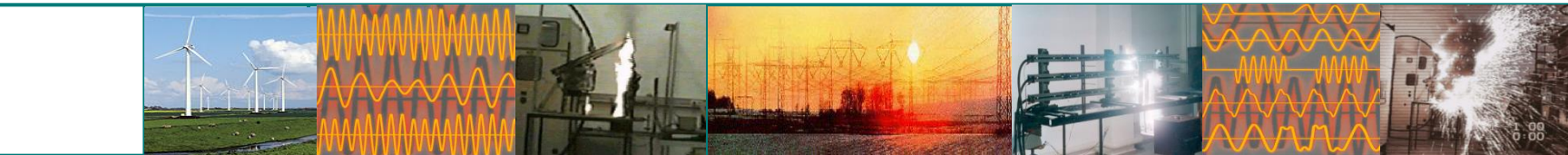


# Störlichtbögen in AC- und DC-Systemen – Ergebnisse aktueller Forschungsarbeiten

**Holger Schau**

*Technische Universität Ilmenau*

*GERMANY*



**18. Vortragsveranstaltung  
ELEKTROTECHNIK**

**07. und 08. Juni 2016 in Kassel**



# Überblick

- **Aktuelle Forschungsprojekte**
- Laboruntersuchungen an DC-Lichtbögen
- Verhalten und Stabilität von DC-Lichtbögen
- DC-Lichtbogen-Modell und –Parameter
- Leistungs- und Energieumsatz
- Vergleich zum AC-Lichtbogen



Eines der Hauptrisiken beim  
Arbeiten an elektrischen Anlagen

Kurzschlüsse mit  
**Störlichtbögen**  TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
ILMENAU

# Aktuelle Forschungsthemen und -projekte

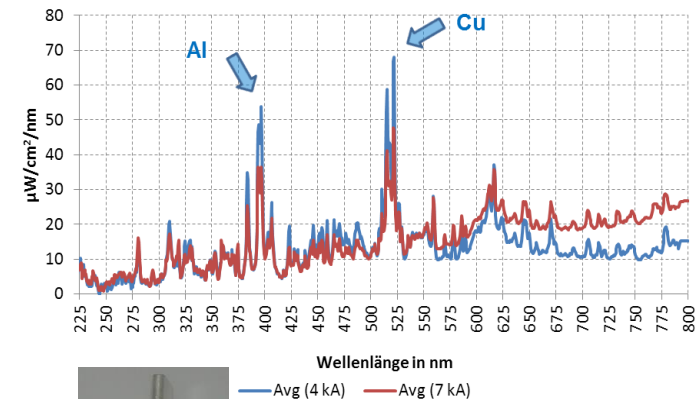
Zum Lichtbogenschutz:

Untersuchungen zu

- Lichtbogenausbildung und energetischen Kenngrößen von Störlichtbögen in Drehstromsystemen (unterschiedliche Anlagenkonfigurationen)
- Emission optischer Strahlung durch Störlichtbögen (Strahlungsspektren, -leistungen, Gefährdungskennwerte)
- Koordination von Persönlichen Schutzausrüstungen mit Überstrom-Schutzeinrichtungen (Schmelzsicherungen) im Niederspannungsbereich
- Vergleich von Störlichtbögen in AC- und DC-Systemen



Mittelwerte (Prüfklassen 1 und 2, Entfernung 2,7 m)

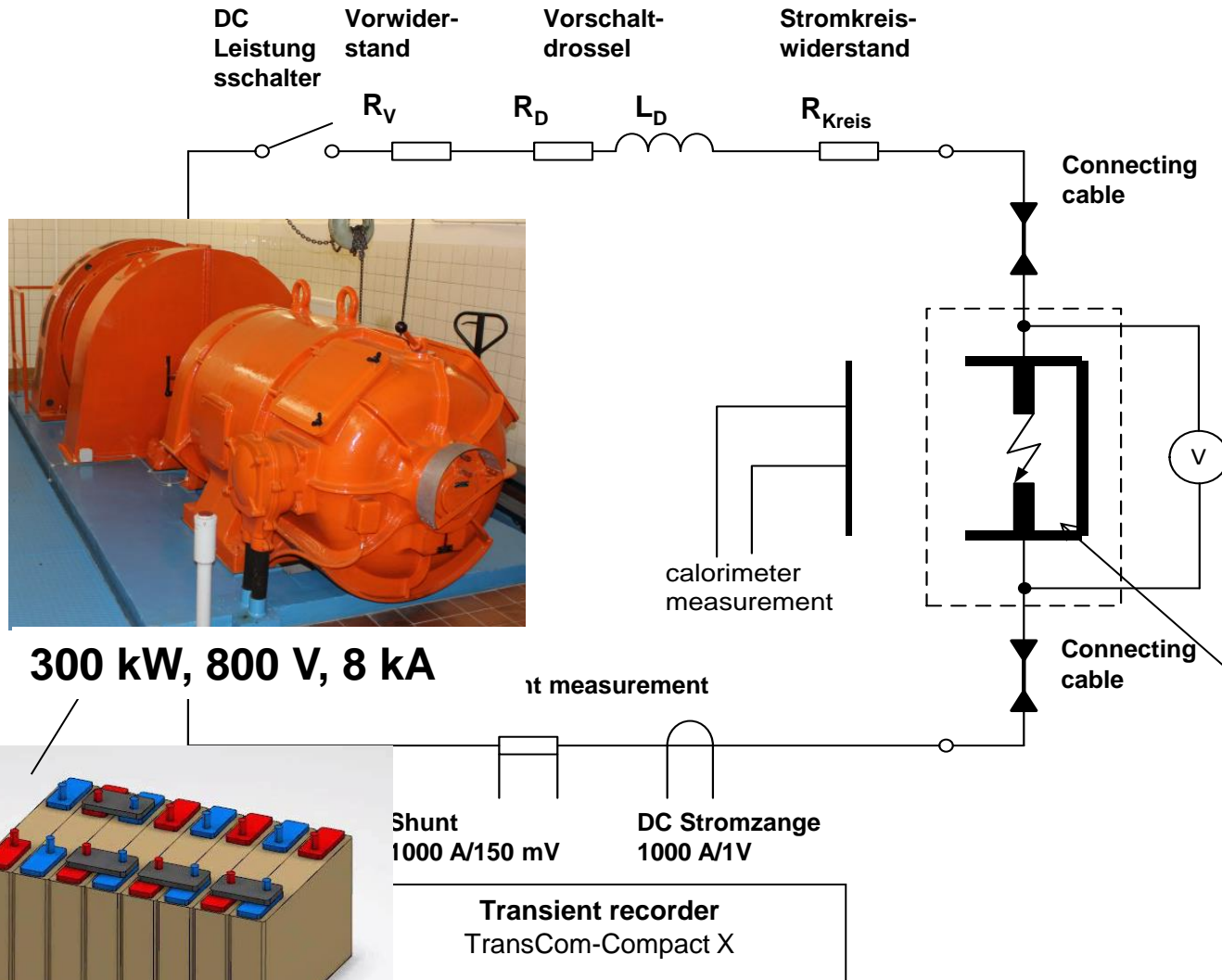


**Ableiten wirksamer Maßnahmen zum Schutz von Personen beim Arbeiten an elektrischen Anlagen in Stromversorgungsnetzen**

# Gleichstromkurzschlüsse mit Störlichtbögen

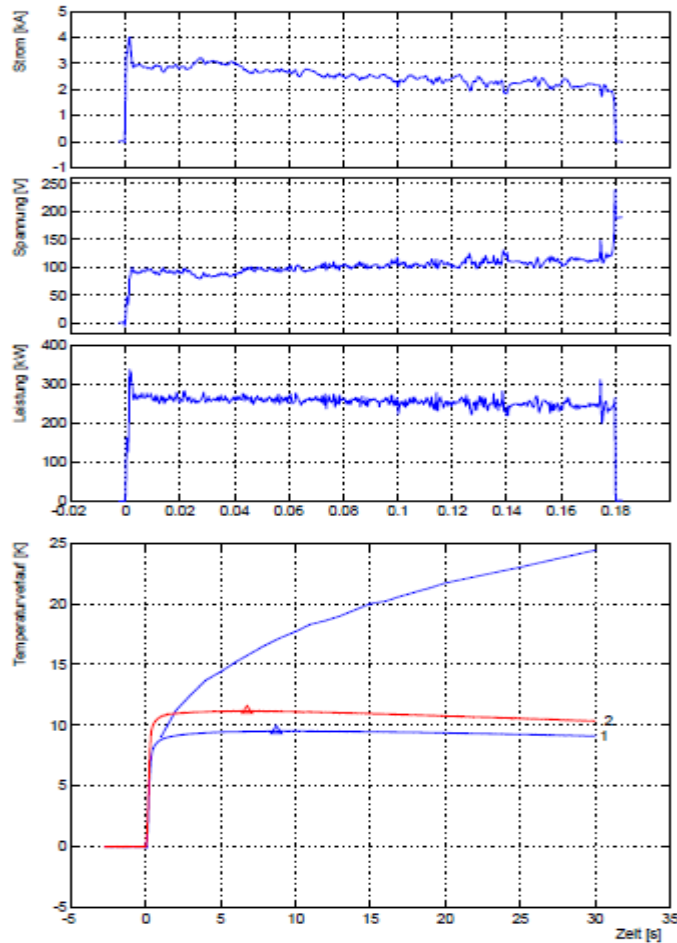
- Umfang/Verbreitung von DC-Anlagen nimmt zu:
  - Wechselrichter gespeiste DC-Anlagen und DC-Abnehmernetze
  - dezentrale Netzeinspeisungen (Photovoltaikanlagen)
  - Batteriespeicher und E-Mobilität mit Hochvoltbatterien (Montage, Betrieb, Laden) ...
- Bisher kaum Untersuchungen zu DC-Störlichtbögen
- Systematische Untersuchungen zu Ausbildung und energetischen Kennwerten notwendig, Vergleich AC-DC
- messtechnischen Untersuchungen im Hochstromlabor
  - Batterie gespeisten Elektrodenanordnungen (Lithium-Ionen-Hochvolt-Batterien) und
  - Speisung des Systems durch DC-Generator (Induktionsgenerator)
  - Grundanordnungen im Spannungsbereich von 100...750 V und Strombereich von 1...6 kA

# DC-Prüf- und Messkreis

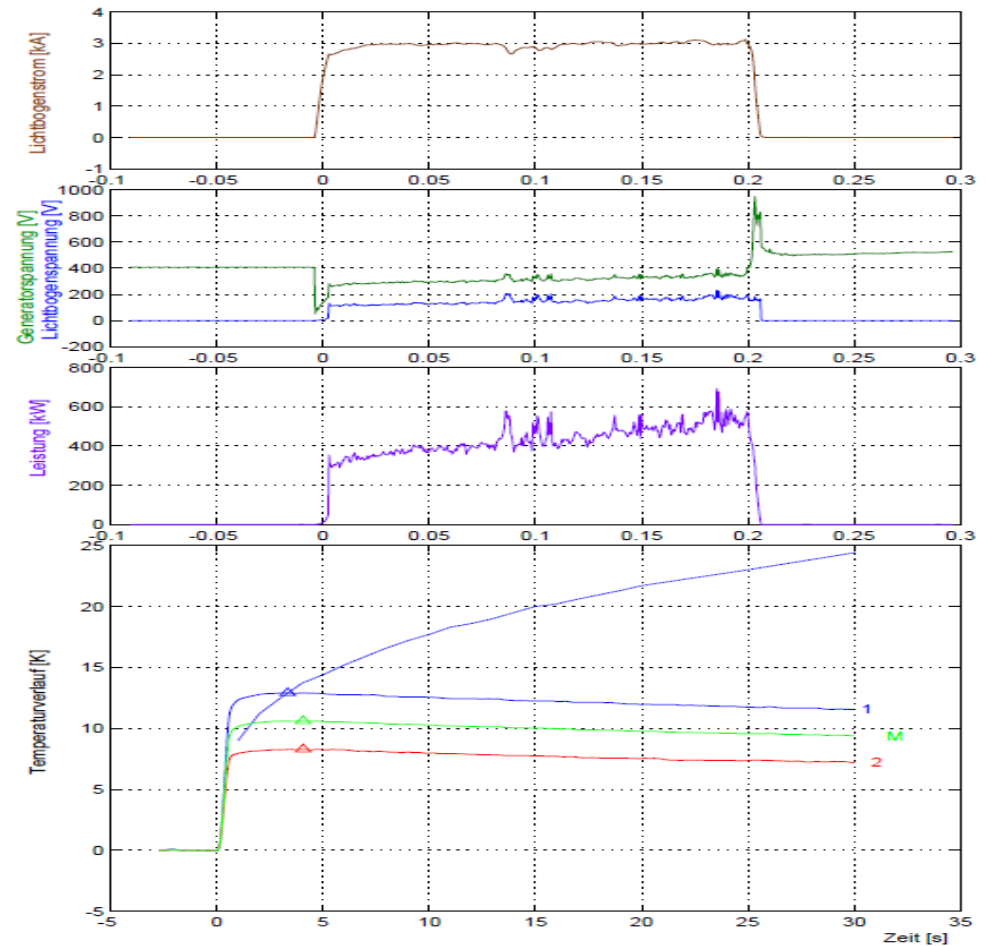


Elektroden-anordnung mit Box gemäß IEC 61482-1-2

# Typische DC-Lichtbogen-Oszillogramme



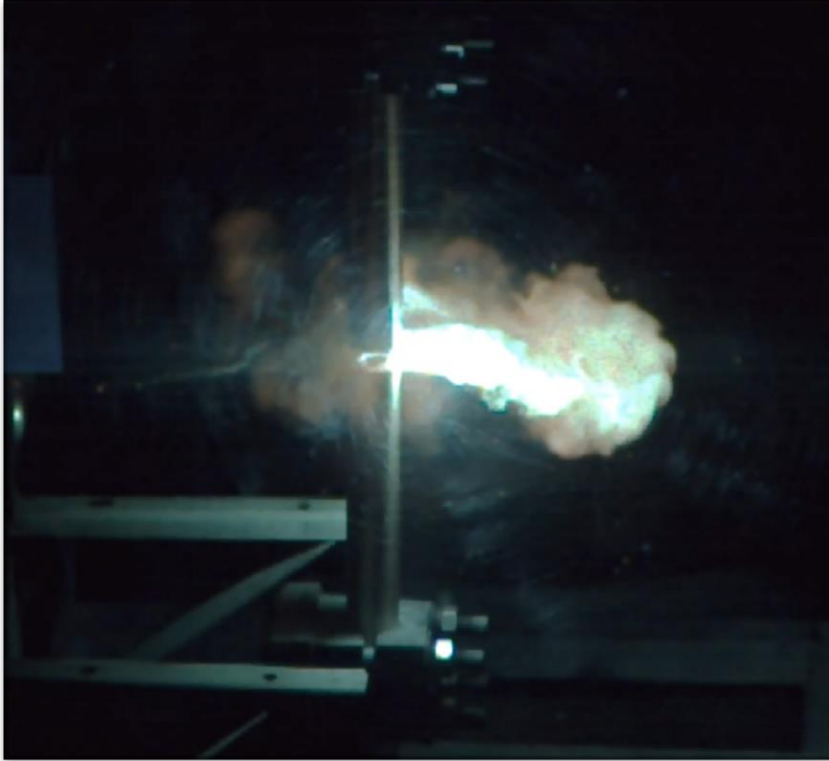
Batteriekreis



Generatorkreis



# Gleichstromlichtbögen



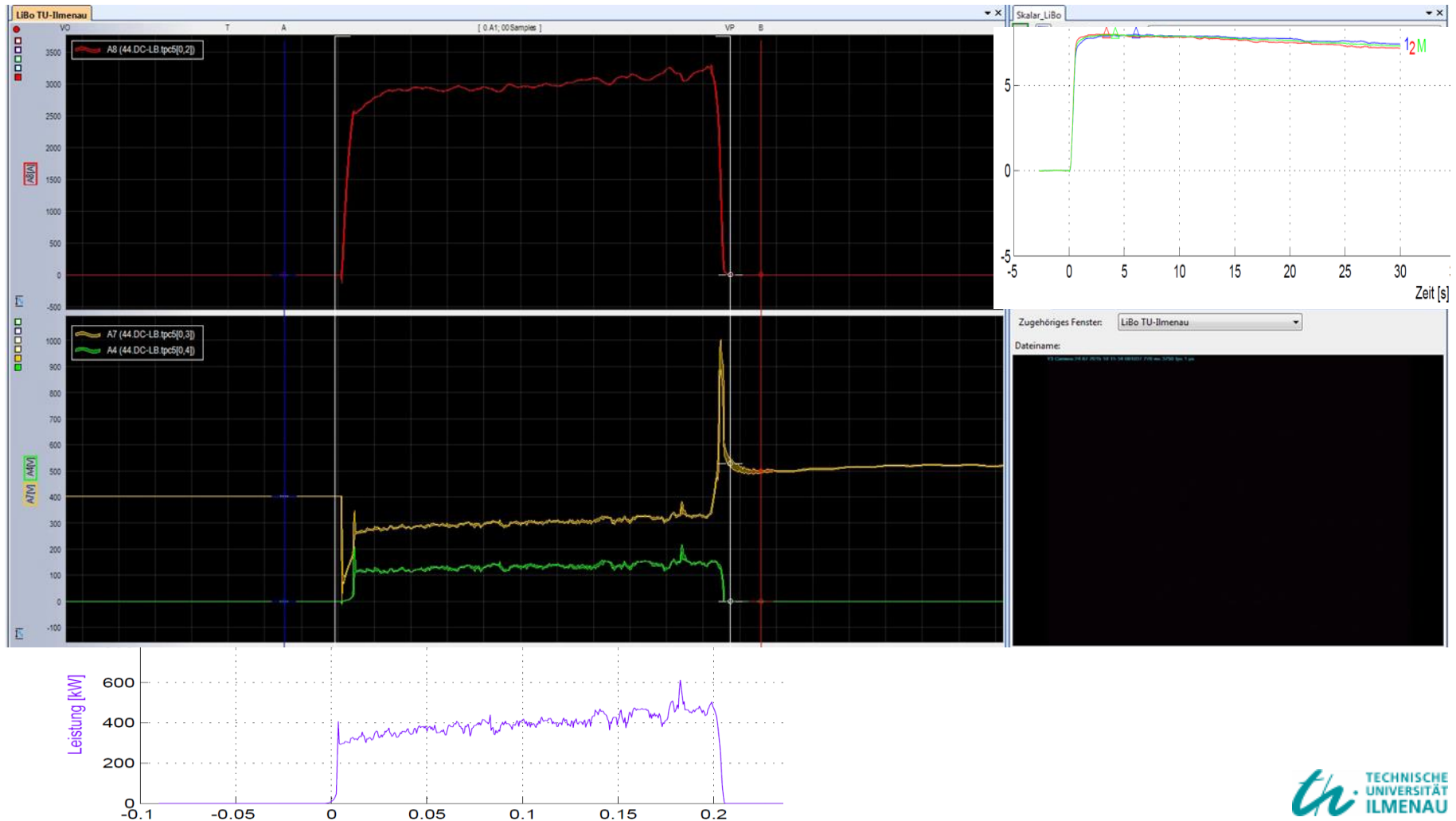
**Offener Lichtbogen**



**Lichtbogen in Box**

# Strom- und Spannungsverlauf beim DC-Lichtbogen

**Beispiel:** Cu-Cu vertikal, 400 V, 4 kA, d = 30 mm, ohne Box  
**P = 397 kW**





# Verhalten und Stabilität von DC-Lichtbögen

Ausbildung und thermische Wirkungen (Erwärmungskurven) ähnlich wie bei AC-Lichtbögen

Wichtige Einflussgrößen sind

- die Leerlaufspannung der DC-Quelle (des Netzes)
- die Stromhöhe (Kurzschlussstrom)
- der Vorwiderstand des Stromkreises
- induktive Vorschaltelemente
- die Zeitkonstante  $T = L/R$
- die Elektrodenkonfiguration (Elektrodenabstand, Elektrodenorientierung, Material, Form, Umgebung)

Kleine Spannungen: z.T. starke Strom-und Spannungsschwankungen (im AP), Neigung zum Selbstverlöschen

# Stabilität DC-Lichtbögen

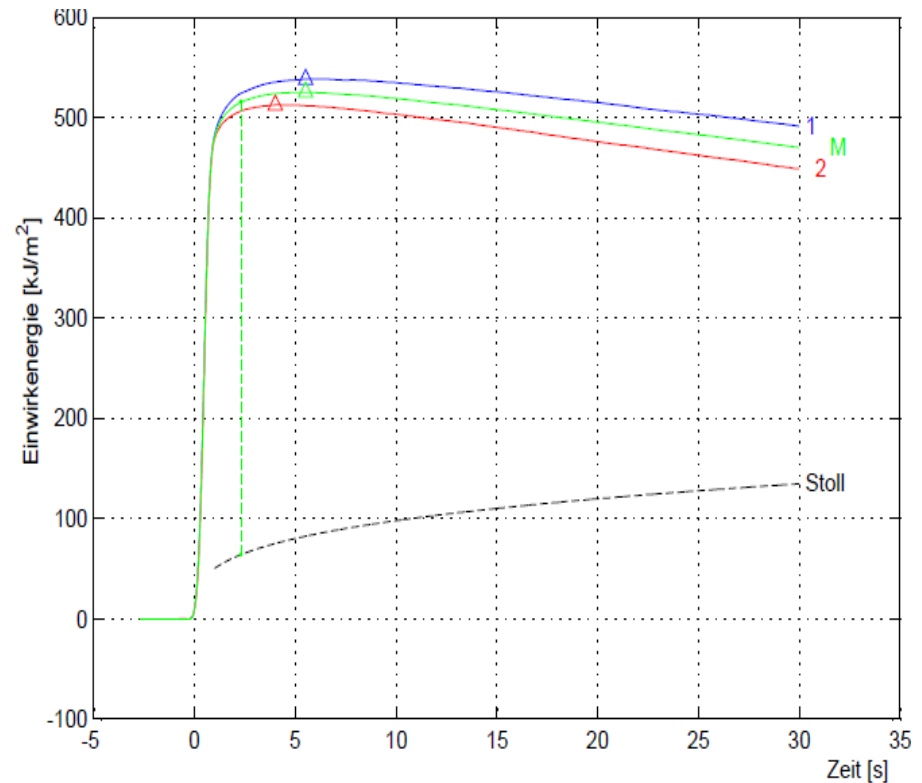
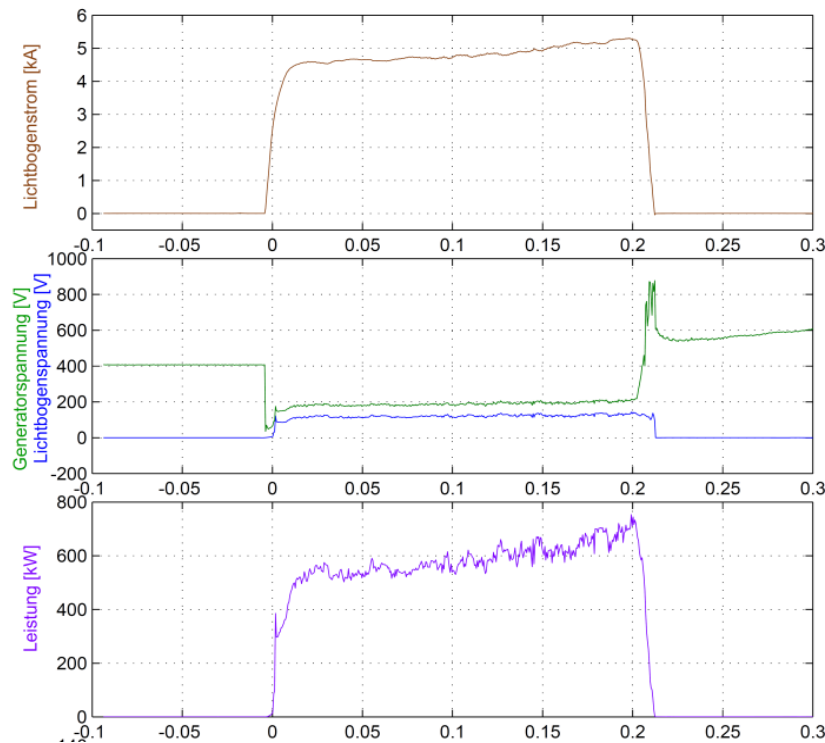
- Lithium-Ionen-Batterien
- Bereich prospektiver Kurzschlussstrom: 1...5 kA

Leerlaufspannung	Lichtbogenverhalten	Randbedingungen
40...60 V	Selbstverlöschen	auch bei Elektrodenabständen von $d = 5 \text{ mm}$
60...120 V	Kurze Lichtbogendauer 20...200 ms	Bei geringen Elektrodenabständen und induktiver Stabilisierung
120...200 V	Lichtbogendauer 200...300 ms möglich	Bei Elektrodenabständen von 5...10 mm
160...200 V	Relativ stabile Lichtbögen	Auch bei größeren Elektrodenabständen bei konischen Elektroden
400 V	Stabile Lichtbögen	Lichtbögen auch bei bis zu $d$ von 100 mm (konische Elektroden)

- Lichtbogenzeiten < 200 ms, Kupferelektroden: keine Einwirkenergien oberhalb der Stollgrenze

# Stabile DC-Lichtbögen

- Bei höheren Spannungen und Strömen stabile Lichtbögen
- auch längere Lichtbögen möglich; stabile LB werden länger
- Thermische Einwirkenergien dann über Stollkurve



**Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf sowie Erwärmungskurven  
(Abstand 300 mm) für einen DC-Lichtbogen (Beispiel: 400 V, 6 kA)**

# DC Lichtbogen – große Länge



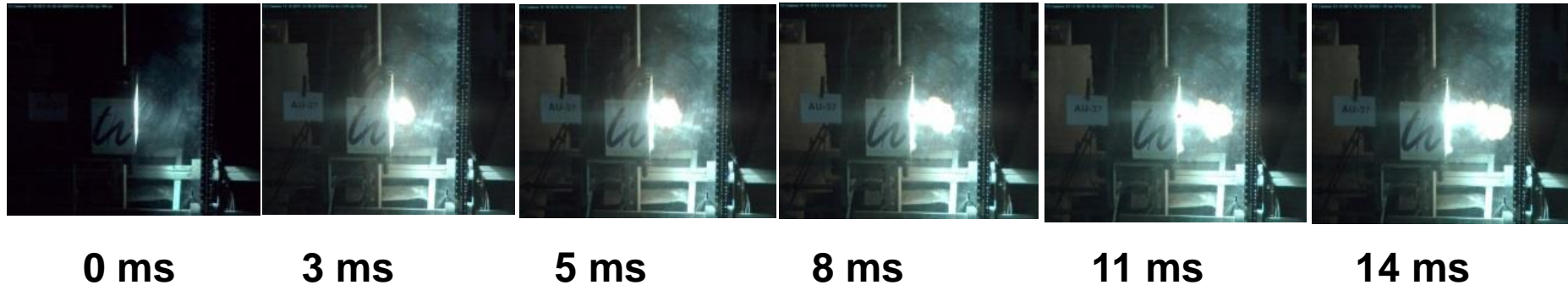
**Leerlauf-  
spannung  
400 V**

**d = 100 mm**



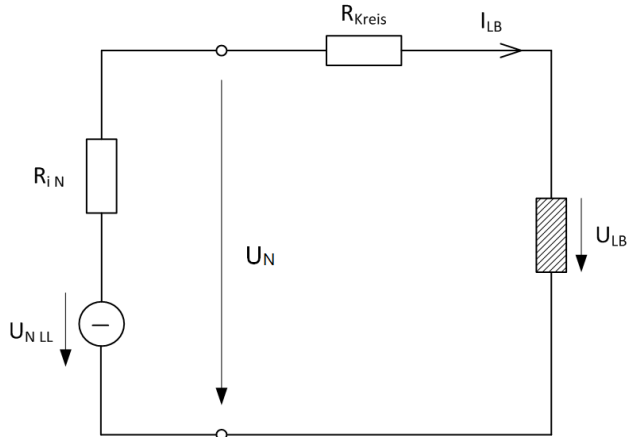
# Ausbildung und Ausbreitung der Gaswolke

- Charakteristik der Erwärmungskurven wie bei AC-Lichtbögen
- Gleiche Wärmeübertragungsmechanismen



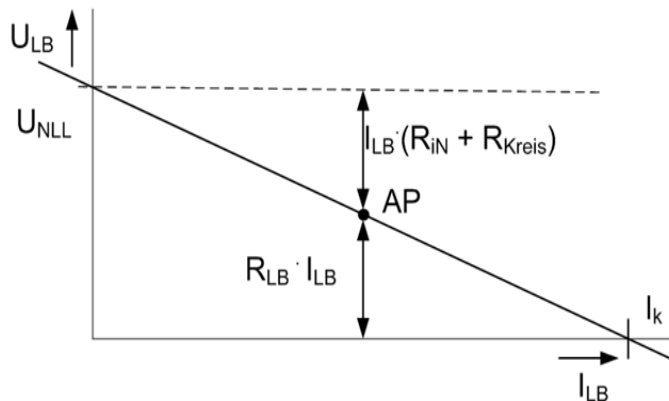
- Beispiel: DC-Lichtbogen 400 V; 3 kA;  $d = 10$  mm
- Geschwindigkeit  $v = 20$  m/s (72 km/h)

# Modell und Parameter des DC-Lichtbogenkreises



$$u_{N\ LL} = i_{LB} \cdot R_V + u_{LB}$$

**Linearisierung im AP →  
Mittelwertbetrachtung**



**Iterativ: Strom  
vorgeben**

$$U_{LB} = U_{N\ LL} - I_{LB} \cdot R_V$$

$$U_{LB} = (A + B \cdot d) \cdot I_{LB}^x$$

$$I_{LB} = \frac{U_{N\ LL} - U_{LB}}{R_V}$$

$$P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{LB} = U_{N\ LL} \cdot I_{LB} - R_V \cdot I_{LB}^2$$

$$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_{LB}$$

$$E_{i0} = K \cdot W_{LB}$$

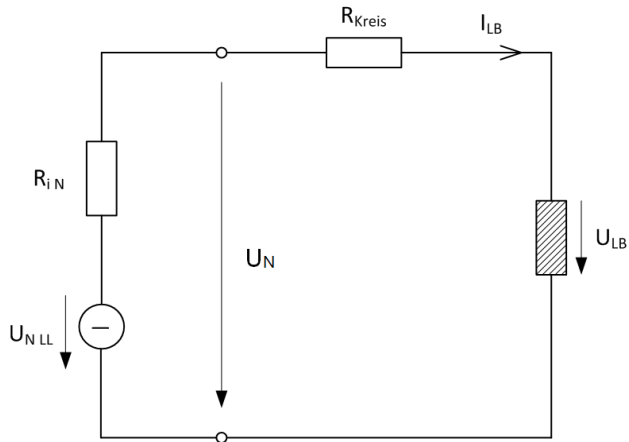
$$K = f(a, El. - mat.)$$

**Für a = 300 mm:**

**K = 0,66...1,0**



# Maximaler Leistungsumsatz



## ■ Lichtbogenleistung

$$P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{LB} = U_{NLL} \cdot I_{LB} - R_V \cdot I_{LB}^2$$

## ■ → max., wenn $R_{LB} = R_V = R_{iN} + R_{Kreis}$

$$P_{LB \max} = 0,25 \cdot U_{NLL} \cdot I_{kDC}$$

$$= 0,25 \cdot P_{kDC} = 0,25 \cdot \frac{U_{NLL}^2}{R_V}$$

## ■ „worst case“- Betrachtung

$$W_{LB} = P_{LB} \cdot t_{LB} \quad E_{i0} = K \cdot W_{LB}$$

# Energetische Verhältnisse

- Untersuchungen im Generatorkreis: stabile LB
- bis zu ca. 1,3-fach höhere Werte für elektrische Lichtbogenleistung und –energie in DC-Tests gegenüber Standard-Boxtest AC
  - Modifikationen zu den Standard-Boxtest-Bedingungen: Elektroden Kupfer-Kupfer, konische Enden
  - konische Enden: sehr stabile Lichtbögen im DC-Kreis, Länge deutlich größer als Elektrodenabstand, vergrößert sich infolge des Materialabbrandes
- Einwirkenergie etwa gleiche Größe wie im Standard-Boxtest
- Verhältnis Einwirkenergie/Lichtbogenenergie ist abhängig vom Elektrodenmaterial
  - Messungen bei AC-Box-Test mit Elektroden Kupfer-Kupfer: Pegel der Einwirkenergie nur ca. 60 % der Werte für die Standardpaarung Aluminium-Kupfer

# Vergleich AC- und DC-Lichtbogen

- Lichtbogenausbildung und Erwärmungskurven ähnlich (gleiche Wärmeübertragungsmechanismen)
- prinzipieller Unterschied: Einflusses des Netz- bzw. Stromkreiswiderstandes
  - DC-Kreis:
    - ohmscher Widerstand (Innenwiderstand Quelle und Kreiswiderstand) bestimmt Arbeitspunkt und Leistungsumsatz im Lichtbogen
    - maximal mögliche Lichtbogenleistung: 25 % der Kurzschlussleistung (wenn Lichtbogenwiderstand = Vorwiderstand)
    - Induktivität hat Einfluss auf die Stabilität, bestimmt Zeitkonstante T (Stromänderungen)
    - Lichtbögen großer Länge möglich
  - AC-Kreis:
    - Leistungsumsatz hängt von R/X-Verhältnis der Stromkreisimpedanz ab (je kleiner R/X desto größer die maximal mögliche Leistung; Bereich 25...45 % der Kurzschlussleistung)
    - R/X bestimmt Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung (Einfluss auf das Wiederezünden des Lichtbogens nach dem Nulldurchgang des Stroms)

# Fazit und Ausblick

- Ergebnisse geben erste Aufschlüsse, müssen noch weiter bestätigt und erweitert werden
- fortsetzende Untersuchungen vorgesehen
- Zielsetzung: fundierte Anwenderhilfen für die Auswahl von PSAgS erarbeiten, die auf gesicherten Kenntnissen und der Bestimmung der energetischen Lichtbogenkenngößen basieren
- Fortsetzung der Untersuchungen: gezielte Parameteränderungen und statistische Absicherung

# Anerkennung

Der Beitrag basiert auf 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.)



- **DEHN + Söhne + Co. KG Neumarkt**



- **AUDI AG Ingolstadt**



sowie **BSD** und **VDE/DKE (UK 214.3)**  
ermöglicht wurden. Der Autor möchte sich dafür bedanken.