

Modellierung einer PEM-Elektrolyseanlage zur Untersuchung des Verhaltens bei DC-Kurzschlüssen für die Bewertung von Schutzkriterien

Jakob Francesco Leide(*), Michael Bruhns, Peter Schegner

Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Professur für Elektroenergieversorgung, D-01062 Dresden, +49 351 46335088, jakob.leide@mailbox.tu-dresden.de, michael.bruhns@tu-dresden.de, peter.schegner@tu-dresden.de, <https://tu-dresden.de/ing/elektrotechnik/ieeh/ev>

Kurzfassung: Dieser Beitrag präsentiert die Modellierung und Simulation einer PEM-Elektrolyseanlage (ELA) in Betriebs- und Fehlerfall in der Software *PLECS* mit dem Fokus auf DC-Kurzschlüsse. Die Analyse resultiert in der Auswahl und Bewertung der Schutzkriterien Strom, Stromanstiegsgeschwindigkeit, i^2t und Spannung für den Selektivschutz von ELAn. Die Ergebnisse betonen die Relevanz dieser Schutzmaßnahmen, insbesondere bei stromstarken DC-Kurzschlüssen mit hohen Stromanstiegsgeschwindigkeiten in multi-MW-Anlagen.

Keywords: PEM-Elektrolyse, Modellierung, PLECS, Selektivschutz

1 Einleitung

Durch seine vielfältigen Einsatzmöglichkeiten kann Wasserstoff als wichtiger Bestandteil zur Energiewende in Deutschland beitragen. In der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung werden unter anderem der Einsatz als Energiespeicher, als Grundstoff für die chemische Industrie oder zur Dekarbonisierung von CO₂-Emissionen in der Industrie genannt [2]. Um den Bedarf an Wasserstoff zu decken, wird in [2] eine Elektrolyseleistung für grünen Wasserstoff von mindestens 10 GW bis zum Jahr 2030 als Ausbauziel angegeben. Das entspricht nach Bild 1 etwa den angekündigten Elektrolyseprojekten bis zu diesem Datum. Mit Leistungen dieser

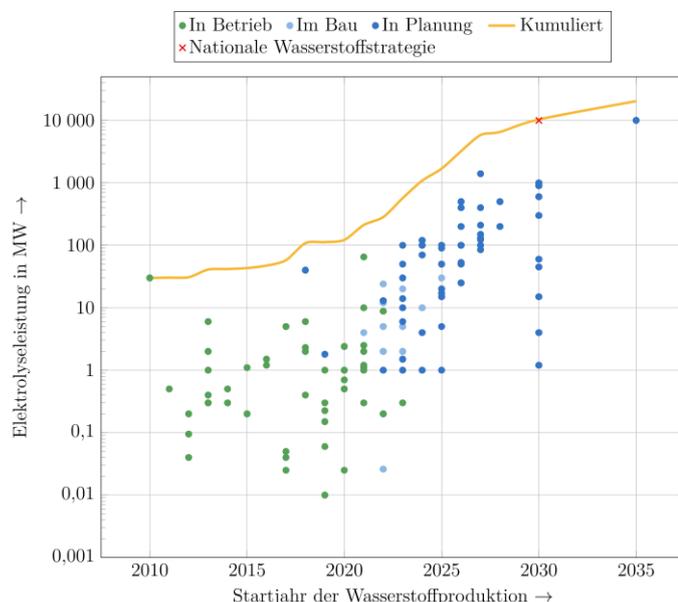


Bild 1: Angekündigte Elektrolyseprojekte in Deutschland (Vgl. [1])

Größenordnung stellt die Wasserelektrolyse langfristig einen relevanten Bestandteil des elektrischen Energienetzes dar. Um den angestrebten Ausbau der Wasserelektrolyse zu vereinfachen, können Skalierungseffekte genutzt werden. Auch für die Auslegung der Schutztechnik ist ein einheitliches Vorgehen anzustreben. Daraus leitet sich die Zielstellung des vor-

liegenden Beitrags ab: Aus den technischen Daten eines Elektrolyseurs soll jeweils ein dynamisches Modell für die Untersuchung des Verhaltens im Betriebs- und Fehlerfall erstellt werden. Dafür werden zwei Simulationsmodelle in der Software *PLECS* aufgebaut. Die Fehleruntersuchung in diesem Beitrag analysiert insbesondere DC-Kurzschlussfälle. AC-Fehler sind in der Literatur bereits ausreichend beschrieben, bspw. in [3]. Anhand der Simulationsergebnisse werden geeignete Schutzkriterien und Schutzfunktionen ausgewählt und bezüglich ihrer Eignung zum Selektivschutz von ELAn bewertet. Aus Bild 1 ist erkennbar, dass zunehmend multi-MW-Anlagen zugebaut werden, weshalb dieser Beitrag das Schutzkonzept für eine solche ELA untersucht.

2 Grundlagen und Simulationsmodell

2.1 Aufbau von DC-Netzen

DC-Netze können in verschiedenen Topologien realisiert werden. Ausgewählte Varianten werden in [4] vorgestellt. Die in dem Beitrag verwendete Variante ist in Bild 2 gezeigt. Hierbei wird zwischen der Leitungskonfiguration und der Stationskonfiguration unterschieden.

2.1.1 Stations- und Leitungskonfiguration

Bei ELAn wird nur ein Gleichrichter zur Erzeugung des DC-Systems verwendet. Der Neutralpunkt wird auf einen der beiden DC-Pole gelegt. Hierbei handelt es sich um eine asymmetrische Konfiguration. Wie für die Niederspannung typisch, wird ein Leiter mit der vollen DC-Spannung belastet. Der zweite Leiter liegt auf einem Potential mit der Erde. [4]

2.1.2 Neutralpunktbehandlung

Bei der Neutralpunktbehandlung von DC-Netzen können die bereits aus AC-Netzen bekannten Varianten verwendet werden. Der Neutralpunkt kann also starr geerdet, resistiv oder induktiv geerdet sowie isoliert ausgeführt werden. [4]

2.1.3 Gleichrichter

Gleichrichter können in fremd- und selbstgeführte Topologien unterschieden werden. Als fremdgeführte Gleichrichter werden solche Systeme bezeichnet, die für ihre Kommutierung – den Wechsel des Stromflusses von einem Zweig des Gleichrichters zu einem andern – eine externe Spannung, benötigen. Ist dies die Netzspannung, wird auch der Begriff netzgeführt verwendet. Selbstgeführte Gleichrichter benötigen keine externe Spannung zur Kommutierung. Diese erfolgt hierbei durch das aktive Ein- und Ausschalten der Leistungshalbleiter. In der Literatur werden oft Gleichstromzwischenkreis-Stromrichter (CSC) mit fremdgeführten und Gleichspannungszwischenkreis-Stromrichter (VSC) mit selbstgeführten Gleichrichtern gleichgesetzt. [5]

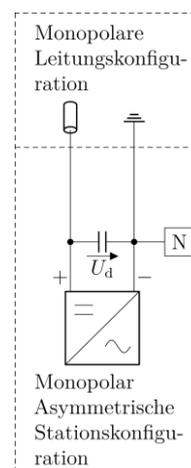


Bild 2: Verwendete Stations- und Leitungskonfiguration (Vgl. [4])

2.2 Verhalten von DC-Systemen im Kurzschlussfall

DC-Systeme, die durch VSC-Gleichrichter auf IGBT-Basis gespeist werden, zeigen bei einem Querfehler ein Verhalten, das nach [7] in drei Teile unterteilt werden kann. Zuerst entladen sich die DC-Zwischenkreis-kapazitäten über das DC-System und die Kabelimpedanzen. Dadurch fällt die DC-Spannung und die VSCs trennen sich automatisch vom Netz. Die Freilaufdioden der IGBTs bilden nun eine ungesteuerte Sechspuls-Brückenschaltung (B6U), die einen DC-Kurzschluss weiterhin speisen kann. So kommutiert im zweiten Teil der Fehlerstrom auf die Freilaufdioden der Gleichrichter. Im dritten Teil des Fehlers wird der Fehlerstrom vollständig durch das AC-Netz über die Freilaufdioden der VSCs gespeist. [7]

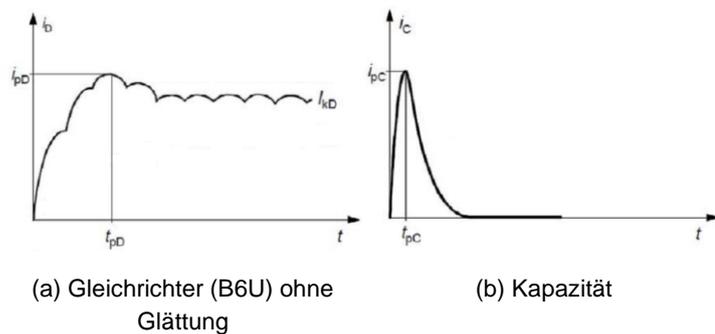


Bild 3: Kurzschlussstrombeitrag verschiedener DC-Betriebsmittel [6]

Ein analoges Verhalten gilt für CSC-Gleichrichter auf Diodenbasis. CSC-Gleichrichter auf Thyristorbasis können das Speisen eines DC-Kurzschlusses blockieren. Solange der Fehler jedoch noch nicht erkannt wurde und die Thyristoren weiterhin mit Gatestromimpulsen eingeschaltet werden, ist das Verhalten ähnlich wie bei den anderen Gleichrichtertopologien. [8, 7]

2.3 Schutz von DC-Netzen

Hohe Fehlerströme stellen eine thermische und mechanische Beanspruchung für elektrische Betriebsmittel dar [4]. Ein entsprechender Schutz der Betriebsmittel ist daher unabdingbar. Da Gleichrichter die hohen Fehlerströme bei einem DC-Kurzschluss nicht tragen können ohne Schaden zu nehmen, müssen solche Fehler nach [8] sehr schnell abgeschaltet werden. Zum Schutz von niederohmig geerdeten DC-Netzen ist laut [8] das Schutzkriterium Strom geeignet. Weiterhin wird für den selektiven Geräteschutz das Schutzkriterium Stromdifferenz vorgeschlagen. Als weitere Schutzkriterien eignen sich nach [8] u. a. die Auswertung der DC-Spannung, des Stromanstiegs di/dt und des Strom-Zeit-Integrals i^2t .

2.4 Simulationsmodell

2.4.1 Übersicht

Der elektrische Aufbau einer ELA, wie sie für diesen Beitrag modelliert wird, ist beispielhaft in Bild 4 als Blockschaltbild dargestellt. Die Anlage wird in der 110 kV-Ebene an das Verteilnetz angeschlossen ($S_k'' = 2,5 \text{ GVA}$). Die Energieversorgung des Elektrolyseurs besteht aus mehreren Transformatoren, einem Gleichrichter sowie Verbindungselementen wie Kabel und Stromschienen. Das Modell wird in der Software *PLECS* aufgebaut und simuliert.

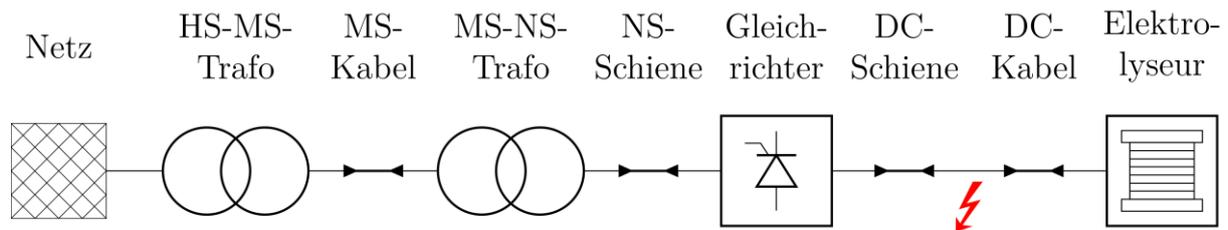


Bild 4: Gesamtmodell als Blockschaltbild mit eingezeichnetem Fehlerort

2.4.2 Modellierung des Elektrolyseurs im Betriebsfall

Modelle für einen PEM-Elektrolyseur basieren hauptsächlich auf der Polarisationskurve, dem Zusammenhang zwischen der Stromdichte und dem Spannungsfall über einer Elektrolysezelle, wie nach [9] in Bild 5 angegeben. Aus den verschiedenen Bestandteilen des Spannungsfalls kann ein elektrisches Ersatzschaltbild wie in Bild 6 gezeigt abgeleitet werden [9, 10].

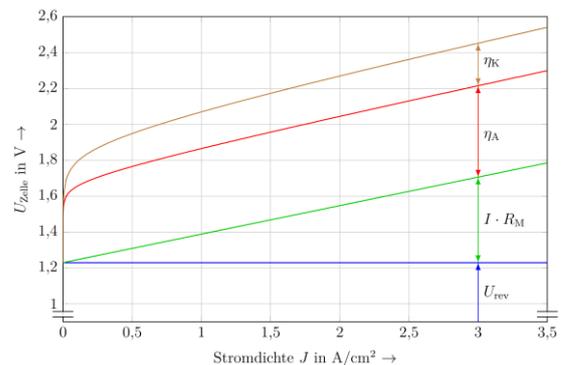


Bild 5: Polarisationskurve der untersuchten Elektrolysezellen bei $\vartheta = 70^\circ\text{C}$ (Vgl. [9])

Die reversible Zellspannung entspricht der Spannung, die angelegt werden muss, damit die elektrochemische Reaktion der Wasserspaltung ablaufen kann. Diese beträgt $U_{rev} = 1,23\text{V}$ nach [10]. An den Elektroden ergeben sich Spannungsfälle durch Polarisierungseffekte und die Aktivierungsenergie für den Ladungsträgerübertritt (η_A, η_K). Diese werden aus der Tafel-Gleichung abgeleitet und in [10] mit Gl. (1) angegeben. Darin sind $R = 8,314\text{J}/(\text{molK})$ die universelle Gaskonstante, $T = 343\text{K}$ die absolute Temperatur, $\alpha = 0,5$ der Ladungstransferkoeffizient [11], $n = 2$ die Anzahl der in der Reaktion ausgetauschten Elektronen [10], $F = 96485\text{C}/\text{mol}$ die Faraday-Konstante, J die Stromdichte der Elektrolysezelle und J_0 die Austauschstromdichte, die abhängig vom Material der Elektroden ist. Hier werden $J_{0A} = 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ und $J_{0K} = 10^{-3}\text{A}/\text{cm}^2$ [11] gewählt. Diese Spannungsfälle können als veränderliche Widerstände modelliert werden.

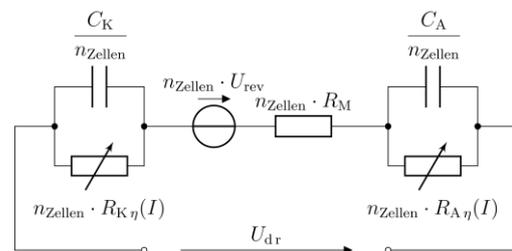


Bild 6: Elektrisches Ersatzschaltbild einer PEM-Elektrolysezelle [10]

$$\eta_{A,K} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{J}{J_{0A,K}} \quad (1)$$

Weiterhin muss der Spannungsfall über die Zellmembran berücksichtigt werden. Die Berechnung des Membranwiderstands R_M wird in der Literatur vielfach besprochen (bspw. in [9, 10]). Dabei gehen die Angaben sehr häufig auf die in [12] empirisch ermittelte Gl. (2) zurück. Darin sind l_M und A_M die Membrandicke bzw. -fläche und $\lambda_M = 14$ der Wassergehalt der Membran nach [12]. Als Membran wird in diesem Beitrag Nafion™ 117 mit $l_M = 178\mu\text{m}$ verwendet.

$$R_M = \frac{l_M}{A_M \cdot (0,005139 \cdot \lambda_M - 0,00326) \cdot \exp\left(1268 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (2)$$

Das dynamische Verhalten des PEM-Elektrolyseurs wird von den Doppelschichtkapazitäten an den Elektroden bestimmt. Diese können jeweils als Kapazität parallel zu $R_{\eta A}$ bzw. $R_{\eta K}$ modelliert werden. Deren Wert wird von [13] mit $C'_{A,K} = 0,035 \text{ F/cm}^2$ angegeben.

Die in dem Beitrag modellierte Elektrolyseanlage basiert auf einer Anlage mit einer Membranfläche von $A_M = 1000 \text{ cm}^2$ und einer Nennstromdichte von $J = 3 \text{ A/cm}^2$. Ein Elektrolysestack soll an einer DC-Spannung von $U_{dr} = 600 \text{ V}$ betrieben werden. Somit ergeben sich Nennstrom und Nennleistung eines Stacks zu $I_{rS} = 3 \text{ kA}$ bzw. $1,8 \text{ MW}$. Um der Vorgabe einer multi-MW ELA zu entsprechen, werden für das Modell zehn parallele Elektrolysestacks betrachtet, so dass die gesamte ELA eine Nennleistung von 18 MW bei einem Strom von $I_{rELA} = 30 \text{ kA}$ aufweist. Der sich am Nennarbeitspunkt ergebenden Spannungsfall pro Elektrolysezelle kann aus der Polarisationskurve in Bild 5 abgelesen werden. Damit ergibt sich die Anzahl der Elektrolysezellen pro Stack zu 245.

2.4.3 Elektrolyseur im Fehlerfall

Bei einem Querfehler auf der Gleichspannungsseite ist ein Einbrechen der DC-Spannung zu erwarten [6, 7]. Dadurch kommt der Elektrolyseprozess zum Erliegen. Die Spannung über den Doppelschichtkapazitäten des Elektrolyseurs ist infolgedessen höher als die DC-Spannung, sodass sich diese über die Fehlerstelle entladen. Der Stromfluss durch den Elektrolyseur kehrt sich damit um und dieser trägt zum Fehlerstrom bei. Dieses Verhalten wurde durch Untersuchungen des Forschungszentrums Jülich (FZJ) bestätigt. Dabei ist in der Literatur nicht geklärt, wie dieses Verhalten in einem Ersatzschaltbild analytisch nachgebildet werden kann. Für das elektrische Ersatzschaltbild im Normalbetrieb, wie in Bild 5, erweist sich der Umgang mit der reversiblen Zellspannung U_{rev} problematisch, da nicht geklärt ist, ob eine Restaktivität im Elektrolyseprozess bestehen bleibt, oder sich dieser sogar umkehrt. Weiterhin sind die Spannungsfälle für die Aktivierungsenergie nach Gl. (1) für negative Stromdichten nicht definiert. Daher wird für diesen Beitrag stattdessen ein durch das FZJ empirisch durch Kurzschlussmessungen an Elektrolyseuren ermitteltes Ersatzschaltbild, wie in Bild 7 gezeigt, eingesetzt. Die Parameter des vom FZJ untersuchten Elektrolysestacks werden auf den in dem vorliegenden Beitrag modellierten Elektrolyseur durch eine Skalierung mit der aktiven Zellfläche und der Anzahl der Elektrolysezellen pro Stack angepasst (siehe Tabelle 1). Die Spannung U_{dF} beschreibt die Spannung, die im Normalbetrieb über den Doppelschichtkapazitäten des Elektrolyseurs anliegt und mit der die Kapazität bei Fehlereintritt vorgeladen ist. [14]

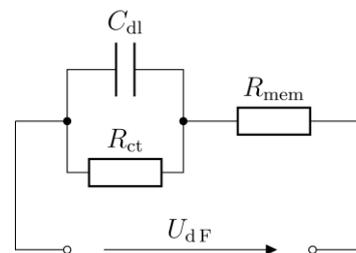


Bild 7: Elektrisches Ersatzschaltbild einer PEM-Elektrolysezelle bei DC-Kurzschluss

Tabelle 1: Parameter des elektrischen Ersatzschaltbildes einer PEM-Elektrolysezelle bei DC-Kurzschluss

Parameter	Wert
C_{dl}	440,82 mF
R_{ct}	2,45 Ω
R_{mem}	43,56 m Ω

2.4.4 Gleichrichter

Um bei den hohen Betriebsströmen von 30 kA im Nennarbeitspunkt die Netzurückwirkungen zu reduzieren, wird für den Beitrag als Gleichrichter eine 24-Puls-Brückenschaltung in Parallelschaltung verwendet. Diese wird bspw. in [15] vorgestellt. Dafür werden vier ungesteuerte Sechspuls-Brückenschaltungen (B6U) DC-seitig parallelgeschaltet. Zur Speisung dieser werden vier Drehstromsysteme verwendet, die eine Phasenverschiebung von 15° zueinander haben. Ein weiterer Vorteil dieser Schaltung ist, dass sich der Strom auf die vier Gleichrichter aufteilt und somit Leistungshalbleiter mit einer geringeren Stromtragfähigkeit verwendet werden können. Im Gegensatz zu dem in [15] vorgestellten Modell wird in diesem Beitrag eine vollgesteuerte 24-Puls-Brückenschaltung in Parallelschaltung (B6C-4P) verwendet, bei der die Dioden durch Thyristoren ersetzt werden, sodass der Mittelwert der DC-Spannung und damit die Leistung am Ausgang über den Einschaltwinkel der Thyristoren gesteuert werden kann.

2.4.5 Weitere Komponenten

Für die Transformatoren wird das Standard-Modell aus der Software *PLECS* verwendet und nach Tabelle 2 parametrisiert. Für die Kabelstrecken werden Längen abgeschätzt und mit Tabellenwerten der Widerstands- und Induktivitätsbeläge wie in Tabelle 2 *RL*-Glieder als elektrische Ersatzschaltung berechnet. Für die Stromschienen werden Längen und Geometrien abgeschätzt und *RL*-Glieder als elektrische Ersatzschaltung berechnet. Diese sind jedoch gegenüber den Kabeln vernachlässigbar.

Tabelle 2: Daten der Komponenten des Simulationsmodells

Größe	HS/MS-Trafo	MS/NS-Trafo	Größe	MS-Kabel	DC-Kabel
U_p/U_s	110 kV/20 kV	20 kV/0,45 kV	R'	0,124 Ω /km	0,16 Ω /km
u_k	14 %	7 %	L'	0,536 mH/km	0,436 mH/km
S_T	20 MVA	8 MVA	l	50 m ... 2 km	40 m

2.4.6 Untersuchte Fehler

In dem Beitrag werden Querfehler auf der DC-Seite als metallische Kurzschlüsse untersucht. Diese treten als Verbindung zweier Pole oder eines Pols mit der Erde auf [16, 6, 8]. Letzteres entspricht nach [8] der häufigsten Fehlerart in DC-Netzen. Ein System mit geerdetem Neutralpunkt ist hierbei besonders gefährdet, da sich nach [8] durch den Fehler eine geschlossene Pol-Erde-Schleife bildet. Der Fehlerort auf der DC-Seite wird wie in Bild 8 gezeigt variiert. Die Fehler 1 bis 3 werden immer an den Zuleitungen zu Stack 1 eingelegt, weshalb dieser Stack im Folgenden auch als fehlerbehafteter Stack bezeichnet wird. Fehler 2 und 3 werden jeweils in der Mitte der Zuleitungen eingelegt, wobei Fehler 2 an einem der neun parallelen Anschlusskabel eines Elektrolysestacks auftritt und Fehler 3 an allen neun gleichzeitig.

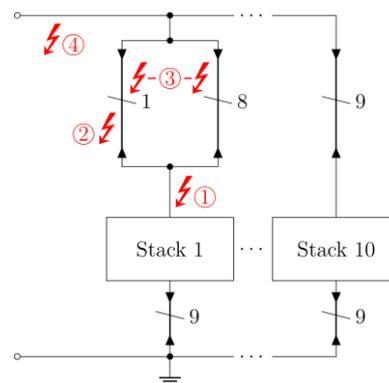


Bild 8: Fehlerorte auf der DC-Seite

3 Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

Die folgenden Schutzkriterien werden im Anschluss untersucht und bezüglich der Eignung für den Schutz von Elektrolyseuren bewertet:

- Strombetrag und -richtung
- Betrag der DC-Spannung
- di/dt
- i^2t

Als Einflussgrößen auf den Fehlerstrom werden die folgenden Parameter untersucht. Die Untersuchung hat ergeben, dass die Impedanz des AC-Netzes keinen Einfluss auf den Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs aufweist. Sie wird daher bei der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt.

- Impedanz zwischen DC-Sammelschiene und Fehlerort (Variation des DC-Fehlerortes)
- Arbeitspunkt des Elektrolyseurs zum Fehlereintritt: maximale Leistung (18 MW), minimale Leistung (11,45 MW) (Variation der Vorladung der Doppelschichtkapazitäten)
- Impedanz des AC-Netzes (Variation der Länge des MS-Kabels)

3.1 Analyse des Fehlerstroms

Der Fehlerstrom wird durch den Gleichrichter (i_{FGR}) und den Elektrolyseur (i_{FELA}) durch die Doppelschichtkapazitäten der Elektroden gespeist. Innerhalb von 0,47 ms steigt der Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs auf einen Spitzenwert von $|\hat{i}_{FELA}| = 63,9 \text{ kA}$ (2,13-facher maximaler Betriebsstrom) an. Danach fällt der Strom exponentiell ab und unterschreitet nach ca. 15 ms den maximalen Betriebsstrom. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass sich der Stromfluss durch den Elektrolyseur bei einem DC-Fehler und dem Entladen der Doppelschichtkapazitäten umkehrt. Die Kurve ist in Bild 9 betragsmäßig dargestellt.

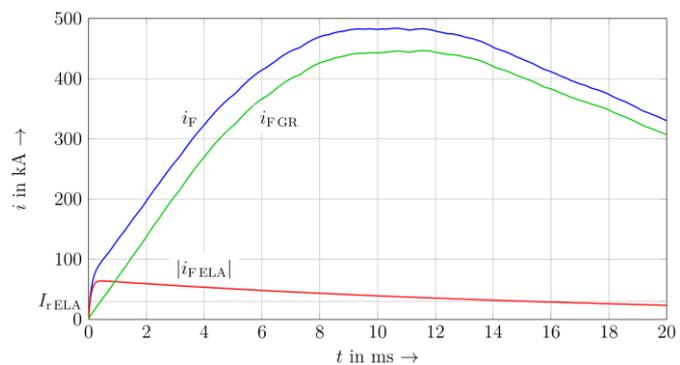


Bild 9: Verlauf des Fehlerstroms bei einem Kurzschluss an der DC-Sammelschiene

Der Fehlerstrombeitrag des Gleichrichters erreicht einen vielfachen Wert des maximalen Betriebsstromes, so dass hier unbedingt Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen. Dies ist jedoch nicht Teil dieses Beitrags.

3.2 Einfluss der Impedanz zwischen DC-Sammelschiene und Fehlerort

Aus Bild 11 ist erkennbar, dass sich der Fehlerstrombeitrag des fehlerbehafteten Stacks für die Fehlerorte 1, 3 und 4 kaum unterscheidet. Bei einem Kurzschluss an Fehlerort 2 halbiert sich der Spitzenwert und tritt mehr als eine Millisekunde später auf. Bei einem Kurzschluss an diesem Fehlerort fließt ein Teil des Fehlerstrombeitrags des Gleichrichters über den Anschlusspunkt des fehlerbehafteten Stacks (siehe Bild 10). Durch die Impedanz zwischen diesem Punkt und der Fehlerstelle erzeugt dieser Stromanteil einen Spannungsfall, wodurch das Potential an dem Anschlusspunkt des fehlerbehafteten Stacks angehoben wird. Damit wird auch der Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs beeinflusst. Bei einem Kurzschluss an den Fehlerorten 1, 3 und 4 können sich die Fehlerströme hingegen weitgehend unbeeinflusst voneinander ausprägen.

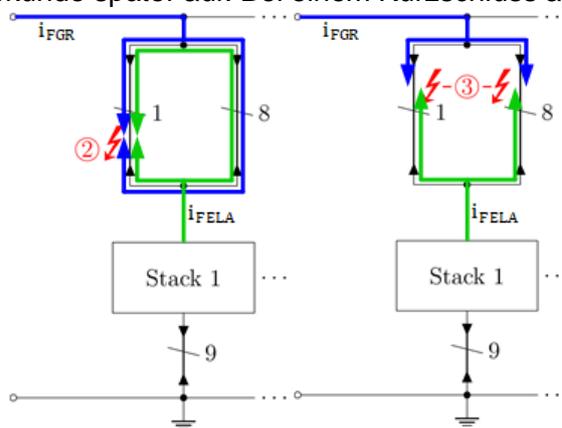


Bild 10: Fehlerstrompfade bei Fehlerort 2 (links) und 3 (rechts)

3.3 Einfluss des Arbeitspunktes bei Fehlereintritt

Es ist in Bild 12 zu erkennen, dass sich der Spitzenwert des Fehlerstrombeitrags des Elektrolyseurs bei einem Kurzschluss im Teillastbetrieb gegenüber einem Kurzschluss bei Volllast reduziert. Es kann geschlussfolgert werden, dass eine geringere Vorladung der Doppelschichtkapazitäten des Elektrolyseurs auch zu einem geringeren Fehlerstrom führt.

3.4 di/dt bei Fehlereintritt

Für die Analyse der Stromanstiegsgeschwindigkeit des fehlerbehafteten Stacks di_S/dt wurde zuvor der maximale Wert im dynamischen Betrieb simulativ mit $-0,179 \text{ kA/ms}$ bestimmt. Es ist aus Bild 13 festzustellen, dass das di/dt um mindestens eine Größenordnung, in den meisten Fällen sogar um mehrere Größenordnungen, höher ist als der maximale Wert im Betriebsfall. Dies stellt eine besondere Herausforderung an den Schutz der ELA dar, da durch die hohen Stromanstiegsgeschwindigkeiten sehr schnell ein großer Spitzenwert des Stromes erreicht wird.

3.5 i^2t bei Fehlereintritt

Das i^2t wird in dem Beitrag für eine Zeitspanne von 10ms angegeben, für die Berechnung werden die ersten 10ms nach Fehlereintritt verwendet. Als Referenz dient der Wert bei Normalbetrieb, der für den fehlerbehafteten Stack $i^2t_{r,S} = 90\,000 \text{ A}^2\text{s}$ beträgt.

Aus Bild 14 ist ersichtlich, dass das i^2t des fehlerbehafteten Stacks in allen Fällen, außer bei einem Kurzschluss an Fehlerort 2, den Vergleichswert deutlich überschreitet. Das Grenzlastintegral ist in diesen Fällen jeweils mindestens doppelt so groß wie der Vergleichswert für den fehlerfreien Betrieb.

3.6 DC-Spannung

Aus Bild 15 ist zu erkennen, dass die DC-Spannung bei einem Kurzschluss auf der DC-Seite einbricht. Je niedriger die Impedanz zwischen der DC-Sammelschiene und dem Fehlerort ist, desto stärker fällt der Spannungseinbruch aus.

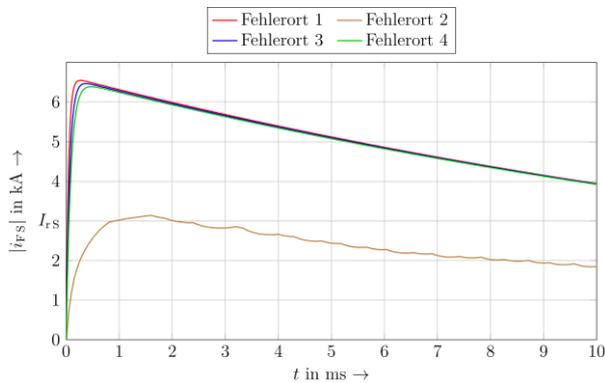


Bild 11: Verlauf des Fehlerstrombeitrags des fehlerbehafteten Stacks bei verschiedenen Fehlerorten

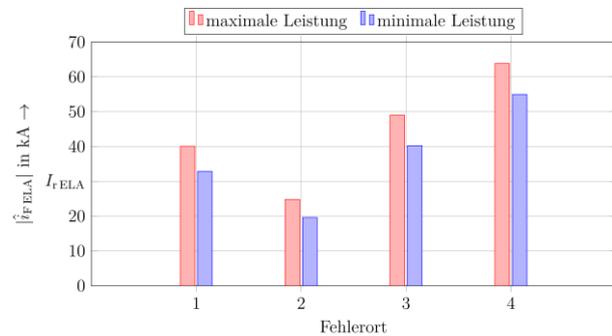


Bild 12: Spitzenwert des Fehlerstrombeitrags des Elektrolyseurs bei verschiedenen Arbeitspunkten und Fehlerorten

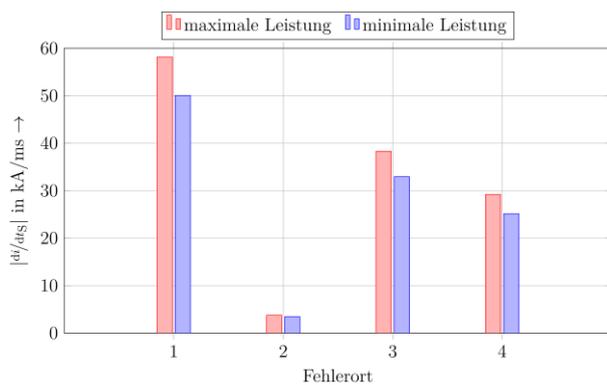


Bild 13: Maximales di/dt des Fehlerstrombeitrags des fehlerbehafteten Stacks bei verschiedenen Arbeitspunkten und Fehlerorten

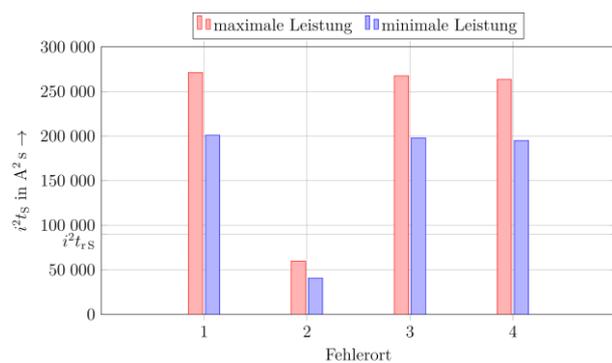


Bild 14: i^2t des Fehlerstrombeitrags des fehlerbehafteten Stacks für die ersten 10 ms nach Fehlereintritt bei verschiedenen Arbeitspunkten und Fehlerorten

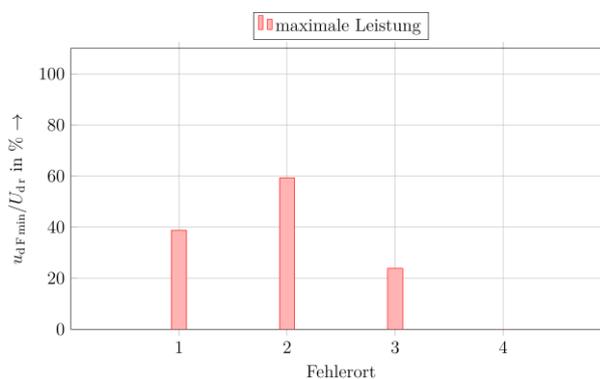


Bild 15: Relative minimale DC-Spannung $u_{dF,min}/U_{dF}$ bei Kurzschlusseintritt bei verschiedenen Fehlerorten

4 Schutzkriterien für Elektrolyseanlagen

Ausgehend von den Simulationsergebnissen können nun Schlussfolgerungen auf geeignete Schutzkriterien zum Schutz von ELAn gezogen werden. Die untersuchten Schutzkriterien und Einflussgrößen auf den Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 nochmals zusammengestellt.

Zur Erkennung stromstarker Fehler eignet sich das Schutzkriterium Strom gut. Als Anregerwert eines Schutzgerätes kann ein Strom, geringfügig höher als der maximale Betriebsstrom eingestellt werden. Jedoch kommt es nicht bei allen Fehlerfällen zu einem überschreiten des maximalen Betriebsstroms, so dass stromschwache Fehler mit diesem Schutzkriterium nicht erkannt werden können. Bei der Anwendung dieses Schutzkriteriums muss beachtet werden, dass bei einem Kurzschluss an einem Arbeitspunkt mit einer gegenüber Volllast reduzierten Leistung der Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs verringert ist.

Zusätzlich zu dem Schutzkriterium Strom ist die Verwendung einer Sicherung möglich. Die Untersuchungen der Fehlerfälle haben gezeigt, dass das i^2t des Betriebsfalls für den fehlerbehafteten Stack an allen DC-Fehlerorten, außer an Fehlerort 2, deutlich, aber mindestens mit dem doppelten Wert, überschritten wird. Daher wird der Einsatz von Sicherungen an jedem Elektrolysestack empfohlen.

Weiterhin wurden bei einem DC-Kurzschluss hohe Stromanstiegsgeschwindigkeiten simuliert. Diese Größe stellt somit ein zuverlässiges Schutzkriterium dar.

Auffällig ist, dass sich der Stromfluss des Elektrolyseurs bei einem DC-Fehler, zu dem er einen Fehlerstrombeitrag liefert, umkehrt. Dies bildet ein gutes Kriterium für den Schutz von ELAn. Somit empfiehlt sich der Einsatz einer Schutzfunktion, die bei Erkennung der Stromrichtungs-umkehr für eine Auslösung sorgt und den Elektrolyseur von seiner elektrischen Energieversorgung trennt.

Der starke Einbruch der DC-Spannung bei einem Kurzschluss bietet ein weiteres Schutzkriterium für ELAn. Bei einer Implementierung dieses Kriteriums muss beachtet werden, dass nach Bild 5 die DC-Spannung in einem Teillast-Arbeitspunkt gegenüber dem Volllast-Arbeitspunkt reduziert ist. Für den untersuchten Arbeitspunkt mit minimaler Leistung beträgt die DC-Spannung nur noch 93 % von U_{dr} . Um die Zuverlässigkeit des Kriteriums zu erhöhen sollte daher der eingestellte Arbeitspunkt des Elektrolyseurs überwacht und die DC-Spannung in diesem Arbeitspunkt als Referenzwert für einen Spannungseinbruch verwendet werden.

Tabelle 3: Einfluss der untersuchten Parameter auf den Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs

Parameter	Einfluss
DC-Impedanz	Geringer Einfluss
Arbeitspunkt	Geringer Einfluss
AC-Impedanz	Kein Einfluss

Tabelle 4: Bewertung der Anwendbarkeit von Schutzkriterien für den Schutz von ELAn

Schutzkriterium	Anwendbarkeit
Stromrichtung	Uneingeschränkt
Stromstärke	Eingeschränkt
di/dt	Uneingeschränkt
i^2t	Eingeschränkt
DC-Spannung	Eingeschränkt

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag behandelt die Modellierung und Simulation von PEM-Elektrolyseanlagen mit Fokus auf DC-Kurzschlussfällen. Es werden zwei Simulationsmodelle des Elektrolyseurs in PLECS präsentiert und das dynamische Verhalten von Elektrolyseuren im Betriebsfall und bei DC-Kurzschlüssen analysiert. Anhand der Simulationsergebnisse werden verschiedene Schutzmaßnahmen vorgeschlagen, bspw. die Verwendung von Sicherungen, der Schutzkriterien Strom, Stromanstiegsgeschwindigkeit und DC-Spannung sowie einer stromrichtungsabhängigen Schutzfunktion, um die ELA zu schützen. Die Simulationsergebnisse betonen die Bedeutung dieser Schutzmaßnahmen, insbesondere im Kontext von stromstarken DC-Fehlern mit hohen Stromanstiegsgeschwindigkeiten.

Um systematische Aussagen zur Dimensionierung und Parametrierung von Schutzsystemen für ELAn zu treffen, bedarf es noch weiterer Untersuchungen und Messungen. So ist eine Validierung des verwendeten Fehlermodells durch Messungen an Elektrolyseuren notwendig. Anzustreben ist weiterhin die Erstellung eines Grey-Box-Modells, das auch das elektrochemische Verhalten des Elektrolyseurs berücksichtigt, um den transienten Übergang der ELA aus dem Normalbetrieb in den Fehler zu untersuchen. Ebenso können weitere Einflussparameter auf den Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs, wie bspw. die Fehlerimpedanz, untersucht werden. Ferner ist das Simulationsmodell um weitere Elektrolysetechnologien, wie bspw. die Alkalische Elektrolyse oder die Hochtemperaturelektrolyse, und Gleichrichtertopologien, wie bspw. VSCs, zu erweitern.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Wasserstoff Kompass, „Elektrolyse-Monitor,“ Januar 2024. [Online]. Available: <https://www.wasserstoff-kompass.de/elektrolyse-monitor>. [Zugriff am 22. Januar 2024].
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie,“ Berlin, 2023.
- [3] H. Hubensteiner, G. Aldinger, G. Brauner, L. Fickert, W. Hadick, H. Hauser, W. Müller, R. Requa, H. Stimmer und L. Zimmerl, Schutztechnik in elektrischen Netzen 1: Grundlagen und Ausführungsbeispiele, Berlin: VDE VERLAG, 1993.
- [4] R. Bleilevens, Vereinfachte Kurzschlussstromberechnung für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze; 1. Auflage, RWTH Aachen University, Bd. RWTH Aachen University, 2020.
- [5] S. Bernet, Selbstgeführte Stromrichter am Gleichspannungszwischenkreis: Funktion, Modulation und Regelung, Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [6] D. M. Bui, S.-L. Chen, C.-H. Wu, K.-Y. Lien, C.-H. Huang und K.-K. Jen, „Review on protection coordination strategies and development of an effective protection coordination system for DC microgrid,“ in *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Hong Kong, China, 2014.

- [7] L. Hallemans, G. Van den Broeck, S. Ravyts, M. M. Alam, M. Dalla Vecchia, P. Van Tichelen und J. Driesen, „Fault Identification and Interruption Methods in Low Voltage DC Grids — A Review,“ in *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Matsue, Japan, 2019.
- [8] J.-D. Park, M. H. Ullah und B. Babaiahgari, „Coordinated protection of DC microgrids,“ in *DC Distribution Systems and Microgrids*, Institution of Engineering and Technology, Hrsg., Dragicevic, Tomislav; Wheeler, Pat; Blaabjerg, Frede, 2018, pp. 63-90.
- [9] D. S. Falcão und A. M. F. R. Pinto, „A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners,“ *Journal of Cleaner Production*, Nr. 261, pp. 121-184, Juli 2020.
- [10] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez und D. Guilbert, „Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 45, Nr. 29, p. 14625–14639, Mai 2020.
- [11] P. Choi, D. G. Bessarabov und R. Datta, „A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis,“ *Solid State Ionics*, Bd. 175, Nr. 1, pp. 535-539, 2004.
- [12] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski und S. Gottesfeld, „Polymer Electrolyte Fuel Cell Model,“ *Journal of The Electrochemical Society*, Bd. 138, Nr. 8, pp. 23-34, August 1991.
- [13] M. J. Khan und M. T. Iqbal, „Modelling and Analysis of Electro-chemical, Thermal, and Reactant Flow Dynamics for a PEM Fuel Cell System,“ *Fuel Cells*, Bd. 5, Nr. 4, p. 463–475, Dezember 2005.
- [14] J. Ullmer, M. Bruhns, P. Schegner, M. Hehemann und R. Juchem, „Applicability of Methods for Short circuit current Calculation in Electrolysis systems,“ in *IEEE Power and Energy Student Summit (IEEE PESS 2023)*, Bielefeld, 2023.
- [15] J. Zhang, X. Feng, K. Li, J. Zheng und D. Huang, „Mode of short-circuit state operation in 24-pulse uncontrolled bridge rectifier,“ in *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Tokyo, Japan, 2009.
- [16] C. Strobl, Verfeinerte Fehlerdetektion für Niederspannungs-Gleichstromnetze: Modellierung, Einflussgrößenanalyse und Identifikationsverfahren, Diss., Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2022.