dem ungünstigsten Fall ausgegangen, dass alle eingesetzten eichrechtskonformen Messgeräte die Fehlergrenzen ausnutzen.

Der Brennwert kann grundsätzlich nach verschiedenen Verfahren ermittelt werden:

- Messung mithilfe klassischer, diskreter, geeichter bzw. konformitätsbewerteter Brennwertmessgeräte
- Berechnung aus der mittels entsprechender geeichter bzw. konformitätsbewerteter Gasbeschaffenheitsmessgeräte gemessenen Gaszusammensetzung
- Berechnung mithilfe eines geeichten bzw. konformitätsbewerteten Zustandsrekonstruktionssystems

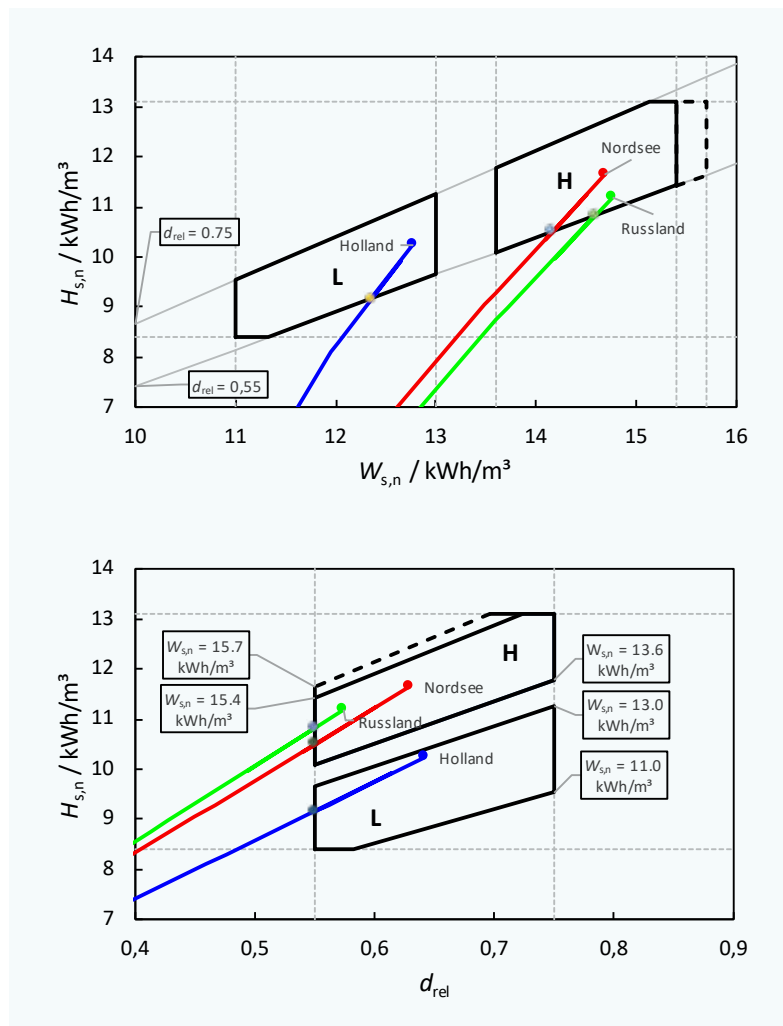


Abbildung 1: Nach DVGW Arbeitsblatt G 260 [15] aus den vorgegebenen Grenzwerten für Wobbe-Index $W_{s,n}$ (oben) und relativer Dichte d_{rel} (unten) resultierender Brennwertbereich $H_{s,n}$ für normgerechtes Erdgas (schwarze Polygone: H-Gas und L-Gas, gestrichelte Linien: zulässige Überschreitung bei grenzüberschreitendem Gastransport) und die Lage dreier typischer Erdgas/Wasserstoff-Gemische. Die farbigen Linien spiegeln einen nach links unten zunehmendem Wasserstoffgehalt wider. Blau: L-Gas aus Holland, rot: H-Gas aus der Nordsee, grün: H-Gas aus Russland. Der maximal zulässige, noch normgerechte Wasserstoffanteil $x(H_2,max)$ beträgt für Gas aus Holland 16,0 %, für Gas aus der Nordsee 14,0 % und für Gas aus Russland 4,7 %.

- Berechnung mithilfe eines eichrechtskonformen Ersatzverfahrens gemäß MessEV § 25 Absatz 4.

Brennwertmessgeräte

Brennwertmessgeräte basieren im allg. auf folgenden Messprinzipien [12]:

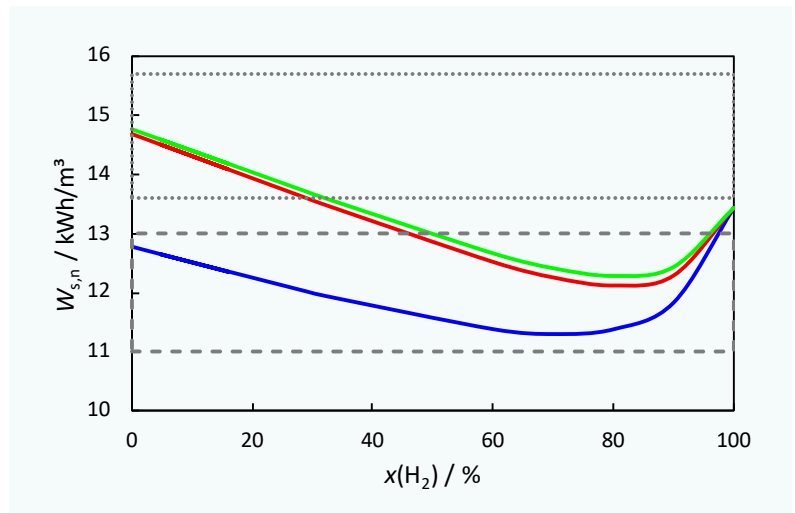
- kalorimetrisches Messprinzip
- stöchiometrisches Messprinzip
- korrelatives Messprinzip
- gaschromatographisches Messprinzip

Dabei sind Kalorimeter grundsätzlich zur Messung wasserstoffhaltiger Gase geeignet. Die Verbrennung und Messung der Temperaturerhöhung eines Wärmeträgers ist unempfindlich gegenüber der Gaszusammensetzung, sofern die Mengenbestimmung des Brenngases nicht durch Wasserstoff beeinflusst wird und der Brenner für das Gasgemisch geeignet ist.

Stöchiometrische Verfahren beruhen auf dem Zusammenhang zwischen der Stoffmenge des Brenngases und der Stoffmenge des zur Verbrennung notwendigen Sauerstoffs. Dieses Verhältnis ist für Kohlenwasserstoff-Gemische ungefähr konstant. Bei Anwesenheit von Wasserstoff ändert sich dieses jedoch, daher sind Messgeräte, die auf diesem Messprinzip beruhen, für wasserstoffhaltige Gase ungeeignet.

Korrelative Verfahren nutzen den Zusammenhang zwischen mehreren physikalischen Eigenschaften des Gasgemisches (z. B. Wärmeleitfähigkeit, Dielektrizitätszahl, Schallgeschwindigkeit) und seiner Zusammensetzung, um ein Pseudo-Erdgas mit drei oder vier Komponenten zu berechnen. Daraus lässt sich dann der Brennwert rechnerisch ermitteln. Die Zumischung von Wasserstoff ändert diese Korrelation, sodass diese Klasse von Messgeräten für wasserstoffhaltige Erdgase ungeeignet ist, sofern nicht durch einen weiteren Sensor eine Detektionsmöglichkeit für den Wasserstoff geschaffen wird.

Bei gaschromatographischen Verfahren wird das Brenngas mit einem Trägergas durch eine Trennsäule getrieben, dabei in seine Komponenten aufgetrennt und anschließend einem Detektor zur Quantifizierung zugeführt. Durch Multiplikation des so ermittelten Stoffmengenanteils mit der Eigenschaft des jeweiligen Reingases können verschiedene Eigenschaften des Brenngases, z. B. Brennwert, Dichte im Normzustand, Methanzahl, berechnet werden. Wasserstoffhaltige Brenngase können mithilfe gaschromatographischer Ver-



fahren nur dann korrekt gemessen werden, wenn auch eine Abtrennung und Quantifizierung des Wasserstoffanteils erfolgt.

Gasbeschaffheitsmessgeräte

Im gesetzlichen Messwesen hat sich als Messverfahren für die Bestimmung der Gasbeschaffenheit in den vergangenen 30 Jahren die Prozessgaschromatographie durchgesetzt. Seit 2008 existieren nach der Eichordnung bzw. Mess- und Eichverordnung anerkannte Technische Regeln für die Fehlergrenzen der Stoffmengenanteile [3, 5].

Eine quantitative Bestimmung des Wasserstoffanteils mittels Gaschromatographie stellt grundsätzlich kein Problem dar, daher ist diese Gerätekategorie gut für den Einsatz bei wasserstoffhaltigen Brenngasen geeignet. Mit der seit ca. 2005 zunehmenden Anzahl von Biogaseinspeiseanlagen wurden dedizierte Prozessgaschromatographen entwickelt, die entsprechend den eichtechnischen Regelungen [6] die relevanten 9 Komponenten eines mit Flüssiggas konditionierten Biogases messen konnten, darunter auch Wasserstoff. Der Messbereich blieb jedoch auf ca. $x(\text{H}_2) < 5\%$ beschränkt. Seit neuerer Zeit sind Prozessgaschromatographen auf dem Markt, die Wasserstoff in Erdgas auch in höheren Konzentrationen quantifizieren können. Der Messbereich derartiger Geräte erstreckt sich momentan bis zu einem maximalen Wasserstoffanteil zwischen 12 und 20 %. Größere Messbereiche sind grundsätzlich möglich.

Gasnetz-Zustandsrekonstruktionssysteme

Als Zustandsrekonstruktionssysteme bezeichnet man Computersysteme, die den Fließzustand in einem Gasnetz berechnen. Diese Systeme benötigen als Eingangsdaten Informationen über die Netztopologie (u. a. Rohrlängen, Rohrdurchmesser, Rohrrauigkeiten, geographische Koordinaten), die Gasbeschaffheiten an den Einspeisestellen

Abbildung 2: Wobbe-Index $W_{s,n}$ dreier typischer Erdgase als Funktion des Wasserstoffanteils $x(\text{H}_2)$. Blau: L-Gas aus Holland, rot: H-Gas aus der Nordsee, grün: H-Gas aus Russland. Die gestrichelten Linien geben den minimal und den maximal zulässigen Wobbe-Index für L-Gas, die gepunkteten Linien für H-Gas an.

sowie die ein- und ausgespeisten Volumina. Auf Basis dieser Eingangsdaten wird über eine strömungstechnische Berechnung der Strömungszustand im gesamten Netz ermittelt, einschließlich der Strömungsgeschwindigkeit für jedes Rohrelement, sowie die zeitliche und örtliche Verteilung der Gasbeschaffenheit im Netz. Damit kann jeder Ausspeisestelle ein individueller Brennwert zugeordnet werden. Eine detaillierte Darstellung derartiger Systeme und ihrer verschiedenen Ausprägungen für den Einsatz im geschäftlichen Verkehr findet sich in [23].

Gasnetz-Zustandsrekonstruktionssysteme sind für den Einsatz bei wasserstoffhaltigen Gasen grundsätzlich geeignet. Bei Brennwertrekonstruktionssystemen ergeben sich keine zusätzlichen Anforderungen. Bei Gasbeschaffenheitsrekonstruktionssystemen ist Voraussetzung, dass der Wasserstoffanteil an den Einspeisestellen quantitativ bestimmt wird.

Ersatzverfahren

Der Gesetzgeber erlaubt die Bestimmung des Abrechnungsbrennwertes auch auf der Basis von technischen Regeln [2]. Der Regelermittlungsausschuss hat dafür das DVGW Arbeitsblatt G 685-2 [17] identifiziert.

Entsprechend dem Stand der Technik wird die Gaszusammensetzung oder der Brennwert an den Einspeisestellen eines Gasnetzes mittels eichrechtskonformer Messgeräte (Gaschromatographen, Rekonstruktionssysteme) bestimmt. Handelt es sich um ein einseitengespeistes Netz, kann der Einspeisebrennwert unmittelbar für die Abrechnung herangezogen werden. Bei mehrseitengespeisten Netzen kann der Abrechnungsbrennwert nach verschiedenen Verfahren bestimmt werden. Weichen die Einspeisebrennwerte nur geringfügig vom Abrechnungsbrennwert ab, so kann als Abrechnungsbrennwert der mengengewichtete Mittelwert verwendet werden. Als geringfügig ist hier eine Abweichung von maximal 2 % definiert [17]. Diese Regelung soll Verbraucher vor übermäßiger Bevorteilung oder Benachteiligung schützen.

Weichen die Einspeisebrennwerte um mehr als 2 % vom mengengewichteten Mittelwert ab, so sind andere anerkannte Verfahren einzusetzen. Derzeit allgemein anerkannt ist das Verfahren der Gasbeschaffenheitsverfolgung. Dieses Verfahren ähnelt dem Verfahren der Gasbeschaffenheitsrekonstruktion, das bereits seit 1986 eichrechtskonform in Deutschland eingesetzt wird, mit im wesentlichen folgenden Unterschieden [23]:

- Basis als Technische Regel ist das DVGW Arbeitsblatt G 685-2 [17] und nicht die PTB-Anforderung 7.64 [4],

- die Eingangsdaten müssen nicht signiert oder ähnlich vor Verfälschung gesichert sein,
- die Ausspeisevolumenmessungen können durch Standardlastprofile der angeschlossenen Verbraucher ersetzt werden,
- als Ergebnis ergibt sich ein mengengewichteter Monatsmittelwert und nicht ein arithmetisch gemittelter Tagesmittelwert und
- das System unterliegt nicht der Konformitätsbewertung und Eichung, aber der Verwenderüberwachung durch die Eichbehörden.

Reiner Wasserstoff

Lt. der aktuellen Ausgabe des DVGW Arbeitsblattes G 260 [15] unterteilt sich Wasserstoff als Grundgas in die Gruppe A mit weniger als oder gleich 2 % Gasbegleitstoffen ($x(\text{H}_2) \geq 98 \%$) und die Gruppe D mit weniger als oder gleich 0,03 % Gasbegleitstoffen ($x(\text{H}_2) \geq 99,97 \%$). Ein Vorschlag zur einfachen Bestimmung des Abrechnungsbrennwertes wird derzeit in den Fachgremien diskutiert. Danach soll für Wasserstoff mit einem Wasserstoffanteil $\geq 99,9 \%$ [7], dies beinhaltet die Gruppe D, der Brennwert des reinen Wasserstoffs nach DIN EN ISO 6976 [9] Anwendung finden. Bei Wasserstoff der Gruppe A wird der ungünstigste Fall angenommen, nämlich dass alle NebenkompONENTEN unbrennbar (Stickstoff) sind. Somit soll hier der Brennwert eines 2%-Stickstoff-Wasserstoff-Gemisches, berechnet nach DIN EN ISO 6976 [9], verwendet werden. Diese Vorgabe erscheint unter der Annahme, dass der Wasserstoff in der Regel mittels Elektrolyse hergestellt wird, plausibel, da in diesem Fall im wesentlichen mit Luft als Gasbegleitstoff zu rechnen ist, und vermeidet einen hohen messtechnischen Aufwand zur Charakterisierung und Quantifizierung der Gasbegleitstoffe.

Natürlich darf in jedem Fall auch die Gaszusammensetzung mit eichrechtskonformen Gasbeschaffenheitsmessgeräten bestimmt und der Brennwert als Mischbrennwert nach DIN EN ISO 6976 berechnet werden. Als Fehlergrenze für den Wasserstoffanteil ist hier – abweichend von [5] – 0,05 % (mol/mol) zu fordern. Auch der Einsatz von für diesen Zweck von der PTB als geeignet erklärten und regelmäßig mit rückgeführten, zertifizierten Normalen kalibrierten Geräten ist zulässig [7]. Mindestens für eine Übergangszeit wird auch der Einsatz von Prozessgaschromatographen, die nur die Verunreinigungen bestimmen – und dies mit geringer Unsicherheit – unterstützt, wie beispielsweise bei der Wasserstoffherstellung der Firma Uniper SE in Falkenhagen [26].

Der Einsatz von Brennwertmessgeräten wäre hier wegen ihrer großen Fehlergrenze nicht sinnvoll.

Wasserstoff-Erdgas-Gemische

Grundsätzlich lassen sich in Abhängigkeit von der Lage der Einspeisestellen verschiedene Einspeisenszenarien konstruieren. Unterschieden muss dabei zwischen Einspeisungen in das Transportnetz, in ein regionales Verteilnetz oder in ein Ortsverteilstromnetz. Einspeisungen in das Transportnetz sind in Hinblick auf die Energiebestimmung beim Endverbraucher grundsätzlich als unkritisch zu betrachten. Bei Einspeisungen in ein regionales Verteilnetz sind Einseiteneinspeisungen im allg. unkritisch, jedoch ist eine Flussumkehr aufgrund von Druckwechseln und daraus resultierende Pendelzonen und eventuelle Aufkonzentrationen von Wasserstoff zu vermeiden. Einseiteneinspeisungen in Ortsnetze sind deswegen grundsätzlich kritisch zu sehen, da Ortsnetze häufig hochgradig vermascht sind und keine eindeutige Flussrichtung vorherrscht.

Mehrseiteneinspeisung auf jeder Druckstufe kann immer zu Misch- und Pendelzonen führen, daher ist diese Einspeisesituation grundsätzlich messtechnisch oder regulatorisch so zu behandeln, dass kein Endverbraucher unzulässig bevorteilt oder benachteiligt wird.

Wasserstoff weist einen Brennwert von $H_s(\text{H}_2) = 3,5402 \text{ kWh/m}^3$ auf, ist somit weit von den Brennwerten der derzeit gehandelten Erdgase ($8,8 \text{ kWh/m}^3 < H_s(\text{Erdgas}) < 12,9 \text{ kWh/m}^3$ [15, 22]) entfernt. Wird der Wasserstoff vor oder bei der Einspeisung in das Verteilnetz zugemischt, so ergibt sich der Einspeisebrennwert an diesem Punkt

- durch die Messung des Brennwertes nach der Mischung oder
- durch Berechnung des Mischgasbrennwertes als mengengewichteter Mittelwert auf der Grundlage der Mengenströme und Brennwertwerte der zur Mischung kommenden Gase.

Erfolgt die Einspeisung jedoch innerhalb des Verteilnetzes, ist für die Ermittlung des Abrechnungsbrennwertes zunächst zu untersuchen, ob das Verteilnetz in Brennwertzonen aufgeteilt werden kann. So könnte man beispielsweise eine Zone, in der die Verbraucher mit Sicherheit ein Wasserstoff-Erdgas-Gemisch erhalten, eine zweite Zone, in der die Verbraucher mit Sicherheit nur Erdgas erhalten und eine dritte Zone definieren, in der für die dort ansässigen Verbraucher keine eindeutige Aussage getroffen werden kann. In Zone 1 und 2 erhalten die Verbraucher dann den jeweiligen Brennwert des Mischgases bzw. des Erdgases als

Abrechnungsbrennwert zugeordnet. In Zone 3 ist entsprechend dem Stand der Technik (neben der Messung an allen Ausspeisestellen) nur das Verfahren der Gasbeschaffenheitsverfolgung einsetzbar. Jedoch existieren technische Randbedingungen, die diesen Einsatz unmöglich machen, z. B. in sehr stark vermaschten Netzen oder in Netzen mit geringen Drücken und niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. In diesen Fällen möchte man auf das Verfahren der Mittelwertbildung zurückgreifen. Dies steht jedoch im Widerspruch zu der oben diskutierten sog. 2%-Grenze, die bei Wasserstoffzumischung schon bei geringer Zumischung verletzt wird. Daher gibt es momentan in den oben genannten Gremien Überlegungen, den einfachen Algorithmus zur Bestimmung einer Überschreitung der 2%-Grenze um eine Komponente zu erweitern, die den zeitlichen und mengenmäßigen Anteil des eingespeisten Wasserstoffs berücksichtigt, sodass der durchschnittliche Verbraucher nicht unangemessen benachteiligt und dennoch – für eine Übergangszeit – eine Wasserstoffeinspeisung ermöglicht wird:

$$\Delta H_{s,w} = \frac{H_s(i) - H_{s,\text{eff}}}{H_{s,\text{eff}}} \times \frac{n(i)}{n_{\text{tot}}} \times f(\text{SLP}) \quad (2)$$

mit

$\Delta H_{s,w}$	gewichtete Brennwertabweichung
$H_s(i)$	Brennwert der Einspeisung i
$H_{s,\text{eff}}$	Abrechnungsbrennwert
$n(i)$	Anzahl der Stunden mit Einspeisung in Einspeisestelle i
n_{tot}	Anzahl der Stunden der Abrechnungszeitspanne
$f(\text{SLP})$	Funktion auf der Basis von Standardlastprofilen (SLP)

Derzeit diskutiert wird ein Vorschlag, den mengenmäßigen Anteil des Wasserstoffs auf 10 % und den zeitlichen Anteil auf 50 % zu begrenzen [27]. Für diese Zahlen gibt es zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses keine belastbaren rechtlichen oder technischen Hintergründe, daher können sie sich im Laufe der Diskussion noch ändern. Zur Berücksichtigung des Einspeiseprofiles wird vorgeschlagen, die Stundenvolumina mit einem Faktor zu versehen, der sich aus den Standardlastprofilen der angeschlossenen Verbraucher ergibt. Das Ziel ist in jedem Fall, einfach nachvollziehbare und prüfbare Regeln zu schaffen.

Als Alternative bietet sich an, den Wasserstoff mit einem Zusatzgas zu verschneiden (zu konditionieren), um eine eichrechtskonforme Abrechnung zu ermöglichen. Verwendet man beispielsweise das Grundgas zur Konditionierung, ergeben sich bei Einhaltung der 2%-Grenze maximale Wasserstoffanteile zwischen 3 % und 5 %. Damit steht für die Konditionierung des Wasserstoffs nur LPG (Liqui-

⁵ Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Quellen hier thematisch geordnet.

fied Petroleum Gas, Flüssiggas) zur Verfügung, um ein regelkonformes Mischgas zu erzeugen. In diesem Fall findet jedoch nicht die 2%-Grenze nach DVGW G 685-2 [17] Anwendung, sondern die nach PTB TR G 19 [6], die für den Fall einer technisch beeinflussbaren Gasmischung eine Grenze von 0,25 % einführt. Beispielsweise könnte durch Zumischung von 31,83 % Propan zu Wasserstoff ein Mischgas mit gleichem Brennwert wie Gas aus Russland erzeugt werden ($H_s = 11,187 \text{ kWh/m}^3$; $d_{\text{rel}} = 0,533$; $W_s = 15,329 \text{ kWh/m}^3$).

Eine weitere Alternative ist grundsätzlich eine Abrechnung des Verbrauchers nach dem Bestwertverfahren. Dabei wird dem Verbraucher der niedrigste Brennwert zugeordnet, der in seinem Brennwertbezirk vernünftigerweise auftreten kann. Damit werden jedoch die Kosten der Wasserstoffeinspeisung auf die Allgemeinheit umgelegt, daher ist dieses Verfahren sicherlich nur für eine sehr begrenzte Übergangszeit tolerabel, z. B. wenn

- die Wasserstoffeinspeisung absehbar nur kurzzeitig und in geringen Mengen erfolgt oder
- bis in dem Brennwertbezirk eine ausreichende Messinfrastruktur installiert ist oder
- die Wasserstoffeinspeisung absehbar schnell soweit zunimmt, dass zukünftig die 2%-Grenze nicht überschritten wird.

Ausblick

Um auch höhere Wasserstoffeinspeisungen in Ortsverteilnetze zulassen zu können, werden in der PTB zusammen mit der Hochschule München Forschungen angestellt, die es erlauben sollen, kleinteilige Brennwertbezirke zu bilden. Dabei sollen vorzugsweise im Netz vorhandene Sensordaten, z. B. die Schallgeschwindigkeit des Gases bei Ultraschallgaszählern, die Wärmekapazität des Gases bei thermischen Massestromzählern oder die Steuersignale von modernen Verbrauchseinrichtungen mit Verbrennungsoptimierung, genutzt werden, um eine Information über die Ausbreitung des Wasserstoffs im Netz zu generieren. Idealerweise sind diese Sensoren an Smart Meter Gateways angeschlossen, sodass der Informationsfluss zum Netzbetreiber ohne zusätzlichen Aufwand sichergestellt ist [21].

Literatur⁵

- [1] *Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen (Mess- und Eichgesetz – MessEG)*
- [2] *Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung – MessEV)*
- [3] *Ermittelte Regeln und Erkenntnisse des Regelermittlungsausschusses nach § 46 des Mess- und Eichgesetzes*; Hrsg.: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, 22.03.2021
- [4] PTB-Anforderung 7.64:1999-12; *Messgeräte für Gas – Brennwertmessgeräte, Ermittlung von Abrechnungsbrennwerten und weiteren Gasbeschaffungsdaten mittels Zustandsrekonstruktion*
- [5] *Anforderungen an Geräte zur Bestimmung der Gasbeschafftheit*, PTB-Mitt. **118(1)** (2009) 19–20
- [6] PTB Technische Richtlinie G 14:2007-11; *Messgeräte für Gas – Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz*
- [7] PTB Technische Richtlinie G 19:2014-12; *Messgeräte für Gas – Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz*
- [8] PTB Technische Richtlinie G 22:2020-04; *Messgeräte für Gas – Regeln für den Übergang der DIN EN ISO 6976 von Ausgabe 2005 zur Ausgabe 2016*
- [9] DIN EN ISO 6976:2016-12; *Erdgas – Berechnung von Brenn- und Heizwert, Dichte, relativer Dichte und Wobbeindex aus der Zusammensetzung (ISO 6976:2016)*
- [10] DIN EN ISO 12213-2:2010-01; *Erdgas – Berechnung von Realgasfaktoren – Teil 2: Berechnungen basierend auf einer molaren Gasanalyse als Eingangsgröße (ISO 12213-2:2006)*
- [11] DIN EN ISO 12213-3:2010-01; *Erdgas – Berechnung von Realgasfaktoren – Teil 3: Berechnungen basierend auf physikalischen Stoffeigenschaften als Eingangsgrößen (ISO 12213-3:2006)*
- [12] DIN EN ISO 15971:2014-09; *Erdgas – Messung der Eigenschaften – Wärmewerte und Wobbe-Index (ISO 15971:2008)*
- [13] DIN EN ISO 20765-2:2018-12; *Erdgas – Berechnung thermodynamischer Eigenschaften – Teil 2: Einphaseneigenschaften (gasförmig, flüssig und dickflüssig) für den erweiterten Anwendungsbereich (ISO 20765-1:2005)*
- [14] DVGW G 260:2013-03; *Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 260 (A), Gasbeschafftheit*
- [15] DVGW G 260 :2021-09; *Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 260 (A), Gasbeschafftheit*

- [16] DVGW G 685-1:2020-08; *Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 685-1 (A), Gasabrechnung – Grundlagen der Energieermittlung*
- [17] DVGW G 685-2:2020-08; *Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 685-2 (A), Gasabrechnung – Brennwert*
- [18] DVGW G 685-3:2020-08; *Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 685-3 (A), Gasabrechnung – Volumen im Normzustand*
- [19] DVGW G 685-6:2020-08; *Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 685-6 (A), Gasabrechnung – Kompressibilitätszahl (K-Zahl)*
- [20] DVGW Presseinformation vom 09.04.2019: *Mehr Wasserstoff technisch sicher verankern*, <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-09042019-mehr-wasserstoff-technisch-sicher-verankern>, abgerufen am 02.09.2021
- [21] Athanassios Alexiou, Joachim Schenk: *Sensor-based gas tracking. Data acquisition, linearization, and successive source tracking and separation*, *Energy Systems* **11** (2020) 581–606
- [22] Klaus Altfeld, Peter Schley: *Entwicklung der Erdgasbeschaffenheiten in Europa*, *Gaswärme international* **2** (2012) 57–63
- [23] Stefan M. Sarge: *Ermittlung von Gasbeschaffenheitskenngrößen für Erdgas im geschäftlichen Verkehr mittels Gasnetz-Zustandsrekonstruktion*, *PTB-Mitt.* **127(1)** (2017) 23–31
- [24] Stefan M. Sarge: *SGERG-modH2+ – Leistungsfähigkeit verschiedener Implementationen*, 17.06.2021, im Druck
- [25] Peter Schley, Tan-Trieu-Giang Nguyen, Roland Span, Andreas Hielscher, Gerhard Kleppek, Jos van der Grinten, Roland Schmidt, Stefan M. Sarge: *Calculation of Compression Factors and Gas Law Deviation Factors Using the Modified SGERG-Equation SGERG-mod-H2*. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn: 19.05.2022
<https://www.dvgw.de/medien/dvgw/gas/infrastruktur/dvgw-pk-1-5-3-forschungsbericht-sgerg88-mod-h2-eng.pdf>
- [26] Peter Schley, Dieter Wolf, Marco Henel, Holger Schreck, Gert Müller-Syring, Christian Fiebig, Roland Span: *Einfluss von Wasserstoff auf die Energiemessung und Abrechnung*, Hrsg.: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn, April 2014, S. 17
- [27] Peter Schley: *2 % Regel bei temporärer Einspeisung*, persönliche Mitteilung, 19.05.2021
- [28] Klaus Steiner: *Messabweichung und -unsicherheit beim Letztverbraucher infolge der Netzeinspeisung von Wasserstoff*, *gw Gas + Energie* **159(6)** (2018) 40–46

 **PTB** mitteilungen

Impressum

Die PTB-Mitteilungen sind metrologisches Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Die PTB-Mitteilungen stehen in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht.

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Postanschrift:

Postfach 33 45,
38023 Braunschweig

Lieferanschrift:

Bundesallee 100,
38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB

Dr. Fabian Plag (wissenschaftlicher Redakteur)

Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)

Sabine Siems (Redaktion / Lektorat)

Sebastian Baumeister / stilsicher.design (Layout / Satz)

Telefon: (05 31) 592-82 02

Telefax: (05 31) 592-30 08

E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Erscheinungsweise und Copyright

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Printed in Germany ISSN 0030-834X

Die fachlichen Aufsätze aus dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen sind auch online verfügbar unter:
doi: 10.7795/310.20220299



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: 0531 592-3006
Fax: 0531 592-3008
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de