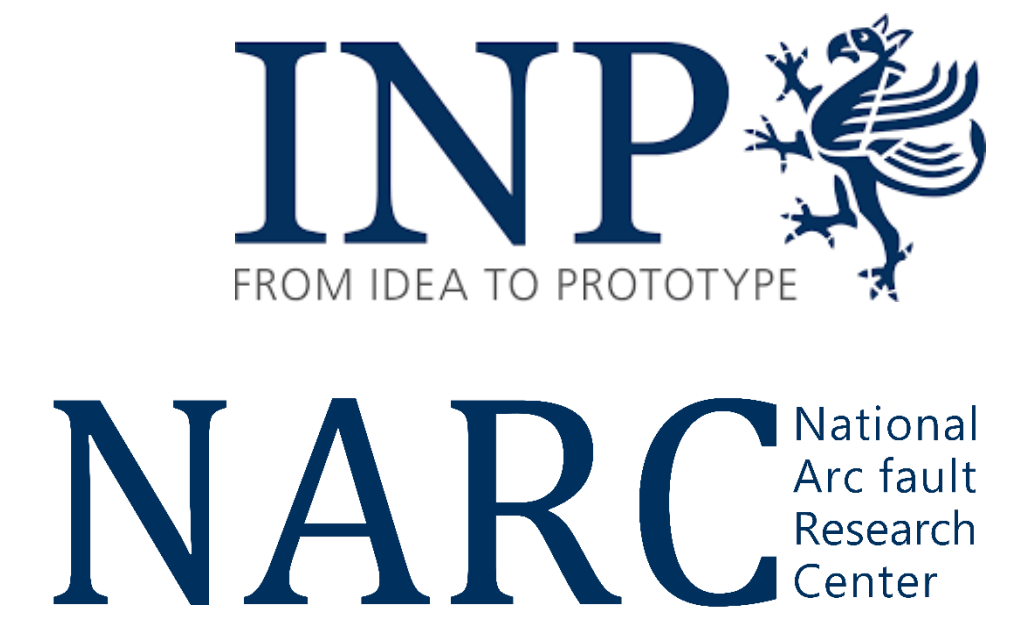


Einfluss der Spannungsform auf die Eigenschaften stromstarker Störlichtbögen in der Niederspannung

Michael Bruhns*, Ricardo Herrmann*, Peter Schegner**

Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) - TU Dresden
 * Professur für Energiesysteme ** Seniorprofessur für Elektroenergieversorgung



Motivation

- Extreme Gefährdung von Personen und Anlagen** durch stromstarke Störlichtbögen in der Niederspannung (NS)
 - 2024 traten fast 90 % der 596 meldepflichtigen Stromunfälle in NS-Anlagen auf [1]
 - Ca. 25 % meldepflichtiger Stromunfälle sind Störlichtbogenunfälle [2]
- Besondere Anforderungen an den Störlichtbogenschutz in DC-Systemen**
 - Fehlerklärung problematisch wegen des fehlenden Stromnulldurchgangs
 - Anzahl von DC-Anlagen in der NS steigt aufgrund von fortschreitender Elektrifizierung (Elektromobilität, PV, Batteriespeicher, Elektrolyse, DC-Industrie) [3]
- Bewertung der Anwendbarkeit von bekannten (AC-)Berechnungsverfahren für Kenngrößen und Gefährdungsparameter von Störlichtbögen** in DC-Systemen notwendig
 - Untersuchung des Einflusses der Spannungsform auf die Eigenschaften von stromstarken NS-Störlichtbögen wird benötigt

Eigenschaften stromstarker NS-Störlichtbögen

- Brennverhalten:** Beeinflussung von Lichtbogenspannung und -strom sowie optisches Verhalten während der Ausbildung eines stabilen Plasmakanals relevant für die Entwicklung von Detektionssystemen
- Nach [4] benötigt man für die Auswahl und Auslegung von Störlichtbogenschutzsystemen **direkte und bezogene elektrische Kenngrößen von Störlichtbögen (LB)**

Direkte LB-Kenngrößen		Bezogene LB-Kenngrößen	
– LB-Spannung	U_{LB}	– Bezogene LB-Spannung	$k_u = U_{LB}/U_n$
– LB-Strom	I_{LB}	– Strombegrenzungsfaktor	$k_B = I_{LB}/I'_k$ bzw. I_{LB}/I_k
– LB-Leistung	P_{LB}	– Bezogene LB-Leistung	$k_p = P_{LB}/S'_k$ bzw. P_{LB}/P_k

Nennspannung U_n , Subtransienter Kurzschlussstrom I'_k , Subtransiente Kurzschlussleistung S'_k

- Im Störlichtbogen umgesetzte Energie W_{LB} ist wichtiges Maß für die Gefährdung bei Störlichtbögen
- Gefährdungsparameter** für die Charakterisierung der **thermischen Auswirkungen** (Gefährdung) bei Störlichtbögen sind u. a.:

LB-Größen zur Charakterisierung der thermischen Auswirkungen (Gefährdung)	
Anlagengefährdung	Personengefährdung
– Druckmaximum $p_{ü\ max}$	– Maximaler Temperaturanstieg ΔT_{max}
– Druckanstieg $\frac{dp}{dt}$	– Direkte thermische Einwirkenergie E_{10}
– Zeit bis zum Druckmaximum $t_{p\ ü\ max}$	– Quotient E_{10}/W_{LB}
	– Definition der Größen nach DIN VDE 0682-306-1-2

Experimentelle Untersuchungen

- Versuchsanordnungen und -einstellungen für LB-Experimente im Hochstrom-Versuchsfeld am National Arc Fault Research Center (NARC) der TU Dresden (s. Bild 1 u. Tab. 1)

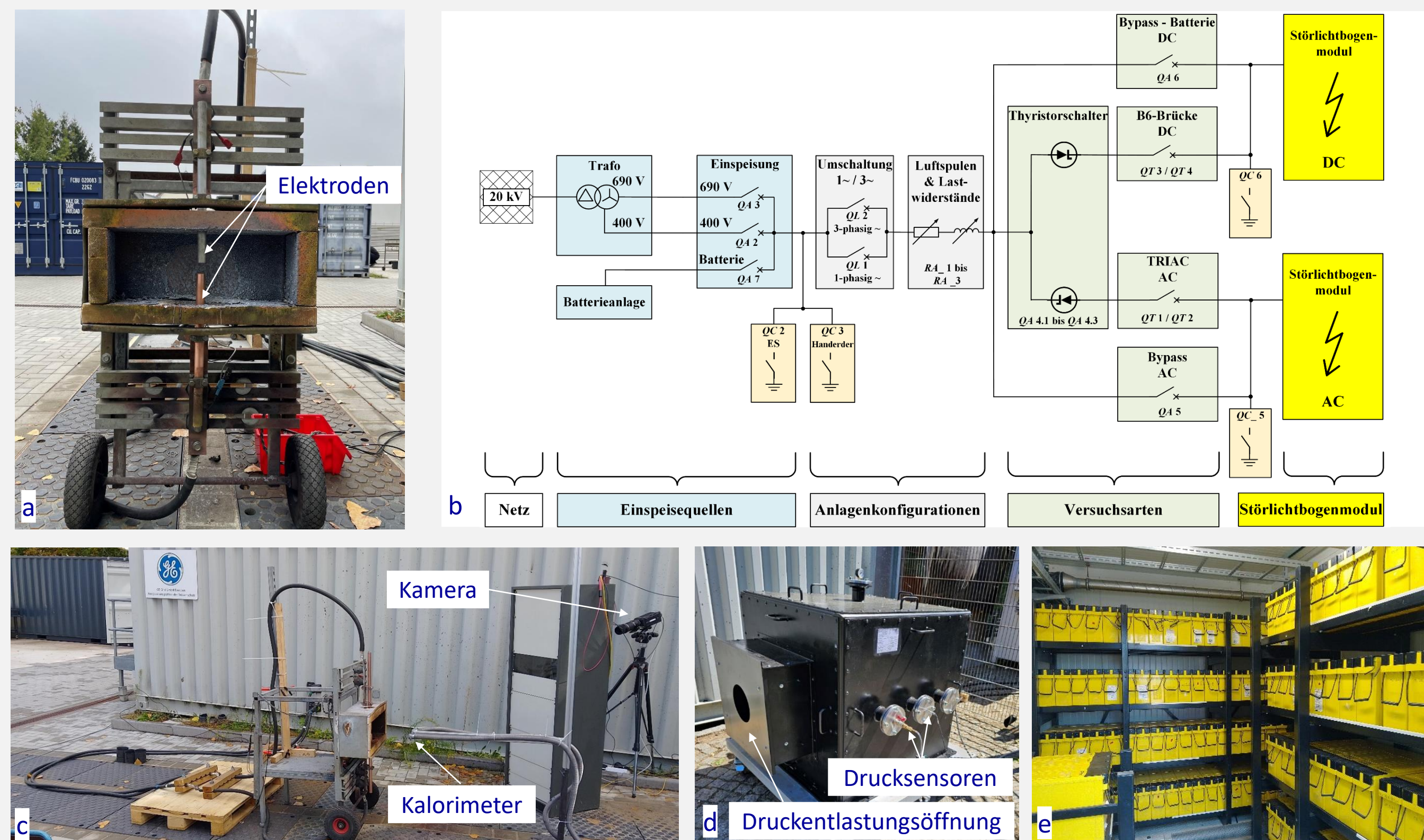


Bild 1: Offene Versuchsanordnung mit runden Elektroden (a), schematischer elektrischer Aufbau des Hochstrom-Versuchsfeldes (b), Versuchsaufbau mit offener Versuchsanordnung (c), geschlossene Versuchsanordnung mit Sammelschienen (d) und Batteriesystem (e) am NARC der TU Dresden

Tabelle 1: Versuchsplan mit Versuchseinstellungen und Versuchsanordnungen

Messreihe	Spannungsform	Nennspannung U_n / V	Kurzschlussstrom I_k / kA	Elektrodenabstand d_E / mm	Druckentlastungsöffnung F_{E0} / cm ²	Versuchsanordnung
1	AC	400	5	10; 30; 50	-	Offen, runde Cu-Elektroden: senkrecht gegenüberstehend, s. Bild 1a
2	DC	460	5	10; 50	-	
3	AC	400; 690	5 ... 7	70	100; 225	Geschlossen, mit Druckentlastungsöffnung, Cu-Sammelschienen: aufrecht, übereinander, Volumen $V = 1$ l, s. Bild 1d
4	DC	460; 690	6 ... 8	70	100; 225	

Einfluss der Spannungsform

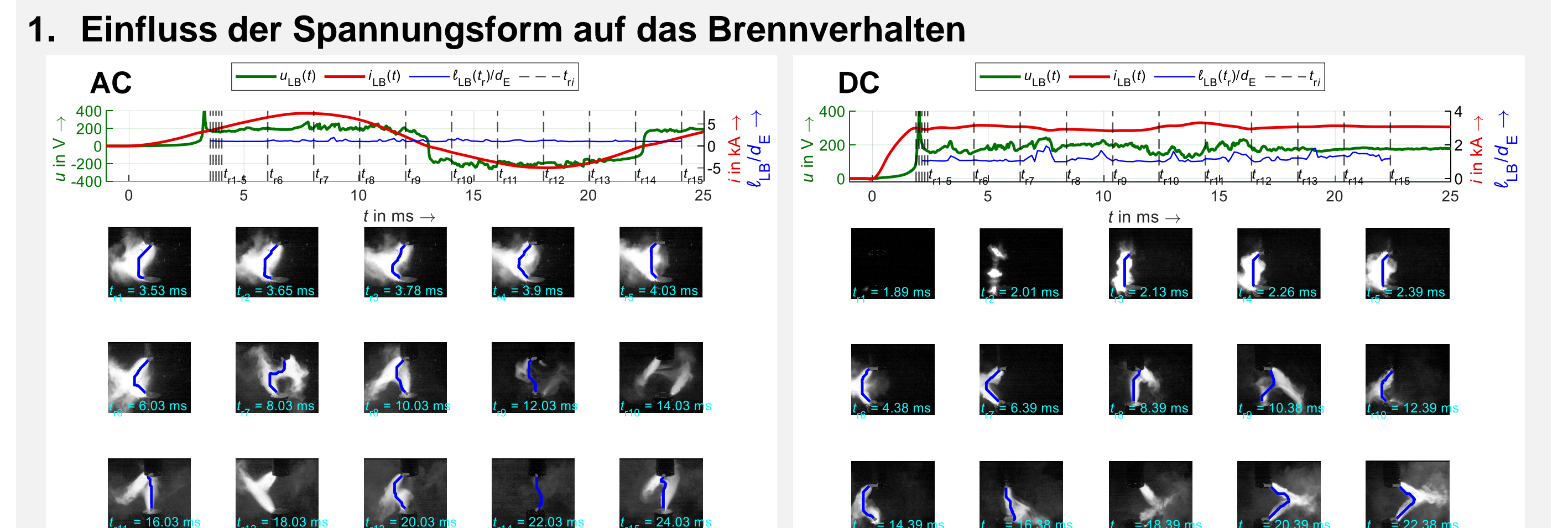


Bild 2: Zeitverlauf von LB-Spannung u_{LB} , LB-Strom I_{LB} und realer LB-Länge l_{LB} und optische Highspeed-Aufnahmen von Lichtbogen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten t_i für 25 ms nach Fehlereintritt (bei $t = 0$ ms)

- Vergleich des elektrischen und optischen Verhaltens von AC- und DC-Störlichtbögen in offener Elektrodenanordnung (s. Bild 2)
- Vollständig ausgebildeter Plasmakanal (heller Bereich auf Highspeed-Aufnahmen) wenige Millisekunden nach der Zündung
- Austritt eines Plasmastrahls je Elektrode → starke räumliche Änderung der Plasmastrahlen und des Plasmakanals aufgrund elektromagnetischer Kräfte
- Reale Lichtbogenlänge l_{LB} variiert stark → entspricht nicht dem Elektrodenabstand
- Bei AC: stromabhängige Intensität des Lichtbogens im Bereich des Stromnulldurchgangs bis hin zum Verlöschen deutlich erkennbar (bspw. Bild 2, AC, $t_i = 22.03$ ms)

2. Einfluss der Spannungsform auf die elektrischen LB-Kenngrößen

- Geringer Einfluss der Spannungsform auf Abhängigkeit der direkten und bezogenen LB-Kenngrößen vom Elektrodenabstand d_E (s. Bild 3)
- Nahezu kein Einfluss der Spannungsform auf direkte und bezogene LB-Spannung (U_{LB} , k_u)
- LB-Strom I_{LB} und LB-Leistung P_{LB} bei DC geringer, Differenz nimmt mit größerem Elektrodenabstand d_E zu, Ursachen:
 - Bei DC: Geringerer Kurzschlussstrom I_k , zusätzlich führt Entladung der Batterien zu Abnahme des LB-Stroms I_{LB}
 - Bei AC: Einfluss der Netzzeitkonstante τ → Phasendifferenz zwischen u_n und i_k führt zu höherem LB-Strom I_{LB}

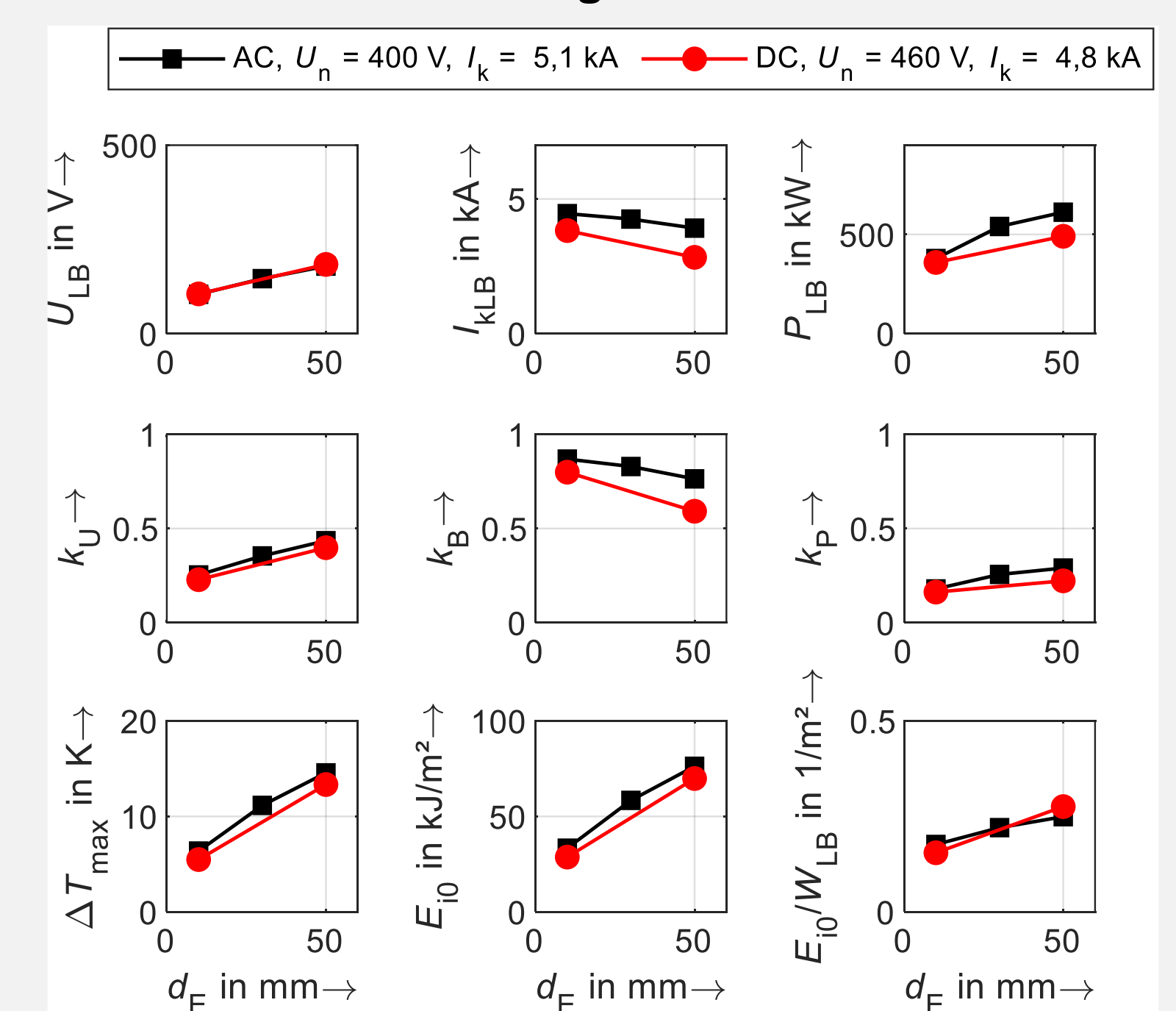


Bild 3: Abhängigkeit der direkten und bezogenen elektrischen LB-Kenngrößen sowie thermische Größen (ΔT_{max} , E_{10} , E_{10}/W_{arc}) vom Elektrodenabstand d_E in offener Elektrodenanordnung

3. Einfluss der Spannungsform auf die thermischen Auswirkungen

- Geringer Einfluss auf Temperaturanstieg ΔT_{max} und direkte Einwirkenergie E_{10} (s. Bild 3 unten)
- Deutlicher Einfluss der Spannungsform auf Druckentwicklung (s. Bild 4)

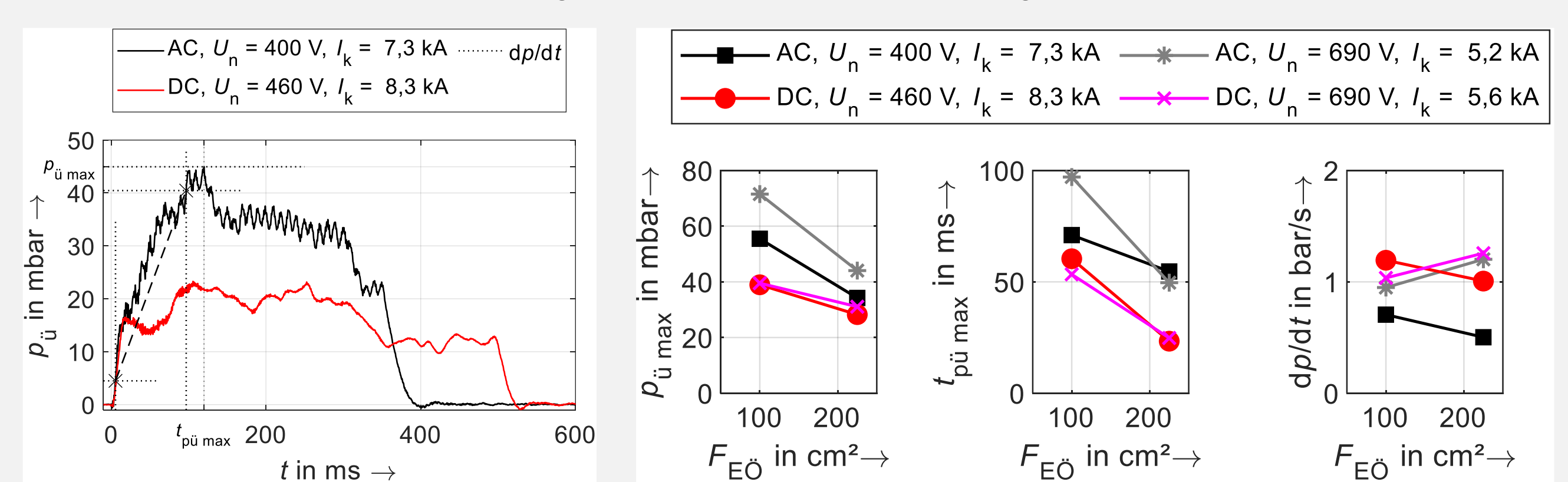


Bild 4: Zeitverlauf des Überdrucks p_u in geschlossener Versuchsanordnung bei AC- und DC-Störlichtbogen (links) und Einfluss der Systemgrößen inkl. Spannungsform auf Kenngrößen der Druckentwicklung (rechts)

Fazit

- Bisherige Untersuchungen weisen auf geringen Einfluss der Spannungsform auf die untersuchten elektrischen Eigenschaften von stromstarken NS-Störlichtbögen hin
- Bei den thermischen Eigenschaften zeigen sich Unterschiede vor allem beim Druckaufbau
- Für genauere Ergebnisse werden weitere Messdaten benötigt

Literatur

[1] BG ETEM, Statistik der Stromunfälle. Techn. Ber. Aug. 2025.
 [2] G. Waschbüsch, Störlichtbögen in Schaltanlagen. Jan. 2016.
 [3] VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e. V. (Hrsg.), Gleichstrom im Niederspannungsbereich. Deutsche Normungs-Roadmap, Version 2, August 2018.
 [4] M. Bruhns u. a., Berücksichtigung der Eigenschaften stromstarker Störlichtbögen bei der Schutzsystemauslegung von Niederspannungsanlagen. In: Symposium Energieinnovation. Feb. 2024.