

Reihe 9

Elektronik/Mikro  
und Nanotechnik

Nr. 394

Dipl.-Ing. Danny Lehmann,  
Hamburg

## Inkjet-Druckprozess für die Fertigung von Strukturen zur photoaktivierten Wasserspaltung



*Professur für Automatisierungstechnik*

*Professur für Prozessdatenverarbeitung  
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg



# Inkjet-Druckprozess für die Fertigung von Strukturen zur photoaktivierten Wasserspaltung

---

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

von

**D. L e h m a n n**

aus Hamburg

Hamburg 2016

## Tag der mündlichen Prüfung:

25.11.2016

## Prüfungskommission:

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg  
Institut für Automatisierungstechnik

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Klassen  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg  
Institut für Werkstofftechnik

Prüfungsvorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Markus Bause  
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg  
Professur für Numerische Mathematik

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 9

Elektronik/Mikro-  
und Nanotechnik

Dipl.-Ing. Danny Lehmann,  
Hamburg

Nr. 394

## Inkjet-Druckprozess für die Fertigung von Strukturen zur photoaktivierten Wasserspaltung



*Professur für Automatisierungstechnik*

*Professur für Prozessdatenverarbeitung  
und Systemanalyse*

Institut für Automatisierungstechnik der  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg

Lehmann, Danny

## **Inkjet-Druckprozess für die Fertigung von Strukturen zur photoaktivierten Wasserspaltung**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 9 Nr. 394. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

166 Seiten, 100 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-18-339409-8, ISSN 0178-9422,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

**Für die Dokumentation:** Automatisierungstechnik – Additive Manufacturing – Tintenstrahl Druck – Elektronik – Photokatalyse – Wasserspaltung – Elektroden – Mikrostrukturierung

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Automatisierungstechnik und Fertigungstechnik. Sie befasst sich mit Experimenten und Simulationen im Bereich funktioneller Inkjet-Druck. Im Fokus standen in der Vergangenheit dabei der Tintenstrahl Druck elektrisch funktioneller Strukturen. Die Arbeit schließt sich hier an. Es ist das Ziel, photokatalytische Elektroden für die Wasserspaltung mittels Sonnenlicht im Tintenstrahl Druck zu fertigen. Besondere Herausforderungen liegen im Druck definiert dünner Schichten sowie in deren Mikrostrukturierung. Durch die gezielte Modifikation des Prozesses gelingt es, Elektroden für photoelektrochemische Zellen herzustellen, deren Leistung vergleichbar ist mit der Leistung von Elektroden, die auf konventionellem Wege gefertigt werden.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie

(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9422

ISBN 978-3-18-339409-8

---

## Geleitwort der Herausgeber

Die Automatisierungstechnik ist ein komplexes und vielfältiges wissenschaftliches Gebiet. Am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wird zum einen die Entwicklung neuer automatisierungstechnischer Methoden vorangetrieben, zum anderen wird die Automatisierung bzw. Regelung komplexer Fertigungsprozesse bearbeitet. Die reale Umsetzung im Rahmen technischer Prozesse, insbesondere industrieller Produktionsprozesse, ist das Ziel des ingenieurwissenschaftlichen Wirkens und zugleich Gradmesser für seinen Erfolg.

Das sogenannte *Additive Manufacturing* ruft sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Industrie großes Interesse hervor. Das verwundert nicht, die zugehörigen Verfahren bieten vielfältige und neuartige Möglichkeiten. Am Institut wird seit gut zehn Jahren auf diesem Gebiet geforscht. Im Fokus steht dabei der Tintenstrahldruck elektrisch funktioneller Strukturen.

Die Arbeit von Herrn Lehmann reiht sich hier ein. Er setzte sich das Ziel, photokatalytische Elektroden für die Wasserspaltung mittels Sonnenlicht im Tintenstrahldruck zu fertigen. Besondere Herausforderungen lagen im Druck definiert dünner Schichten sowie in deren Mikrostrukturierung. Beides ist Herrn Lehmann gelungen. Sehr schön nutzt er den Marangoni-Effekt zur Generierung von Strukturen deutlich unterhalb der Größenordnung eines Tintentropfens. Bezüglich ihrer photokatalytischen Leistung überzeugen die so hergestellten Elektroden uneingeschränkt. Damit bietet der Tintenstrahldruck grundsätzlich das Potential kostengünstige Elektroden für die solare Wasserstoffgewinnung herzustellen.

Die Herausgeber danken dem VDI-Verlag für die Möglichkeit einer breiten Veröffentlichung dieser Ergebnisse.

Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

## Vorwort des Verfassers

Im Rahmen meiner Forschungstätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Helmholtz-Zentrum Geesthacht und am Institut für Automatisierungstechnik ist nun schließlich die vorliegende Dissertationsschrift entstanden. Ich habe diese Zeit als durchaus intensiv, spannend und herausfordernd empfunden, in jedem Falle nicht nur als eine fachliche sondern auch als eine persönliche Bereicherung.

Sehr herzlich bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger, der dieses Vorhaben betreut hat und durch Anregungen und kritische Diskussionen weitreichend zum Erfolg des Projektes beigetragen hat sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Klassen, der dieses Forschungsprojekt mit initiiert und damit ermöglicht hat.

Ein entscheidendes Moment für das Voranschreiten dieser wissenschaftlichen Unternehmung war zudem die produktive Zusammenarbeit mit den Kollegen vom Helmholtz-Zentrum Geesthacht, hier bedanke ich mich bei Frau Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Iris Herrmann-Geppert, Herrn Dr. rer. nat. Mauricio Schieda sowie Frau Dr. rer. nat. Yaowapa Treekamol.

Besonderer Dank auch an Herrn Dr.-Ing. Vico Haverkamp, der zwischenzeitlich die kommissarische Leitung der Professur übernommen und so auf organisatorischer Ebene zu dem Projekt beigetragen hat.

Für die Unterstützung bei der Durchführung von Experimenten bedanke ich mich bei Herrn Ercan Yilmaz, für Mitarbeit im Rahmen der Labortechnik danke ich den Herren Reinhard Schultz, Nicki Grauert, Hendrik Schöning, Wolfgang Kletz und Wolfgang Schmidt.

Im Rahmen von Studien- und Masterarbeiten hatten auch Studenten die Gelegenheit Fragestellungen zu bearbeiten, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Forschungsarbeit auftraten. Für die motivierte und engagierte Mitarbeit bedanke ich mich bei den Herren Matthew Long, Martin Ohland und Marcel Donatz.

Für das Korrekturlesen der schriftlichen Arbeit und für entsprechende Hinweise danke ich Herrn Dr. rer. nat. Hauke Langner und Herrn Hendrik Schnack. Abseits der Forschungsarbeit sei auch allen weiteren Kollegen an der Helmut-Schmidt-Universität und am Helmholtz-Zentrum gedankt, die dazu beigetragen haben dass wir auf die vergangenen Jahre nun in der Tat auch neben unserer professionellen Tätigkeit als eine sehr erfreuliche und erfüllende Zeit zurückblicken dürfen.

Außerdem danke ich meiner Familie, die voll und ganz hinter dem Vorhaben stand und deren Vorbild und stete Unterstützung für mich zu jeder Zeit einen außerordentlichen Rückhalt darstellten.

Hamburg, November 2016

D. Lehmann

# Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Formelzeichenverzeichnis</b>  | <b>VIII</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2 Stand der Forschung</b>   | <b>7</b>    |
| 2.1 Funktioneller Tintenstrahl Druck . . . . .                                       | 7           |
| 2.2 Photoelektrochemische Zelle . . . . .  | 11          |
| <b>3 Funktionelle Partikelintinten</b>   | <b>16</b>   |
| 3.1 Verdruckbarkeit . . . . .  | 16          |
| 3.1.1 Ziele . . . . .  | 16          |
| 3.1.2 Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                       | 17          |
| 3.1.3 Druckbarkeitsversuche für reine Flüssigkeiten . . . . .                        | 22          |
| 3.1.4 Erweiterung des klassischen Modells für stabilisierte Dispersionen . . . . .   | 25          |
| 3.2 Stabilität . . . . .   | 32          |
| 3.2.1 Ziele . . . . .  | 32          |
| 3.2.2 Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                       | 33          |
| 3.2.3 Photometrische Sedimentationsanalyse . . . . .                                 | 36          |
| 3.2.4 Impedanzbasierte Sedimentationsanalyse . . . . .                               | 39          |
| 3.2.5 Entwicklung eines bildbasierten Verfahrens zur Sedimentationsanalyse . . . . . | 43          |
| 3.3 Substratbenetzung . . . . .  | 45          |
| 3.3.1 Ziele . . . . .  | 45          |
| 3.3.2 Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                       | 46          |
| 3.3.3 Benetzung von leitfähigen Gläsern . . . . .                                    | 49          |
| 3.3.4 Steuerung des Kontaktwinkels . . . . .   | 51          |
| 3.4 Schichthöhe . . . . .  | 52          |
| 3.4.1 Ziele . . . . .  | 53          |
| 3.4.2 Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                       | 53          |
| 3.4.3 Steuerung der Schichthöhe über den Feststoffgehalt . . . . .                   | 54          |
| 3.5 Tinten auf Basis von oberflächenmodifizierten Partikeln . . . . .                | 55          |
| 3.5.1 Ziele . . . . .  | 56          |
| 3.5.2 Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                       | 56          |
| 3.5.3 Einfluss der Oberflächenmodifizierung auf die Tintenrheologie . . . . .        | 58          |
| <b>4 Druck- und Sinterprozess</b>  | <b>61</b>   |
| 4.1 Fluidmechanische Effekte in trocknenden Tintentropfen . . . . .                  | 61          |
| 4.1.1 Ziele . . . . .  | 61          |
| 4.1.2 Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                       | 62          |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.3    | Coffee-Ring-Effect und Einfluss der Substratbeheizung . . . . .                  | 65         |
| 4.1.4    | Marangoni-Konvektion bei binären Lösungsmittelgemischen . . . . .                | 68         |
| 4.2      | Systematischer Ansatz zur Wahl des Spot- und Linienabstandes . . . . .           | 80         |
| 4.2.1    | Ziele . . . . .  | 80         |
| 4.2.2    | Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                         | 81         |
| 4.2.3    | Minimierung der Schichthöhe . . . . .  | 81         |
| 4.3      | Sinterprozess . . . . .  | 83         |
| 4.3.1    | Ziele . . . . .  | 84         |
| 4.3.2    | Physikalische Grundlagen und Stand der Technik . . . . .                         | 84         |
| 4.3.3    | Temperaturverhalten der Leitfähigkeit dünner poröser Hämatitschichten . . . . .  | 85         |
| 4.3.4    | Volumenschwund und Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Sinterfortschritt . . . . . | 88         |
| 4.3.5    | Entwicklung eines bildbasierten Haftfestigkeitstests . . . . .                   | 90         |
| <b>5</b> | <b>Tintenstrahl Druck von ebenen Photoelektroden</b>                             | <b>94</b>  |
| 5.1      | Experimentelle Grundlagen . . . . .  | 94         |
| 5.1.1    | Inkjet-Versuchsstand . . . . .   | 94         |
| 5.1.2    | Charakterisierung der Photoelektroden . . . . .                                  | 95         |
| 5.2      | Photoelektroden auf Basis von Hämatit . . . . .                                  | 95         |
| 5.2.1    | Nachbehandlung durch Sintern bei 500 °C . . . . .                                | 96         |
| 5.2.2    | Nachbehandlung durch Sintern unter Sauerstoffatmosphäre . . . . .                | 97         |
| 5.2.3    | Vorbehandlung der funktionellen Partikel . . . . .                               | 98         |
| 5.2.4    | Nachbehandlung durch Sintern bei 800 °C . . . . .                                | 99         |
| 5.3      | Photoelektroden auf Basis von Titandioxid . . . . .                              | 100        |
| 5.3.1    | Polymerische Stabilisierung des Trägerfluides . . . . .                          | 100        |
| 5.3.2    | Trägerfluid als höherviskoses binäres Gemisch . . . . .                          | 101        |
| 5.3.3    | Herstellung durch mehrschichtigen Druck . . . . .                                | 102        |
| 5.3.4    | Photoaktive Schicht auf Titansubstrat . . . . .                                  | 104        |
| 5.4      | Photoelektroden auf Basis von oberflächenmodifizierten Partikeln . . . . .       | 107        |
| <b>6</b> | <b>Tintenstrahl Druck von strukturierten Photoelektroden</b>                     | <b>110</b> |
| 6.1      | Potential zur Erhöhung der freien Oberfläche . . . . .                           | 110        |
| 6.2      | Systematische Auswahl geeigneter Trägerfluide . . . . .                          | 111        |
| 6.2.1    | Berechnung über die Festlegung der gewünschten Stoffeigenschaften . . . . .      | 112        |
| 6.2.2    | Heuristische Bestimmung geeigneter Zusammensetzungen . . . . .                   | 114        |
| 6.3      | Modifikation des Druckprozesses . . . . .  | 115        |
| 6.3.1    | Aufbau der aktiven Schicht durch einzelne Spots . . . . .                        | 115        |
| 6.3.2    | Realisierung einer hohen Oberfläche . . . . .                                    | 118        |
| 6.4      | Photoelektroden auf Basis von einzelnen strukturierten Spots . . . . .           | 119        |
| 6.4.1    | Freiliegende einzelne Spots . . . . .  | 119        |
| 6.4.2    | Überlagerung der einzelnen Spots . . . . .                                       | 120        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>124</b> |
|          | <b>Anhang</b>  | <b>128</b> |
| <b>A</b> | <b>Materialparameter</b>   | <b>129</b> |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>B</b> Messergebnisse                                   | <b>131</b> |
| <b>C</b> Herleitung der verwendeten theoretischen Modelle | <b>135</b> |
| Literaturverzeichnis                                      | <b>140</b> |

# Formelzeichenverzeichnis

## Formelzeichen

| Zeichen                   | Bezeichnung  |
|---------------------------|--|
| $a$                       | Parameter der Konzentrationsabhängigkeit der Oberflächenspannung |
| $a$                       | Temperaturleitfähigkeit  |
| $A$                       | Fläche   |
| $A_{\text{eben}}$         | Fläche des ebenen Spots  |
| $A_{\text{strukturiert}}$ | Fläche des strukturierten Spots                                  |
| $b$                       | Parameter der Konzentrationsabhängigkeit der Oberflächenspannung |
| $B_{1,2,3,4}$             | Gleichungsparameter zur Berechnung der Oberfläche                |
| $c$                       | Schallgeschwindigkeit  |
| $c$                       | Massenbezogener Gehalt einer Komponente eines binären Gemischs   |
| $c_p$                     | Isobare spezifische Wärmekapazität                               |
| $c_{p,\text{Gem}}$        | Isobare spezifische Wärmekapazität eines binären Gemischs        |
| $c_{\text{Add}}$          | Massenbezogener Anteil des Additivs                              |
| $c_{\text{Fest}}$         | Massenbezogener Feststoffgehalt                                  |
| $c_{\text{Fluid}}$        | Massenbezogener Anteil des Trägerfluids                          |
| $C$                       | Kritischer Punkt   |
| $d$                       | Dicke des Coffee-Rings   |
| $D$                       | Düsendurchmesser   |
| $D_{50}$                  | Mittlerer Partikeldurchmesser                                    |
| $D_{\text{Rohr}}$         | Durchmesser der Glaskapillare                                    |
| $D_{\text{Tropfen}}$      | Durchmesser des Tropfens   |
| $e$                       | Elementarladung  |
| $E$                       | Elastizitätsmodul  |
| $E$                       | Energie  |
| $E^\circ$                 | Standard Potential   |
| $E_{\text{cb}}$           | Energieniveau des Leitungsbandes                                 |
| $E_{\text{vb}}$           | Energieniveau des Valenzbandes                                   |
| $f$                       | Frequenz   |
| $f$                       | Funktion zur Beschreibung der Bewegung des Piezokristalls        |
| $F$                       | Kraft  |
| $F$                       | Faraday-Konstante  |
| $F_{\text{AG}}$           | Resultierende Kraft aus Auftriebs- und Gewichtskraft             |

|                      |   |
|----------------------|---|
| $F_W$                | Widerstandskraft  |
| $g$                  | Gravitationskonstante   |
| $G$                  | Leitwert  |
| $G'$                 | Speichermodul   |
| $G''$                | Verlustmodul  |
| $G^\circ$            | Freie Energie   |
| $h$                  | Plancksches Wirkungsquantum   |
| $h$                  | Wandstärke des Piezorohrs   |
| $h$                  | Oberflächenfunktion   |
| $h$                  | Höhe  |
| $h_{\max}$           | Maximale Höhe   |
| $h_{\min}$           | Minimale Höhe   |
| $IPCE$               | Quantenausbeute   |
| $k$                  | Koeffizient der Einstein-Gleichung                                      |
| $k_D$                | Gleichungsparameter der Temperaturabhängigkeit der Dichte               |
| $k_E$                | Eötvös-Koeffizient  |
| $k_O$                | Gleichungsparameter der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung  |
| $k_{VA}$             | Gleichungsparameter der Abhängigkeit der Viskosität vom Additivgehalt   |
| $k_{VF}$             | Gleichungsparameter der Abhängigkeit der Viskosität vom Feststoffgehalt |
| $k_{VT}$             | Gleichungsparameter der Temperaturabhängigkeit der Viskosität           |
| $L$                  | Länge   |
| $m_{\text{Add}}$     | Masse des Additivs  |
| $m_{\text{Fest}}$    | Masse des Feststoffs  |
| $m_{\text{Fluid}}$   | Masse des Trägerfluids  |
| $M$                  | Molmasse  |
| $M$                  | Moment  |
| $n$                  | Anzahl  |
| $n_i$                | Konzentration der zur Verfügung stehenden Elektronen im Leitungsband    |
| $p$                  | Druck   |
| $p$                  | Dampfdruck  |
| $p_0$                | Druck bei Standardbedingungen   |
| $p_{\text{Gem}}$     | Dampfdruck eines binären Gemischs                                       |
| $P_{\text{Solar}}$   | Strahlungsleistung der Sonne  |
| $r$                  | Radius  |
| $r$                  | Weg in radialer Richtung  |
| $r_{\text{Fluid}}$   | Radius der Flüssigkeitssäule  |
| $r_{\text{H}_2}$     | Wasserstoffproduktionsrate  |
| $R$                  | Widerstand  |
| $R$                  | Radius  |
| $R_0$                | Spotradius während der ersten Verdampfungsphase                         |
| $R_{1,2}$            | Hauptkrümmungsradien  |
| $R_{\text{Spot}}$    | Radius des Spots auf dem Substrat                                       |
| $R_{\text{Tropfen}}$ | Radius des Tropfens in der Luft   |
| $STH$                | Solar-to-hydrogen Wirkungsgrad  |
| $t$                  | Zeit  |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $t_{VD}$              | Verdampfungszeit  |
| $T$                   | Temperatur  |
| $T_K$                 | Kritische Temperatur  |
| $T_S$                 | Schmelztemperatur   |
| $T_{Spitze}$          | Temperatur an der Spitze des trocknenden Spots                  |
| $T_{Substrat}$        | Substrattemperatur  |
| $u$                   | Geschwindigkeit   |
| $v$                   | Geschwindigkeit   |
| $v$                   | Molvolumen  |
| $V$                   | Volumen   |
| $V_A$                 | Van-der-Waals-Abstoßung   |
| $V_B$                 | Bornsche Abstoßung  |
| $V_M$                 | Maximales Abstoßungspotential                                   |
| $V_R$                 | Elektrostatische Abstoßung                                      |
| $V_T$                 | Gesamtpotential der elektrostatischen Wechselwirkung            |
| $w$                   | Geschwindigkeit   |
| $x$                   | Molare Anteile der Komponenten eines binären Gemischs           |
| $x$                   | Parameter der Gleichung zur Bestimmung der Grenzflächenspannung |
| $x$                   | Weg in x-Richtung   |
| $X$                   | Stoffeigenschaft einer Komponente eines binären Gemischs        |
| $X_{Gem}$             | Stoffeigenschaft eines binären Gemischs                         |
| $y$                   | Weg in y-Richtung   |
| $y$                   | Parameter der Gleichung zur Bestimmung der Grenzflächenspannung |
| $z$                   | Weg in z-Richtung   |
| $\beta_{eq}$          | Gleichgewichtsspreitung   |
| $\beta_{max}$         | Maximale Spreitung  |
| $\dot{\gamma}$        | Scherrate   |
| $\delta$              | Diffusionskoeffizient   |
| $\delta_{Gem}$        | Diffusionskoeffizient eines binären Gemischs                    |
| $\Delta$              | Differenz   |
| $\eta$                | Viskosität  |
| $\eta_0$              | Viskosität einer reinen Flüssigkeit                             |
| $\eta_{Gem}$          | Viskosität eines binären Gemischs                               |
| $\theta$              | Kontaktwinkel   |
| $\lambda$             | Wärmeleitfähigkeit  |
| $\lambda_{Gem}$       | Wärmeleitfähigkeit eines binären Gemischs                       |
| $\mu$                 | Ladungsträgerbeweglichkeit                                      |
| $\mu$                 | Mittelwert  |
| $\rho$                | Dichte  |
| $\rho_0$              | Ursprüngliche Dichte  |
| $\rho_{20\text{ °C}}$ | Dichte bei 20 °C  |
| $\rho_{Add}$          | Dichte des Additivs   |
| $\rho_{Fest}$         | Dichte des Feststoffs   |
| $\rho_{Fluid}$        | Dichte des Trägerfluids   |
| $\rho_{Gem}$          | Dichte eines binären Gemischs                                   |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $\sigma$              | Standardabweichung                                      |
| $\sigma$              | Oberflächenspannung                                     |
| $\sigma_{\text{Gem}}$ | Oberflächenspannung eines binären Gemischs              |
| $\sigma_{\text{L}}$   | Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Umgebung  |
| $\sigma_{\text{S}}$   | Grenzflächenspannung zwischen Feststoff und Umgebung    |
| $\sigma_{\text{SL}}$  | Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Feststoff |
| $\tau$                | Schubspannung   |
| $\tau_{\text{rr}}$    | Resultierende Spannung in radialer Richtung             |
| $\varphi$             | Dichtefunktion der Normalverteilung                     |
| $\varphi_0$           | Winkel des Rheometer-Kegels                             |
| $\Phi$                | Volumetrischer Feststoffgehalt                          |
| $\Phi$                | Assoziationskoeffizient                                 |
| $\omega$              | Winkelgeschwindigkeit                                   |

## Abkürzungen

| Zeichen | Bedeutung  |
|---------|--|
| BC      | Butyldiglycol  |
| BCA     | Butyldiglycolacetat  |
| BUG     | Butyglycol   |
| CRE     | Coffee-Ring-Effect   |
| DoD     | Drop on Demand   |
| DEG     | Diethylenglycol  |
| DLVO    | DLVO-Theorie nach Derjaguin, Landau, Verwey und Overbeek   |
| DMAc    | Dimethylacetamid   |
| EG      | Ethylenglycol  |
| ETH     | Ethanol  |
| FTO     | Fluorid-Doped-Tinoxide                                     |
| HER     | Hydrogen Evolution Reaction                                |
| IPCC    | Weltklimarat der Vereinten Nationen                        |
| ISO     | Isopropanol  |
| LED     | Light-Emitting-Diode                                       |
| NHE     | Normal-Wasserstoffelektrode                                |
| OER     | Oxygen Evolution Reaction                                  |
| P25     | Titandioxid-Partikel, Standard P25                         |
| P25 Si  | Oberflächenmodifizierte Titandioxid-Partikel, Standard P25 |
| PEC     | Photoelektrochemische Zelle                                |
| PEN     | 1,5-Pentandiol   |
| RFID    | Radio-Frequency-Identification                             |
| RGB     | RGB-Farbmodell   |
| SHE     | Standard-Wasserstoffelektrode                              |

|        |   |
|--------|---|
| TER    | $\beta$ -Terpeniol  |
| UNFCCC | Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen |
| WAS    | Destilliertes Wasser  |

## Dimensionslose Größen

| Zeichen            | Bedeutung   |
|--------------------|---|
| $Ma_C$             | Marangonizahl, konzentrationsgetrieben                                    |
| $Ma_T$             | Marangonizahl, temperaturgetrieben  |
| $Oh^{-1}$          | Inverse Ohnesorgezahl   |
| $p_{\text{Gem}}^*$ | Auf den Druck bei Standardbedingungen bezogener Dampfdruck eines Gemischs |
| $Re$               | Reynoldszahl  |
| $We$               | Weberzahl   |
| $\chi$             | Auf den Spotradius bezogener Spotabstand                                  |
| $\psi$             | Auf den Spotradius bezogener Linienabstand                                |