

Jakob Leide

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Elektroenergieversorgung

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

18. Symposium Energieinnovation 2024 // Donnerstag, 15. Februar 2024

Einleitung

- Wasserstoff ist wichtiger Bestandteil der Energiewende [1]
- Nationale Wasserstoffstrategie (DtL.) sieht 10 GW Elektrolyseleistung bis 2030 vor [1]
- Zum Ausbau Skalierungseffekte nutzen
 - Auch für Auslegung des Schutzsystems
- Erstellung eines dynamischen Elektrolyseur-Modells in *PLECS*
 - Untersuchung von Betriebs- und Fehlerfall
- Analyse und Bewertung von Schutzkriterien zum Einsatz in Elektrolyseanlagen (ELA)

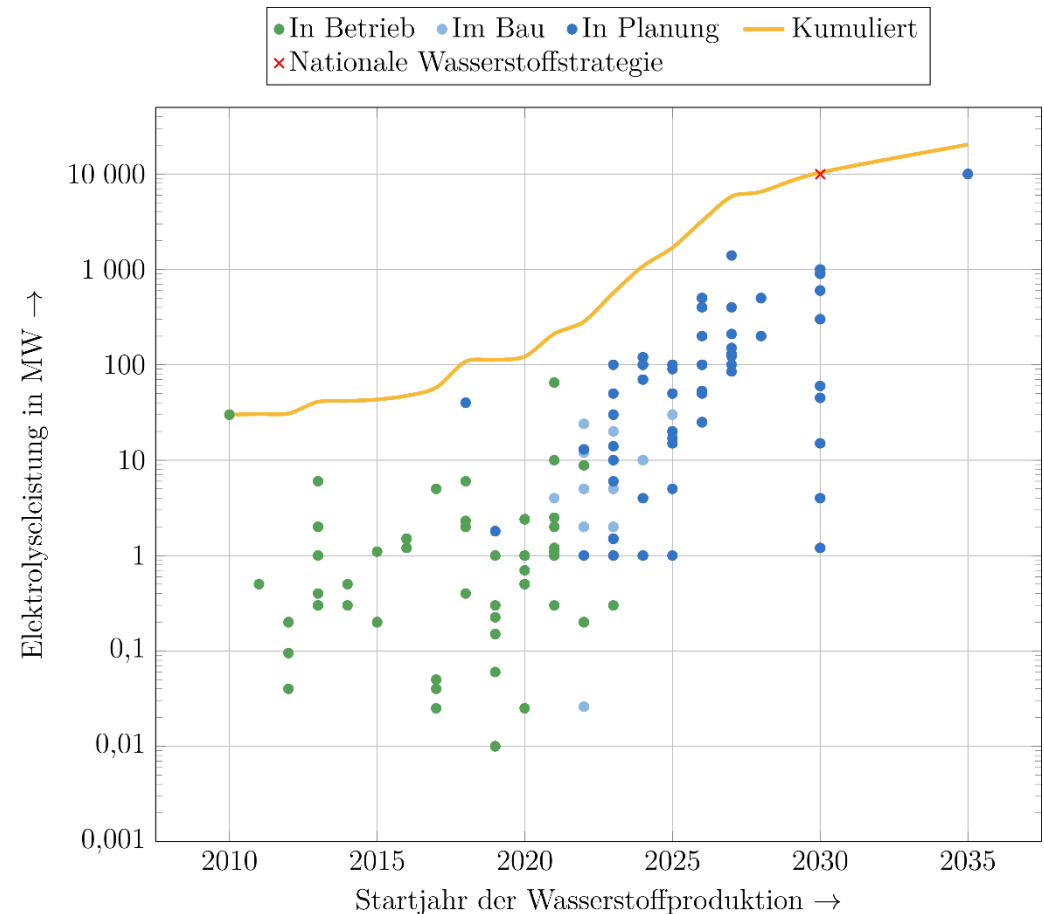


Bild 1: Angekündigte Elektrolyseprojekte in Deutschland [2]

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung
- 2 Simulationsmodell
- 3 Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen
- 4 Schutzkriterien für Elektrolyseanlagen
- 5 Zusammenfassung und Ausblick

Simulationsmodell

Energieversorgung der ELA

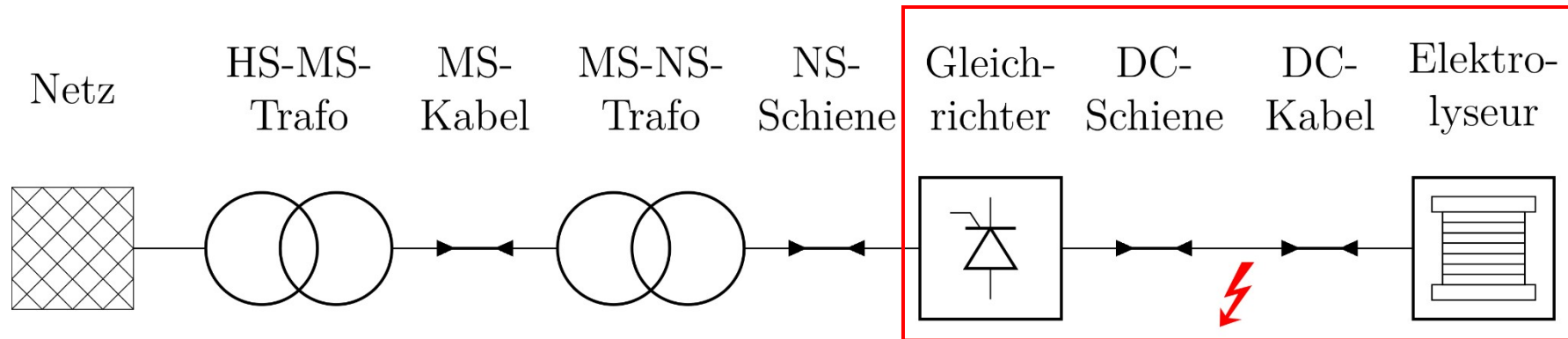


Bild 2: Blockschaltbild der elektrischen Energieversorgung einer ELA (Vgl. [3])

- Modellierung eines Proton Membrane Exchange Elektrolyseurs (PEM EL)
- Fokus auf DC-Fehler

Simulationsmodell

Modellierung PEM EL - Betriebsfall

- Aktivierungsenergie für den Ladungsträgerübertritt (,)
- Widerstand der Membran ()
- Reversible Zellspannung ()
- Doppelschichtkapazitäten an den Elektroden (,)

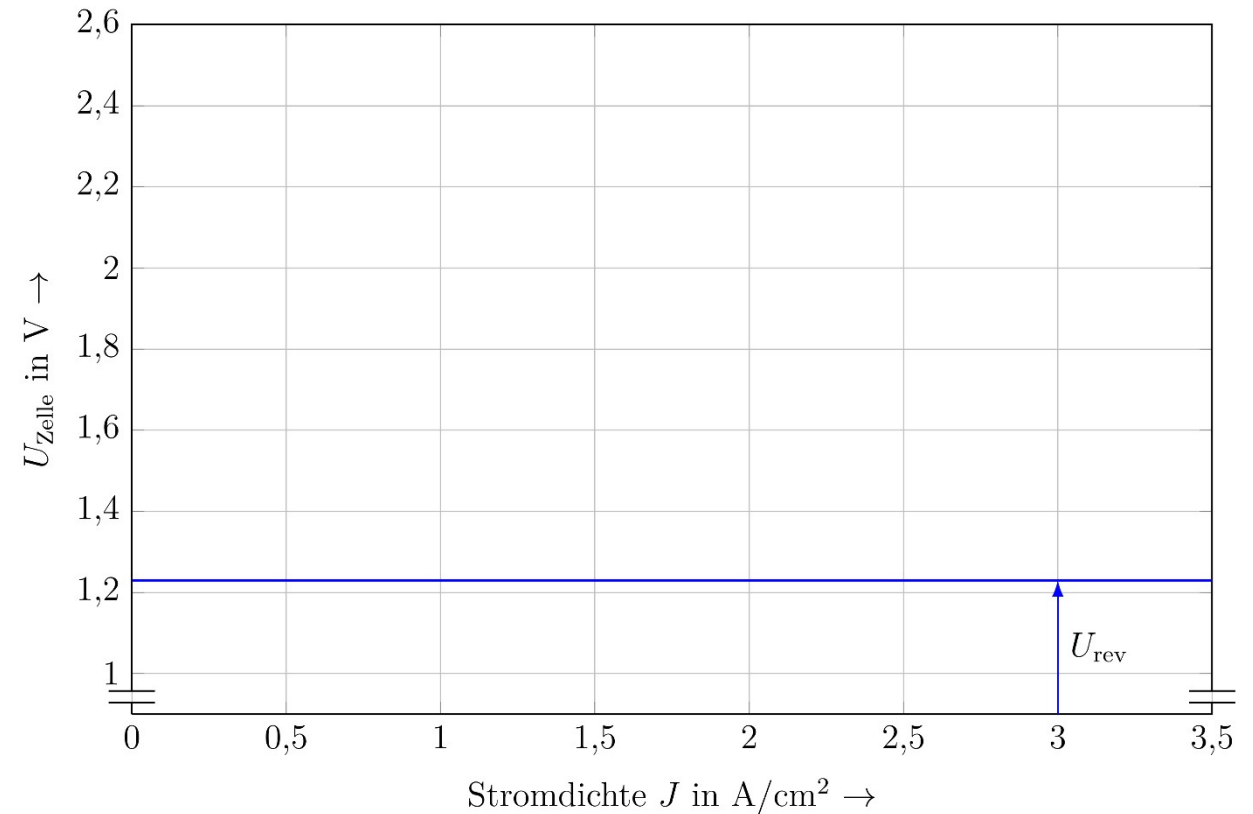


Bild 3: Verluste in einer Elektrolysezelle (Vgl. [4])

Simulationsmodell

Modellierung PEM EL – Betriebsfall

- Aktivierungsenergie für den Ladungsträgerübertritt [5]

-

} für

- Membranwiderstand [6]
- Reversible Zellspannung [5]
- Doppelschichtkapazitäten an den Elektroden [7]

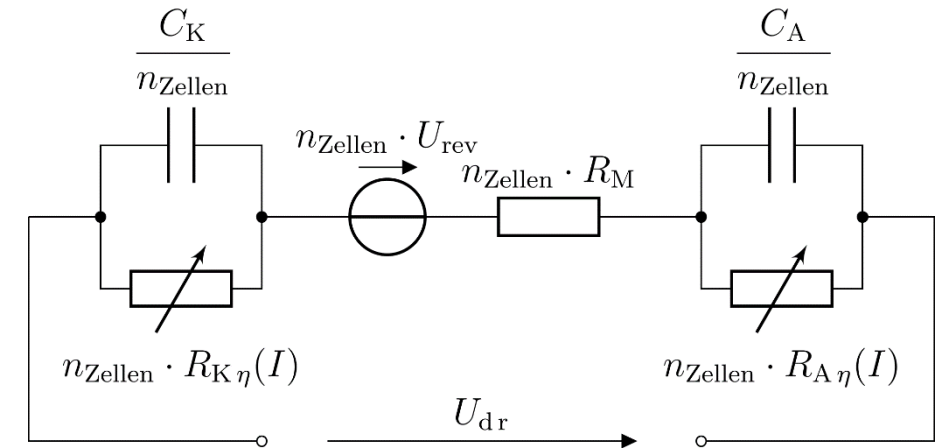


Bild 4: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Elektrolysestacks (Vgl. [5])

Simulationsmodell

Modellierung PEM EL – Betriebsfall

Tabelle 1: Kennwerte des simulierten Elektrolyseurs [8]

Formel	Größe	Wert
	Anzahl der Zellen	245
	Anzahl der Stacks	10
	Bemessungsstromdichte e	3 A/cm ²
	Membranfläche	1000 cm ²
	Strom eines Stacks	3 kA
	Strom der ELA	30 kA
	DC-Spannung	600 V
	Leistung eines Stacks	1,8 MW
	Leistung der ELA	18 MW

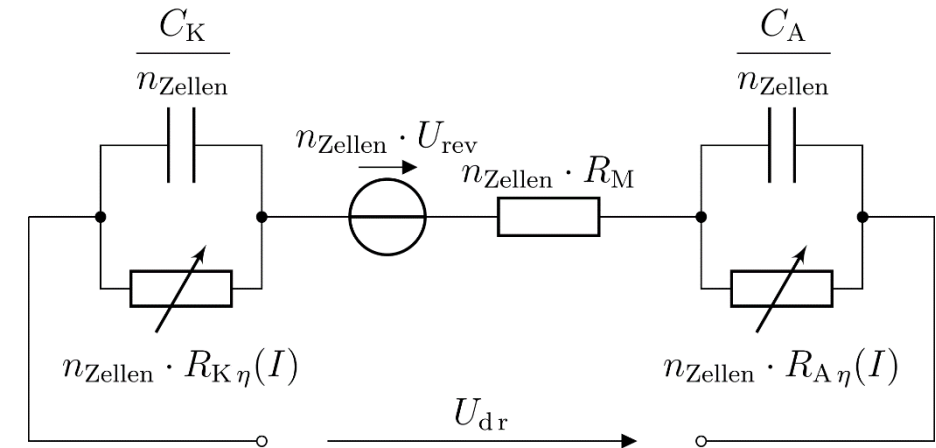


Bild 4: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Elektrolyseestacks (Vgl. [5])

Simulationsmodell

Modellierung PEM EL – Aktivierungsenergie [5]

$$\eta_A = k_A \ln \frac{J}{J_{0A}}$$

$$\eta_K = k_K \ln \frac{J}{J_{0K}}$$

Tabelle 2: Werte für die Berechnung der Aktivierungsenergie einer Elektrolysezelle

Formel	Größe
	Temperaturabhängige Konstante
	Temperaturabhängige Konstante
	Austauschstromdichte der Anode
	Austauschstromdichte der Kathode

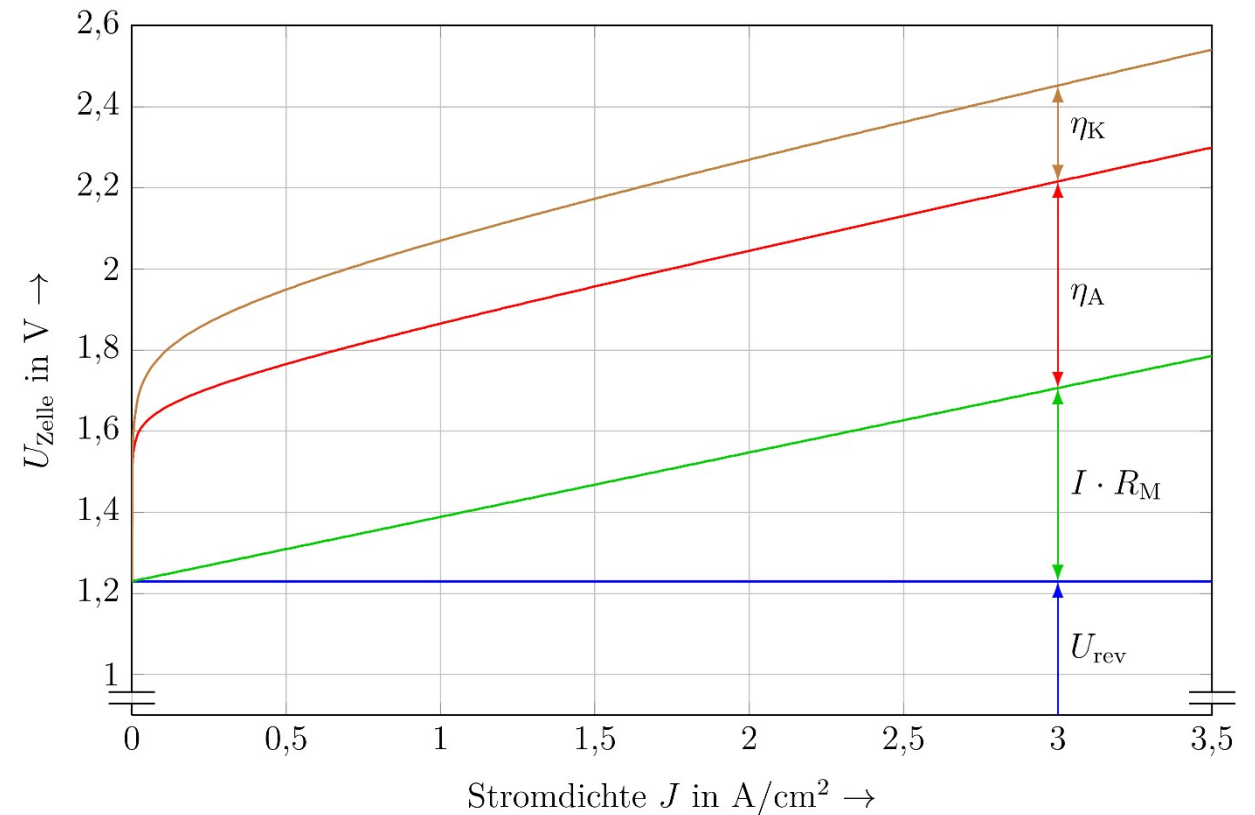


Bild 3: Verluste in einer Elektrolysezelle (Vgl. [4])

Simulationsmodell

Modellierung PEM EL – Fehlerfall

- Ersatzschaltbild durch das Forschungszentrum Jülich ermittelt [8]
 - Aus Messungen an 50 kW Stack
- Werte mit der Membranfläche und Zellanzahl auf simulierte ELA skaliert (i. A. a. [8])

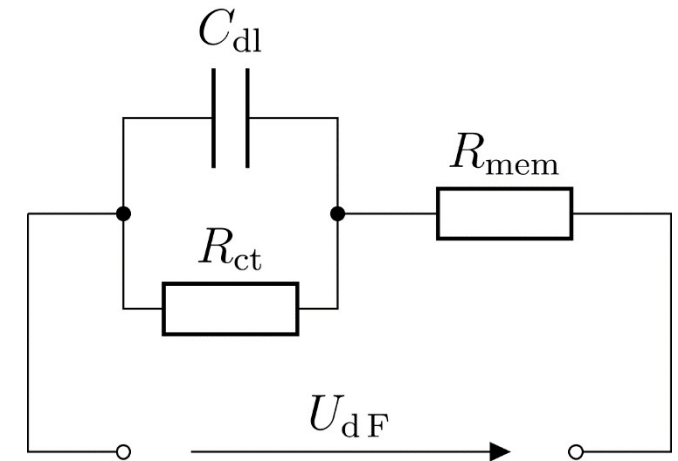


Bild 5: Kurzschlussersatzschaltbild einer Elektrolysezelle [8]

- entspricht Spannung über den Doppelschichtkapazitäten im Betriebsfall

Simulationsmodell

Gleichrichter und DC-Netz

- Netzgeführter Gleichrichter
 - Vollgesteuerte 24-Puls-Brückenschaltung in Parallelschaltung (B6C-4P) (i. A. a. [10])
- Monopolar asymmetrisches DC-System [9]
- Starre Neutralpunktbehandlung [9]

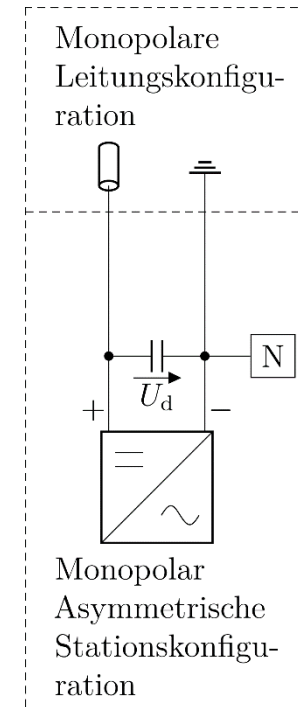


Bild 6: Stations- und Leitungskonfiguration (Vgl. [9])

Simulationsmodell

Fehlerstellen

Tabelle 3: Fehlerorte

Fehler	Fehlerort
1	Stack 1 des Elektrolyseurs, positiver Pol
2	Mitte DC-Kabel zu Stack 1, ein Kabel
3	Mitte DC-Kabel zu Stack 1, alle Kabel
4	DC-Stromschiene, Anschlusspunkt der DC-Kabel

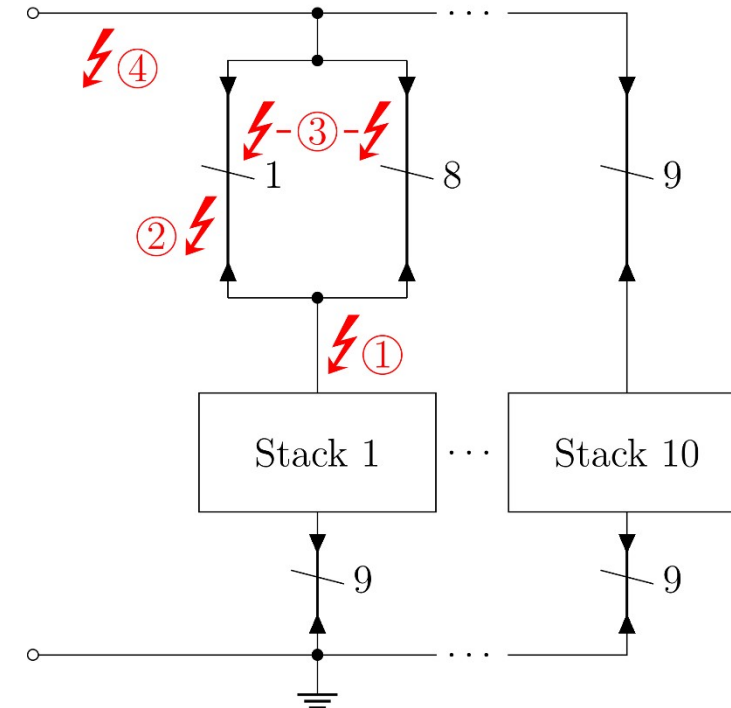


Bild 7: DC- Fehlerorte

Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

Verlauf des Fehlerstromes

- nach 10,6 ms
- nach 11,6 ms
- nach 0,47 ms

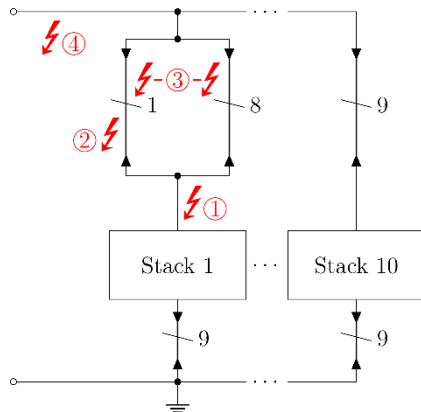


Bild 7: DC-Fehlerorte

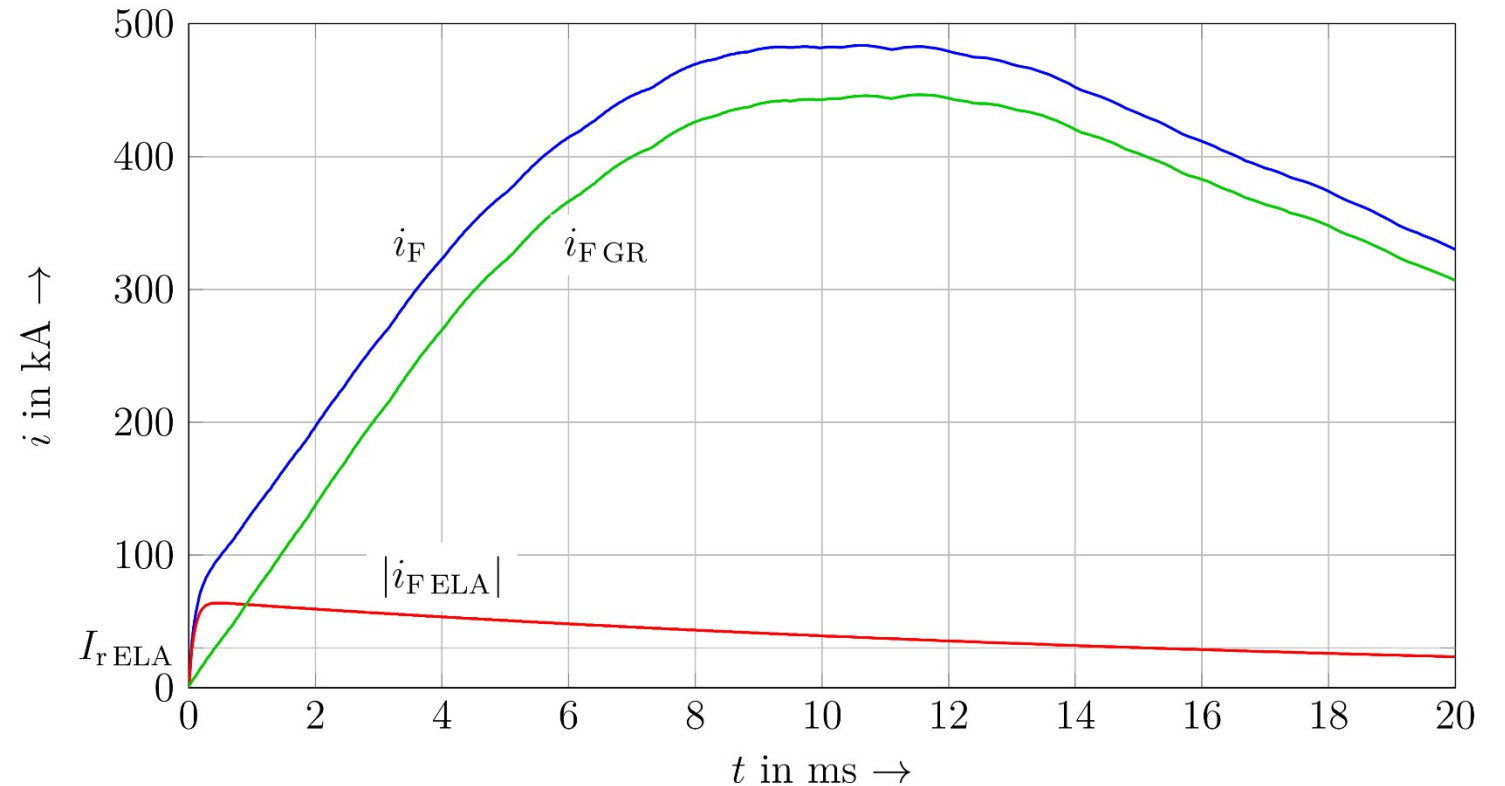


Bild 8: Verlauf des Fehlerstromes bei Kurzschluss an Fehlerort 4

Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

Fehlerarten

Tabelle 4: Untersuchte Schutzkriterien und Einflussparameter

Einflussparameter	Variation
Fehlerort	Fehlerorte 1-4
Arbeitspunkt	1 Teillastarbeitspunkt
Länge MS-Kabel (AC-Impedanz)	50 m...2 km

Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

Einfluss des Fehlerortes

- Nur an Fehlerort 2 Einfluss
- Bei Fehlerort 1, 3 und 4 weitgehend unbeeinflusste Ausprägung des Fehlerstrombeitrags von Stack 1

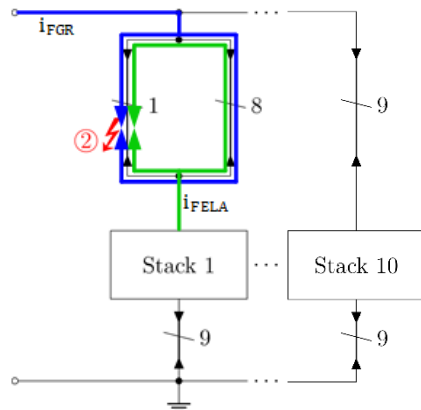


Bild 7: DC-Fehlerorte

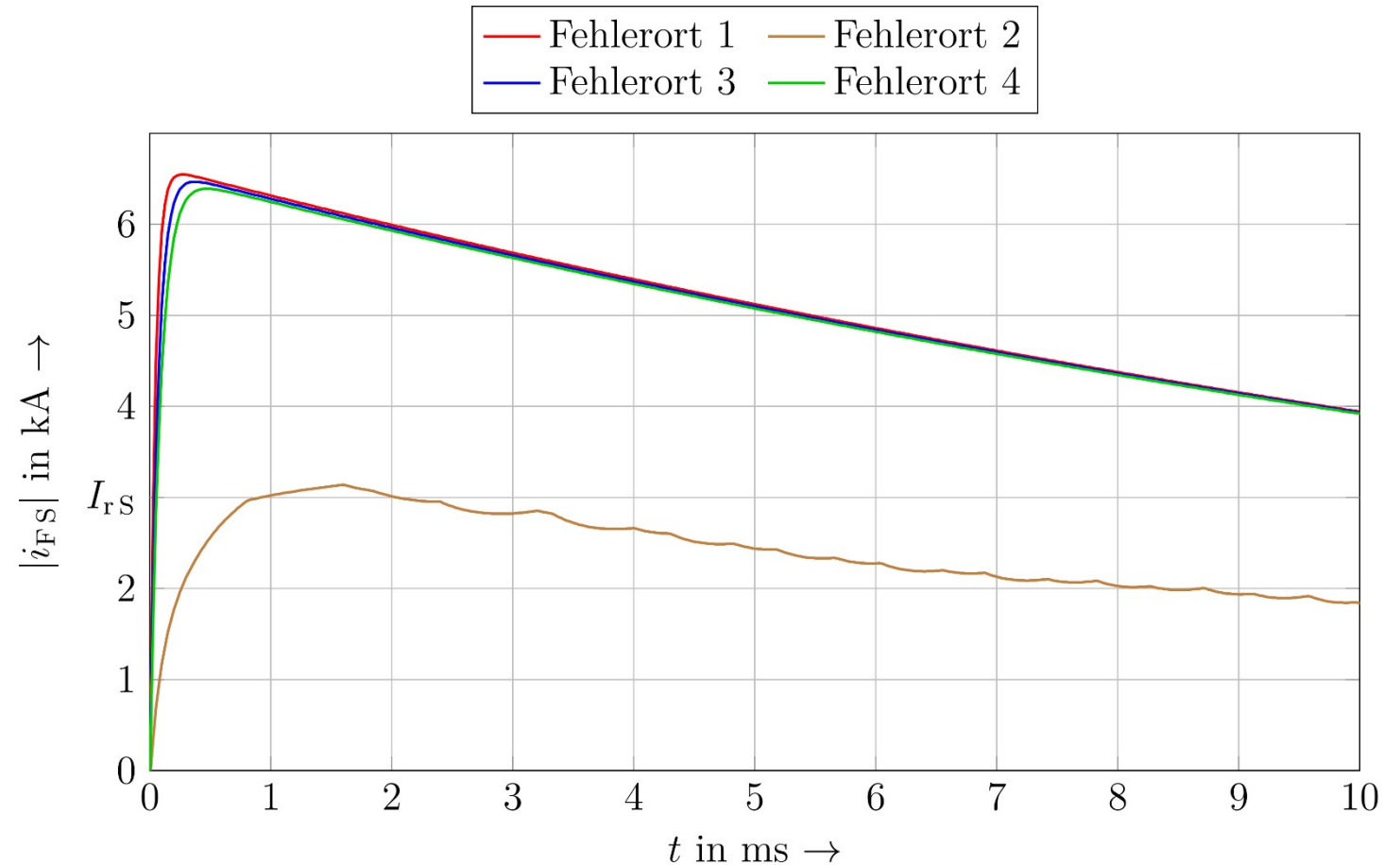


Bild 9: Verlauf des Fehlerstrombeitrags des fehlerbehafteten Stacks bei verschiedenen Fehlerorten

Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

Einfluss des Arbeitspunktes

- Ein Fehler im Teillastarbeitspunkt reduziert den Spitzenwert des Fehlerstrombeitrags des Elektrolyseurs
 - max. 21 %

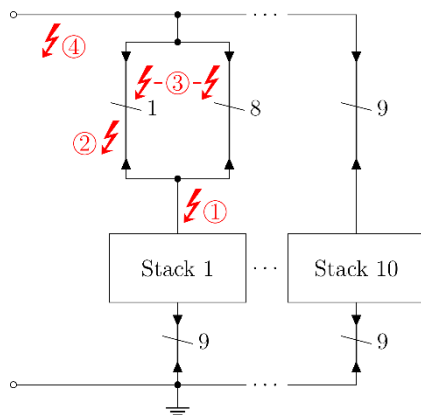


Bild 7: DC-Fehlerorte

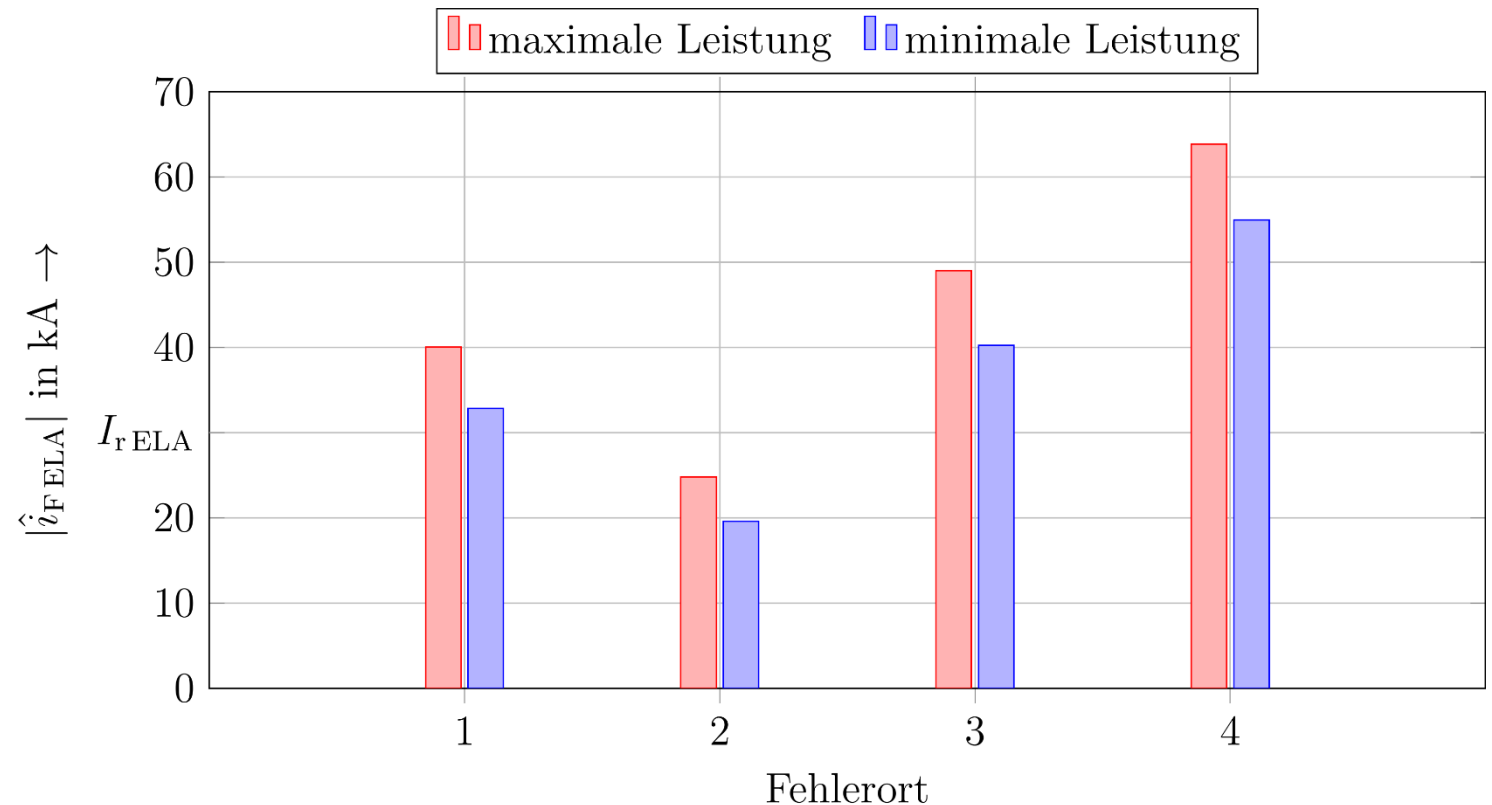


Bild 10: Spitzenwert des Fehlerstrombeitrages des Elektrolyseurs bei verschiedenen Arbeitspunkten und Fehlerorten

Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

- Fehlerfall

- Unterschied zum dynamischen Betrieb (-0,18 kA/ms) um eine bis mehrere Größenordnungen \uparrow

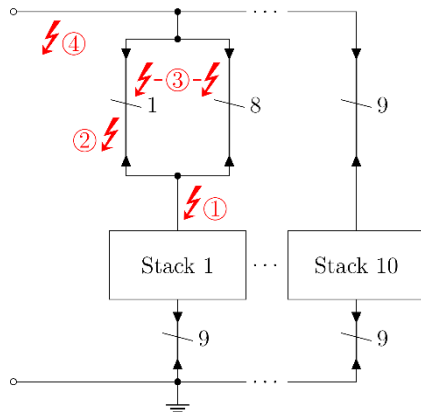


Bild 7: DC-Fehlerorte

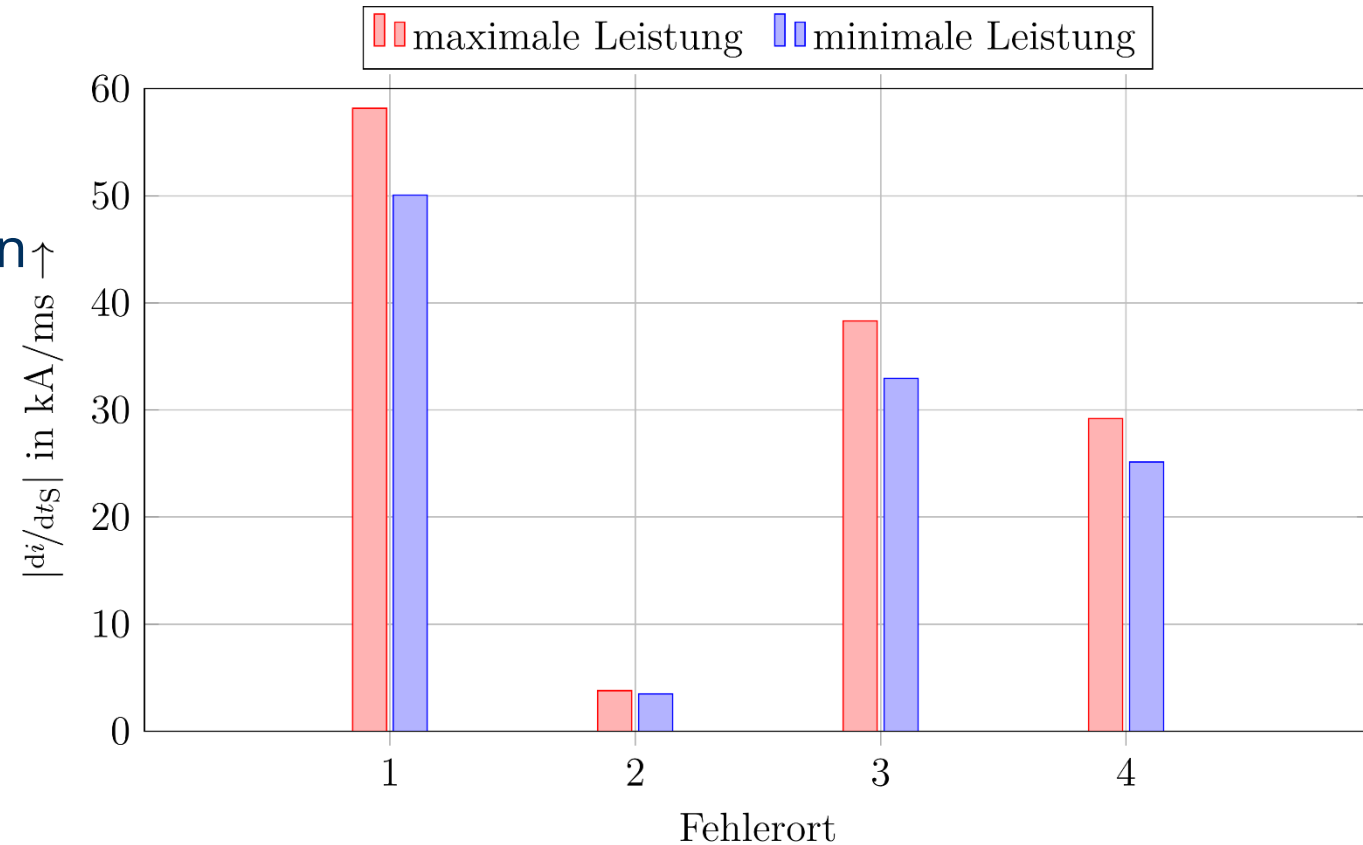


Bild 11: Maximale des Fehlerstrombeitrags des fehlerbehafteten Stacks bei verschiedenen Arbeitspunkten und Fehlerorten

Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

- Für 10 ms ausgewertet
 - Im Betrieb: 90 000 A²s ()
- Im Fehler doppelter Betriebswert
 - An Fehlerort 2 geringer als der Betriebswert

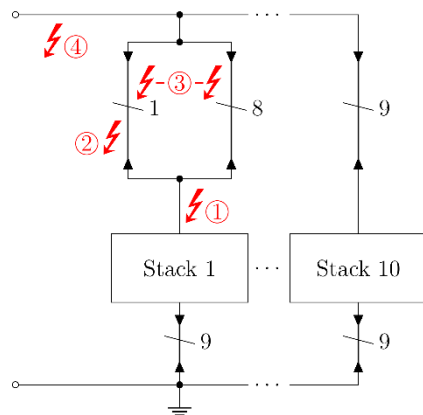


Bild 7: DC-Fehlerorte

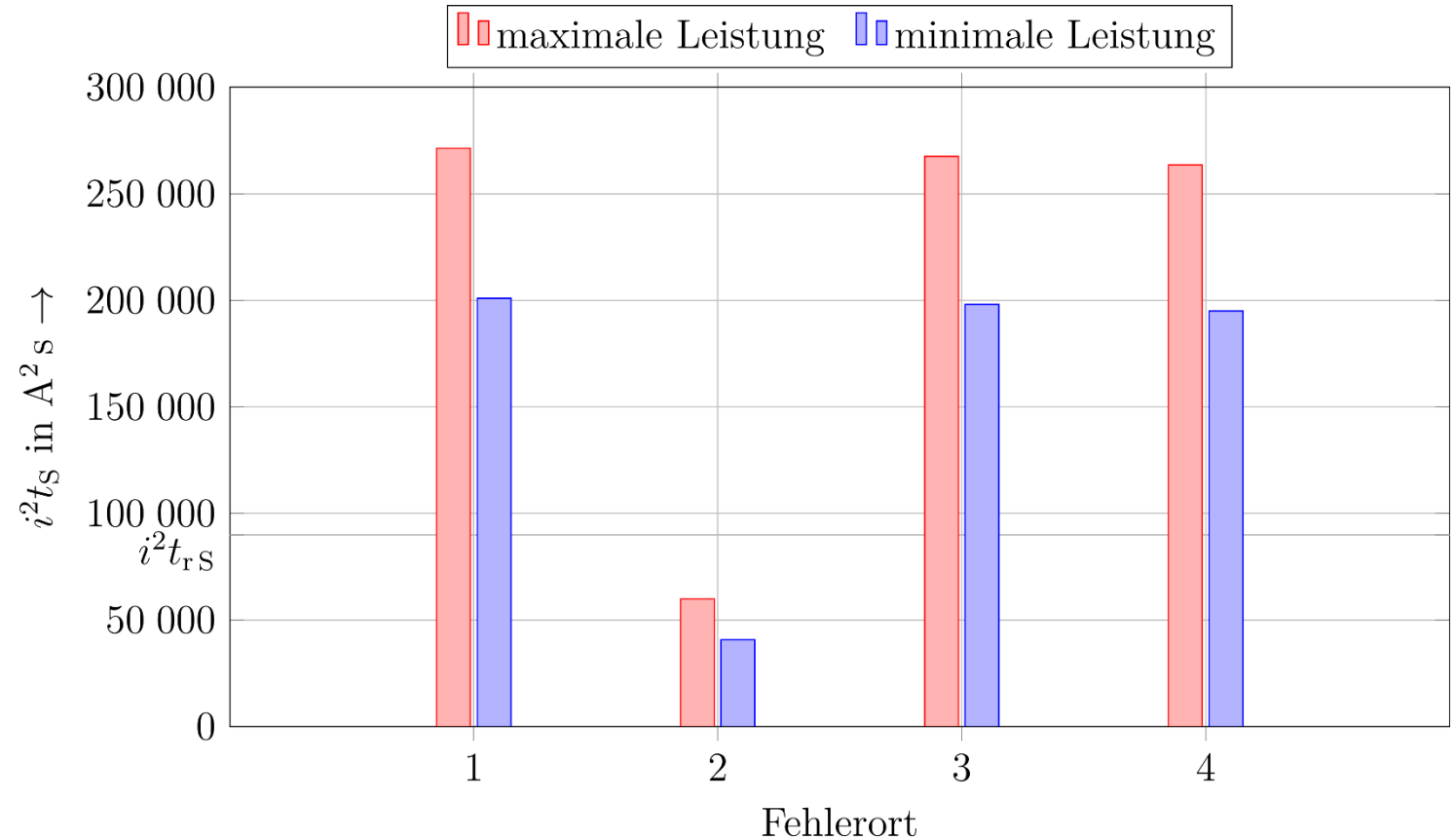


Bild 12: des Fehlerstrombeitrags des fehlerbehafteten Stacks für die ersten nach Fehlereintritt bei verschiedenen Arbeitspunkten und Fehlerorten

Systemverhalten bei DC-Kurzschlüssen

DC-Spannung

- Messstelle an Fehlerort 4 (DC-Sammelschiene)
- Größerer Einbruch je geringer die Impedanz zur Fehlerstelle

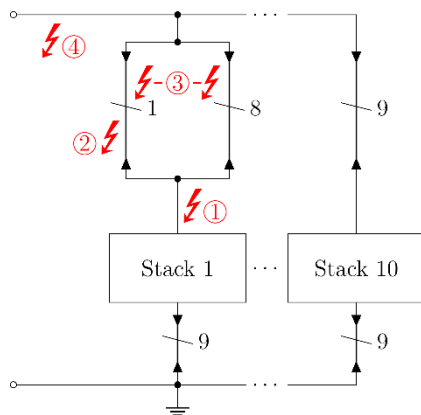


Bild 7: DC-Fehlerorte

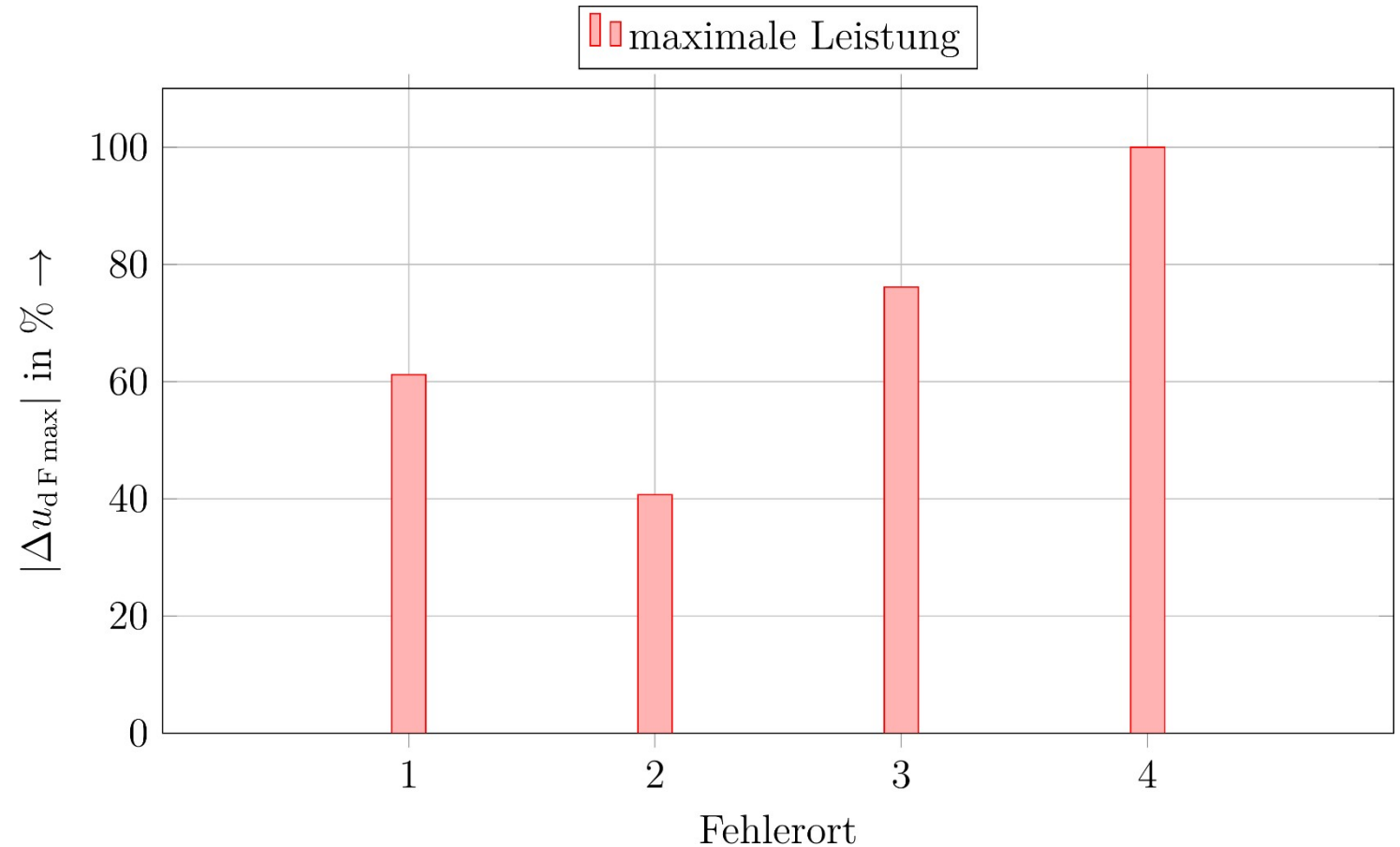


Bild 13: Maximaler Einbruch der DC-Spannung an der Sammelschiene bei Kurzschlusseintritt bei verschiedenen Fehlerorten

Schutzkriterien für Elektrolyseanlagen

Tabelle 5: Einfluss der untersuchten Parameter auf den Fehlerstrombeitrag des Elektrolyseurs

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

Zusammenfassung

- Simulation und Analyse verschiedener Betriebs- und Fehlerarten einer ELA in *PLECS*
 - Stromumkehr der ELA bei DC-Kurzschlüssen
 - Hohe Stromanstiegsgeschwindigkeit
 - Einfluss des Fehlerortes
 - Betrachtung des i_{DC} und der DC-Spannung
- Bewertung verschiedener Schutzkriterien für den Schutz von ELAn

Ausblick

- Validierung des Fehlermodells mit Messungen
- Weitere qualitative und quantitative Untersuchungen notwendig
 - Weitere Elektrolysetechnologien
 - Weitere Gleichrichtertopologien
- Gemeinsames Betriebs- und Fehlermodell als *Grey-Box-Modell*

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie,“ Berlin, 2023.
- [2] Wasserstoff Kompass, „Elektrolyse-Monitor,“ Januar 2024. [Online]. Verfügbar: <https://www.wasserstoff-kompass.de/elektrolyse-monitor>. [Zugriff am 22. Januar 2024].
- [3] J. Haarer, Aufbau eines Elektrolysegleichrichters in Parallel-Topologie, 2019.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Institut für Energie- und Klimaforschung, Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-14), Forschungszentrum Jülich im Rahmen einer Projektkooperation mit SMA, Jülich, 2023.
- [9] R. Bleilevens, Vereinfachte Kurzschlussstromberechnung für Mittel- und Niederspannungsgleichstromnetze; 1. Auflage, RWTH Aachen University.: Bd. RWTH Aachen University, 2020.
- [10] 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.
- [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.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

 Leitprojekt
H₂Giga



Jakob Leide
Technische Universität Dresden
Professur für
Elektroenergieversorgung
jakobleide@mailbox.tu-dresden.de
 49 351 463-35088
 Jakob Leide

Simulationsmodell

Modellierung PEM EL – Verluste

Tabelle 7: Berechnung der Verluste einer Elektrolysezelle [5,6]

Größe	Formel	Wert

Tabelle 8: Werte für die Berechnung der Verluste einer Elektrolysezelle [5,6,11]

Formel	Größe	Wert
	Universelle Gaskonstante	
	Temperatur	
	Ladungstransferkoeffizient der Anode	
	Ladungstransferkoeffizient der Kathode	
	Anzahl der ausgetauschten Elektronen	
	Faraday-Konstante	
	Austauschstromdichte der Pt-Anode	
	Austauschstromdichte der Pt-Kathode	
	Membranfläche	
	Membrandicke (Membran: Nafion™ 117)	
	Wassergehalt der Membran	
	Freie Reaktionsenthalpie	
	Stoffmenge	

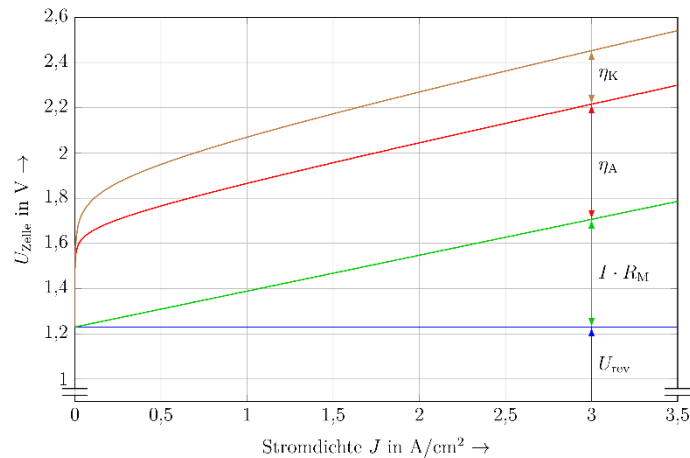


Bild 3: Verluste in einer Elektrolysezelle (Vgl. [4])

Simulationsmodell

Gesamtmodell

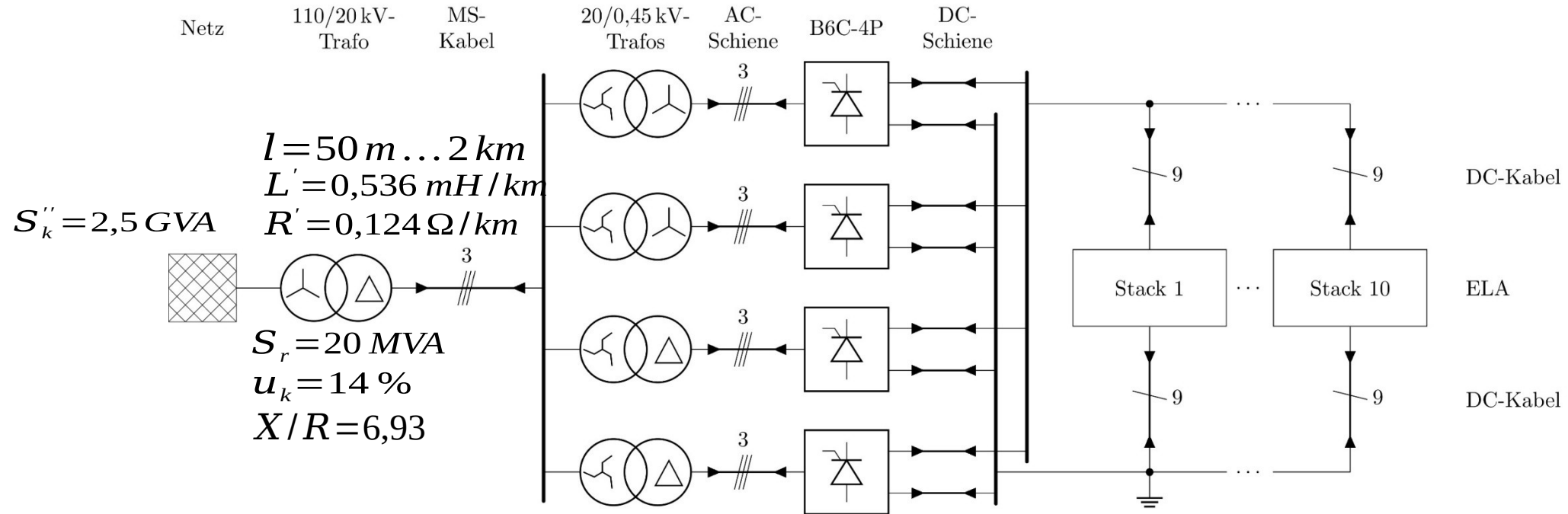


Bild 14: Gesamtmodell