

Sabrina Tietze

Akustische Beschleunigung
elektrochemischer
Iontentransporte an
Fest-Flüssig-Grenzflächen

Akustische Beschleunigung elektrochemischer Ionentransporte an Fest-Flüssig-Grenzflächen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde einer
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
M. Eng. Sabrina Tietze
aus
Kronach

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer
Zweitgutachter: Prof. Dr. Gerhard Lindner
Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2020

Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik
Universität Bayreuth
2021

Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Band 36

Sabrina Tietze

**Akustische Beschleunigung elektrochemischer
Iontentransporte an Fest-Flüssig-Grenzflächen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8205-0

ISSN 1862-9466

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort der Herausgeber

Im Rahmen der Energiewende wird häufig von verbesserten Akkumulatoren oder dem Bau von Windkraft- und Solaranlagen gesprochen. Aber nicht nur die Speicherung und Erzeugung von Energie spielen eine Rolle, sondern auch der Verbrauch an Energie. So benötigen z. B. Galvanikbetriebe mittlerer Größe 5.000 – 10.000 MWh pro Jahr. Galvanikbetriebe werden u. a. zur Herstellung von Verchromungen oder dem Prägewerkzeug für Blu-Ray Disk benötigt.

Die hier durchgeführte Arbeit hatte das Ziel, ausgewählte elektrochemischen Reaktion mittels geführter akustischer Wellen zu beeinflussen, um die Energieeffizienz der Prozesse zu erhöhen. Die auf den Elektroden angeregten geführten akustischen Wellen sollen hierbei eine akustische Strömung im flüssigen Elektrolyten hervorrufen. Diese induzierte Strömung soll direkt in der Nernst'schen Diffusionsgrenzschicht erzeugt werden, um diese zu reduzieren. Hierdurch soll die Ionenbeweglichkeit erhöht werden. Im Unterschied zu diffus eingestrahlt Ultraschall soll diese Variante einen verbesserten Ladungsträgertransport bei weniger zusätzlicher elektrischer Leistung ermöglichen.

Zur Verifikation dieser These werden zunächst die grundlegenden Eigenschaften der geführten akustischen Wellen untersucht. Die Refraktovibrometrie wird hierfür abgewandelt, um die Ausbreitung der geführten akustischen Welle und deren Wechselwirkung mit der Flüssigkeit zu analysieren. Anhand der Ergebnisse erfolgen anschließend die Experimente mit dem elektrochemischen Prozess. Dabei werden die Frequenz und Intensität der Welle variiert. Die Messreihen werden hinsichtlich erhöhter Stromaufnahme und Oberflächenbeschaffenheit bewertet, und auch die Übertragbarkeit auf andere Prozesse wird diskutiert. Der Vorteil der hier angewandten Technik liegt darin, dass am elektrochemischen Prozess selbst keine Veränderung vorgenommen werden muss, aber dennoch eine erhöhte Effizienz bei massentransportlimitierten Reaktionen erzielt wird.

Bayreuth im August 2021

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer, Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos und als Gastherausgeber Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Lindner

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis	XX
Kurzzusammenfassung	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.1.1 Herkömmlicher Ultraschall	2
1.1.2 Einsatz von Ultraschall bei höheren Frequenzen	4
1.1.3 Einsatz von geführten Schallwellen	5
1.2 Motivation	6
1.3 Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen	10
2.1 Schallausbreitung in Festkörpern und Flüssigkeiten	10
2.1.1 Schallausbreitung in isotropen Festkörpern	12
2.1.2 Geführte akustische Wellen	13
2.1.3 Wellenausbreitung bei Flüssigkeitsbelegung	19
2.1.4 Wellenausbreitung bei kompressibler, newtonscher Flüssigkeitsbelegung	24
2.1.5 Akustische Strömungen	26
2.2 Elektrochemische Transportprozesse und deren Anwendung	28
2.2.1 Elektrochemische Vorgänge ohne Stromfluss	28
2.2.2 Elektrochemische Vorgänge unter Stromfluss	30
2.2.3 Elektropolieren	33

3	Methodik	36
3.1	Auswahl geeigneter piezoelektrischer Schallwandler	36
3.1.1	Impedanzspektrum und Analyse der Leistungsaufnahme des Schallwandlers	36
3.1.2	Shear-Lag-Modell	39
3.2	Analyse der Schallausbreitung mittels Laser-Doppler-Vibrometer	44
3.2.1	Analyse der Schallausbreitung auf der Probe außerhalb der Flüssigkeit	45
3.2.2	Analyse der Schallausbreitung im Fluid	48
3.3	Betrachtung des Einflusses geführter akustischer Wellen auf den Transportprozess des Elektropolierens	53
3.3.1	Dreielektrodenanordnung	57
3.3.2	Zweielektrodenanordnung	59
4	Ergebnisse und Diskussion	66
4.1	Wellenanregung mit Piezowandlern und Schallausbreitung auf der Probe an Luft	66
4.1.1	Ergebnisse des elektrischen Impedanzverhaltens	66
4.1.2	Ergebnisse der Kurzzeit-Fourier-Transformation	68
4.1.3	Ergebnisse der 2D-FFT und des Shear-Lag-Modells	70
4.1.4	Vergleich der unterschiedlichen Mess- und Auswertemethoden	78
4.1.5	Auswertung des stehenden Wellenfeldes	81
4.1.6	Diskussion der Wellenanregung mit Piezowandlern und Schal- lausbreitung auf der Probe	83
4.2	Wechselwirkung geführter akustischer Wellen mit Fluiden	90
4.2.1	Ergebnisse der Wechselwirkung der geführten akustischen Wellen mit Wasser	90
4.2.2	Ergebnisse der Wechselwirkung der akustisch geführten Wel- len mit Wasser-Glycerin-Mischungen	96
4.2.3	Ergebnisse für stehende Wellen im Fluid und den daraus resultierenden Strömungen im Fluid	99
4.2.4	Diskussion der Wechselwirkung geführter akustischer Wellen mit Fluiden	103

4.3	Wechselwirkung geführter akustischer Wellen mit dem elektrochemischen Prozess	113
4.3.1	Ergebnisse der Dreielektrodenanordnung	113
4.3.2	Ergebnisse der Zweielektrodenanordnung	115
4.3.3	Ergebnisse der optischen Schichtdetektion	123
4.3.4	Diskussion der Wechselwirkung geführter akustischer Wellen mit dem elektrochemischen Prozess	125
5	Zusammenfassung und Ausblick	140
5.1	Zusammenfassung	140
5.2	Ausblick	143
5.3	Summary	146
5.4	Outlook	149
	Literaturverzeichnis	153