

# Kontinuierliche Ammoniakbestimmung durch Leitfähigkeitsmessungen im Kondensat

*Heike Wünscher<sup>1</sup>, Steffen Herbst<sup>1</sup>, Andreas Frank<sup>2</sup>, Jean Michel Zapf<sup>2</sup>, Thomas Frank<sup>2</sup>, Michaela Schnider<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik, Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt, Deutschland*

<sup>2</sup>*Umwelttechnik MCZ GmbH, Hohe Straße 8, 61231 Bad Nauheim, Deutschland*

<sup>3</sup>*Lukeneder GmbH, Dr.-Friedrichs-Ring 41, 08056 Zwickau, Deutschland*

## Zusammenfassung

Ammoniakgas entsteht in Biogasanlagen bei der Vergärung stickstoffreicher Substrate. Es übt einen direkten Einfluss auf die Effizienz der Biogaserzeugung aus, indem es die Aktivität wichtiger Mikroorganismen beeinflusst. Ein niedriger, weitgehend stabiler Gehalt ist für die Wirtschaftlichkeit und Stabilität der Anlagen wesentlich. Daher wird ein Überwachungssystem entwickelt, das über einen bestimmten Zeitraum kontinuierlich misst. Für ein Ammoniakmesssystem stellen die korrosiven Eigenschaften des Biogases, die äußerst komplexe Zusammensetzung und der hohe Kohlendioxidgehalt wesentliche Herausforderungen dar.

Für die Bestimmung wurde deshalb ein Verfahren entwickelt, das auf dem einfachen Prinzip der elektrischen Impedanzmessung beruht. Zur Verringerung der Querempfindlichkeiten durch gelöste Gase z.B. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S und flüchtige Karbonsäuren wird diese jedoch in einem Kondensat realisiert. Dieses wird erzeugt, indem das zu untersuchende Gas in eine stark basische wässrige Lösung geleitet und an einer gekühlten Oberfläche kondensiert wird, in die eine Interdigitalelektrode integriert wurde. Die sauren Komponenten des Biogases werden dabei in ihre nichtflüchtigen Formen überführt und gelangen somit nicht ins Kondensat.

Der hohe CO<sub>2</sub>-Gehalt des Biogases überfordert jedoch bei gewerbsmäßiger Benutzung schnell die Kapazität der Base. Daher muss das Kohlendioxid im Rahmen einer Vorreinigung abgetrennt werden. Etablierte physikalische Trenntechnologien sind dafür nicht geeignet, da sie den Ammoniakgehalt unkontrollierbar verändern. Deshalb wurde ein eigener Trennprozess evaluiert, mit dem Ammoniak definiert angereichert wird. Das Messsystem sowie erreichte Ergebnisse werden vorgestellt.

**Keywords:** Biogas, Interdigitalelektrode, Impedanz, Gassensorik

## 1. Einleitung

Ammoniak entsteht in Biogasanlagen bei der Vergärung stickstoffreicher Substrate. Das Gas übt einen direkten Einfluss auf die Effizienz der Biogaserzeugung aus, indem es die Aktivität wichtiger Mikroorganismen beeinflusst, d.h. in der Regel hemmt. Bei der Verstromung von Biogas kann zudem ein zu hoher Ammoniakgehalt die Lebensdauer von Komponenten im Blockheizkraftwerk (BHKW) deutlich reduzieren.

Da sich Mikroorganismen in begrenztem Maße auf die Situation einstellen können, ist ein niedriger, weitgehend stabiler Gehalt für Effizienz und Stabilität der Anlagen wesentlich [1]. Aktuell gibt es jedoch kein System, das den Ammoniakgehalt von Biogas inline misst und dabei einen weiten Konzentrationsbereich überstreicht. Daher werden Rückschlüsse auf die Gaszusammensetzung meist aus Stichproben gezogen, wie dies in den Regelwerken (z.B. VDI 3869, VDI 3496 oder DIN 38406-E5) beschrieben ist. Für den

Betreiber sind neben der Notwendigkeit der Probennahme auch der zeitlich verzögerte Erhalt der Ergebnisse und der zusätzliche Aufwand für die Anlagendokumentation nachteilig. Es soll deshalb ein inline-Messsystem entwickelt werden, das einen großen Konzentrationsbereich abdeckt und eine einfache Anbindung an ein elektronisches System erlaubt. Eine ausreichende Stabilität, einfaches Handling und ein angemessener Aufwand bei der Instandhaltung spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Entwicklungsziel war daher ein Messsystem, das all diese Bedingungen erfüllt und finanziell erschwinglich ist.

Bei der Entwicklung eines Ammoniakmesssystems für Biogas stellen die korrosiven Eigenschaften und die äußerst komplexe Zusammensetzung große Herausforderungen dar. Den wertbestimmenden Bestandteil des Gases

bildet das Methan mit einem Anteil von ca. 60 % [2]. Daneben kommen große Mengen nicht nutzbarer Gase vor, wie Kohlendioxid und Wasserdampf sowie eine Reihe problematischer Komponenten z.B. Schwefelwasserstoff und Ammoniak. Hohe Ammoniakgehalte verursachen zudem teilweise feste Ablagerungen auf Oberflächen.

Unter Berücksichtigung dieser speziellen Bedingungen wurde zur Ammoniakbestimmung ein System auf Basis einer Leitfähigkeitsmessung entwickelt. Bei Auswahl eines stabilen Elektrodenmaterials ist dieses Verfahren relativ robust. Das Methan sowie andere unlösliche Gasbestandteile stören die Bestimmung nicht. Bei der Gestaltung der Elektroden in Form flacher Interdigitalelektroden (IDE) lassen sich diese ggf. durch Abwischen reinigen. Allerdings wird für die Messung eine wässrige Phase benötigt. Diese muss generiert werden, bevor die Konzentrationsbestimmung beginnt.

## 2. Detektionsprinzip

Für die Bestimmung wird eine IDE genutzt. Um die wässrige Phase zu erzeugen, wird die IDE gekühlt, sodass sich auf ihrer Oberfläche ein Kondensat bildet (Abb. 1). Letzteres wird über einer wässrigen Basenlösung erzeugt, in die das zu bestimmende ammoniakhaltige Gas eingeleitet wird. Die inline-Messung von Ammoniak basiert auf der Impedanz dieses Kondensats. Gegenüber einer klassischen Leitfähigkeitsmessung hat dieses Vorgehen den Vorteil einer Verringerung der Querempfindlichkeit gegenüber Gasbestandteilen, die in Wasser löslich sind und dissoziieren können, z.B. Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und flüchtige Karbonsäuren. Je nach ihrem Verhältnis zum Ammoniakanteil können diese Komponenten die Leitfähigkeit erhöhen, aber auch erniedrigen, da sie die Basewirkung des Ammoniaks neutralisieren können. Daher ist eine rechnerische Korrektur unmöglich.

Da es sich bei den störenden Verunreinigungen ausschließlich um saure Komponenten handelt, können sie durch Einleiten in die Basenlösung in ihre nichtflüchtigen Formen überführt werden, sodass sie nicht ins Kondensat gelangen. Der pH-Wert der Basenlösung sollte zu diesem Zweck einen Wert von 10 übersteigen. Ammoniak wird unter diesen Bedingungen aus der Lösung freigesetzt und kann zusammen mit dem Wasserdampf kondensiert werden. Er verteilt sich während der Messung auf die Flüssigkeit und die darüber liegende Gasphase entsprechend der Henry-Konstante. Am

Kondensattropfen stellt sich erneut ein Verteilungsgleichgewicht ein.

Die Erzeugung und Impedanzmessung des Kondensats stellen den Kernpunkt des entwickelten Messsystems dar. Da Ammoniak in Wasser dissoziiert, erhöht sich die Leitfähigkeit des Tropfens im Vergleich zu einem rein wässrigen Kondensat und die Impedanz sinkt. Ammoniak ist die einzige basische Komponente des Biogases. Daher beeinflusst sie allein die Impedanz und stellt damit ein Maß für seinen Gehalt im Gas dar.

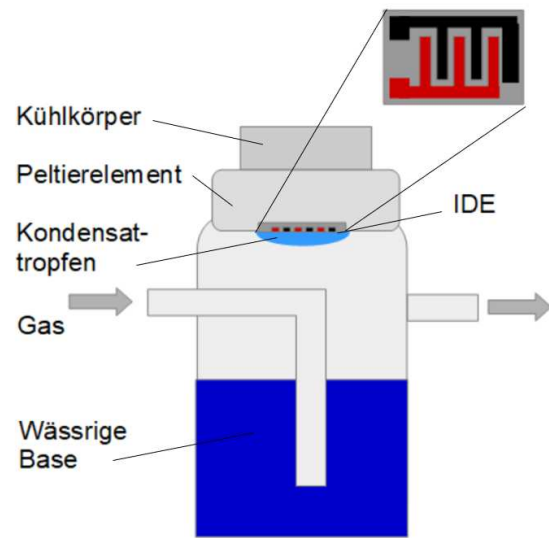


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau

In früheren Versuchen konnte bereits gezeigt werden, dass diese Methode prinzipiell funktioniert und Ammoniak auch bei einem niedrigen Gehalt erfasst werden kann [3].

## 3. Trennkonzep

Die geringe Selektivität des Messverfahrens stellt eine wesentliche Herausforderung für die Richtigkeit der Ergebnisse dar. Denn durch Einleiten in die Base können nur geringe Restgehalte der Säure bildenden Gase wirkungsvoll abgefangen werden. Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt des Biogases, der einen Anteil von 25 ... 55 Vol % ausmacht, führt bei gewerblicher Nutzung jedoch dazu, dass die Kapazität der Basenlösung bereits nach kurzer Zeit erschöpft ist und ersetzt werden müsste [4]. Die notwendige Häufigkeit ist für den Betreiber unakzeptabel.

Der Hauptteil des Kohlendioxids muss deshalb bereits vor dem Einleiten in die Base entfernt werden. Dazu ist ein leistungsfähiges Trennverfahren erforderlich, das sich auch für den größeren Maßstab der realen Biogasproduktion eignet, die Konzentration des  $\text{NH}_3$  jedoch nicht unkontrollierbar verändert.

Etablierte physikalische Trenntechnologien, wie z.B. Gaswäsche, Swing-Trockner oder Druckwechseladsorption erwiesen sich aus diesem Grunde als ungeeignet. Deshalb wurde nach leistungsfähigen Alternativen für den technischen Maßstab gesucht. In der Patentliteratur ist ein Anreicherungsverfahren beschrieben, das für die Vorreinigung erprobt wurde. Es beruht auf der Komplexbildung des gasförmigen Ammoniaks. Dabei wird dieser als Ligand selektiv an ein festes 3d-Übergangsmetallsalz angelagert und thermisch daraus freigesetzt [5]. Der Prozess ist reversibel.

Nach dieser Anreicherungsprozedur wird das ammoniakhaltige Gas in die Base eingeleitet, wo nur noch Reste der störenden Bestandteile entfernt werden müssen. Die dabei gebildete Gasphase wird dann an der IDE kondensiert und die Impedanz bestimmt. Durch definierte Zugabe eines Spikegases mit bekanntem Ammoniakgehalt kann die Messung kalibriert werden (Abb. 2). Gleichzeitig kann überprüft werden, ob die Gasreinigung erfolgreich war, oder ob saure Komponenten die Leitfähigkeit des Kondensats beeinflussen.

#### 4. Aufbau

Funktionelle Hauptkomponenten des Messsystems bilden die Gasseparationseinheit, an der die Hauptmenge der störenden Verunreinigungen entfernt und Ammoniak definiert angereichert wird, und die Kondensationseinheit, an der die Leitfähigkeitsmessungen im Kondensat stattfinden (Abb.2).

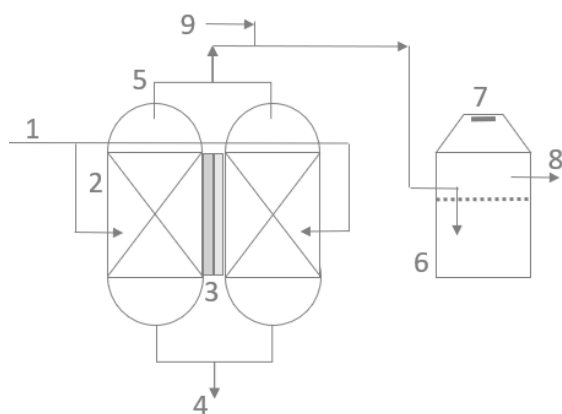


Abb. 2: Gesamtsystem

- 1 Einlass Biogas
- 2 Festbettreaktor mit 3d-Übergangsmetallsalz
- 3 Peltierelement
- 4 Gasausgang (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und Restgase)
- 5 Ammoniakauslass

- 6 Behälter mit Basenlösung
- 7 Kondensationseinheit
- 8 Exhaust
- 9 Auffüll- /Spikegas

#### 4.1. Gasseparationseinheit

Die Gasseparationseinheit besteht aus zwei Festbettreaktoren, die beide mit dem festen Übergangsmetallsalz z.B. NiSO<sub>4</sub>·6 H<sub>2</sub>O gefüllt sind. Beide sind mit einem Peltierelement ausgestattet und können jeweils geheizt und gekühlt werden. Über Ventile wird der Gasein- und -auslass gesteuert.

Wie in Abb. 2 dargestellt ist, wird im ersten Schritt das Gas über den Einlass 1 dem Reaktor zugeführt, wobei das Salz bei niedriger Temperatur überströmt wird. Ammoniak wird selektiv koordinativ gebunden, während Kohlendioxid und andere Gasbestandteile den Reaktor weitgehend ungehindert passieren können. Letztere werden über den Gasausgang 4 entfernt. Im zweiten Schritt wird der Ammoniak bei erhöhter Temperatur aus dem Festbettreaktor freigesetzt. Das Salz steht danach für eine erneute Beladung zur Verfügung. Die beiden Reaktoren werden dabei wechselseitig beheizt bzw. gekühlt, sodass ein kontinuierlicher Gasstrom erhalten bleibt. Das ammoniakhaltige Gas verlässt den Festbettreaktoren verzögert über den Ammoniakauslass 5, sodass es der Kondensationseinheit zugeführt werden kann.

#### 4.2. Kondensationseinheit

Die Kondensationseinheit besteht aus einem Sensorchip aus Silizium mit einer Interdigitalstruktur (IDE) und einer Temperaturdiode, die in eine PCB aus FR-4-Material intergriert ist. Von der Rückseite wird der Siliziumchip mit einem Peltierelement gekühlt (Abb. 3). Für eine effiziente Kühlung ist es mit Wärmeleitkleber direkt auf dem Sensorelement montiert. Vier Öffnungen an den Ecken der PCB erlauben die Verschraubung mit dem Gefäß, das die Base enthält.

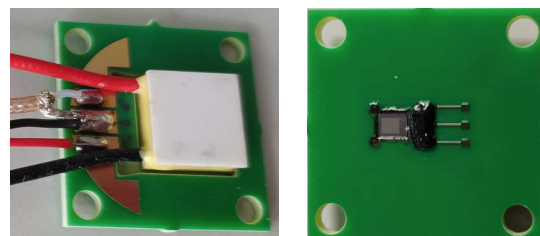


Abb. 3: Kondensationseinheit, rechts: PCB-Rückseite mit Peltierelement, links: PCB-Vorderseite

Die Kondensationseinheit wird über dem mit der Base gefüllten Gefäß angeordnet. Die IDE ist dabei nach unten gerichtet, damit sich das Kondensat bilden und wieder in die Flüssigkeit tropfen kann. Dadurch stellt sich ein stabiler Zustand an der IDE ein und die Impedanz erreicht konstante Werte.

Als Elektrodenmaterial der IDE wurde Molybdändisilizid ( $\text{MoSi}_2$ ) ausgewählt. Es besitzt keine Isolation, sodass die Leitbahnen mit dem Kondensat galvanisch gekoppelt sind. Die Oberfläche ist eben und porenfrei und kann leicht gereinigt werden. Das Elektrodenmaterial erwies sich in Ammoniaklösung als korrosionsstabil über Monate hinweg [3].

Die PCB ist durch Drahtbonden mit dem Sensorchip verbunden. Über Durchkontakte werden die elektrischen Kontakte auf die Rückseite geführt, wo sie besser gegenüber dem Medium geschützt sind. Die Oberfläche und die Leitbahnen wurden durch Lötstopplack bzw. die Abscheidung von ChemNiPdAu weitgehend versiegelt. Die Durchkontakte wurden außerdem durch ein Plugging verschlossen. Die Kontaktbereiche zwischen Sensorchip und PCB sowie die gebondeten Bereiche sind vergossen.

## 5. Funktion

### 5.1. Ammoniakmesssystem

Das Ammoniakmesssystem ist für die Anbindung an das Rohrleitungssystem des Fermenters vorgesehen, an dessen Ausgang bzw. an einem Bypass daran. Damit soll die  $\text{NH}_3$ -Erzeugung zu festgelegten Zeiten, z.B. nach einer Substratzugabe kontinuierlich über einen bestimmten Zeitraum verfolgt werden. Das Biogas (ggf. nach der  $\text{H}_2\text{S}$ -Bestimmung) wird dabei mit einer Pumpe dem Messsystem dosiert zugeführt. Es passiert einen der beiden Festbettreaktoren, in denen das  $\text{NH}_3$ -Gas zeitweise fixiert wird. Die übrigen Gasbestandteile, u.a. das bei der Biogaserzeugung erwünschte Methan, verlassen den Reaktor und können wieder dem Nutzgasstrom zugeführt werden.

Nach Freisetzung des Ammoniaks aus dem Festbettreaktor wird mit dem Auffüll- bzw. Nullgas ein definiertes Gasvolumen hergestellt, das schließlich in die Basenlösung eingeleitet und kondensiert wird. Das ammoniakhaltige Gas gelangt am Ende in den Exhaust 8 und kann durch Säure neutralisiert und ggf. entsorgt werden.

Die Impedanzmessung erfolgt kontinuierlich anhand einer einzelnen Frequenz. Dafür

erweist sich der Bereich zwischen ca. 20 kHz und 100 kHz als geeignet.

Nach der Equilibrierung bildet das Kondensat einen zusammenhängenden Tropfen, der die gesamte Oberfläche der IDE bedeckt. Er ist etwa 1 mm dick. Typischerweise liegt die Eindringtiefe des elektrischen Streufeldes der IDE im Bereich der räumlichen Periode der Elektroden [6-9]. Da die hier verwendeten Elektroden eine Breite von 33  $\mu\text{m}$  und einen Abstand von 25  $\mu\text{m}$  haben, beträgt die räumliche Periode 58 mm. Innerhalb dieses Bereichs entsteht während der Impedanzmessung ein elektrisches Feld, auf den sich der Stromfluss konzentriert. Weil die Dicke der Kondensatschicht ist sehr viel größer als dieser räumliche Bereich, haben kleinere Dickenunterschiede des Kondensattropfens keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Die Dauer der Equilibrierung des Systems hängt von äußeren Parametern, wie den Volumina von Basenlösung und Gasphase, dem Volumenstrom und der Temperaturdifferenz ab.

### 5.2. Temperaturmanagement

Das Messsystem soll bei Umgebungstemperaturen arbeiten, die auch oberhalb der normalen Raumtemperatur liegen können, um die Anwendung an heißen Sommertagen zu ermöglichen. Durch die Temperaturabhängigkeiten der verschiedenen Gleichgewichte und der Messelektronik sind konstante Temperaturen an der IDE und der Umgebung für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wichtig.

Das Temperaturmanagement des Peltierelementes wird auf Basis einer aktiven Kühlung mit Kühlkörper und Lüfter realisiert. Die Regelung des Peltierelementes beruht auf den Daten der Temperaturdiode des Siliciumsensors. Die Diodenflussspannung bei Konstantstrom (100  $\mu\text{A}$ ) bildet das Maß für die aktuelle Temperatur. Der PID-Regler des Controllers TEC-1091 (Fa. Meerstetter Engineering) übernimmt die Regelung.

Die Impedanzdaten werden einer AD-Wandlung unterzogen, um deren Verarbeitung außerhalb des Ex-Schutzbereichs der Biogasanlage zu ermöglichen. Dazu wird der Schaltkreis AD5933 (Fa. Analog Devices) genutzt, der in der Nähe der IDE platziert ist (Abb. 4).

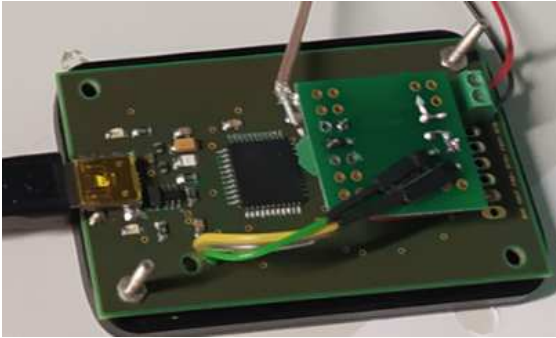


Abb. 4: Platine für die AD-Wandlung

Die Vorverarbeitung erfolgt auf Basis eines Ersatzschaltbilds mit einem in Reihe und einem parallel geschalteten Widerstand sowie einer Kapazität. Die gewandelten Daten können über USB auf einen Laptop übertragen werden.

## 6. Ergebnisse und Diskussion

Die Ammoniakmesseinheit, bestehend aus Kondensationseinheit, Temperaturmanagementsystem und Signalaufbereitung wurde aufgebaut und in seinem Zusammenwirken charakterisiert. Dabei wurde ein Peltierelement (11,2 x 11,2 qmm, 0,42 W, Adaptive) verwendet, das auf einem Stopfen (NS 29, Brand) montiert wurde. Dieser wurde auf einen Dreihalskolben mit Baselösung aufgesteckt. Die Wärmeabfuhr von der Rückseite des Peltierelements erfolgte mit einem BGA-Kühlkörper mit Aluminiumstiften und Lüfter. Die ersten Versuche wurden ohne Ammoniakzustrom durchgeführt (Abb. 5).



Abb. 5: Kondensationseinheit, integriert in den Laboraufbau

Um Umgebungstemperaturen ( $T_u$ ) zu simulieren, wurde ein Klimaschrank benutzt.

Hierbei wurden Raumtemperaturen zwischen 16 und 33 °C erprobt. Wie unter realen Bedingungen wurde die teilweise recht warme Luft mit Hilfe des Lüfters zur Wärmeabfuhr vom Peltierelement genutzt.

Bei diesen Versuchen wurde die Einregelung der Oberflächentemperaturen ( $T_{IDE}$ ) auf Basis eines PT100-Bauelements realisiert, das neben der IDE platziert war. Dafür erwiesen sich die automatisch ermittelten PID-Parameter des Controllers als robust für Zieltemperaturen zwischen 11 und 25 °C. Die Kontrolle erfolgte durch die Standardabweichung der eingeregelter Oberflächentemperaturen war kleiner als 0,05 K. Eine Temperaturabsenkung an der IDE um ca. 8 K gegenüber der Umgebung führte zuverlässig zur Ausbildung eines stabilen Kondensats

Für die Impedanzmessungen wurde eine Stützstelle bei ca. 50 kHz herangezogen. Folgenden Ergebnisse wurden nach der AD-Wandlung erhalten (Tab.1):

Tab. 1: Impedanz  $Z$  und relative Standardabweichung  $\sigma_{rel}$  nach AD-Wandlung

$T_u / ^\circ\text{C}$	$T_{IDE} / ^\circ\text{C}$	$Z / \text{a.u.}$	$\sigma_{rel} / \%$
22	22	19741	0,6
22	14	9773	2,9

Die Werte in der oberen Zeile gehören zu einer trockenen IDE. Die Wiederholbarkeit wurde bei drei Messungen über jeweils 4 h ermittelt. Bezogen auf den Mittelwert ist sie besser als 0,01 %. Wie zu erkennen ist, übersteigt die derzeitige Messwertstreuung die Wiederholbarkeit um mehr als eine Größenordnung.

Zum Funktionstest des Aufbaus wurde die Impedanz eines reinen wässrigen Kondensats (0 ppm  $\text{NH}_3$ ) bestimmt. Dies fand über einer 0,3 m  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -Lösung statt, damit das  $\text{CO}_2$  der Raumluft in der Flüssigkeit gebunden wird. Nachdem sich der Aufbau equilibriert hatte, änderte sich die Impedanz über den gesamten Beobachtungszeitraum (5 h) nicht mehr, d.h. es trat keine Messwertdrift auf. Die Impedanz des Kondensats war erwartungsgemäß bedeutend geringer als im trockenen Zustand (Tab. 1, unten). Es wurde auch die Temperaturabhängigkeit des Impedanzsignals für das rein wässrige Kondensat ermittelt. Durch den endothermen Charakter der Autoprotolyse des Wassers ist eine fallende Impedanz mit steigender Temperatur zu erwarten. Allerdings weisen elektronische

Aufbauten in der Regel eine mehr oder weniger ausgeprägte eigene Temperaturabhängigkeit auf, die den Effekt der Protolyse überlagert.

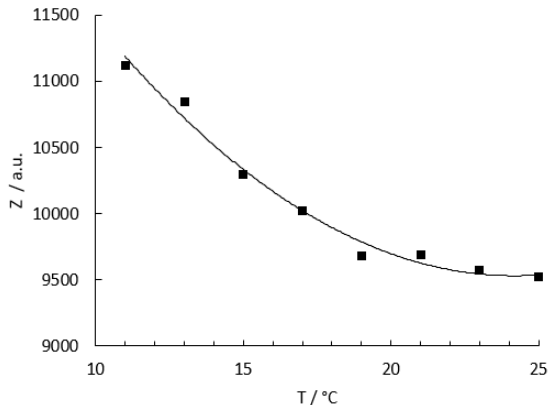


Abb. 6: Abhängigkeit des Impedanzsignals des rein wässrigen Kondensats von der Oberflächentemperatur an der IDE

Im Ergebnis dieser Funktionstests zeigt sich, dass der Aufbau ordnungsgemäß arbeitet. Wie in Abb. 6 zu erkennen ist, muss jedoch eine Temperaturabhängigkeit bei der Impedanzmessung berücksichtigt werden.

## 7. Ausblick

Ein Ammoniakmesssystem auf Basis einer Impedanzbestimmung wurde für die Anwendung an Biogasanlagen konzipiert. Einige Komponenten wurden aufgebaut und erprobt. Bei der Kondensationseinheit wurde für das Temperaturmanagement und die Signalaufbereitung die zunächst verwendete teure Labormesstechnik durch eigene funktionelle und elektronische Komponenten abgelöst. Damit wurde eine Voraussetzung für den gewerblichen Einsatz geschaffen.

Für den Aufbau des vollständigen Messsystems sind neben der Anbindung der Separationseinheit auch Messungen ammoniakhaltiger Gase unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen erforderlich. Da sowohl die Phasengleichgewichte als auch die Dissoziationen temperaturabhängig sind, sind zahlreiche Datensätze für die Korrektur per Software erforderlich, die durch Messungen generiert werden müssen.

Alternativ besteht die Möglichkeit, die basische Flüssigkeit auf eine konstante Temperatur zu heizen und an der IDE mit einer festen Temperatur zu arbeiten. Das reduziert den notwendigen Datensatz für die Softwarekorrektur und kann zugleich eine Erhöhung der Präzision bewirken. Dieses

Vorgehen ist insbesondere vorteilhaft, wenn die Außentemperaturen stark schwanken, sodass einmalig bestimmte PID-Parameter schwer eingehalten werden können. Allerdings erhöht sich dadurch der apparative Aufwand des Messsystems.

## Danksagung

Die Arbeiten sind Teil des Projektes AmmoniaSense, Förderkennzeichen KK5085701CS0. Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken für diese finanzielle Unterstützung.

## Literaturnachweis

- [1] [https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p\\_40100.pdf](https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_40100.pdf), abgerufen am 4.1.2023.
- [2] <https://www.chemie.de/lexikon/Biogas.html>, abgerufen am 2.4.24.
- [3] H. Wünscher, T. Frank, A. Cyriax, I. Tobehn-Steinhäuser, T. Ortlepp, T. Kirner, *Chem. Eng. Technol.* 43, No. 1, 99-103 (2020); doi: 10.1002/ceat.201900347.
- [4] <https://www.biogas-netzeinspeisung.at/technische-planung/funktionsprinzip-einerbiogasanlage/zusammensetzung-von-rohbiogas.html>, abgerufen am 9.1.2024.
- [5] Arthur Flueck, Armin Reller, „Adsorption/Desorption von Ammoniak“, WO001998014400A1, Januar 26, 1997
- [6] J. Oberländer, Ph.D. Thesis, University Marburg 2018.
- [7] P. van Gerwen, W. Laureyn, W. Laureys, G. Huybrechts, M. op de Beeck, K. Baert, J. Suls, W. Sansen, P. Jacobs, L. Hermans, R. Mertens, *Sens. Actuators B* 49, 73–80 (1998).
- [8] M. W. den Otter, *Sens. Actuators A* 96, 140–144 (2002).
- [9] M. Westenthanner, A. Barthel, P. He, D. Beckmann, A. Steinke, I. Tobehn, T. Frank, U. Pliquet, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013, 434, 012093; doi: 10.1088/1742-6596/434/1/012093