



Technische und ökonomische Bewertung der Polymer-Elektrolyt-Membran Elektrolyse

Sayed Mobasher Saba

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 570

ISBN 978-3-95806-615-1

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-14)

Technische und ökonomische Bewertung der Polymer-Elektrolyt-Membran Elektrolyse

Sayed Mobasher Saba

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

Band / Volume 570

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-615-1

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung..... 1

 1.1 Motivation der Arbeit 2

 1.2 Ziel der Arbeit..... 4

 1.3 Aufbau der Arbeit 5

2 PEM-Elektrolyseure: System-Design, Effizienz und spezifische Kosten..... 7

 2.1 System-Design..... 7

 2.1.1 Systemeffizienz und Systemkosten 11

 2.2 Stack-Design, Funktion der Stack-Komponenten und Stack-Materialien 13

 2.2.1 Zersetzungsspannung und Spannungswirkungsgrad 17

3 Wirtschaftswissenschaftliche Grundbegriffe..... 21

 3.1 Der Investitionsbegriff..... 21

 3.2 Der Kosten- und Preisbegriff 23

 3.2.1 Betriebliche Kostenerfassung: Kosten- und Erlösrechnung/Leistungsrechnung ... 27

 3.2.2 Plankalkulation/Vorkalkulation..... 30

 3.3 Kostenschätzungsmethoden/Vorkalkulationsmethoden..... 31

 3.3.1 Material-, Kilokosten und Kostenfunktionsmethode 32

 3.3.2 Kostenmethode nach Turton – Anlagenbau 35

 3.3.3 Expertenabschätzungen und Detailkalkulationen 40

 3.4 Ergebnisse und Methoden bisheriger Kostenprojektionen zu PEM-Elektrolyseuren 40

 3.4.1 Expertenbefragungen und weitere Untersuchungen..... 40

 3.4.2 Detailkalkulation: *National Renewable Energy Lab (NREL)*..... 44

 3.4.3 Diskussion bisheriger Kostenprojektionen 47

 3.5 Zusammenfassung und Beurteilung der Informationen des Kapitels 48

4 Materialbezugskosten/Anschaffungskosten elektrolyserelevanter Materialien 49

 4.1 Edelstahl und unlegierter Baustahl..... 49

 4.2 Kunststoffe 51

 4.3 Kupfer 52

 4.4 Titanblech, Titanpulver und Wasserstoffversprödung bei Titan 53

 4.5 Kohlenstoffpapier 56

 4.6 Nafion® 57

4.7	Katalysatoren: Platin und Iridium	58
4.8	Zusammenfassung und Beurteilung der Informationen und Ergebnisse des Kapitels..	61
5	Fertigungstypen sowie Fertigungsverfahren & Komponentenanalyse der einzelnen Stack-Komponenten eines PEM-Stacks	63
5.1	Fertigungstypen und Organisationstypen der Fertigung	63
5.2	End-, Iso- und Stromverteilerplatte	67
5.3	Rahmen	71
5.4	Bipolarplatten	76
5.4.1	Edelstahl-Bipolarplatten-Konzepte	77
5.4.2	Titan-Bipolarplatten-Konzepte	80
5.5	Gasdiffusionsschichten: Anode und Kathode	82
5.5.1	Konzepte für Gasdiffusionsschichten: Anode und Kathode	83
5.6	Membran-Elektroden-Einheit	86
5.7	Zusammenfassung und Beurteilung der Informationen und Ergebnisse des Kapitels..	90
6	Methodik dieser Arbeit	95
6.1	Stack Produktionsmodell	96
6.1.1	Dimensionierung der Stack-Komponenten	97
6.1.2	Berechnung der Selbstkosten am Beispiel der Endplatte	104
6.1.3	Monte Carlo-Simulation	107
6.2	BOP Kostenmodell	108
6.2.1	Zirkulationspumpen	109
6.2.2	Wärmeübertrager	111
6.2.3	Verdichtung, Trocknung und Gas-Wasser-Separator	113
6.2.4	Transformator und Gleichrichter	114
6.3	Berechnung der Selbstkosten, der <i>Fixed Capital Investments</i> und der <i>Total Capital Investments</i> des Systems und Ableitung spezifischer Kosten	117
7	Ergebnisse der Selbstkostenanalyse der Stack-Komponenten	119
7.1	Selbstkosten End-, Isolations- und Stromverteilerplatte	119
7.2	Selbstkosten Rahmen und Gasdiffusionsschichten	120
7.3	Selbstkosten Bipolarplatten	125
7.4	Selbstkosten Membran-Elektroden-Einheit	131
7.5	Selbstkosten von möglichen Stack-Varianten aus Kostenanalyse	133
7.6	Umrechnung der Stack-Selbstkosten in €/kW _e , €/kW _{LHV} , €/kW _{HHV}	138

8	Ergebnisse der Selbstkostenanalyse der betrachteten Systemkonfigurationen.....	143
8.1	Skalierung der betrachteten Systemkonfigurationen.....	144
8.2	Ergebnisse Selbstkosten Systemvariante: Differenzdruck Anode 1 bar + Kathode 30 bar und ausschließlich Kathode bei 30 bar.	147
8.3	Gegenüberstellung aller untersuchten Systemvarianten bei 1,7 V und 2,25 A·cm ⁻² : Selbstkosten, <i>Fixed Capital Investments</i> , mögliche Verkaufspreise und <i>Total Capital Investments</i> der Systemvarianten.....	150
8.4	Ergebnisvergleich der Selbstkosten mit Literaturwerten	156
9	Zusammenfassung und Fazit der einzelnen Kapitel der Arbeit	159
10	Anhang.....	163
10.1	Anhang zu Abschnitt 6.1.2	163
10.2	Berechnungsblatt Endplatte Edelstahl, Anhang zu Abschnitt 7.1	164
10.3	Berechnungsblatt Isolationsplatte, Anhang zu Abschnitt 7.1	166
10.4	Berechnungsblatt Stromabnehmer, Anhang zu Abschnitt 7.1	168
10.5	Berechnungsblatt Rahmen, Anhang zu Abschnitt 7.2	170
10.6	Berechnungsblatt Gasdiffusionsschicht Kathode, Anhang zu Abschnitt 7.2	172
10.7	Berechnungsblatt Gasdiffusionsschicht Anode: Sinterkörper beid- und einseitig beschichtet, Anhang zu Abschnitt 7.2.....	174
10.8	Berechnungsblätter Bipolarplatten, Anhang zu Abschnitt 7.3.....	177
10.8.1	Edelstahl, geformt, Titanpulver, Platinpünktchen auf aktive Fläche	177
10.8.2	Titan, geformt, Platinpünktchen auf aktive Fläche	180
10.8.3	Edelstahl, geformt, Titanpulver, Beschichtung mittels physikalischer Gasphasenabscheidung der aktiven Fläche	181
10.8.4	Titanblech, geformt, Beschichtung der aktiven Fläche mittels Physikalischer Gasphasenabscheidung.	184
10.9	Berechnungsblatt Membran-Elektroden-Einheit, Anhang zu Abschnitt 7.4.....	186
10.10	Anhang zu Abschnitt 7.6	188
10.11	Anhang zu Kapitel 8: Systemkosten untersuchter Varianten.....	191
10.11.1	Anhang zu Abschnitt 8.1.....	191
10.11.2	Anhang zu Abschnitt 8.2: Anode 1 bar + Kathode 30 bar und ausschließlich Kathode bei 30 bar. Selbstkosten bei unterschiedlichen Betriebspunkten.....	192
10.11.3	Anhang zu Abschnitt 8.2: Anode 1 bar + Kathode 30 bar und ausschließlich Kathode bei 30 bar. <i>Fixed Capital Investments</i> bei unterschiedlichen Betriebspunkten ..	194
10.11.4	Anhang zu Abschnitt 8.2: Anode 1 bar + Kathode 30 bar und ausschließlich Kathode bei 30 bar. <i>Total Capital Investments</i> bei unterschiedlichen Betriebspunkten	196

10.12	Anhang zu Abschnitt 8.4: Anode 1 bar + Kathode 1 bar und ausschließlich Kathode bei 1 bar. Selbstkosten bei unterschiedlichen Betriebspunkten.....	198
10.12.1	Anhang zu Abschnitt 8.4: Anode 1 bar + Kathode 1 bar und ausschließlich Kathode bei 1 bar. Fixed Capital Investments bei unterschiedlichen Betriebspunkten	200
10.12.2	Anhang zu Abschnitt 8.4: Anode 1 bar + Kathode 1 bar und ausschließlich Kathode bei 1 bar. Total Capital Investments bei unterschiedlichen Betriebspunkten	202
10.13	Anhang zu Abschnitt 8.4: Anode 70 bar + Kathode 100 bar und ausschließlich Kathode bei 100 bar. Selbstkosten bei unterschiedlichen Betriebspunkten	204
10.13.1	Anhang zu Abschnitt 8.4: Anode 70 bar + Kathode 100 bar und ausschließlich Kathode bei 100 bar. Fixed Capital Investments bei unterschiedlichen Betriebspunkten ..	206
10.13.2	Anhang zu Abschnitt 8.4: Anode 70 bar + Kathode 100 bar und ausschließlich Kathode bei 100 bar. Total Capital Investments bei unterschiedlichen Betriebspunkten ..	208
10.14	Verwendeter Quellcode Visual Basic for Applications in Excel.....	210
10.15	Berechnungsblätter einzelner Stack-Varianten VBA-Code.....	210
11	Abbildungsverzeichnis	233
12	Tabellenverzeichnis	241
13	Literaturverzeichnis.....	247

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 570
ISBN 978-3-95806-615-1