

Matthias Nilges*, Sebastian Krahmer *, Robert Adam *, Karsten Backhaus *, Christian Hildmann *,
Stephan Rupp~, Peter Schegner *

* TU Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH)
~ Maschinenfabrik Reinhausen, Geschäftsentwicklung Leistungselektronik

SYSTEMKONZEPTE VON DC-VERTEILNETZEN – ERHÖHUNG DER ANSCHLUSSLEISTUNG VON WIND-PARKS

EnInnov // Graz // 16.-18.02.2022

1

Projektvorstellung AC2DC

2

Belastbarkeit von AC-Kabeln unter DC

3

Allgemeine DC-Systemkonzepte

4

**Wirtschaftliche Bewertung am Beispiel eines
MT-MSDC-Windpark-Netzes**

1

Projektvorstellung AC2DC

2

Belastbarkeit von AC-Kabeln unter DC

3

Allgemeine DC-Systemkonzepte

4

Wirtschaftliche Bewertung am Beispiel eines
MT-MSDC-Windpark-Netzes

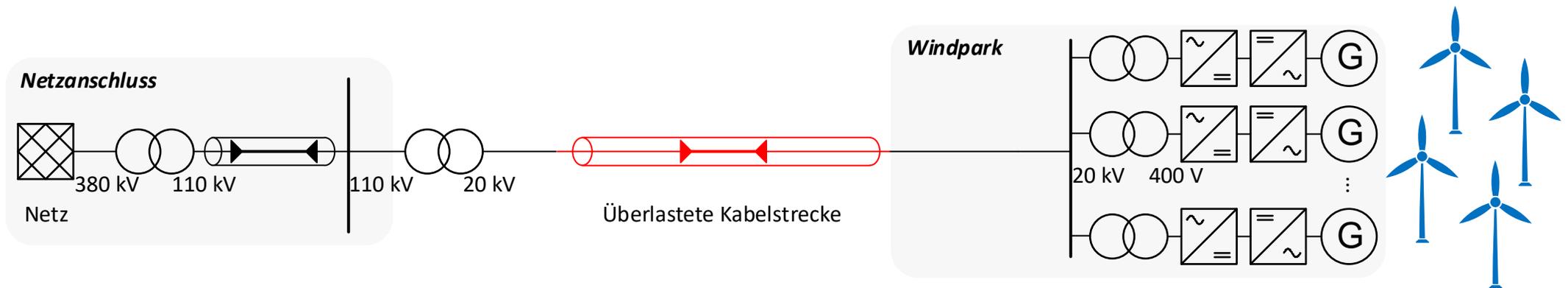
Motivation

Vielfältige Herausforderungen im Netz

- Steigende Forderung zu Beiträgen an Systemdienstleistungen
- Umkehr von Leistungsflüssen
- Neue leistungsintensive Verbraucher
- Überlastung von Bestandsleitungen

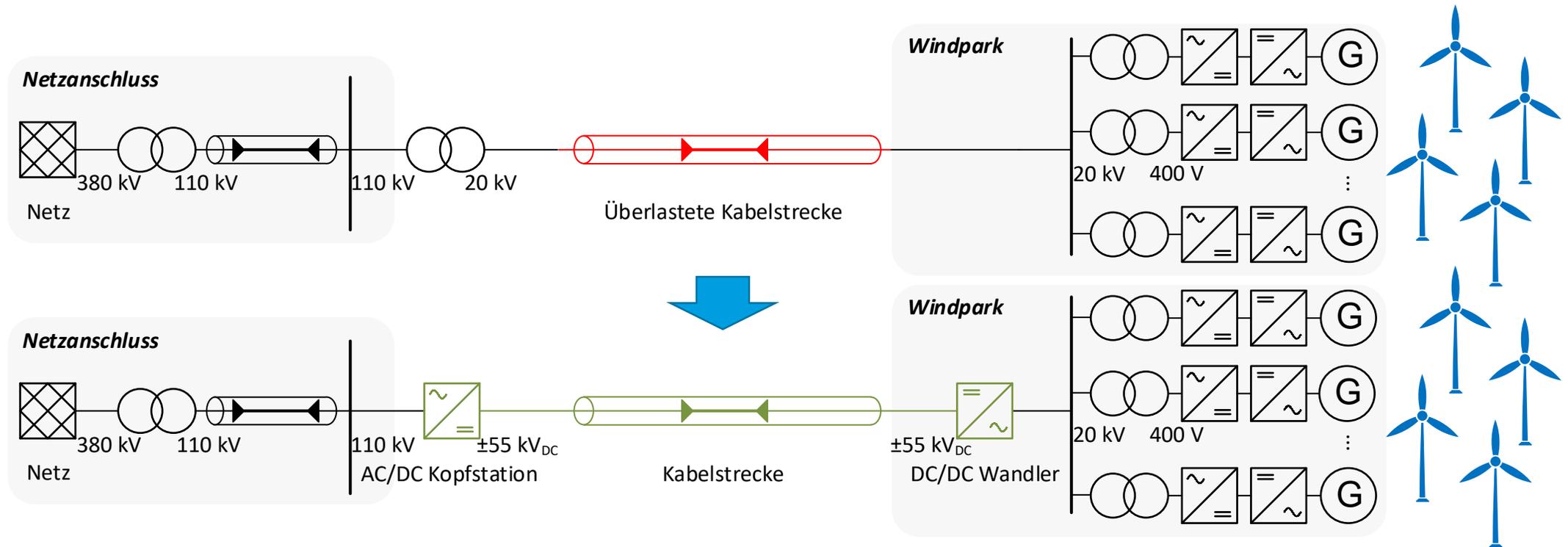
Studien zu Gleichspannungsnetzen in Verteilnetzen sind bereits angelaufen

- ETG-Studie "Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung", 2019
- CIGRE WG C6.31 "Medium voltage direct current (MVDC) grid feasibility study", 2020



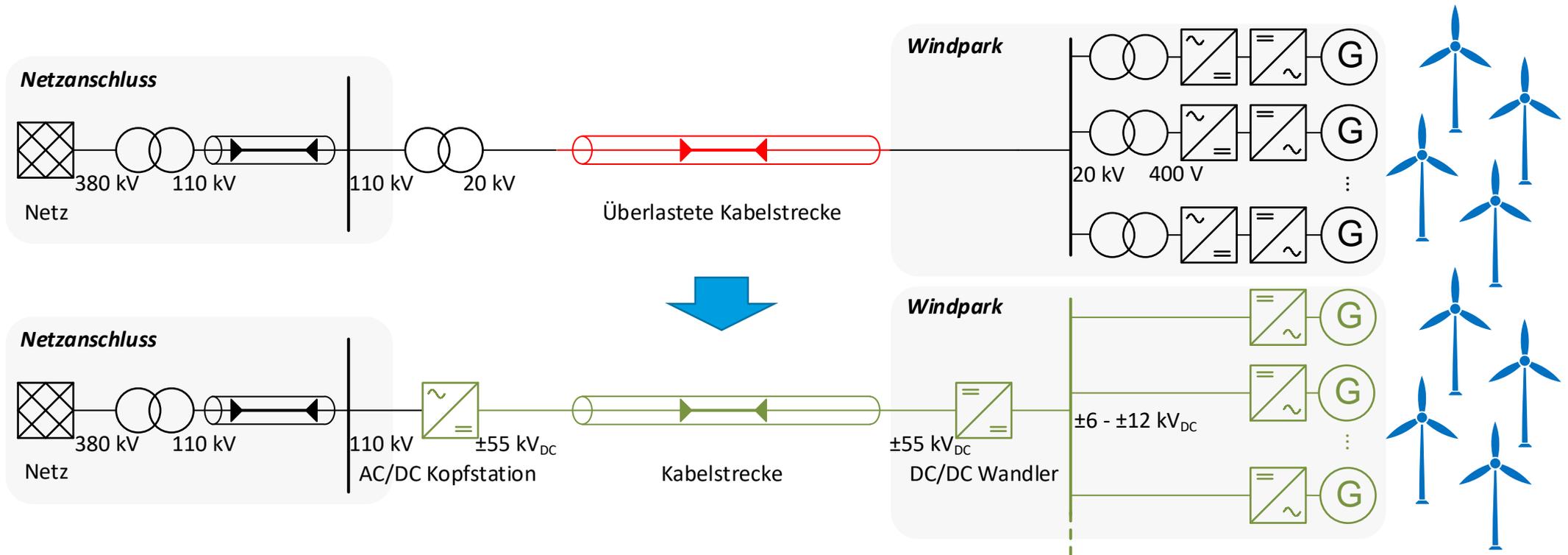
Lösungsansätze für überlastete Leitung

- DC-Stecke mit höherer Spannung
- Blindleistungsbereitstellung von WEAs entkoppelt



Lösungsansätze für überlastete Leitung / Repowering

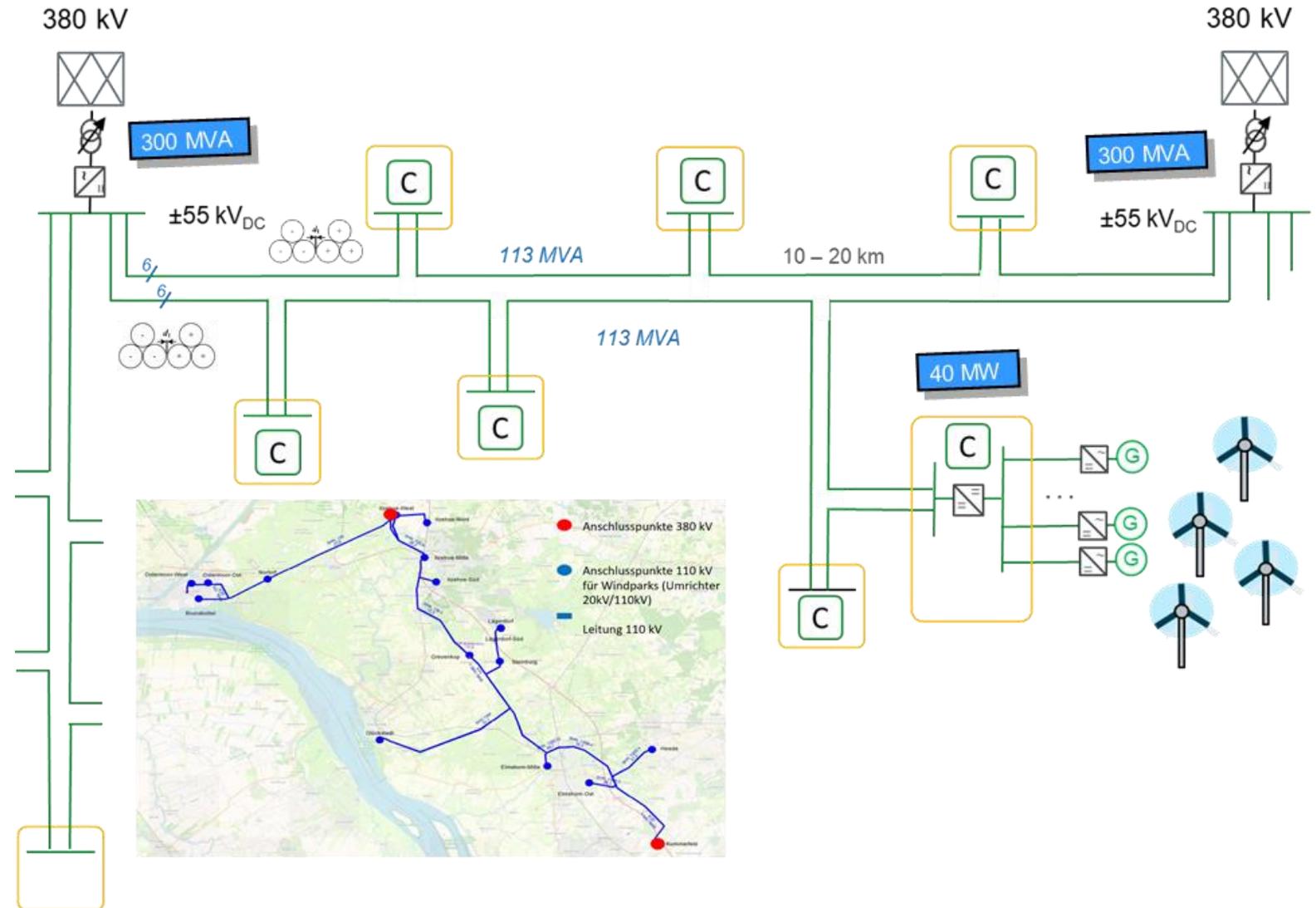
- DC-Stecke mit höherer Spannung
- Blindleistungsbereitstellung von WEAs entkoppelt
- Effizienzsteigerung durch vollständige DC-Durchdringung



Zukunftsvisionen zum Anschluss von Windparks im MSDC-Netz

Betrieb eines MT-MSDC-Erzeugernetzes als konventionelles Kraftwerk

- Verbund vieler Kleinkraftwerke (WEA/Photovoltaik)
- Momentanreserve durch Anschluss von SuperCaps
- Batteriespeicher für Primärregelleistung
- Sekundär- und Tertiärregelung durch Elektrolyseure, Brennstoffzellen, etc.



Vorteile und Herausforderungen von DC-Netzen

Vorteile

- Erhöhte Übertragungsfähigkeit
- Keine Leitungsbelastung durch Übertragung von Blindleistung
- Netzentkopplung durch Voltage source converters (VSCs)
 - *unterstützen die Spannungshaltung* in vorgelagerten Netzen durch Bereitstellung von Blindleistung
 - *verbessern Power Quality* durch Entkopplung nachgelagerter AC-Netze
- Netzanschluss von DEAs kann effizienter ausfallen (keine DC/AC-Wandlung)

Herausforderungen

Betriebsmittel

- Umnutzung/Prüfung bestehender AC-Kabelstrecken
- Muffen und Endverschlüsse im Bereich höherer DC-Mittelspannung

Netzbetrieb

- Systemkonzepte
- DC-Anschlussrichtlinie
 - *Zuordnung der Netzbetriebsmittel zu Netz- oder Anlagenbetreiber*
- Wirtschaftlichkeit des Projekts
 - *Umrichter Kosten ↔ Flexibilität*

1

Projektvorstellung AC2DC

2

Belastbarkeit von AC-Kabeln unter DC

3

Allgemeine DC-Systemkonzepte

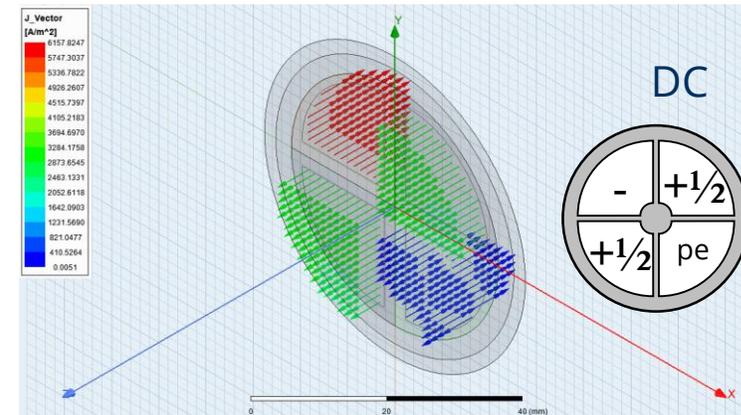
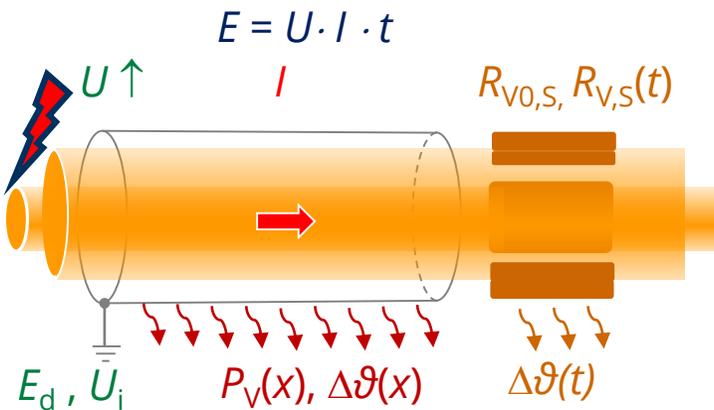
4

Wirtschaftliche Bewertung am Beispiel eines
MT-MSDC-Windpark-Netzes

DC-Strombelastbarkeit – Kabelerwärmung

Wärmequellen bei DC-Betrieb von Kabeln

- Erwärmung infolge von Verlustleistung
- Unterschiedliche Wärmequellen bei AC- und DC-Betrieb
- Verifizierung von 2D- und 3D-FEM-Modellen durch Experimente



Stromdichteverteilung im NAYY 4 x 240

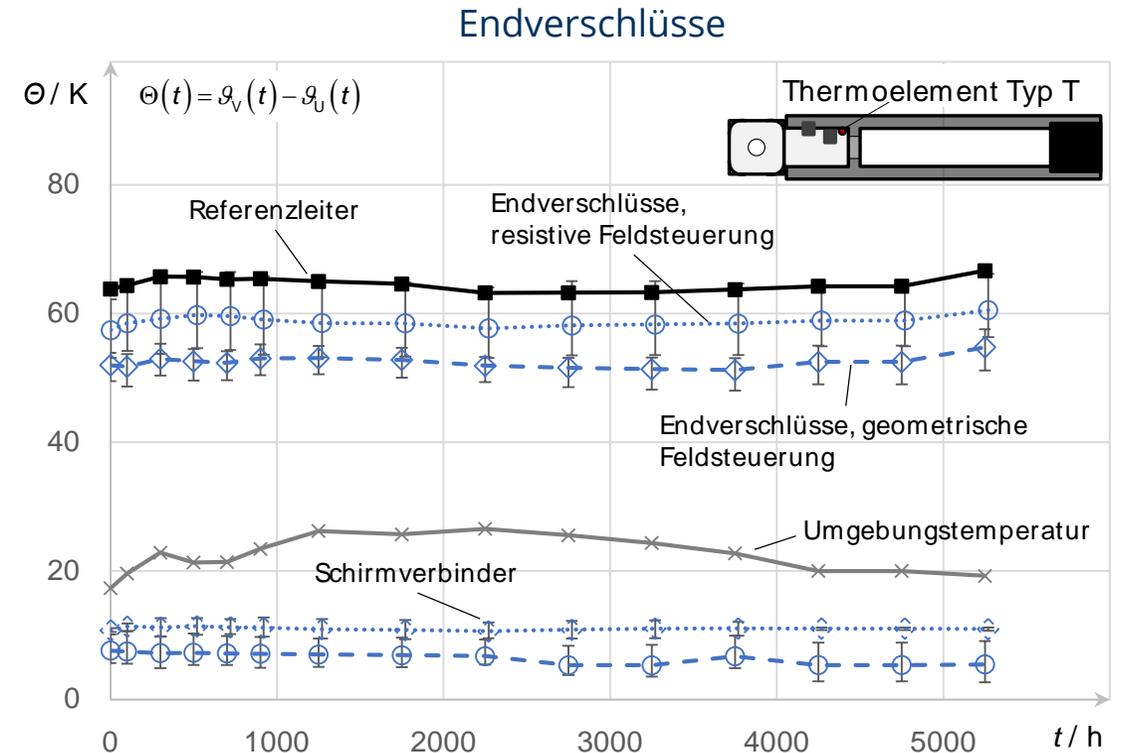
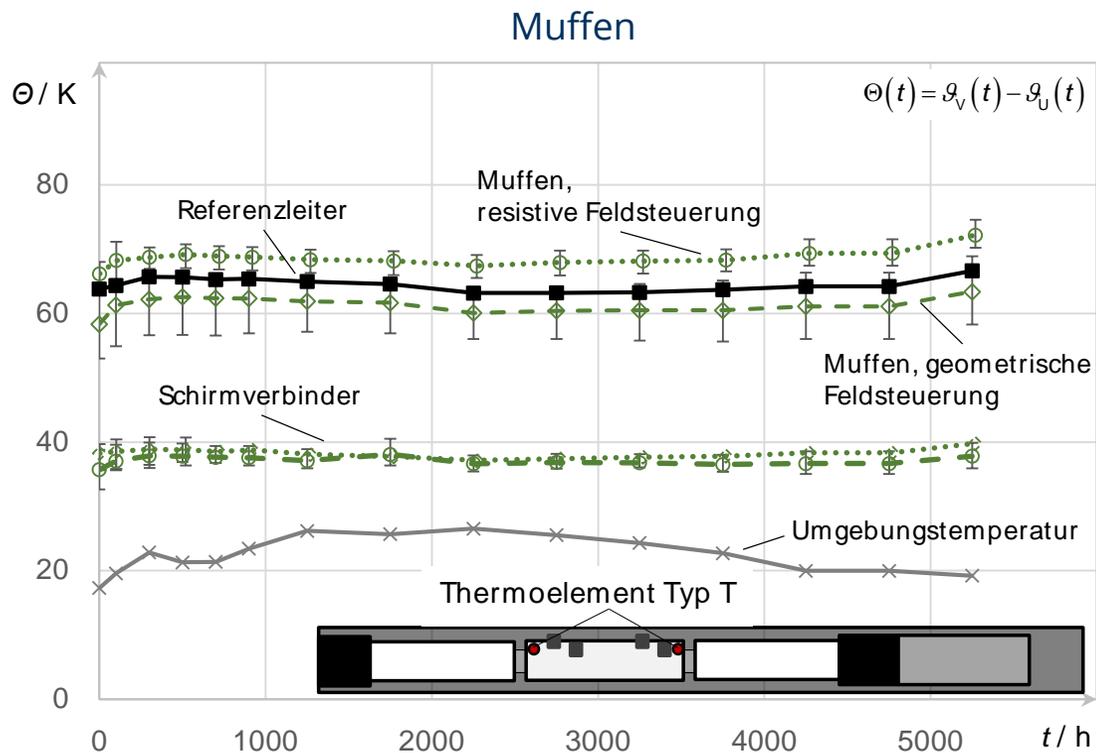
Vorläufiges Fazit

- **Geringfügig höhere Strombelastbarkeit** der Kabel als unter AC
- **Grenzen hochfrequenter AC-Anteile** in DC-Netzen sind relevant und zu **definieren**

DC-Strombelastbarkeit – Kabelgarnituren

Langzeitverhalten stromführender Verbindungen

- Ausgangswiderstände und Alterung zeigen **gleiche Abhängigkeit wie bei AC**
- Elektromigration als zusätzlicher Alterungsmechanismus nicht in Erscheinung getreten



DC-Spannungsbelastbarkeit

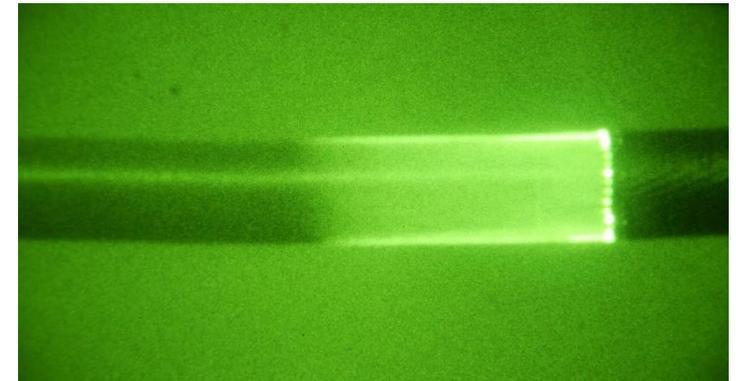
Langzeitverhalten DC-belasteter PVC- und PE-Isolierungen

- Fokus: NA2XS(F)2Y MS-Kabel
- Bewertung des Einflusses der Raumladungen auf Feldverteilung gegenüber AC-Betrieb
- Untersuchung betriebsgealterter Kabel
- Gezielte Störstelle mittels Nadel in Mantel

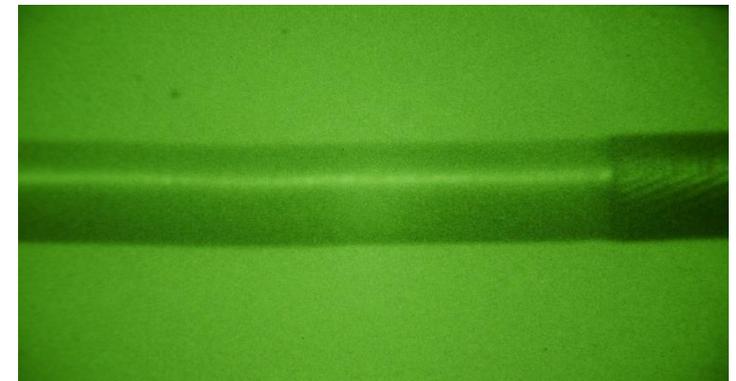
Dauerbetrieb bei 60 kV DC

- **Kein Versagen der Isolierung** trotz künstlicher Fehlstellen
- Keine Erosionserscheinungen an Kabelenden
- Deutlich **geringere Teilentladungen** gegenüber AC-Belastung
→ Entstehen von Raumladungsgebieten (positive Wirkung)
- Ausgestaltung der Prüfungsprozedur für Bestimmung der Durchschlagsspannung offen

Dauerbetrieb bei 60kV DC möglich



Gleitentladungen mit ca. 10 cm Länge bei $\hat{U}_{AC} = 60 \text{ kV}$



Teilentladungsfrei durch stabilisierende Ladungen auf der XLPE-Oberfläche bei $U_{DC} = 60 \text{ kV}$

1

Projektvorstellung AC2DC

2

Belastbarkeit von AC-Kabeln unter DC

3

Allgemeine DC-Systemkonzepte

4

Wirtschaftliche Bewertung am Beispiel eines
MT-MSDC-Windpark-Netzes

DC-Systemkonzepte

Niederspannung ($\leq 1,5$ kV DC)

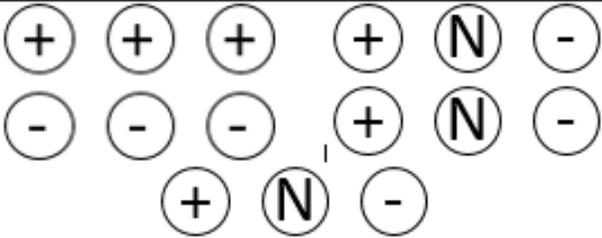
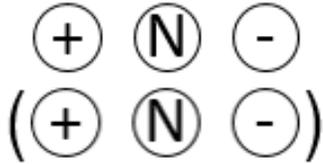
- Kein dauerhafter DC-Betriebserdstrom zulässig
- TN-S-Netz mit separatem Neutraleiter

Einsatzzweck	Polkonf.	Spannung	Kabelkonf.	Netzkonf.
Ladeinfrastruktur	unipolar	1,5 kV		TT / IT
	bipolar	± 750 V		
Hausversorgung	bipolar	± 750 V		TN-S
				TN-S
Industriernetze	bipolar	± 750 V		TN-S
				TT

DC-Systemkonzepte

Mittelspannung (~ 55 kV DC)

- Beste Auslastung bestehender Kabelsystem bei DC-Doppelsystemen
- Ersatz eines 110-kV-AC-Systems durch 2x ± 55 -kV-DC-Systeme

Einsatzzweck	Polkonf.	Spannung	Kabelkonf.
Galvanisch entkoppelt	bipolar	bis ± 55 kV	
Galvanisch gekoppelt	bipolar	bis ± 55 kV	

1

Projektvorstellung AC2DC

2

Belastbarkeit von AC-Kabeln unter DC

3

Allgemeine DC-Systemkonzepte

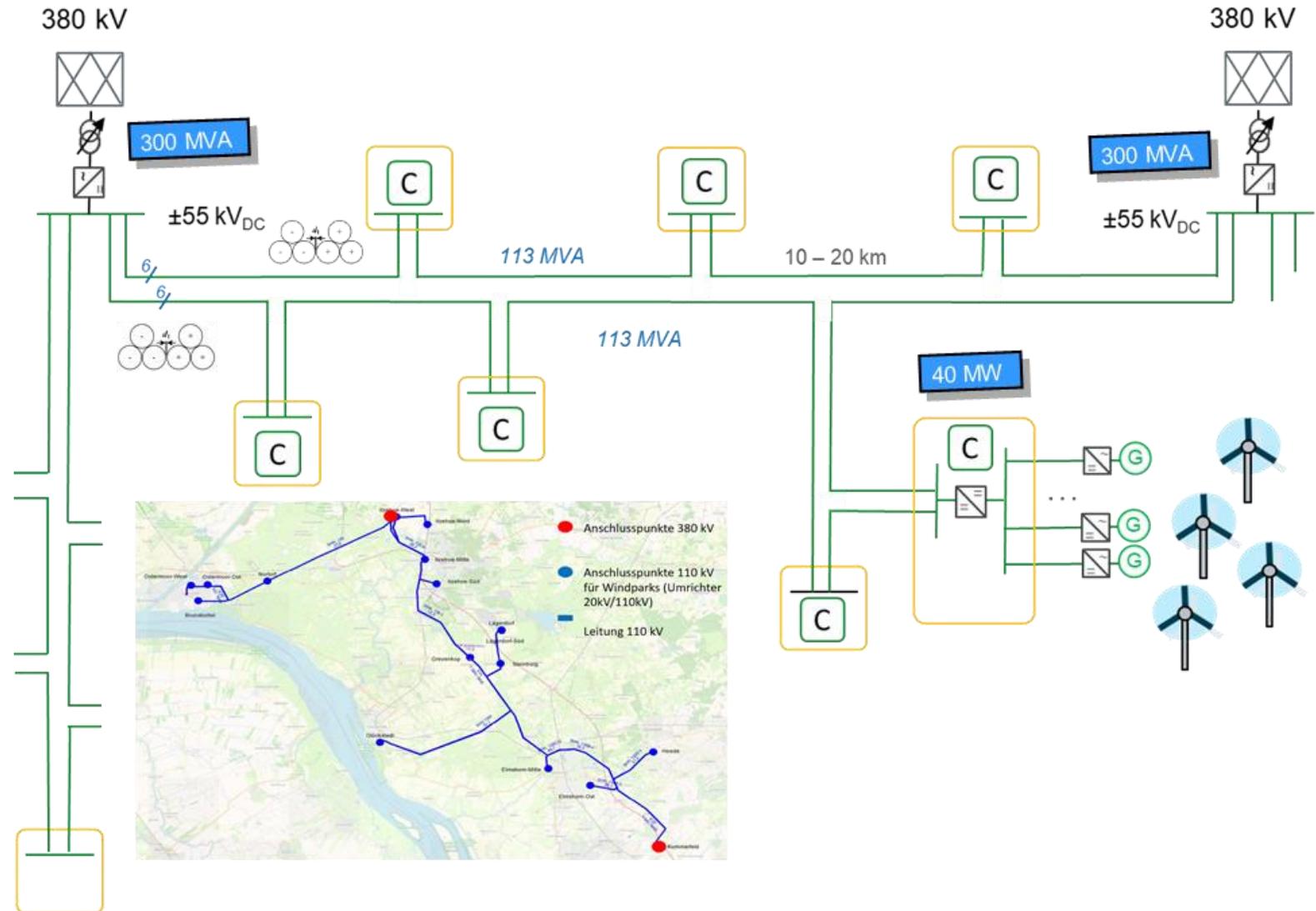
4

Wirtschaftliche Bewertung am Beispiel eines
MT-MSDC-Windpark-Netzes

Windpark am MSDC-Netz - Wirtschaftlichkeitsanalyse

Annahmen

- Gegenüberstellung Neubaukosten
- 3x110-kV-Kabel 800mm² werden ersetzt durch 2x 3x20-kV-Kabel 240 mm²
- 20-kV-AC-Kabel werden mit ±55 kV betrieben
- Kosten
 - $\frac{\text{Umrichter}}{\text{Transformator}} = 10$
 - Kabel & Verlegung $\frac{20}{110} = \frac{1}{3}$
 - Schaltanlagen $\frac{\text{DC}}{\text{AC}} = 1$



Windpark am MSDC-Netz – Wirtschaftlichkeitsanalyse

Finanzielle Bewertung

- Noch Mehrkosten von 25 % für MSDC-Netz-Auslegung

Trend:

- Fallende Halbleiterkosten → sinkende Umrichter Kosten (vgl. Anlagenumrichter)
- Steigende Rohstoffkosten → steigende Kabel- und Transformator Kosten

Netztechnische Bewertung

- Begrenzung von Fehlerströmen durch intrinsisches Umrichterverhalten
- Netzführendes Verhalten des AC/DC-Umrichters gemeinschaftlich für Windparks → Kraftwerksähnlicher Betrieb
- Netzanschlusspunkt (NAP) und Anschlussrichtlinie
 - NAP am AC/DC-Umrichter ← → NAP am DC/DC-Umrichter
- Einfacher Anschluss weiterer DC-Anschlussnehmer → ggf. vollwertiger Kraftwerksbetrieb

Fazit

Fazit

Zusammenfassung

20-kV-AC-Doppelkabelsystem mit ± 55 kV DC einsetzbar

- zur kurzfristigen Erhöhung der Übertragungsleistung einer Kabelstrecke
- als Alternative zum Einsatz von 110-kV-AC-Systemen

Tradeoff von Kosten gegenüber Systemdienstleistungen

- Stromrichtertechnik ist (noch) teurer
- Regelfähigkeit verbessert
- diverse Systemdienstleistungen abbildbar

Ausblick

- Galvanisch trennende DC/DC-Wandler stehen kurz vor Feldtest
- Machbarkeitsnachweis im Feld soll in den nächsten 3 Jahren erfolgen

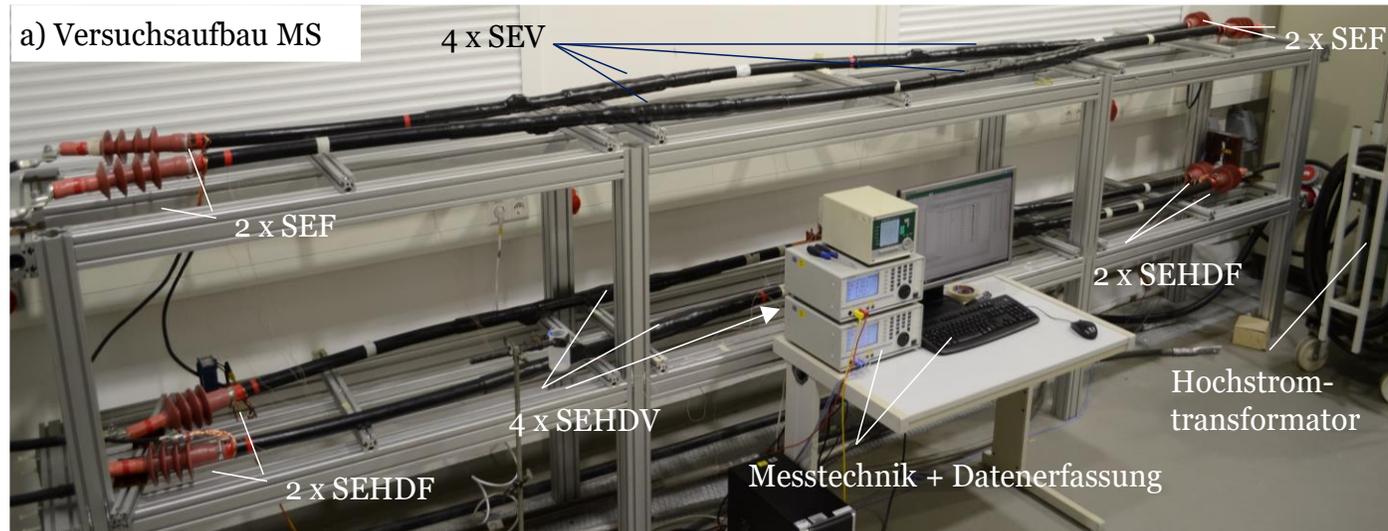
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Literatur

- [1] OTH Regensburg, INA GmbH, „Zukünftige Bereitstellung von Blindleistung und anderen Maßnahmen für die Netzsicherheit,“ BMWi, 2016.
- [2] RWE, [Online]. Available: <https://www.rwe.com/unsere-portfolio-leistungen/innovation-und-technik/projektvorhaben/megabatterie-plus-wasserkraft>. [Zugriff am 13.01.2022].
- [3] LEAG. [Online]. Available: <https://www.leag.de/de/bigbattery/>. [Zugriff am 13.01.2022].
- [4] H. Weber, „Von der Frequenzregelung mit Schwungmassen (netzstützende Maßnahmen) zur Winkelregelung mit Umrichtern (netzbildende Maßnahmen),“ in 12. ETG/GMA-Fachtagung „Netzregelung und Systemführung“, Berlin, 2017.
- [5] „Reallabor Referenzkraftwerk Lausitz (RefLau),“ [Online]. Available: <https://www.energiequelle.de/content/wasserstoff-speicherkraftwerk-soll-errichtet-werden/>. [Zugriff am 13.01.2022].
- [6] C. Heising, D. Meyer, T. Hennig, K. Vennemann, G. Deiml, W. Winter, H. Wrede, J. Lehner, J. Weidner und J. Fortmann, „Need for Grid-Forming Converter-Control in Future System-Split Scenarios,“ in 18th Wind Integration Workshop, Dublin, 2019.
- [7] Positionspapier der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, „Notwendigkeit der Entwicklung netzbildender STATCOM-Anlagen,“ 2020.
- [8] S. Kraemer, S. Rupp, R. Adam, K. Backhaus, C. Hildmann, M. Nilges und P. Schegner, „Conversion of Existing AC into DC Cable Links in Distribution Grids: Benefits and Challenges,“ in ETG Congress 2021, Online, 2021.
- [9] F. Berger, „Getestet: Isolationsverhalten von Leitungen bei Gleichspannung,“ ETZ, Nr. 5, 2019.
- [10] Y. Murata und e. al., „Development of High Voltage DC-XLPE Cable System,“ SEI Technical Review, pp. 55-62, April 2013.
- [11] B. Marungsri, A. Rawangpai und N. Chomnawang, „Investigation Life Time Model of 22 kV XLPE Cable for Distribution System Applications in Thailand,“ WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Volume 10, Issue 6, July 2011.
- [12] Brugg-Kabel, „High-Voltage XLPE Cable Systems - Technical User Guide,“ 2006.
- [13] A. Mendelson und e. al., „Evaluation of tree resistant XLPE (TR-XLPE) and EPR insulated 35 kV cables after 17 years of field service,“ in Jicable, Versailles, 2003.
- [14] F. B. Lalam und F. Djemmal, „DC Electrical Ageing of XLPE under Hydrostatic Pressure,“ Advances in Materials Science and Engineering, pp. 1-5, 2017.
- [15] G. Montanari, J. Ghinello, F. Peruzzotti und M. Albertini, „Endurance characteristics of XLPE compounds under DC voltage,“ in 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, IEEE, Västerås, 1998.
- [16] IEEE Std 1366-2012 - IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices.
- [17] DIN EN 60038 (VDE 175-1):2012-04 CENELEC Normspannungen.
- [18] D. Van Hertem, O. Gomis-Bellmunt und J. Liang, HVDC Grids: For Offshore and Supergrid of the Future, Wiley-IEEE Press, 2016.
- [19] C. Wagner, I. Schlecht und M. Bucksteeg, „Marktgestützte Beschaffung von Schwarzstartfähigkeit - Bericht im Vorhaben „SDL-Zukunft“,“ 2020.
- [20] Deutsche Energieagentur (dena), „dena-Studie Systemsicherheit 2050,“ Berlin, 2020.
- [21] UMZUG - Netzstabilität durch Momentanreserve in stromrichterdominierten Netzen (Umbruch zwischen stromrichter- und generatorbasiertem Energiesystem), Förderkennzeichen 03EI4020A-D, 2021 - 2024.

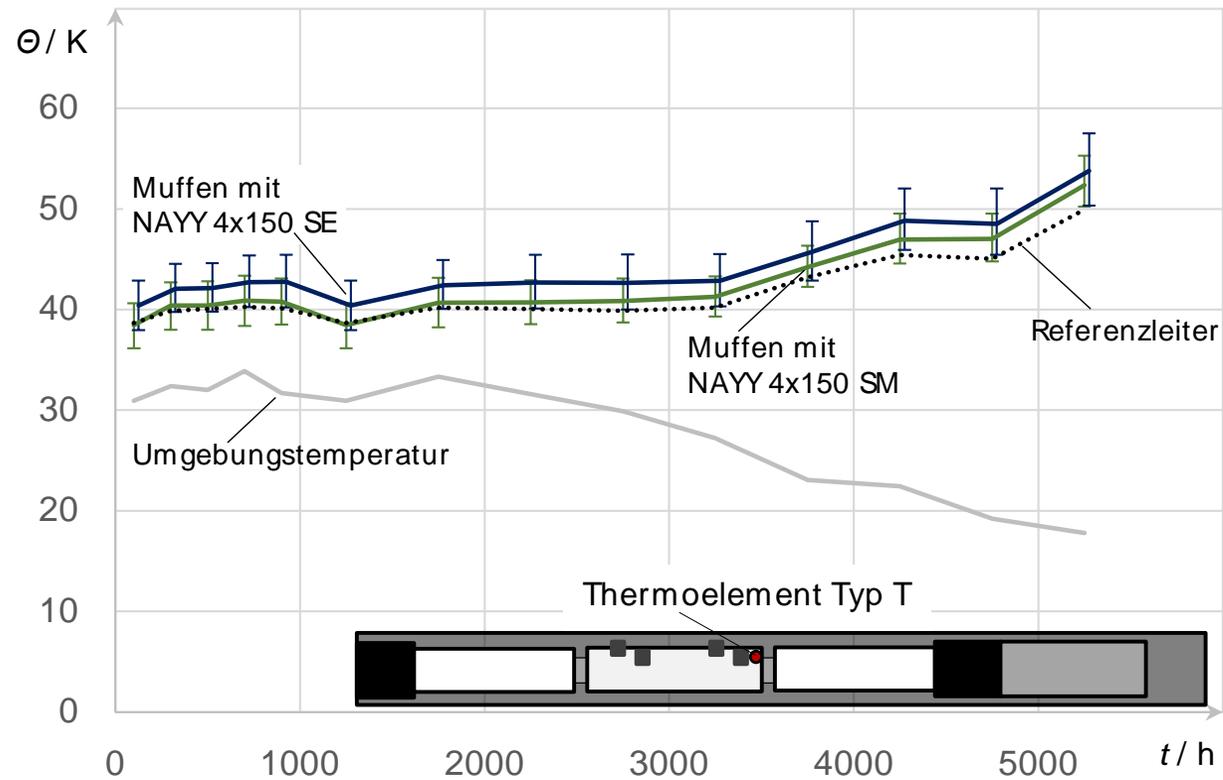
DC-Strombelastbarkeit - Kabelgarnituren (Experimentaufbau)



DC-Strombelastbarkeit – Kabelgarnituren

Muffen für NAYY NS-Kabel

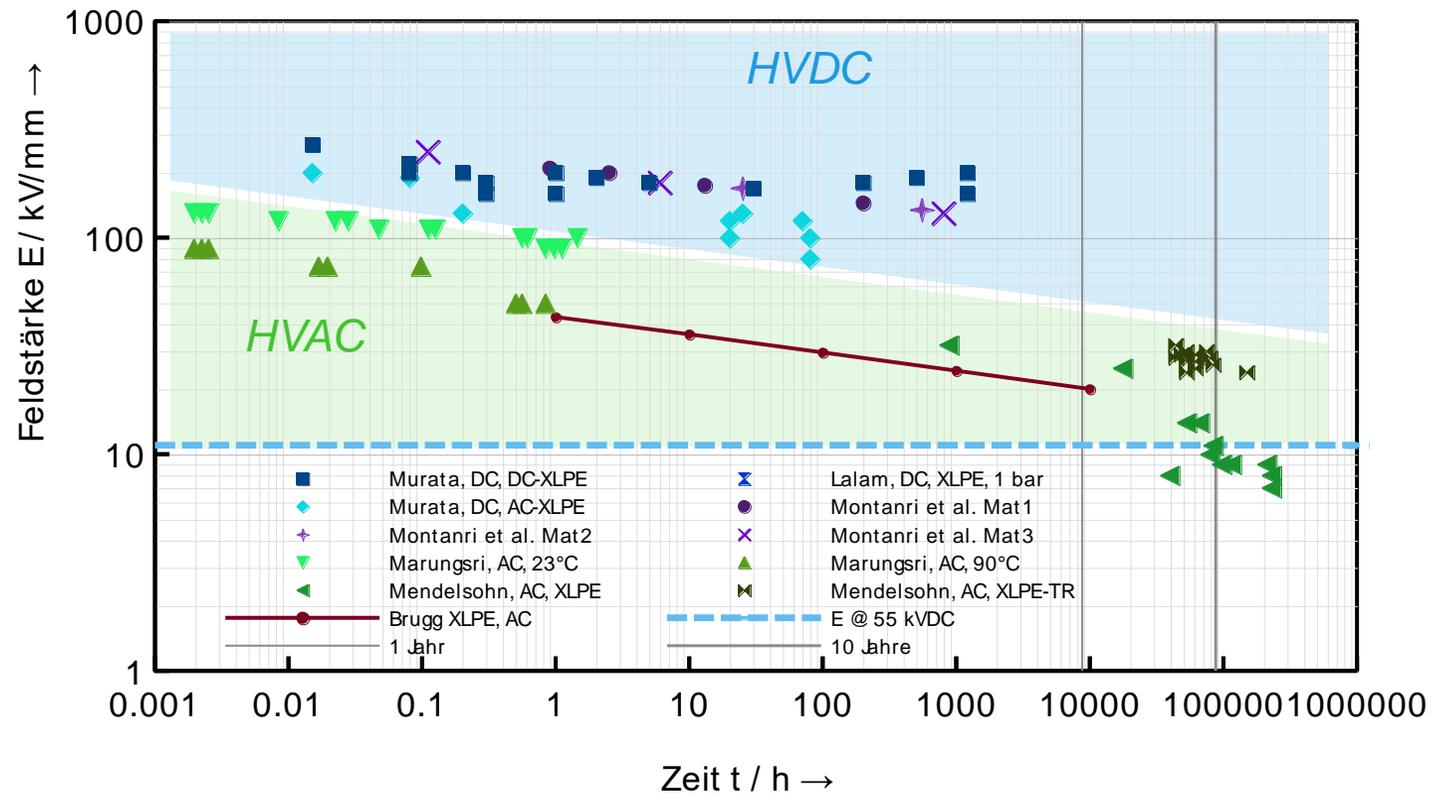
- Stabiles elektrisches Langzeitverhalten nach über 5000 h



DC-Spannungsbelastbarkeit

Literaturlauswertung

- Vergleich der Lebensdauer bezüglich der Spannungsform für XLPE-Isolierung [10 – 15]



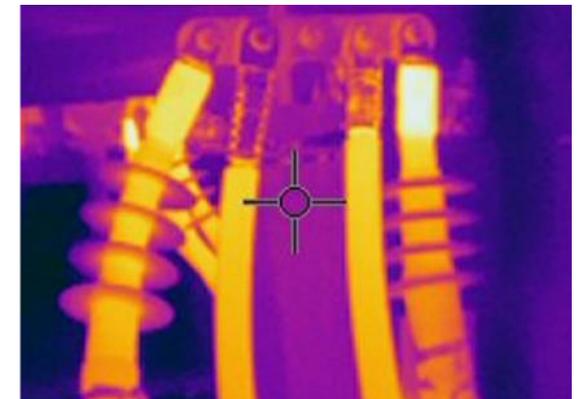
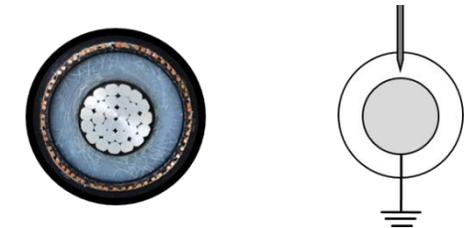
DC-Spannungsbelastbarkeit

Langzeitverhalten DC-belasteter PVC- und PE-Isolierungen

- Fokus: NA2XS(F)2Y MS-Kabel
- Bewertung des Einflusses der Raumladungen auf Feldverteilung gegenüber AC-Betrieb
- Untersuchung betriebsgealterter Kabel
- Gezielte Störstelle mittels Nadel in Mantel

Dauerbetrieb bei 60 kV DC

- **Kein Versagen der Isolierung** trotz künstlicher Fehlstellen
- Keine Erosionserscheinungen an Kabelenden
- Deutlich **geringere Teilentladungen** gegenüber AC-Belastung
→ Entstehen von Raumladungsgebieten (positive Wirkung)
- Ausgestaltung der Prüfungsprozedur für Bestimmung Durchschlagspannung offen



Dauerbetrieb bei 60kV DC möglich

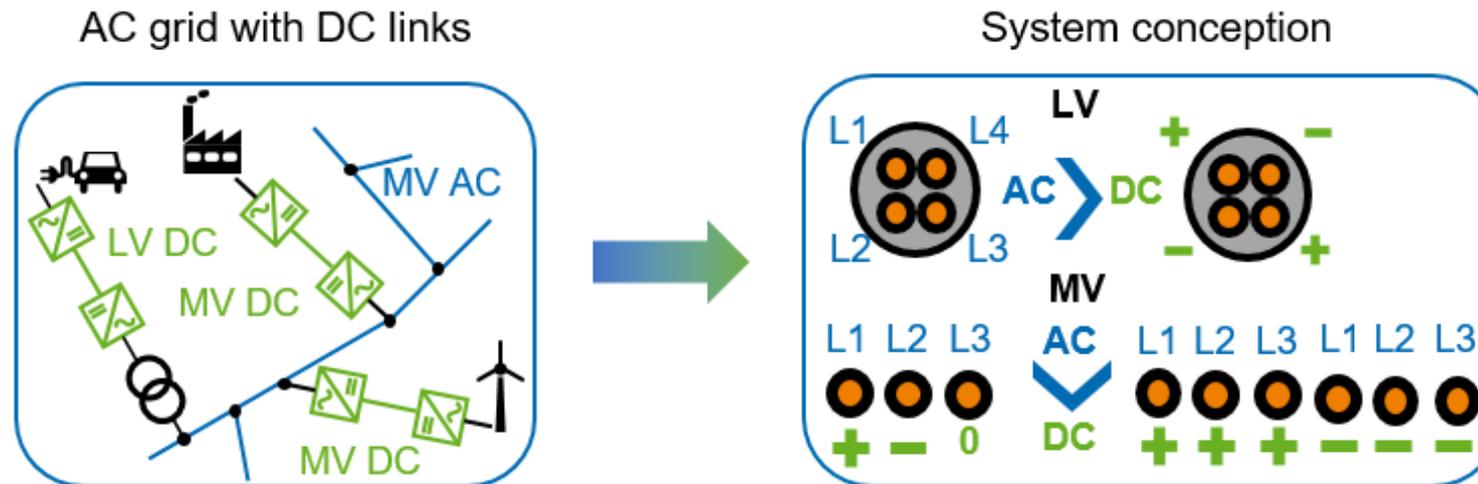
Motivation

Vielfältige Probleme im Netz

- Steigende Forderung zu Beiträgen an Systemdienstleistungen
- Umkehr von Leistungsflüssen
- Neue leistungsintensive Verbraucher
- Überlastung von Bestandsleitungen

Studien zu Gleichspannungsnetzen in Verteilnetzen sind bereits angelaufen

- ETG-Studie "Gleichspannung in der elektrischen Energieverteilung", 2019
- CIGRE WG C6.31 "Medium voltage direct current (MVDC) grid feasibility study", 2020



DC-Strombelastbarkeit – Kabelgarnituren

Langzeitverhalten stromführender Verbindungen

- Ausgangswiderstände und Alterung abhängig von der Erwärmung
- Elektromigration als zusätzlicher Alterungsmechanismus möglich

Setup des Experiments

- Schraubverbinder mit geometrischer und resistiver Feldsteuerung in NS- und MS-Muffen
- Schraubkabelschuhe in MS-Endverschlüssen

- Messung der Temperatur im 60-s-Takt

- Adaptive Bestromung, sodass sich am Referenzleiter konst. Temperatur einstellt
 - PVC-NS-Kabel: Zielvorgabe 70 °C
 - PE-MS-Kabel: Zielvorgabe 90 °C

- Messung der Übertemperatur: $\Theta(t) = \vartheta_V(t) - \vartheta_U(t)$