

Aufbau eines Sensorsystems zur *in situ* Analyse des Gasraums während mechanochemischen Reaktionen in einer Schwingmühle

Max Walter, Wolfhard Reimringer, Andreas Schütze und Christian Bur

Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland

Kontakt: max.walter@stud.uni-saarland.de

Einleitung

Im Gegensatz zu klassischen oftmals lösungsmittelbasierten Reaktionswegen oder energieintensiven Hochtemperaturreaktionen, stellt die Mechanochemie eine vielversprechende und nachhaltige Synthesemethode dar, die im Einklang mit den zwölf Prinzipien der grünen Chemie steht [1, 2]. Die Überwachung der Syntheseprozesse ist mittels *ex situ* als auch *in situ* Verfahren möglich. Der Vorteil von *ex situ* Methoden zur Überwachung der ablaufenden Prozesse ist der einfache und leicht durchzuführende Aufbau sowie die Nutzung etablierter Analysemethoden. Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch, dass der Prozess hierfür unterbrochen werden muss, wodurch das Resultat beeinflusst wird. Die Verwendung von *in situ* Methoden bietet die Möglichkeit, Messungen kontinuierlich in Echtzeit und ohne Unterbrechung des Syntheseprozesses vorzunehmen [3]. Bisher kommen hierfür allerdings aufwändige und kostenintensive Aufbauten zum Einsatz [4]. Ein alternativer, kostengünstiger Ansatz sind mit Sensoren modifizierte Versuchsgefäße. Diese sind um ein Vielfaches günstiger als bisher verwendete Aufbauten und einfacher in der Handhabung. Aktuell auf dem Markt befindliche Ausführungen messen allerdings lediglich Temperatur und Druck der Reaktionsatmosphäre [3].

In dieser Arbeit wurde ein modifizierter Deckel für den Mahlbecher einer Schwingmühle (MM500 nano, Retsch GmbH, Haan) entwickelt, mit einem Sensorsystem für die Messung von Sauerstoff und Wasserstoff, die während der Reaktion entstehen. Neben diesen beiden Hauptmessgrößen werden ebenfalls die Größen Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit überwacht. Der Aufbau wurde sowohl an Gasmischanlagen kalibriert und validiert als auch in praktischen Mechanochemie-Experimenten erprobt.

Methoden und Materialien

Der mit Sensoren modifizierte Mahlbecherdeckel vereint Aspekte von Sensorik, mechanischer Konstruktion und Softwareentwicklung für Microcontroller sowie die Realisierung einer nutzerfreundlichen Steuerungssoftware. Diese werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Sensoren

Für die Erfassung der Messgrößen wurden überwiegend MEMS-Sensoren gewählt. Die einzige Ausnahme stellt hierbei die Lambdasonde (O₂S-FR-T4-5P, SST Sensing Ltd., Coatbridge, UK) dar. Der Grund hierfür ist die Anforderung der Messung bei Temperaturen bis zu 80 °C, welche von anderen gängigen Sauerstoffsensoren dieser Baugröße oder kleiner, z. B. EC-Zellen mit flüssigem Elektrolyten, nicht unterstützt wird [5]. Für die Messung der Wasserstoffkonzentration wird ein Wärmeleitfähigkeitssensor und zur weiteren Untersuchung der Gaszusammensetzung ein Breitband-Halbleitersensord (STC31 bzw. SGP40, Sensirion AG, Staefa, Schweiz) und ein Temperatur-Feuchte-Sensor (BME280, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Deutschland) eingesetzt. Für die Erfassung der physikalischen Prozessparameter kommen ein Thermoelement vom Typ K mit Auswert-IC (MCP9600, Microchip Technology Inc., Chandler, USA), ein Temperatur-Druck-Sensor (MS5803-05BA, TE Connectivity Corp., Berwyn, USA) und ein Beschleunigungssensor (KXTJ3-1057, ROHM Semiconductor GmbH, Willich, Deutschland) zum Einsatz. Mit dem Thermoelement soll eine Temperatur gemessen werden, die möglichst nahe an der tatsächlichen Temperatur des Gasraumes liegt und weniger von der Temperatur des Aufbaus beeinflusst ist.

Aufbau

Bei Verwendung des modifizierten Deckels in der Schwingmühle ist der Original-Mahlbecher das

Gegenstück. Um an den Gasmischanlagen (GMA) die Atmosphäre im Becher gezielt mit Gasangeboten zu beaufschlagen, wird in diesem Fall anstelle des Original-Mahlbechers der in Abb. 1 gezeigte „Dummy-Mahlbecher“ verwendet. Dieser ist vom Anschlussmaß identisch zum Original-Mahlbecher, verfügt jedoch zusätzlich über fluidische Anschlüsse für den Betrieb an einer GMA.

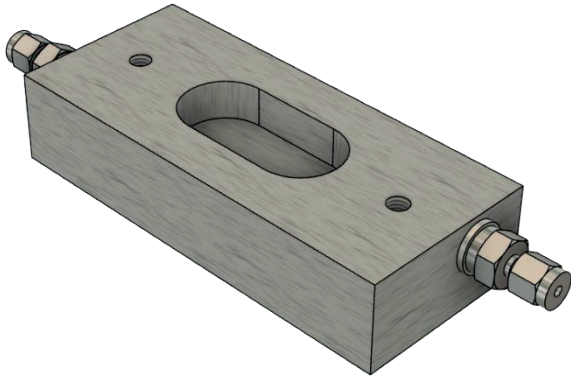


Abb. 1: CAD-Modell des „Dummy-Mahlbechers“.

Der modifizierte Deckel besteht, wie in Abb. 2 gezeigt, aus einer oberen und einer unteren Deckelhälfte. Die MEMS-Sensoren sind auf einer Platine integriert und in der oberen Hälfte befestigt. Neben der Platine befindet sich die Lambdasonde, die durch das obere Deckelelement hindurchgesteckt ist. Die Untersicht der oberen Deckelhälfte ist in Abb. 3 dargestellt.

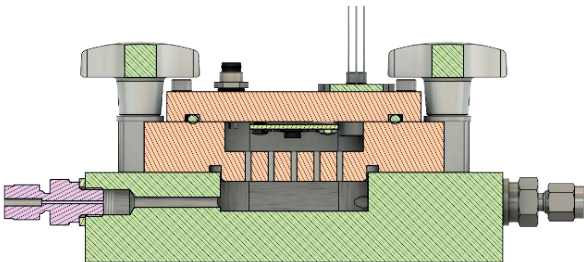


Abb. 2: Querschnitt des Versuchsaufbaus zur Kalibrierung der Sensoren im Deckel (orange) an einer Gasmischanlage mit „Dummy-Mahlbecher“ (grün).

Die untere Deckelhälfte sorgt für eine Trennung des Reaktionsraumes und des Sensorraumes. Dies ist notwendig, um die Sensoren vor mechanischer Beschädigung durch das Mahlgut und die Mahlkugeln zu schützen. Damit der Gasaustausch zwischen den beiden Räumen gewährleistet werden kann, befinden sich im unteren Deckelelement Bohrungen mit einem Durchmesser kleiner dem Durchmesser der Mahlkugeln. Die Dichtigkeit der beiden Varianten des Aufbaus sind mit der des Original-Deckels und -Bechers vergleichbar. Gefertigt wurden die

Deckelelemente als auch der „Dummy-Mahlbecher“ aus korrosionsbeständigem Edelstahl. Ein Querschnitt durch den Aufbau mit „Dummy-Mahlbecher“ ist in Abb. 2 gezeigt. Sowohl die Lambdasonde als auch die Platine mit den MEMS-Sensoren sind über je eine mehradrige Zuleitung mit der Steuereinheit verbunden.



Abb. 3: CAD-Modell der Unterseite des oberen Deckelelements mit Sensorplatine (Mitte) und Lambdasonde (rechts).

Die Steuereinheit enthält die Auswerteelektronik der Lambdasonde (*OXY-LC-485, SST Sensing Ltd., Coatbridge, UK*) und einen Microcontroller (*Arduino Uno R4 Minima, Arduino S.r.l., Monza, Italien*). Letzterer ist mit einem auf Lochraster aufgebautem Kommunikationsschild ausgestattet, das die Verbindung zur Elektronik der Lambdasonde über RS 485 und zur Platine der MEMS-Sensoren über I²C herstellt. Die Anbindung an einen Computer erfolgt per USB.

Software

Die Sensordaten werden sowohl auf dem Microcontroller der Steuereinheit sowie dem angeschlossenen Computer verarbeitet. Die Software auf dem Microcontroller wird im Folgenden als Firmware und die Software auf dem Computer als Anwenderprogramm bezeichnet. Die Firmware ist in der Programmiersprache C++ programmiert und modular aufgebaut. Die verwendeten Sensoren können dadurch einfach erweitert oder ausgetauscht werden, ohne mit Quellcode zu interagieren, der nicht die direkte Kommunikation mit dem Sensor koordiniert. Das Anwenderprogramm empfängt die Daten der Sensoren von der Firmware und sendet Steuerbefehle an diese per serieller Verbindung mittels der plattformübergreifenden Protocol Buffers Bibliothek. Die Konfiguration der Messung ist einer der möglichen Befehle, die durch das Anwenderprogramm verschickt werden können, und umfasst Einstellungen wie die Heizertemperatur des Halbleiter-Gassensors oder den Betriebszustand der Lambdasonde. Die Anwendersoftware bietet eine

grafische Oberfläche, die eine intuitive Steuerung der Messungen ermöglicht. Über diese Oberfläche können die Messeinstellungen vorgenommen, für die spätere erneute Verwendung in einer Konfigurationsdatei gespeichert und schließlich wieder daraus geladen werden. Während einer laufenden Messung können die Daten der einzelnen Sensoren in Echtzeit grafisch dargestellt werden. Dies erlaubt einen direkten Einblick in die Verläufe der Messgrößen und beugt so auch Fehlern vor, da diese anhand der Daten idealerweise schneller detektiert werden können. Das Speicherziel kann aus den Typen CSV (*Comma-Separated Values*), HDF (*Hierarchical Data Format*) und Zeitreihendatenbank InfluxDB vom Benutzer gewählt werden. Durch den modularen Aufbau lassen sich softwareseitig leicht weitere Speicherziele implementieren. Innerhalb der Anwendersoftware werden die vom Halbleitersensor gelieferten Daten mittels vorher gebildeter Modelle zur Verwendung aufbereitet.

Messungen

Eingebaut in eine der am Lehrstuhl für Messtechnik vorhandenen Gasmischanlagen ermöglicht der „Dummy-Mahlbecher“ Messungen zur Kalibrierung der Sensoren im Deckel, die Untersuchung geometriebedingter Einflüsse auf die Messung und die Untersuchung des Quereinflusses der Messprinzipien untereinander. Zur Untersuchung des Einflusses des Durchmessers der Bohrungen im unteren Deckelelement und der Lambdasonde auf die Sensorsignale wurden sechs Messungen durchgeführt und dabei die Optionen 2 mm und 3 mm für den Durchmesser der Bohrungen sowie Lambdasonde ausgeschaltet, eingeschaltet und „Dummy“ permutiert. Bei der Option „Dummy“ handelt es sich um ein aus Aluminiumvollmaterial gefrästes Bauteil, welches die gleichen Abmessungen wie die Lambdasonde besitzt. Die sechs Versuche und ihre Parameter sind in Tab. 1 aufgeführt.

Tab. 1: Versuchsreihe zur Untersuchung der Einflüsse von Bohrdurchmesser und Lambdasondenbetrieb.

Versuch	Durchmesser der Bohrungen	Lambdasonde
1	2 mm	eingeschaltet
2	2 mm	ausgeschaltet
3	2 mm	„Dummy“
4	3 mm	eingeschaltet
5	3 mm	ausgeschaltet
6	3 mm	„Dummy“

Für diese Messungen stellt die GMA insgesamt vier verschiedene Gasangebote zur Verfügung, bestehend aus Methanol und Wasserstoff bei 500 mL/min Gesamtfluss und 50 % relativer Feuchte. In Tab. 2 ist die von der GMA durchlaufene Sequenz dargestellt. Als Trägergas kommt trockene Nullluft zum Einsatz. Zusätzlich zum Aufbau mit „Dummy-Mahlbecher“ und modifiziertem Deckel befindet sich je eine Sensorkammer vor und nach dem Aufbau als Referenz in der GMA, siehe Abb. 4. Diese Sensorkammern haben zwei Einbauplätze, die abhängig von der Messung mit unterschiedlichen Sensoren bestückt werden. Bei dieser Messung befindet sich in beiden Kammern jeweils ein SGP40. Der andere Platz wurde mit einer Blindabdeckung verschlossen.

Tab. 2: Sequenz der Gasangebote für die Versuchsreihe.

Zustandsname	Gasangebot	Dauer
Einlaufen	–	4 h
Angebot 1	Methanol 1 ppm	2 h
Spülen 1	–	2 h
Angebot 2	Methanol 2 ppm	2 h
Spülen 2	–	2 h
Angebot 3	Wasserstoff 1 ppm	2 h
Spülen 3	–	2 h
Angebot 4	Wasserstoff 2 ppm	2 h
Spülen 4	–	2 h

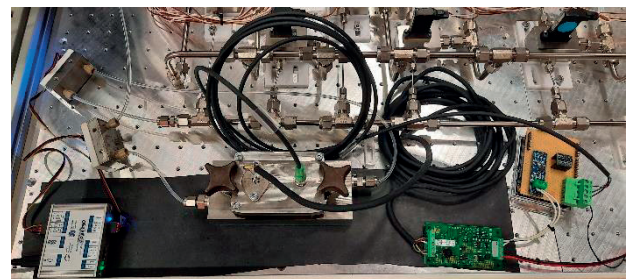


Abb. 4: Aufbau mit modifiziertem Deckel auf dem „Dummy-Mahlbecher“ mit je einer Sensorkammer als Referenz davor und danach.

Zunächst wurde außerhalb der GMA die Dichtheit des modifizierten Deckels mit dem Originaldeckel manuell per Druckdifferenzmethode verglichen. Als Prüfgas wurde Argon mit einer Konzentration von 100 Vol.-% verwendet, um mögliche Leckagen mit einem Leckdetektor (*Restek GmbH, Bad Homburg vor der Höhe, Deutschland*) zu lokalisieren. Die Elektronik der Lambdasonde besitzt eine Funktion zur Selbstkalibrierung, bei welcher die vorliegende Konzentration an die Elektronik übermittelt wird. Hierbei wird der Sauerstoffgehalt von trockener Nullluft zugrunde gelegt. Nach Durchführung

der Kalibrierung werden durch Zumischen von Stickstoff vier verschiedene Sauerstoffkonzentrationen von der GMA bereitgestellt und überprüft, wie weit der von der Lambdasonde gelieferte Messwert von der eingestellten Konzentration abweicht. Die entsprechende Sequenz ist in Tab. 3 aufgelistet. Für diese Messung werden die zusätzlichen Sensorkammern nicht benötigt. Bei der Kalibrierung und der darauffolgenden Validierungsmessung liegt ein Gesamtfluss von 500 mL/min mit trockener Nullluft als Trägergas (0 % R.H.) vor.

Tab. 3: Sequenz der Gasangebote für die Validierung der Kalibrierung der Lambdasonde.

Zustandsname	Gasangebot	Dauer
Einlaufen	–	2 h
Angebot 1	Sauerstoff 15 Vol.-%	1 h
Angebot 2	Sauerstoff 10 Vol.-%	1 h
Angebot 3	Sauerstoff 5 Vol.-%	1 h
Angebot 4	Sauerstoff 1 Vol.-%	1 h
Spülen	–	1 h

Für die Kalibrierung des Wärmeleitfähigkeitssensors auf Wasserstoff wird die in Tab. 4 angeführte Sequenz von der GMA bereitgestellt. Die beiden zusätzlichen Sensorkammern sind jeweils mit einem weiteren STC31 bestückt. Der zweite Platz wird von einem SGP40 besetzt. Die Messung erfolgt bei 500 mL/min Gesamtfluss und trockenem Argon als Trägergas. In Tab. 4 ist die Sequenz der Gasangebote aufgeführt.

Als erstes reales Experiment wird die Reduktion von Nb_2O_5 mittels LiH gewählt, da diese Reaktion zuvor schon in einer Planetenmühle durchgeführt

wurde [6]. Die Menge, die in der Planetenmühle zugeführten Reaktanten wird während dieses Experiments reduziert, da der erwartete Druckanstieg zu hoch für den Versuchsaufbau wäre. Die Dauer des Experiments beträgt eine Stunde bei einer Schwingfrequenz von konstant 35 Hz. Vor Beginn der Messung werden die Edukte unter Argonatmosphäre dem Versuchsgefäß zugeführt, um ungewollte Nebenreaktionen mit Bestandteilen aus der Umgebungsluft während des Versuchs zu vermeiden.

Tab. 4: Gasangebote für die Kalibrierung des Wärmeleitfähigkeitssensors auf Wasserstoff.

Zustandsname	Gasangebot	Dauer
Einlaufen	–	4 h
Angebot 1	Wasserstoff 1 Vol.-%	2 h
Spülen 1	–	2 h
Angebot 2	Wasserstoff 4 Vol.-%	2 h
Spülen 2	–	2 h
Angebot 3	Wasserstoff 2 Vol.-%	2 h
Spülen 3	–	2 h

Ergebnisse

Der Original-Deckel zeigt auf dem „Dummy-Mahlbecher“ während der Dichtheitstests einen Druckabfall von initial 4 bar auf 2,5 bar nach ca. 20 Stunden. Der gleiche Druckabfall tritt am modifizierten Deckel nach ca. 40 Stunden auf. Dementsprechend weist der modifizierte Deckel eine Dichtigkeit auf, die mindestens der des Original-Deckels entspricht.

Die Versuche zur Untersuchung der Einflüsse von Bohrdurchmesser und Lambdasonde auf die Sensorsignale zeigen, dass die eingeschaltete Lambdasonde den Sauerstoff aus der Atmosphäre im

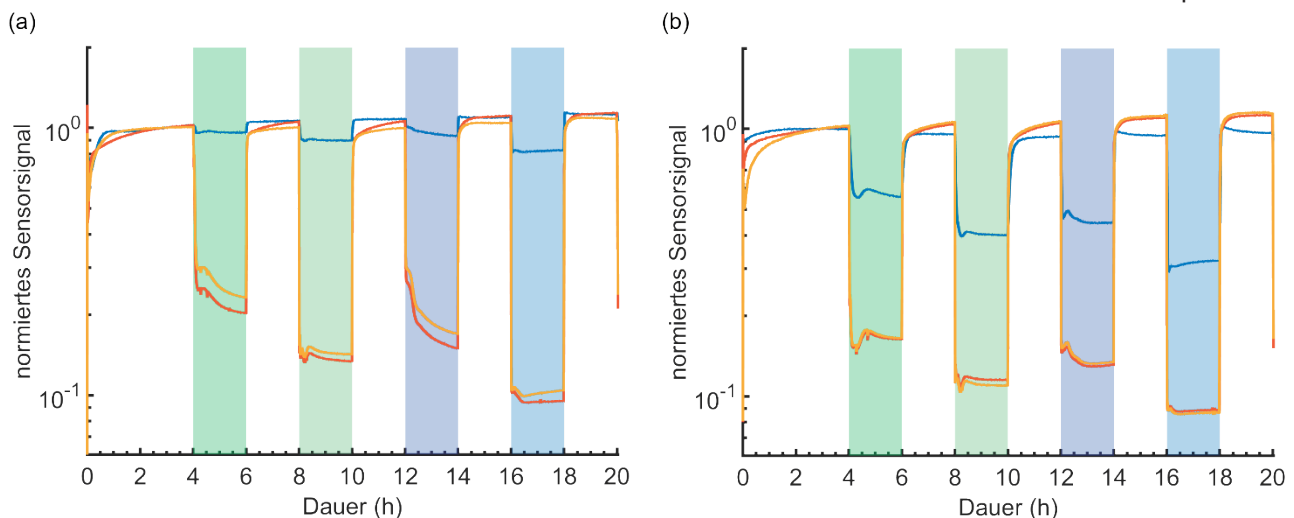


Abb. 5: Normiertes Sensorsignal von Schicht 2 des SGP40 während (a) Versuch 1 und (b) Versuch 2 zur Untersuchung der Einflüsse von Bohrdurchmesser und Lambdasonde.

Legende: ■ Methanol 1 ppm ■ Methanol 2 ppm ■ Wasserstoff 1 ppm ■ Wasserstoff 2 ppm
— Mahlbecher — Referenz davor — Referenz danach

Deckel verbraucht, wodurch die Signale aller vier Schichten des SGP40 im Deckel einen niedrigeren Hub aufweisen.

Der SGP40 in der Referenzkammer nach dem Aufbau weist lediglich eine geringfügige Änderung im Hub der Sensorsignale auf. Zur Veranschaulichung werden die Graphen des Sensorsignals von Schicht 2 mit (a) eingeschalteter und (b) ausgeschalteter Lambdasonde für einen Bohrdurchmesser von je 3 mm in Abb. 5 gegenübergestellt. Schicht 2 weist im Allgemeinen einen größeren Hub bei den Wasserstoffangeboten auf und eignet sich deswegen am besten zur Betrachtung der Effekte. Ein Vergleich mit den Messdaten des „Dummy“-Sensors statt der kalten Lambdasonde ergibt keinen merklichen Unterschied im Sensorsignal, siehe Abb. 6.

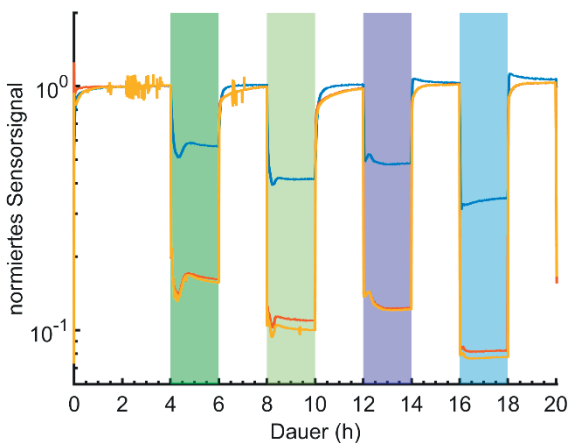


Abb. 6: Normiertes Sensorsignal von Schicht 2 der SGP40 während Versuch 3 zur Untersuchung der Einflüsse von Bohrdurchmesser und Lambdasonde.

Legende: ■ Methanol 1 ppm ■ Methanol 2 ppm
■ Wasserstoff 1 ppm ■ Wasserstoff 2 ppm
— Mahlbecher — Referenz davor — Referenz danach

Trotz der Verdopplung der Querschnittsfläche der Bohrungen (Faktor 2,25) beträgt die Änderung der

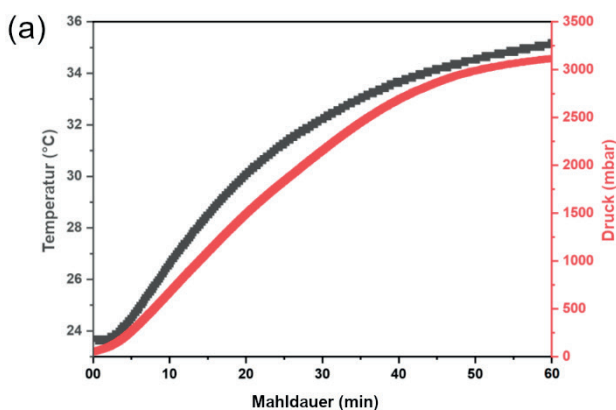


Abb. 8: Druck-Temperatur-Plot zur Reaktion der Reduktion von Nb_2O_5 mittels LiH in der (a) Planetenmühle, nach [6] (Suppl.) und (b) Schwingmühle.

Sensorantwort bei ausgeschalteter Lambdasonde für die Methanolangebote lediglich 7 % und für die Wasserstoffangebote 1 %. Bei eingeschalteter Lambdasonde unterscheiden sich die Änderungen, wie in Abb. 7 gezeigt, zwischen allen vier Angeboten sehr stark. Für 1 ppm Methanol liegt die Änderung bei etwa 29 %, für 2 ppm Methanol bei 53 % sowie bei Wasserstoff 1 ppm 59 % und 2 ppm 80 %.

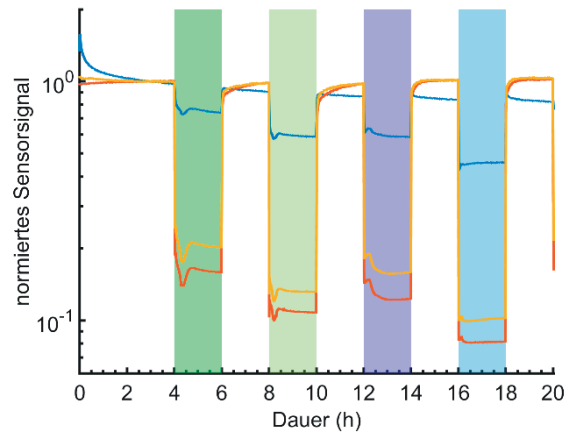
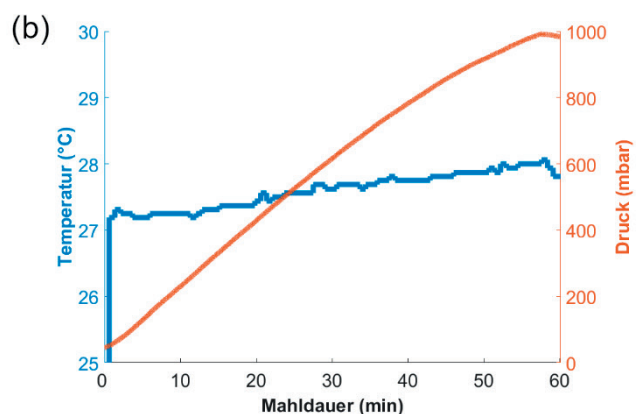


Abb. 7: Normiertes Sensorsignal von Schicht 2 der SGP40 während Versuch 4 zur Untersuchung der Einflüsse von Bohrdurchmesser und Lambdasonde.

Legende: ■ Methanol 1 ppm ■ Methanol 2 ppm
■ Wasserstoff 1 ppm ■ Wasserstoff 2 ppm
— Mahlbecher — Referenz davor — Referenz danach

In Abb. 8 ist (a) der Plot aus der Reaktion in der Planetenmühle dem (b) Plot aus der Reaktion in der Schwingmühle gegenübergestellt. Der Temperaturanstieg in der Planetenmühle ist mit einer Differenz zwischen Anfangs- und Endwert von über 10 °C wesentlich größer als der in der Schwingmühle mit nur etwa $0,8\text{ °C}$. Der Verlauf des Drucks ist nach einer Skalierung um den Faktor drei vergleichbar. Eine Ausnahme ist das stärkere Abflachen im Plot der Planetenmühle.



Diskussion

Eine hohe Dichtheit des Aufbaus über einen längeren Zeitraum, z. B. 54 Stunden für die längste in diesem Rahmen durchgeführte Reaktion, ist wichtig, um die Reaktion nicht zu beeinflussen. Während des Tests hat sich gezeigt, dass weder Original-Deckel noch modifizierter Deckel diesen Anforderungen genügen. Eine mögliche Erklärung ist die unterschiedliche Oberflächenrauheit des Original-Mahlbeckers und des „Dummy-Mahlbeckers“, was allerdings noch näher zu untersuchen wäre.

Der Betrieb der Lambdasonde beeinflusst neben dem Sensorsignal des SGP40 auch in Form von erhöhter Temperatur die Messungen. Diese kann sich nicht nur auf den Verlauf der angeregten Reaktion auswirken, sondern sorgt auch für Störungen bei anderen Sensoren auf der Platine. Bei kurzzeitigem Betrieb kommt es während Messungen zum Ausfall des Beschleunigungssensors. Bei längerem Betrieb fällt zusätzlich der Temperatur-Druck-Sensor aus. Aus diesen Gründen scheint es erstrebenswert, einen kompakteren Sensor oder ein anderes Sensorprinzip auszuwählen. Der Einsatz eines MEMS-Sensors mit integrierter Elektronik und I²C-Unterstützung würde den Aufbau deutlich vereinfachen und die Kosten für die Sensoren um etwa 70 % reduzieren. Aktuell konnte jedoch kein entsprechender kommerziell verfügbarer Sensor gefunden werden.

Für größere Mahlkugeln lassen sich die Bohrungen im unteren Deckelelement vergrößern ohne Beschädigungen an den Sensoren in Kauf nehmen zu müssen. Dies würde zu einer erhöhten Diffusionsrate und damit zu einer kürzeren Reaktionszeit der Sensoren führen. Auch die Sensorreaktion des Halbleitersensors wird verbessert, besonders beim Einsatz stark gasverbrauchender Sensoren wie der Lambdasonde. Während der ersten praktischen Messung in der Schwingmühle zeigt sich, wie in Abb. 9 zu sehen, dass sich im Inneren des Deckels anschließend eine nicht unerhebliche Menge von Edukt als auch Produkt anlagert. Aus diesem Grund wäre zu untersuchen, ob eine Vergrößerung der Bohrungen zielführend ist.

Eine mechanische Stabilisierung insbesondere der Zuleitung der Lambdasonde stellt sich nach den ersten Messungen in der Schwingmühle als notwendig heraus. Um die Verwendung des Aufbaus weiter zu erleichtern und die Problematik der Leitungsführung in der Schwingmühle zu umgehen,

scheint es erstrebenswert, eine Funkverbindung zwischen Steuereinheit und Deckel zu realisieren.

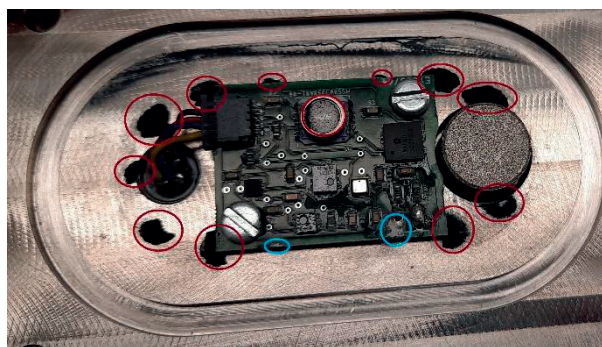


Abb. 7: Untersicht des oberen Deckelelements mit Sensorplatine und Lambdasonde. Die dunklen Stellen auf dem Bild (rot markiert) sind Anlagerungen des Produkts. Vereinzelte helle Stellen (blau markiert) sind Anlagerungen der Edukte.

Literatur

- [1] S. Kipp u. a., „Mechanochemie. Chemie mit dem Hammer“, *Chemie in unserer Zeit*, Bd. 39, Nr. 6, S. 384–392, November 2005, doi: 10.1002/ciuz.200500355.
- [2] P. Anastas, N. Eghbali, „Green Chemistry: Principles and Practice“, *Chemical Society Reviews*, Bd. 39, Nr. 1, S. 301–312, Januar 2010, doi: 10.1039/B918763B.
- [3] D. Tan, F. García, „Main group mechanochemistry: from curiosity to established protocols“ *Chemical Society Reviews*, Bd. 48, Nr. 8, S. 2274–2292, April 2019, doi: 10.1039/c7cs00813a.
- [4] S. Lukin u. a., „Toward Mechanistic Understanding of Mechanochemical Reactions Using Real-Time *In Situ* Monitoring“, *Accounts of Chemical Research*, Bd. 55, Nr. 9, S. 1262–1277, April 2022, doi: 10.1021/acs.accounts.2c00062.
- [5] G. Wiegleb, „Gasmesstechnik in Theorie und Praxis: Messgeräte, Sensoren, Anwendungen“, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2022.
- [6] A. Michaely u. a., „Black Titania and Niobia within Ten Minutes – Mechanochemical Reduction of Metal Oxides with Alkali Metal Hydrides“, *Chemistry - A European Journal*, Bd. 29, Nr. 29, Mai 2023, doi: 10.1002/chem.202300223.

Danksagung

Wir danken dem Lehrstuhl für Anorganische Festkörperchemie der Universität des Saarlandes unter Leitung von Professor Kickelbick für die Unterstützung in Form der Messungen in der Schwingmühle und der Expertise im Bereich Mechanochemie. Dadurch wurde die Bearbeitung des Themas als Aufgabenstellung einer Bachelor-Arbeit im Studiengang „Eingebettete Systeme“ möglich.