



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL



innogy

ZIEHL VI

Mittwoch, 21.03.2018

## Hochtemperatur-Supraleiter als innovatives Planungselement in Großstädten

Dr.-Ing. Frank Merschel (VDE)  
innogy SE, Essen; Neue Technologien und Projekte

Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek; Sebastian Harnisch, M.Sc.  
Bergische Universität Wuppertal



1

Ausgangssituation

2

Machbarkeitsstudie:  
Prototyp „AmpaCity“

3

Ampacity 2-Studie –  
Ziele und Methodik

4

Ampacity 2-Studie –  
Ergebnisse

5

Fazit





BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL



# AUSGANGS- SITUATION

Warum Supraleiter?

# Hohe Energiedichten in Ballungsgebieten erfordern hohe Spannungsebenen.



## “Klassische Technik” in Großstadtnetzen

- überlagertes Hochspannungsnetz
- Transformatorstationen Hochspannung/Mittelspannung
- Mittel- und Niederspannungsnetz zur Weiterverteilung der Energie



## Konventionelle Kabel und innerstädtische Transformatorstationen

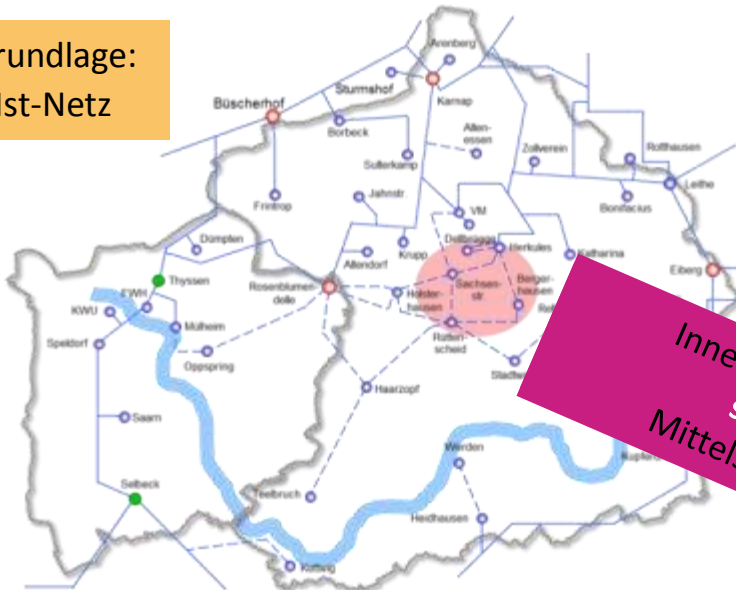
- haben geringe technische und wirtschaftliche Optimierungspotenziale und bieten nur eingeschränkte Möglichkeiten für die Neukonzeption von Netzstrukturen
- beanspruchen wegen hoher Spannungsebenen viel Platz und Volumen und belegen hochpreisige Standorte

## Alternative?

- Supraleitende Betriebsmittel?

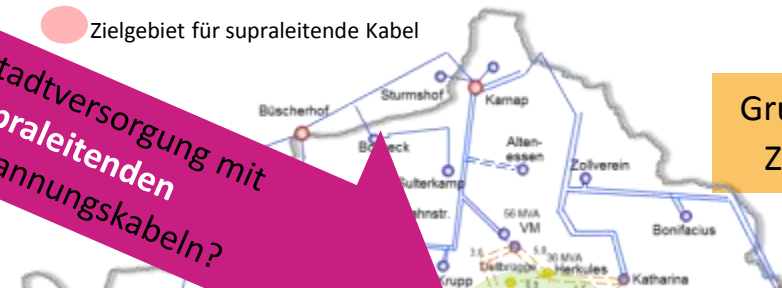
# Das Hochspannungsnetz im Bereich Essen/Mülheim

Grundlage:  
Ist-Netz



- Einspeisepunkte ins supraleitende 10-kV-Netz
- 380-kV-Umspannanlage
- 220-kV-Umspannanlage
- 110/10-kV-Anlage
- 10-kV-Schwerpunktstation
- 10-kV-Kabel supraleitend
- 110-kV-Kabel
- 110-kV-Freileitung
- Zielgebiet für supraleitende Kabel

Grundlage:  
Zielnetz



Innenstadtversorgung mit  
supraleitenden  
Mittelspannungskabeln?

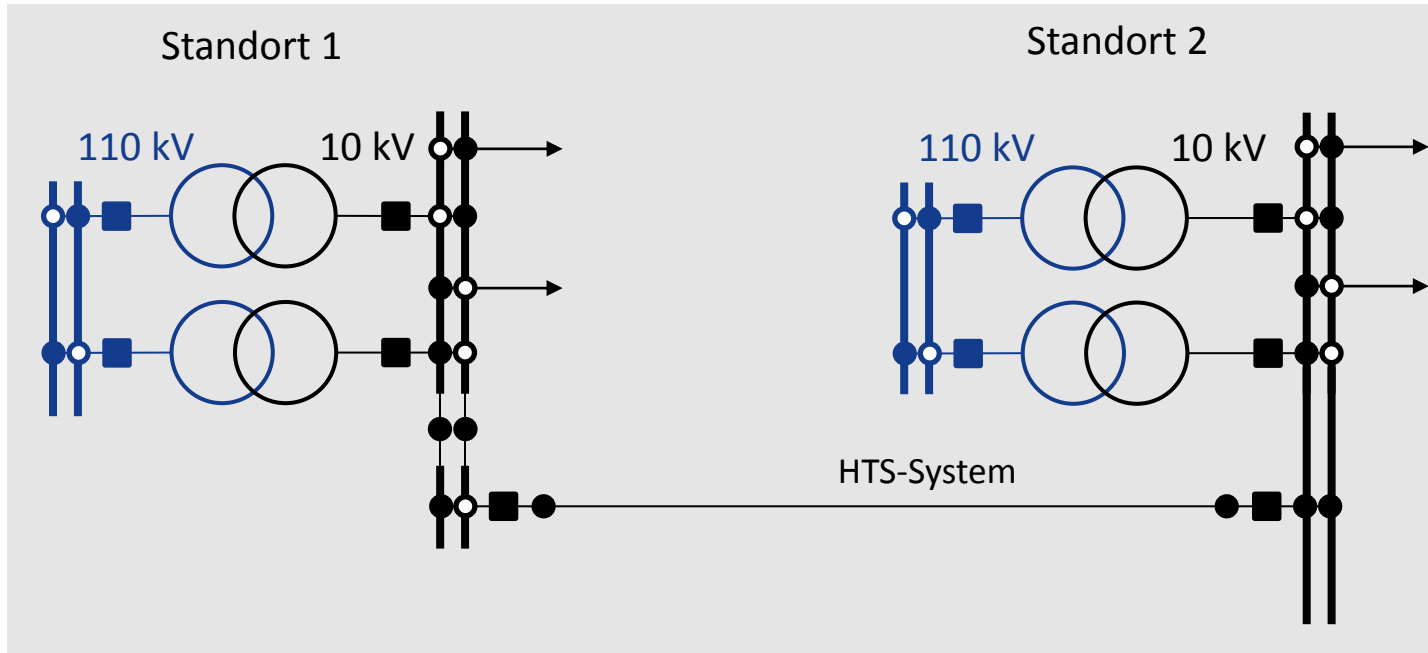
## Neue Randbedingungen durch Strukturwandel

- Im Ruhrgebiet starker Rückgang der Schwerindustrie
- Anforderungen an Leistung und räumliche Aufteilung der Netze verändert
- Netz-Neubewertung und Konzeption für optimiertes Zielnetz

**Unabdingbare Voraussetzung:**  
Supraleitende Betriebsmittel müssen

- > in bestehende Netze integrierbar sein
- > und mit konventioneller Technik harmonisieren.

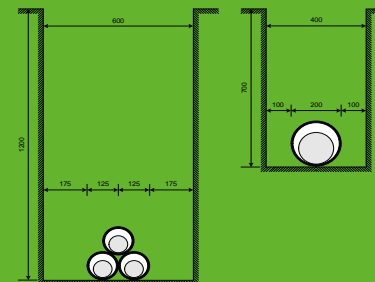
# Mittelspannungs-Hochtemperatur-Supraleiter



## Vorteile Supraleitung

- Geringerer Raumbedarf bei Anlagen und Trassen
- Geringerer Installationsaufwand
- Keine elektromagnetische Beeinflussung
- Wegfall von Umspannanlagen HS/MS
- Möglichkeiten für neue Netzstrukturen

→ „Doppelgarage statt Turnhalle“





# PROTOTYP

Pilotstrecke „AmpaCity“ in der  
Innenstadt von Essen

# Dies sind die Komponenten der Anlage (1)

## ■ Kabelsystem

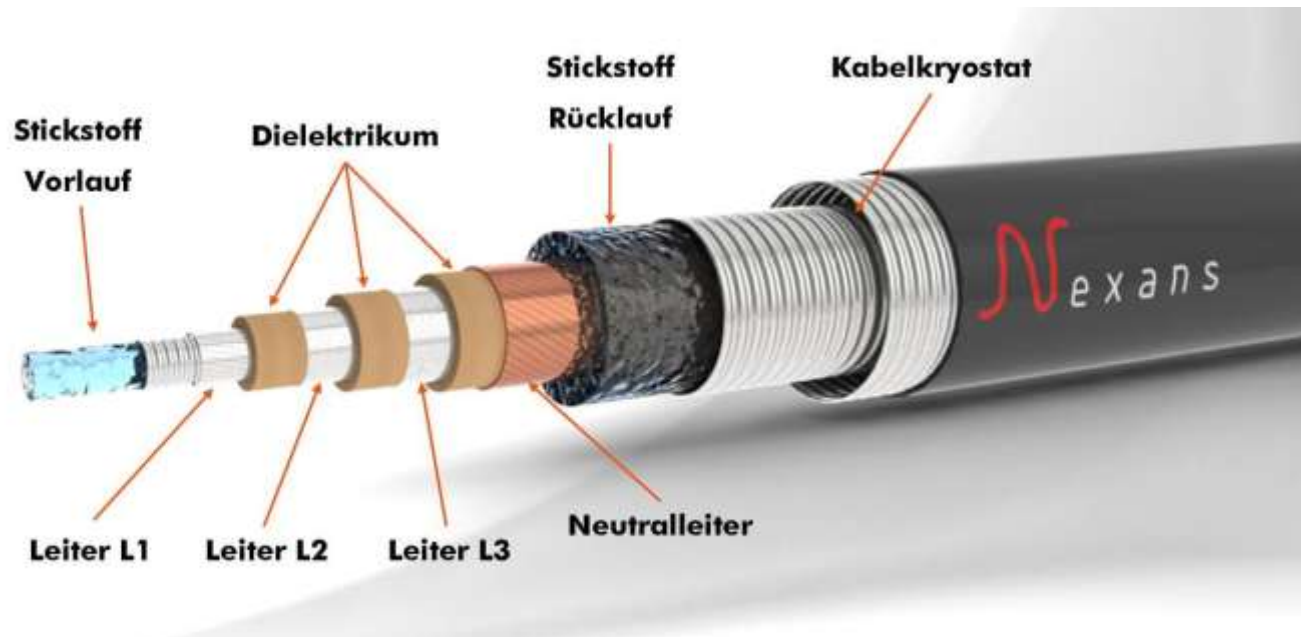
- Kabelader 

---

  - Stromtransport und Spannungsfestigkeit
  - Transport von flüssigem Stickstoff
- Kabelkryostat 

---

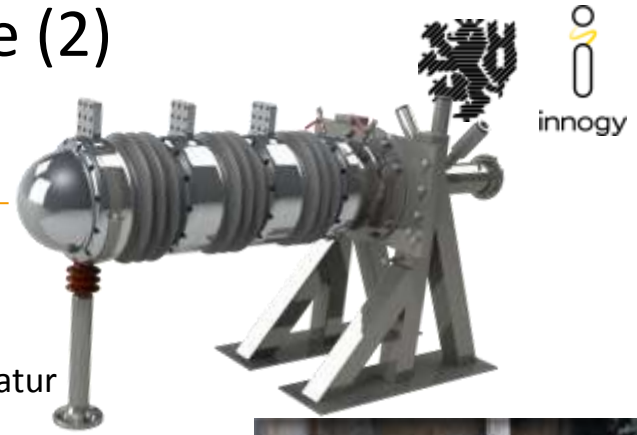
  - Thermische Isolierung der Kabelader
  - Transport von flüssigem Stickstoff



# Dies sind die Komponenten der Anlage (2)

## ■ **Kabelsystem**

- Endverschlüsse
  - Verbindung des Kabels mit Netz / Strombegrenzer, Anschluss Kühlanlage
  - Übergang zwischen Betriebs- und Umgebungstemperatur



- Verbindungsmuffe
  - Verbindung der beiden Teil-Kabellängen



## ■ **Kurzschlussstrombegrenzer**

- Schutz des HTS-Kabels bei Kurzschlüssen im Netz

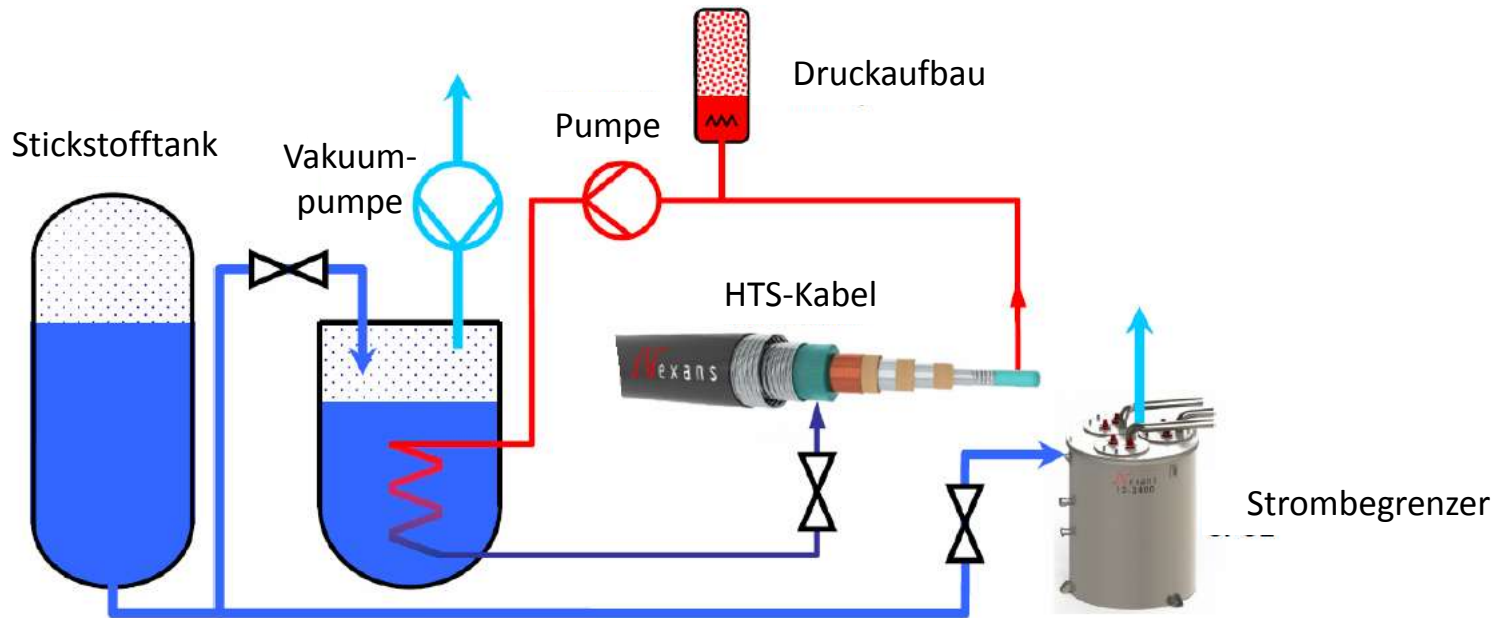


# Dies sind die Komponenten der Anlage (3)



## ■ Kühlanlage

- Bereitstellung Kühlleistung für Kabelsystem und Strombegrenzer



Prototyp

# Anordnung der Komponenten vor Ort



# Trassenverlauf

## Technische Spezifikation

- 1 km Entfernung zwischen den Anlagen
- 10 kV Betriebsspannung
- 2.310 A Bemessungs-Dauerstrom
- 40 MVA Dauerleistung



# Seit Inbetriebnahme (2014) problemlose Funktion, aber einige Optimierungen im laufenden Betrieb



## Symmetrierung der Erdkapazitäten

- Unsymmetrische Erdkapazitäten des HTS-Kabels durch nachträglichen Einbau von Kondensatoren symmetriert



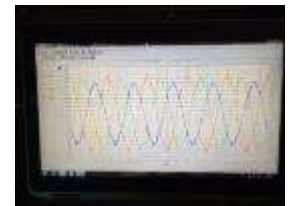
## Optimierung der Kühlanlage

- Modifizierung der Vakuumpumpen des Wärmetauschers nach Einfrierungen von feuchter Luft
- Weitere kleinere Optimierungen



## Anpassung der Systemüberwachung

- Erhöhung der Ansprechzeiten und der Messwerttoleranz nach KU für unterbrechungsfreien Betrieb



# Überprüfung des Verhaltens des HTS-Systems im gestörten Betrieb

## Versuche zum Kurzschlussverhalten des HTS-Systems im Betrieb

- Verhalten des Systems bei verschiedenen Kurzschluss- und Erdschlusszenarien

## Wesentliche Ergebnisse

- Alle geprüften Szenarien plangemäß abgelaufen
- Einwandfreie Funktion und Reaktion sowohl des Kurzschlussstrombegrenzers als auch der Schutzsysteme
- Keinerlei Schäden – weder an Komponenten des HTS-Systems, noch an anderen Primär- bzw. Sekundärkomponenten

## Fazit

- Das System beherrscht im praktischen Netzeinsatz nicht nur sicher den ungestörten (Dauer-) Betrieb, sondern auch relevante Betriebssituationen im gestörten Betrieb



# Eine kleine Erfolgsbilanz



## Seit der Inbetriebnahme vor knapp vier Jahren ...

- wurden über 500 GWh (500 Millionen Kilowattstunden) mit dem AmpaCity-Kabel übertragen
- wurde in einer Vielzahl von Veröffentlichungen und Vorträgen auf Tagungen und Kongressen über das Projekt berichtet
- wurde AmpaCity mit dem IKU-Innovationspreis für Klima und Umwelt ausgezeichnet
- besuchten mehr als 500 Gruppen mit insgesamt rund 6.000 Teilnehmern die Umspannanlage Herkules in Essen
  - von interessierten Laien
  - bis zu „hochkarätigen“ Fachbesuchergruppen
  - national und international (z. B. USA, China, Japan, Australien, Neuseeland, Ghana, Korea, Russland, Schweden, Kanada, Saudi-Arabien, Südafrika, ...)
- war(und ist) das Projekt Thema in unterschiedlichen Medien





BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL



# AMPACITY 2- STUDIE

Ziele und Methodik



# Ziele der Studie



# 1

**Der Weg zum verlässlichen  
Planungskonzept**

Fehlerbehandlung: (n-1)-  
Sicherheit

Zuverlässigkeitsberechnung

# 2

**Ermittlung von  
Anwendungsfällen im  
untersuchten Netzgebiet**

Technische Anwendbarkeit des  
Planungskonzepts HTS

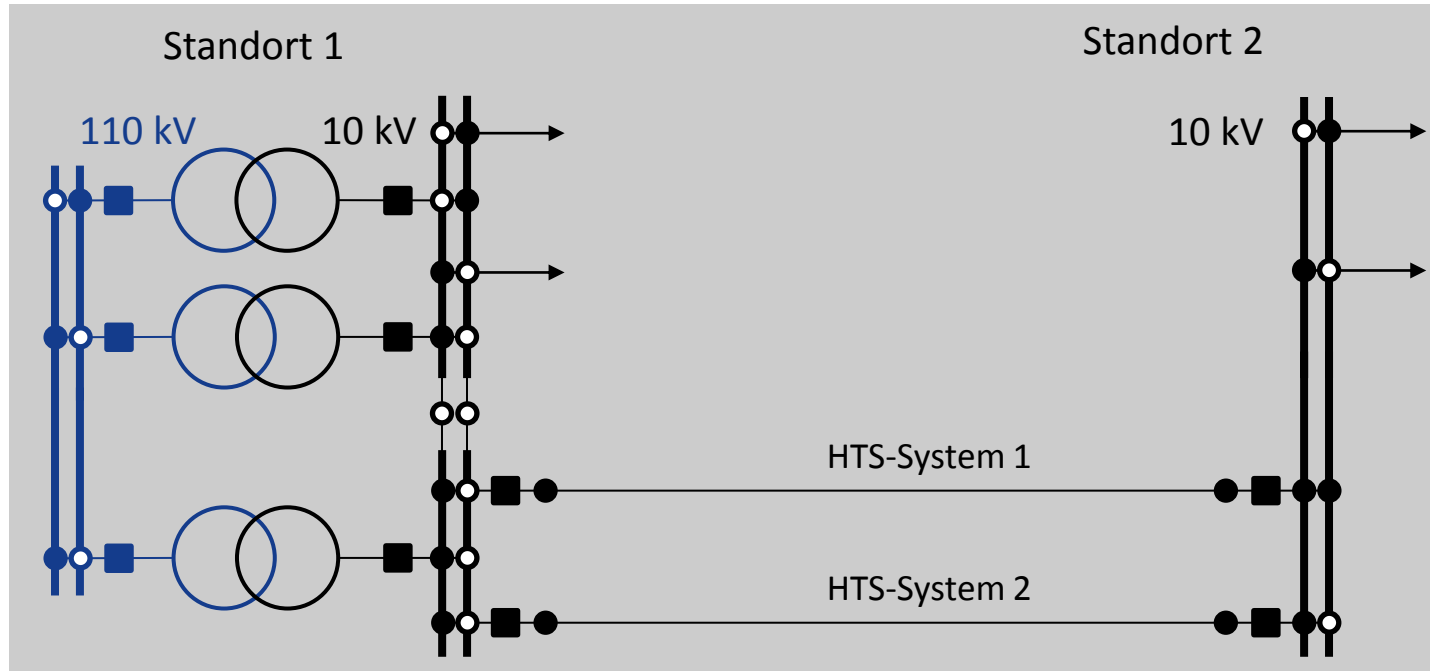
Feststellung möglicher  
Synergieeffekte mit  
Erneuerungsmaßnahmen

# 3

**Technische/netzplanerische  
Herausforderungen**

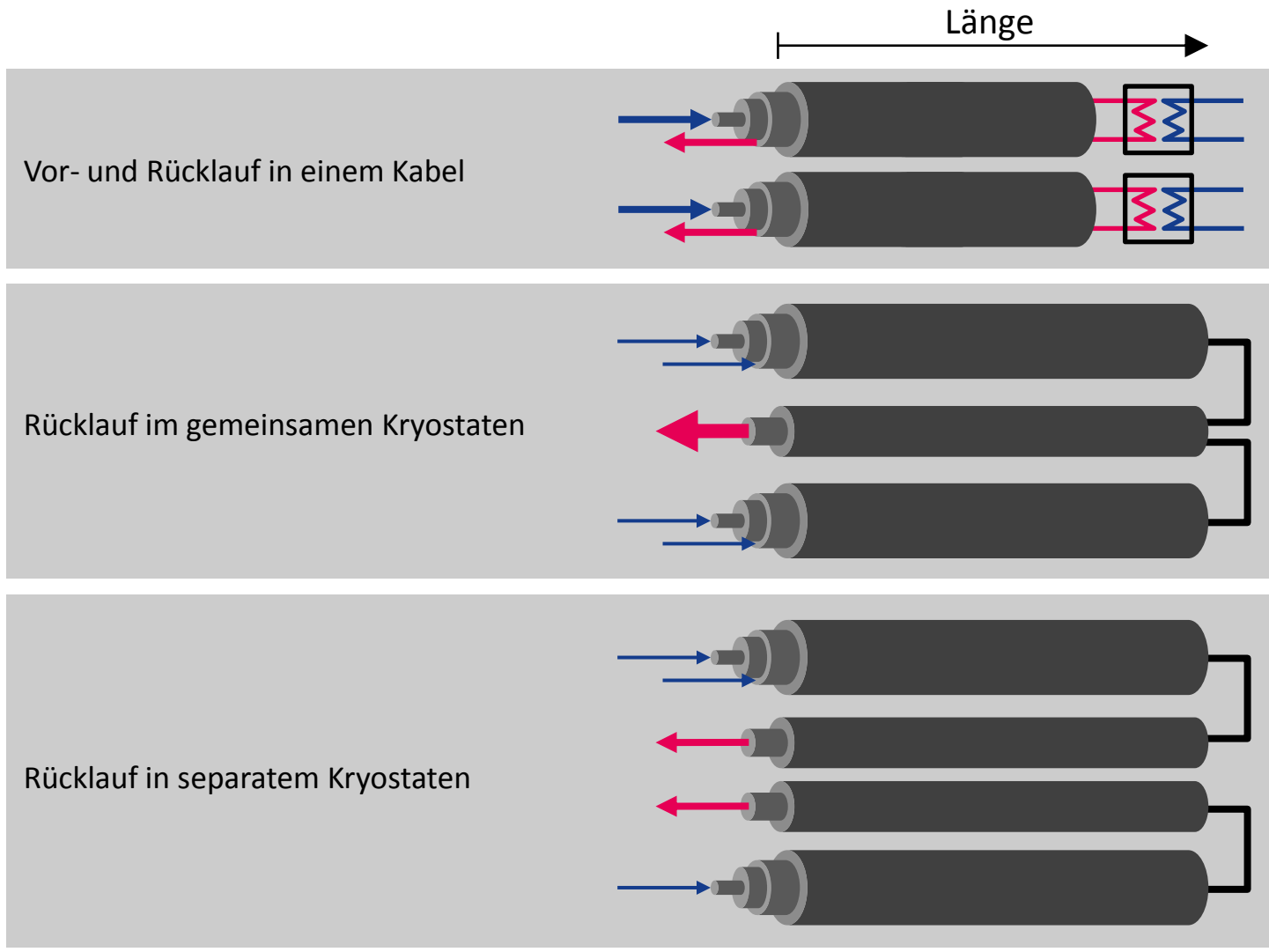
Anpassungsbedarf bei  
Leitungslängen > 1km

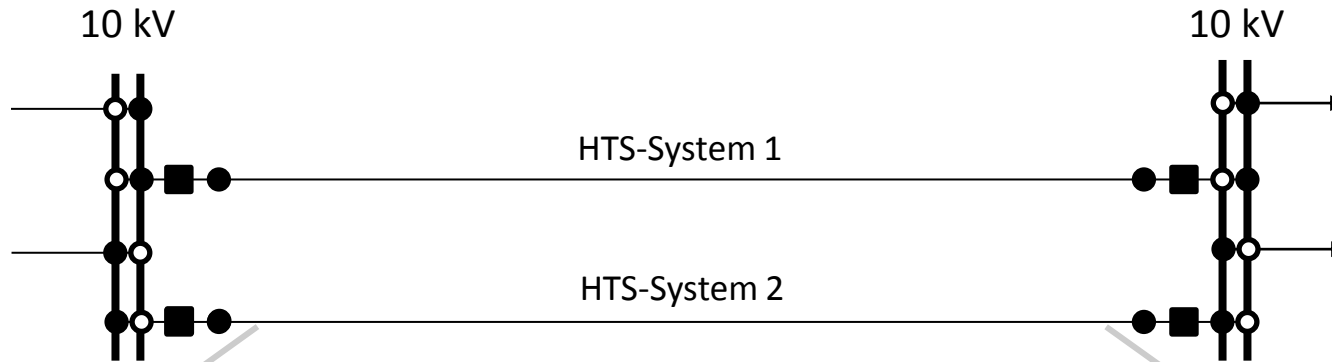
Nutzung von Leerrohren  
(Retrofit)



- (n-1)-Sicherheit durch Einsatz eines dritten Trafos und zweier HTS-Systeme
- Beide Systeme verwenden völlig unabhängige oder redundante Kühlanlagen in einer Weise, dass Unabhängigkeit angenommen werden kann

# (n-1)-Konzept: Kühlung





**Verzögerte Abschaltung**

Durch Umschaltmaßnahmen vor  
Abschalten Vermeidung von  
Versorgungsunterbrechungen

**Abschaltung**

Versorgungsunter-  
brechung



Abschätzung der Zuverlässigkeitskenndaten anhand der  
Daten konventioneller Betriebsmittel, vergleichbarer  
Komponenten und Betriebserfahrungen mit dem Prototypen

# Ermittlung der Anwendungsfälle

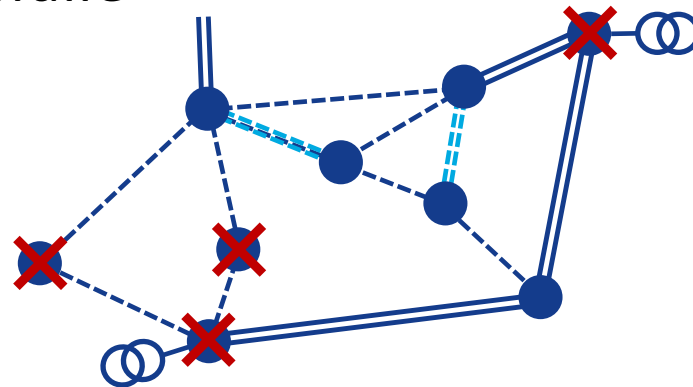
1

2

Anwendungsfälle

3

Tech. Herausforderungen



## 0 Übereinstimmung mit dem angestrebten Netzkonzept

**Schwerpunktstation:** Hohe Lastdichte, hohe Grundstückspreise, wenig Platz für Betriebsmittel

**Speisende Station:** Außerhalb der Lastschwerpunkte

## 1 Eignung zur Umrüstung in eine Schwerpunktstationen

- Erneuerungsbedarf 110 kV-Assets
- Individuelle Aspekte (z.B. Anfahrbarkeit für Trafotausch)

## 2 Eignung als speisende Station

- Platz für zusätzlichen Trafo, Kühlanlage, Strombegrenzer etc.
- Zuwegung für Stickstoffversorgung
- Erweiterbarkeit der 10 kV-Schaltanlage

## 3 Trasse

- Vorhandene Leerrohre
- Länge
- und viele weitere Kriterien...



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL



# AMPACITY 2- STUDIE

Ergebnisse

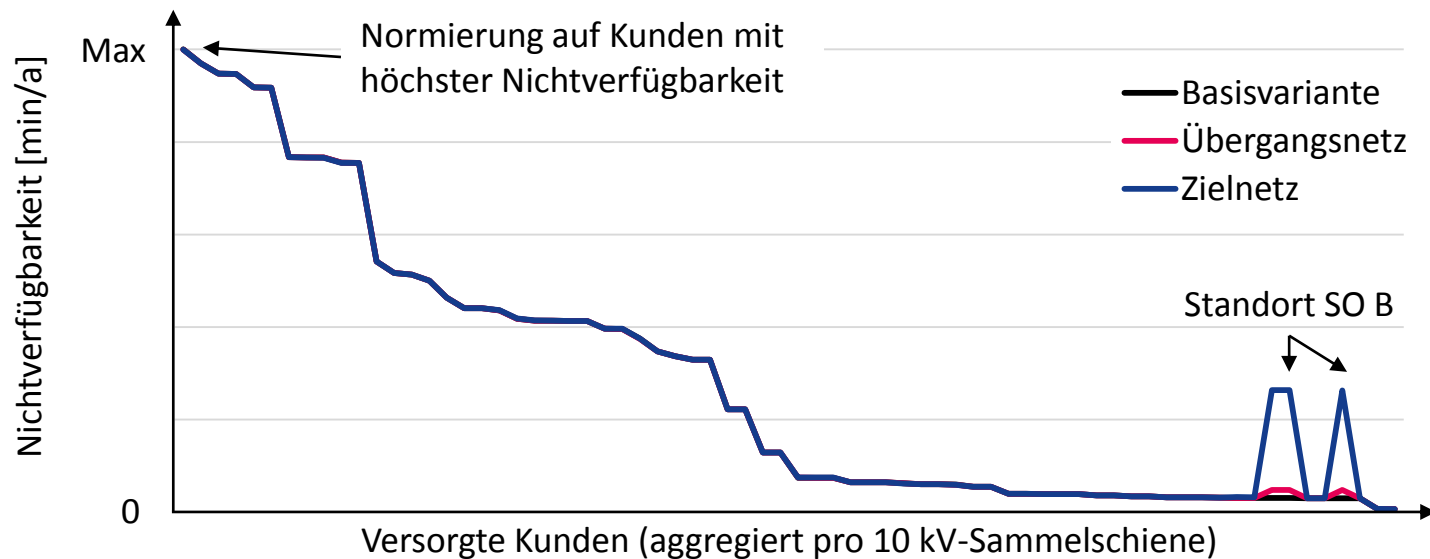
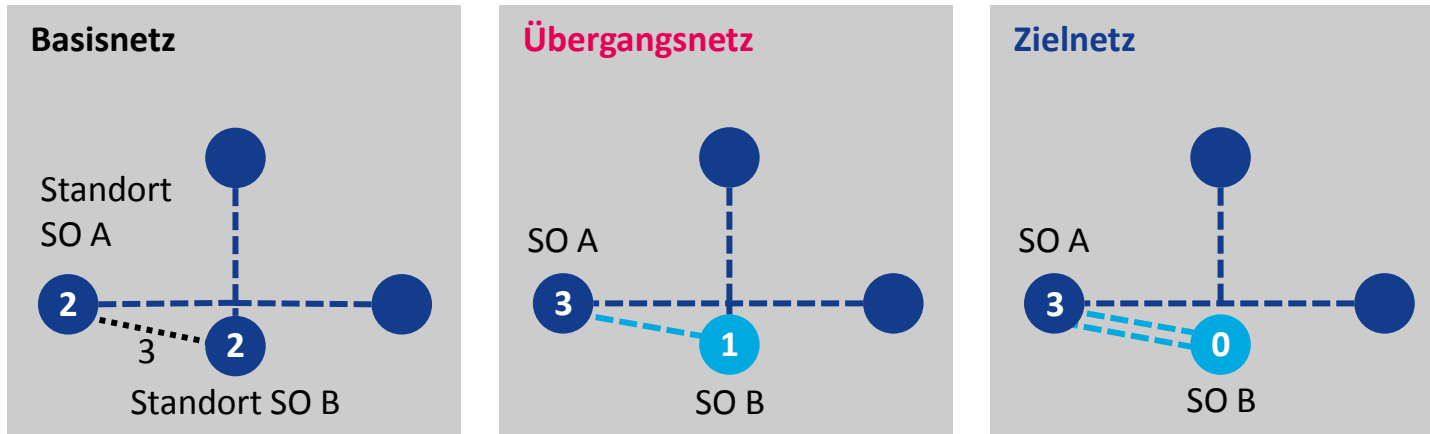


# Anwendungsfall 1: Innerstädtisches Kabelnetz



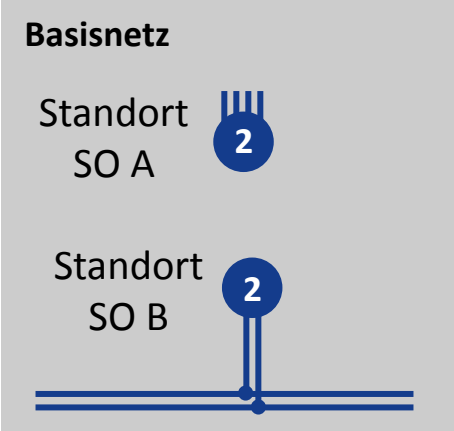
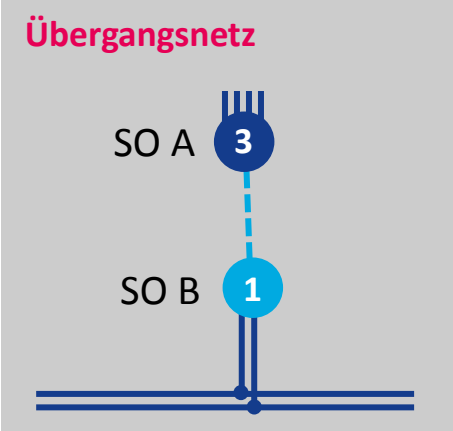
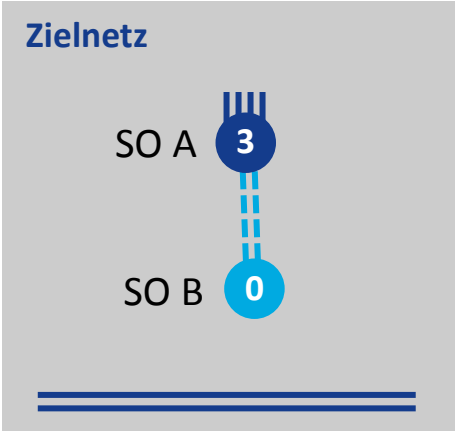
	Basisnetz	Übergangnetz	Zielnetz
SO A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Platzangebot ausreichend.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation eines dritten HS/MS-Trafos</li> </ul>	
SO B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 110 kV-Schaltanlage in absehbarer Zeit zu erneuern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abbau von 1 der 2 HS/MS-Trafos</li> <li>• Testphase: 110 kV-Trafo als Backup</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abbau des verbliebenen Trafos</li> </ul>
Trasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 Leerrohre vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung Leerrohre für HTS-System („Retrofit“)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HTS-System redundant</li> </ul>

# Anwendungsfall 1: Innerstädtisches Kabelnetz

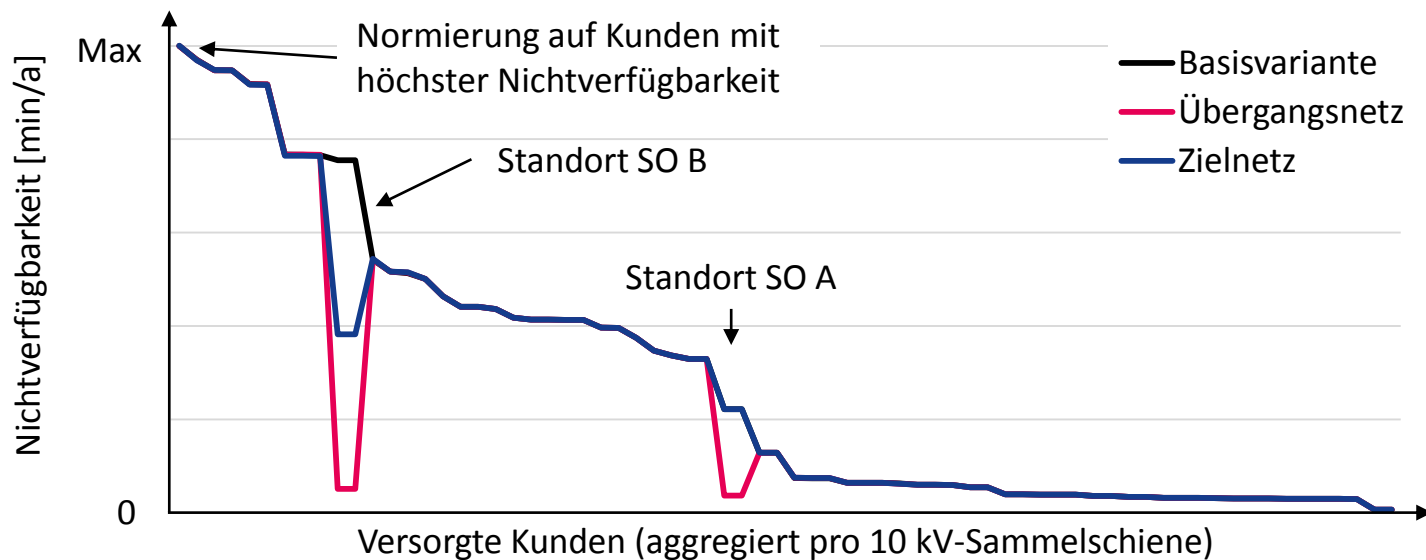
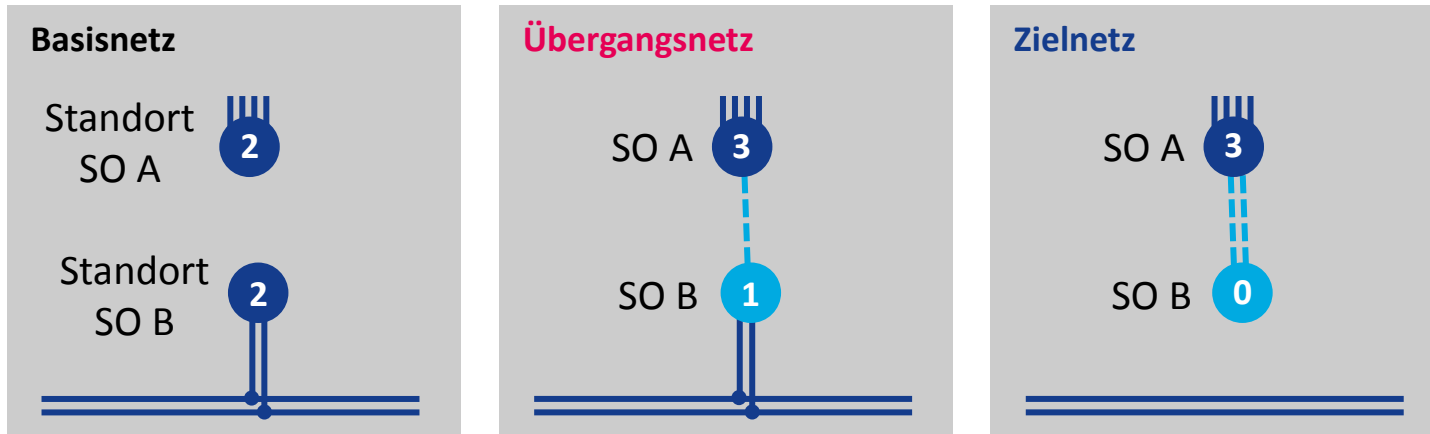


# Anwendungsfall 2: Großstädtisches Freileitungsnetz



	Basisnetz	Übergangnetz	Zielnetz
<b>SO A</b>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Platzangebot ausreichend.</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation eines dritten HS/MS-Trafos</li> </ul>	
<b>SO B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 110 kV-Schaltanlage und Trafostände bald zu erneuern</li> <li>• Geplantes Wasserschutzgebiet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abbau von 1 der 2 HS/MS-Trafos</li> <li>• Testphase: 110 kV-Trafo als Backup</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abbau des verbliebenen Trafos</li> </ul>
<b>Trasse</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neue Trasse erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HTS-System redundant</li> <li>• Rückbau Freileitung</li> </ul>

# Anwendungsfall 2: Großstädtisches Freileitungsnetz



# Wirtschaftlichkeit (Beispiel)



- Betrachtung der Investition- und Betriebskosten über 40 Jahre
- Direkter Vergleich eines redundanten ca. 3,5 km langen Kabels in konventioneller Technik gegenüber HTS-Technik
- Gleichmäßige Senkung der Investitions- und Betriebskosten des redundanten HTS-Kabels bis Gesamtkostengleichheit herrscht
- Im Beispiel müssen sowohl die Investitions- als auch Betriebskosten auf etwa ein Viertel der heutigen Kosten gesenkt werden
- Wirtschaftlichkeit ergibt sich bei Zielinvestitionskosten von ca. 650 TEUR/km (ohne Kühlanlage)



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL



# FAZIT



# Zusammenfassung und allgemeine Erkenntnisse



Der Prototyp arbeitet zuverlässig. Somit wurde die praktische Eignung nachgewiesen.

Es konnten zwei besonders geeignete Anwendungsfälle in der betrachteten 110 kV-Netzgruppe identifiziert werden, an denen die Untersuchungen zur Versorgungszuverlässigkeit durchgeführt wurden

Unter den getroffenen Annahmen zeigen die Berechnungsergebnisse der HTS-Supraleiter-Kabelsysteme eine vergleichbare Zuverlässigkeit wie konventionelle Kabel

Sowohl sehr hohe Investitions- als auch Betriebskosten verhindern i.d.R. noch den wirtschaftlichen Einsatz in Standard-Anwendungen



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

# Kontakt

**Dr.-Ing. Frank Merschel**

innogy SE

Sparte Netz & Infrastruktur

Neue Technologien

T. +49 201 12-29389

frank.merschel@innogy.com

**Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek**

Bergische Universität Wuppertal

Lehrstuhl für elektrische

Energieversorgungstechnik

T. +49 202 439-1797

zdrallek@uni-wuppertal.de



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**