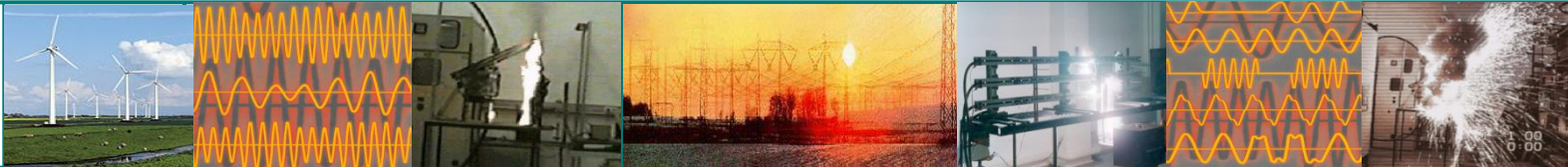


# Ergebnisse von Untersuchungen an DC-Störlichtbögen und Schlussfolgerungen für die Auswahl von PSAgS

**Holger Schau**

*Technische Universität Ilmenau*

*GERMANY*



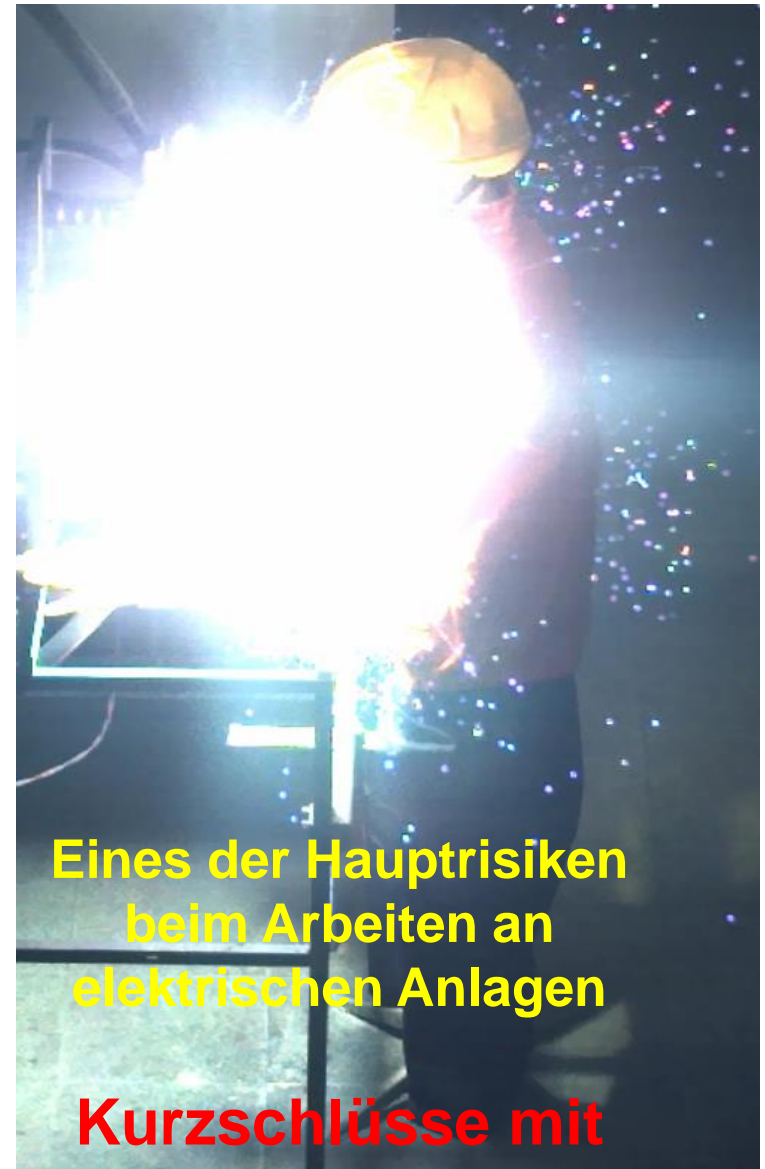
**19. Vortragsveranstaltung  
ELEKTROTECHNIK**

**12. und 13. Juni 2018 in Kassel**



# Überblick

- Laboruntersuchungen an NS-DC-Lichtbögen
- Elektrische und thermische Kennwerte von DC-Störlichtbögen
- Erwartungswerte der Lichtbogenenergie
- Schutzpegel der PSAgs im DC-System
- Fazit und Ausblick



Eines der Hauptrisiken  
beim Arbeiten an  
elektrischen Anlagen

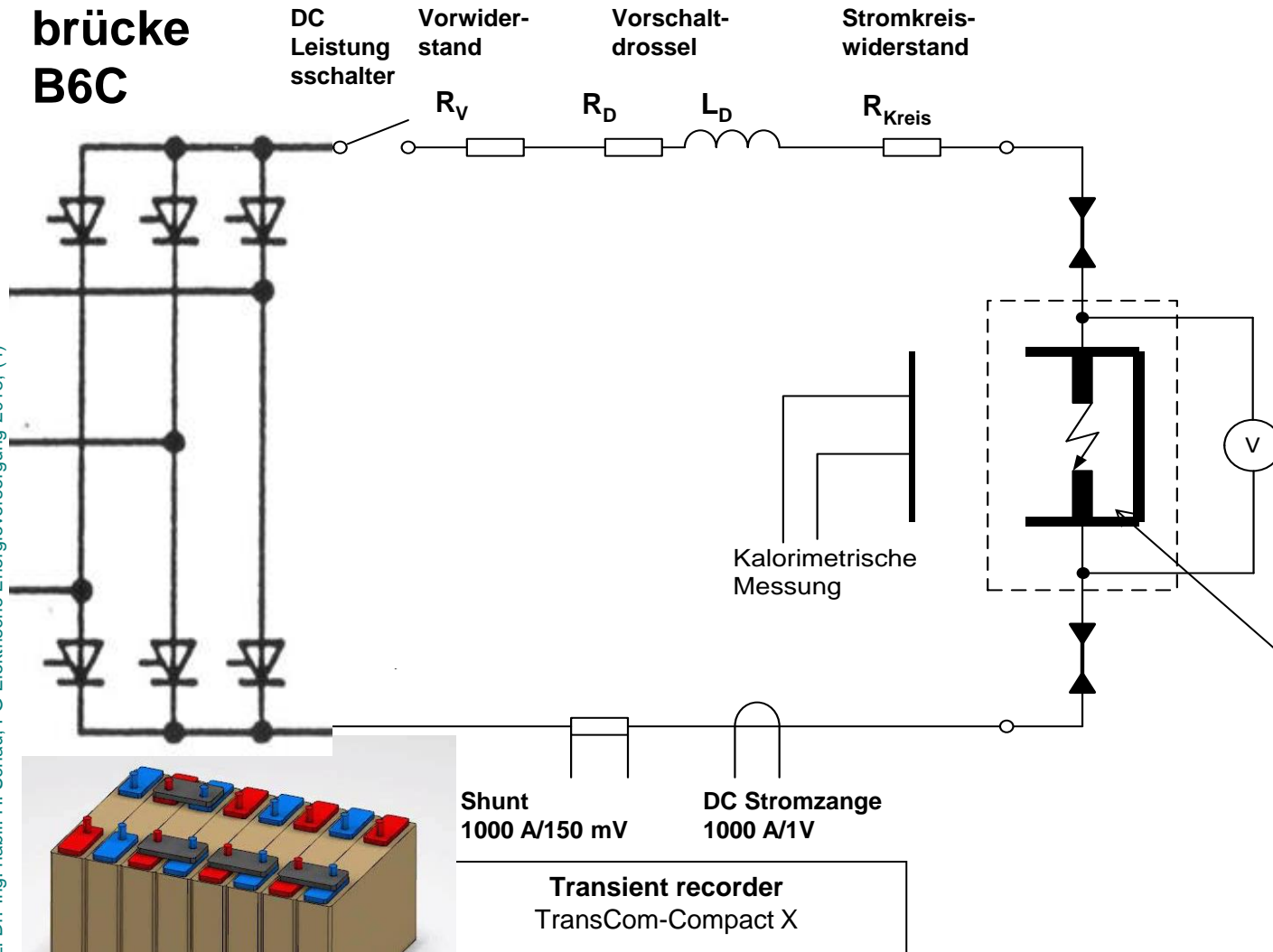
Kurzschlüsse mit  
**Störlichtbögen**

# Gleichstromkurzschlüsse mit Störlichtbögen

- Verbreitung von DC-Anlagen im NS-Bereich nimmt zu
- Begründete Auswahl von PSAgS notwendig für Personenschutz vor **energiereichen Störlichtbögen bei Kurzschlüssen NS-Bereich**
- Kenntnisstand/Literatur zu DC-Störlichtbögen begrenzt
- Bericht über erste Messungen vor 2 Jahren
- Untersuchungen wurden systematisch fortgesetzt
- Hochstromlabor: neben **messtechnischen Untersuchungen** in DC-Systemen mit Speisung durch
  - Batterien (Lithium-Ionen-Hochvolt-Batterien) und
  - DC-Generator (Induktionsgenerator)
- Messungen im Gleichrichterkreis (Sechspuls-Gleichrichter)
- **Spannungsbereich von 100...750 V (Schwerpunkt 400 V), Strombereich von 1...15 kA, Zeitkonstante 3...12 ms**

# DC-Prüf- und Messkreis

## Gleichrichter- brücke B6C

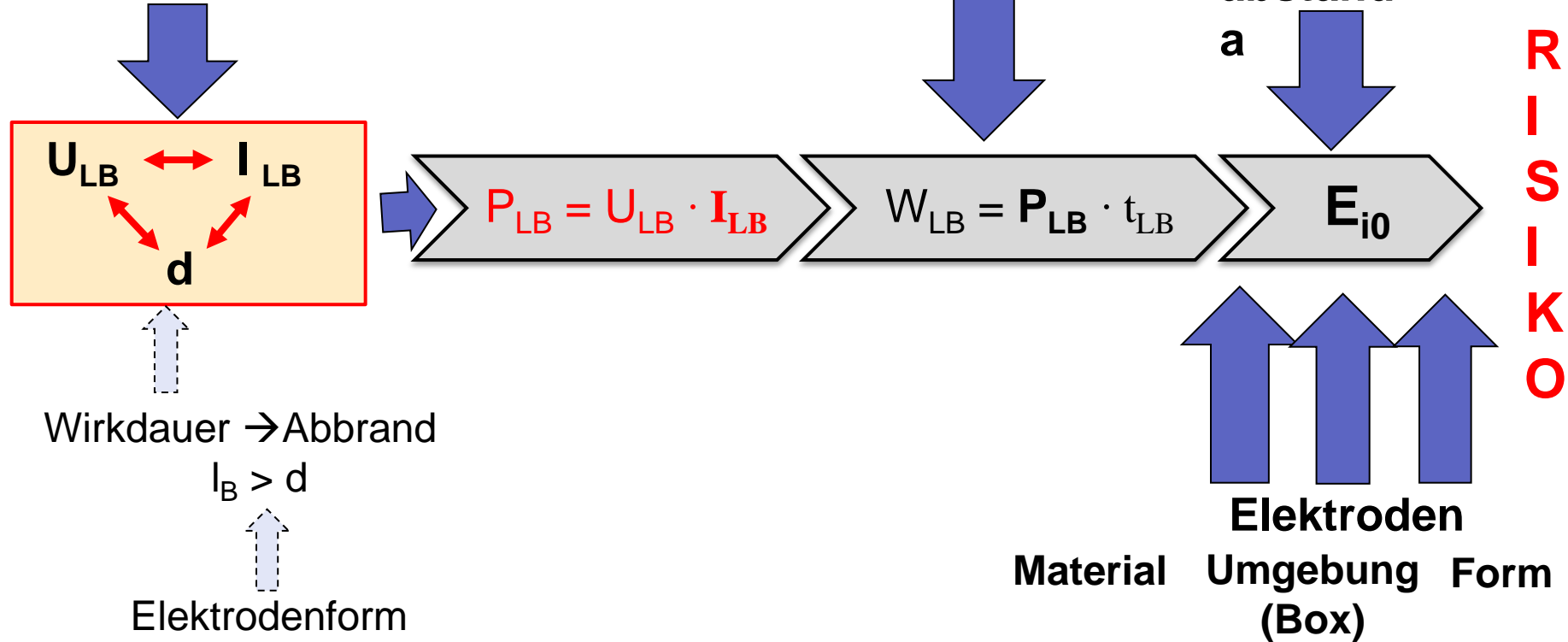


Elektroden-  
anordnung mit  
Box gemäß IEC  
61482-1-2

Hochvolt-Lithium-Ionen-Batterie

# Einflussgrößen auf DC-Störlichtbögen

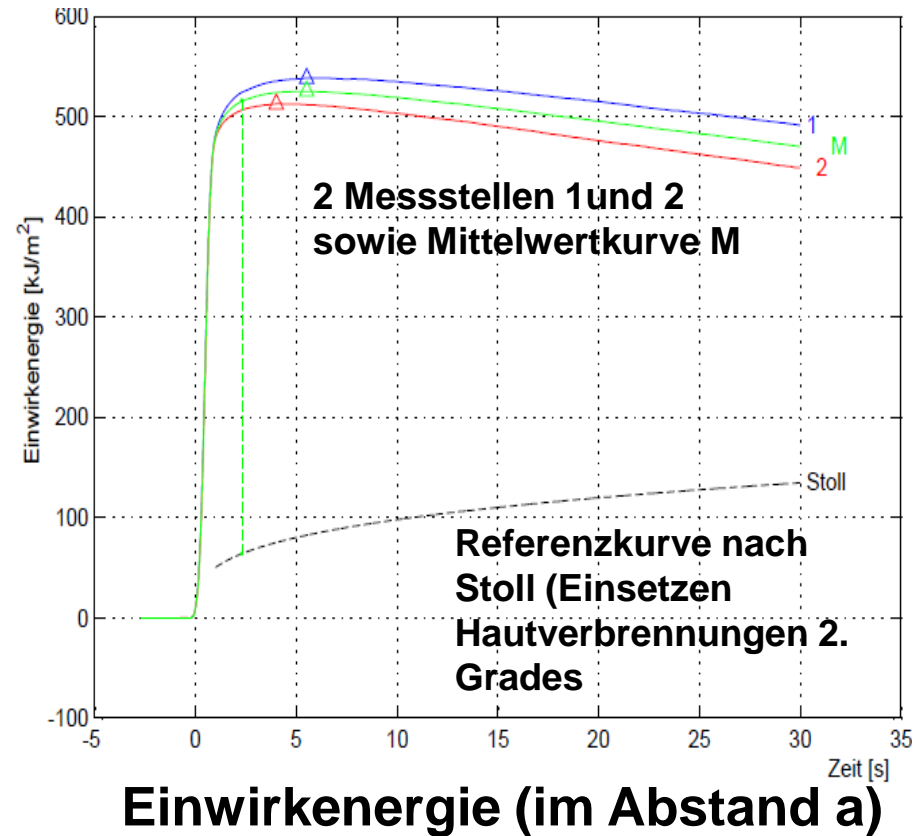
Leerlaufspannung  
Kurzschlussstrom  
Zeitkonstante  $T = L/R$



**Vielzahl und Vielfalt von Einflussgrößen auf elektrische und thermische Kennwerte**

# Thermische Wirkung von DC-Störlichtbögen

- Personenschutz: Begrenzung der Einwirkenergie (thermische Energiedichte auf exponierter Oberfläche) durch PSaGS
- Analogie zu AC-Störlichtbögen: Gleiche Wärmeübertragungsmechanismen, analoge Erwärmungscharakteristik
- Pegelunterschiede bei Lichtbogen- und Einwirkenergie
- Bestimmung der Energiekennwerte



# Überprüfung Literaturangaben

## ■ Aus Literatur bekannt

### ■ Oppenlander/Stokes

$$U_{LB} = (20 + 0,534 \cdot d) \cdot I_{LB}^{0,12}$$

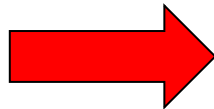
#### Abweichung Rechenwert-Messwert

mittlere	maximale
27,3%	45,0%

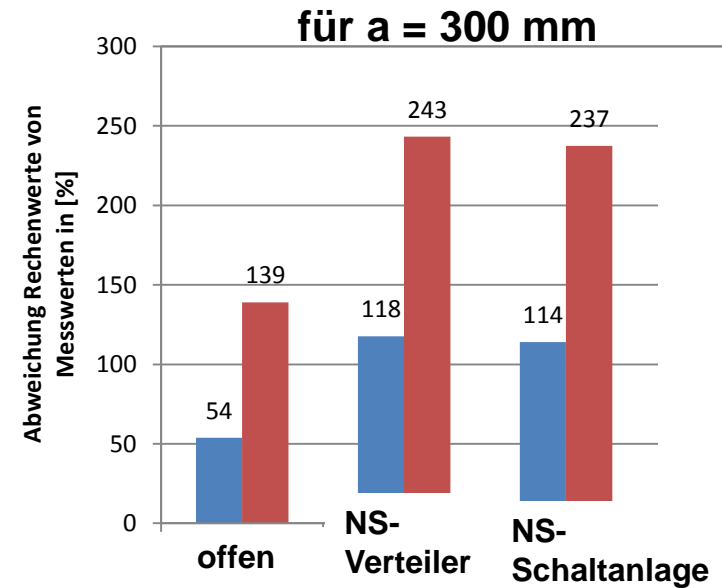
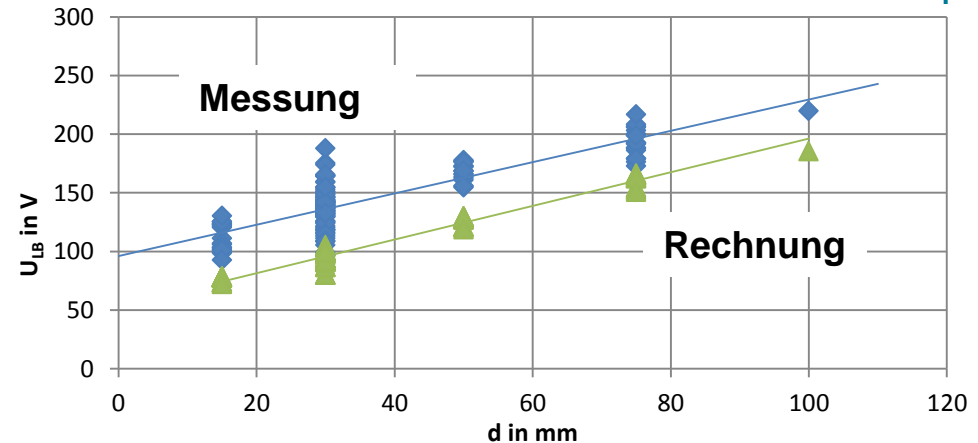
### ■ Wilkins

$$E_{i0(offener LB)} = \frac{W_{LB}}{4\pi \cdot a^2}$$

$$E_{i0(Box)} = k_1 \frac{W_{LB}}{k_2^2 + a^2}$$



**Keine  
ausreichende  
Approximation**





# Auswertung der Messergebnisse

Zielsetzungen im Hinblick auf  
Gefährdungsbeurteilung  
(Erweiterung DGUV-I 203-077 auf  
DC-Systeme)

## ■ Bestimmung

- Approximationsgleichungen für  $W_{LB}$   
um Erwartungswerte der  $W_{LB}$  im DC-  
Netz (DC-Anlage) aus  
Anlagenparametern ermitteln zu  
können
- Zusammenhang  $E_{i0} / W_{LB}$  bei DC-  
Lichtbogen-Exposition  
um Aussagen zu Schutzpegeln  $W_{LB S}$   
von PSAgS beim DC-Einsatz zu  
ziehen



## Berechnungsalgorithmus

- für AC-Systeme entwickelt
- Ergänzung für DC-Systeme



# Bestimmung der Erwartungswerte der Lichtbogenenergie

$$W_{LB} = U_{LB} \cdot I_{LB} \cdot t_{LB} = k_U \cdot k_B \cdot P_k \cdot t_k$$

$$k_U = \frac{U_{LB}}{U_{NLL}} \quad k_B = \frac{I_{LB}}{I_k}$$

$$P_k = U_{NLL} \cdot I_k$$

- Beschreibung der U-I-Charakteristik  $U_{LB} = (A + B \cdot d) \cdot I_{LB}^x$   
Anpassung der Koeffizienten A, B, x,  
iterative Bestimmung von U, I, P

- Ableitung von multiplen Regressionsgleichungen

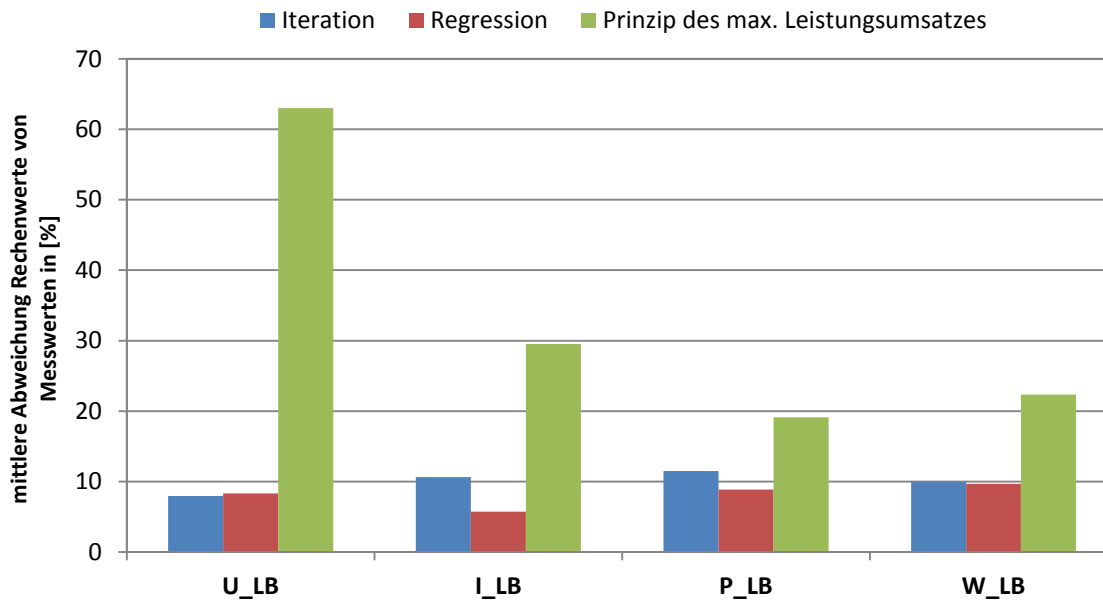
$$U_{LB} \text{ bzw. } k_U = f(I_k, d, t_k, U_{NLL}) \quad I_{LB} \text{ bzw. } k_B = f(I_k, d, t_k, U_{NLL})$$

aus Messdaten

- „Maximum Power“-Methode

$$W_{LB} = P_{LB \max} \cdot t_k = 0,25 \cdot U_{NLL} \cdot I_k \cdot t_k = 0,25 \cdot P_k \cdot t_k$$

# Bestimmung Lichtbogenenergie - Vergleich



Vergleich zu Messwerten	Größe	Iteration	Regression	„Maximum Power“ Prinzip
mittlere Abweichung [%]	$U_{LB}$	7,92	8,32	63,01
	$I_{LB}$	10,61	5,72	29,52
	$P_{LB}$	11,46	8,84	19,13
	$W_{LB}$	9,95	9,65	22,33
maximale Abweichung [%]	$U_{LB}$	26,75	34,18	304,13
	$I_{LB}$	42,43	29,47	44,76
	$P_{LB}$	25,67	30,56	124,59
	$W_{LB}$	26,57	40,82	132,73

- Iteration und Regression: relativ gute Näherung, mit vergleichbarer Genauigk.
- „Max.-Power“-Methode deutliche Abweichungen
- Approximationsfunktionen (Koeffizienten) hängen von Messdatenlage ab (besonders Regressionen)
- Messreihen: keine homogene Par.-verteilung, punktuelle Schwerpunkte
- Regressionsgleichungen: rein empirische Anpassg., keine physik. Abhängigk.
- Weitere systematische Variation der Eingangspar. in einem erweiterten Wertebereich zur Verifizierung der Allgemeingültigkeit notwendig

# Bestimmung des Schutzpegels der PSAgS

- Frage untersucht: PSAgS im Standard-Boxtest nach EN 61482-1-2 geprüft, welcher Schutzpegel im DC-System?

- Prüfpegel unter Standardprüfbedingungen:

400 V, Elektroden Al-Cu plan, vertikal in Box, d = 30 mm, a = 300 mm, 4 kA (APC 1) bzw. 7 kA (APC 2), 500 ms

APC	AC-Prüfkreis			DC-Prüfkreis		
	$W_{LB}$ [kJ]	$E_{i0}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$E_{i0}/W_{LB}$ [1/m <sup>2</sup> ]	$W_{LB}$ [kJ]	$E_{i0}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$E_{i0}/W_{LB}$ [1/m <sup>2</sup> ]
1	168	146	0,87	175	146	0,83
2	320	427	1,33	264	360	1,36

- Schutzpegel hängt generell vom Verhältnis  $E_{i0}/W_{LB}$  ab
- Verhältnis für AC und DC fast identisch, d.h.

unter Standardexpositionsbedingungen

$$W_{LB \text{ S DC}} \approx W_{LB \text{ P AC}}$$

# Schutzpegel der PSAgS

- DGUV-I 203-077: AC-System bei beliebigem Wirkabstand

$$W_{LB\ S} = W_{LB\ P} \cdot \left( \frac{a}{300\ mm} \right)^2 \cdot k_T$$

- Abstandsabhängigkeit:  
analog AC:  $1/a^2$

$$E_{i0\ S} = E_{i0\ P} \cdot \left( \frac{a}{300\ mm} \right)^2$$

- wegen  $(E_{i0\ P}/W_{LB\ P})_{DC} = (E_{i0\ P}/W_{LB\ P})_{AC}$

$$W_{LB\ S\ DC} = W_{LB\ P\ AC} \cdot \left( \frac{a}{300\ mm} \right)^2 \cdot k_T$$

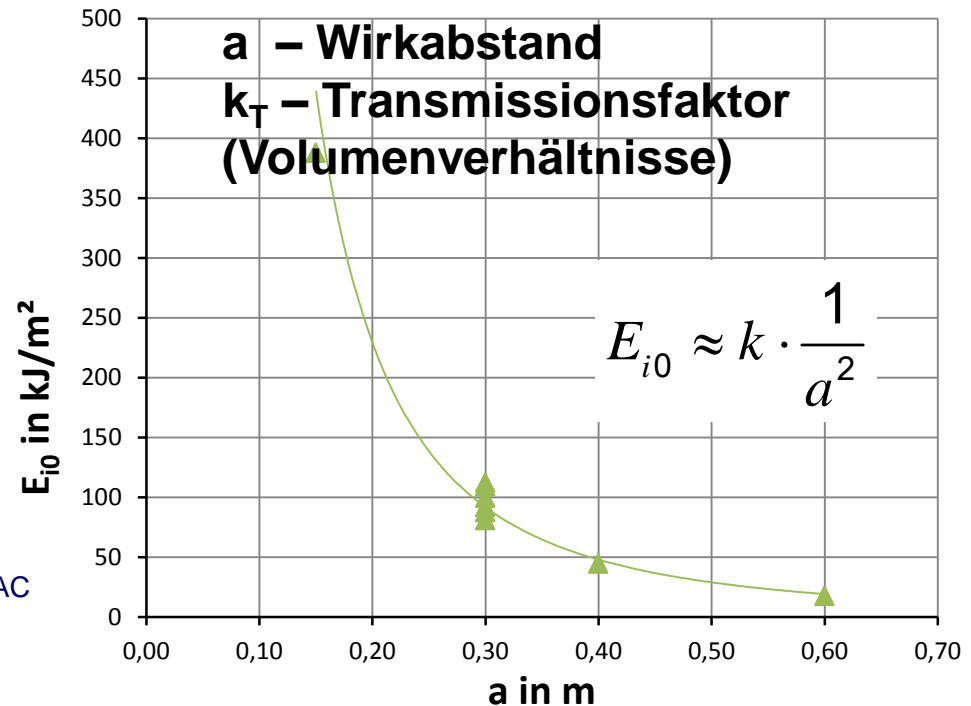
- APC 1

$$W_{LB\ S\ DC} = 168\ kJ \cdot \left( \frac{a}{300\ mm} \right)^2 \cdot k_T$$

- APC 2

$$W_{LB\ S\ DC} = 320\ kJ \cdot \left( \frac{a}{300\ mm} \right)^2 \cdot k_T$$

- $k_T$  – Einfluss muss noch untersucht werden



# Fazit und Ausblick

- Ergebnisse werden in DGUV-I 203-077 einfließen
- Fortsetzung der Untersuchungen vorgesehen
- Wertebereiche erweitern (auch auf Extremwerte), Approximationsgleichungen weiter verifizieren
- Existenzbedingungen/Risikogrenzen bestimmen/berücksichtigen
- Transmissionsfaktoren (in Analogie zum Auswahlverfahren im AC-Bereich) ermitteln
- Berücksichtigung Elektrodenform, Elektrodenmaterial im Auswahlverfahren für PSaGS prüfen
- Zielsetzung: fundierte Anwenderhilfe für die Auswahl von PSaGS im DC-Bereich

# Anerkennung

Der Beitrag entstand auf der Grundlage von Untersuchungen, die mit Unterstützung und in enger Zusammenarbeit mit den Partnern

- **BG ETEM**

(Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro  
Medienerzeugnisse)



- **NH/HH-Recycling e.V.**

(Verein zur Förderung des umweltgerechten Recycling von abgeschalteten  
NH/HH-Sicherungseinsätzen e.V.)



durchgeführt wurden. Der Autor möchte sich dafür bedanken.  
Dank gilt auch dem **VDE/DKE (UK 214.3)**