



ZIEHL VI, 20. – 21. März 2018, Berlin

# Spannungsfestigkeit von konventionellen Isolierstoffen bei tiefen Temperaturen

Christof Humpert

Institut für Elektrische Energietechnik  
Cologne Institute for Renewable Energy  
Technische Hochschule Köln

**Technology**  
**Arts Sciences**  
**TH Köln**

# Danksagung

Ein Teil der Ergebnisse entstand im Rahmen des Projekts (03FH023I2)  
**DYBSUS-110 - Dielektrische Auslegung YBCO-Band basierter supra-  
leitender Strombegrenzer für den Einsatz im Hochspannungsnetz (110 kV)**

GEFÖRDERT VOM



## Projektpartner

- Mathias Noe, Stefan Fink, Institut für Technische Physik, KIT
- Judith Schramm, Achim Hobl, Nexans SuperConductors GmbH (Hürth)

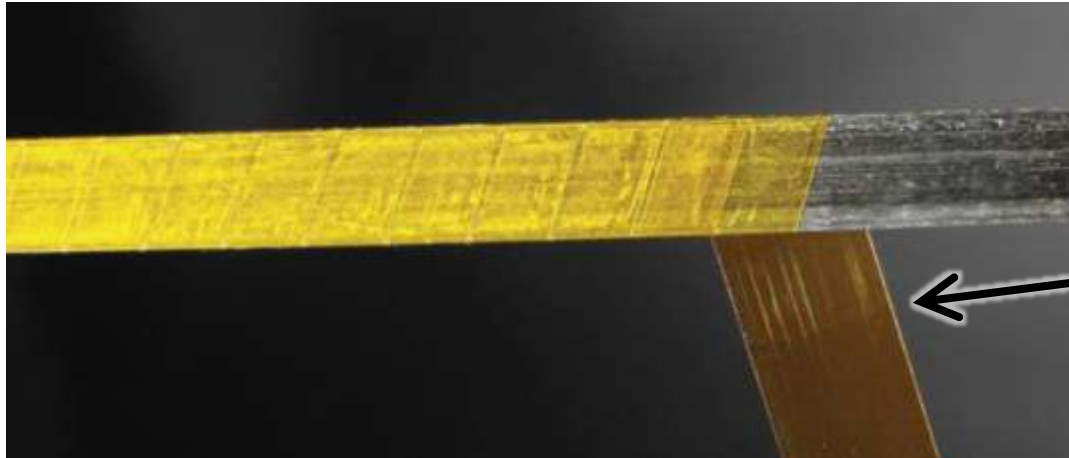
## Projektbeteiligte der Technischen Hochschule Köln

Ralph Schumacher, Dirk Gromoll, Niclas Barthel, Michael Garzem,  
Marcel Grunwald, André Schmid, Matthias Stedler, René Schnorrenberg,  
Christian Bauer, Richard Bonin

# Inhalt

1. Um welche Isolierstoffe geht es?
2. Elektrische Eigenschaften und deren Messung
3. Eigenschaften von Isolierfolien und Isolierpapieren in  $\text{LN}_2$
4. Eigenschaften von GFK und Boardmaterialien in  $\text{LN}_2$
5. Zusammenfassung

# Typische feste Isolierstoffe für tiefe Temperaturen

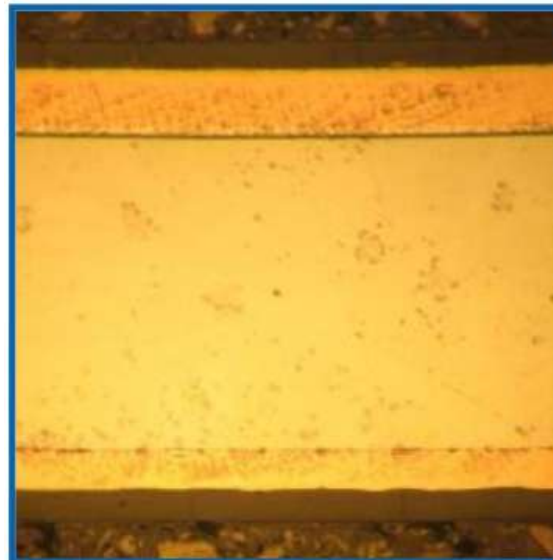


## Isolierung eines HTS-Bandleiters

Polyimid (PI)  
z. B. Kapton®

N. Zangenberg, Danish Technological Institute: HTS tape insulation, 2015

## Beschichtung eines HTS-Bandleiters (SuperOx)



PI coating 5  $\mu\text{m}$

Copper 10  $\mu\text{m}$

Silver 1  $\mu\text{m}$

Buffers + HTS 2  $\mu\text{m}$

Substrate 60  $\mu\text{m}$

SuperOx - 2G HTS tape performance and specifications, <http://www.superox.ru/products/0001.pdf>

# Typische feste Isolierstoffe für tiefe Temperaturen



**Sekundärspule eines  
supraleitenden Transformators  
(ITEP, KIT)**

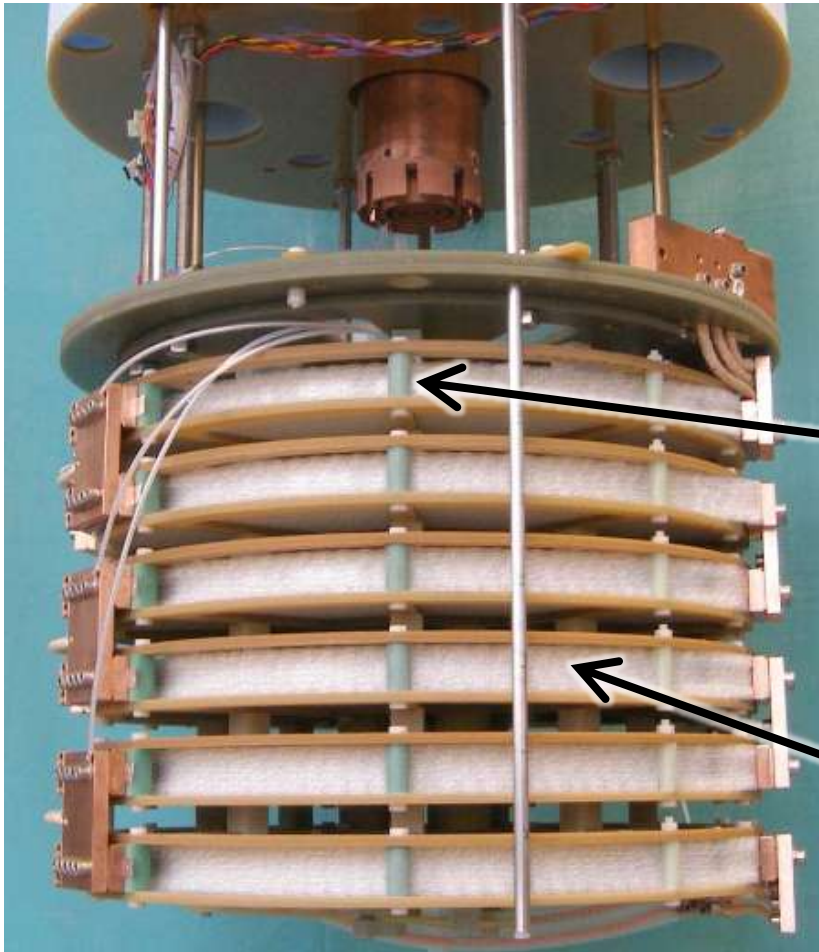
Polyimid (PI) z. B. Kapton®

Glasfaserverstärkter Kunststoff  
(GFK) z. B. Epoxid-Glashartgewebe  
(EP GC 201, HGW 2372, G10)

Institut für Technische Physik – Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung,  
Jahresbericht 2016, März 2017

# Typische feste Isolierstoffe für tiefe Temperaturen

## Bifilare Spulenanordnung eines Strombegrenzers mit HTS-Bändern (Siemens)



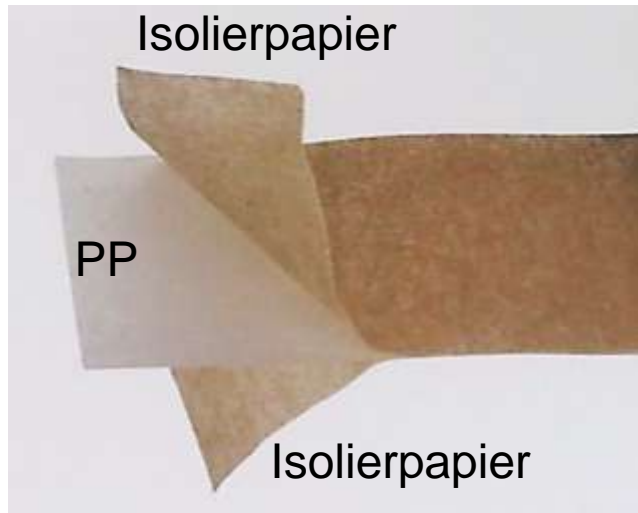
Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) z. B. Epoxid-Glashartgewebe (EP GC 201, HGW 2372, G10)

Polytetrafluorethylen (PTFE) bzw. Teflon®

H. P. Krämer, W. Schmidt: Supraleitende Strombegrenzer aus YBCO-Bandleitern, 4. Braunschweiger Supraleiterseminar, 2009

# Typische feste Isolierstoffe für tiefe Temperaturen

mit Polypropylen (PP) laminiertes  
Isolierpapier (PPLP)



Supraleitendes Kabel  
(Nexans)



M. J. Dedicatoria, J. R. Dizon, H.-S. Shin, K.-D. Sim: Establishment of CTE Measurement Procedure for PPLP at 77 K for HTS Power Cables using Double Extensometers. Progress in Superconductivity and Cryogenics, Vol.14, No.4, 2012

# Alternative konventionelle feste Isolierstoffe

## Leistungstransformator



© Maschinenfabrik Reinhausen GmbH



© Philippe Mertens

# Alternative konventionelle feste Isolierstoffe

## Leistungstransformator

Transformerboard aus Cellulose  
imprägniert mit Isolieröl

Isolierpapier aus Cellulose  
und / oder Baumwolle  
imprägniert mit Isolieröl



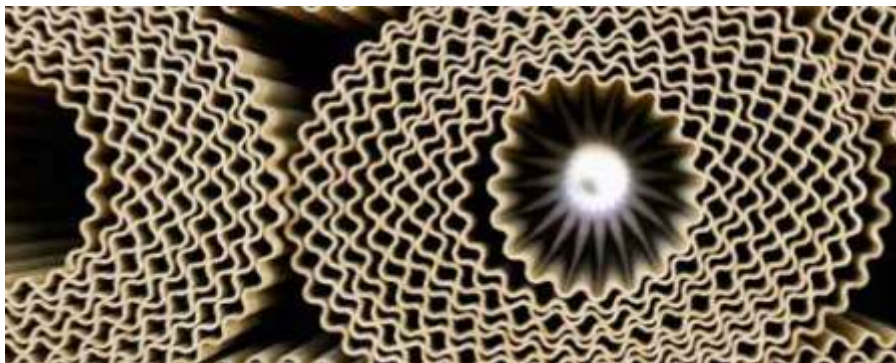
© Philippe Mertens

# Alternative konventionelle feste Isolierstoffe



Isolierpapier aus Cellulose und / oder Baumwolle

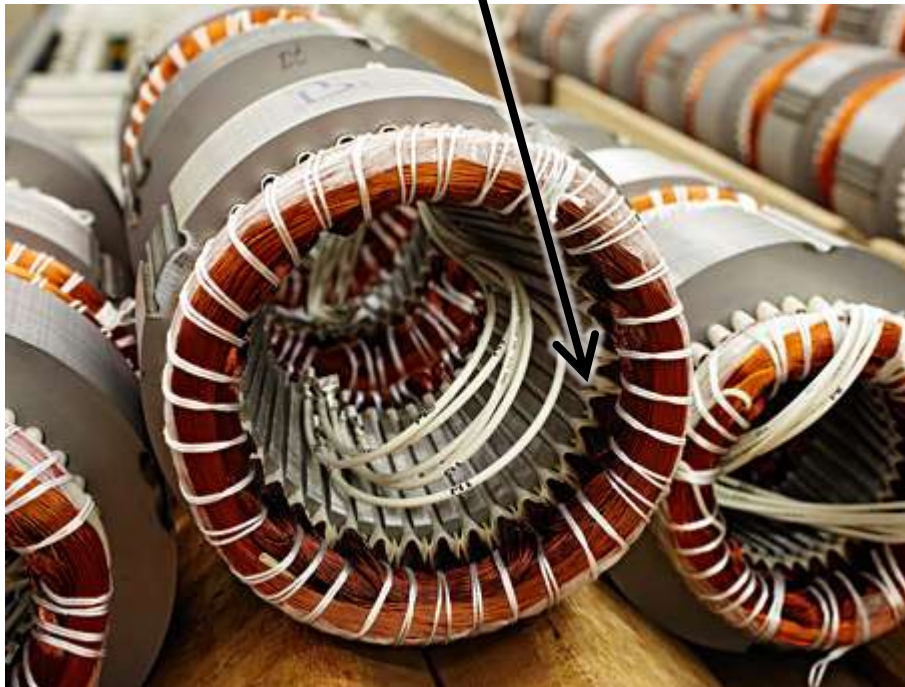
Transformerboard aus Cellulose in unterschiedlichen Formen und Dicken



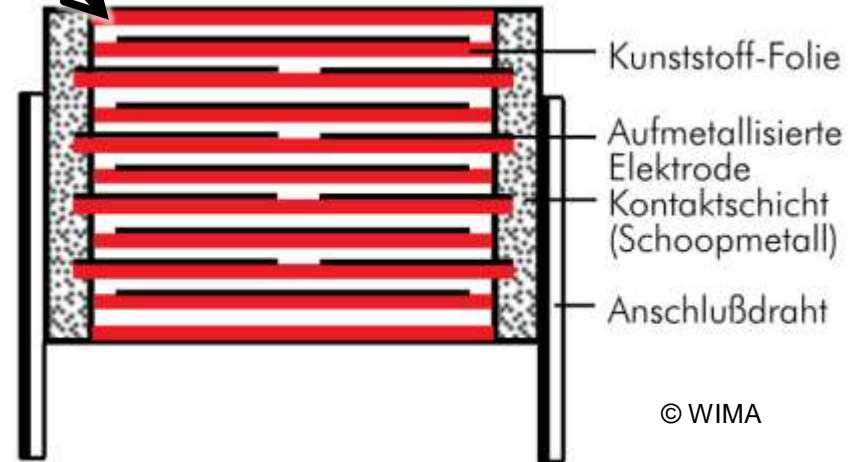
© Weidmann

# Alternative konventionelle feste Isolierstoffe

Polyester (PET)  
z. B. Hostaphan® oder Mylar®

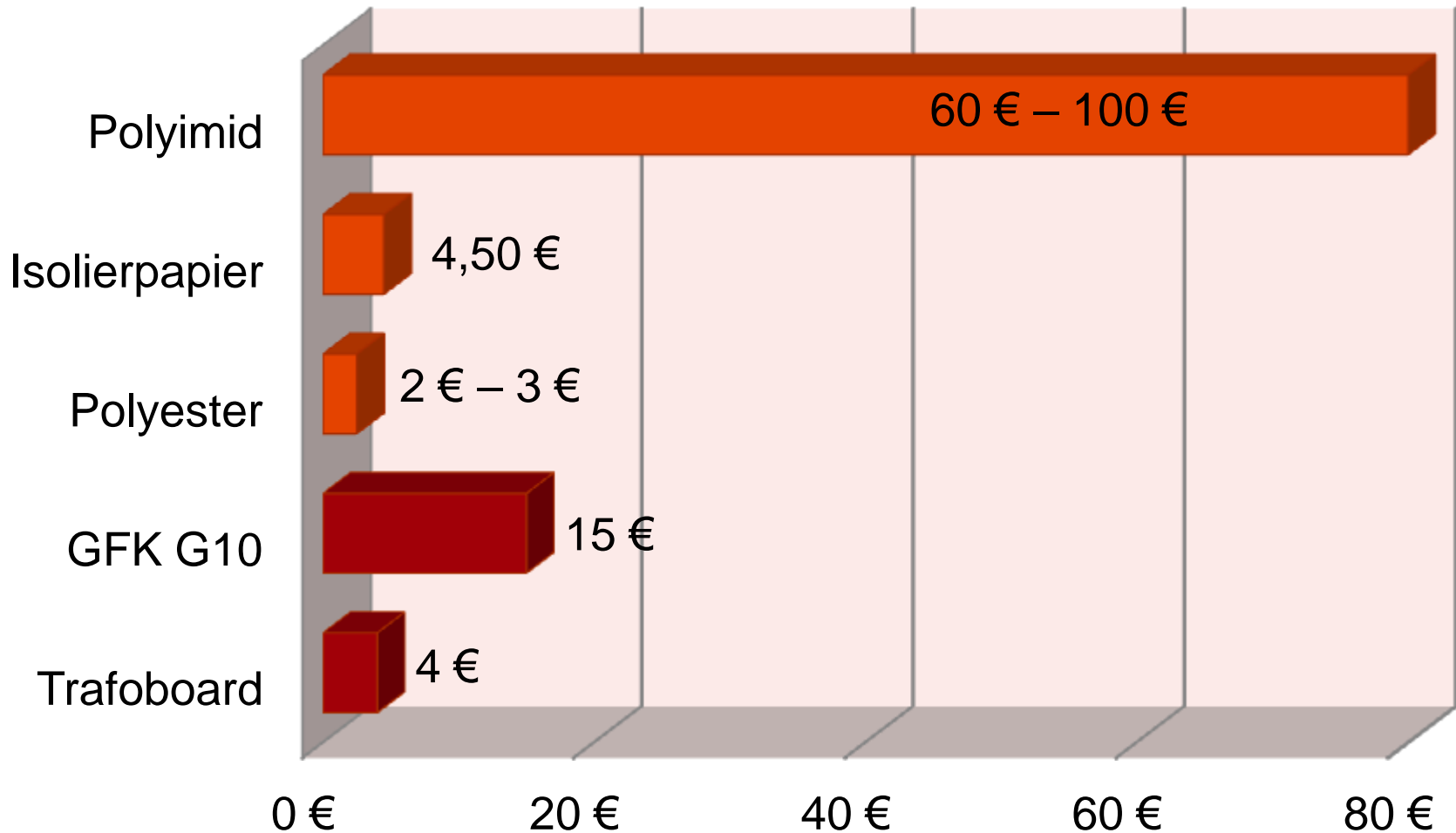


© Mitsubishi Polyester Film



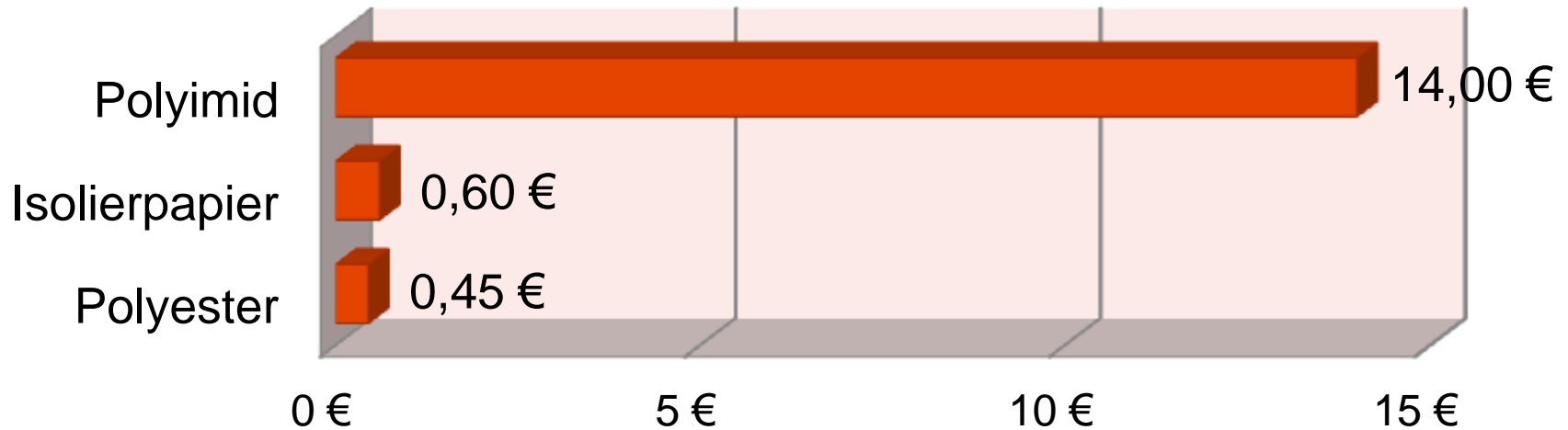
# Warum alternative Isolierstoffe?

ca.-Kosten pro kg

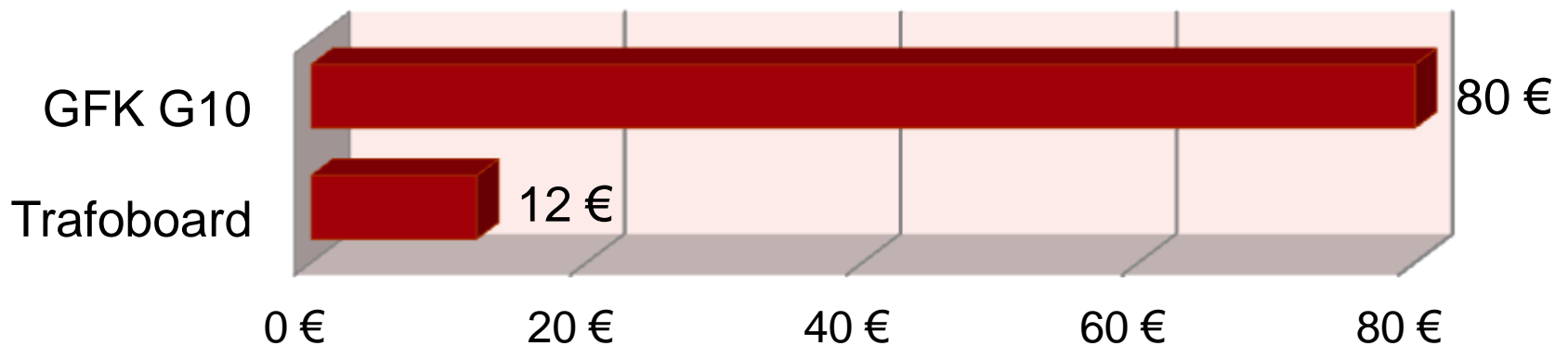


# Warum alternative Isolierstoffe?

## ca.-Kosten pro m<sup>2</sup> für 125 µm dicke Isolierfolie bzw. -papier



## ca.-Kosten pro m<sup>2</sup> für 3 mm dickes Plattenmaterial



# Inhalt

1. Um welche Isolierstoffe geht es?
- 2. Elektrische Eigenschaften und deren Messung**
3. Eigenschaften von Isolierfolien und Isolierpapieren in LN<sub>2</sub>
4. Eigenschaften von GFK und Boardmaterialien in LN<sub>2</sub>
5. Zusammenfassung

# Welche elektrischen Eigenschaften sind wichtig?

## Verlustfaktor $\tan \delta$

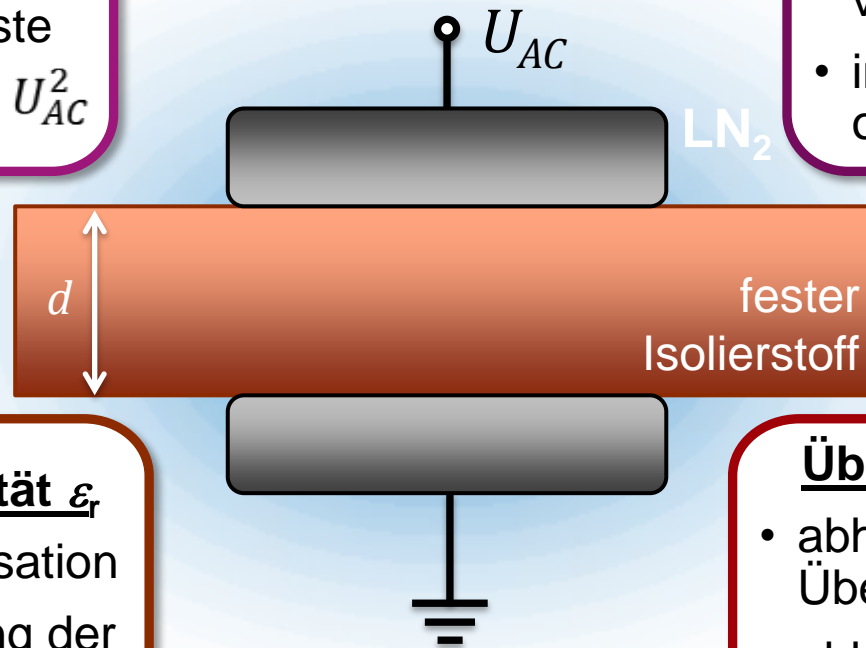
- Polarisationsverluste und Leitungsverluste
- $P_V \sim \epsilon_r \cdot \tan \delta \cdot f \cdot U_{AC}^2$

## Durchschlagspannung

- nur kurzzeitige Spannungsbelastung
- Durchschlagfeldstärke  $E_D = U_D/d$

## Teilentladungen (TE)

- äußere TE abhängig von Geometrie und  $\epsilon_r$
- innere TE in Lunkern oder an Fehlstellen



## relative Permittivität $\epsilon_r$

- Maß für die Polarisation
- bestimmt Verteilung der elektrischen Feldstärke

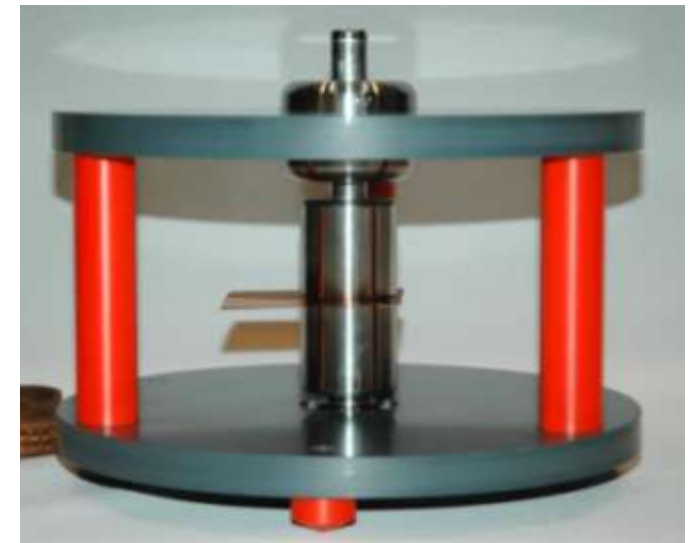
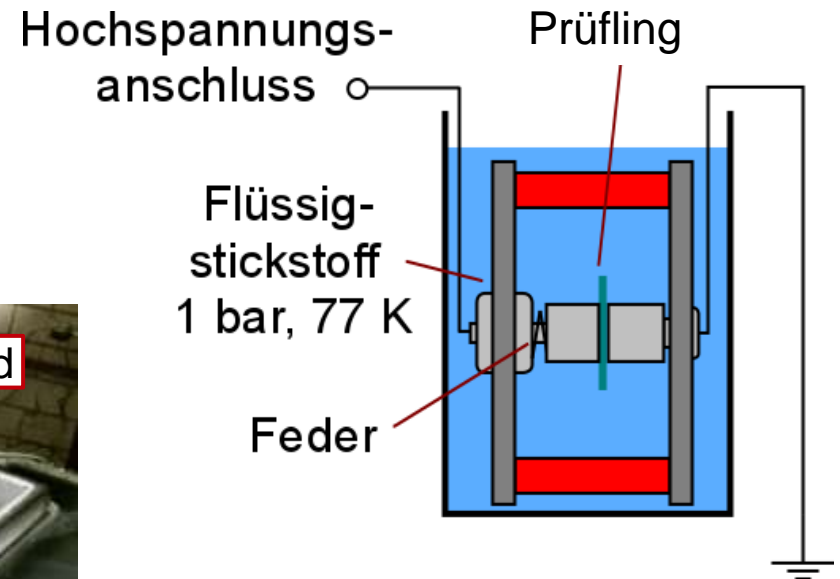
## Überschlagspannung

- abhängig von Geometrie, Überschlaglänge und  $\epsilon_r$
- abhängig vom äußeren Medium, hier LN<sub>2</sub>

## Langzeitverhalten

# Untersuchung von elektrischen Eigenschaften in LN<sub>2</sub>

Messungen im offenen Behälter in LN<sub>2</sub>,  
typischerweise jeweils an 10 Prüflingen  
(100 mm x 100 mm)



# Untersuchung von elektrischen Eigenschaften in LN<sub>2</sub>

## Flüssigstickstoff-Badkryostat

- Innendurchmesser: 840 mm
- LN<sub>2</sub>-Volumen: 900 l
- max. Druck: 5 bar (absolut)
- 6 Fenster (Ø 100 mm)
- 3 kW Heizung am Boden
- maximal 230 kV AC
- maximal 605 kV Blitzstoß



# Inhalt

1. Um welche Isolierstoffe geht es?
2. Elektrische Eigenschaften und deren Messung
- 3. Eigenschaften von Isolierfolien und Isolierpapieren in LN<sub>2</sub>**
4. Eigenschaften von GFK und Boardmaterialien in LN<sub>2</sub>
5. Zusammenfassung

# Untersuchte Isolierpapiere und Isolierfolien

Abk.	Material	Dicke $d$ in $\mu\text{m}$
Grade 3 *	Isolierpapier aus Baumwolle & Cellulose	130, 250
Grade 4 *	Isolierpapier aus Baumwolle	130, 250
Grade K *	Isolierpapier aus Cellulose	130, 250
PPLP	PP laminiertes Papier	125, 225
PI	Kapton <sup>®</sup> Isolierfolie	125
PI	Polyimid Isolierfolie	250
PTFE	Teflon <sup>®</sup> Isolierfolie	125, 250
PET	PET Isolierfolie	125, 250

\* Hersteller: Weidmann Electrical Technology AG

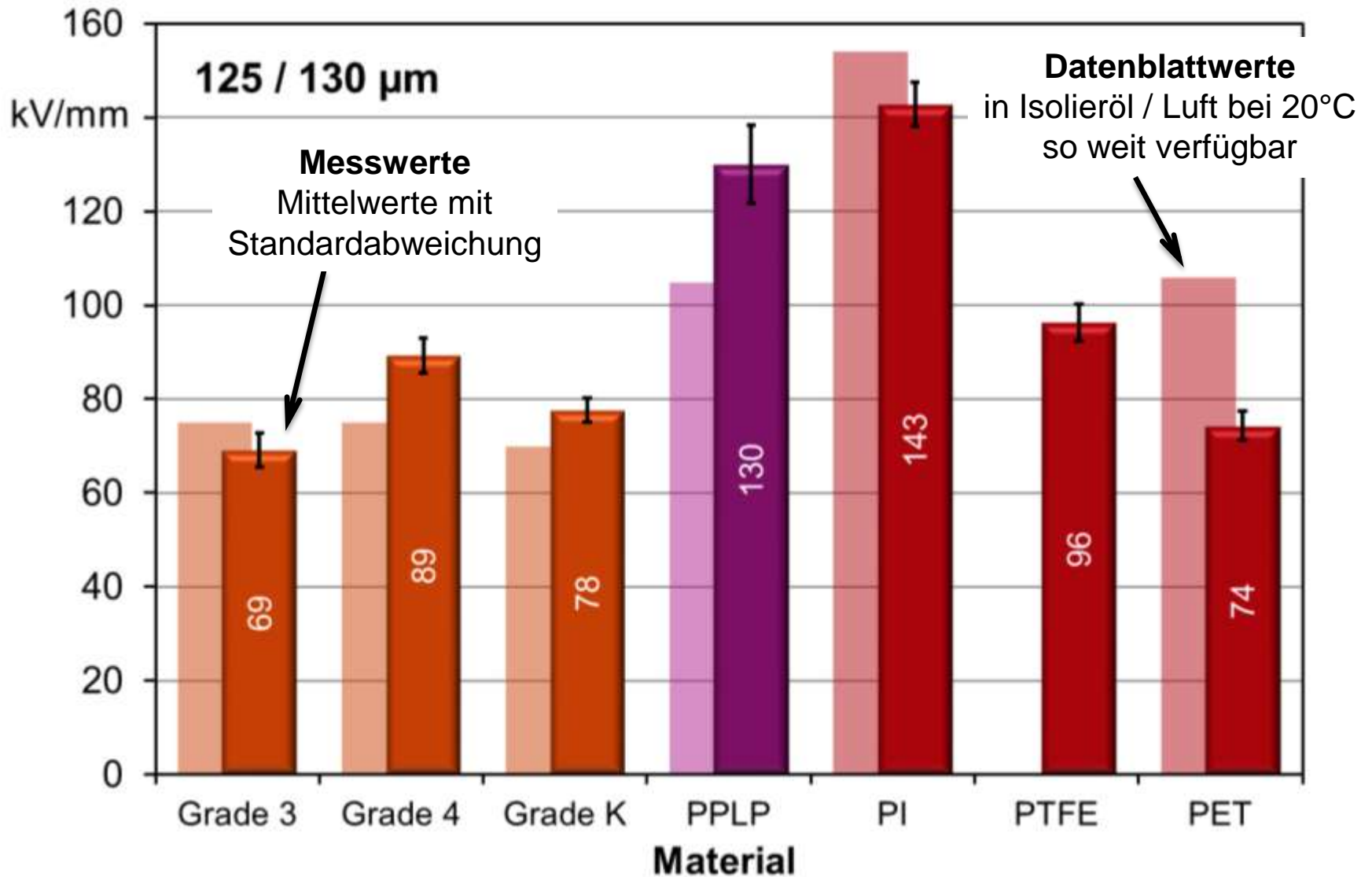
# Untersuchte Isolierpapiere und Isolierfolien

Abk.	Dicke $d$ in $\mu\text{m}$	gemessen in $\text{LN}_2$ bei 60 Hz	
		Permittivität $\epsilon_r$	Verlustfaktor $\tan \delta$
Grade 3 *	130, 250	2,1 – 2,2	0,21 % – 0,22 %
Grade 4 *	130, 250	2,2 – 2,4	0,23 % – 0,25 %
Grade K *	130, 250	2,1 – 2,4	0,20 % – 0,21 %
PPLP	125, 225	2,0 – 2,1	0,05 % – 0,07 %
PI	125	3,0	0,17 %
PI	250	3,2	0,18 %
PTFE	125, 250	2,1 **	0,03 % **
PET	125, 250	2,8	0,08 % – 0,09 %

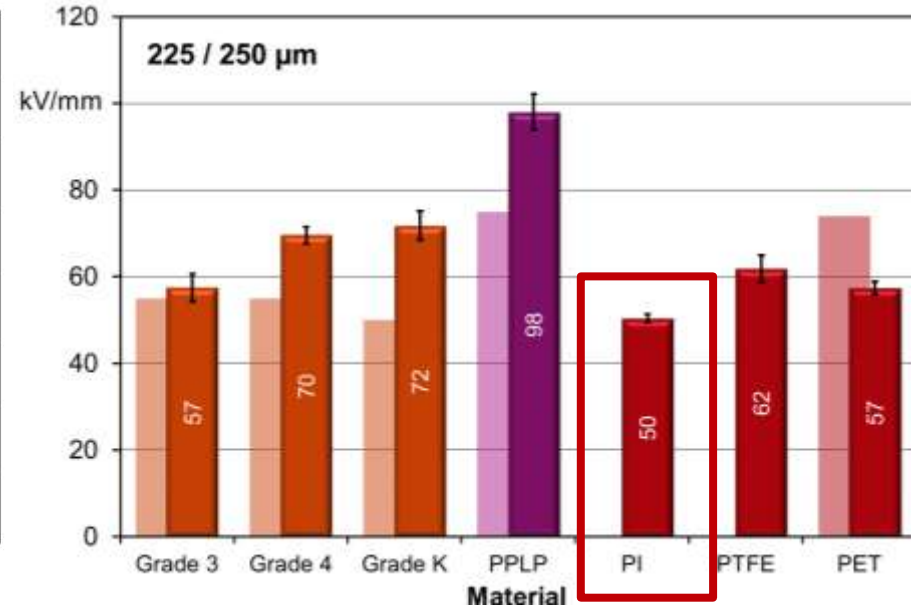
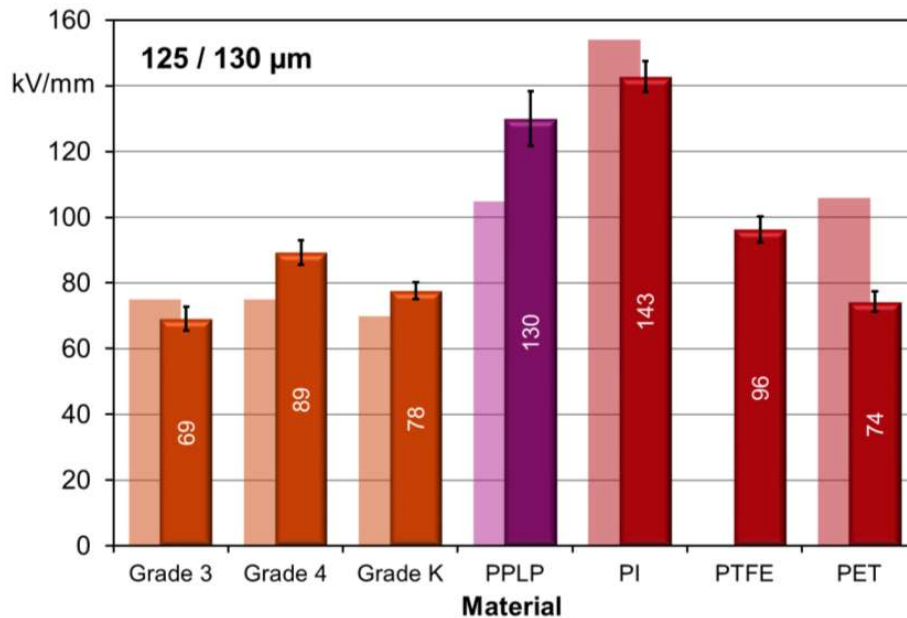
\* Hersteller: Weidmann Electrical Technology AG

\*\* Gerhold, J. (1998): Properties of cryogenic insulants. In: *Cryogenics* 38 (11), S. 1063–1081

# Durchschlagfeldstärke $E_D = U_D/d$ von Isolierpapieren und -folien

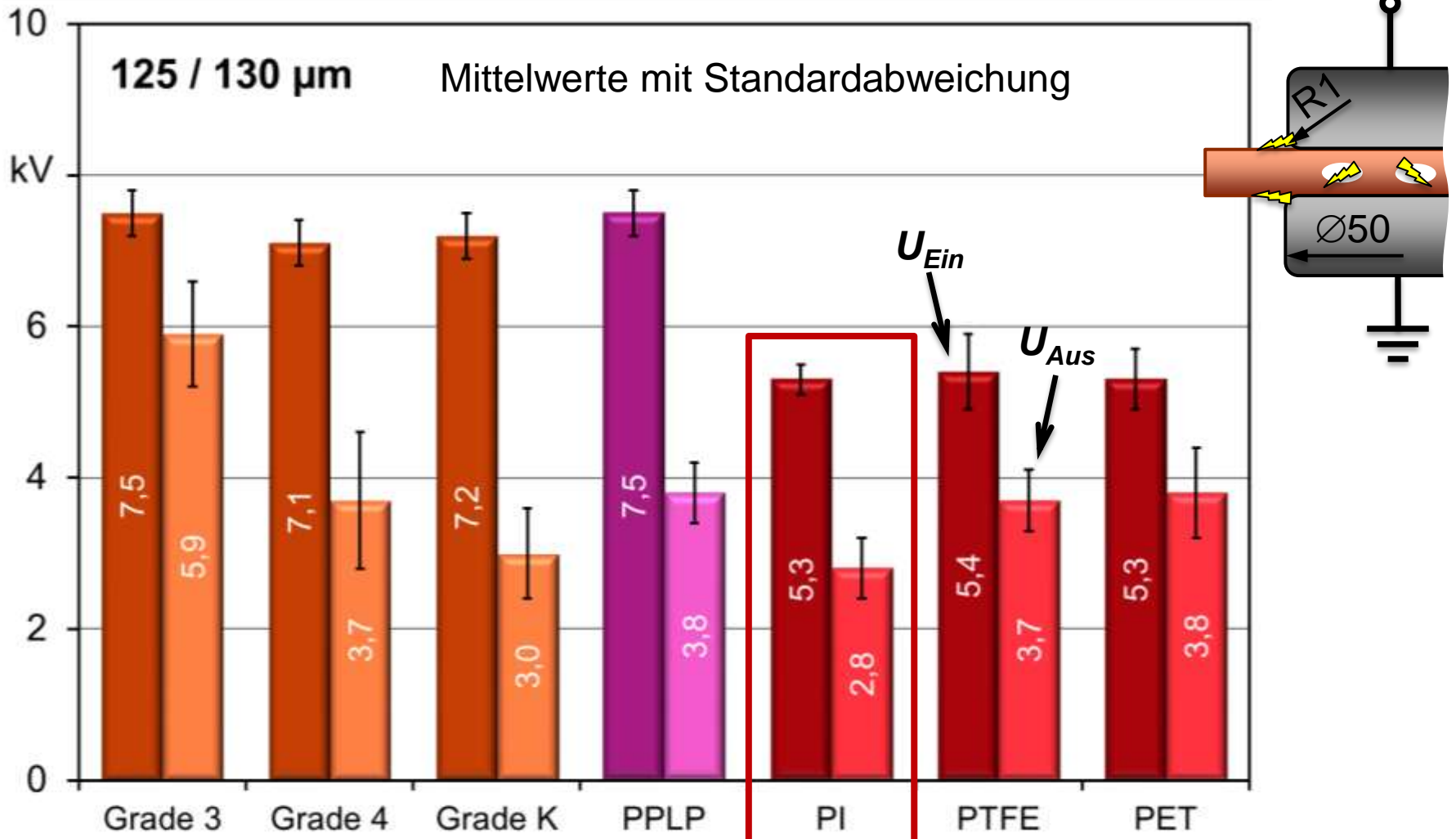


# Durchschlagfeldstärke $E_D = U_D/d$ von Isolierpapieren und -folien



- Isolierpapiere in  $LN_2$  vergleichbar oder besser als in Isolieröl
- PPLP und PI (Kapton<sup>®</sup>) mit herausragenden Eigenschaften
- PI (250 µm) deutlich schwächer  
→ Materialien unterschiedlicher Hersteller jeweils einzeln freiprüfen!
- PET erstaunlich gut und vergleichbar mit PTFE

# Ein- und Aussetzspannungen $U_{Ein}$ und $U_{Aus}$ von Teilentladungen



**Material** geringe Einsetz- und Aussetzspannungen für PI aufgrund größerer Permittivität

# Inhalt

1. Um welche Isolierstoffe geht es?
2. Elektrische Eigenschaften und deren Messung
3. Eigenschaften von Isolierfolien und Isolierpapieren in  $\text{LN}_2$
- 4. Eigenschaften von GFK und Boardmaterialien in  $\text{LN}_2$**
5. Zusammenfassung

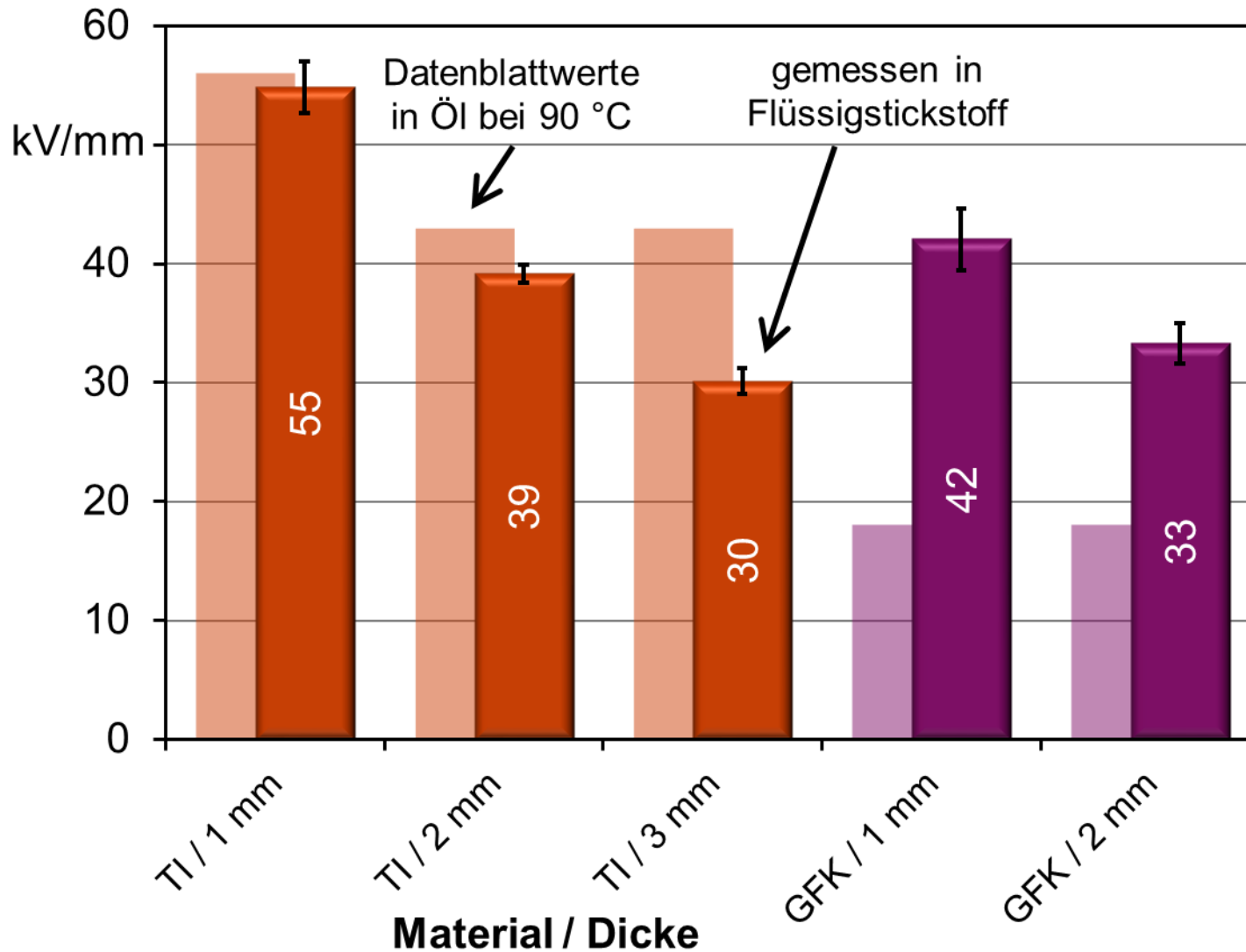
# Untersuchte Plattenmaterialien

Abk.	Material	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Dicke <i>d</i> in mm	gemessen in LN <sub>2</sub> bei 60 Hz	
				Permittivität $\epsilon_r$	Verlustfaktor $\tan \delta$
TI *	Cellulose, kalandriert	1,2	1, 2, 3	2,2 – 2,6	0,16 – 0,17
GFK	Epoxid-Glas- hartgewebe, G10	1,85	1, 2, 3	3,9 – 4,2	0,24 – 0,29

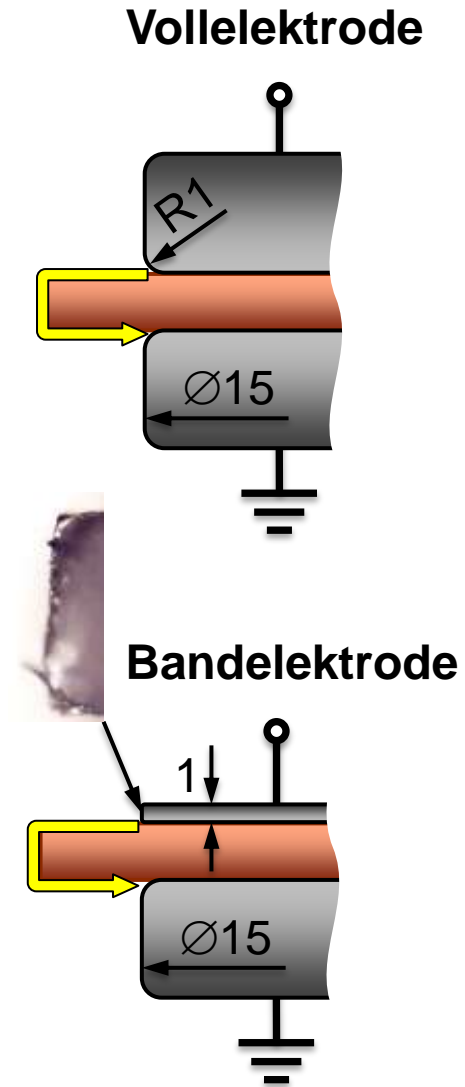
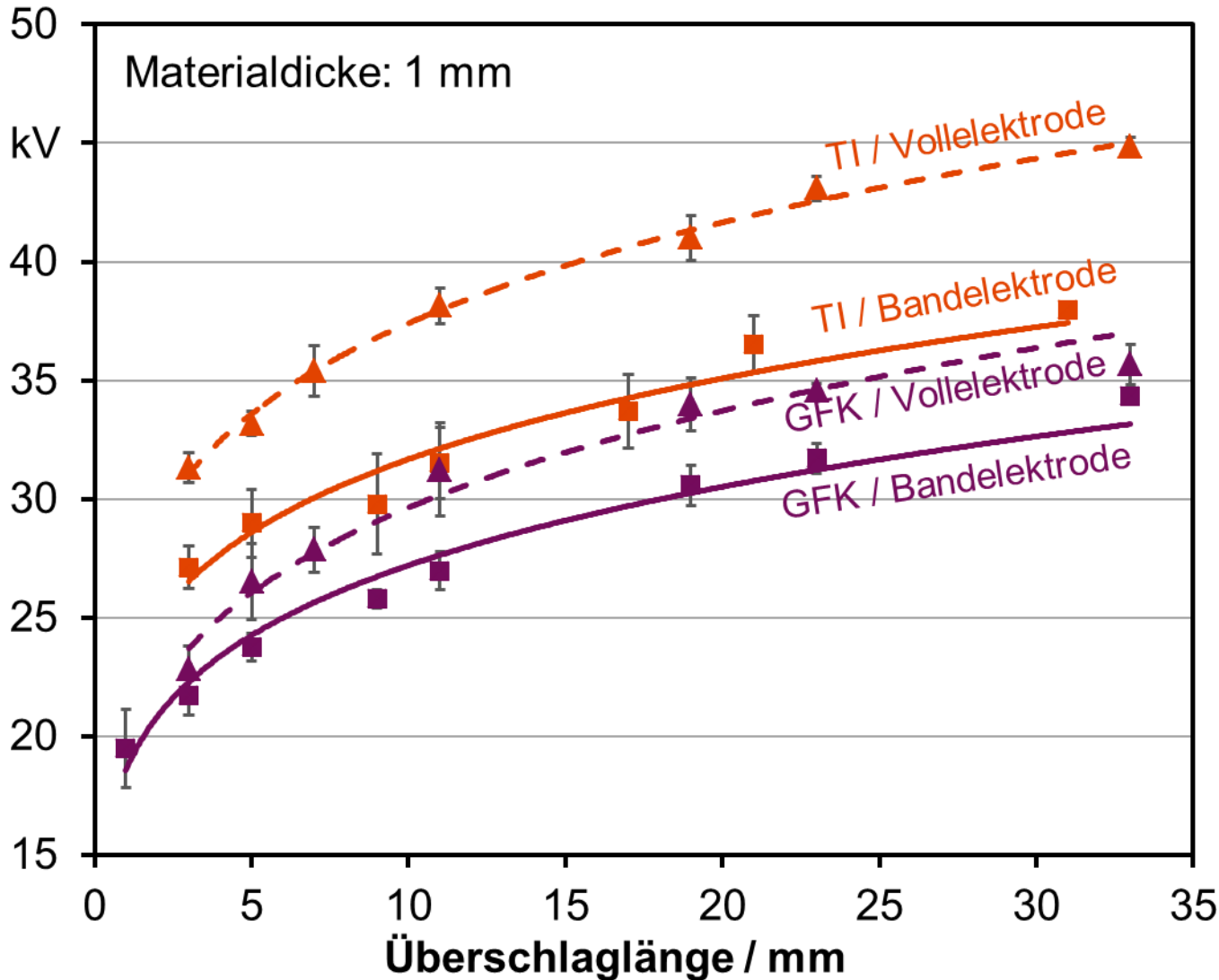


\* Hersteller: Weidmann Electrical Technology AG

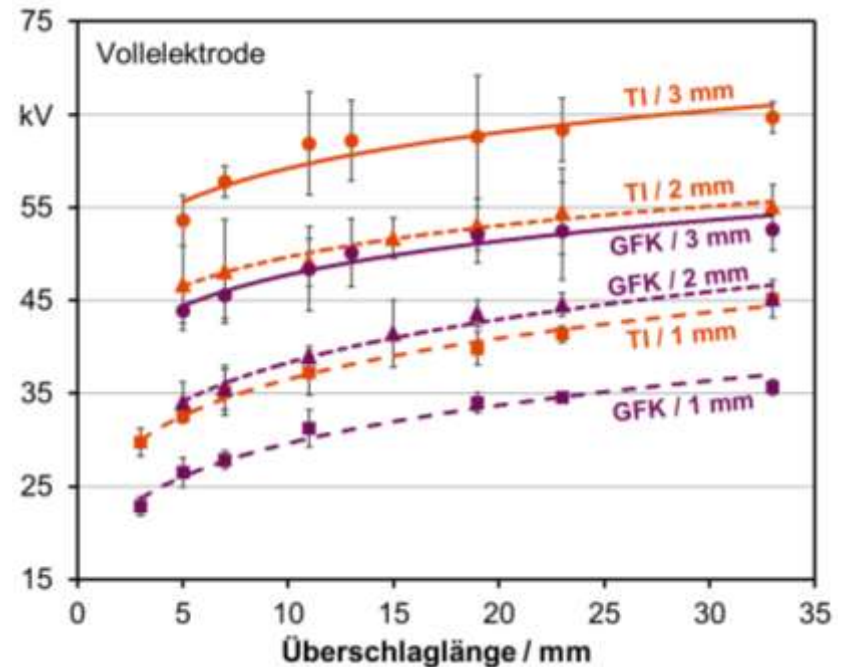
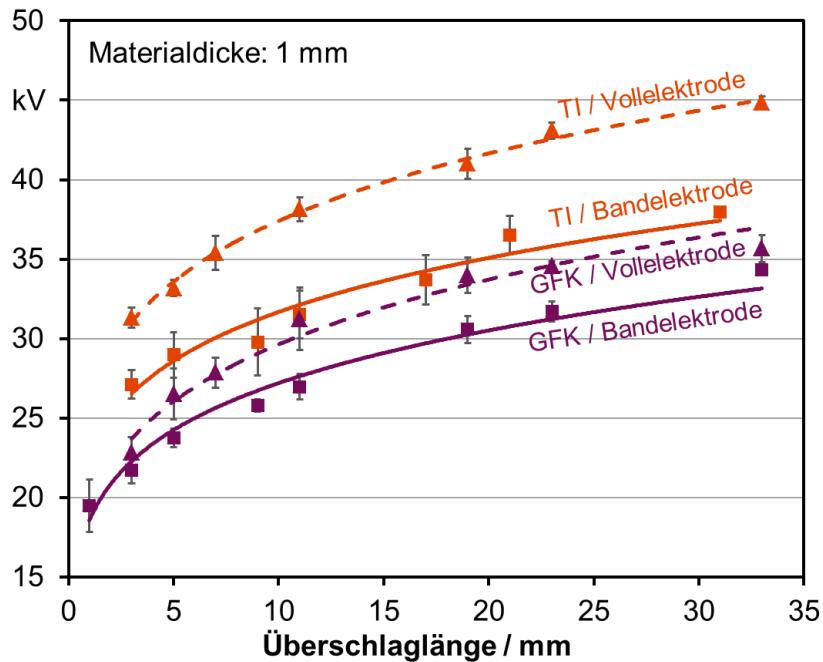
# Durchschlagfeldstärke $E_D = U_D/d$ von Plattenmaterialien in $LN_2$



# Überschlagsspannung von Plattenmaterialien in LN<sub>2</sub>



# Überschlagsspannung von Plattenmaterialien in LN<sub>2</sub>



- Vergrößerung der Überschlagspannung durch
  - größere Kantenverrundung der Elektroden
  - kleinere Permittivität → Transformerboard im Vorteil
  - größere Dicke des Materials
- Vergrößerung der Überschlaglänge nur begrenzt wirksam → Entladungseinsatz vermeiden

# Zusammenfassung

## Konventionelle Isolierpapiere als Alternative zu PPLP?

- Durchschlagsspannung in LN<sub>2</sub> höher oder vergleichbar mit den Werten in Isolieröl, jedoch gegenüber PPLP deutlich geringer
- Teilentladungseinsatz bei ähnlichen Spannungswerten
- Verlustfaktoren deutlich höher

## Konventionelle Isolierfolien (PET) als Alternative zu PI oder PTFE?

- Durchschlagsspannung in LN<sub>2</sub> vergleichbar mit PTFE, geringer als PI
- geringer Verlustfaktor zwischen den Werten von PTFE und PI
- kurzzeitige thermische Belastbarkeit bis ca. 150 °C (PI und PTFE > 300 °C)

## Transformerboard als Alternative zu GFK?

- Durchschlag- und Überschlagspannungen deutlich größer als bei GFK
- Verlustfaktor geringer im Vergleich zu GFK
- mechanische Eigenschaften in LN<sub>2</sub> im Vergleich zu GFK?