



Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

# **Energetische und wirtschaftliche Optimierung eines membranbasierten Oxyfuel-Dampfkraftwerkes**

Yevgeniy Nazarko

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

Band / Volume 269

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-065-4

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                         |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung.....</b>                                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation .....                                                                        | 1         |
| 1.2      | Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....                                             | 4         |
| 1.3      | Definitionen .....                                                                      | 6         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Wissenschaft und Technik .....</b>                                         | <b>7</b>  |
| 2.1      | Fossil befeuetes Dampfkraftwerk ohne CO <sub>2</sub> -Abtrennung .....                  | 7         |
| 2.1.1    | Feuerung .....                                                                          | 9         |
| 2.1.2    | Luftbereitstellung .....                                                                | 12        |
| 2.1.3    | Wasser-Dampf-Kreislauf .....                                                            | 14        |
| 2.1.4    | Kühlung .....                                                                           | 17        |
| 2.1.5    | Rauchgasreinigung.....                                                                  | 17        |
| 2.1.6    | Abwärmenutzung.....                                                                     | 30        |
| 2.2      | Oxyfuel-Dampfkraftwerk .....                                                            | 36        |
| 2.2.1    | Feuerung .....                                                                          | 38        |
| 2.2.2    | Oxidansbereitstellung .....                                                             | 42        |
| 2.2.3    | Wasser-Dampf-Kreislauf .....                                                            | 50        |
| 2.2.4    | Kühlung .....                                                                           | 50        |
| 2.2.5    | Reinigung des CO <sub>2</sub> -reichen Rauchgases .....                                 | 50        |
| 2.2.6    | CO <sub>2</sub> -Verdichtung .....                                                      | 65        |
| 2.2.7    | Betriebsaspekte des Oxyfuel-Kraftwerkes.....                                            | 67        |
| 2.3      | Oxyfuel-Dampfkraftwerk mit membranbasierter Sauerstoff-<br>bereitstellung .....         | 72        |
| 2.3.1    | Überblick über Gastrennmembranen zur Sauerstoffbereitstellung.....                      | 72        |
| 2.3.2    | Physikalisch-chemische Grundlagen der Sauerstoffabtrennung<br>mittels Mischleiter ..... | 74        |
| 2.3.3    | Einbindung der Membrananlage ins Dampfkraftwerk und<br>Realisierungskonzepte .....      | 75        |
| 2.4      | Zusammenfassung .....                                                                   | 80        |
| <b>3</b> | <b>Berechnungsgrundlage.....</b>                                                        | <b>81</b> |
| 3.1      | Methodische Definitionen .....                                                          | 81        |
| 3.2      | Methode der thermodynamischen Modellierung.....                                         | 82        |
| 3.2.1    | Vorgehensweise der Kraftwerksmodellierung .....                                         | 82        |
| 3.2.2    | Simulationssoftware .....                                                               | 84        |
| 3.2.3    | Modellierung einzelner Module.....                                                      | 85        |
| 3.2.3.1  | <i>Mahltröcknung mit Staubfördersystem .....</i>                                        | <i>86</i> |

|          |                                                                                  |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.3.2  | <i>Brennkammer</i> .....                                                         | 88         |
| 3.2.3.3  | <i>Luft- bzw. Oxidansbedarf für Verbrennung</i> .....                            | 90         |
| 3.2.3.4  | <i>Sauerstoffmembran</i> .....                                                   | 91         |
| 3.2.3.5  | <i>Wärmeübertragung</i> .....                                                    | 94         |
| 3.2.3.6  | <i>Arbeits- und Kraftmaschinen</i> .....                                         | 98         |
| 3.2.3.7  | <i>Rauchgasreinigung / Reinigung des CO<sub>2</sub>-reichen Rauchgases</i> ..... | 99         |
| 3.3      | Komponentenauslegung und -größenabschätzung .....                                | 102        |
| 3.4      | Kostenabschätzung .....                                                          | 105        |
| 3.4.1    | Kostenmodell .....                                                               | 105        |
| 3.4.2    | Vorgehensweise der Kostenabschätzung .....                                       | 106        |
| 3.4.3    | Verfahren der Kostenabschätzung der Kraftwerkskomponenten .....                  | 108        |
| 3.4.3.1  | <i>Elektrofilter</i> .....                                                       | 111        |
| 3.4.3.2  | <i>Wärmeübertrager</i> .....                                                     | 112        |
| 3.5      | Bewertung der Kraftwerksoptimierungen .....                                      | 113        |
| 3.5.1    | Relative Bewertung .....                                                         | 113        |
| 3.5.2    | Absolute Bewertung .....                                                         | 113        |
| 3.6      | Berechnung von Kenngrößen .....                                                  | 115        |
| <b>4</b> | <b>Referenz-Kraftwerk ohne CO<sub>2</sub>-Abtrennung</b> .....                   | <b>117</b> |
| 4.1      | Randbedingungen der Simulationen .....                                           | 117        |
| 4.2      | Prozessdefinition und -beschreibung .....                                        | 119        |
| 4.2.1    | Feuerung .....                                                                   | 121        |
| 4.2.2    | Luftbereitstellung .....                                                         | 124        |
| 4.2.3    | Wasser-Dampf-Kreislauf .....                                                     | 128        |
| 4.2.4    | Kühlung .....                                                                    | 131        |
| 4.2.5    | Rauchgasreinigung .....                                                          | 134        |
| 4.3      | Ergebnisse der thermodynamischen Simulation .....                                | 141        |
| 4.4      | Zusammenfassung .....                                                            | 144        |
| <b>5</b> | <b>Oxy-Vac-Jül-Basiskraftwerk</b> .....                                          | <b>145</b> |
| 5.1      | Definition und Beschreibung .....                                                | 145        |
| 5.1.1    | Feuerung .....                                                                   | 148        |
| 5.1.2    | Oxidansbereitstellung .....                                                      | 150        |
| 5.1.3    | Wasser-Dampf-Kreislauf .....                                                     | 159        |
| 5.1.4    | Kühlung .....                                                                    | 160        |
| 5.1.5    | Reinigung des CO <sub>2</sub> -reichen Rauchgases .....                          | 163        |
| 5.1.6    | CO <sub>2</sub> -Nachreinigung und -Verdichtung .....                            | 174        |
| 5.2      | Ergebnisse der thermodynamischen Simulation .....                                | 179        |
| 5.2.1    | Gesamtprozessanalyse .....                                                       | 179        |
| 5.2.2    | Sauerstoffbereitstellung .....                                                   | 181        |
| 5.2.3    | Rauchgas .....                                                                   | 183        |

|          |                                                                 |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.4    | CO <sub>2</sub> -Bilanz.....                                    | 186        |
| 5.2.5    | Optimierungsbedarf.....                                         | 187        |
| 5.3      | Zusammenfassung.....                                            | 191        |
| <b>6</b> | <b>Optimierung der Ablaufstruktur des Basiskraftwerkes.....</b> | <b>193</b> |
| 6.1      | Designoptimierung des Gastrennprozesses.....                    | 194        |
| 6.1.1    | Vakuumsauger mit mehrstufiger Zwischenkühlung.....              | 194        |
| 6.1.1.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 195        |
| 6.1.1.2  | Modulauslegung.....                                             | 196        |
| 6.1.1.3  | Ergebnisse.....                                                 | 197        |
| 6.1.2    | Sauerstoffkühlung vor Vakuumsauger.....                         | 200        |
| 6.1.2.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 201        |
| 6.1.2.2  | Modulauslegung.....                                             | 202        |
| 6.1.2.3  | Ergebnisse.....                                                 | 203        |
| 6.2      | Modifikation der Rauchgasrückführung.....                       | 205        |
| 6.2.1    | Kalte entstaubte Primär-Rauchgasrückführung.....                | 207        |
| 6.2.1.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 207        |
| 6.2.1.2  | Modulauslegung.....                                             | 207        |
| 6.2.1.3  | Ergebnisse.....                                                 | 210        |
| 6.2.2    | Warme entstaubte Sekundär-Rauchgasrückführung.....              | 212        |
| 6.2.2.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 212        |
| 6.2.2.2  | Modulauslegung.....                                             | 213        |
| 6.2.2.3  | Ergebnisse.....                                                 | 215        |
| 6.2.3    | Warme entstaubte Primär- und Sekundär-Rauchgasrückführung.....  | 217        |
| 6.2.3.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 217        |
| 6.2.3.2  | Modulauslegung.....                                             | 218        |
| 6.2.3.3  | Ergebnisse.....                                                 | 219        |
| 6.3      | Abwärmenutzung.....                                             | 222        |
| 6.3.1    | Rauchgaswärmenutzung.....                                       | 225        |
| 6.3.1.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 225        |
| 6.3.1.2  | Modulauslegung.....                                             | 231        |
| 6.3.1.3  | Ergebnisse.....                                                 | 236        |
| 6.3.2    | Sauerstoffwärmenutzung.....                                     | 241        |
| 6.3.2.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 241        |
| 6.3.2.2  | Modulauslegung.....                                             | 243        |
| 6.3.2.3  | Ergebnisse.....                                                 | 245        |
| 6.3.3    | Kohlendioxidwärmenutzung.....                                   | 248        |
| 6.3.3.1  | Prozessbeschreibung.....                                        | 248        |
| 6.3.3.2  | Modulauslegung.....                                             | 249        |
| 6.3.3.3  | Ergebnisse.....                                                 | 251        |
| 6.4      | Zusammenfassung der Optimierung der Ablaufstruktur.....         | 253        |

|                                                                   |            |
|-------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7 Abschätzung der Anlagenkosten .....</b>                      | <b>255</b> |
| 7.1 Kostenermittlung der Komponenten .....                        | 255        |
| 7.2 Berechnung der Anlagenkosten und Differenzanlagenkosten ..... | 259        |
| <b>8 Bewertung der Kraftwerksoptimierungen.....</b>               | <b>261</b> |
| 8.1 Relative Bewertung .....                                      | 262        |
| 8.2 Absolute Bewertung .....                                      | 265        |
| <b>9 Zusammenfassung .....</b>                                    | <b>268</b> |
| <b>10 Anhang.....</b>                                             | <b>273</b> |
| 10.1 Definition der Luftzusammensetzung .....                     | 273        |
| 10.2 Stoffdaten .....                                             | 275        |
| 10.3 Spezifischer Wärmebedarf der Kohletrocknung .....            | 276        |
| 10.4 Leistungsbedarf der Kraftwerkskomponenten .....              | 278        |
| 10.5 Komponentenauslegung und -größenabschätzung .....            | 279        |
| 10.5.1 Wärmeübertrager .....                                      | 280        |
| 10.5.2 Rauchgasreinigung.....                                     | 286        |
| 10.5.3 Gebläse .....                                              | 291        |
| 10.6 Kesselformel.....                                            | 292        |
| 10.7 Wärmeübertrager der Rauchgaswärmenutzung.....                | 294        |
| <b>11 Verzeichnisse .....</b>                                     | <b>304</b> |
| 11.1 Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes.....                  | 304        |
| 11.2 Tabellenverzeichnis.....                                     | 312        |
| 11.3 Abbildungsverzeichnis.....                                   | 321        |
| 11.4 Literaturverzeichnis .....                                   | 325        |

Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung mit anschließender Speicherung ist eine technologische Option zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Oxyfuel-Prozess basiert auf der Verbrennung fossiler Brennstoffe in einer Sauerstoff-Rauchgas-Atmosphäre mit nachfolgendem Aufkonzentrieren des CO<sub>2</sub>. Die Anwendung der Keramikmembranen im vom Forschungszentrum Jülich entwickelten und unter EP 2214806 patentierten Oxy-Vac-Jül-Konzept verringert den spezifischen Energiebedarf der Sauerstoffbereitstellung. Im diesem Buch werden Optimierungen des Gesamtprozesses hinsichtlich ihrer Effizienz und Investitionskosten beurteilt. Diese Arbeit bietet eine Grundlage für Entscheidungen über die Anwendung der Optimierungsoptionen im CO<sub>2</sub>-armen membranbasierten Oxyfuel-Kraftwerk.

Yevgeniy Nazarko studierte an der Technischen Universität Berlin an der Fakultät Prozesswissenschaften am Institut für Technischen Umweltschutz. Von 2007 bis 2014 beschäftigte er sich am Institut für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) im Forschungszentrum Jülich mit der Konzeptentwicklung und Analyse von Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus fossil befeuerten Kraftwerken. Der Fokus lag auf den Konzepten der chemischen Rauchgaswäsche aus konventionellen Kraftwerken sowie der membranbasierten Oxyfuel-Kraftwerke. Der Inhalt dieses Buches wurde von der RWTH Aachen als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften angenommen.

Das Institut für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) verfügt über wissenschaftlich-technischen Kernkompetenzen Elektrochemie und Energieverfahrenstechnik. Mit anwendungsorientierter Zielausrichtung erforscht und entwickelt das IEK-3 Brennstoffzellen, Brenngaserzeugungssysteme, Gastrennmembranen, Wasserelektrolyse und Batterien. Dies beinhaltet die Modellierung, Realisierung, experimentelle Untersuchung und systemanalytische Betrachtung der Energiesysteme, deren Komponenten sowie elektrochemischer Vorgänge und verfahrenstechnischer Prozessführung.