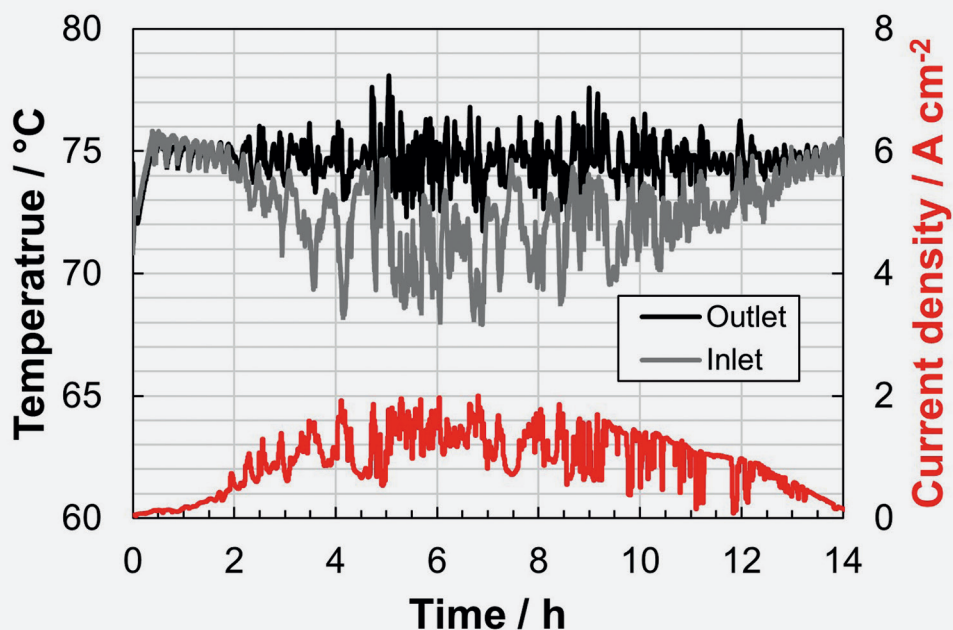




## Dynamischer Betrieb von Polymer-Elektrolyt-Membran Wasserelektrolyseuren

Edward Rauls

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 658

ISBN 978-3-95806-811-7

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institute of Energy Technologies (IET)  
Elektronische Verfahrenstechnik (IET-4)

# **Dynamischer Betrieb von Polymer-Elektrolyt-Membran Wasserelektrolyseuren**

Edward Rauls

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 658

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-811-7

## Inhaltsverzeichnis

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| Kurzfassung.....                                        | I         |
| Abstract .....                                          | II        |
| Inhaltsverzeichnis.....                                 | III       |
| Abbildungsverzeichnis.....                              | VI        |
| Tabellenverzeichnis.....                                | X         |
| Nomenklatur .....                                       | XI        |
| <b>1 Einleitung.....</b>                                | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivation.....                                     | 1         |
| 1.2 Zielsetzung.....                                    | 2         |
| 1.3 Gliederung der Arbeit.....                          | 3         |
| <b>2 Elektrolytische Wasserstoffherzeugung.....</b>     | <b>4</b>  |
| 2.1 Funktionsweise von Elektrolysezellen.....           | 5         |
| 2.1.1 Technologien der Niedertemperaturelektrolyse..... | 5         |
| 2.1.2 Thermodynamische Grundlagen.....                  | 7         |
| 2.1.3 Polarisierung von PEM-Elektrolysezellen .....     | 8         |
| 2.2 Aufbau von PEM-Elektrolyseuren .....                | 11        |
| 2.2.1 Elektrolysestack.....                             | 11        |
| 2.2.2 Elektrolysesystem.....                            | 12        |
| 2.2.3 Gasaufbereitung .....                             | 14        |
| 2.3 Stand der Technik und Marktausblick .....           | 17        |
| 2.4 Modellierung von Elektrolyseuren.....               | 20        |
| 2.4.1 Überblick vorhandener Modelle .....               | 20        |
| 2.4.2 Dynamische Modellierungsansätze.....              | 25        |
| 2.4.3 Forschungsbedarf.....                             | 32        |
| 2.5 Zusammenfassung von Abschnitt 2 .....               | 34        |
| <b>3 Dynamischer Betrieb von Elektrolyseuren.....</b>   | <b>35</b> |
| 3.1 Betriebsstrategien von Elektrolyseuren .....        | 35        |
| 3.1.1 Betriebsbereiche von Elektrolyseuren .....        | 37        |

|          |                                                              |            |
|----------|--------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1.2    | Bereitschaftsbetrieb .....                                   | 39         |
| 3.2      | Kopplung mit wetterabhängigen Stromquellen .....             | 41         |
| 3.2.1    | Kopplung mit Windkraftanlagen .....                          | 41         |
| 3.2.2    | Kopplung mit Photovoltaikanlagen .....                       | 45         |
| 3.3      | Einsatz zur Stabilisierung von Stromnetzen .....             | 49         |
| 3.3.1    | Arten von Regelleistungen am Strommarkt .....                | 49         |
| 3.3.2    | Einsatzpotenzial von Wasserelektrolyseuren .....             | 51         |
| 3.4      | Degradation im dynamischen Betrieb .....                     | 54         |
| 3.5      | Diskussion zum dynamischen Betrieb von Elektrolyseuren ..... | 55         |
| 3.6      | Zusammenfassung von Abschnitt 3 .....                        | 57         |
| <b>4</b> | <b>Methodenteil: Versuche und Modellbildung .....</b>        | <b>58</b>  |
| 4.1      | Versuche zum dynamischen Systemverhalten .....               | 58         |
| 4.1.1    | Beschreibung des Referenzteststandes .....                   | 58         |
| 4.1.2    | Elektrochemische Charakterisierung .....                     | 60         |
| 4.1.3    | Thermische Charakterisierung .....                           | 61         |
| 4.1.4    | Vergleich von Aufheizstrategien .....                        | 66         |
| 4.1.5    | Systemantwort auf dynamische Lastvorgaben .....              | 69         |
| 4.2      | Dynamisches Simulationsmodell für PEM-Elektrolyseure .....   | 73         |
| 4.2.1    | Dynamisches Zellmodell .....                                 | 74         |
| 4.2.2    | Dynamisches Stackmodell .....                                | 81         |
| 4.2.3    | Dynamisches Systemmodell .....                               | 83         |
| 4.2.4    | Modellierung der Regelungen .....                            | 97         |
| 4.2.5    | Skalierung von Elektrolyseuren .....                         | 101        |
| 4.3      | Zusammenfassung von Abschnitt 4 .....                        | 108        |
| <b>5</b> | <b>Parametrisierung und Validierung .....</b>                | <b>109</b> |
| 5.1      | Parametrisierung des Simulationsmodells .....                | 109        |
| 5.1.1    | Elektrochemische Parameter .....                             | 109        |
| 5.1.2    | Thermische Parameter .....                                   | 111        |
| 5.2      | Thermoneutrale Betriebspunkte .....                          | 122        |
| 5.2.1    | Realer Elektrolyseur .....                                   | 122        |

|          |                                                        |            |
|----------|--------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.2    | Adiabater Elektrolyseur .....                          | 125        |
| 5.3      | Validierung des Simulationsmodells.....                | 127        |
| 5.3.1    | Synthetisches Stufenprofil .....                       | 128        |
| 5.3.2    | Windkraft-Betriebsprofil .....                         | 134        |
| 5.3.3    | Photovoltaik-Betriebsprofil.....                       | 139        |
| 5.4      | Diskussion der Parametrisierung und Validierung.....   | 144        |
| 5.5      | Zusammenfassung von Abschnitt 5 .....                  | 145        |
| <b>6</b> | <b>Dynamische Aspekte der Wasserelektrolyse .....</b>  | <b>146</b> |
| 6.1      | Skalierung von PEM-Elektrolyseuren.....                | 146        |
| 6.1.1    | Skalierung der Elektrolysestacks .....                 | 146        |
| 6.1.2    | Skalierung des Elektrolysesystems .....                | 150        |
| 6.2      | An- und Abschaltdynamik von Wasserelektrolyseuren..... | 157        |
| 6.2.1    | Aufheizverhalten von PEM-Elektrolyseuren.....          | 157        |
| 6.2.2    | Neustart aus dem Bereitschaftsbetrieb.....             | 173        |
| 6.3      | Betriebsdynamik von Wasserelektrolyseuren .....        | 182        |
| 6.3.1    | Einfluss der Auslegung.....                            | 182        |
| 6.3.2    | Einfluss der Betriebsweise.....                        | 190        |
| 6.4      | Diskussion der dynamischen Aspekte.....                | 199        |
| 6.5      | Zusammenfassung von Abschnitt 6 .....                  | 201        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>                           | <b>202</b> |
| <b>8</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                      | <b>205</b> |
| <b>9</b> | <b>Anhang.....</b>                                     | <b>224</b> |
| 9.1      | Stoffdaten.....                                        | 224        |
| 9.1.1    | Stoffdaten für die thermodynamischen Grundlagen .....  | 224        |
| 9.1.2    | Stoffdaten von Wasserstoff, Sauerstoff und Argon.....  | 225        |
| 9.1.3    | Stoffdaten von Wasser .....                            | 227        |
| 9.2      | Übersicht der analysierten Simulationsmodelle .....    | 230        |
| 9.3      | Parameter für die Auslegung von Elektrolyseuren .....  | 235        |
| 9.3.1    | Elektrolysestacks .....                                | 235        |
| 9.3.2    | Systemkomponenten .....                                | 237        |

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 658  
ISBN 978-3-95806-811-7