

Low-Cost-Messtechnik am Beispiel Leitfähigkeitssensor in Modellreaktoren

Michael Kopriva¹, Thomas Osterland^{1,*}, Pascal Dabbagh², Elias Rößner¹

¹ TH Augsburg, An der Hochschule 1, 86161 Augsburg

² Onoff AG, Niels-Bohr-Str. 6, 31515 Wunstorf

*Email Korrespondenzautor:in: thomas.osterland@hs-augsburg.de

Abstract: Im Praktikum der Lehrveranstaltung Chemische Verfahrenstechnik des Studiengangs Umwelt- & Verfahrenstechnik an der TH Augsburg wird mittels Leitfähigkeitssonden die Verweilzeitverteilung in Modellreaktoren untersucht. Die bisherigen Sonden haben eine hohe Messgenauigkeit, aber sind hochpreisig und beeinflussen die Strömung stark. Daher wurden Low-Cost-Sonden für einen Rohrreaktor entwickelt, deren Signale mittels Arduino zur Leitfähigkeitsmessung mit geringem Einfluss auf die Strömungsverhältnisse bei ähnlicher Messgenauigkeit genutzt werden. Das Messsystem, dessen Einsatzoptionen und Grenzen werden präsentiert.

Keywords: Microcontroller, Arduino, elektrische Leitfähigkeit, Low-Cost-Messtechnik, Modellreaktoren

1. Hintergrund und Motivation

Inlinemessungen mit Leitfähigkeitssonden ermöglichen eine zeitlich direkte und relativ hochaufgelöste Ermittlung von Konzentrationen in Reaktoren. Eine wichtige Anwendung von Inlinemessungen ist die Bestimmung der zeitabhängigen Konzentration einer Modellschubstanz am Austritt eines kontinuierlich betriebenen Reaktors. Aus dieser so genannten Verweilzeitverteilung können Rückschlüsse auf die Strömungsverhältnisse im Reaktor sowie zu erwartende Umsätze und Selektivitäten in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen gezogen werden [1]. Abb. 1 zeigt exemplarisch Konzentrations-Zeit-Profile eines Rohrreaktors in Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen bei einem idealen Stoßimpuls. Dabei sind c_{ein} und c_{aus} die Konzentrationen am Ein- und Ausgang des Reaktors und \bar{t} die mittlere hydrodynamische Verweilzeit. Zu den theoretischen Hintergründen s. [1].

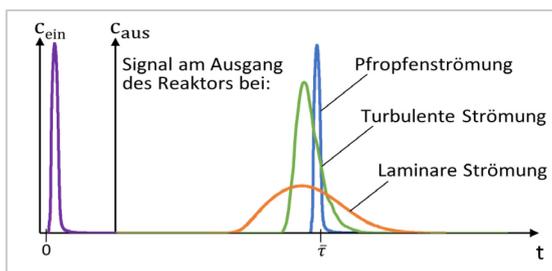


Abb. 1: Ausgangssignale typischer Konzentrationsmessungen in Abhängigkeit vom Strömungsprofil bei idealem Stoßimpuls.

Die Messmethode wird seit Jahren in einem Praktikum der Lehrveranstaltung Chemische Verfahrenstechnik des Studiengangs Umwelt- & Verfahrenstechnik an der TH Augsburg angewendet. Bei den bisher genutzten kommerziellen Leitfähigkeitssonden treten folgende Nachteile auf: Die Anschaffungskosten sind bei mehreren Sonden im vierstelligen Bereich, die Strömungsverhältnisse werden besonders im Rohrreaktor stark beeinflusst und die Messdatenaufnahme kann nur in niedriger Taktung von maximal einer Messung je Sekunde erfolgen.

Ziel des hier vorgestellten Projektes war daher die Entwicklung von Low-Cost-Messtechnik mit vergleichbarer Genauigkeit und geringem Störeinfluss auf die Strömung bei höherer Taktung.

2. Versuchsaufbau und verwendete Geräte

In den folgenden Unterkapiteln werden die Versuchsanlage, die verwendeten Sensoren sowie die Erzeugung, Verarbeitung, und Visualisierung der Messdaten vorgestellt.

2.1 Aufbau der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage ist schematisch in Abb. 2 gezeigt. Sie besteht aus einem mit Wasser gefüllten Tank, einer Zahnradpumpe zur Förderung des Fluids, einem Flügelrad-Volumenstrom-Sensor (FIR | 01), einer Injektionsstelle für die Zugabe des Tracers (KCl-Lösung) inklusive Absperrventil, je einer Messstelle zur Bestimmung der Eingangskonzentration (CIR | 02) und Ausgangskonzentration (CIR | 03), einem Rohrreaktor mit 26 m Länge und acht mm Durchmesser sowie einem zweiten Tank zur finalen Fluidaufnahme.

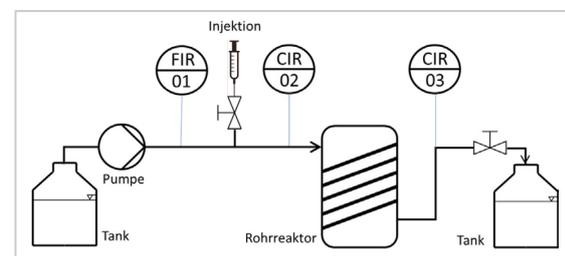


Abb. 2: Prinzipskizze der verwendeten Versuchsanlage.

2.2 Sensoren

Als kommerzieller Sensor wurde das WTW Multi 3320 mit der Messzelle TetraCon DU/T verwendet [2]. Die Low-Cost-Sensoren bestehen aus einem 3-D-gedruckten Gehäuse mit eingepassten und über O-Ring Dichtungen aus NBR abgedichteten Stromkontakten. Praktikable Ausführungen zeigt Abb. 3. Besonders empfehlenswert ist die mittlere Ausführung aufgrund ihres größeren Messbereichs.



Diese verwendet Edelstahl-Blindnieten die in den Rand des Rohrprofils zur Kontaktierung eingesetzt werden. Der Sensor 2 ist deutlich kompakter, misst aber nicht die gesamte Rohrströmung. Er verwendet einen versilberten Kupferdraht für den elektrischen Anschluss.

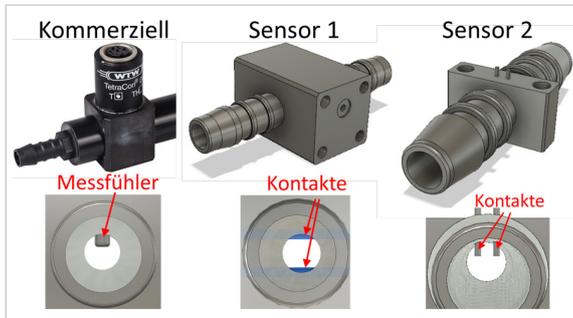


Abb. 3: Kommerzieller Sensor und entwickelte Varianten der Eigenbau Low-Cost-Sensoren.

2.3 Erfassung, Wandlung & Ausgabe der Messdaten

Die messtechnische Erfassung der Leitfähigkeit erfolgt über eine astabile Kippstufe. Dabei werden mittels einer elektrotechnischen Schaltung Rechtecksignale erzeugt. Die Länge der Pausen zwischen den Signalen ist eine Funktion der elektrischen Leitfähigkeit. Details zur Schaltung finden sich in [3].

Mittels Mikrocontroller (z.B. Arduino) und der Programmiersprache Python erfolgt die Umrechnung der Rohdaten in die gesuchten Leitfähigkeitsdaten. Die Datenausgabe erfolgt einmal als Livebild über eine graphische Nutzeroberfläche (GUI) und zusätzlich als .xlsx-Datei.

Abb. 4 zeigt den Gesamtverlauf von der Rohdatenmessung bis zur Datenausgabe.

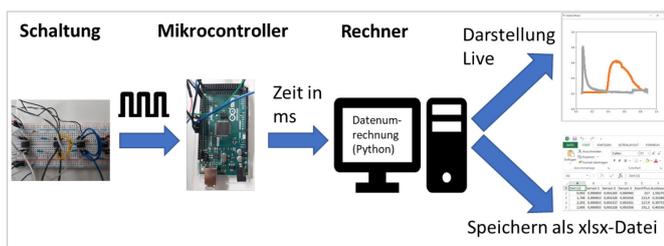


Abb. 4: Ablauf der Datengenerierung aus den gemessenen Rohdaten.

Das Schaltbild, die Funktionsweise der Schaltung sowie der Arduino- und der Python-Quellcode sind in den Supporting Information hinterlegt. Weitere Details wie STL-Datei der 3-D-gedruckten Halterung werden gern auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Im Konzentrationsbereich 0,1 mmol/L bis 50 mmol/L weichen die Messwerte des optimalen Eigenbausensors maximal 10 % von den realen Konzentrationen ab. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Korrelation von Salzkonzentration und Leitfähigkeit beträgt hier 0,875. Das Industriemessgerät ist mit einer maximalen Abweichung von 2 % und einem R^2 von 0,999 genauer, s. Abb. 5.

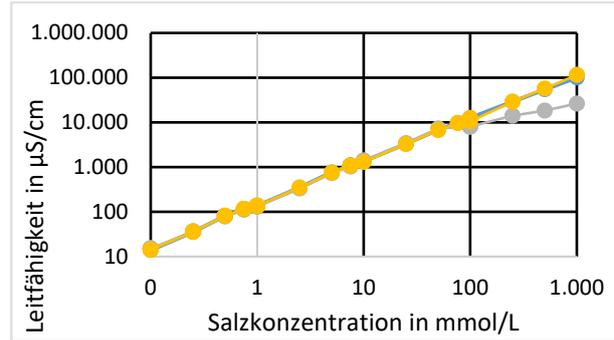


Abb. 5: Vergleich des Low-Cost-Sensors (grau) und des kommerziellen Produkts (gelb) mit der Soll-Leitfähigkeit (blau).

Allerdings kostet ein kommerzielles System, bestehend aus zwei benötigten Sensorsystemen inklusive Messgerät und Auswertesoftware über 1.000 €. Die Gesamtkosten des Low-Cost-Systems betragen unter 100 €. Allerdings ist hierfür anfangs viel Zeit für den Aufbau und die Kalibrierung einzurechnen.

Das Low-Cost-System hat zudem die höhere Frequenz der Datenerfassung: Während das kommerzielle System nur eine Messung pro Sekunde ermöglicht, konnte mit dem Low-Cost-System eine Taktung von fünf Messungen pro Sekunde erzielt werden. Limitierend ist hier die Live-Darstellung der GUI. Durch die geringen Messintervalle kommt es bei längeren Versuchen zu einer zeitlich verzögerten Darstellung. Seitens des Arduinos wäre mit dem derzeitigen Aufbau eine maximale Taktung von etwa elf Messungen pro Sekunde realisierbar.

Kleinere Nachteile sind teils geringe Undichtigkeiten sowie eine Veränderung der Elektrodenoberflächen durch Langzeitkorrosion. Dies erfordert eine monatliche Neukalibrierung.

4. Fazit

Es wurde für ein Budget von < 100 € ein System zur Leitfähigkeitsmessung auf Basis von 3-D-gedruckter Halterung, Metallkontakten und Verstärkerschaltung für einen Modellreaktor entwickelt. Wesentliche Vorteile im Vergleich zu kommerziellen Systemen sind der geringere Einfluss auf die Reaktorströmung durch geringeres Eigenvolumen und geringere Mindesteintauchtiefe im Strömungsrohr und die vielfache Taktung der Messungen. Die Messgenauigkeit des Low-Cost-Systems ist hinreichend, aber signifikant schlechter als die des kommerziellen Systems.

Optimierungsbedarf besteht besonders bei hohen Konzentrationsbereichen und einer automatischen Temperaturkompensation. Weitere zukünftige Optimierungsziele sind eine höhere Korrosionsbeständigkeit und Dichtigkeit des Systems sowie die weitere Steigerung der Taktung und eine automatische Anpassung der angesteuerten Widerstände der Schaltung zur Optimierung der Messgenauigkeit.

5. Referenzen

- [1] K. Hertwig, L. Martens: Chemische Verfahrenstechnik, 2012, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- [2] Xylem-Analytics: <https://www.xylemanalytics.com/de/produkte/ph-redox-leitfaehigkeit-sauerstoff-geraete-und-sensoren> (31.08.2023)
- [3] P. Schnabel, T. Schaerer, Timer 555 <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/0310131.htm> (25.04.2023)