

# **Einsatz Glaskohlenstoff-basierter Partikel in der Elektrobiotechnologie**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

von

Frau

**Dipl.-Chem. Melanie Paetzold**

aus Darmstadt

Datum der mündlichen Prüfung	15. März 2017
Dekan	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Prüfungsvorsitzender	Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans-Jörg Bart
Berichterstatter	Prof. Dr. rer. nat. Roland Ulber Prof. Dr. rer. nat. Jens Schrader

Kaiserslautern, 2017

D 386



Schriftenreihe des DECHEMA-Forschungsinstituts

Band 13

**Melanie Paetzold**

**Einsatz Glaskohlenstoff-basierter Partikel  
in der Elektrobiotechnologie**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5258-9

ISSN 2197-6155

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Meinen Eltern



## Danksagung

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr. Roland Ulber für die Übernahme der Betreuung meiner Dissertation, die kritische Durchsicht des Manuskripts und die wertvollen Ratschläge.

Mein großer Dank gilt Prof. Dr. Jens Schrader für die Möglichkeit die praktischen Arbeiten am DECHEMA-Forschungsinstitut durchzuführen, für die Erstellung des Zweitgutachtens sowie für die interessante Zeit in seiner Arbeitsgruppe.

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans-Jörg Bart danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei Dr.-Ing. Dirk Holtmann möchte ich mich besonders für die fachliche Betreuung, die vielen konstruktiven Gespräche und Vorschläge sowie die Korrektur meiner Arbeit bedanken. Ohne seine Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Dr.-Ing. Nils Tippkötter danke ich für seine Unterstützung während des Promotionsverfahrens.

Danken möchte ich weiterhin Dr. Klaus-Michael Mangold für die Beantwortung vieler fachlicher Fragen.

Bei der gesamten Arbeitsgruppe bedanke ich mich für die Unterstützung, die hervorragende Zusammenarbeit und die wunderschöne Zeit auch außerhalb des Arbeitsalltages.

Ein besonderer Dank an Ina Huth für die vielen hilfreichen Tipps und ihre fachliche Hilfe, an Svenja Kochius für die gemeinsamen Arbeiten und an Martin Kornecki für die große Unterstützung im Rahmen seines Praktikums.

Nicht zuletzt danke ich Markus Buchhaupt für seine ständige Hilfsbereitschaft, für zahlreiche Ratschläge und Hinweise sowie dafür, dass meine Fragen jederzeit willkommen waren.

Ein weiterer Dank gilt meinen Projektpartnern, insbesondere Prof. Dr. Matthias Franzreb, für die gute Kooperation und viele hilfreiche Diskussionen.

Für die moralische Unterstützung, Motivation und Ablenkung möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die auch trotz großer Entfernung immer da waren.

Sebastian danke ich für sein Verständnis und seine unendliche Geduld in dieser Zeit.

Einen lieben Dank auch an Linda und David für ihr stetes Interesse am Fortschritt der Arbeit.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern für ihre Motivation, Zuversicht und ihr Vertrauen. Meinem Vater danke ich für das zügige Korrekturlesen der Arbeit und meiner Mutter dafür, dass sie jederzeit für mich erreichbar war.



## Zusammenfassung

Bei der Entwicklung neuer, umweltfreundlicher und vor allem kostengünstiger Produktionswege sind (elektro-) biotechnologische Prozesse vermehrt in den Fokus der Forschung gerückt. Sie bieten die Möglichkeit auch nachwachsende Rohstoffe in ressourcenschonenden, energie- und emissionsärmeren Prozessen mittels hochspezifischer Katalyse zu enantiomerenreinen pharmazeutischen Wirkstoffen, Feinchemikalien sowie neuen Produkten umzusetzen. Das stetig wachsende Interesse an der weißen Biotechnologie führt zu einem kontinuierlichen prozentualen Anstieg dieser Prozesse in der chemischen Industrie.<sup>[1]</sup>

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Etablierung und Weiterentwicklung der potential-kontrollierten Flüssigchromatographie (engl. electrochemically modulated liquid chromatography, EMLC) sowie zweier enzymatischer Umsetzungen mit gekoppelter elektrochemischer Cofaktorregeneration. Als Material für beide Anwendungsgebiete diente Glaskohlenstoff, ein Werkstoff aus reinem Kohlenstoff mit vielen positiven Eigenschaften wie extreme Korrosionsbeständigkeit, chemische Stabilität, hohe Härte bei geringer Dichte sowie gute elektrische Leitfähigkeit.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit biotechnologischer Prozesse ist die Entwicklung eines effizienten, ressourcenschonenden Aufreinigungsverfahrens unerlässlich, da die Produktionskosten organischer Säuren typischerweise bis zu 30–50 % von jenen des Downstream Processings bestimmt werden.<sup>[2,3]</sup> Bezüglich des zukünftigen Einsatzes in verschiedenen biotechnologischen Anwendungen wie Fermentationen und enzymatischen Umsetzungen wurde ein rein wässriges System als Laufmittel für den Einsatz in der EMLC zur Retention von Biomolekülen untersucht. Die Optimierung der mobilen Phase bezogen auf Ionenkonzentration, pH-Wert und Ionenwertigkeit resultierte in einer Retentionszeitverschiebung von maximal 62 s. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Ionenart der mobilen Phase den weitaus größten Effekt auf eine Verbesserung der Retentionszeitverschiebung hat. Durch Layer-by-Layer-Beschichtungen der Glaskohlenstoffpartikel wurde die Hydrophilie des Festbettes sowohl erhöht als auch verringert. Hierbei wurden die Retentionszeiten ohne externes Potential mit dem Einsatz hydrophiler Beschichtungen um bis zu 3,16 min verlängert bzw. durch hydrophobe

Polyelektrolyte um 1,31 min verkürzt. Die Simulation des Prozesses an unmodifizierten Glaskohlenstoffpartikeln bestätigte die experimentellen Daten und zeigte, dass durch Erhöhung des Potentials die Kapazität des Materials erhöht wird, was zu längeren Retentionszeiten führt. Jedoch weist Glaskohlenstoff als stationäre Phase nur geringe Sättigungskapazitäten auf, was vor allem in der mit steigendem Potential absinkenden Peakhöhe sowie starkem Tailing resultierte, sowohl in der Modellierung als auch den durchgeführten Versuchen. Eine analytische Trennung zweier Substanzen wird folglich nahezu unmöglich.

Des Weiteren wurde die elektrochemische, mediatorvermittelte Regeneration des oxidierten Cofaktors  $\text{NAD}^+$  in zwei unterschiedlichen enzymatischen Umsetzungen evaluiert. Mit 2,2'-Azino-di-(3-ethylbenzthiazolin-6-sulfonsäure) (ABTS) als Mediator wurde mittels einer (S)-selektiven Alkoholdehydrogenase (ADH) die enantioselektive Synthese von (*R*)-Acetoin aus *meso*-2,3-Butandiol etabliert. Durch Optimierung der eingesetzten Enzymmenge war es möglich einen elektroenzymatischen Prozess im semi-präparativen Bereich mit Ausbeuten von bis zu 64,6 % und Produktivitäten von bis zu  $5,7 \text{ mM h}^{-1}$  zu realisieren. Verschiedene Verfahrensansätze zeigten, dass Limitierungen der Raum-Zeit-Ausbeute (RZA) aufgrund eines schlechten Oberfläche-Volumen-Verhältnisses und die damit zusammenhängende erschwerte Diffusion des Mediators zwischen Elektrode und Reaktionslösung durch den Einsatz eines elektrochemischen Durchflussreaktors behoben werden könnten. In diesem Reaktor fungierten Glaskohlenstoffpartikel als Festbett-Arbeits Elektrode in einem 3-Elektroden-System. Verglichen mit der zuvor eingesetzten planaren Elektrode von  $2,4 \text{ cm}^2$  wurde die Elektrodenoberfläche  $10^5$ -fach auf ca.  $22 \text{ m}^2$  vergrößert.

Weiterhin wurde der Einsatz von beschichteten Glaskohlenstoffpartikeln in einer elektroenzymatischen Umsetzung evaluiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Polymerschichten über eine ausreichende elektrochemische Stabilität verfügen und zudem in der Lage sind, den Cofaktor indirekt zu regenerieren. Somit konnten sowohl Partikel mit einer erhöhten als auch einer verringerten Hydrophilie im Vergleich zu unbehandelten Glaskohlenstoff für die Kopplung der indirekten Regeneration mit einer enzymatischen Umsetzung im Loopreaktor eingesetzt werden. Anhand des Modellenzym Glucosedehydrogenase (GDH) wurde eine Steigerung der Gesamtwechselzahlen (TTN) des

Cofaktors und Mediators auf 1926 und 96 gezeigt. Auch die Ausbeute der enzymatischen Umsetzung wurde gegenüber der Literatur um 3 % auf 96 % erhöht.

Zusammenfassend bilden die im Rahmen dieser Arbeit gezeigten Ergebnisse viel versprechende Ausgangspunkte für Weiterentwicklungen der beschriebenen biotechnologischen Methoden mit Glaskohlenstoff als Elektrodenmaterial. Zukünftige Untersuchungen der Prozesse könnten dazu dienen, die durch eine veränderte Hydrophilie der Oberfläche beeinflussten Wechselwirkungen mit den Lösungskomponenten zu verstehen und somit die grundlegenden Mechanismen biotechnologischer Anwendungen aufzuklären.

## Abstract

In the course of developing new, environmentally friendly and in particular cost-effective production methods (electro-) biotechnological processes have become the focus of research. They offer the possibility to convert even renewable raw materials by highly specific conversions to optically pure active pharmaceutical ingredients, fine chemicals and new products. These resource-saving production processes are low on energy consumption and produce low levels of emissions. The steadily increasing interest in industrial biotechnology, the so-called white biotechnology, leads to a continuous relative increase of these processes in the chemical industry.<sup>[1]</sup>

This thesis basically deals with the establishment and further development of two biotechnological methods for their use in the white biotechnology: the electrochemically modulated liquid chromatography (EMLC) and two different enzymatic conversions coupled with an electrochemical cofactor regeneration system. Due to its favourable characteristics glassy carbon, a versatile material consisting of pure carbon, was used in the above mentioned applications. It features extreme corrosion resistance, chemical inertness, high hardness at low density and moreover a good electrical conductivity.

Downstream processing costs of carboxylic acids are typically up to 30 – 50 % of the total production costs.<sup>[2,3]</sup> Particularly with regard to the economic efficiency of biotechnological processes, it is essential to develop an efficient, resource-saving separation process as an integral part of the overall process. In the scope of this thesis an aqueous system as mobile phase for the potential-controlled retention of fumaric acid was investigated, which is realistically in regard to the future use of the EMLC in several bio-applications like fermentations or enzymatic conversions. The systematic investigation of the composition of the mobile phase and its optimisation in terms of ionic strength, pH value as well as ion valence of the compounds led to a retention time shift up to 62 s. In addition, it was shown that the ion type of the mobile phase has by far the greatest effect on an improvement of the retention time shift.

By using different layer-by-layer-coated glassy carbon particles it was able to increase and decrease the hydrophilicity of the fix bed electrode. Without applying an external potential the retention times have been extended by up to 3.16 min with hydrophilic polymers as coating and shortened about 1.31 min with hydrophobic polyelectrolytes. The simulation of

this process with unmodified glassy carbon particles confirmed the experimental data and showed that the capacity of the material is increased by applying an increasing potential inducing extended retention times. However, glassy carbon as stationary phase seems to have only low saturation capacities which makes a clean analytical separation almost impossible. The result of this are decreasing peak heights and strong peak tailing with increasing potential, which was observed in the simulation as well as in the experiments performed.

Furthermore, the electrochemical mediated regeneration of the oxidised cofactor  $\text{NAD}^+$  was evaluated in two different enzymatic conversions. With 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) as mediator the enantioselective synthesis of (*R*)-acetoin from *meso*-2,3-butanediol by means of a (*S*)-selective alcohol dehydrogenase (ADH) was established. Optimizing the concentration of the enzyme, it was possible to realize an electroenzymatic process in a semi-preparative scale with yields up to 64.6% and productivities up to  $5.7 \text{ mM h}^{-1}$ . Various approaches revealed that limitations of the space-time yield (STY) are caused by the heterogeneous character of the electrochemical process. Assuming the regeneration system as the limiting step using a three-dimensional electrochemical loop reactor enhanced the surface-to-volume ratio and the related hampered diffusion of the mediator between the electrode surface and the bulk solution. In this reactor glassy carbon particles were used as a fixed bed working electrode in a three electrode arrangement. Compared with the previously used planar glassy carbon electrode ( $2.4 \text{ cm}^2$ ) the electrode surface was magnified  $10^5$  times up to  $22 \text{ m}^2$ .

Moreover the effect of layer-by-layer-coated glassy carbon was evaluated in an electroenzymatic conversion. At first, it could be shown that the polymer layers provide a sufficient electrochemical stability and are able to regenerate the oxidised cofactor indirectly versus ABTS as mediator. Thus particles with an increased and decreased hydrophilicity compared to unmodified glassy carbon were used as a working electrode in the above mentioned loop reactor. Using a glucose dehydrogenase (GDH) as model enzyme an increase of the total turnover numbers (TTN) of the cofactor and the mediator to 1926 and 96 was realised. These values and the improvement of the product yield by 3% to a final 96% are amongst the highest values reached in an electrochemical regeneration system.

Summarizing the investigations of the present thesis, these results can be used as starting points for further investigations and technological enhancements in the shown biotechnological applications: Glassy carbon can be used as an electrode material in electrochemical cofactor regeneration approaches as well as a stationary phase in the electrochemically modulated chromatography. Future research of these processes could help to understand the interactions between the glassy carbon surface and the components in solution. Using different surfaces with altered hydrophilicities could help to resolve the fundamental mechanisms between a surface and bio-catalysts like enzymes, cells or microorganisms in biotechnological applications.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Formelzeichen.....	XV
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>5</b>
2.1 Glaskohlenstoff.....	5
2.2 Layer-by-Layer-Beschichtungen.....	12
2.2.1 Polyelektrolyte.....	13
2.2.2 Das Layer-by-Layer-Verfahren.....	14
<b>3 ELECTROCHEMICALLY MODULATED LIQUID CHROMATOGRAPHY (EMLC).....</b>	<b>17</b>
3.1 Einleitung und Zielsetzung.....	17
3.2 Theoretische Grundlagen.....	19
3.2.1 Die elektrochemische Doppelschicht.....	19
3.2.2 Elektrosorption.....	25
3.2.3 Electrochemically modulated liquid chromatography (EMLC).....	27
3.2.3.1 Chromatographische Grundlagen.....	27
3.2.3.2 Mechanismus der EMLC.....	29
3.2.3.3 Stand der Forschung.....	35
3.2.4 Fumarsäure.....	44
3.3 Material und Methoden.....	45
3.3.1 Glaskohlenstoffpartikel Sigradur® G 10 – 20 µm als stationäre Phase.....	45
3.3.1.1 Elektrochemische Charakterisierung von RVC.....	47
3.3.2 Aufbau der EMLC-Säule.....	48
3.3.3 Packen der elektrochemischen Chromatographie-Säule.....	50
3.3.4 Chromatographische Untersuchungen.....	51
3.3.4.1 Laufmittel.....	52

---

3.3.4.2	Proben .....	53
3.3.4.3	Analyte zur Totzeitbestimmung .....	53
3.4	Ergebnisse .....	54
3.4.1	Elektrochemische Charakterisierung von RVC .....	54
3.4.1	Bestimmung der chromatographischen Kenngrößen .....	55
3.4.2	Veränderungen des pH-Wertes durch Anlegen eines Potentials.....	57
3.4.3	Einfluss der Laufmittelkonzentration auf die Retention.....	60
3.4.4	Einfluss des pH-Wertes des Laufmittels auf die Retention .....	62
3.4.5	Einfluss der Ionenart und -wertigkeit des Laufmittels auf die Retention ...	65
3.4.6	Einfluss der Oberfläche der stationären Phase auf die Retention .....	66
3.4.7	Potentialsprünge zur Elution .....	68
3.4.8	Alterung des Chromatographiematerials.....	70
3.5	Zusammenfassende Diskussion .....	73
<b>4</b>	<b>ELEKTROCHEMISCHE COFAKTORREGENERATION AN GLASKOHLENSTOFF.....</b>	<b>91</b>
4.1	Einleitung und Zielsetzung .....	91
4.2	Theoretische Grundlagen .....	93
4.2.1	Cofaktor-abhängige enzymatische Oxidationen .....	93
4.2.1	Elektrochemische Cofaktorregeneration .....	97
4.2.2	Elektrochemischer (Festbett-)Reaktor .....	101
4.2.3	Enantiomerenreines Acetoin .....	103
4.3	Material und Methoden .....	106
4.3.1	Glaskohlenstoff-Plättchen Sigradur® G .....	106
4.3.1	Reinigung der unbeschichteten Glaskohlenstoff-Plättchen .....	106
4.3.1	Reinigung der Platinelektroden .....	106
4.3.2	Glaskohlenstoffpartikel Sigradur® G 1000 – 2000 µm .....	107
4.3.3	Aufbau des elektrochemischen Glasreaktors .....	108
4.3.4	Aufbau des Loopreaktors.....	109
4.3.5	Enantioselektive Synthese von ( <i>R</i> )-Acetoin .....	110
4.3.5.1	Enzym-Charakterisierung .....	111
4.3.5.2	Methode der enantioselektiven Umsetzung .....	111
4.3.5.3	Chirale GC-Analytik .....	114

---

4.3.6	Cofaktorregeneration an modifizierten Glaskohlenstoffpartikeln .....	114
4.3.6.1	Charakterisierung der Beschichtungen .....	114
4.3.6.2	Enzym-Charakterisierung .....	115
4.3.6.3	Methode der enzymatischen Umsetzung .....	116
4.3.6.4	Analytik mittels Glucose-Analyser .....	117
4.4	Ergebnisse .....	118
4.4.1	Enantioselektive Synthese von ( <i>R</i> )-Acetoin .....	118
4.4.2	Cofaktorregeneration an modifizierten Glaskohlenstoffpartikeln .....	128
4.5	Zusammenfassende Diskussion .....	141
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>151</b>
<b>6</b>	<b>REFERENZEN .....</b>	<b>157</b>
<b>ANHANG .....</b>	<b>.....</b>	<b>171</b>
Anhang A	Chromatogramme verschiedener Analyte an RVC 100 PPI .....	171
Anhang B	Totzeitbestimmung an Glaskohlenstoff .....	172
Anhang C	Chromatogramm 1 mM Fumarsäure an Glaskohlenstoff (EMLC) .....	173
Anhang D	Retention von 1 mM Fumarsäure an Glaskohlenstoff (EMLC) .....	174
Anhang E	Daten für die Modellierung der EMLC-Chromatographie-Säule .....	176
Anhang E.1	Parameter .....	176
Anhang E.2	Formeln .....	177
Anhang E.3	Korrelationen .....	178
Anhang F	Verwendete Chemikalien .....	179
Anhang G	Verwendete Lösungen .....	181
Anhang H	Verwendete Materialien .....	185
Anhang I	Verwendete Geräte .....	186
Anhang J	Zubehör der EMLC-Säule .....	188
Anhang K	Zubehör Cofaktorregeneration .....	190
Anhang L	Methoden .....	191
Anhang L.1	HPLC-Methode EMLC .....	191
Anhang L.2	GC-Methode ( <i>R</i> )-Acetoin .....	191
Anhang L.3	Glucose-Analyser .....	192
Anhang M	Abbildungsverzeichnis .....	193

Anhang N	Tabellenverzeichnis .....	200
Anhang O	Angaben zur Person.....	202
	Anhang O.1    Betreute Studienarbeiten.....	202
	Anhang O.2    Publikationen .....	202
	Anhang O.3    Tagungsbeiträge .....	202
	Anhang O.4    Curriculum vitae .....	204

## Abkürzungsverzeichnis

1,5-NDS	Natrium-1,5-naphtalin-disulfonat
2,6-NDS	Natrium-2,6-naphtalin-disulfonat
1,2-BDS	Dinatrium-1,2-benzoldisulfonat
1,3-BDS	Benzol-1,3-disulfonsäure Dinatriumsalz
ABTS	2,2'-Azino-di-(3-ethylbenzthiazolin-6-sulfonsäure)
ACN	Acetonitril
ADH	Alkoholdehydrogenase
Ag/AgCl	Silber/Silberchlorid
Al	Aluminium
AMP	Adenosinmonophosphat
API	Pharmazeutischer Wirkstoff (engl. active pharmaceutical ingredients)
Arg	Arginin
ATP	Adenosintriphosphat
Ba	Barium
BDM	Bockris-Devanathan und Müller
BET	Brunauer, Emmett und Teller
Br <sup>-</sup>	Bromid
BS	Benzolsulfonsäure bzw. Benzolsulfonsäure Dinatriumsalz
C	Kohlenstoff
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchlorid
CBS	<i>p</i> -Chlorbenzolsulfonsäure
CDI	Kapazitive Entionisierung (engl. capacitive deionization)
CE	Kapillarelektrophorese (engl. capillary electrophoresis)
CF <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	Trifluoracetat
CNT	Kohlenstoffnanoröhre (engl. carbon nanotube)
CPO	Chlorperoxidase
CV	Cyclovoltammetrie, Cyclovoltammogramm
DFI	DECHEMA-Forschungsinstitut, Frankfurt am Main
DNA	Desoxyribonukleinsäure (engl. deoxyribonucleic acid)
DOE	U. S. Department of Energy
DSP	engl. downstream processing

EBS	4-Ethylbenzolsulfonsäure
ECE	elektrochemisch-chemisch-elektrochemisch
EMLC	Potential-kontrollierte Flüssigchromatographie (engl. electrochemically modulated liquid chromatography)
ELSA	engl. electrostatic layer-by-layer self-assembly
EOF	Elektroosmotischer Fluss
<i>et al.</i>	<i>et alii</i> (lat. und andere)
FAD	Flavin-Adenin-Dinukleotid
[Fe(CN <sub>6</sub> ) <sup>4-</sup>	Hexacyanoferrat
FFF	Feld-Fluss-Fraktionierung (engl. field-flow fractionation)
GC	Glaskohlenstoff (engl. glassy carbon)
GC	Gaschromatographie
GDH	Glucosedehydrogenase
Glu	Glutaminsäure
H	Wasserstoff
HBS	4-Hydroxybenzolsäure Natriumsalz
HClO <sub>4</sub>	Perchlorsäure
HETP	Trennstufenhöhe (engl. height of an equivalent theoretical plate)
His	Histidin
HLADH	Pferdeleberalkoholdehydrogenase (engl. horse liver alcohol dehydrogenase)
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
H <sub>2</sub> O	Wasser
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid
H <sub>x</sub> PO <sub>4</sub> <sup>y-</sup>	Phosphatanion
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Phosphorsäure
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (engl. high-performance liquid chromatography)
HQS	Hydrochinonsulfonat
HRTEM	Hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie (engl. high resolution transmission electron microscopy)
HTW	Hochtemperatur-Werkstoffe GmbH

---

I <sup>-</sup>	Iodid
IO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Iodat
ISPR	<i>in situ</i> -Produktentfernung (engl. <i>in situ</i> product removal)
K	Kalium
KCl	Kaliumchlorid
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Kaliumdihydrogenphosphat
LbL	Layer-by-Layer
Li	Lithium
LiCl	Lithiumchlorid
LiClO <sub>4</sub>	Lithiumperchlorat
LiNO <sub>3</sub>	Lithiumnitrat
MBS	Methylbenzolsulfonsäure
MeOH	Methanol
MER	Elektrochemischer Membranreaktor (engl. membrane electrochemical reactor)
Mg	Magnesium
MgSO <sub>4</sub>	Magnesiumsulfat
Na	Natrium
NaBF <sub>4</sub>	Natriumtetrafluoroborat
NaCl	Natriumchlorid
NaClO <sub>4</sub>	Natriumperchlorat
NAD <sup>+</sup>	Nicotinamidadeninnukleotid, oxidiert
NADH	Nicotinamidadeninnukleotid, reduziert
NaF	Natriumfluorid
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	Dinatriumhydrogenphosphat
NaOH	Natronlauge
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Natriumsulfat
NDS	Dinatrium-1,5-Napthalindisulfonat
NH <sub>4</sub> Cl	Ammoniumchlorid
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrit
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrit
NTS	Naphtalintrisulfonat
OCP	Ruhepotential (engl. open-circuit potential)

OH <sup>-</sup>	Hydroxidion
<i>o</i> -H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	<i>ortho</i> -Phosphorsäure
PAA	Polyacrylsäure
PAH	Polyallylamin Hydrochlorid
PEM	engl. polyelectrolyte multilayer
PGC	poröser graphitischer Kohlenstoff (engl. porous graphitic carbon)
PFSA	Poly(perfluoroalkyl)sulfonsäure (Nafion®)
PMAA	Polymethacrylsäure
PPI	Poren pro inch (engl. pores per inch)
PSS	Polystyrolsulfonat
PVA	Polyvinylalkohol
PVBTMAC	Poly ((vinylbenzyl) trimethylammonium chlorid))
PZC	Nullladungspotential (engl. potential of zero charge)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RVC	Glaskohlenstoffschaum (engl. reticulated vitreous carbon)
RZA	Raum-Zeit-Ausbeute (engl. space-time yield, STY)
SAM	engl. self-assembled monolayer
satd	gesättigte (engl. saturated)
SCN <sup>-</sup>	Thiocyanat
TEAP	Tetraethylammoniumperchlorat
TFA	Trifluoressigsäure
TF	Wechselzahl (engl. turnover frequency), auch TOF
TTN	Gesamtwechselzahl (engl. total turnover number), auch TN oder TON
TRIS	Tris(hydroxymethyl)-aminomethan
TS	Natriumtoluolsulfonat, 4-Toluolsulfonat
VBS	4-Styrolsulfonat

## Formelzeichen

$\alpha$	Selektivitätsfaktor	
A	Elektrodenoberfläche	[cm <sup>2</sup> ], [m <sup>2</sup> ]
$\beta$	Stromausbeute	[%]
c	Konzentration	[mM], [M], [mg L <sup>-1</sup> ], [g L <sup>-1</sup> ]
$c_i$	Konzentration der Ionensorte i	[M]
C	Kapazität	[F]
d	Schichtabstand	[m]
d	Schichtdicke	[cm]
$\Delta E$	Steigung der Absorption	[min <sup>-1</sup> ]
$\Delta\varphi$	Differenz der elektrischen Potentiale	[V]
$\Delta\varphi$	Galvanispannung	[V]
e	Elementarladung	$1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]
$\varepsilon$	Extinktionskoeffizient	[mL $\mu\text{mol}^{-1}$ cm <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	Permittivität	[A s V <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_0$	elektrische Feldkonstante	$8,854 \cdot 10^{-12}$ [A s V <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_\lambda$	Extinktionskoeffizient	[L mol <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_r$	Permittivitätszahl	
$E_{pa}$	Anodisches Peakpotential	[mV]
$E_{pc}$	Kathodisches Peakpotential	[mV]
$E_\lambda$	Extinktion	
$E_{pZC}$	Nullladungspotential	[V]
F	Verdünnungsfaktor	
F	Faraday-Konstante	96485,34 [C mol <sup>-1</sup> ]
H	Höhe eines theoretischen Bodens	[m]
i	Stromdichte	[A m <sup>-2</sup> ]
I	Ionenstärke	[mol L <sup>-1</sup> ]
$I_{pa}$	Anodischer Peakstrom	[A]
$I_{pc}$	Kathodischer Peakstrom	[A]
$\kappa$	Dicke der diffusen Doppelschicht	
$k'$	Kapazitätsfaktor	
$k_B$	Boltzmannkonstante	$1,38 \cdot 10^{-23}$ [J K <sup>-1</sup> ]

$K_m$	Michaelis-Menten-Konstante	[mM]
$l_D$	Debye-Länge	
L	Säulenlänge	[m]
M	Molare Masse	[g mol <sup>-1</sup> ]
N	Bodenzahl	
$N_A$	Avogadro-Konstante	$6,022 \cdot 10^{23}$ [mol <sup>-1</sup> ]
$\varphi$	elektrisches Potential	[V]
R	Auflösung	
RZA	Raum-Zeit-Ausbeute	[g L <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
T	Temperatur	[K]
TF	Wechselzahl	[s <sup>-1</sup> ], [h <sup>-1</sup> ]
t	Zeit	[h], [min]
$t_r$	Bruttoretentionszeit	[min]
$t_0$	Totzeit	[min]
$t'$	Nettoretentionszeit	[min]
Q	Ladung	[C]
U	Spannung	[V]
V	Reaktionsvolumen	[L]
$v_{max}$	maximale Reaktionsgeschwindigkeit	[ $\mu$ M (Produkt) s <sup>-1</sup> ]
w	Peakbreite	
x	Abstand von der Elektrode	[m]
$z_i$	Ladung der Ionensorte i	
z	Anzahl übertragener Elektronen	
$\zeta$	Zeta-Potential	[V]