

Michael Bruhns, Peter Schegner

NARC National Arc fault Research Center, Professur für vernetzte Energiesysteme

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH)

Technische Universität Dresden

Forschungsergebnisse zur Sicherheit bei NS- Störlichtbögen in Gleichspannungssystemen

134. Sitzung des AK 1 "Starkstromanlagen bis 1000V"

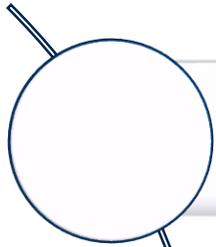
am 01.12.2025

VDE Bezirksverein Dresden e. V.

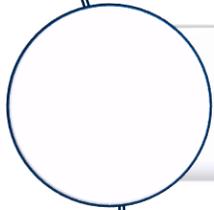
Dresden, 01.12.2025



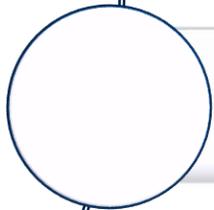
Inhalte



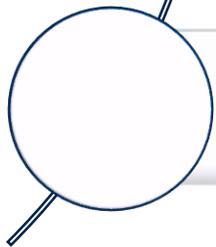
National Arc fault Research Center (NARC)



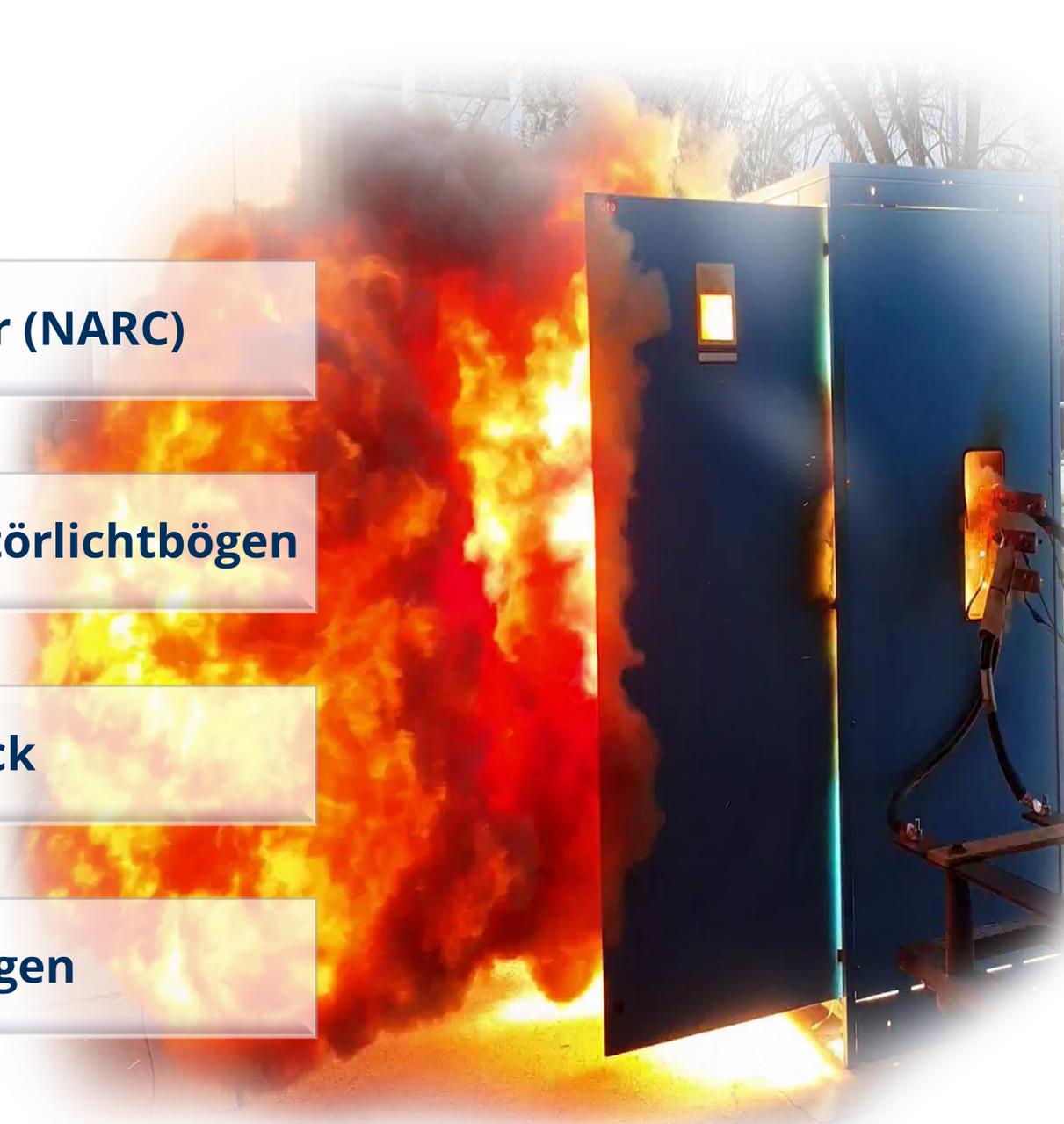
Forschungsergebnisse zu DC-Störlichtbögen



Zusammenfassung und Ausblick



Highspeed-Aufnahme von Lichtbogen



National Arc fault Research Center (NARC)

Kompetenzzentrum zur Untersuchung von Störlichtbögen

Motivation

- **Gefährdung für Personen, Anlagen und Elektroenergieversorgung bei Störlichtbögen reduzieren**

Tätigkeiten am NARC

- **F&E**
- Fachvorträge
- Seminare und Schulungen
- Lichtbogenvorführungen



Prof. Dr.-Ing.
Peter Schegner



Dipl.-Ing.
Carlo Liebermann



Dipl.-Ing.
Michael Bruhns



Dipl.-Ing. (FH)
Franz Jani



Dipl.-Ing.
Ricardo Herrmann



Techniker
Gunter Lemke



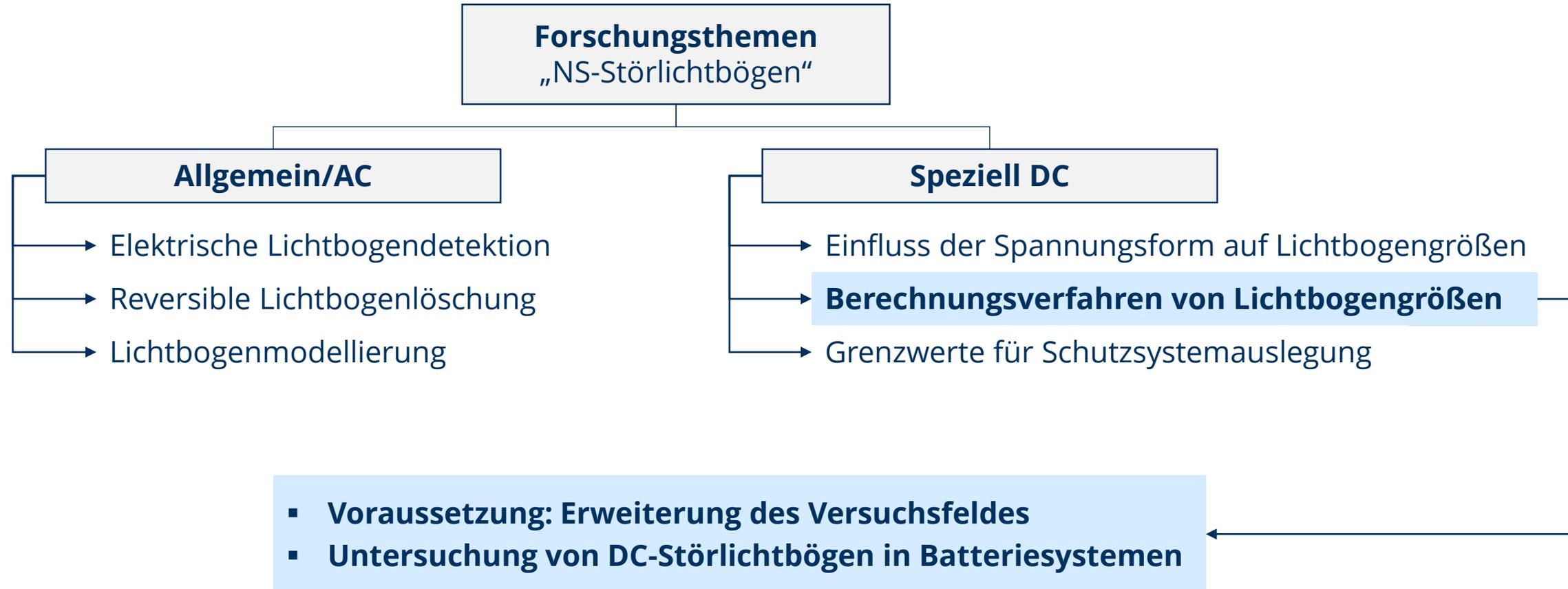
Dipl.-Ing.
Jan Keller



Dipl.-Ing. Thanh
Binh Nguyen

National Arc fault Research Center (NARC)

Übersicht der Forschungsthemen im Bereich „NS-Störlichtbögen“



Forschungsprojekt

IGF-Vorhaben 01IF22533N

SICHERHEIT BEI STÖRLICHTBÖGEN IN NIEDERSpannungs- GLEICHSTROMSYSTEMEN



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zielstellungen & Schwerpunkte

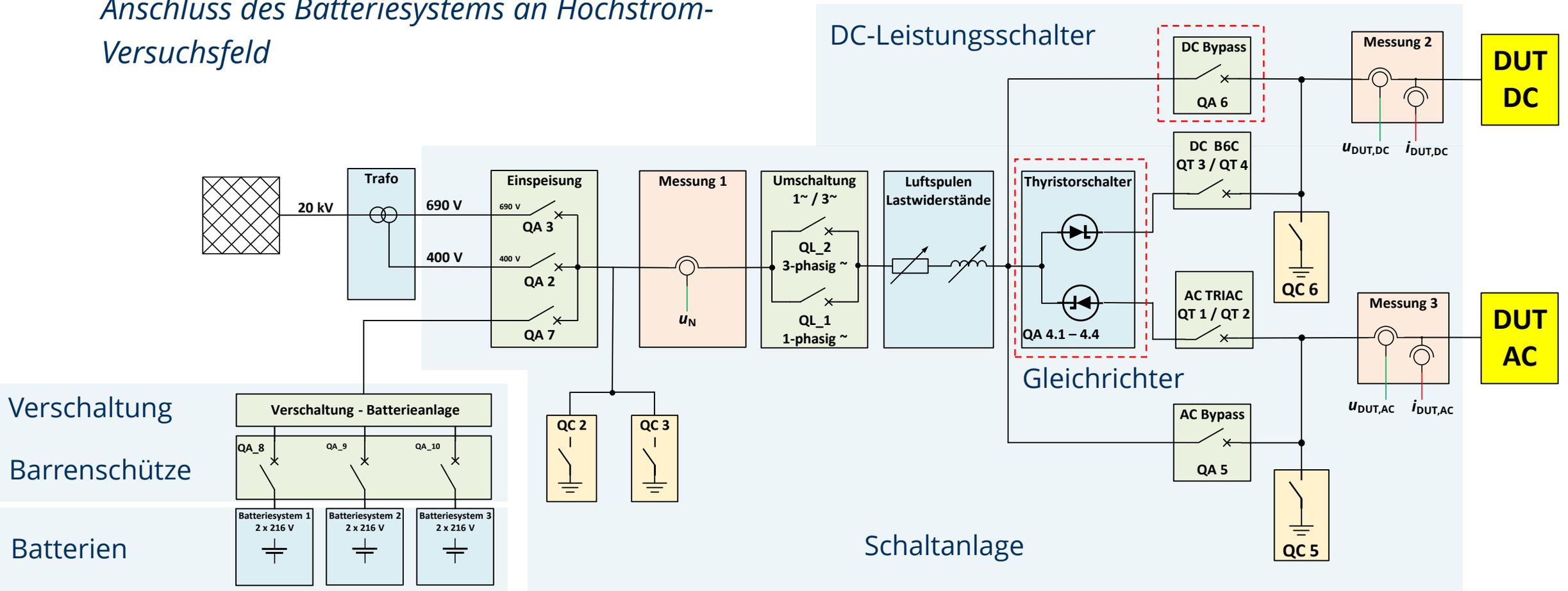
- **Einfluss der DC-Quelle auf Charakteristik** und therm. Auswirkungen des Störlichtbogens
- Fokus: Batterie
- **Anwendbarkeit des DC-Modells aus DGUV-I 203-077 in Batteriesystemen**
- Stabilitätsbedingungen des DC-Störlichtbogens
- Versuchsdurchführung in **Hochstrom-Versuchsfeld NARC der TU Dresden**
- 134 Störlichtbogenversuche durchgeführt
- **Beitrag zu Anlagen- und Personenschutz in DC-Systemen**



Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Aufbau des Hochstrom-Versuchsfeldes am NARC 1/2

Anschluss des Batteriesystems an Hochstrom-Versuchsfeld



Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Aufbau des Hochstrom-Versuchsfeldes am NARC 2/2

Komponenten der Hochstrom-Versuchsanlage

Barrenschütze ✓

Abschaltung der DC-Kurzschlussströme



Sicherungstrennschalter ✓

Einfachen Verschaltung der Batteriestränge



Blei-Batterien ✓

6 Batteriestränge mit je 230 V

Gleichrichter ✓

Erzeugung verschiedener DC-Spannungen



DC-Leistungsschalter ✓

Reserveschutz

Schaltanlage ✓

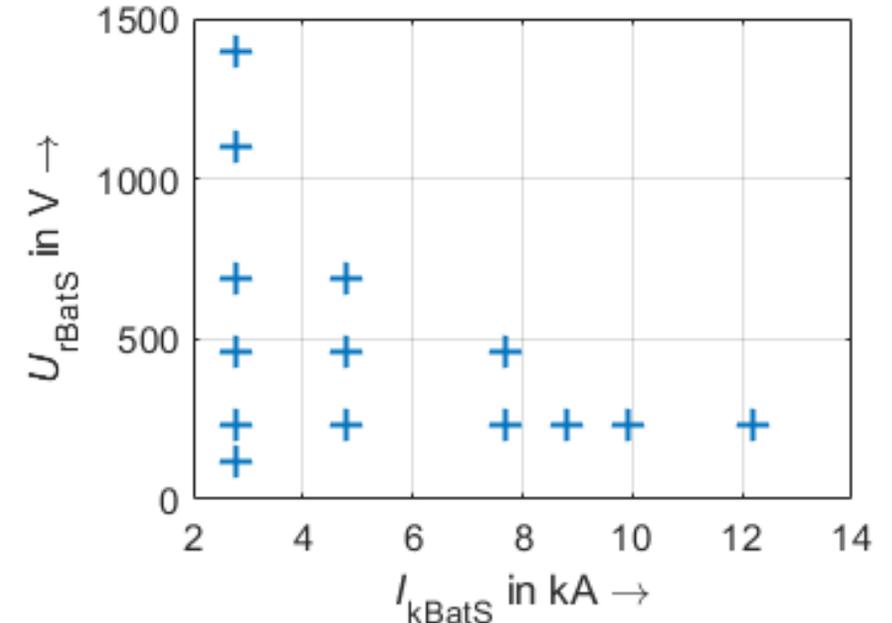
Auswahl von Einspeisung, Netzimpedanz, Fehlerart

Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Untersuchung von Störlichtbögen in Batteriesystemen (BatS)

- Batteriesystem
 - 6 Batteriestränge, Batterietyp: Blei-Flies-Batterien (VRLA)
 - Strang-Nennspannung¹: $U_{rBatS}^{(1Str)} = 230 \text{ V}$
 - Strang-Kurzschlussstrom¹: $I_{kBatS}^{(1Str)} = 3 \text{ kA}$
 - **Beliebige Verschaltung** der Stränge in Reihe und parallel
- Versuchsaufbau
 - Box-Test-Versuchsaufbau entsprechend IEC 61482-1-2
 - Stabilisierter Lichtbogen für Worst-Case-Untersuchung

Foto von Versuchsaufbau



Betriebspunkte von Batteriesystem mit System-Nennspannung (U_{rBatS}) und System-Kurzschlussstrom (I_{kBatS})

¹Nennwerte



Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Untersuchung von Störlichtbögen in Batteriesystemen: Messreihen

- Untersuchung des *Einfluss von Systemgrößen* auf die Lichtbogengrößen für die Schutzsystemauslegung in 4 Messreihen

Systemgröße	Messreihen			
	A	B	C	D
Spannung U_{rBatS} in V	115 ... 1400	230 V	460	460
Kurzschlussstrom I_{kBatS} in kA	3	1 ... 12	3	3, 5, 7
Ladezustand SOC in %	100	100	25 ... 100	100
Elektrodenabstand d_E in mm	30	5, 10	30	5 ... 120
DC Quelle	Batterie	Batterie, Gleichrichter	Batterie	Batterie

- Vergleich der Messergebnisse mit Berechnung nach **DGUV-I 203-077**:

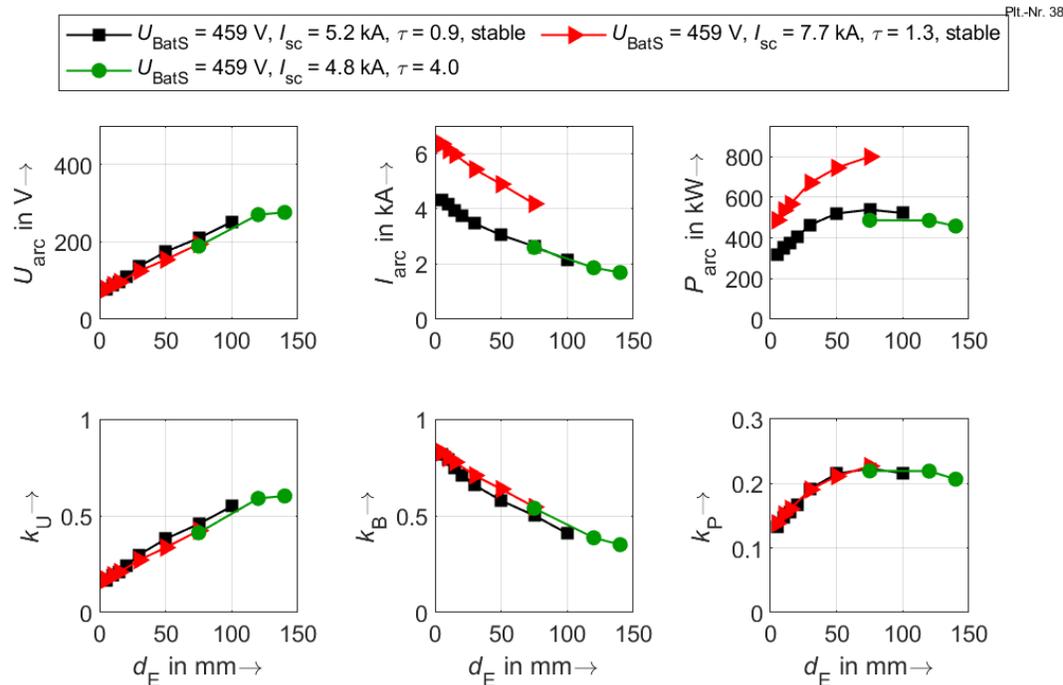
$$I_{arc(i+1)} = \frac{U_{BatS}}{(34 + 0.532 \cdot d_E)} + \frac{U_{BatS}}{I_{sc}^{0.88} \cdot I_{arc(i)}}$$

Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

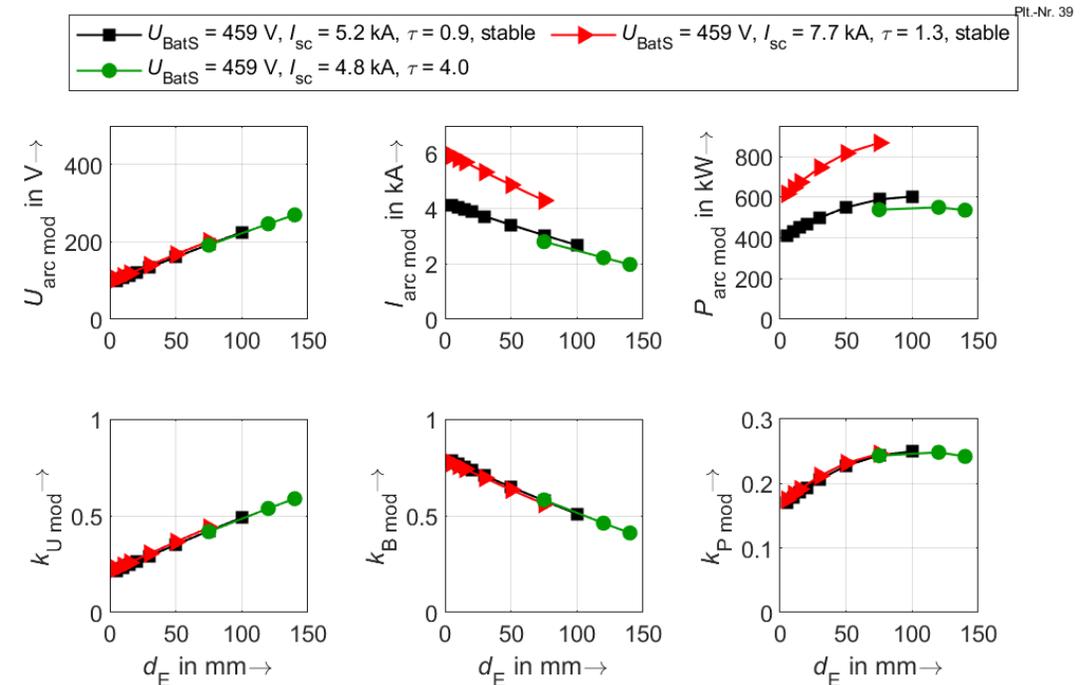
Untersuchung von Störlichtbögen in Batteriesystemen: Messergebnisse 1/3

Abweichung zwischen Messung und Berechnung (für Auswahl an Messreihen)

Messung



Berechnung (nach DGUV-I)



- Qualitative Bewertung: Gute Übereinstimmung

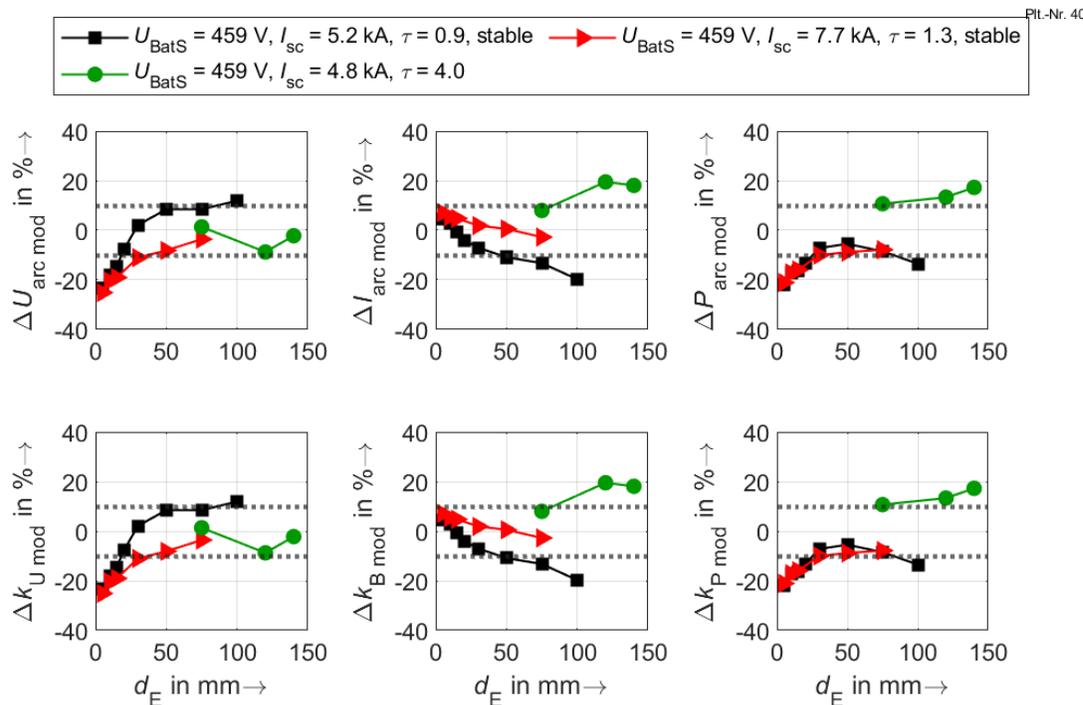
Ergebnisse der Untersuchung zu gemessenen (l) und berechneten (r) Kenngrößen von Störlichtbögen in DC-Systemen am NARC [5]

Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Untersuchung von Störlichtbögen in Batteriesystemen: Messergebnisse 2/3

Abweichung zwischen Messung und Berechnung

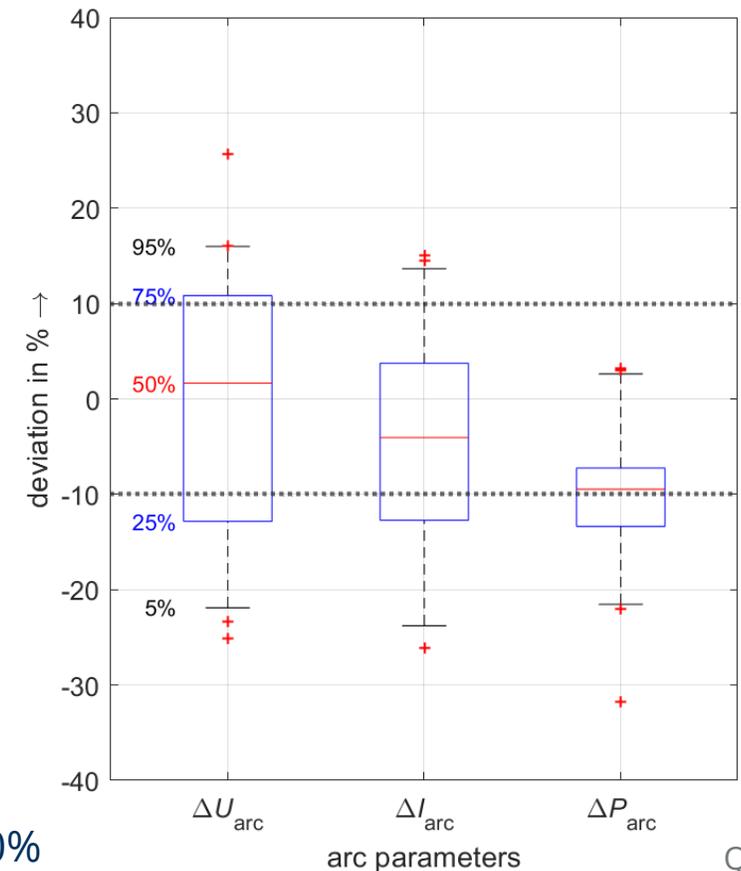
Differenz (Messung zu Berechnung)



alle
Messreihen

$$\Delta X_{\text{arc}} = \frac{X_{\text{arc gem}} - X_{\text{arc ber}}}{X_{\text{arc ber}}}$$

Plt-Nr. 37



- Quantitative Bewertung: Abweichungen überwiegend zw. -10 und +10%

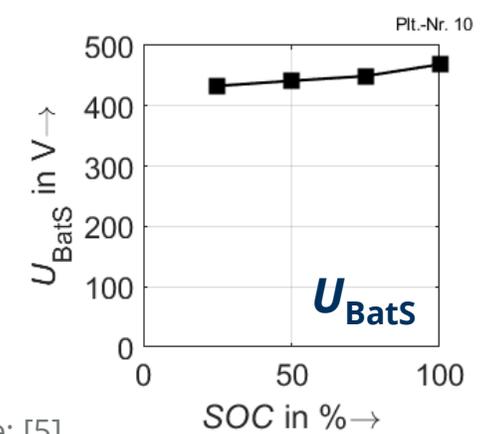
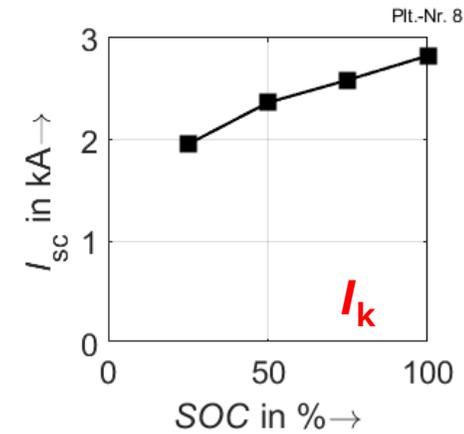
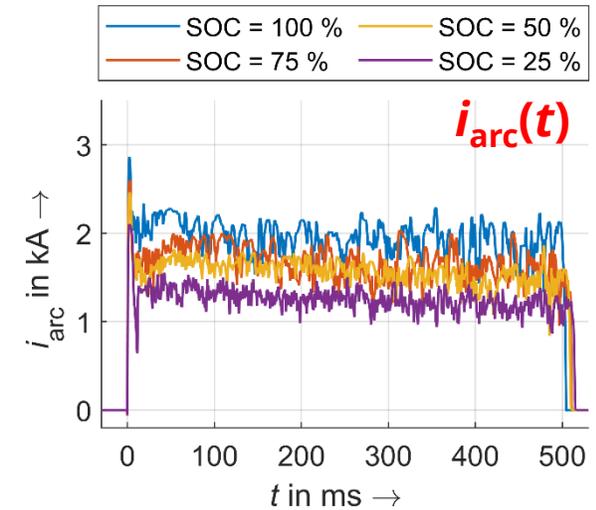
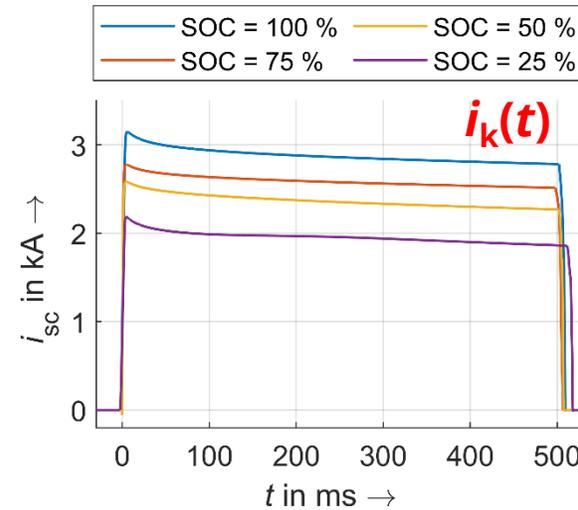
Quelle: [5]

Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Untersuchung von Störlichtbögen in Batteriesystemen: Messergebnisse 3/3

- Einfluss des Ladezustands (SOC) auf das Fehlverhalten in Batteriesystemen

Größe	Einfluss von SOC
U_{BatS}	Gering
$i_k(t), I_k$	Hoch
$i_{\text{arc}}(t)$	Hoch



- Bei der **Berechnung der Lichtbogengrößen** muss der **SOC** berücksichtigt werden

Quelle: [5]

Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Anforderungen an den Anlagenfunktionsschutz bei Störlichtbögen

Anlagenfunktionsschutz bei Störlichtbögen [1]

- Reduktion des Gefährdungspotentials
- Vermeidung unzulässiger Anlagenschäden
- Geringe Beeinflussung der Versorgung mit elektr. Energie

Anforderung an den Anlagenfunktionsschutz

- Begrenzung der Lichtbogenenergie (W_{LB}) im Störlichtbogenfall auf ein zulässiges Maß (W_{LBzul})
- Schutzsystem muss Lichtbogen hinreichend schnell erkennen und abschalten
- *Anforderung an Schutzsystem:* Erwartete Lichtbogenbrenndauer (t_{LB}) darf maximal zulässige Lichtbogenbrenndauer (t_{LBzul}) nicht überschreiten

$$W_{LB} < W_{LBzul}$$



$$t_{LB} < t_{LBzul}$$



Störlichtbogenexperiment im Hochleistungsversuchsfeld am NARC der TU Dresden

Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Störlichtbogenschutzes in Batteriesystemen: Bewertung der Schutzwirkung

Batteriesystemgrößen						Sicherungsgrößen			Lichtbogengrößen				Schutzgrößen	
Variante	U_{rBats} in V	t_d in h	SOC in %	I_{rBats} in A	I_k in kA	U_{nF} in V	I_{nF} in A	Type	I_{arc} in kA	k_B in %	P_{arc} in kW	k_P in %	t_{kLB} in ms	W_{LB} in kJ
A	460	1,0	25	125	2.0	700	160	NH2	1.2	63	170	21	20	28
			50	125	2.4		160		1.5	66	215	21	6	23
			100	125	2.8		160		1.9	67	266	21	<4	2
B		0,5	25	210	2.0		315		1.2	63	170	21	3000	510
			50	210	2.4		315		1.5	66	215	21	1250	269
			100	210	2.8		315		1.9	67	266	21	250	67

Quelle: [5]

- Anforderungen an den Anlagenfunktionsschutz nicht immer erfüllt

➤ **Der SOC hat Einfluss auf die Wirksamkeit des Anlagenschutzes**

$$W_{LB} < W_{LBzul} = 100 \text{ kJ}^1$$

¹From system function protection in AC [1]

Forschungsthemen am NARC: DC-Störlichtbögen

Störlichtbogenschutz in Batteriesystemen: Auslegungsverfahren

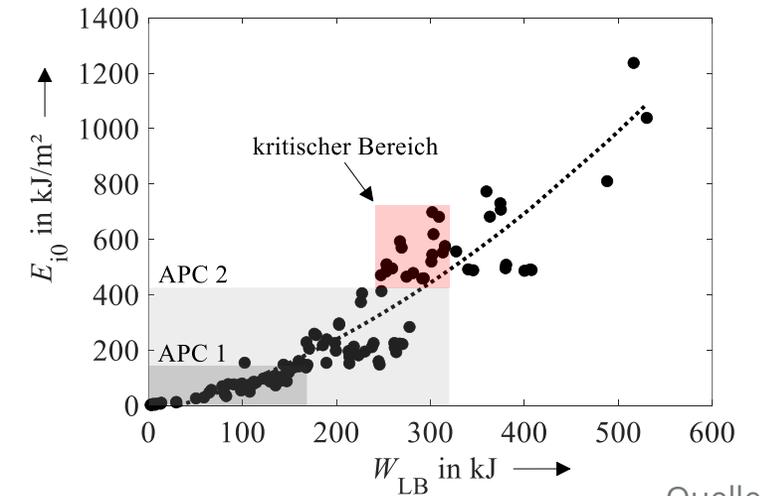
- In **Batteriesystemen** muss der **Ladezustand** bei der Bestimmung der Wirksamkeit des Anlagenfunktionsschutzes berücksichtigt werden
- Ein **mehrstufiges Auslegungsverfahren** kann zur Bestimmung der Wirksamkeit angewendet werden:
 - **Schritt 1:** Bestimmung der maximalen Anforderungen an Schutzsystem bei maximalem SOC ($\text{SOC}_{\max} = 100\%$)
 - **Schritt 2:** Bestimmung der Anforderungen an Schutzsystem bei minimalen SOC (e. g. $\text{SOC}_{\min} = 30\%$)

➤ Anforderung an den Anlagenfunktionsschutz in Batteriesystemen

$$t_{\text{kLB } 1}(\text{SOC}_{\max}) < t_{\text{kLBzul } 1}(\text{SOC}_{\max}) \quad \text{und} \quad t_{\text{kLB } 2}(\text{SOC}_{\min}) < t_{\text{kLBzul } 2}(\text{SOC}_{\min})$$

Zusammenfassung und Ausblick

- **Statisches Zweipolmodell** zur Bestimmung der DC-Störlichtbogenkenngrößen in Batteriesystemen gut einsetzbar
 - *breiter Anwendungsbereich des DC-Verfahrens bestätigt*
- **Berücksichtigung des SOC** von Batterien für Personen- und Anlagenschutz erforderlich
 - Integration in DGUV-I in Planung
- **Korrekturfaktor** für hohe Stromstärken k_I bei PSaGS-Auswahl entworfen
 - Spezifizierung und Validierung durch **weitere Untersuchungen** im DC-Bereich → Nachfolgeprojekt
 - Integration in DGUV-I in Planung
- **Korrekturfaktor** für kleine Elektrodenabstände k_d bei PSaGS-Auswahl entworfen
 - Spezifizierung und Validierung durch **weitere Untersuchungen** im DC-Bereich → Nachfolgeprojekt
 - **Vergleich für AC** notwendig
 - Integration in DGUV-I in Planung



Quelle: [6]

$$W_{LBS} = k_I \cdot k_d \cdot k_T \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}} \right)^2 \cdot W_{LBP}$$

$$k_I = \begin{cases} 0,7, & \text{wenn } I_k > 7 \text{ kA} \\ 1,0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 0,7, & \text{wenn } d < 30 \text{ mm} \\ 1,0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Quelle: [6]

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Quelle: [6]



Bild eines Störlichtbogenversuchs im Hochleistungsprüffeld „NARC“ des Projektpartners TU Dresden



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsthemen am NARC: Lichtbogenmodellierung

Weiterentwicklung von Lichtbogenmodellen

Versuchsanordnung

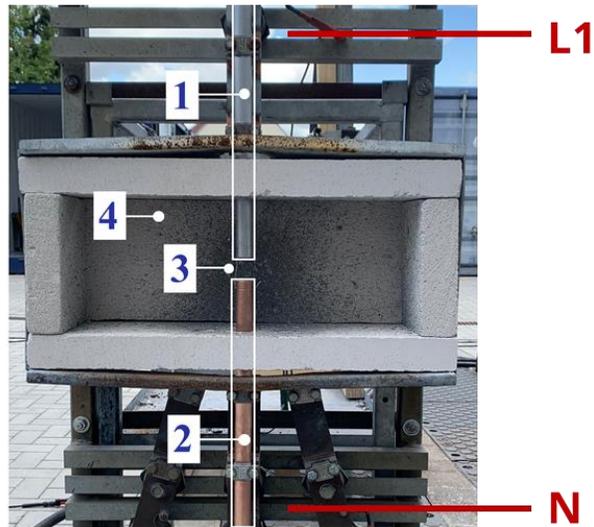


Bild 18: Halboffene Störlichtbogenexperimentieranordnung mit runden Elektroden [8]

1. Cu-Elektrode
2. Cu-Elektrode
3. Zünddraht und $d = 30\text{mm}$
4. Brennkammer mit Gasbetonsteinen

High-Speed-Videoaufnahme (© INP Greifswald e. V.)



➤ Weiterentwicklung von Lichtbogenmodellen durch Berücksichtigung der realen Lichtbogenlänge

Quellenverzeichnis

- [1] Schau, H.; Schäfer, H.: *Lichtbogenenergie - Ein Maß für die Personengefährdung und Zerstörung von Schaltanlagen*. 40. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau 1995, 18.-21. Sept. 1995, Ilmenau/Deutschland, Tagungsband 1, S. 283...288.
- [2] H. Schau, A. Halinka, und W. Winkler: *Elektrische Schutzeinrichtungen in Industrienetzen und -anlagen: Grundlagen und Anwendungen*. in de-Fachwissen. München and Heidelberg: Hüthig & Pflaum Verlag GmbH & Co, 2008.
- [3] K. Wenzlaff, D. Luhnau, P. Schegner, und M. Anheuser, „*Fast Numerical Algorithms for Arc Fault Detection*“, in 2021 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts (HLM), San Antonio, TX, USA: IEEE, Okt. 2021, S. 32–37. doi: 10.1109/hlm51431.2021.9671116.
- [4] M. Bruhns, J. Urbank, C. Liebermann, und P. Schegner, „*Berücksichtigung der Eigenschaften stromstarker Störlichtbögen bei der Schutzsystemauslegung von Niederspannungsanlagen*“, gehalten auf der 18. Symposium Energieinnovation, EnInnov 2024, Graz, Feb. 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tugraz.at/events/eninnov2024/nachlese/download-beitraege/stream-c#c590769>
- [5] M. Bruhns, P. Schegner: *Characteristics of High Current DC Arc Faults in LV Battery Systems and Conclusions for System Protection*, 14. ICOLIM International Conference On Live Maintenance, Oslo, Juni 2025.
- [6] S. Glaser, D. Westermann: *Research on Arc Fault Characteristics in Battery Systems and Conclusions for Personal Protection in LVDC Systems*, 14. ICOLIM International Conference On Live Maintenance, Oslo, Juni 2025.