

Abschlussbericht

SWM SuperLink

Innerstädtisches HTS-Hochspannungskabel zur Absicherung
kritischer Infrastruktur im Zuge der Energiewende

Förderkennzeichen: 03EN2036 A-F

Laufzeit: 01.10.2020 – 30.06.2025

Stadtwerke München
(03EN2036A)



THEVA Dünnschichttechnik GmbH
(03EN2036B)



NKT cables
(03EN2036C)



Linde AG
(03EN2036D)



Karlsruher Institut für Technologie
(03EN2036E)



FH Südwestfalen
(03EN2036F)



Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt
beim Autor/bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Kurzdarstellung

A)	Aufgabenstellung	4
B)	Voraussetzungen des Vorhabens	4
C)	Planung und Ablauf	6
D)	Wissenschaftlich-technischer Stand	6
E)	Zusammenarbeit der Partner	8

Eingehende Darstellung..... 10

F)	Erzielte Ergebnisse	13
F.1	Stadtwerke München - SWM.....	13
AP1	Grundkonzept und technisches Design.....	13
AP5.1	Vorbereitung des Testgeländes im HUW Menzing	14
AP5.4	Testbetrieb im Hauptumspannwerk Menzing	17
F.2	THEVA.....	19
AP2.4	Entwicklung und Herstellung der HTS-Bandleiter	19
AP4.1	Herstellung der HTS-Komponenten für die Qualifikationstests	25
AP4.3	Herstellung der HTS-Komponenten für das Demokabel	27
F.3	Linde	30
AP3.	Auslegung Kühlsystem	30
AP3.1	Konzept für das verteilte Kühlsystem	30
AP3.2	Zuverlässigkeit, Risikobewertung (TRAS) und Maßnahmen	37
AP3.3	Wirtschaftlichkeit.....	38
AP3.4	Next-Gen-Kühlsystem – Zusammenarbeit mit dem KIT	38
AP3.5	Neon-Expander Tests.....	43
AP5.3	Aufbau und Betrieb des Kühlsystems in der Testanlage in Menzing	43
F.4	KIT	46
AP2.1	Numerische Simulation.....	46
F.5	FHSWF	57
AP2.3	Kryogene Hochspannungsisolierung und Monitoring.....	57
F.6	NKT	66
AP2	Entwicklung und Auslegung des HTS-Kabels	66
AP2.2	Numerische thermo-hydraulische Simulation.....	66
AP2.5	Auslegung des HTS-Kabelsystems	68
AP2.6	Wirtschaftlichkeitsanalyse	70
AP4	Konformitätstests und Testfertigung.....	71
AP4.1 & 4.3	Herstellung der HTS-Komponenten	71
AP4.2	Vortests der Komponenten.....	73
AP5	Langzeittest in Menzing	74
AP5.1	Vorbereitung des Testgeländes	74

AP5.2	Installation des Demo-Kabels.....	75
AP5.3	Aufbau und Betrieb des Kühlsystems (NKT, Linde).....	76
AP5.4	Testbetrieb in Menzing (SWM).....	77
AP5.5	Auswertungsphase (SWM).....	82
	Literaturhinweise	83
G)	Voraussichtlicher Nutzen – Energieeinsparung.....	84
H)	Veröffentlichung der Ergebnisse	85

Kurzdarstellung

A) Aufgabenstellung

Mit dem Projekt SWM Superlink sollte der Grundstein gelegt werden, den massiven Zuwachs des elektrischen Energiebedarfs und die elektrische Energieverteilung in Großstädten durch den Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) zukunftsfähig zu bewältigen. Räumliche Einschränkungen und Akzeptanzprobleme bei Erweiterung der elektrischen Infrastruktur sowie die verstärkte Verdichtung von Ballungsräumen stellen hohe Anforderungen an die Sicherheit und Qualität der Stromversorgung und begründen die drängende Nachfrage nach kompakten und effizienten Stromübertragungskonzepten wie der HTS-Technologie.

Anhand eines realen Einsatzszenarios im Netz der Landeshauptstadt München sollte eine Hauptverbindungsstrecke mit einer Übertragungsleistung von 500 MVA in kompakter Bauweise in HTS-Technik ausgelegt und ihr Einfluss auf das Netz untersucht werden. Die Anforderungen an diese Verbindung orientierten sich an den Randbedingungen und dem realen Versorgungsauftrag einer Großstadt, die den Herausforderungen der Energiewende und dem wachsenden Verbrauch elektrischer Energie durch Elektromobilität, Klimatisierung und IT gerecht werden muss.

Um diesen Anforderungen zu entsprechen, musste das im Projekt entwickelte HTS-Kabelsystem sehr viel kompakter und schlanker gestaltet werden, als dies bislang bei HTS-Installationen geschehen ist und weit über die Möglichkeiten der bislang eingesetzten, konventionellen Technik hinausgehen.

Die erste Phase des Projekts diente der Auslegung einer 15 km langen 110 kV HTS-Kabelstrecke mit möglichst geringem Raumbedarf im Graben und mit einem modularem Kühlsystem, basierend auf einem im Wesentlichen geschlossenem Flüssigstickstoff-Kühlkreislauf mit nur einer Zwischenkühlstation auf der Strecke. Das Kabeldesign wurde so gewählt, dass alle drei elektrischen Phasen in einem einzelnen flexiblen Kabel-Kryostaten untergebracht werden konnten.

In der zweiten Phase wurden alle notwendigen Komponenten der HTS-Kabelstrecke entwickelt, getestet und qualifiziert. Alle elektrischen Komponenten wurden dabei bis zur Typprüfung nach anwendbaren Normen gebracht und anschließend in einem Testfeld im Hauptumspannwerk (HUW) Menzing für mehr als 6 Monate unter realen Bedingungen und mit unterschiedlichen Lastkurven bis zur maximalen Dauerlast von 500 MVA betrieben. Der im Projekt durchgeführte Testbetrieb stellte im Vergleich zu allen früheren HTS-Demoprojekten in dieser Hinsicht ein Novum dar, denn er war so angelegt, dass das Kabel mit unterschiedlichsten Lastzyklen bis an die Höchstbelastungsgrenze bestromt werden konnte und somit auch Betriebszustände getestet wurden, die im Regelbetrieb praktisch nie vorkommen.

Das Projekt umfasste damit alle Arbeiten zur Vorbereitung einer kommerziellen Umsetzung nach Abschluss des Entwicklungsprojekts im Netz der Stadt München und lieferte für den Netzbetreiber (SWM) über 6 Monate hinweg alle wichtigen Monitoring- und Betriebsdaten der Kabelinstallation.

B) Voraussetzungen des Vorhabens

Die voranschreitende Energiewende in Deutschland bedingt einen stetigen Umbau der Stromerzeugung, weg von Großkraftwerken und hin zu dezentralen Quellen wie Solar- und Windenergie. Im Projektzeitraum wurden in Deutschland die letzten AKWs abgeschaltet, darunter auch ISAR II, das für die Versorgung von München eine große Rolle spielte. In den nächsten Jahren werden absehbar auch die großen Kohlekraftwerke folgen. Viele Städte tragen diesem Umstand Rechnung mit dem Ausbau eigener, lokaler und dezentraler Versorgungseinheiten, u.a. unter Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung.

Auf der Verbrauchsseite entstehen wachsende Herausforderungen an die städtischen Netze bezüglich Leistungsfähigkeit und Versorgungssicherheit. Diese entstehen durch die steigende Elektrifizierung der Mobilität und der Gebäude (E-Mobilität, Elektrizität für Heizung, Luftumwälzung und Klimatisierung), und die immer intensivere Digitalisierung aller Lebensbereiche (z. B. Industrie 4.0 / IoT, Mobile Technologien, Hybrid Clouds, Big Data Anwendungen). Gleichzeitig wird durch die

Urbanisierung und vor allem infolge einer steigenden Verdichtung der Städte, der zur Verfügung stehende Raum immer knapper und teurer. Als Beispiel kann hier München dienen: laut städtischem Demografiebericht werden hier im Jahr 2030 etwa 1,8 Millionen Einwohner leben, ein Zuwachs um 300.000 bzw. 20 % im Vergleich zu 2015. Eine vergleichbare Entwicklung wird in vielen Städten erwartet. Durch diese gesellschaftliche Entwicklung werden auch die direkten und indirekten Begleitkosten für umfangreiche Baumaßnahmen in innerstädtischen Gebieten stetig steigen.

Parallel zum steigenden Versorgungsbedarf steigt auch der Anspruch, die Stromversorgung möglichst umweltfreundlich (z.B. geringer Ressourcenverbrauch, Vermeidung von Umweltschäden bei der Installation) und ohne Beeinträchtigung der Lebensqualität der Anwohner (z. B. Minimierung der EM-Strahlung, möglichst kurze Installation mit geringer Störung des Verkehrsflusses) zu gestalten.

Die gegenwärtige Versorgungssituation durch das Stromverteilungsnetz der Stadt München ist in Abb. 0.1 skizziert. Die Verteilung geschieht heute über die 110 kV Spannungsebene mittels Gasinnen- (GID) und Gasaußendruckkabeln (GAD), die in den 1960er bis 90er Jahren verlegt wurden. Diese Kabeltypen zeichnen sich durch hohe Zuverlässigkeit aus, werden jedoch nicht mehr hergestellt und auch Support und Wartung werden zunehmend schwieriger, was einen Ersatz nahelegt.

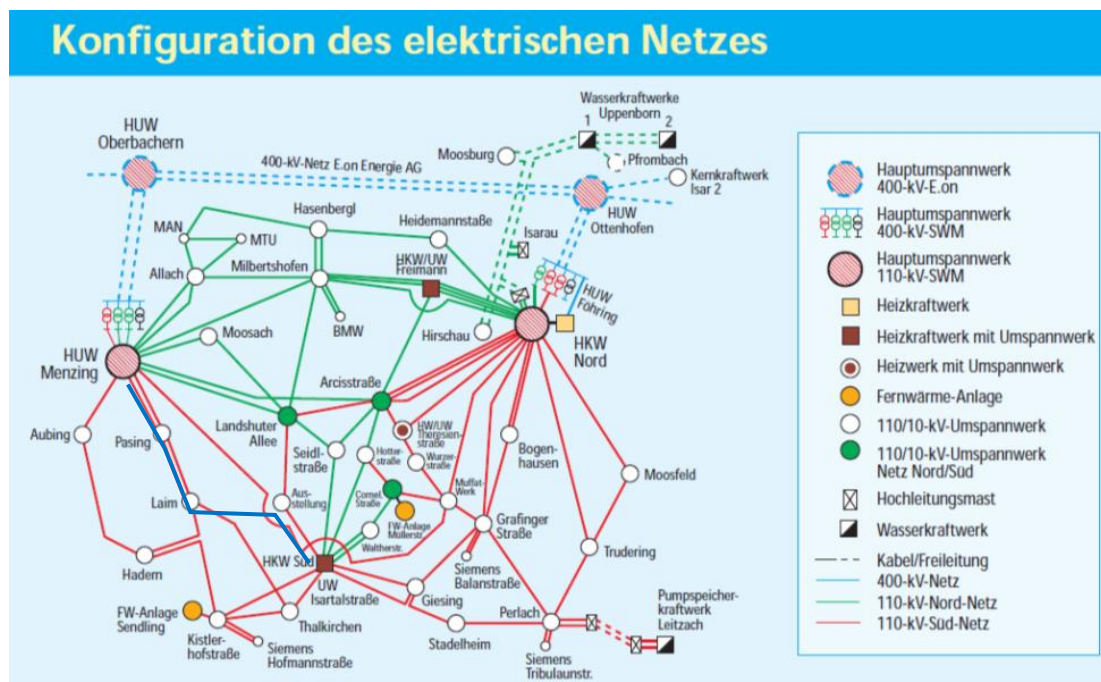


Abb. 0.1: Elektrisches Hochspannungs-Verteilungsnetz der Stadt München mit Anbindung an die Fernübertragung (HUW) und geplanter Trassenführung der HTS-Kabelstrecke (blau)

Die Anbindung der Stadt München an das Übertragungsnetz erfolgt über 400 kV-Freileitungen an den beiden Hauptumspannwerken (HUW) Menzing (im NW) und Föhring (im NO). Von Menzing und Föhring werden das nördliche Verteilungsnetz (grün) und das südliche Verteilungsnetz (rot) versorgt. In Föhring befindet sich das Heizwerk Nord (HKW) und im Süden von München befindet sich im Isartal das HKW Süd. Beide Kraftwerke sichern die Versorgung der Stadt zusätzlich zu den Anbindungen an das Übertragungsnetz ab. Die Erzeugungsleistung im HKW Süd wird in den nächsten Jahren durch Zubau noch steigen und muss als strategische Reserve auch an das Übertragungsnetz angeschlossen werden.

In diesem Zusammenhang ist die Verteilung elektrischer Energie im 110 kV-Netz der SWM neuen Lastflussanforderungen unterworfen, die durch einen HTS-Ausbau adressiert werden sollen. Die Ausgangssituation im Verteilnetz der Stadt München ist durchaus als exemplarisch zu bewerten. Sehr viele Großstädte in Deutschland und Europa stehen vor vergleichbaren Herausforderungen, was zum einen die 110 kV-GiD/-GaD-Kabel-Problematik und zum anderen die absehbare innerstädtische Leistungsverdichtung angeht. Das Projekt SWM Superlink betrachtet die Situation in München als

exemplarisch und leitet daraus die technischen und logistischen Anforderungen für die geplanten Entwicklungen und Projektziele ab.

C) Planung und Ablauf

Das Projekt gliederte sich in fünf Hauptarbeitspakete (AP) mit jeweiligen Unteraufgaben (vgl. Tab. 0.1) – von der Konzeption und Auslegung des Kabels und Kühlsystems (AP1, AP3), über die Entwicklung und Fertigung der benötigten Komponenten (AP2), die Konformitätstests der Komponenten vor der Installation (AP4), bis hin zu Installation und Betrieb einer Teststellung im SWM-Hauptumspannwerk in Menzing (AP5).

Tab. 0.1 Gliederung des Projekts in Arbeitspakete und verantwortliche Partner

Arbeitspakete	Partner
AP 1 "Grundkonzept & technisches Design"	alle
AP 2 "Entwicklung des HTS-Kabels"	NKT
AP 2.1: Numerische Simulation	KIT
AP 2.2: Numerische thermo-hydraulische Simulation	NKT
AP 2.3: Kryogene Hochspannungsisolierung und Monitoring	FHSWF
AP 2.4: Herstellung des HTS-Leiters	THEVA
AP 2.5: Auslegung des HTS-Kabels	NKT
AP 2.6: Wirtschaftlichkeitsanalyse	NKT
AP 3 "Auslegung Kühlsystem"	Linde
AP 3.1: Konzept für das verteilte Kühlsystem	Linde
AP 3.2: Zuverlässigkeit, Risikobewertung und Maßnahmen	Linde
AP 3.3: Wirtschaftlichkeitsanalyse	Linde
AP 3.4: Next-Gen-Kühlsystem	KIT
AP 3.5: Test Neon-Expander	Linde
AP 4 "Konformitätstests und Testfertigung"	NKT
AP 4.1: Herstellung der HTS-Komponenten für Testzwecke	NKT, THEVA
AP 4.2: Vortests der Komponenten	NKT
AP 4.3: Herstellung der HTS-Komponenten für den Langzeittest	NKT, THEVA
AP 5 "Langzeittest in Menzing"	SWM
AP 5.1: Vorbereitung des Testgeländes	SWM
AP 5.2: Installation des Testkabels	NKT, SWM
AP 5.3: Aufbau und Betrieb des Kühlsystems	NKT
AP 5.4: Testbetrieb in Menzing	NKT, SWM
AP 5.5: Auswertungsphase	NKT, SWM

Die Projektdauer war ursprünglich bewusst sportlich auf 30 Monate geplant. Der Beginn des Projekts im Oktober 2020 fiel jedoch in die grassierende Corona-Pandemie, die auch auf die ersten 12-15 Monate des Projekts massive Auswirkungen hatte. Dazu kam im März 2021 die wochenlange Blockade des Suez-Kanals. Beide Umstände führten zur langfristigen Störung der weltweiten Lieferketten, was auch die Beschaffungsphase im Projekt stark beeinträchtigte. Zudem führten technische Herausforderungen vor allem beim Bau der Kabelendverschlüsse und der Komponenten der Kühlanlage in Menzing zu beträchtlichen Verzögerungen, so dass die Gesamtprojektlaufzeit schließlich 56 Monate betrug. Ausschlaggebend für die Entscheidungen zur Verlängerung des Projekts, die immer kostenneutral erfolgte, war stets die Erreichung und Demonstration der technischen Ziele. Diese konnten schließlich durchgängig erreicht und in der Demonstrationsphase im HUW Menzing über mehr als sechs Monate eindrucksvoll nachgewiesen werden.

D) Wissenschaftlich-technischer Stand

VPE-Hochspannungskabel: zur Übertragung elektrischer Leistungen von 500+ MVA werden konventionell Höchstspannungskabel mit einer Isolierung aus vernetztem Polyethylen (VPE) bei 220 kV oder 400 kV eingesetzt. Solche Kabelsysteme bestehen aus jeweils drei Einleiter-Kabeln, die aufgrund ihrer Wärmeemission in den Boden auf Abstand gelegt werden müssen. Sie lassen sich damit nicht mehr in engen Gräben verlegen, sondern erfordern eine aufwändige, tiefe Verlegung. Bei

einer Verlegung durch Grabenbau sind daher Großbaustellen erforderlich, durch die es zu wochenlangen, starken Verkehrsbehinderungen und zur Beeinträchtigung der Anwohner kommt.

Im städtischen Bereich weicht man oft aus Platz- und Sicherheitsgründen auf eine noch aufwändigere Alternative aus. So findet man in Metropolen wie London oder Berlin auch Höchstspannungskabel (400 kV) in Tunneln. So ist man in Berlin für die 400 kV Kabeldiagonale den Weg tief unter die Erde gegangen und hat die Installation im Schildvortrieb in 26 m Tiefe in einem befahrbaren, zwangsbelüfteten Tunnelbau (Durchmesser 3,6 m) ausgeführt – nicht zuletzt um oberflächennaher Infrastruktur und Konflikten um Wegerechte aus dem Weg zu gehen. Ähnlichen Aufwand muss man für Gas-isolierte Rohrleiter (GIL) betreiben. Dabei befindet sich der stromführende Leiter jeder Phase im Zentrum einer SF₆-gasgefüllten Röhre mit 50 cm Durchmesser, die ebenfalls in einem tiefen, begehbaren Tunnel verlegt werden.

Beide Höchstspannungsoptionen benötigen zudem neue Umspannwerke und sind damit extrem raumgreifend und kostspielig. Auch handelt es sich auch bei diesen Installationen um individuelle Anfertigungen und nicht um Standardprodukte. Es bleibt also auch bei den konventionellen Lösungen ein technisches Risiko.

HTS-Kabel: weltweit wurde in den letzten 25 Jahren eine beachtliche Anzahl von HTS-Kabeln zur Stromübertragung realisiert. In den meisten Fällen handelte es sich dabei jedoch um Tests über kurze Strecken (ca. 1 km) mit zeitlicher Befristung. Wirklich dauerhafte HTS-Installationen im Versorgungsnetz gibt es nach wie vor nur wenige (z.B. in Shanghai und Shenzhen (China) oder in Korea. In Essen wurde unter dem Projektnamen „Ampacity“ ein 1 km langes HTS - Kabel über 8 Jahre hinweg erfolgreich betrieben und damit der problemlose, bislang längste Dauerbetrieb eines HTS-Kabels nachgewiesen.

In all diesen Fällen handelte es sich um Mittelspannungskabel (MS) bei 10 kV mit Übertragungsleistungen von 60 – 80 MVA. Diese MS-Kabel weisen zumeist ein konzentrisches Design auf, bei dem die drei HTS-Phasen mit dünnen dazwischen liegenden Dielektrika coaxial aufeinander gewickelt werden. Auf der Hochspannungsebene (HS) verbietet sich dieser Aufbau, da die elektrischen Feldstärken höher sind und damit die Isolierung (Dielektrikum) deutlich dicker sein muss. Dadurch leidet die Flexibilität, und die Biegeradien der Kabel werden zu groß für den Transport auf Trommeln und die Verlegung.

Auch wenn diese Demo-Projekte sehr wichtig waren, um die Zuverlässigkeit der HTS-Technologie zu demonstrieren, gibt es im Mittelspannungsbereich nur wenige echte Business Cases, da man vergleichbare Leistungen über konventionelle VPE-Hochspannungskabel übertragen kann.

Echte HTS-Hochspannungskabel wurden erstmals auf Long Island, in den USA bei 138 kV (2007 – 2012) und in einer Umspannstation auf der Insel Jeju (Südkorea) bei 154 kV (2017) mit ähnlicher Leistungsklasse 500-600 MW demonstriert. Allerdings wurden dort wohl aus Sicherheitsüberlegungen (Hochspannung) jeweils drei Einleiter-Kabel verwendet, d.h. jede der drei Phasen ist von einer relativ dicken Isolierung umgeben und liegt in einem individuellen Kabel-Kryostat, was diese Ausführungsform raumgreifend und teuer macht. Damit konnte zwar die technische Machbarkeit von HTS-Hochspannungskabeln demonstriert werden, für einen wirtschaftlichen, innerstädtischen Einsatz erscheint dieses Kabeldesign jedoch eher ungeeignet.

Bei allen HTS-Kabeln war die Maximallänge bisher zudem auf ca. 1 km begrenzt, was die Kühlung relativ einfach von einem Ende her ermöglicht. In einem echten innerstädtischen Anwendungsfall, liegen Umspannstationen jedoch meist weiter (ca. 5 km) auseinander und die Frage der Zwischenkühlung muss beantwortet werden.

Das Projekt SWM Superlink sollte deshalb die für den kommerziellen Einsatz in der Stadt München zentralen Fragen adressieren:

- Entwicklung und Test eines schlanken 110 kV HTS-Kabeldesigns mit einer Übertragungsleistung von 500 MVA und
- Konzepterstellung für eine Kühlanlage mit geschlossener Zirkulation des Kühlmittels über eine bislang nie realisierte Streckenlänge von 15 km.

E) Zusammenarbeit der Partner

Das Projektkonsortium wurde so zusammengestellt, dass alle mit einer Langzeitanstallation verbundenen Fragestellungen rund um die HTS-Kabelstrecke adressiert werden konnten.

Die SWM hatten dabei als Netzbetreiber und Endnutzer der HTS-Kabeltechnologie ein zentrales Interesse, innerhalb des Projekts zu verstehen, welche Möglichkeiten aber auch Schwierigkeiten beim Einsatz der Technologie existieren.

Da das Projekt eine Konzeption für einen konkreten Anwendungsfall auf der 15 km langen Kabelstrecke vom HUW Menzing zum Lastschwerpunkt Süd (Isartalstraße) erarbeiten sollte, leiteten die SWM das AP1 und waren dafür verantwortlich, die Vorgaben und Anforderungen, die aus dieser Streckenführung resultierten für die Planung vorzugeben. Dazu gehören u.a. alle Anforderungen, die sich aus dem elektrischen Netz, der Topographie der Strecke, Regeln zur Legung, Platzverfügbarkeit für Muffen und Zwischenkühlstationen und ggf. Hindernissen ergeben.

Da die SWM keine eigene Entwicklungsabteilung besitzen, wurde die Auslegung des Kabels und der Kühlanlage in AP2, AP3, in Unteraufträgen bei Linde und NKT erstellt und von den SWM lediglich begleitet, um die Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit im Auge zu behalten.

Die wesentlichen Aufgaben der SWM waren mit dem Testbetrieb im AP5 zum Projektende verbunden. Die technische Abteilung der SWM hat in Absprache mit Linde und NKT die Teststellung im HUW vorbereitet, Anschlussmöglichkeiten ans Netz, sowie Fundamente für Container und Leerrohre zum Einzug des Kabels bereitgestellt. Da die Installationsarbeiten im Gefahrenbereich und bei laufendem Betrieb des HUW stattfanden, haben die SWM die gesamte Installation sicherheitstechnisch überwacht und begleitet. Das Gleiche galt für den Testbetrieb, der immer wieder Zugang zur Anlage erforderte.

Während Linde die Fernüberwachung der Kühlanlage erstellte, wurden die elektrischen Betriebsparameter durch die Netzleitwarte der SWM überwacht und dokumentiert. Gegen Ende der halbjährigen Versuchsperiode wurden die gesammelten Daten von NKT mit den Partnern ausgewertet und Rückschlüsse auf die Betriebs- und Ausfallsicherheit gezogen.

Der Hauptbeitrag von THEVA zum Projekt bestand in der Entwicklung und Anpassung der eingesetzten HTS-Bandleiter an die Anforderungen bei der Herstellung und dem Betrieb des Kabels. Diese Entwicklung geschah hauptsächlich im AP 2.4 in enger Zusammenarbeit mit NKT.

Sowohl im AP 2 als auch im AP 4 hat THEVA die Komponententests und Typprüfungen im Hause NKT direkt mit begleiten. Dabei erfolgte eine eingehende Analyse und Bewertung von potentiellen Versagensmechanismen in den HTS-Leitern. Im AP 4.3 hat THEVA schließlich die HTS-Bandleiter für die Testkomponenten und das Demo-Kabel in Menzing produziert und beigelegt.

NKT zeichnete verantwortlich für die gesamte Entwicklung des HTS-Kabels und der Garnituren, wie Endverschlüssen und Muffen, sowie die temporäre Kühlanlage im Testfeld Menzing und den Testbetrieb. Die Lastzyklen über den 6-monatigen Testbetrieb wurden eng zwischen SWM und NKT abgestimmt.

Die Gesamtkonzeption der Kühlanlage über die lange Strecke von 15 km wurde im AP3 von Linde erstellt. Die Konzeptionierung erfolgte in enger Abstimmung mit NKT, die Kabelverluste und die Anforderungen an das thermo-hydraulische System spezifizierten. Ebenfalls im AP3 sollten Alternativen zur Erhöhung des Wirkungsgrads der Kühlanlage beleuchtet werden. So war geplant, dass Linde an einem Neon-Expander für eine Turbo-Brayton-Kühlmaschine arbeitete, während in enger Zusammenarbeit mit dem KIT alternative Kreisprozesse zur Effizienzsteigerung der Kühlanlage (AP 3.4) untersucht wurden.

Im kompakten Hochspannungskabel kommt dem Dielektrikum zentrale Bedeutung zu, da die elektrische Isolierung einen Großteil des Platzbedarfs im Kabel ausmacht und daher möglichst dünn sein sollte. Zudem sind Hochspannungsfestigkeit und Alterungseffekte der gängigen Dielektrika bei kryogenen Temperaturen (-200°C) kaum untersucht. Flankierend zur Entwicklung des Kabels liefen deshalb an der FHSWF in Abstimmung mit NKT eingehende Untersuchungen zu Auftreten und Auswirkung von Teilentladungen auf das Dielektrikum im Kabel (AP 2.3). Der enge Austausch und die

Hochspannungskompetenz bei der FHSWF war im Übrigen auch für die erfolgreiche Entwicklung der kompakten Kabelendverschlüsse hilfreich.

Um die Auswirkungen des HTS-Kabels bei Integration ins Stadtnetz im Detail zu verstehen, wurden das gesamte Hochspannungsnetz der Stadt München in einem Simulationstool am KIT (AP 2.1) exakt modelliert und über fünfzig verschiedenen Kombinationen von Betriebszuständen numerisch simuliert. Die Netzsimulationen lieferten den SWM neue und tiefe Einblicke in ihr Netz und eine wertvolle Entscheidungsgrundlage für den Netzausbau.

Im Projektverlauf traten naturgemäß eine ganze Reihe extremer technischer und logistischer Herausforderungen auf. Entscheidend für den Erfolg und die Zielerreichung war die eng abgestimmte und kollegiale Zusammenarbeit aller Partner. Diese soll an dieser Stelle besonders herausgehoben werden, da sie in komplexen Projekten nicht immer selbstverständlich ist. Das Engagement der Partner und aller ihrer einzelnen Mitarbeitenden ging in kritischen Phasen weit über die ursprünglich zugeordneten Aufgaben und Verpflichtungen hinaus, so dass im Konsortium oft kurzfristig hervorragende Lösungen erarbeitet und alle wesentlichen technischen Ziele erreicht wurden.

Eingehende Darstellung

Im folgenden Abschnitt soll auf die Ergebnisse des Projekts detailliert eingegangen werden. Die Gliederung folgt dabei zwar in groben Zügen dem Projektplan, ist jedoch nach den Beiträgen der Projektpartner sortiert, so dass Arbeitspakete an unterschiedlichen Stellen erscheinen können. Verantwortlichkeiten und Zuordnung der einzelnen Partner zu den Arbeitspaketen des Projektplans können Tab. 0.1 entnommen werden.

Vor der detaillierten Beschreibung der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Ergebnisse bei den Partnern soll hier eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Projektergebnisse stehen.

Executive Summary – Ergebnisse im Überblick

Im Vorgriff auf die detaillierte Präsentation der Arbeitspakete, sollen hier die wichtigsten Projektergebnisse zusammengefasst werden:

- **Trassenführung und Verlegung (SWM, NKT)**

Die Gegebenheiten in der Trassenführung und bei der Verlegung durch gekrümmte Rohre gingen als Vorgaben ein ins Kabeldesign, die erforderlichen Kabeldimensionen und Krümmungsradien (Flexibilität). Zudem sollte der Kühlmittelfluss durch das Kabel ausreichend Reichweite bereitstellen, um auf der 15 km langen Strecke mit nur einer Zwischenkühlung auszukommen. Das im Projekt gewählte Kabeldesign erfüllt alle diese Vorgaben und kann deshalb nach Projektabschluss direkt für die konkrete Umsetzung im Stadtnetz verwendet werden.

- **Konzept einer Kühlanlage für die Langstrecke (Linde)**

Linde führte nach Vorgabe des Kabeldesigns und Wärmeeintrags für die Langstrecke (15 km) eine „Front-end engineering design“ (FEED)-Studie durch, um eine redundante Kühlanlage mit modularem Aufbau abzuleiten. Ein sehr wichtiges Ergebnis war, dass auf der langen Strecke neben den beiden Kühlanlagen an den Kabelenden lediglich eine Zwischenkühlstation benötigt wird. Diese kann auch etwas abseits der Kabelstrecke liegen, wo Platz zur Verfügung steht, da der flüssige Stickstoff (LN) auch über längere Rohrleitungsstutzen ein- und ausgekoppelt werden kann. Temporäre Spitzenlasten können auch durch einen Hybridbetrieb (kurzzeitiges Verdampfen von LN) gepuffert werden. Das Konzept ist somit ausfallsicher und kann modular erweitert und auf andere Streckenlängen angepasst werden.

- **Netzsimulation und Einfluss des HTS-Kabels auf des Stadtnetz (KIT)**

Am KIT konnte das Münchener Stadtnetz mit allen Einspeiseleistungen und in seiner ganzen Komplexität in einem Softwaretool virtuell nachgebildet werden. Danach wurden die HTS-Kabelverbindung von München Süd nach Menzing eingefügt und unterschiedlichste Betriebszustände (Einspeise- und Lastszenarien) simuliert. Dadurch konnten Kabelbelastungen, Lastflüsse, Netzverluste und Kurzschlussströme genau berechnet werden – was den SWM erstmalig einen derart detaillierten Einblick in ihr Netz und eine wertvolle Entscheidungsgrundlage für den Netzbau lieferte. Vor allem konnten auch unerwartete Vorteile des HTS-Kabels für den Betrieb und Umbau des Stadtnetzes identifiziert werden. Da das 110 kV HTS-Kabel wie jedes normale Kabel ins Hochspannungsnetz integriert ist und in Umspannstationen Leistung zu- und abfließen können, führt die nieder-impedante Verbindung zu einer weiträumigen Entlastung des umliegenden Netzes. Dadurch verringert sich vor allem in Hochlastszenarien die Belastung der alten Gasdruckkabel, was sich positiv auf deren Lebensdauer auswirkt und mehr Zeit für den Netzbau verschafft. Zum anderen sinken die Netzverluste durchschnittlich um bis zu 20%, da der Strom von verlustbehafteten Kabeln ins verlustfreie HTS-Kabel umgeleitet wird. Beim zukünftigen Netzbau können durch einige wenige HTS-Kabelverbindungen zudem mehr als 40 km (12 %) an Kabellänge im Stadtnetz eingespart werden.

- **Kabeldesign – Kurzschlussfestigkeit, Kompensation der Längenänderung (NKT)**

Im Projekt wurde ein völlig neuartiges, schlankes Hochspannungs-Kabeldesign entwickelt, bei dem alle drei elektrischen Phasen in einem flexiblen Kryostaten untergebracht sind, so dass nur ein einziges Kabel verlegt werden muss. Da der Kryostat immer auch einen großen Kosten- und Risikofaktor

darstellt, trägt dieser für ein Hochspannungskabel erstmals realisierte Ansatz deutlich zur Wirtschaftlichkeit des HTS-Kabels bei. Neben der reinen Stromübertragungskapazität weist das Kabel jedoch noch zusätzliche vorteilhafte „eingebaute“ Eigenschaften auf. So ist das Kabel elektrisch sehr gut stabilisiert und kann Kurzschlussströme bis 40 kA über eine Sekunde verkraften, was einfache Schutzeinrichtungen ermöglicht. Zudem ist es erstmals gelungen, die beim Abkühlen unweigerlich auftretende Längenkontraktion (-0,3%) des Kabels durch die radiale Kontraktion im Kabelkern zu kompensieren, so dass an den Kabelenden kein zusätzlicher Raum für Ausgleichsbewegung (bewegliche Lagerung, Kabelbögen) benötigt wird. Auch in dieser Hinsicht ist das Kabel einzigartig.

- **Kryogene Hochspannungsisolierung – Teilentladungsfestigkeit (FHSWF)**

Über das Alterungsverhalten von Dielektrika als Hochspannungsisolierung bei tiefen Temperaturen (- 200°C) war bis zum Projekt wenig bekannt. Da bei tiefen Temperaturen keine thermische Alterung (wie in üblichen VPE-Kabeln) auftritt, stellen Teilentladungen den wichtigsten Schädigungsmechanismus dar. An der FHSWF wurden deshalb in Versuchsaufbauten künstliche Beschädigungen und Teilentladung in dielektrischen Folienstapeln erzeugt und im flüssigen Stickstoff (@ 77 K) untersucht. Dabei ergaben sich vor allem für die im Kabel eingesetzte Cryoflex™-Folien extrem gutmütige Eigenschaften. Selbst bei massiver Vorbeschädigung reagierte das Isoliersystem sehr gutmütig. Bei oberflächlichen Entladungen kam es zur „Wachsbildung“, so dass keine signifikante Verschlechterung der Durchbruchfeldstärke festgestellt wurde. Langzeitalterungseffekte erscheinen damit extrem unwahrscheinlich.

- **HTS-Bandleiter (THEVA)**

Für das HTS-Kabel wurde im Projekt ein laminierter Bandleiter mit trapezförmigem Querschnitt entwickelt, der sich gut und mit minimalen Lücken auf dem runden Former arrangieren lässt. Dadurch konnten die Wechselstromverluste und damit der Wärmeeintrag pro Kabelphase unter 0,8 W/m gehalten werden, was sich positiv auf die Reichweite der Kühlung auswirkt. Um Degradation der Stromtragfähigkeit bei der Verarbeitung der Bandleiter zu vermeiden, wurde für zukünftige Kabel ein sehr robuster Leiter entwickelt, der auch starken mechanischen Belastungen (u.a. durch die Kabelherstellung und das Auftrommeln des Kabels) gewachsen ist.

- **Endverschlüsse (NKT)**

Kompakte Kabel-Endverschlüsse stellen beim HTS-Hochspannungskabel die größte Herausforderung dar, da auf engem Raum und unter Hochspannung der Übergang von Warm zu Kalt erfolgen muss. Bei Blitzstoßtest treten Spannungen über 550 kV auf! Im Laufe des Projekts wurden tatsächlich drei Iterationsschritte unternommen, um das Design schrittweise zu verbessern. Im Ergebnis wurde ein Design erreicht, das selbst für höhere Spannung >220 kV verwendbar erscheint.

- **Typtests (NKT)**

Alle Kabelkomponenten wie Endverschlüsse, Muffen, Splitterbox, und das Kabel selbst wurden normgerecht bei NKT im Labor typ-geprüft. Dazu gehörten u.a. AC-Spannungstests bis 160 kV, Blitzstoßtests (550 kV), Teilentladungsmessungen und mechanische Biegetests (Auftrommeln). Nach der Installation der Demo-Anlage wurde für die Freigabe durch die SWM vor dem Einschalten nochmal vor Ort ein Hochspannungstest durchgeführt. Alle Tests verliefen problemlos.

- **Demo-Kabelinstallation im HUW Menzing (SWM, NKT)**

Die SWM hatten im HUW Menzing den Platz und die periphere Infrastruktur für die Verlegung des 150 m langen Kabelrundkurses vorbereitet. Nachdem NKT auch die mechanischen Kräfte für den Einzug (pulling strength) spezifiziert und vorgetestet hatte, wurde das Kabel dort in Kunststoffrohre eingezogen, Splitterboxen, Endverschlüsse und Muffenbauwerke wurden von NKT vor Ort, z.T. unter widrigen Witterungsbedingungen, montiert und funktionierten einwandfrei.

- **Kühlanlage für Demo-Betrieb (NKT)**

Die Kühlanlage stellt bei einer kleinen Demo-Installation für kurzfristigen Betrieb die größte Herausforderung dar, da man aus Kostengründen zwangsläufig Kompromisse machen muss. Für eine große, dauerhafte Kabelinstallation würde man in jedem Fall eine geeignete, langlebige Kühlanlage auf Basis von Turbo-Brayton Turbinen einsetzen, mit denen sich auch Kühlleistungen von mehreren zehn kW

darstellen lassen. Aus Kostengründen war für den Demobetrieb eine Kühlanlage aus gebrauchten Stirling-Kühlern (einige kW Kühlleistung) vorgesehen. Diese erwiesen sich jedoch aufgrund der mechanischen Komponenten als unzuverlässig. Das Kühlsystem wurde daraufhin kurzerhand auf eine offene Kühlung mit verdampfendem LN umgestellt und zuverlässig betrieben.

- **Testbetrieb (NKT, SWM)**

Das Demokabel im HUW Menzing wurde als Rundkurs ausgeführt und mit dem 110 kV Stadtnetz elektrisch verbunden. Das eröffnete die Möglichkeit die drei Phasen der Kabelschleife als Sekundärwicklungen eines dreiphasigen Transformators (Heiz-Trafo) zu beschalten und damit individuelle Ströme und Lastprofile einzuprägen. Als Schutzvorrichtung waren lediglich zwei Trennschalter in Serie geschaltet, um das Kabel im Störfall innerhalb von 1-2 Sekunden vom Netz zu trennen. In diesem Modus wurde das Kabel problemlos von November 2024 bis Juni 2025 mit unterschiedlichsten Lastprofilen bis hin zur maximalen Dauerlast (500 MVA) betrieben.

Diese Betriebsführung kann also einzigartig gelten und ist so noch nie zuvor in einer HTS-Teststrecke realisiert worden. Üblicherweise beschränken sich Kabeltests auf kurze Kabelstücke im Labor (z.B. bei Typtests). Auf Teststrecken oder bei Integration ins Netz sehen Kabel gemeinhin nie die Maximallast, da vor Ort die Leistung nicht zur Verfügung steht, oder die Kabelstrecke im Regelbetrieb nur zu max. 20 – 30% der nominalen Kapazität ausgelastet ist. Insofern stellte der Langzeitversuch über 6 Monate einen echten Härtetest aller Kabelkomponenten dar und führte diese an die technischen Grenzen.

Nach Abschluss der Tests, hatte das Kabel alle Testszenarien u.a. mit schnellen Lastwechseln, und Langzeitbelastungen bis zur maximalen Obergrenze (@ 2650 A_{ac}, 110 kV) problemlos bewältigt. Limitierend war im Endeffekt einer der sechs Endverschlüsse, da in diesen die Hauptwärmelast anfällt und an der LN-Ausleitung der wärmste Punkt auftritt.

Projektmanagement

Aufgrund der Zahl von sechs Projektpartnern, die noch nicht in dieser Konstellation zusammengearbeitet hatten, und der zahlreichen Schnittstellen untereinander haben die Projektpartner zur Sicherstellung eines reibungslosen Projektablaufes ein übergreifendes Projektmanagement eingerichtet. Die übergeordnete Projektleitung wurde von SWM übernommen. Des Weiteren hatte jeder Projektpartner einen eigenen Projektleiter für seine Arbeitspakete benannt. Zusätzlich wurde das Büro IFTP (Berlin) mit der Führung des Projektmanagement Offices (PMO) beauftragt. Das PMO bildete eine Art Klammer um die Projektpartner. Wesentliche Aufgaben des PMO waren Organisation, Koordination und Dokumentation, Terminplanung und Termin-Controlling sowie die Koordination des Risikomanagements. Diese arbeitsteilige Organisation erwies sich als sehr erfolgreich und zielführend.

In der Anfangsphase wurde ein detaillierter Terminplan erstellt, der nach Erfordernis weiter detailliert wurde und die Grundlage für das monatliche Termin-Controlling bildete. Abweichungen im geplanten Projektablauf und die Auswirkungen auf das Gesamtprojekt konnten somit frühzeitig erkannt und Steuerungsmaßnahmen zur Terminsicherung geplant werden. Mit dieser Vorgehensweise war eine hohe Transparenz des Projektablaufes für alle Beteiligten zu jedem Zeitpunkt gegeben.

Zur Identifikation möglicher Probleme im Projektablauf haben die Projektpartner ein Risikomanagement eingerichtet, in dem regelmäßig die Risiken bewertet und Maßnahmen zur Risikoabwehr beschlossen wurden. Ein Steering-Committee bewertete und entschied über weiterreichende Maßnahmen.

Um die Erfahrungen aus dem Demo-Kabelprojekt für zukünftige Projekte zu sichern, haben die Projektpartner zum Abschluss des Projekts einen Lessons-learned-Workshop durchgeführt.

F) Erzielte Ergebnisse

F.1 Stadtwerke München - SWM

AP1 Grundkonzept und technisches Design

Um ein einsatzfähiges Kabel im 110-kV-Netz eines Verteilnetzbetreibers zu entwickeln, mussten im Rahmen des Projektes zuerst die technischen Rahmenbedingungen und Anforderungen an das HTS-Kabel definiert werden. Diese Anforderungen können von Netzbetreiber zu Netzbetreiber variieren. Um ein möglichst universell einsetzbares Kabel zu entwickeln, wurde jedoch auf die Adaptierbarkeit in die Netze anderer Netzbetreiber geachtet.

Die maßgeblichen technischen Vorgabewerte sind hier aufgelistet und werden im Einzelnen kurz erläutert.

- 110 kV Spannung
- 500 MVA Nennleistung
- 15 km Systemlänge
- Kühlstationen an den Enden und höchstens eine Zwischenkühlstation
- Fehlerstromtoleranz 40 kA_{rms} für 1 s Dauer

Als eine entscheidende Größe neben der Nennspannung 110 kV des Hochspannungsbereiches ist die maximal zu übertragende Leistung von 500 MVA (dies entspricht einem Auslegungsnennstrom $I = 2625$ A) definiert. Diese Übertragungskapazität stellt nach heutiger Auffassung einen Wert nahe der maximalen Übertragungskapazität dar. Begrenzt wird dieser Wert vor allem durch die Verfügbarkeit von Hochspannungsleistungsschaltern am Beginn und Ende der Leitung, da Schaltkapazitäten im Hochspannungsnetz oft in diesem Bereich enden. Es ist davon auszugehen, dass das HTS-Kabel grundsätzlich auch im Hochspannungsbereich für größere Übertragungsleistungen dimensioniert werden kann (Erhöhung der verwendeten supraleitenden Leiteranteile), ohne dass grundsätzliche Designanpassungen oder geometrische Veränderungen erforderlich sind. Dabei sind allerdings die Technik und Verfügbarkeit von Schalterbauteilen zu beachten.

Ein weiterer entscheidender Wert zur Erreichung der großen Systemlänge ist der maximal zulässige Wechselstromverlust des Kabels $P_{\text{loss,AC}}$ von ca. 2 W/m.

In Abstimmung mit den Konzeptbereichen der Stadtwerke München und den Entwicklungsbereichen des Partners NKT wurde die Stromtragfähigkeit I_k im Störfall auf 40 kA für eine Sekunde definiert. Dieser Wert entspricht dem Auslegungswert aller neu in das Netz der SWM eingebauten Komponenten im Hinblick auf zukünftige Netzausbau- und Betriebsvarianten in München. Es ist davon auszugehen, dass dieser Wert den Anforderungen der meisten Energieversorgungsunternehmen in Deutschland, aber auch in Europa- und weltweit in diesem Spannungsbereich, genügen wird.

Die Rekuperationszeit t_r (Zeit in das HTS-Kabel nach einer fehlerbedingten Abschaltung wieder zuschaltbereit sein muss) wurde auf 5 min festgelegt. Diese Zeitdefinition genügt vollständig den heute bekannten Anforderungen in Hochspannungsnetzen, wenn die übrigen Planungsgrundsätze für 110 kV-Netze (z.B. Einhaltung der n-1 Sicherheit) eingehalten werden.

Ebenso wurden die Rahmenbedingungen für eine Verlegung in München definiert. Hierbei sind insbesondere der Außendurchmesser (OD=168,3 mm), die Wandstärke ($t_h=4,5$ mm) und der Biegeradius ($r=3,5$ m) des zu verwendenden, PE-isolierten Stahlrohres entscheidend, in die Kabel eingezogen werden. Diese Anforderungen dürften ebenfalls anderen, insbesondere urbanen, Netzbetreibern genügen. Aufgrund der erreichten Kabeldimensionierungen musste der Außendurchmesser des Rohres allerdings zumindest für die Teststellung auf OD=200 mm erhöht werden.

Weitere Anforderungen betreffen Aufbau und Verwendbarkeit der Kabelendverschlüsse und -stecker, Mindestanforderungen an die Umgebungsbedingungen für Freiluftsysteme und gasisolierte Schaltanlagen, Art, Anzahl und Dimension der einzusetzenden Kühlanlagen, sowie Vorgaben zur Überwachung und Steuerung der gesamten Anlage.

Die dort definierten Werte wurden in der Superlink-Kabelspezifikation festgelegt. Bezüglich der durchzuführenden Typ- und Stückprüfungen wurde bestimmt, hier nach IEC63075 zu verfahren.

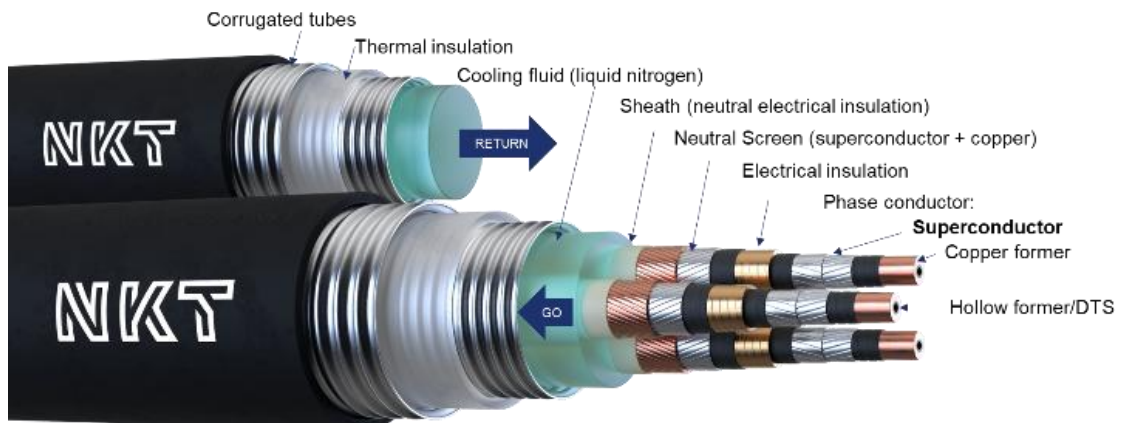


Abb. 1.1: Schematische Darstellung des entwickelten Kabeldesigns.

Abb. 1.1 zeigt das Kabeldesign „SWM05“, das nach mehrfachen Simulations-Iterationen und Bewertungen abschließend gewählt wurde und die obigen Anforderungen erfüllt. Da das Kabel einer sehr schlanken Designvorgabe folgt, ist der Platz im Inneren des Kabels für den Kanal des LN-Kühlmittels beschränkt und eine Rückströmung zur Zirkulation kann nicht im Kabel erfolgen. Bei einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung wird deshalb eine separate LN-Rückleitung benötigt. Da es sich beim Demo-Kabel in der Teststellung im HUW Menzing um einen Rundkurs handelte, war dort keine Rückleitung nötig.

AP5.1 Vorbereitung des Testgeländes im HUW Menzing

Für den Aufbau der Supraleiter-Teststellung im Hauptumspannwerk Menzing, wurde seitens SWM das Testgelände baulich vorbereitet und drei Übergabepunkte für NKT bereitgestellt:

a) Bauliche Vorbereitung Supraleiter-Testfeld:

- Erstellung eines offenen Grabens für die Kunststoffrohrverlegung (DA=280 mm) zum späteren Einziehen des Kryostaten und SuperLink Demo-Kabels.
- Erstellung von zwei 110 kV-Muffengruben (M1 und M2) für die Montagearbeiten der Kabelmuffen.
- Erstellung einer befestigten Stellfläche für die Freiluftendverschlüsse und den Flüssigstickstofftank

b) 110 kV-Anbindung Supraleiter-Testfeld

- Errichtung eines Trenners inkl. Seilverbindung zu einem bestehenden 110 kV-Kabelabgangsfeld für die Spannungsanbindung an die Supraleiter-Teststellung
- Bereitstellung eines Kabelabfanggestells und der Kabeltrasse für ein 110 kV-Baueinsatzkabel durch die Firma NKT, zur Verbindung des neuen Trenners zwischen SWM-Netz und Netzeinspeisung Supraleiter-Teststellung.

c) Stromversorgung Supraleiter-Testfeld

- Legung von zwei Niederspannungskabeln für die Versorgung der gesamten Supraleiter-Teststellung mit Strom (Eigenbedarf Testfeld).

d) Kommunikationsanbindungen Supraleiter-Testfeld (Schutztechnik)

- Sicherer Betrieb des Netzes während der Testphase und Zugriff der Projektpartner auf die Systeme der Teststellung (Bedienen, Beobachten und Daten auswerten/abtransportieren).

e) Übergabe des Supraleiter-Testfeldes an NKT

5.1.1 Bauliche Vorbereitung Supraleiter-Testfeld:

Die Kabeltrasse, in welche das SuperLink Demo-Kabel eingezogen wurde, war entsprechend der geplanten Verantwortungsgrenzen durch die SWM zu stellen. Der Aufbau des Testfeldes erforderte eine enge Abstimmung mit den Projektpartnern hinsichtlich der einzuhaltenden Parameter für Kabelzug und Garniturenmontage. Die unterirdische Verlegung der Rohrtrasse war hinsichtlich der mechanischen Voraussetzungen für den Einzug des SuperLink Demo-Kabels notwendig, um die auftretenden Kräfte bei den Kabelzugarbeiten in das Erdreich abzuleiten und die Rohrtrasse in Ihrer Lage zu halten. Zudem war bei der unterirdischen Verlegung in einem Fehlerfall ein Schutz gegen Wegfliegen von Bestandteilen der Teststellung gegeben. Es wurde entschieden, einen Graben für die Kabeltrasse zu erstellen, diesen allerdings mit einer geringeren Tiefe als im Standard-Graben für Hochspannungsleitungen zu realisieren. Abb. 1.2 zeigt die diskutierten Varianten im Vergleich:

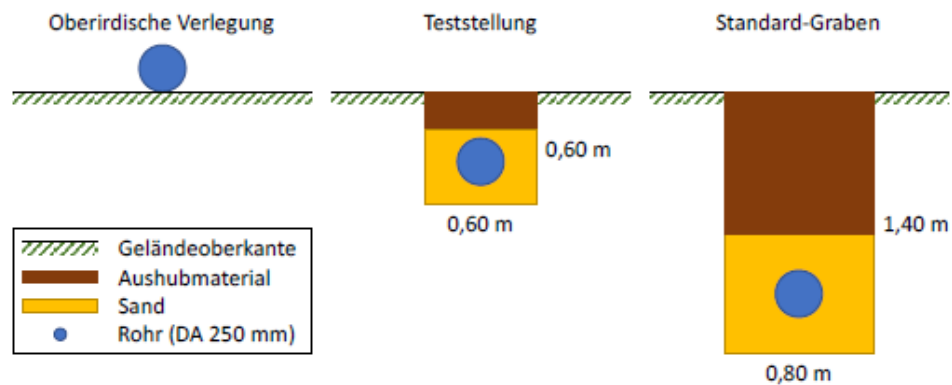


Abb. 1.2: Varianten für die Herstellung der Kabeltrasse für das SuperLink Demo-Kabel



Abb. 1.3: Luftbild mit der Detailplanung der Rohrtrasse (grün), Muffengruben und Stellfläche der Freiluft-Endverschlüsse für die Teststellung (grau)

Die bauliche Ausprägung des Testfeldes auf dem Hauptumspannungsgelände in Menzing ist in Abb. 1.3 dargestellt. Für die Übergabe an NKT wurde SWM-seitig die Fläche wie folgt vorbereitet:

Die Rohrtrasse für das SuperLink Demo-Kabel setzte sich aus drei Abschnitten zusammen. Zwei Abschnitte bestanden aus einem Bogen mit Radius 6,50 m und daran angebunden zwei gerade Strecken mit einer Länge von 18 m und 9 m. Den dritten Abschnitt bildete die Verbindung der beiden Muffengruben M1 und M2, mit einer Länge von je 12 m. Verlegt wurde ein Kunststoffrohr, mit der Bezeichnung PEHD DA280. Dies findet unter anderem auch Verwendung für den Einzug von 110 kV-VPE-Einleiter-Kabeln. Eine Verlegung erfolgte in Einzelrohrstücken. Die Verbindung wurde in Steckmuffen-Technik ausgeführt. Für die Montage der beiden SuperLink Demo-Muffen wurden zwei begehbare Muffengruben (M1 und M2), mit den Abmessungen Länge = 15,0 m, Breite = 3,0 m, Tiefe = 1,2 m erstellt. Zur Fertigstellung der SuperLink Demo-Muffen-Montage wurden die Muffen-

gruben eingehaust, um vor Ort, witterungsunabhängig Messaufbauten oder Sichtprüfungen durchführen zu können. Um die Freiluft-Endverschlüsse des SuperLink Demo-Kabels sicher aufzustellen, wurde eine befestigte Fläche mit den Abmessungen: Länge = 15,0 m und Breite = 6,0 m erstellt. Zur Verbindung von Messgerätschaften für die Überwachung der Teststrecke wurden zwei PP110 Kunststoffrohre zwischen einem Schacht im Bereich der Freiluftendverschlüsse und der Muffengrube M1 verlegt. Zwei weitere PP110 Kunststoffrohre wurden zu diesem Zweck ebenfalls zwischen den beiden Muffengruben verlegt.

5.1.2 110 kV Anbindung Supraleiter-Testfeld

Das Testfeld wurde mittels eines Baueinsatzkabels an die 110 kV-Bestandsanlage angebunden, um die Spannung an den Supraleiter anlegen zu können. Abb. 1.4 zeigt den entsprechende Anlagenaufbau mit den maßgeblichen elektrotechnischen Bauelementen.

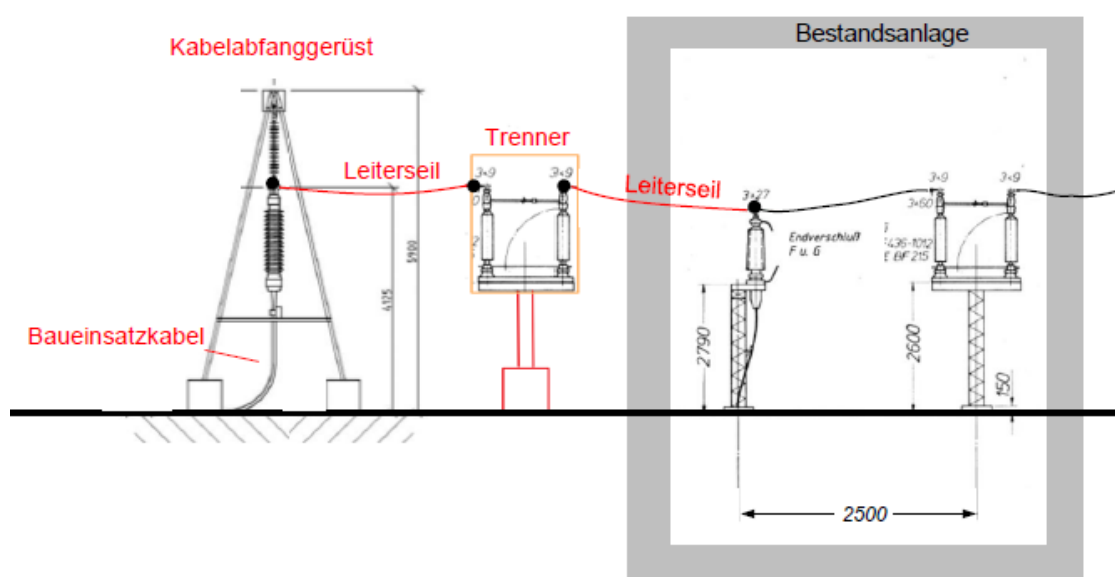


Abb. 1.4: Schematischer Aufbau der 110 kV-Anbindung an die Bestandsanlage (das Baueinsatzkabel geht zum hier nicht dargestellten Testfeld).

Ein wesentliches Bauelement war der 110 kV-Trennschalter. Dieser erlaubte es, das Testfeld sicher von der Bestandsanlage zu trennen. Zudem erlaubte er die Erdung des Testfelds. Abb. 1.5 zeigt im schematischen Aufbau, wie der Trenner mit dem Baueinsatzkabel, das zum Testfeld führt, mit der Bestandsanlage verbunden wurde. Das Kabelabfangerüst wurde seitens SWM errichtet und für den Anschluss des Baueinsatzkabels vorbereitet. An diesem Gerüst wurde der zukünftige Kabel-Endverschluss des Baueinsatzkabels befestigt, welches den Übergang von freiluft-isolierter in VPE-isolierter Technik ermöglichte.

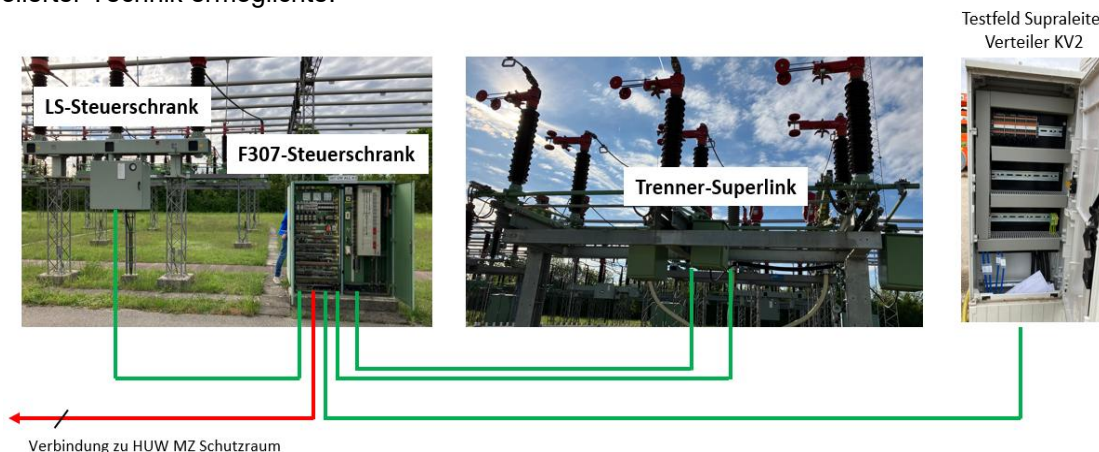


Abb. 1.5: Verkabelungsübersicht der Signalkabel für Meldekette

5.1.3 Stromversorgung Supraleiter Testfeld

Für die Stromversorgung wurden drei PP110 Leerrohre zwischen dem HUW-Gebäude und dem Testfeld verlegt, in welchen die einzelnen Leitungen im Nachgang eingezogen wurden. Der Stromanschluss für das Testfeld wurde über einen Verteilerkasten realisiert. Die Niederspannungs-Stromversorgung für das Testgelände wurde mit zwei Kabeln vom Typ NA2X2Y 4×150 mm² mit einer Absicherung von je max. 200 A sichergestellt.

5.1.4 Kommunikationsanbindung Supraleiter Testfeld (Sekundärtechnik)

Um den sicheren Betrieb des Netzes während der Testphase und der Abschaltung des SuperLink-Testfeldes vom SWM-Netz zu gewährleisten, wurde ein umfassendes Schutz- und Betriebskonzept erforderlich. Dieses Konzept berücksichtigte eine Vielzahl möglicher Fehlerfälle, wie etwa Kurzschlüsse oder Erdschlüsse an verschiedenen Betriebsmitteln. Für die Umsetzung des Betriebs- und Schutzkonzeptes wurden, in Abstimmung mit NKT und Linde, die Signalkabelverbindungen durch SWM bereitgestellt (siehe Abb. 1.5). Als Übergabepunkt zum Testfeld wurde ein Verteiler (KV2) definiert. Die Verdrahtung von diesem Verteiler zu der Automatisierungstechnik der Supraleiter-Teststellung erfolgte durch die Firma NKT.

5.1.5 Übergabe des Supraleiter Testfeldes an NKT

Vor Beginn des Teststellungsaufbaus durch NKT erfolgte eine Übergabe des Testfeldes von SWM an NKT. In diesem Zuge wurden, durch Abschränkung zu den in Betrieb befindlichen Anlagenteilen, Arbeitsbereiche definiert. Dies diente zum einen der eindeutigen Abgrenzung Testfeld - Anlagenfeld, zum anderen als Sicherheitsabgrenzung zu spannungsführenden Teilen.

AP5.4 Testbetrieb im Hauptumspannwerk Menzing

Für den Testbetrieb wurde die von NKT aufgebaute HTS-Kabelschleife an den Verbindungsschienen, die zwischen den Nord- und Süd-Endverschlüssen der drei Phasen angebracht waren, mit dem 110 kV Hochspannungsnetz der Stadtwerke München verbunden. Für die Inbetriebnahme des Testfeldes war es somit notwendig, Schutzeinrichtungen zu installieren, zu parametrisieren und zu testen, damit ein gefahrloser und sicherer Betrieb des Testfeldes ohne negative Auswirkungen auf das SWM-Netz gewährleistet werden konnte. Zudem wurden Meldungen für eine automatisierte Notfall-Abschaltung und eine Vorwarnmeldung für einen kritischen Systemzustand des Testfeldes, wie zum Beispiel dem Ausfall der Kühlung, definiert und implementiert, um die Netzleitstelle der SWM in diesen Situationen über den Status des Testfeldes zu informieren.

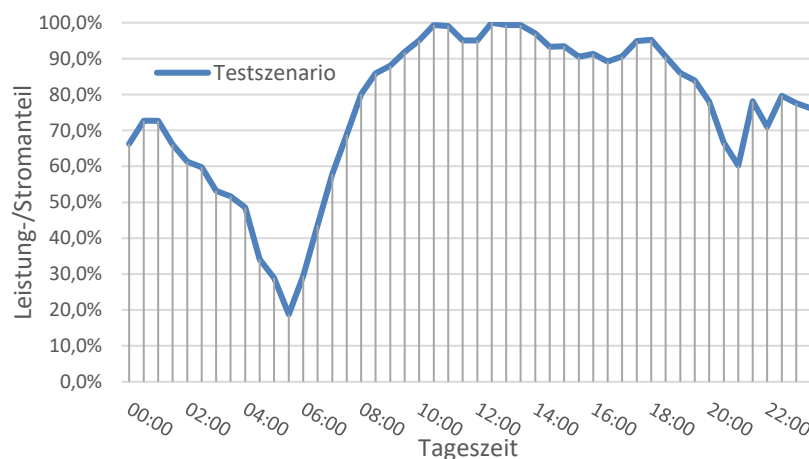


Abb. 1.6: Relative Lastkurve als realitätsnaher Tagesverlauf des Energiebezugs der Hauptumspannwerke der SWM als Vorgabe für das zweite Testszenario

Für den Testbetrieb wurden zwei Testszenarien definiert. Neben einem Dauerlasttest mit einem konstanten symmetrisch eingepprägten Strom in alle drei Phasen wurde als zweites Testszenario eine typische Tagesverlaufskurve anhand des Energiebezugs der Hauptumspannwerke der SWM aus dem übergelagerten Transportnetz bestimmt. Diese wurde skaliert auf die Leistungsfähigkeit des

HTS-Kabelsysteme ebenso symmetrisch in die drei Phasen induziert. Abb. 1.6 zeigt diese relative Lastkurve für das zweite Testszenario.

Vor der ersten Inbetriebnahme (Bespannung mit 110 kV-Netzspannung) des Testfeldes am 12.08.2024 erfolgte eine Überprüfung der primär- und sekundär-technischen Komponenten mittels einer Schutzprüfung, inklusive Auslösung im spannungsfreien Zustand und einer Hochspannungsprüfung. Nach den Gleichstrom- und Wechselstrombelastungstest erfolgte die offizielle Freigabe für den Testbetrieb am 09.10.2024. Projektpartner und Fördergeber schalteten symbolisch das Testfeld in Betrieb (Siehe Abb. 1.7 und Abb. 1.8)



Abb. 1.7: Offizielle Einweihung des Testfeldes am 09.10.2024



Abb. 1.8: Symbolisches Einschalten des Testfeldes durch die Vertreter der Projektpartner

Im Anschluss erfolgten in Abstimmung mit NKT die Tests anhand der definierten Testszenarien. Dabei wurde schrittweise der Maximalstrom bis an den Höchstwert von 2625 A je Phase, das entspricht einer Leistung von 500 MVA bei 110 kV, erhöht. Mehrere Konfigurationsänderungen an der Kühlung waren notwendig, bis der optimale Betriebspunkt erreicht wurde.

Bei den Tests gab es bezüglich des HTS-Kabels keine nennenswerten Auffälligkeiten. Insbesondere der Dauerbelastungstest zeigte eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit des HTS-Kabels.

F.2 THEVA

AP2.4 Entwicklung und Herstellung der HTS-Bandleiter

Als HTS-Bandleiterhersteller im Projekt war THEVA verantwortlich für die Entwicklung und Fertigung der HTS-Leiter für die Qualifizierungstests und das Material, das im Kabel zum Einsatz kam. Dafür wurden mehrere neue Prozessabläufe zur Konfektionierung bis zur Fertigungsreife entwickelt:

- Laserschneiden der HTS-Bandleiters von Fertigungsbreite 12 mm in jeweils vier 3 mm breite und zwei 6 mm breite Adern.
- PVD-Verkupferung der geschnittenen Bandleiter und die dafür erforderliche Erhöhung des Durchsatzes der Kupferbeschichtungsanlage.
- „Reparatur“ (Patchen) von defekten Stellen zur Erhöhung der erreichbaren HTS-Leiterlänge.
- Laminierung mit 150 µm dicken Tombak-Bändern, die zuvor einseitig mit $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$ -Lot (SAC) beschichtet und anschließend in schmalere Adern von 2,5 bzw. 5,5 mm Breite aufgeteilt wurden.

Da jeder dieser Prozesse das Risiko birgt, den Bandleiter zu beschädigen, lag der Fokus hauptsächlich auf der Erhöhung der Ausbeute. Die neu entwickelten Bandleiter wurden hinsichtlich der von NKT gesetzten Spezifikationen geprüft und qualifiziert.

2.4.1 Erarbeitung der Anforderungen

Um die Wechselstrom (AC)-Verluste im Kabel zu reduzieren, müssen die Abstände zwischen den Bandleitern, die im Kabel auf dem zylindrischen Former nebeneinander als Helix aufgewickelt sind, minimiert werden. Dies erfordert möglichst schmale Bandleiter mit geringer Breitentoleranz (Kreisoberfläche wird durch Polygon angenähert). Schmale Bandleiter sind jedoch schwieriger zu handhaben und erhöhen das Risiko für Defekte und Einbrüche im kritischen Strom.

Aus Optimierungsüberlegungen heraus wurden für die Phasen des Kabels Bandleiter mit 3 mm Breite eingesetzt. Das von NKT erarbeitete Kabeldesign beinhaltet zusätzlich um jede supraleitende Phase auch einen Neutralleiter (Schirm) aus HTS-Drähten. Da zwischen der Phase und dem Schirm die Hochspannungsisolierung liegt, ist der Durchmesser des Schirms deutlich größer und so konnten dort 6 mm breite HTS-Leiter verarbeitet werden, was sich auf Ausbeute und Kosten positiv auswirkte.

2.4.2 Mechanische Anforderungen

Aus der industriellen Verkabelungsanlage bei NKT erwachsen besondere Anforderungen an die mechanische Stabilität und Robustheit. Zudem mussten für den Verseilungsprozess HTS-Leiter mit größeren Stücklängen geliefert werden. Um von den Herstellungslängen unabhängiger zu werden, wurde auch eine Patch-Technik entwickelt, um Defekte zu überbrücken und längerfristig Leiter aneinander anstücken zu können. Diese Patches sollten auch möglichst die gleichen mechanischen Anforderungen erfüllen, wie der Leiter selbst, so dass sie sich problemlos verarbeiten lassen.

2.4.3 Laminierung

Um eine hohe Kurzschluss toleranz zu gewährleisten, mussten die HTS-Bandleiter mit einer dicken, elektrischen Stabilisierungsschicht aus einem leitfähigen Material laminiert werden, um ein Durchbrennen bei Überschreiten des kritischen Stroms zu verhindern. Die Stabilisierung diente dazu einerseits den überschüssigen Strom kurzfristig aufzunehmen, andererseits die durch den Normalleiter lokal entstehende Wärme effektiv abzuleiten. Das Laminat sollte dazu eine möglichst hohe elektrische- und Wärmeleitfähigkeit besitzen, in der Wärmeausdehnung gut an den HTS-Bandleiter angepasst sein und eine bessere Zugfestigkeit und Dehngrenze als reines Kupfer aufweisen. In Voruntersuchungen wurden eine ganze Reihe möglicher Materialkandidaten untersucht. Im Endeffekt konnte nur die Messinglegierung Tombak (CuZn_{10}) als Laminat überzeugen und qualifiziert werden.

Für eine gute elektrische Verbindung muss diese Stabilisierungsschicht mit der Bandleiteroberfläche sicher und mit geringem Übergangswiderstand verlötet werden.

Aus den gegebenen Anforderungen wurde zusammen mit NKT der Bandleiteraufbau in Abb. 2.1 abgeleitet. Ausgangsmaterial ist ein 3 mm (bzw. 6 mm für den Schirm) breiter Bandleiter mit einer 10 μm dicken umlaufenden Kupferbeschichtung. Dieses wird anschließend einseitig mit einem ca. 2,5 mm breiten (bzw. 5,5 mm für den Schirm) und 150 μm dicken Tombak-Band zusammen verlötet und damit laminiert.

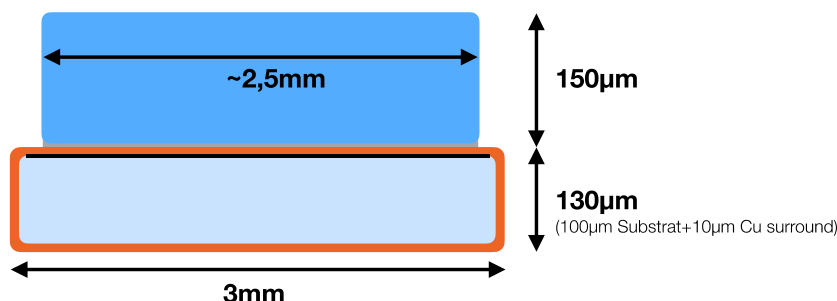


Abb. 2.1: Schema der in der Kabel-Phase verwendeten Bandleiter-Architektur

Dadurch entsteht ein leicht trapezförmiger Querschnitt, so dass sich die Leiter sehr gut nebeneinander auf Stoß auf die gekrümmte Oberfläche des Formers auflegen lassen.

2.4.4 Defekte, Stromumverteilung, Akzeptanzkriterien

Die Fertigung der Bandleiter auf großen Längen ist nie ganz fehlerfrei. Durch Variationen der Beschichtungsparameter in den Fertigungsprozessen können lokale Variationen in der Stromtragfähigkeit der Bänder entstehen. Hinzu kommen Defekte durch Beschädigungen der Schichten auf Umlenkrollen, an Seitenscheiben der Bandspulen oder während der Handhabung der Bänder. Diese Fehler führen zu Einbrüchen des kritischen Stroms unter das spezifizierte Minimum. Die maximale auslieferbare Länge ohne Einbrüche wird somit statistisch limitiert.

Innerhalb des Kabels werden glücklicherweise viele Bandleiter nebeneinander auf einen gemeinsamen Kupferformer gewickelt. Die Leiter korrespondieren elektrisch und die Stromumverteilung aus einem defekten Band in die benachbarten Bandleiter ist grundsätzlich möglich. Die Stromumverteilung wurde bei THEVA mit Gleichstrom, bei NKT mit Wechselstrom untersucht. Basierend auf diesen Messungen kann davon ausgegangen werden, dass hinreichend kurze Defekte auch im Fehlstromfall keine Probleme darstellen, wenn sich der Strom in den Former umverteilen kann. Auch bleiben die Verluste im Betrieb akzeptabel. Diese Erkenntnis war kritisch für die Akzeptanz von Defekten in Bandleitern und damit auch für Ausbeute und Kosten der Bandleiter.

Basierend auf Berechnungen des NKT-Teams wurden schließlich die Akzeptanzkriterien in Tabelle. 2.1 für die HTS-Bandleiter festgelegt.

Tabelle. 2.1 I_c -Anforderungen an Bandleiter für Demokabel.

Bandleitertyp	I_c -Mittel	I_c -Minimum	Defektanalyse
Phase (3 mm)	135 A	105 A	20 – 105 A
Schirm (6 mm)	180 A	105 A	20 – 105 A

Wie in Tabelle. 2.1 zusammengefasst, wurde aus hochaufgelösten Daten für jeden Meter des Bandes der Mittelwert des kritischen Stroms I_c ermittelt. Gab es Einbrüche unter das spezifizierte Minimum (105 A), wurde die Halbwertsbreite von Defekten zwischen 20 und 105 A ausgewertet und mit dem Drop-out Kriterium im Diagramm der Abb. 2.2 verglichen. Wenn die Werte eines Bandleiters allesamt im grün markierten Akzeptanzbereich lagen, wurde das Band freigegeben.

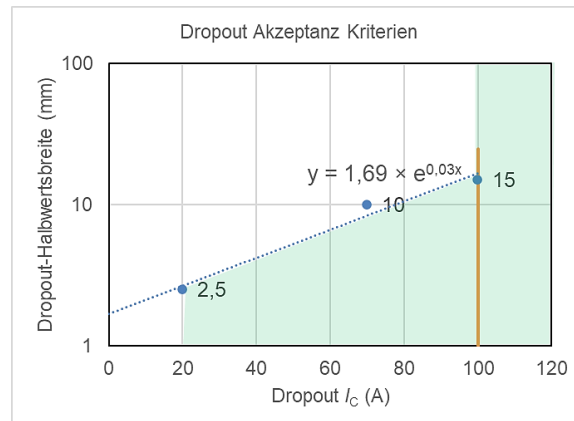


Abb. 2.2: I_C -Akzeptanzbereich für HTS-Bandleiter im Demokabel.

2.4.5 Herstellungsprozess für HTS-Bandleiter

Um flexible Leiter aus der HTS-Keramik $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ herzustellen, werden diese als dünne, kristallin orientierte Schichten auf ein flexibles Metallsubstrat aufgebracht. THEVA benutzt dafür physikalische Beschichtungsverfahren (PVD) basierend auf dem Elektronenstrahl-Verdampfen. Auf das elektrolytisch polierte Substrat (Hastelloy C276) wird zunächst eine MgO Doppelschicht aufgebracht, in der die kristalline Textur erzeugt wird und die als Pufferschicht zum Substrat dient. Im nächsten Schritt folgt die Supraleiterschicht die die richtige Orientierung von der Unterlage übernimmt (Epitaxie). Nur so lassen sich hohe kritische Stromdichten erreichen. Eine nur $1\text{ }\mu\text{m}$ dünne, umlaufende Silberschicht (Ag), sorgt für einen niederohmigen Kontakt zum Supraleiter, so dass die extrem hohen Ströme eingespeist werden können.

In der seit 2016 bestehenden Pilotfertigung kann THEVA 12 mm breite Bandleiter auf $50\text{ }\mu\text{m}$ sowie $100\text{ }\mu\text{m}$ dickem Substrat mit bis zu 800 m Länge herstellen. Die hohe Ausbeute von über 90% wird befördert durch den vergleichsweise einfachen Schichtaufbau des Supraleiterbandes (siehe Abb. 2.3).

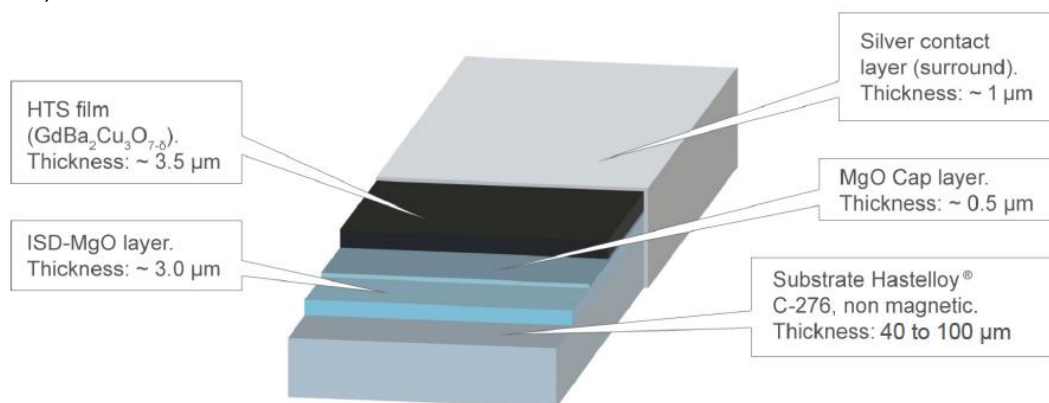


Abb. 2.3: Schematischer Aufbau des HTS-Bandleiters (Dicken nicht maßstabsgetreu)

Der so hergestellte Bandleiter wird nachfolgend für die Anwendung konfektioniert, um den Anforderungen des Verseilungsprozesses zum Kabel zu genügen. Die im SuperLink-Projekt entwickelten Prozesse betreffen ausschließlich die folgenden Konfektionierungsschritte.

2.4.6 Laserschneiden

Für die Kabelherstellung werden schmale Bandleiter benötigt. Der Roh-Bandleiter mit 12 mm Breite muss deshalb sehr präzise und möglichst ohne Degradation längs aufgeschnitten werden.

Vor dem Projekt kamen dazu auch bei Wettbewerbern fast durchgängig Rollenmesser zum Einsatz. Das Abscheren stellt jedoch eine sehr grobe Behandlung dar und erzeugt in den Keramikschichten Risse und auch Grate an den Bandkanten. Diese Risse können sich mehrere hundert μm von der

Schnittkante in die HTS-Schicht reichen und führen nicht zuletzt unter mechanischer Belastung bei der Weiterverarbeitung zu einer massiven Degradation des kritischen Transportstroms.

Bei THEVA wurde deshalb eine Anlage zum schnellen Laserschneiden bis zur Serienreife aufgebaut (Abb. 2.4). Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass praktisch keine Beschädigung der HTS-Schicht entsteht, und das Band mit mehreren Schneidköpfen mit hoher Präzision und Geschwindigkeiten ($> 25 \text{ m/min}$) in schmale Streifen geschnitten werden kann.

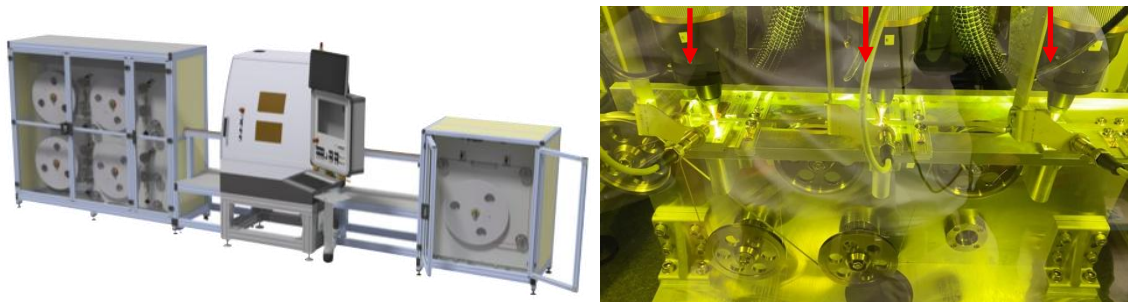


Abb. 2.4: Gesamtansicht der neuen Laserschneidanlage (links) und Blick auf die drei Schneidköpfe (rechts)

Auch die Schnittbreite kann mit der Laserschneideanlage sehr genau kontrolliert werden. Abb. 2.5 zeigt eine Breitenmessung des 3 mm-Schneidprozesses über 70 m Bandlänge. Die Standardabweichung konnte sofort unter 0.04 mm gesenkt werden. Durch eine Automatik zur Anpassung des Schnitts an die reale Eingangsbandbreite verbesserte sich die Maßhaltigkeit der Bänder auf unter 0.02 mm und die Einrichtung des Prozesses konnte um den Faktor vier schneller erfolgen, was die Produktivität der Anlage nochmals steigerte. Die extrem gute Maßhaltigkeit schaffte ideale Voraussetzungen, um die Bandleiter passgenau im Kabel zu verwickeln.

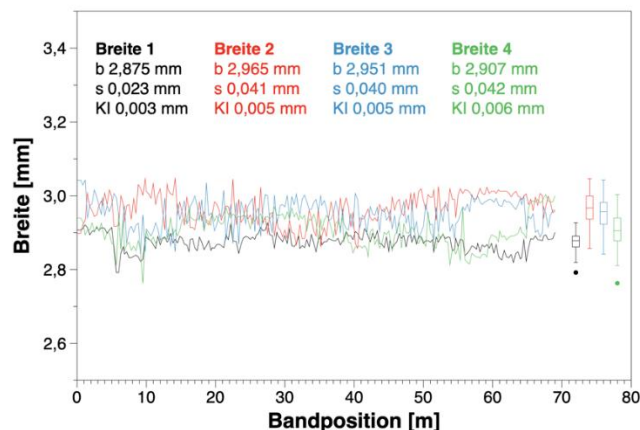


Abb. 2.5: Verlauf der Bandbreiten gemessen an einem 70 m langen Bandleiter. Oben im Diagramm sind die Mittelwerte der Breite (b), die Standardabweichung (s) und der 95%-Konfidenzintervall (KI) für jede Ader angegeben. Rechts sind zur Verdeutlichung der Lage und Streuung der Bandbreiten die dazugehörigen Boxplots dargestellt.

Besonders eindrucksvoll ist der Vergleich der Qualität in der Stromtragfähigkeit von Bandleitern, die mit Laser oder Rollenmesser geschnitten wurden – dargestellt in Abb. 2.6. Deutlich sichtbar sind die tiefen Einbrüche durch angelegte mechanische Defekte und Risse im mechanisch geschnittenen Band.

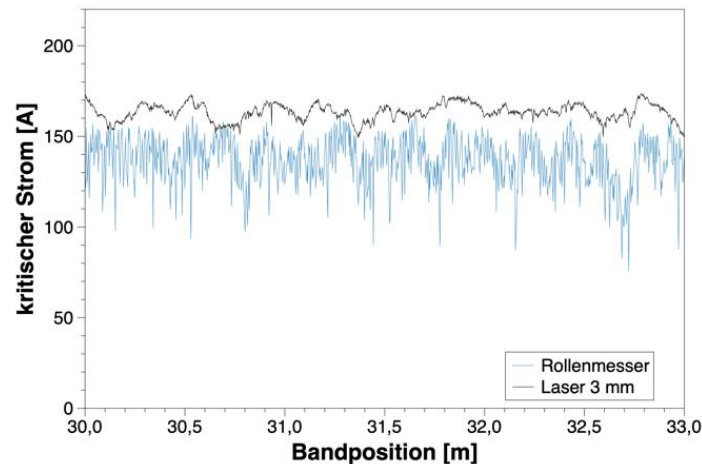


Abb. 2.6: Vergleich der I_c -Verläufe eines mit Rollenmesser-geschnittenen (blau) mit dem Laser-geschnittenen (schwarz) Bandleiters mit vergleichbarer ursprünglicher Ausgangsperformance.

2.4.7 Metallisierung

Bei der Entwicklung der Kupferbeschichtung stand vor allem die Steigerung des Durchsatzes im Vordergrund. Während der Fertigung des Leiters für das Typtestkabel wurde noch ein Bandwickler mit nur 15 Bahnen für 12 mm breites Band verwendet. Zwischen den Passagen über die Quelle muss das Band gekühlt werden, damit es nie wärmer als etwa 80-120°C wird, da die Supraleiterschicht sonst im Vakuum Sauerstoff verliert und somit die supraleitenden Eigenschaften degradieren. Gleichzeitig darf pro Passage nicht zu viel Kupfer auf dem Band abgeschieden werden, da sonst die Temperatur zu hoch ansteigt. Um die insgesamt 10 μm Kupfer beidseitig abzuschneiden, hätte der Leiter mit 500 m/h insgesamt fünfmal durch die Anlage gefahren werden müssen. Für die schmalen Leiter (3 mm) wurde deshalb ein Wickler mit 42 Umläufen. Da dadurch die Zahl der Umlenkrollen massiv zunimmt, wurde die Lagerung der Rollen neu konzipiert. Jede Rolle wurde einzeln an einer Kühlfahne über zwei vergleichsweise kleine Kugellager aufgehängt. Auf diese Weise können Rollen nicht seitlich verkippen und die Reibungsmomente sind sehr klein. Der Zugkraftverlust für mehr als 80 Umlenkrollen in einem Wickler konnte so auf insgesamt etwa 2 N begrenzt werden. Die Prozessgeschwindigkeit stieg um den Faktor drei.

2.4.8 Laminierung

Zur Laminierung wurde eine Anlage beschafft und in Betrieb genommen, die jedoch weder für die schmalen Bänder noch für das steifere Tombak ausgelegt war. Um die Prozesssicherheit zu erhöhen, wurden die Lötrollen vollständig neu konstruiert, so dass die Heizung der Rollen indirekt durch Strahlungsheizer erfolgte, die sich nicht mehr mit der Lötrolle mitdrehen (Abb. 2.7). So konnte die Stromversorgung der Heizelemente sehr einfach realisiert werden und es kam auch nicht mehr zu ungewollten Verdrehungen der Stromleitungen.

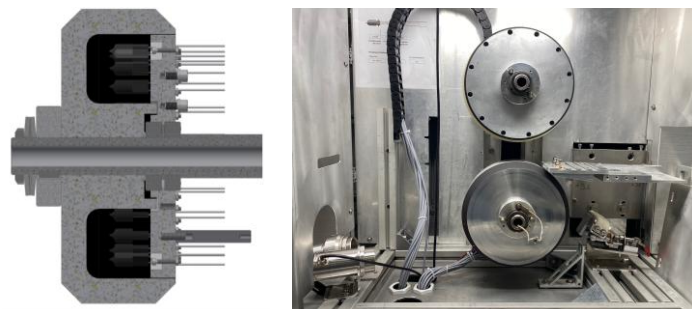


Abb. 2.7: Querschnitt der neu konstruierten Heizwalze (links). Auf der rechten Seite sind feststehend mehrere Halogenlampen angeordnet. Auf der rotierenden Achse ist eine Aluminiumhalbschale befestigt, die nun von innen geheizt wird. Die Halbschale kann bei Bedarf sehr einfach ausgetauscht und gewartet werden. Rechts ist die Heizwalze in eingebautem Zustand abgebildet.

Die neuen Lötrollen hatten zudem eine deutlich geringere thermische Masse und konnten damit schneller aufgeheizt werden. Zur Vermeidung von Delaminierung wurde eine Kühleinheit so nah wie möglich hinter den Heizwalzen angebracht. Beim Verlassen wurde das Laminat dadurch schnell unter die Schmelztemperatur des Lots herabgekühlt, so dass sich die Bänder nicht voneinander lösen konnten.

2.4.9 Defektreparatur (Patchen)

Eine Möglichkeit zur „Reparatur“ von Einbrüchen im kritischen Strom ist das Überlöteten der defekten Stelle mit einem zweiten, einige Zentimeter langen Supraleiterband (→ Patch). Auf diese Weise lassen sich auch Verbindungen zwischen zwei Bandleitern herstellen, wenn man zunächst die Substrate der Leiter mittels Laserschweißen verbindet und anschließend die Schweißstelle überlötet.

Der beste Zeitpunkt zum Patchen ist vor der Laminierung, da der Patch dann „vergraben“ und durch das Laminat stabilisiert wird. Als Patch kam ein Bandleiter mit einem 30 µm dünnen Substrat zum Einsatz, um möglichst wenig Dicke aufzutragen und die mechanische Steifigkeit nicht zu stark zu verändern. Das Patch-Band wurde mit einer 10 µm dicken, umlaufenden Kupferschicht versehen und mit ca. 5 – 8 µm SAC305 – Lot verzinnt. Danach wurde das Band auf eine Breite von 3 mm geschnitten und mit einer halbautomatischen Lötapparatur aufgelötet.

Mit diesem Verfahren konnten reproduzierbar Kontaktwiderstände von 20 – 30 nΩ erzielt werden, was signifikant unter den spezifizierten 50 nΩ lag. Da der Strom bei diesem geringen Kontaktwiderstand innerhalb von einigen Zentimetern kommutiert, reichten Patchlängen von 10 – 15 cm zur sicheren Überbrückung.

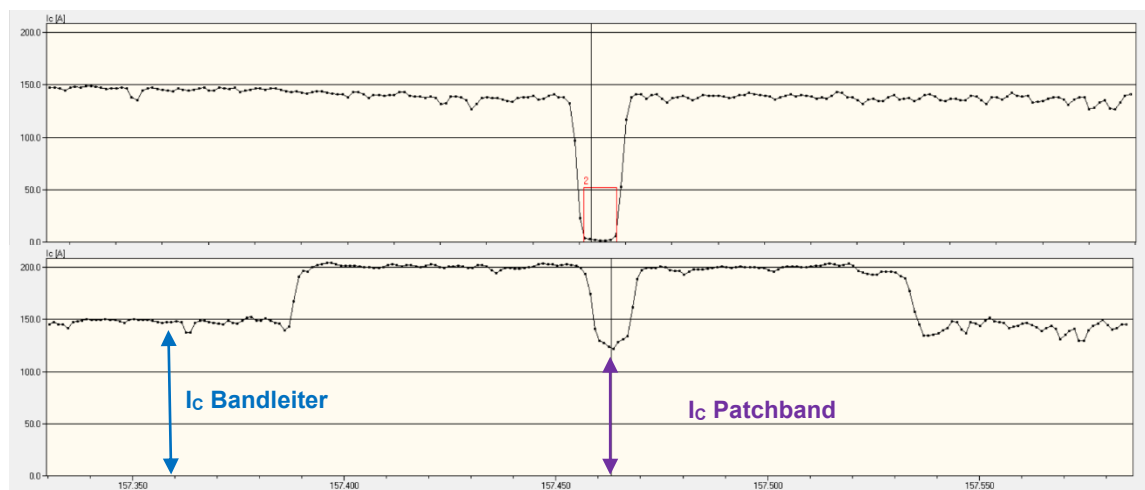


Abb. 2.8: Der Ausschnitt aus dem TapeStar-Plot (oben) zeigt einen IC -Einbruch auf 0 A über 2 cm Breite. Der Plot unten zeigt die gepatchte Stelle.

Zur Erfolgskontrolle wurden Defektstellen vor und nach dem Patchen im TapeStar™ vermessen, wie beispielhaft in Abb. 2.8 gezeigt. Nach dem Patchen ist der kritische Strom im Patch-Bereich leicht erhöht, allerdings nicht auf das Doppelte des vorherigen Wertes, was an der gegenseitigen Abschirmung der Bänder liegt. In der Mitte jedoch, wo das Substratband keinen Strom trägt, sieht man das I_c des Patch-Bandes, welches hier bei ca. 125 A liegt. Das geforderte Minimum von 105 A ist somit überschritten und das Band kann im Kabel verwendet werden.

AP4.1 Herstellung der HTS-Komponenten für die Qualifikationstests

Qualifikations- und Typ-Tests

Bei der Verarbeitung zum Kabel stellt die Deformationen der Bandleiter eine kritische Größe dar. Deshalb wurden im Vorfeld eine Reihe von Biege- und Torsionstests durchgeführt, um die kritischen Belastungsgrenzen zu ermitteln. Für die Biegeversuche (double-bending in beide Richtungen) wurden 50 cm lange laminierte Bandleiter-Proben verwendet und bei Biegeradien von 25, 20, 15, 12,5 und 10 mm untersucht. In Abb. 2.9 ist der Verlauf der I_c -Reduktion gegenüber den Biegeradien aufgetragen. Dadurch ließ sich der kritische Biegeradius zu $r_{\text{krit}} = (16,9 \pm 2,4)$ mm bestimmen und ist somit gut innerhalb der Spezifikation von $r < 30$ mm.

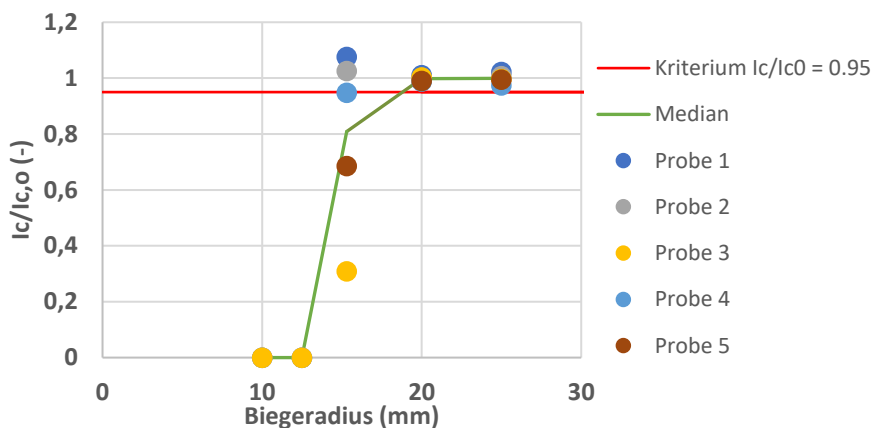


Abb. 2.9: I_c -Degradation in Abhängigkeit des Biegeradius

Zur Bestimmung der Torsionsfestigkeit wurden 50 cm lange laminierte Bandleiter-Proben um einen Former mit 15 mm Durchmesser gewickelt und Schlaglängen (Pitch) von 30, 20, 15 und 10 cm untersucht. Vor und nach den Versuchen wurden Strom-Spannungs-Kennlinie in flüssigem Stickstoff aufgenommen.

In Abb. 2.10 ist das Verhältnis I_c/I_{c0} über die Schlaglängen aufgetragen. Mit sinkender Schlaglänge steigt die mechanische Belastung auf die Bänder und eine I_c -Reduktion ist zu beobachten. Die kritische Schlaglänge, bei einer I_c -Reduktion unter 5%, bleibt, ergab $h_{\text{krit}} = (13,8 \pm 0,2)$ cm und liegt damit weit unterhalb der spezifizierten Schlaglänge von 40 cm.

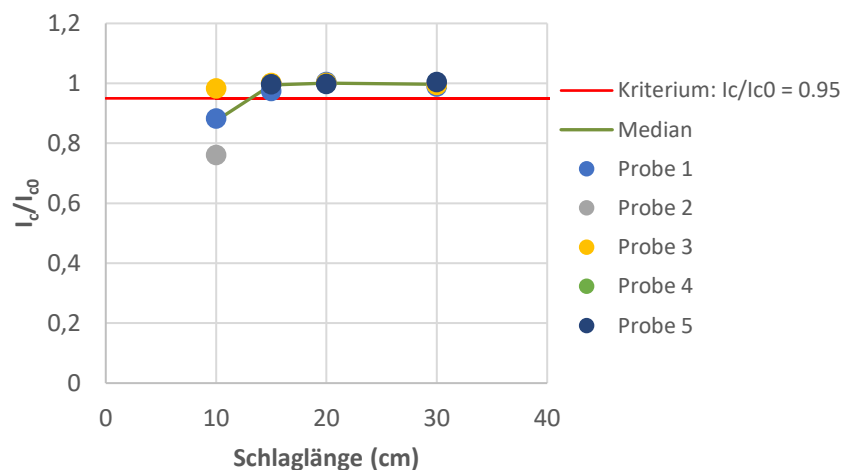


Abb. 2.10: I_c -Degradation in Abhängigkeit der Schlaglänge

Neben den mechanischen Tests wurden im Rahmen der Qualifizierung und Typ-Prüfung eine ganze Reihe weiterer Tests zur Temperaturbeständigkeit, Lagerung und Beständigkeit gegen Feuchtigkeit durchgeführt und an einem großen Probensatz statistisch ausgewertet. Alle diese Messungen verliefen sehr zufriedenstellend, so dass das Risiko der Degradation beim Verwickeln oder Anlöten

der Endverschlüsse als gering und überschaubar gesehen wurde. Lediglich die Anfälligkeit gegenüber Feuchtigkeit durch die offenen Kanten der hier produzierten Bandleiter stellt einen Risikofaktor dar, dem man jedoch durch geeignete Verpackung und trockene Lagerung begegnen kann.

Da der Schirm-Bandleiter doppelt so breit war (6 mm), stellten hier die Leistungsanforderungen keine wirklichen Einschränkungen dar und auch die Resultate der Typ-Tests (mechanische Tests und Umweltbeständigkeit) konnten aus den 3 mm Tests einfach übertragen werden.

Fertigungstests

Im Rahmen des SuperLink Projekts wurden zwei Bandleiter-Serien gefertigt. Die erste im Zeitraum Juli 2021 – Dezember 2021, die zweite leicht überlappend von Dezember 2021 bis Juli 2022. In der ersten Serie wurden nur 80 m lange Stücke für ein Qualifikationstestkabel gefertigt. Dieses benötigte nur eine Phase anstelle der drei Phasen für das Demokabel. Das Material für das Qualifikationstestkabel (TT) war noch deutlich schlechter als das Material, das später im Demo-Kabel (DK) zum Einsatz kam. Zum einen spiegelt das den früheren Entwicklungsstand wider, zum anderen konnte das auf eine deutlich schlechtere Substratcharge (Hastelloy) zurückgeführt werden.

Bei der resistiven Gleichstrom-Messung des Qualifikationstestkabels wurde festgestellt, dass die Bandleiter im Schnitt um ca. 50% degradiert waren und der resultierende kritische Strom I_c zu niedrig war, um die Spezifikationen des 500 MVA Kabels zu erfüllen.

Zum Zwecke der detaillierten Analyse erhielt THEVA 30 Stücke je 0,6 m langer Bandleiter aus dem Qualifikationstestkabel zurück. Diese Stücke wurden sowohl visuell genau untersucht, als auch im TapeStar vermessen. Die Veränderungen im I_c gegenüber den Ursprungsbändern ließen sich vier Defektenklassen zuordnen, von denen drei eindeutig auf die anfänglichen Unzulänglichkeiten der neuen Schneide- und Laminier-prozesse zurückzuführen waren. Defekte die in diesen Prozessen angelegt waren, wie zum Beispiel offen Kanten, Lotschlacke- und Flussmittlrückstände hatten sich beim Verseilen, der Lagerung und der Messung des Kabels (Feuchtigkeit) verschlimmert. Lediglich eine Art mechanischer Defekte konnte Klemmrollen in der Verkabelungsmaschine zugeordnet werden.

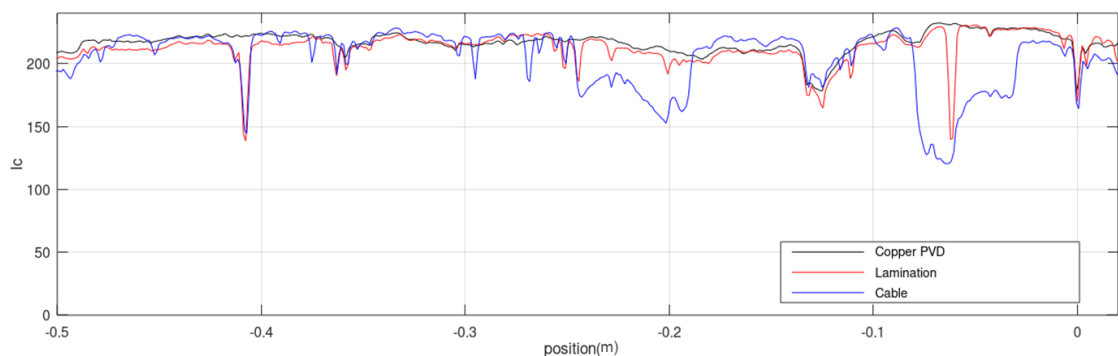


Abb. 2.11: I_c -Messung derselben Bandleitersektion jeweils nach der Verkupferung (schwarz), nach der Laminierung (rot), sowie nachdem der Bandleiter im Typtestkabel verbaut worden war (blau).

Abb. 2.11 zeigt TapeStar-Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten der Fertigung (schwarz, rot) und post-mortem (blau) aus dem Typtest-Kabel. Vor allem beim Laminieren wurden offenbar Defekte angelegt, die sich im weiteren Verlauf der Verarbeitung und Tests verstärkten.

In der Folge wurden eine Reihe prozesstechnischer Verbesserungen vor allem in Verbindung mit dem Laminier-Prozess umgesetzt. Um die Wirksamkeit der Maßnahmen zu überprüfen, wurde im Februar 2022 nochmals ein 10 m langes Kabelstück (Phase) ohne Schirm gefertigt, aus 30 Stücken des neuen DK-Materials mit je 10 m Länge und 3 mm Breite.

Um kritische Stellen in der Verkabelungsanlage zu lokalisieren, wurde ein Kabelstück bis zu drei unterschiedlichen Fertigungsgraden hergestellt und in drei Sektionen unterteilt. Zuerst wurden die HTS-Drähte in der Verseilanlage auf den Former gewickelt. Anschließend wurden die Isolierlagen um die Drähte gewickelt und zuletzt fuhr das Kabel durch die sog. Zugraupe, die den Antrieb darstellt.

Diese besteht aus zwei Förderbändern, die von oben und unten auf das Kabel drücken und dieses Richtung Trommel vorwärts transportieren. Das vorderste Drittel durchlief die Wicklung, die Isolierung und die Zugraupe und wurde im Anschluss aufgetrommelt – also gebogen. Das zweite Stück lag beim Anhalten des Prozesses noch in der Raupe, wurde also nicht gebogen, hat aber den Druck durch die Raupe erfahren. Das dritte Stück war vor der Raupe stehen geblieben.

Die drei Teilstücke wurden bei NKT separat in flüssigem Stickstoff getestet. Die Bandleiterstücke hatten über die 10 m sehr konstante kritische Ströme. Ohne Degradation wäre also zu erwarten gewesen, dass alle Kabelstücke den gleichen kritischen Strom transportierten. Tab. 2.2 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse aus diesem Test. Dabei ist zu beachten, dass durch das Eigen(magnet)feld des Kabels 5 – 10% Stromreduktion gegenüber der Summe der Einzelleiter auftritt.

Tab. 2.2 Zusammenfassung der Messergebnisse der drei Stücke aus Typtest 2.0.

Prozesse	Gewickelt & isoliert	Zugraupe	Auftrommeln	Kritischer Strom I_c (A)	Relativ zu Original
Original				ca. 4100	
Stück 1	X			3900	95%
Stück 2	x	X		3100	76%
Stück 3	x	x	x	3300	80%

Um das Risiko für das Demokabel weiter zu senken, führte THEVA am Kabelstück 2 eine detaillierte Fehlerursachenanalyse durch, um weitere Verbesserungen des Kabelfertigungsprozesses abzuleiten. Die gravierendsten Beschädigungen konnten auf das Gleiten der Bänder auf dem Former zurückgeführt werden, wobei sich die Bänder gegeneinander verschoben und sich die Leiterkanten gegenseitig schädigen. Mechanische Berechnungen bei NKT zeigten auch, dass die Zugraupe an manchen Stellen die zulässige Belastungsgrenze des Bandleiters überschritten hatte. Daraufhin wurden einige Modifikationen an der Zugraupe vorgenommen, um diese Druckspitzen zu reduzieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch den Einsatz des DK-Bandleiters an Stelle des TT-Bandleiters sowie durch Verbesserungen in der Verkabelungsmaschine die I_c -Degradation der supraleitenden Bänder im Kabel auf unter 20% reduziert wurde und damit die geforderten Spezifikationen erreicht werden konnten.

AP4.3 Herstellung der HTS-Komponenten für das Demokabel

Fertigung des DK-Materials

Nach den Vorentwicklung und den ausgedehnten Tests im Rahmen der Typprüfung und Qualifikation (AP4.1) wurden von Dezember 2021 bis Juli 2022 die Leiter für das Demokabel (DK) gefertigt und an NKT geliefert.

Insgesamt wurden für das Projekt 30 km₁₂ an HTS-Rohbandleiter (12 mm) hergestellt, davon ca. 20 km₁₂ DK-Material Anfang 2022, das in ca. 40 km₃ und 20 km₆ für Phasen und Schirm des Kabels konfektioniert wurde. Die statistischen Auswertungen dieser Lieferungen sind im Folgenden dargestellt, wobei sich die Bewertung der Güte vor allem auf drei Größen stützt:

- Breiten-Maßhaltigkeit innerhalb eines Bandes
- Absolutwert der Bandbreite (möglichst geringe Abweichung zwischen einzelnen Bändern)
- I_c -Wert und Verwendbarkeit des Bandes für das Kabel

Beim Wickeln der Bänder um den Kabelkern ist es besonders wichtig, dass die Bänder untereinander alle möglichst gleich breit sind. Bei den 3 mm breiten Bändern wurde ein Breitenmittelwert von

3,06 mm $\pm$ 0,03 mm erreicht, bei den 6 mm breiten Bändern ein Mittelwert von 6,08 mm $\pm$ 0,02 mm. Die Verteilungskurven sind in Abb. 2.12 dargestellt.

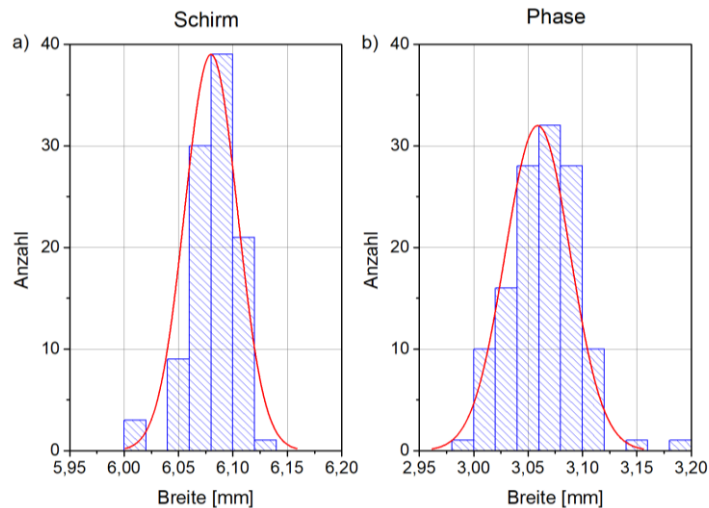


Abb. 2.12: Breitenverteilung aller produzierten Bänder für den Schirm a) und die Phase b)

Zusätzlich wurde für jeden akzeptierten Bandleiter die mittlere Stromtragfähigkeit I_C errechnet, sowie die Anzahl akzeptierter Einbrüche. Wie aus Abb. 2.13.a ersichtlich, liegt der I_C -Mittelwert bei den meisten Bändern zwischen 155-165 A, also ca. 20 A höher als gefordert, was viel Sicherheits-spielraum für das Kabel bedeutete. Die Anzahl der nach dem festgelegten Drop-out Kriterium akzeptablen Einbrüche, also Stellen geringer räumlicher Ausdehnung, in denen I_C unter 105 A fiel, lag bei den meisten Bändern unter 5 pro 200 m (vgl. Abb. 2.13.b) Nur wenige Bänder wiesen eine höhere Anzahl von Dropouts auf, was aber aufgrund der Stromverteilung und das insgesamt höhere I_C -Niveau keine Leistungsbeeinträchtigung für das Kabel darstellte.

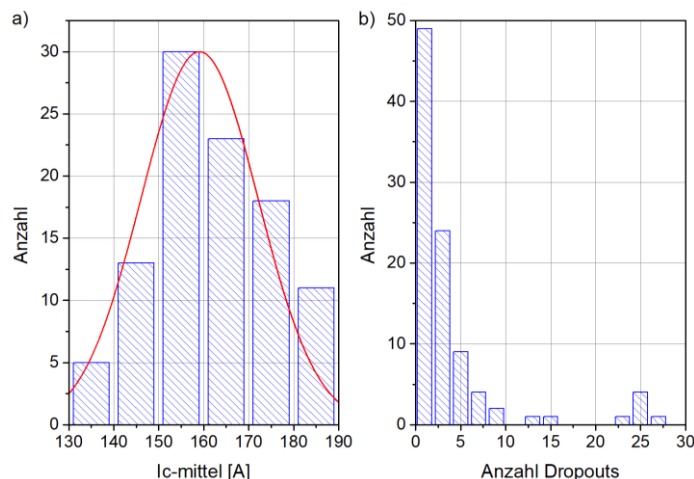


Abb. 2.13: a) I_C -Verteilung über alle akzeptierten 3 mm-Bänder für die Phasen.
b) Anzahl akzeptabler Dropouts in angenommenen Bändern.

Der Vollständigkeit halber ist in Abb. 2.14 die I_C -Verteilung der 6 mm breiten Bandleiter für den Schirm des Demokabels gezeigt. Aufgrund der Breite war das Material völlig unkritisch und die Werte lagen allesamt deutlich über den geforderten 180 A.

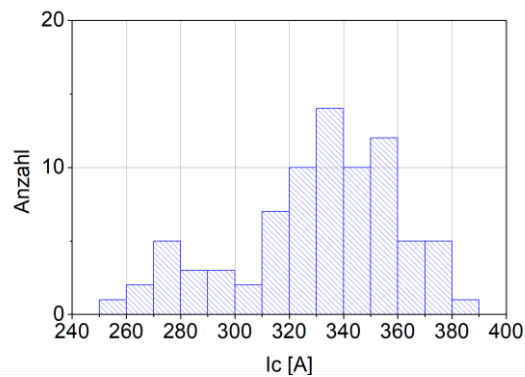


Abb. 2.14: I_c -Verteilung aller für den Schirm akzeptierten Bandleiter (6 mm).

Die Ausweitung des Akzeptanzbereichs und die Möglichkeit, prozessbedingte, unumgängliche Dropouts im Kabel ausgleichen zu können, stellt eine nicht-triviale Voraussetzung zur Kommerzialisierung von HTS-Bandleitern dar.

Ausblick

Im Projekt ist es gelungen, in der HTS-Bandleiterherstellung eine Reihe neuer Konfektionierungsprozesse zu entwickeln und bis zur Produktionsreife zu bringen, mit denen sich sicher und mit guter Ausbeute HTS-Leiter für Kabel herstellen lassen.

Der vorliegende Bericht zeigt deutlich die Entwicklungen beim Laserschneiden, in der Verkupferung und in der Laminierung von 3 mm und 6 mm breiten Bandleitern. [THEVA verfügt mit diesen Prozessen und Anlagen auch gegenüber dem internationalen Wettbewerb über wesentliche Alleinstellungsmerkmale.](#)

Die enge Abstimmung und aktive Einbindung und Beteiligung bei der Kabelfertigung beim Partner NKT hat auf beiden Seiten zu wichtigen Verbesserungen der Prozesse und letztendlich des Kabelprodukts geführt. [Dadurch konnten alle HTS-Komponenten erfolgreich gefertigt und getestet werden, so dass das Gesamtprojekt zu einem großen Erfolg geführt wurde.](#)

Noch vor Abschluss wurden aus dem Projekt wertvolle Lehren gezogen und die Prozesse weiterentwickelt, die auf einen noch robusteren und hochwertigeren HTS-Kabelbandleiter zielen. Dieser sollte sich im industriellen Verkabelungsprozess noch gutmütiger verarbeiten lassen und damit technische Risiken und Kosten der Kabelherstellung nachhaltig senken, um das angestrebte erste kommerzielle HTS-Kabel im Versorgungsnetz der SWM zu realisieren.

F.3 Linde

AP3. Auslegung Kühlsystem

AP3.1 Konzept für das verteilte Kühlsystem

Um die Leitfähigkeit des Supraleiters und die Integrität der elektrischen Isolierung zu gewährleisten, müssen Temperatur und Druck über die gesamte Kabellänge innerhalb der Nennwerte bleiben. Aufgrund des begrenzten Kühlstroms im kompakten Kryostaten sind entlang der Kabelstrecke Zwischenkühlstationen erforderlich. Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, die maximale Länge eines Kabelabschnitts bis zur nächsten erforderlichen Zwischenkühlung zu bestimmen. Daraus ließ sich die Anzahl von Kühlstationen, sowie die erforderliche Kälteleistung pro Kühlstation ableiten. Diese Informationen sind zur Abschätzung der Beschaffungs- und Betriebskosten und deswegen der gesamten Wirtschaftlichkeit erforderlich. Um diese Anforderung zu erfüllen, wurde das in Abb. 3.1(a) dargestellte Kühlsystem entwickelt.

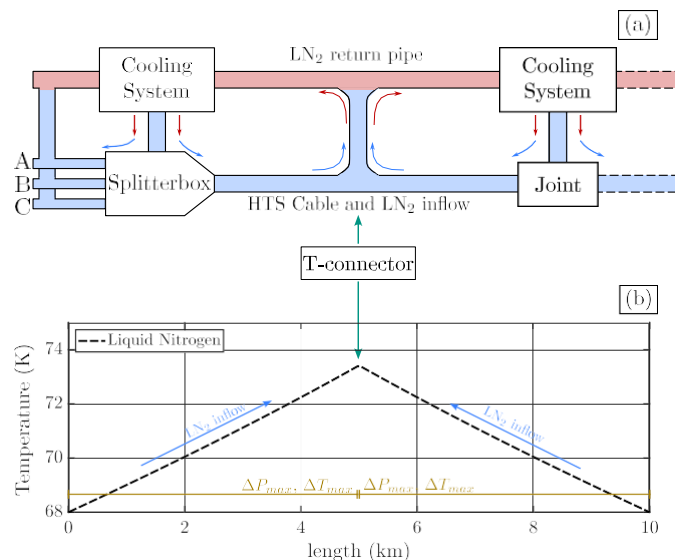


Abb. 3.1: (a) Kühlsystem mit einem HTS-Kabel und separatem Rücklauf-Kryostaten für das Kühlmittel. (b) Temperaturprofil des LN-Flusses entlang des Kabel-Kryostaten. Der Mittelpunkt entspricht der T-Verbindung, an der das Kühlmittel über die Rücklaufleitungen zurück zur Kühlstation geleitet wird.

In diesem System tritt die Kühlflüssigkeit etwa auf halber Strecke zwischen den Kühlstationen über einen T-Verbinder aus dem Kabel-Kryostat aus, wodurch sich der Abstand zwischen den Kühlstationen effektiv verdoppelt. Die in Abb. 3.1(a) dargestellte Architektur des Kühlsystems umfasst eine unabhängige Rückleitung. Diese Konstruktion erhöht die Flexibilität bei der Installation, da die Rückleitung getrennt vom Hauptkabelgraben verlegt werden kann. Die thermische Analyse zeigt, dass das Kabel über erhebliche thermische Reserven verfügt, so dass es selbst bei einem vollständigen Ausfall des Kühlsystems, z. B. bei einem Stromausfall oder dem Ausfall aller Redundanzmechanismen, mehr als 20 Stunden lang betrieben werden kann. Der Druckabfall in Rohren bei einphasiger Strömung kann mit der Darcy-Weisbach-Gleichung berechnet werden [1].

In Systemen mit festem Rohrdurchmesser und konstantem Massenstrom, wie z. B. geschlossenen Systemen, die der Kontinuitätsgleichung unterliegen, bleibt die Flüssigkeitgeschwindigkeit konstant. Im analysierten Kühlsystem wurde über einen Rohrleitungsabschnitt von 5 km ein Druckabfall von 10 bar spezifiziert. Der entsprechende Temperaturanstieg entlang dieser Strecke wurde mit der in [2] beschriebenen Methode geschätzt (Abb. 3.1(b)). Diese Methode wendet eine Finite-Differenzen-Methode (FDM) an, um das gekoppelte System von Differentialgleichungen in einem transienten Regime zu lösen.

3.1.1 Thermohydraulische Berechnung des Kabel-Kryostaten

Vollständige Methode:

Der grundsätzliche Aufbau des Hochtemperatur-Supraleiterkabels (HTS-Kabel), welches im Projekt SuperLink eingesetzt wurde, wurde bereits in Abb. 1.1 (AP1) vorgestellt. Das HTS-Kabel wird von Flüssigstickstoff (LN) durchflossen und gekühlt. Die Betriebsbedingungen der Installation bezüglich Druck und Temperatur sind durch den Schmelz- und Siedepunkt von Stickstoff (63 K und 77 K) abgegrenzt. Die maximale Länge eines Kabelabschnitts ist durch den max. zulässigen Druckabfall sowie den Wärmeeintrag von außen bestimmt. Daher spielt die thermo-hydraulische Untersuchung der LN-Strömung im Kabel-Kryostaten eine zentrale Rolle bei der Auslegung der Kabelstrecke. Das Zusammenspiel aus Temperaturanstieg und Druckverlust bestimmt neben der maximal realisierbaren Länge eines Kabelabschnitts, auch den zur Kühlung des Kabels benötigten Stickstoff-Massenstrom.

Zunächst wurden die Grundlagen der thermo-hydraulischen Berechnung der LN-Strömung im Kryostaten des HTS-Kabels erarbeitet. Dafür wurde ein Excel-Modell implementiert, mit dem für eine definierte Kabelgeometrie und vorgegebene Betriebsparameter der LN-Strömung die Kabellänge und der zur Kühlung benötigte LN-Massenstrom berechnet werden konnte (vgl. Abb. 3.2).

Zur korrekten Beschreibung des Druckverlusts der LN-Strömung wurden geeignete Korrelationen zur Berechnung des Darcy-Reibungsfaktors aus der Literatur herangezogen [3, 4]. Das implementierte Modell ist nicht nur zur Beschreibung sogenannter 3-in-1 Kabel-Geometrien geeignet. Es können ebenfalls HTS-Einleiter-Kabel (konzentrisch und/oder exzentrisch) berechnet werden. Zur Validierung des Modells wurden die Arbeiten von Ivanov et al. 2012 [5] und Tadakuma et al. 2019 [3] herangezogen.

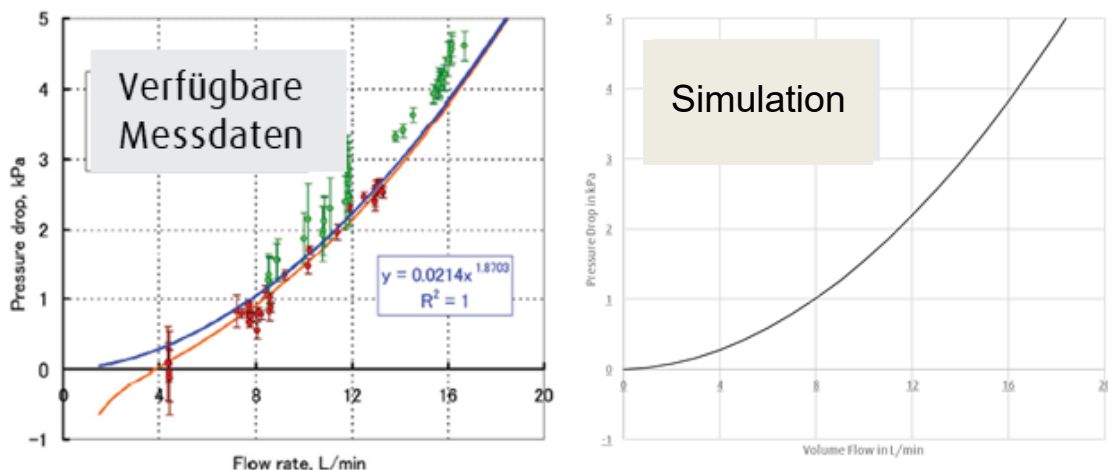


Abb. 3.2: Vergleich der Messdaten und Simulation des LN-Volumenstroms

Genauigkeit des Modells

Diese Untersuchung zeigte aber auch, dass

- eine genaue Spezifikation der Kabelgeometrie für die Modelrechnungen (im Speziellen für die Geometrie des Innenwellrohrs und Rauigkeit der Kabeloberfläche) benötigt wird, sowie
- eine genaue Berechnung der Druckverluste im Kabelabschnitt von großer Bedeutung ist: bei 5 km Länge war der Sicherheitsüberhang mit etwa 200-300 m nur minimal gegeben.

Die letzte Zahl stellt eine große Anforderung an die Genauigkeit des thermo-hydraulischen Modells. Wenn die Genauigkeit der Vorhersage die 4% übersteigt, ist der Sicherheitsaufschlag bereits aufgebraucht und das hätte gravierende Auswirkungen auf das Gesamtkonzept. Zumal allgemein bekannt ist, dass die Genauigkeit der auf der Ähnlichkeitstheorie basierenden Korrelationen typischerweise $\pm 15\%$ beträgt. Deswegen sollte dieses Modells unbedingt validiert werden.

Diese Frage wurde mit Projektpartner NKT diskutiert und erkannt, dass die entsprechende für die Validierung der Methode erforderliche Daten aus Messungen an der Testanlage in Obermenzing

gewonnen werden konnten. Den Zugriff auf diese Daten kann man erhalten, indem man die Instrumentierung der Testanlage entsprechend gestaltet. Diese Aufgabe wurde von NKT übernommen. Die erforderlichen Anpassungen sollten in der Zusammenarbeit mit Prof. Grohmann (KIT) vorbereitet und von NKT umgesetzt werden.

3.1.2 Modellierung des Kälteverteilungssystems:

Ziel dieser Untersuchung war es, die bestmögliche Konfiguration des Kälteverteilungssystems zu identifizieren. Bereits zu Beginn des Projekts wurden mehrere Analysen durchgeführt, um eine optimale Auslegung zu ermitteln. Eine abschließende Studie zu diesem Thema wurde im Sommer 2021 durchgeführt. Ihr Ziel war es, eine Möglichkeit zur weiteren Vereinfachung der Kälteverteilung zu finden und das System mit nur einer einzigen Zwischenkühlstation zu realisieren. Abb. 3.3 zeigt das Konzept, welches erarbeitet wurde. Mithilfe des vollständigen Excel Modells wurde für einen Kabelabschnitt im Projekt SuperLink zwischen zwei Kühlstationen eine maximale Länge zwischen 5 und 6 km ermittelt.

Diese Optimierung hat sich gelohnt: **durch eine tiefere Unterkühlung des zirkulierenden Flüssigstickstoffs wurde das Ziel erfolgreich erreicht.** Diese Änderung bedeutet:

- zum einen, dass das Gesamtkälteverteilungssystem sich deutlich günstiger (drei Kälteanlagen anstelle von vier) und etwas effizienter gestaltet. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass die Kälteanlagen größerer Kapazität grundsätzlich effizienter sind, da sie auf Basis von effizienteren Hardwarekomponenten gebaut sind,
- zum anderen, dass die Anforderungen an die Kälteanlage[n] sich ändern: die Kälteanlagen müssen eine tiefere Kühltemperatur erreichen und eine größere Kälteleistung erzeugen.

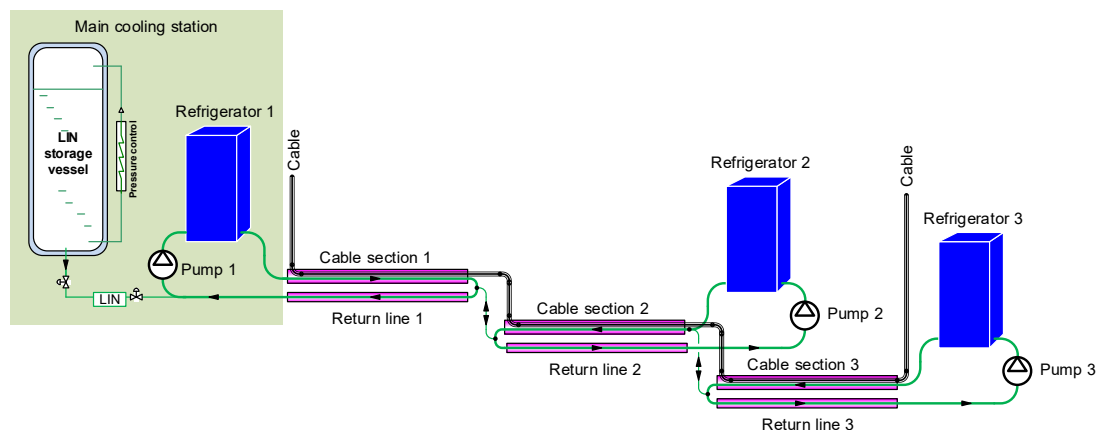


Abb. 3.3: Kälteverteilungssystem mit einer Zwischenkühlstation

3.1.3 Entwicklung des Kühlsystems

Begonnen wurde mit der Untersuchung des Kühlsystems zur Kühlung der LN-Strömung im Kabel-Kryostaten. Dafür wurden mehrere mögliche Kältekreisläufe mit Hilfe des Prozess-Simulationstools Unisim abgebildet und ausgewertet. Die Auswertung berücksichtigte sowohl verfahrenstechnische als auch kostenspezifische Gesichtspunkte. Im Rahmen dieser Studie wurde in Zusammenarbeit mit NKT ein Konzept entwickelt. In Q2/21 wurden Anforderungen an diese Studie gemeinsam spezifiziert.

Spezifikation 1

Im ersten Schritt wurden die Anforderungen an das Kühlsystem definiert, die auf einem Kabel-Kryostatendesign basieren, welches dem zu Projektbeginn vorhandenen Stand der Technik entsprach und entsprechend gesichert machbar und beschaffbar war (Spezifikation 1).

In der Tab. 3.1 ist diese Spezifikation 1 zusammengefasst. Die Angaben dort basieren auf Prozessparametern, die in der Tabelle 3.2 gegeben sind.

Tabelle 3.1 Spezifikation 1 (für eine Kühlstation), State-of-the-art-Kabel-Kryostatdesign

					Design Operational Cases, I/Inom			
					Design load	Design min load	Design norm load	Design FC re-cool
load range		specific power	multiplier		100%	50%	75%	75%
cable cryostat	2.2	W/m	15000	m	33000	33000	33000	33000
return line	1.8	W/m	15000	m	27000	27000	27000	27000
AC & Joule loss	1.1	W/m	15000	m	16500	2062.5	6961	6961
fault current event in grid - recooling	9500	W	1	-				9500
pumps	3500	W/unit	3	units	10500	10500	10500	10500
current leads	500	W/end	2	ends	1000	600	800	800
cryostat joints	10	W/joint	75	joints	750	750	750	750
cold demand total				kW	88.8	73.9	79.0	88.5
number of cooling stations					3	3	3	3
required cooling power per station				kW	29.6	24.6	26.3	29.5
Percent relative to Design load specification				%	100%	83%	89%	100%

Tabelle 3.2 Prozessparameter für Spezifikation 1

mass flow rate	1.7	kg/s					
Return pressure (from pressurizing tank)	3	bar	including 2 bar pressure drop in return				
Supply pressure	15	bar	to cable system from cooling system				
end of cable temperature	73	K					
Return from cable temperature	75.3	K	including 2.3 K temperature rise in return				
Return after fault current (max)	79.4	K	including 4.1 K temperature rise due to fault current				
Supply temperature	68	K	to cable system from cooling system				
average LIN velocity	0.4	m/s					
temp difference between go and return	7.3	K	including 2.3 K temperature rise in return				

Spezifikation 2 (optimistische Spezifikation)

Im zweiten Schritt – nachdem ein besseres Kryostaten-Design (im Rahmen des AP4) von NKT entwickelt wurde - wurden diese Anforderungen verfeinert und neue Spezifikationen (Spezifikation 2) abgeleitet. Das Kühlsystem musste jedoch so geplant werden, dass sich die künftigen Anforderungen (Spezifikation 2) auch erreichen lassen und der Anpassungsaufwand ans Kühlsystem möglichst gering ausfällt. In der Tabelle 3.3 sind die Spezifikationen 2 zusammengefasst. Die Angaben dort basieren auf Parametern, die in der Tabelle 3.4 gegeben sind.

Tabelle 3.3 Spezifikation 2 (für eine Kühlstation), zukünftiges Kabelkryostat-Design

					Target Operational Cases, I/Inom			
					Target load	Target min load	Target norm load	Target FC re-cool
load range		specific power	multiplier		100%	50%	75%	75%
cable cryostat	1.3	W/m	15000	m	19500	19500	19500	19500
return line	0.8	W/m	15000	m	12000	12000	12000	12000
AC & Joule loss	1.1	W/m	15000	m	16500	2062.5	6961	6961
fault current event in grid - recooling		kW						9500
pumps	1600	W/unit	3	units	4800	4800	4800	4800
current leads	500	W/end	2	ends	1000	600	800	800
cryostat joints	10	W/joint	75	joints	750	750	750	750
cold demand total				W	54.6	39.7	44.8	54.3
number of cooling stations					3	3	3	3
required cooling power per station				kW	18.2	13.2	14.9	18.1
Percent relative to Design load specification				%	61%	45%	50%	61%

Tabelle 3.4 Prozessparameter für Spezifikation 2

mass flow rate	1.3	kg/s						
Return pressure (from pressurizing tank)	8	bar	<i>lower pressure drop due to lower flow rate</i>					
Supply pressure	15	bar						
end of cable temperature	73	K						
Return from cable temperature	74.6	K	<i>including 1.6 K temperature rise in return</i>					
Return after fault current (max)	78.7	K	<i>including 4.1 K temperature rise due to fault current</i>					
Supply temperature	68	K						
average LIN velocity	0.3	m/s						
temp difference between go and return	6.6	K	<i>including 1.6 K temperature rise in return</i>					

Zusammenfassung zu Spezifikationen

1) Die im Rahmen dieser Untersuchung entwickelten Spezifikationen verdeutlichen eindrucksvoll, welchen Einfluss die technische Ausgestaltung des Kabel-Kryostaten auf die wirtschaftliche Gesamtbewertung des HTS-Kabelsystems hat. Es wurde klar, dass die **Qualität und thermische Effizienz des Kryostaten nicht nur ein technisches Detail darstellen, sondern einen zentralen Erfolgsfaktor für die Realisierbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit des gesamten Konzepts**. Daraus ergibt sich, dass bei der Auswahl und Qualifizierung eines Herstellers insbesondere die thermische Performance des Kabel-Kryostaten im Vordergrund stehen sollte – in Kombination mit Kriterien wie Zuverlässigkeit und Langlebigkeit.

2) Ingenieure neigen erfahrungsgemäß dazu, technische Spezifikationen eher konservativ zu formulieren. Dieses Vorgehen ist grundsätzlich nachvollziehbar, da es darauf abzielt, potenzielle Risiken frühzeitig zu minimieren und unerwartete Probleme im späteren Projektverlauf zu vermeiden. Aus dieser Perspektive erscheint Spezifikation 1 als die vernünftigste und sicherste Wahl, während Spezifizierung 2 als langfristiges Ziel beibehalten wird, um Energieeinsparungen zu ermöglichen und die wirtschaftliche Machbarkeit durch weitere Anwendungen der Technologie zu verbessern.

Gerade bei innovativen Technologien zeigt sich jedoch immer wieder, dass eine allzu vorsichtige Herangehensweise auch erhebliche Nachteile mit sich bringen kann. Zu konservative Annahmen können die Wirtschaftlichkeit eines Projekts – insbesondere im Hinblick auf den Business Case – deutlich beeinträchtigen oder sogar gefährden. Vor diesem Hintergrund schlagen wir als pragmatischen Ansatz vor, einen **Kabel-Kryostat-Hersteller frühzeitig auszuwählen und zu qualifizieren**. Dessen **realistische Leistungsdaten** sollten dann als Grundlage für die weitere Planung und Bewertung herangezogen werden.

Offenes Kühlsystem als Benchmark

Zuerst wurde ein offenes LN-System untersucht, in dem die benötigte Kälte durch Verdampfung von LN bei unteratmosphärischem Druck erzeugt wird. Dieses Verfahren wird als Benchmark für weitere Kälteverfahren verwendet.

Geschlossene Kreisläufe

Das grundlegende Konzept der Kabel-Kühlanlage ist in Abb. 3.4 skizziert.

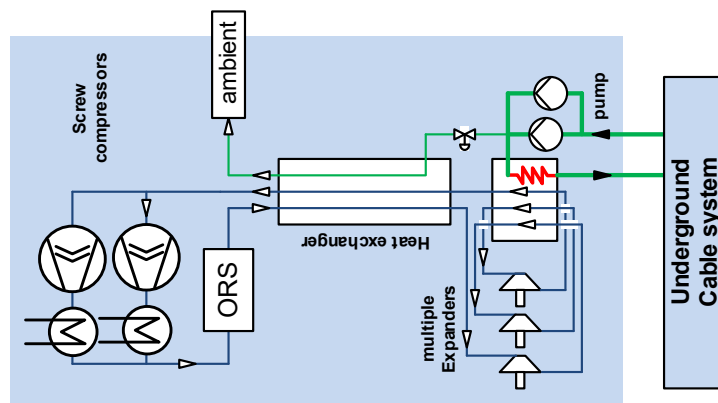


Abb. 3.4: Konzeption der Kälteanlage

Für die Realisierung wurden fünf verschiedene Kälteanlagenkonzepte betrachtet – jeweils mit und ohne Vorkühlung mittels LN aus dem Kälteverteilungskreislauf. Die Konzepte sind in Tabelle 3.5 aufgelistet. Konzept E wurde mit zwei unterschiedlichen Kompressor-Einheiten (Kolbenverdichter sowie Turboverdichter) untersucht. Insgesamt wurden 24 Verfahren zur Kälteerzeugung analysiert.

Tabelle 3.5 Untersuchte Kühlkonzepte

A	Helium-Kältekreis, 2 Expander seriell, 2 ölgeschmierte Schraubenkompressoren parallel
B	Helium-Kältekreis, 3 Expander seriell, 2 ölgeschmierte Schraubenkompressoren parallel, siehe Abb. 3.4
C	Helium-Kältekreis, 4 Expander seriell, 2 ölgeschmierte Schraubenkompressoren parallel
D	Neon-Kältekreis, 3 Expander seriell, 2 ölgeschmierte Schraubenkompressoren parallel, siehe Abb. 3.4
E	Neon-Kältekreis, 3 Expander seriell, 2 ölfreie Kompressoren (Kolben /Turboverdichter) parallel

Ergebnisse

Tabelle 3.6 gibt die Ergebnisse der Verfahrensrechnungen zusammengefasst wieder.

Tabelle 3.6 Ergebnisse der Verfahrensrechnung

Konzept	Wirkungsgrad, Kaltteil	Wirkungsgrad, Verdichter	Wirkungsgrad, Gesamt
A ohne Vorkühlung	51.2%	58%	29.7%
A mit Vorkühlung	43.8 %		27%
B ohne Vorkühlung	54%	59.7%	32.3%
B mit Vorkühlung	45.7%		29.1%
C ohne Vorkühlung	56.9%	51.3%	29.2%
C mit Vorkühlung	49.2%		27%
D ohne Vorkühlung	60%	59.5%	35.7%
D mit Vorkühlung	43.2%		29%
E ohne Vorkühlung, Kolbenverdichter	60.4%	60.5%	36.6%
E mit Vorkühlung, Kolbenverdichter	43.4%		29.5%
E ohne Vorkühlung, Turbo	60.4%	59%	35.6%
E mit Vorkühlung, Turbo	43.4%		28.9%

Diese Untersuchung hat gezeigt, dass

- ein sehr effizientes Verfahren mit einem Wirkungsgrad von über 35% mit mindestens 3 Konzepten erreichbar ist. Das ist ein hervorragendes Ergebnis. Zur Erinnerung, 2021 war geplant eine Effizienz von 25% zu erreichen und diese später (in 2022-2025) bis auf 30% zu verbessern.
- Die Spitzenwerte wurden mit Neon-basierten Kreisläufen (D und E) erreicht, aber auch mit einem Helium-basierten Prozess (B) konnte eine hohe Effizienz von 32.3% erreicht werden.
- Mit den konservativ im Designfall veranschlagten Wärmelasten ([Szenario 1](#) mit „State-of-the-art“ – Kabel-Kryostat) ergibt sich ein [spezifischer Energieverbrauch der Kälteanlage von 58 kW/km](#).
- Sollte das neue Design des Kabel-Kryostaten die Zielwerte in [Szenario 2](#) erreichen, würde der [spezifischer Energieverbrauch auf ca. 30 kW/km reduziert](#). Nach unseren Schätzungen wäre damit die Stromübertragung mit supraleitendem Kabel effizienter als mit einem konventionellen Kupferkabel.

Abb. 3.5 zeigt noch einmal das detaillierte Prozess-Fluss-Diagramm der vorgeschlagenen Kühlanlage, während der Flächenbedarf der Komponenten – Kompressoren in Abb. 3.6 und Coldbox in Abb. 3.7 abgeschätzt ist.

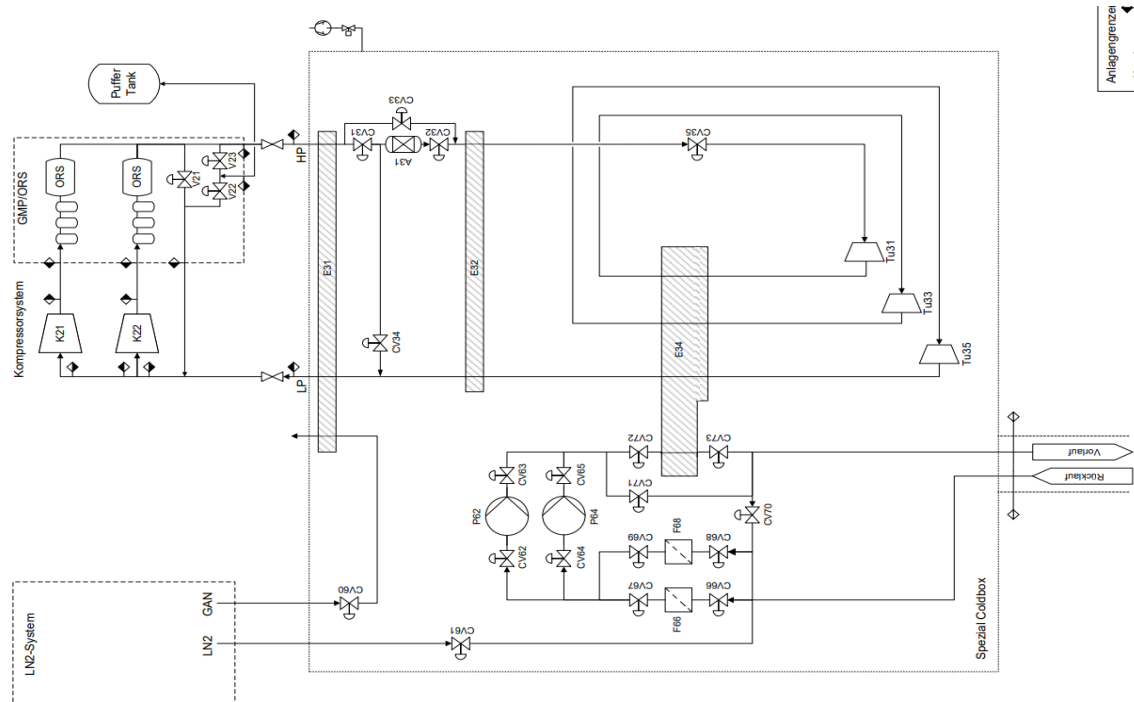


Abb. 3.5: Prozess-Fluss-Diagramm der Kühlanlage

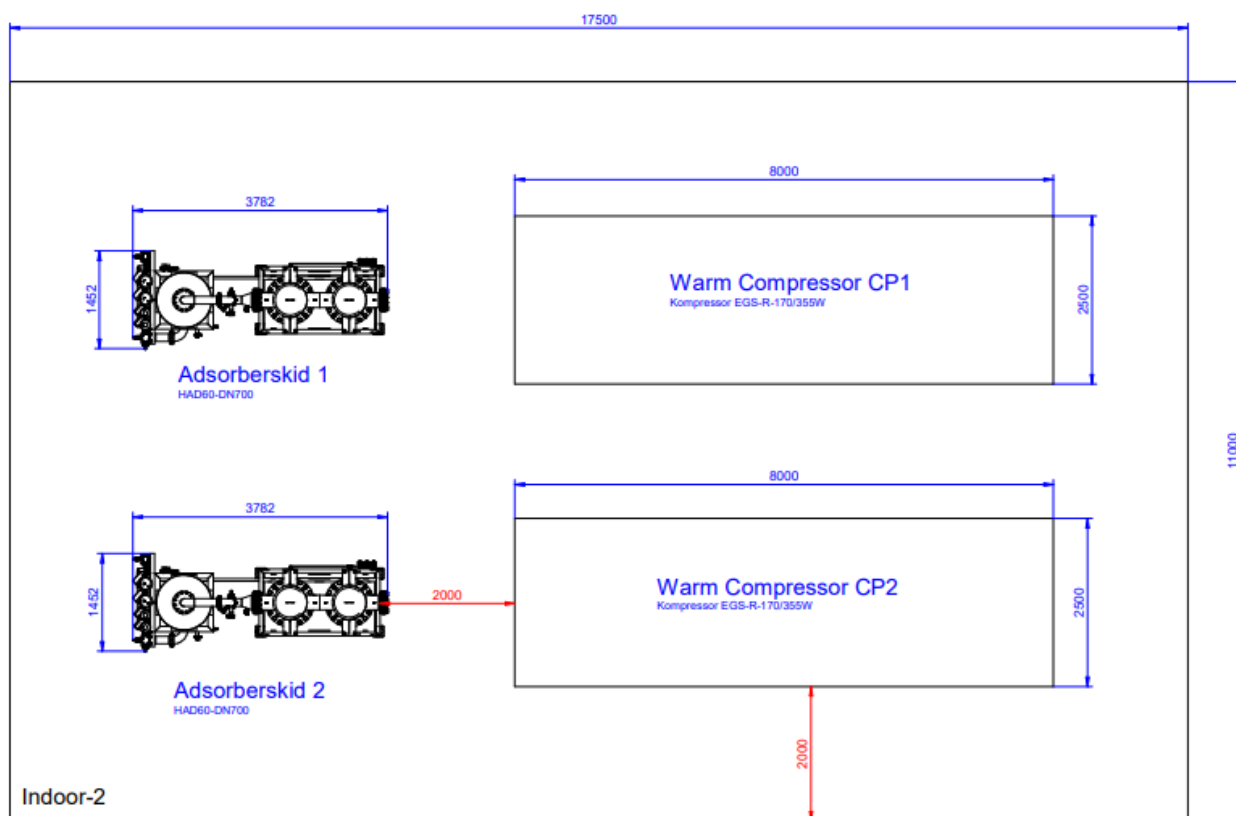


Abb. 3.6: Flächenbedarf für die Kompressor-Einheit

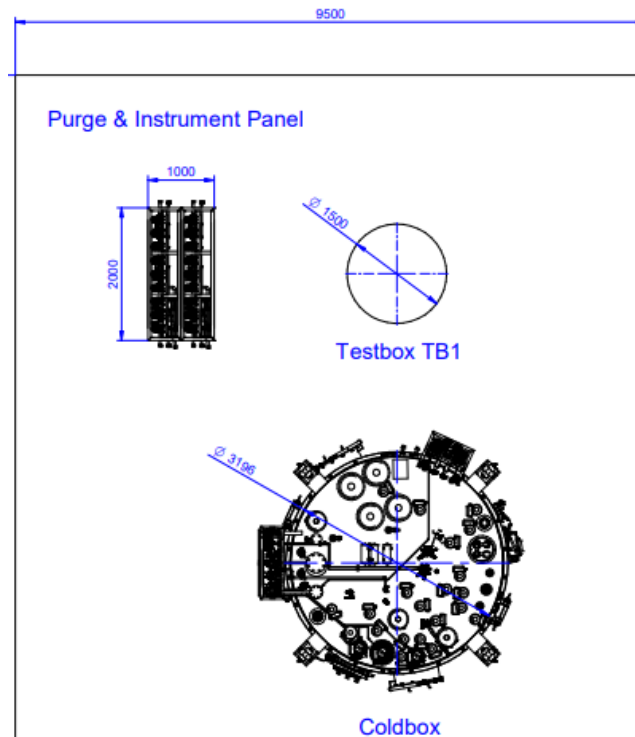


Abb. 3.7: Flächenbedarf für die Coldbox

AP3.2 Zuverlässigkeit, Risikobewertung (TRAS) und Maßnahmen

Im Rahmen der Studie wurden auch Prozessrisiken betrachtet (Technical Risk Assessment TRAS) und vorbeugende Maßnahmen erarbeitet. Diese TRAS-Studie zeigte auf, dass die verschiedenen Konzepte alle gleich niedrig im technischen Risiko und damit hochwertig in der Zuverlässigkeit sind.

Neon als Kältemittel braucht vor abschließender Anwendung weitere Klärungen in Bezug auf Funktionstüchtigkeit der Turbinen und Verfügbarkeit von Neon auf dem Gasmarkt. Dies ist jedoch realistisch und damit kein Ausschlusskriterium. Einzig Konzept E mit einem Turboverdichter wird von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da diese Maschine noch nicht erprobt ist und zudem gegenüber dem Kolbenverdichter nicht den erhofften Vorteil im Wirkungsgrad zeigte.

Das Konzept B ist das technisch Einfachste von allen. Zudem liegt hier noch Potential für eine leichte Wirkungsgradverbesserung durch eine Anhebung des Verdichter-Enddrucks bis auf 20 bar unter Beibehaltung des gewählten Druckverhältnisses. Dieses muss allerdings nochmals auf Kompressorseite validiert werden. **Konzept B wird daher für die weitere Diskussion, Betriebsmittelangaben sowie indikative Kostenschätzung ausgewählt.**

Die umfangreiche Verfahrensstudie wurde durch weitere Elemente ausgebaut wie

- Prozess-Fluss-Diagramm (siehe Abb. 3.5)
- Risikoanalyse
- Redundanzkonzept
- Lastbereich und Laständerungsgeschwindigkeit
- Flächenbedarf für die Kompressor-Einheit und die Coldbox (siehe Abb. 3.6 und Abb. 3.7)
- Beschreibung /Spezifikation für
 - Utilities
 - Lieferumfang
 - Anforderungen an Kühlwasser
 - Angaben zu wartungsfreien Zeiten (MTBF)
- Kostenschätzung

AP3.3 Wirtschaftlichkeit

Die Erstellung einer präzisen Kostenrechnung für das Gesamtsystem stellt derzeit eine erhebliche Herausforderung dar. Dies liegt vor allem daran, dass wesentliche Rahmenbedingungen – wie die genauen Aufstellungsorte, die Zugänglichkeit der jeweiligen Installationsbereiche und insbesondere die Positionierung der Zwischenkühlstation – bislang nicht abschließend geklärt sind. Diese Unsicherheiten erschweren eine belastbare Gesamtkalkulation erheblich.

Was sich hingegen bereits mit einer gewissen Sicherheit abschätzen lässt, sind die Kosten für den sogenannten EP (Equipment Purchase)-Anteil, also die reinen Anlagenkosten ab Werk – ohne Berücksichtigung von Transport zum Kunden und ohne Leistungen vor Ort (Site Services). Im Rahmen der FEED-Studie, konnte ermittelt werden, dass sich die spezifischen EP-Kosten im Bereich von $0,2 \pm 0,05$ M€ pro kW Kälteleistung bewegen. Die genannte Zahl berücksichtigt bereits die erwartete Kostenentwicklung (Eskalation) bis einschließlich 2025. Diese Werte bieten zumindest eine erste Orientierung für die weitere Planung und Budgetierung.

Zur Abschätzung der gesamten „Installed Cost“ wird im Anlagenbau häufig die sogenannte Lang-Methode angewendet. Diese Methode basiert im Wesentlichen darauf, dass die reinen EP-Kosten mit einem Lang-Faktor multipliziert werden, um die Gesamtkosten der Installation zu ermitteln. Für Anlagen der hier untersuchten Größe liegt der Lang-Faktor typischerweise im Bereich von 2 bis 3. Das bedeutet, dass sich die spezifischen **Gesamtkosten für das vollständig installierte System voraussichtlich im Bereich von 0,4 bis 0,6 M€ pro kW Kälteleistung** bewegen dürften. In Einzelfällen – abhängig von Standortbedingungen, Komplexität der Installation und lokalen Anforderungen – kann dieser Wert auch leicht darüber oder darunter liegen.

AP3.4 Next-Gen-Kühlsystem – Zusammenarbeit mit dem KIT

Das AP3.4 wurde federführend (Arbeitsgruppe Prof. Grohmann) durchgeführt und auch der folgende Berichtsteil stammt vom KIT (F. Boehm).

Vom KIT wurde ein neuartiges zweistufiges Kaskaden-Kühlverfahren vorgeschlagen. Die wärmere Stufe basiert auf einem Gemisch-Joule-Thomson-Verfahren. Auch die kältere Stufe ist als Joule-Thomson-Stufe ausgeführt. Das Besondere an der kälteren Stufe ist die Verwendung eines Kältemittelgemischs, das aus Sauerstoff, Stickstoff und einem sogenannten Ballastgas besteht – einer nicht kondensierbaren, gasförmigen Komponente wie z. B. Neon oder Helium. Durch die Beimischung dieses Ballastgases kann das Temperaturprofil im Verdampfer gezielt optimiert werden.

Mit diesem Verfahren wurde angestrebt, sowohl die energetische als auch die wirtschaftliche Effizienz zu steigern. Die Entwicklung befand sich zu Projektbeginn noch in einem sehr frühen Stadium (Technology Readiness Level TRL < 5), so dass eine belastbare techno-ökonomische Bewertung bislang nicht möglich war. Eine vertiefende Studie zu diesem Thema wäre jedoch hilfreich, um fundiert beurteilen zu können, ob eine Weiterentwicklung des Verfahrens sinnvoll und zukunftsfruchtig ist.

Um den effizienten Einsatz von Hochtemperatursupraleitern im Stromnetz zu ermöglichen, muss neben den elektrischen Verlusten im Kabel der nötige Energiebedarf für die Kühlung betrachtet und gesenkt werden. Nach dem üblichen Vorgehen erfolgt die Prozessoptimierung der Kälteanlagen unter Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten unter Verwendung eines geeigneten tiefsiedenden Kältemittels. Im gegebenen Anwendungsfall stellt der Turbo-Brayton-Prozess mit Helium den aktuellen Stand der Technik dar. Die energetische Optimierung erfolgt darin über eine komplexere Prozesstopologie, die in diesem Fall drei kalte Turboexpander zum Erreichen von 30 % Carnot-Effizienz erfordert.

Eine prinzipielle Alternative zum o.g. Vorgehen besteht darin, eine einfache und kostengünstige Prozesstopologie zu realisieren und die Stoffeigenschaften des Kältemittels an diesen Prozess anzupassen [6]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Helium mit seinen Idealgaseigenschaften im Anwendungstemperaturbereich das Kältemittel mit der niedrigsten Effizienz (höchster Isentropenexponent) und der geringsten Energiedichte (einphasige Gasströmung) ist. Die Verwendung höhersiedender Komponenten erhöht die Effizienz durch den Einfluss auf den Isentropen-

exponenten, die Kapazitätsströme und die spezifischen Volumina, und die Energiedichte durch den Phasenwechsel entlang der Dampfdruckkurven. Die Anpassung der Stoffeigenschaften erfolgt somit durch die Verwendung weitsiedender Kältemittelgemische, indem die Gemisch-Komponenten und deren Konzentrationen im Hinblick auf die höchste Prozesseffizienz optimiert werden. Dafür wurde ein Simulations- und Optimierungstool entwickelt und auf die gegebenen Kühlbedarfe angepasst. Die Ergebnisse übertrafen mit bis zu 35 % Carnot-Effizienz deutlich den Stand-der-Technik. Da prinzipbedingt auch der Platzbedarf und die Investitionskosten sinken, resultiert ein großes Anwendungspotential dieser neuen Kryotechnologie in HTS-Anwendungen.

Linde-Hampson-Kreislauf

Für die Rückkühlung des zirkulierten LN im Superlink-Kabel ist der Gemisch-Kälte-Joule-Thomson-Kreislauf (Linde-Hampson-Kreislauf, Cryogenic Mixed-Refrigerant Cycle CMRC) die günstigste Option, der auf der linken Seite in Abb. 3.8 dargestellt ist. Dieser bietet den Vorteil, dass durch die Verwendung eines Drosselventils anstatt des im Brayton-Prozess nötigen Expanders keine bewegten Teile im kalten Bereich der Anlage vorhanden sind. Neben der Kostenreduktion erhöht dies die Langlebigkeit bzw. reduziert die nötige Wartung.

Durch die Verwendung weitsiedender Gemische mit partieller Kondensation auf der Hochdruckseite und partieller Verdampfung auf der Niederdruckseite im Gegenstrom treten überwiegend zweiphasige Wärmeübertragungsbedingungen auf, mit im Vergleich zu Helium-Gasströmungen ≥ 100 höheren Wärmeübergangskoeffizienten. Die gleiche Wärmeübertragereffizienz erfordert deshalb im Vergleich eine etwa um den Faktor hundert geringere Wärmeübertragerfläche! Da die Wärmeübertrager maßgeblich die Dimensionen der Kälteanlagen bestimmen, kann mit der Gemischkältetechnologie eine substantiell höhere Energiedichte erreicht werden.

Generell können in diesem Prozess Bauteile aus der klassischen Kältetechnik verwendet werden, die in verschiedensten Leistungsklassen und vergleichsweise preisgünstig verfügbar sind.

Um mit einer Gemisch-Kälteanlage das nötige Temperaturniveau von unter 70 K bereitzustellen, ist es ratsam, zwei in Form einer Kaskade gekoppelte Kreisläufe anzuwenden. Einfache Gemisch-Kältekreisläufe werden in diesem Temperaturbereich ineffizient, da der Anteil der Hochsieder im Kältemittelgemisch, die den spezifischen Kühleffekt und die Effizienz erhöhen, reduziert werden muss, um ein Ausfrieren zu verhindern [7].

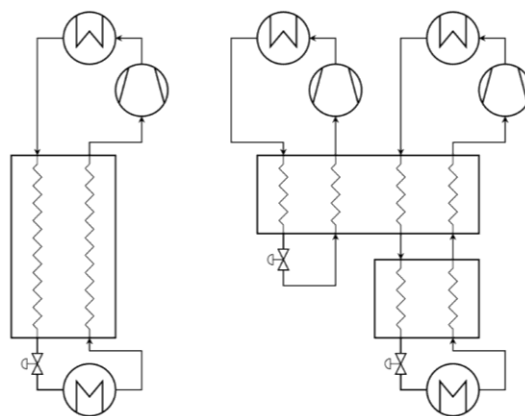


Abb. 3.8: Linde-Hampson-Kreislauf. Links: einfacher Prozess; rechts: Kaskadenschaltung

Abb. 3.8 rechts zeigt eine solche Kaskadenschaltung. Dort sind zwei Linde-Hampson-Kreisläufe miteinander verschaltet, sodass die Kälteleistung aus dem ersten Kreislauf in einem mehrströmigen Wärmeübertrager für den zweiten Kreislauf zur Vorkühlung genutzt wird. Die eigentliche Kälteleistung zur Rückkühlung des flüssigen Stickstoffs wird im Verdampfer des Niedertemperaturkreislaufs nutzbar.

Soll nun der gesamte Prozess analysiert werden, müssen für beide Kreisläufe ideale Gemische (Komponenten, Konzentrationen) und Betriebsparameter (Drücke, Temperaturen, Massenströme) festgelegt werden. Da es sich hierbei um ein komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl von Variablen

handelt und insbesondere die thermodynamischen Eigenschaften der Gemische stark konzentrationsabhängig sind, ist eine analytische Auslegung des Systems nicht möglich.

Zum Auffinden der besten Gemische und Betriebsparameter liegt demnach ein Optimierungsproblem vor, dessen Bearbeitung hier beschrieben wird. Zunächst wird auf die Modellierung der einzelnen Prozesssimulation eingegangen und anschließend die Optimierung beschrieben.

Modellierung

Für die thermodynamische Modellierung des Prozesses war es zunächst notwendig, die Berechnung der Stoffdaten zu implementieren. Um hierbei unabhängig von kommerzieller Software zu sein, fiel die Entscheidung zugunsten des Open Source Tools CoolProp. Für dieses musste die Schnittstelle zum gewählten Berechnungsprogramm Mathematica umfassend erweitert und verbessert werden. In diesem Rahmen wurden mehrere Änderungen am Open Source Projekt vorgeschlagen und akzeptiert. Im nächsten Schritt wurde der Linde-Hampson-Kreisprozess in Mathematica abgebildet. Dafür mussten mehrere Software-Pakete geschrieben und getestet werden. Insbesondere die Berechnung der Stoffdaten innerhalb des Zwei-Phasen-Gebiets stellte dabei einige Schwierigkeiten dar, die jedoch alle behoben werden konnten.

Als Rahmen zur Gemisch-Optimierung unterliegt das entwickelte Modell gewissen Vereinfachungen. So wurde für den Verdichter eine konstante Effizienz angenommen, die minimale Temperaturdifferenz sowie die Druckverluste sind vorgegebene Werte und es wurde eine ideale thermische Isolierung der Komponenten angenommen. Bekannte bzw. gegebene Temperaturen wurden definiert für den Nachkühleraustritt, sowie die Eintritts- und Austrittstemperaturen des eigentlichen Kühlers.

Als Zielgröße für die Optimierung wird nach der Berechnung der einzelnen Zustandspunkte der Energiebedarf des Prozesses ermittelt. Dieser besteht im Wesentlichen aus der Antriebsleistung des/der Verdichter.

Optimierung

Durch die komplexen Zusammenhänge innerhalb der Prozesssimulation war es nicht möglich, aus dem Modell Gradienten für alle Parameter zu berechnen. Bei der Auswahl des Optimierungsalgorithmus war deshalb darauf zu achten, dass dieser möglichst ohne Gradienten auskommt. Es wäre möglich gewesen, numerische Ableitungen für jeden Parameter zu bestimmen, um jeweils sehr kleine Parameterabweichungen zu simulieren. Dies hätte jedoch den Rechenaufwand bei der großen Anzahl an Parametern vervielfachen. Außerdem sollte der Algorithmus unabhängig vom Startwert / von den Startwerten ein globales Optimum finden. Die Wahl fiel daher auf den „Differential Evolution“-Algorithmus aus der Gruppe der genetischen Algorithmen, der erstmals in [8] vorgeschlagen wurde. Dieser benutzt anstelle eines einzelnen Startwerts eine Population einer festgelegten Anzahl von Kandidaten, die in einzelnen Generationen zu neuen Kandidaten mutiert und kombiniert werden und mit dem vorangegangenen Kandidaten verglichen werden. Zunächst wurde eine kleine Optimierungsstudie für den einfachen Linde-Hampson-Kreislauf durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit zu testen. Darauf folgte die Entwicklung für die Optimierung von Kaskaden.

Gemisch-Kaskaden

Das oben beschriebene Modell zur Simulation und Optimierung von Gemisch-Kreisläufen wurde verwendet, um die Betriebsparameter für eine Gemisch-Kaskade gemäß Abb. 3.8 rechts zu optimieren. Im Vergleich zum „einfachen“ einstufigen Linde-Hampson-Kreislauf ergaben sich für die Modellierung der Kaskade weitere zu optimierende Parameter sowie nötige Annahmen. Zum einen musste für die Berechnung der Temperaturprofile im Inneren des mehrströmigen Wärmeübertragers (IWÜT) angenommen werden, wie sich die Temperaturen der vier Ströme gegenseitig beeinflussen, zum anderen ist neben den Betriebsdrücken und den Gemisch-Zusammensetzungen auch die Temperatur, bis zu der der Vorkühlkreislauf abkühlt, vorzugeben.

Auf Basis der gegebenen Randbedingungen (minimale Temperaturdifferenzen, Verdichter-Effizienz, Umgebungstemperatur etc.) wurden die Zustandspunkte des Systems und der Massenstrom des zweiten Kreislaufs zur Bereitstellung der benötigten Kälteleistung berechnet. Die benötigte verteilte

Kälteleistung (und daraus der Massenstrom) des ersten Kreislaufs ergab sich aus der Enthalpie-Differenz der Zustandspunkte des zweiten Kreislaufs am warmen Ende des IWÜT ohne die Vorkühlung und mit minimaler Temperaturdifferenz.

Die Temperatur, auf die der Vorkühlkreislauf abkühlt, muss vorgegeben werden, damit das System berechnet werden konnte. Sie hat einen signifikanten Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems. Wie eingangs beschrieben, stellen die Hochsieder die meiste Kälteleistung zur Verfügung. Gleichzeitig besteht aber die Gefahr, dass diese ausfrieren können. Durch die Gesamtbetrachtung des Systems kann also herausgefunden werden, wie die optimale Kombination aus Hochsiedern und Kühltemperatur im Vorkühlkreislauf aussieht.

Um den Gesamtprozess zu entwickeln, müssen für beide Kreisläufe ideale Gemische (Komponenten, Konzentrationen) und Betriebsparameter (Drücke, Temperaturen, Massenströme) festgelegt werden. Einzig feste Vorgabe ist hierbei die Kühltemperatur, bei der die für die Rückkühlung nötige Kälteleistung bereitgestellt werden soll. Zur Vergleichbarkeit mit den Brayton-Prozessen bei Linde wurde hier ein Temperaturanstieg von 64 auf 74 K im Verdampfer angenommen.

Es wurden die in Tabelle 3.7 angegebenen Randbedingungen gewählt. Für die Berechnung der Kühleffizienz wurde die Vorkühltemperatur für jeden Durchgang auf einen festen Wert gesetzt. Dieser wurde dann in Schritten (80 - 120 K in 5 K-, 120 - 200 K in 10 K-Schritten) variiert könnte aber auch als Optimierungsvariable gewählt werden. Um die Druckverhältnisse, die bei den gegebenen Randbedingungen auftreten, erreichen zu können, wurde eine zweistufige Verdichtung mit dem isentropen Gütegrad 0,8 angenommen. Dies ist mit Schraubenverdichtern am optimalen Auslegungspunkt (internes Volumenverhältnis) technisch möglich. Alternativ können ähnliche Effizienzen mit einer dreistufigen Verdichtung und isentropen Gütegraden von 0,7 erreicht werden.

Tabelle 3.7 Randbedingungen für die Optimierungsstudien.

	Parameter	Wert / Wertebereich
Vorkühlstufe	Zwischenkühltemperatur	80 - 120 K in 5 K, 120 - 200 K in 10 K Schritten
	Minimale Temperaturdifferenz	2 K
	Hochdruck	10-60 bar
	Niederdruck	1-20 bar
	Gemischbestandteile	0...1
	Isentroper Gütegrad Verdichter	0,8, zweistufige Verdichtung
Niedrigtemperatur -stufe	Kühltemperatur	64K - 74 K
	Minimale Temperaturdifferenz	2 K
	Hochdruck	10-60 bar
	Niederdruck	1-20 bar
	Gemischbestandteile	0...1
	Isentroper Gütegrad Verdichter	0,8, zweistufige Verdichtung

In Abb. 3.9 zeigt das Ergebnis der Berechnungen, d.h. den Carnot-Wirkungsgrad des Gesamtsystems als Funktion der gewählten Vorkühltemperatur. Dabei ist eine deutliche Zunahme des Wirkungsgrads mit sinkender Vorkühltemperatur erkennbar. Das spricht dafür, dass sich die Reduktion der Vorkühltemperatur und somit das Ausnutzen der Hochsieder bis hin zu ihrem Maximum lohnt. Bei 120 K (grau gestrichelte Linie) ist ein deutlicher Knick zu erkennen. Hier ändert sich der Zustand des Stroms in der Niedertemperaturstufe am Eintritt in den zweiten Wärmeübertrager von einer rein gasförmigen Strömung (Gaseous Refrigerant Supply, GRS) zu einer zweiphasigen Strömung (Liquid Refrigerant Supply, LRS). Dies führt zu signifikanten Effizienzgewinnen.

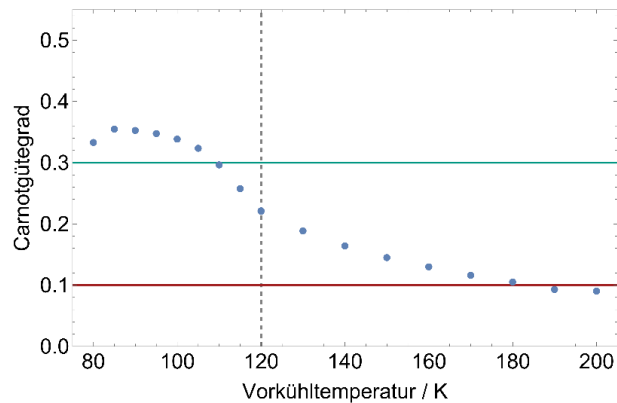


Abb. 3.9: Änderung des Carnotwirkungsgrads (Effizienz der Kaskade geteilt durch die Effizienz des theoretischen Carnot-Prozesses) über die gewählte Zwischenkühltemperatur

Die rote Linie bei 10 % zeigt die typische Effizienz eines marktüblichen Kühlers (z.B. GM-Kühler). Diese liefern viel zu geringe Kälteleistungen für Anwendungen wie SuperLink und dienen hier lediglich zum Vergleich. Die grüne Linie hingegen zeigt die technisch erreichbare Carnot-Effizienz von bis zu 30 % von Turbo-Brayton Kühlern mit drei Expansionsturbinen gemäß der Linde-Studie im AP3.1 zu geschlossenen Kreisläufen. Mit den berechneten Optima ließen sich diese Effizienzen deutlich auf bis zu 35 % Carnot steigern. Das bedeutet, dass sich der Energiebedarf der Gemisch-Kältekaskade gegenüber dem technisch wesentlich aufwendigeren Turbo-Brayton-Kühler um ca. 15 % senken ließe.

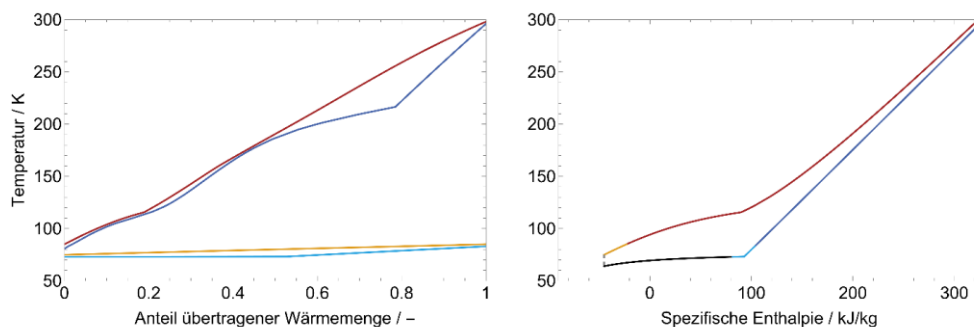


Abb. 3.10: Links: Temperaturverläufe der Warm/Kalt-Ströme im ersten (rot/blau) und im zweiten (gelb/hellblau) Wärmeübertrager für eine Vorkühltemperatur von 85 K.
Rechts: Temperatur-Enthalpie (T-H)- Diagramm der Niedrigtemperaturstufe

Neben der höheren Effizienz und den geringeren Kosten ist absehbar, dass die Baugröße ein entscheidendes Argument für das CMRC-Technologie basierte Next-Gen-Kühlsystem sein wird. Turbo-Brayton Kühler verwenden im einphasigen Betrieb mit Helium-Gasströmung die Lösung mit der niedrigsten Energiedichte. Die Wärmeübergangskoeffizienten im überwiegend zweiphasigen Betrieb (jeweils partielle Kondensation und partielle Verdampfung in den IWÜT) der CMRC-Kaskade sind um einen Faktor einhundert höher, d.h. bei gleicher Effizienz würden die Fläche des Wärmeübertragers etwa um diesen Faktor kleiner. Da die Wärmeübertrager die Gesamtgröße der Anlage im Turbo-Brayton-Kühler dominieren, resultiert eine wesentlich höhere Energiedichte der CMRC-Technologie, die sich in einem erheblich reduzierten Platzbedarf niederschlägt.

In Abb. 3.10 sind links die Temperaturverläufe im Inneren der beiden Wärmeübertrager für eine Zwischenkühltemperatur von 85 K zu sehen. In rot ist die Temperatur des warmen und in dunklem blau des kalten Stroms im ersten WÜT über den Anteil der übertragenen Wärmemenge zu sehen. In gelb und hellblau sind die entsprechenden Ströme im zweiten WÜT dargestellt. In dieser Darstellung wird besonders deutlich, wie durch die Optimierung die Temperaturdifferenzen zwischen den Strömen über weite Teile des Wärmeübertragers kleingehalten werden (< 5 K), was wiederum zu geringer Entropie-Produktion führt und mit sehr hoher Effizienz einhergeht. Die rechte Seite in

Abb. 3.10 zeigt das Temperatur-Enthalpie (T-H) -Diagramm der Niedertemperaturstufe. Hier ist gut sichtbar, dass im ersten Wärmeübertrager eine deutlich größere Wärmemenge übertragen wird als im zweiten.

AP3.5 Neon-Expander Tests

Im Rahmen des AP3.4 war eine Untersuchung zur Umstellung eines Turbo-Expanders geplant, der ursprünglich für den Betrieb mit Helium als Arbeitsgas entwickelt wurde. Ziel war es, den Turbo-Expander auf den Betrieb mit Neon umzustellen und ihn über mehrere Tage in einem geschlossenen Kreislauf zu testen.

Als direkte Auswirkung des Kriegs in der Ukraine konnten diese Untersuchung im Zeitraum Q1–Q2/2022 jedoch nicht mehr durchgeführt werden, bzw. machten ökonomisch keinen Sinn. Hintergrund dieser Situation war, dass rund 40 % des weltweit verfügbaren Neons üblicherweise aus der Ukraine (Odessa) stammen. Dort wird hochreines Neon aus Roh-Neon gewonnen, das zuvor aus Russland importiert wird. Der Krieg in der Ukraine hat diese Produktions- und Lieferkette vollständig unterbrochen, was zu erheblichen Verwerfungen auf dem Neonmarkt geführt hat:

- Der Preis für Neon war drastisch gestiegen und hatte sich im Vergleich zum Vorjahr etwa verzehnfacht,
- Mangelnde Verfügbarkeit – Neon war am Markt nicht erhältlich und somit auch nicht lieferbar.

In der Hoffnung auf eine Entspannung der Marktsituation wurden die geplanten Tests zunächst auf Q4/2022, später auf Q2/2023 verschoben. Letztlich musste Linde jedoch mitteilen, dass die Durchführung dieses Arbeitspakets nicht mehr möglich war. Linde hat daher auf die Durchführung der Neon-Expander-Tests verzichtet. Die dafür vorgesehenen Fördermittel wurden entsprechend nicht in Anspruch genommen.

AP5.3 Aufbau und Betrieb des Kühlsystems in der Testanlage in Menzing

5.3.1 Mess-, Steuer- und Regelsystem für Testanlage

Im Rahmen von AP5.3 wurde ein neues Konzept für das Mess-, Steuer- und Regelsystem (MSR) entwickelt, das auch als übertragbar auf größere kommerzielle Installationen eingeschätzt wird. Dieses basiert auf zwei zentralen Prinzipien:

- **Datenübertragung via Glasfaser:** Diese Technologie ist unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen, wie sie im Hochspannungsnetz bei Kurzschlüssen oder schnellen Abschaltungen auftreten können. Dadurch wird die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Systems deutlich erhöht.
- **Ringförmige Netzwerkstruktur:** Im Falle einer Unterbrechung bleibt die Kommunikation zwischen allen Systemkomponenten erhalten, was die Ausfallsicherheit weiter verbessert.

Auf dieser Grundlage wurden technische Zeichnungen und Dokumentationen erstellt sowie die erforderlichen Hardwarekomponenten beschafft. Diese wurden in einem Hauptschaltschrank und fünf dezentralen Schaltschränken verbaut, die entlang der Kabelstrecke an kritischen Punkten (z. B. Stromzuführungen, Transformatoren, E-Joints, Δ P-Joints) installiert wurden.

Die bestückten Schaltschränke wurden termingerecht nach Kopenhagen (NKT-Labor) geliefert und trafen dort Ende 2021 ein. Aufgrund von Verzögerungen bei der Integration der Sensoren und Steuergeräte durch NKT konnte die geplante Inbetriebnahme nicht sofort erfolgen und musste auf die zweite Jahreshälfte 2022 verschoben werden.

In diesem Zeitraum wurden folgende Arbeiten abgeschlossen:

- Programmierung der Steuerungssoftware,
- Anschluss der Sensoren und Steuergeräte an die Schaltschränke.

Die erste erfolgreiche Inbetriebnahme und Erprobung des MSR-Systems erfolgte in KW 8/2023. Weitere Tests wurden ohne Beanstandungen während der Kabelprüfungsphase durchgeführt. Alle Systemkomponenten (zentral und dezentral) wurden anschließend ins HUW Menzing geliefert. Dort erfolgten:

- Anschluss und Test aller Sensoren (Druck, Temperatur, Durchfluss, Strom, Spannung),
- Definition und Programmierung aller Regelkreise,
- Finalisierung, Test und Inbetriebnahme der Steuerungssoftware,
- Einrichtung und Test der Notabschaltung für das SWM-System,
- Installation und Inbetriebnahme des Fernüberwachungssystems mit Zugängen für NKT, SWM und Linde.

Im Q2/2024 wurde das MSR-System vollständig in Betrieb genommen. Im Oktober und November 2024 folgten erste Hochspannungs- und Gleichstromtests. Anschließend begann das Testprogramm mit höheren Wechselstromstärken. Die dafür erforderlichen Testsequenzen wurden im MSR-System entsprechend nachprogrammiert und erfolgreich getestet – inklusive der Notabschaltung.

In Q4/2024 kam es im Umspannwerk zu mehreren Inzidenzen, die zu teilweisen oder vollständigen Stromabschaltungen im supraleitenden Kabelsystem führten. Das MSR-System reagierte in allen Fällen zuverlässig:

- Es kam zu keinen Systemausfällen,
- Das Testkabelsystem blieb auch bei Stromunterbrechungen stabil im Betrieb,
- Alle Daten wurden vollständig erfasst,
- Das kontrollierte Herunter- und Hochfahren des Systems war jederzeit gewährleistet.

Fazit:

Das MSR-System hat sich unter realen Bedingungen bewährt und stand während der gesamten Demonstrationsphase funktionsfähig zur Verfügung.

5.3.2 LN-Versorgung der Teststellung

Für die Testanlage in Menzing war ein LN-Versorgungssystem erforderlich. Das NKT-Kühlsystem war mit dem LN-Tank fest verbunden. Diese Verbindungsleitung hatte mehrere Funktionen:

- die ständige Druckbeaufschlagung des Kabelsystems (im Normalbetrieb) mit LN-Behälterdruck über das Handventil, welches dafür normalerweise offen gehalten wurde. Im Normalbetrieb war diese Leitung mit LN befüllt, aber der LN-Durchfluss war in diesem Zustand nur verschwindend gering.
- das NKT-Kühlsystem (Unterkühler-Behälter) wurde mit LN über die oben genannte Leitung befüllt und nachgefüllt, zudem wurde auch das Kabelsystem über die oben genannte Leitung mit LN befüllt / nachgefüllt.

Für dieses LN-Versorgungssystem wurde eine Spezifikation erarbeitet. Auf Basis dieser Spezifikation hat SWM das System inklusive der spezifizierten Dienstleistungen (Abkühlen, Spülen) öffentlich ausgeschrieben und beschafft. Diesen Auftrag hat Linde-Gas München gewonnen.

Die Lieferung wurde vom anfänglich geplanten Q4/2022 mehrfach verschoben. Der LN-Behälter wurde schließlich in Q2/2024 ins HUW Menzing geliefert und installiert. Die erste LN-Lieferung erfolgte im Mai 2024. Nach erfolgreicher Abkühlung des Kabels (mit Extra-LN-Lieferung) wurde das System eingestellt und parametrisiert (Drücke für Sicherheitsventile, Regelung für Druckaufbau sowie Druckabbau).

Ab Juli 2024 erfolgte die Kühlung hauptsächlich und abweichend von der ursprünglichen Planung nicht durch die Stirling-Kühler, sondern durch Abpumpen und Verdampfung von LN aus dem Linde-LN-Versorgungssystem. Der Vorratsbehälter vor Ort war für diesen Betrieb nicht ausgelegt und (nur für die Druckhaltung) zu klein dimensioniert. Die erforderliche Menge an LN sowie die Anzahl und Frequenz der LN-Lieferungen stiegen dadurch deutlich, konnte aber durch Linde (trotz erheblichen organisatorischen Aufwands) bewerkstelligt werden.

Für die nächste Projektphase – die Demonstrationsphase – war ursprünglich vorgesehen, die Stirling-basierte Kühlung wieder als Hauptkühlsystem einzusetzen. Dadurch sollte der Bedarf an LN sinken und die LN-Versorgung stabilisiert werden. Allerdings fiel das Stirling-Kühlsystem, das ab

Q3/2024 als Hauptkühlung vorgesehen war, in diesem Zeitraum endgültig aus. Infolgedessen wurde der Betrieb vollständig auf LN-Verdampfungskühlung umgestellt. Dadurch stiegen der LN-Verbrauch sowie Frequenz und Menge der Lieferungen dauerhaft.

Um den gestiegenen Bedarf zu decken, wurde Ende September 2024 der vorhandene LN-Behälter (2,5 m³) durch einen größeren Behälter mit 6 m³ Volumen ersetzt und dieser in das System integriert. Im Zuge der Umstellung wurde das Kühlsystem neu abgestimmt: die Ansprechdrücke der Sicherheitsventile wurden angepasst und die Regelung für Druckaufbau und Druckabbau wurde verlangsamt, um einen stabileren Betrieb zu gewährleisten. Trotz aller Widrigkeiten konnte Linde die erhöhte Nachfrage zuverlässig decken – zuerst mit Lieferungen im Drei-Tage-Rhythmus, in der letzten Phase bei Maximallast sogar mit täglichen Lieferungen.

AP2.1 Numerische Simulation

2.1.1 Konfiguration des elektrischen Netzes

Abb. 4.1 zeigt das 110-kV-Netz in München, das im Mittelpunkt des Projekts steht. Dieses Netz ist über zwei Primärumspannwerke, MS-01 und MS-02, mit dem deutschen 400-kV-Übertragungsnetz verbunden. Um sicherzustellen, dass die Kurzschlussströme unter 25 kA bleiben, ist das Netz in zwei getrennte Sektoren unterteilt: einen nördlichen und einen südlichen. Das Netz weist eine stark vermaschte Topologie auf und umfasst 82 Übertragungsleitungen (zumeist Gasinnen- (GID) und Gasaußendruckkabel (GAD)), die alle 37 über die Stadt verteilten Umspannwerke miteinander verbinden. Um eine zuverlässige Stromversorgung für München zu gewährleisten, wurden in dieser Studie zwei thermische Kraftwerke (TPP) berücksichtigt, die an die Umspannwerke SB-06 und SB-21 angeschlossen sind. Die Erzeugungskapazitäten dieser Kraftwerke wurde zwischen den beiden Netzsektoren aufgeteilt.

Von der Gesamtlast entfallen 54 % auf den südlichen Sektor, während die restlichen 46 % vom nördlichen Sektor versorgt werden. Im Jahr 2019 wurde eine Spitzenlast von ca. 1200 MVA gemessen. Nach Angaben der SWM wird dieser Wert in den kommenden Jahren voraussichtlich auf bis zu 2000 MVA ansteigen, wobei sich die höchsten Lasten (> 80 MVA) auf die Umspannwerke SB-04, SB-05, SB-07, SB-09, SB-13, SB-14, SB-16, SB-22, SB-24, SB-26, SB-30, SB-31 und SB-34 konzentrieren. Die Versorgung dieser Lasten kann die Installation neuer Kabelsysteme oder sogar den Bau zusätzlicher Umspannwerke erforderlich machen. Aufgrund der dichten städtischen Bebauung stellt der zusätzliche Platzbedarf solcher Infrastrukturen ein erhebliches Problem dar.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist die 15 km lange supraleitende SuperLink-Verbindung mit einer Kapazität von 500 MVA geplant, die das Hauptumspannwerk MS-01 mit SB-21 verbinden soll. Aufgrund der hohen Übertragungskapazität und niedrigen Impedanz erfordert die Integration eines solchen HTS-Kabels in das Netz eine sorgfältige Untersuchung. Die Auswirkungen wurden sowohl im nördlichen als auch im südlichen Teil des Netzes bewertet. In Zusammenarbeit mit den SWM wurden für die Analyse zuerst die in Tabelle 4.1 aufgeführten Versorgungsszenarien definiert.

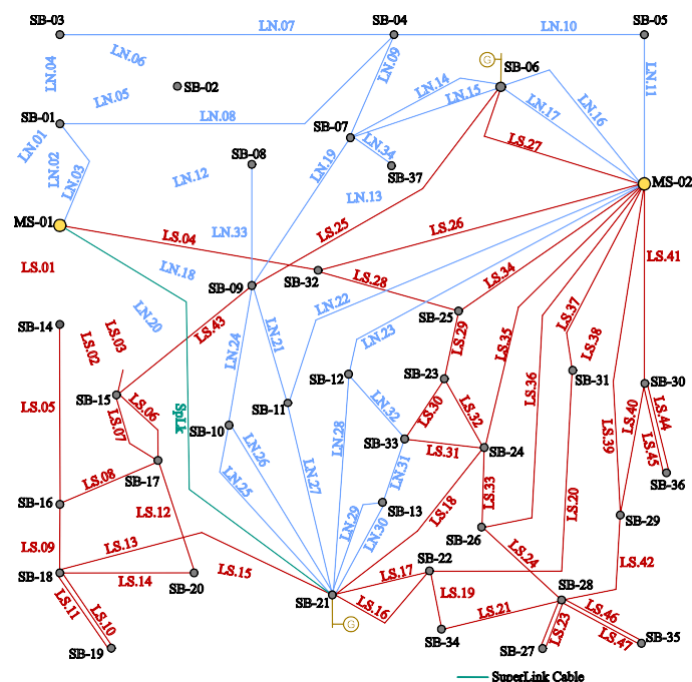


Abb. 4.1: Hochspannungsnetz der Stadt München: das Netz ist in zwei verschiedene Sektoren unterteilt. Die SuperLink-Verbindung zwischen den Umspannwerken MS-01 und SB-21 ist grün hervorgehoben.

Engpässe bestehen insbesondere in Schwachlastzeiten, wenn Strom aus dem HKW Süd (SB-21) über die bestehenden Leitungen an der Isartalstraße nicht ausreichend ins Nord- und Südnetz eingespeist werden kann. Zur Verbesserung der Versorgungssicherheit und Netzstabilität sind zwei leistungsstarke Kabeltrassen mit je 500 MVA ab Isartalstraße zu den HUW MS-01 und MS-02 erforderlich. Die in diesem Bericht analysierte westliche Tangente nach Menzing stellt dabei die bevorzugte erste Ausbaustufe dar.

2.1.2 Auswahl der untersuchten Szenarien im bestehenden Netz

Für die Lastflussberechnungen mit dem HTS-Kabel wurden in Abstimmung mit den SWM geeignete Einspeise- und Lastszenarien definiert, um die Auswirkungen des Kabels besser zu analysieren. Tabelle 4.1 zeigt die drei untersuchten Hauptlastszenarien, die sowohl Niedrig- als auch Hochlastfälle abdecken. Sie umfassen die Gesamtleistung jedes Kraftwerks sowie die jeweilige Einspeisung in beide Netzsektoren. Szenario S01 stellt den Normalbetrieb des Netzes dar, wobei die Kraftwerke SB-06 und SB-21 unter Standardbedingungen arbeiten. Szenario S02 simuliert die Abschaltung des Kraftwerks SB-06. Szenario S03 beinhaltet die Abschaltung des Kraftwerks SB-21, wodurch das Netz vollständig von der externen Stromversorgung (über die HUW) abhängig wird.

Tabelle 4.1 Konfiguration der einzelnen Erzeugungsszenarien

Szenario - Erzeugung		S01	S02	S03
TPP bei SB-06	Nord	50 MVA	0,0 MVA	0,0 MVA
	Süd	50 MVA		
	Gesamt	100 MVA	0,0 MVA	0,0 MVA
TPP bei SB-21	Nord	216 MVA	295 MVA	0,0 MVA
	Süd	276 MVA	376 MVA	
	Gesamt	492 MVA	671 MVA	0,0 MVA

Neben diesen Hauptszenarien wurde es auch als sinnvoll erachtet, das Netz auf Ausfälle der Hochspannungsanschlüsse in den HUW Föhring (MS-02) und Menzing (MS-01) zu untersuchen. Auch ein kompletter Ausfall solcher Verbindungen wurde untersucht (Inselbetrieb). Aufgrund der Vielzahl möglicher Kombinationen und der umfangreichen Ergebnisse beschränken wir uns hier aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die wichtigsten Szenarien.

2.1.3 Netzanalyse

Für die betrachteten Erzeugungsszenarien wurden die Auswirkungen des SuperLink-Kabels mittels vergleichender Analyse der Belastung herkömmlicher Kabel innerhalb des Netzes mit und ohne Integration des supraleitenden Stromkabels bewertet. Die Anzahl der Leitungen mit Auslastung über 85 % ihrer Stromfähigkeit wurde vor und nach dem Anschluss des Superlink-Kabels im Netzwerk ermittelt. Auf die gleiche Weise wurde die Spannungsstufen an jeder Sammelschiene bestimmt und deren Änderungen nach der Integration des Supraleiterkabels analysiert.

Zusätzlich wurden die anfänglichen symmetrischen Kurzschlussströme I_k , ausgedrückt in RMS-Werten, die sich aus einem dreiphasigen Kurzschluss ergeben, an jeder Umspannstation unter Verwendung der vollständigen Überlagerungsmethode berechnet, um sicherzustellen, dass die Integration von SuperLink den vom Netzbetreiber vorgegebenen Schwellenwert von 25 kA nicht überschreitet.

Darüber hinaus wurden die gesamten ohmschen Verluste (I^2R) im Netz bewertet und für beide Szenarien verglichen. Diese umfassende Untersuchung wurde mittels Lastflussanalyse unter Verwendung von DigSILENT PowerFactory unter Berücksichtigung symmetrischer Lasten durchgeführt, wodurch eine detaillierte Bewertung der Systemleistung unter den vorgeschlagenen Bedingungen möglich war. Zur Steuerung von PowerFactory und zum Abruf der gewünschten Ergebnisse innerhalb weniger Sekunden wurde ein externes Python-Skript entwickelt. Die wichtigsten Eigenschaften des für die Lastflussberechnungen berücksichtigten SuperLink-Kabels sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Es ist wichtig zu betonen, dass diese Studie keinerlei Form der Leistungs-flusssteuerung berücksichtigt.

Tabelle 4.2 Elektrische Eigenschaften des SuperLink-Kabels

Parameter	Wert
Widerstandsbelag R'	0,0 Ω/km
Reaktanzbelag X'	29 m Ω/km
Kapazitätsbelag C'	0,327 $\mu\text{F}/\text{km}$
Länge	15 km
Gesamtimpedanz	0,435 Ω
$\tan \delta$	0,0002

Ergebnis – Nördliches Netz

Wie in Abb. 4.1 dargestellt, ist das 110-kV-Netz in München in zwei unterschiedliche Sektoren unterteilt. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen auf das nördliche Netz untersucht, wenn das SuperLink-Kabel in diesen Sektor integriert wird. Abb. 4.2 zeigt die Ergebnisse für alle in Tab. 4.1 aufgeführten Erzeugungsszenarien. Für jedes Szenario wurde die prozentuale Laständerung ΔL jedes Kabels berechnet und ebenfalls in Abb. 4.2 dargestellt. Diese Änderung ist definiert als die Differenz der Kabellast mit und ohne SuperLink im Netz ($\Delta L = L_{\text{mit}} - L_{\text{ohne}}$).

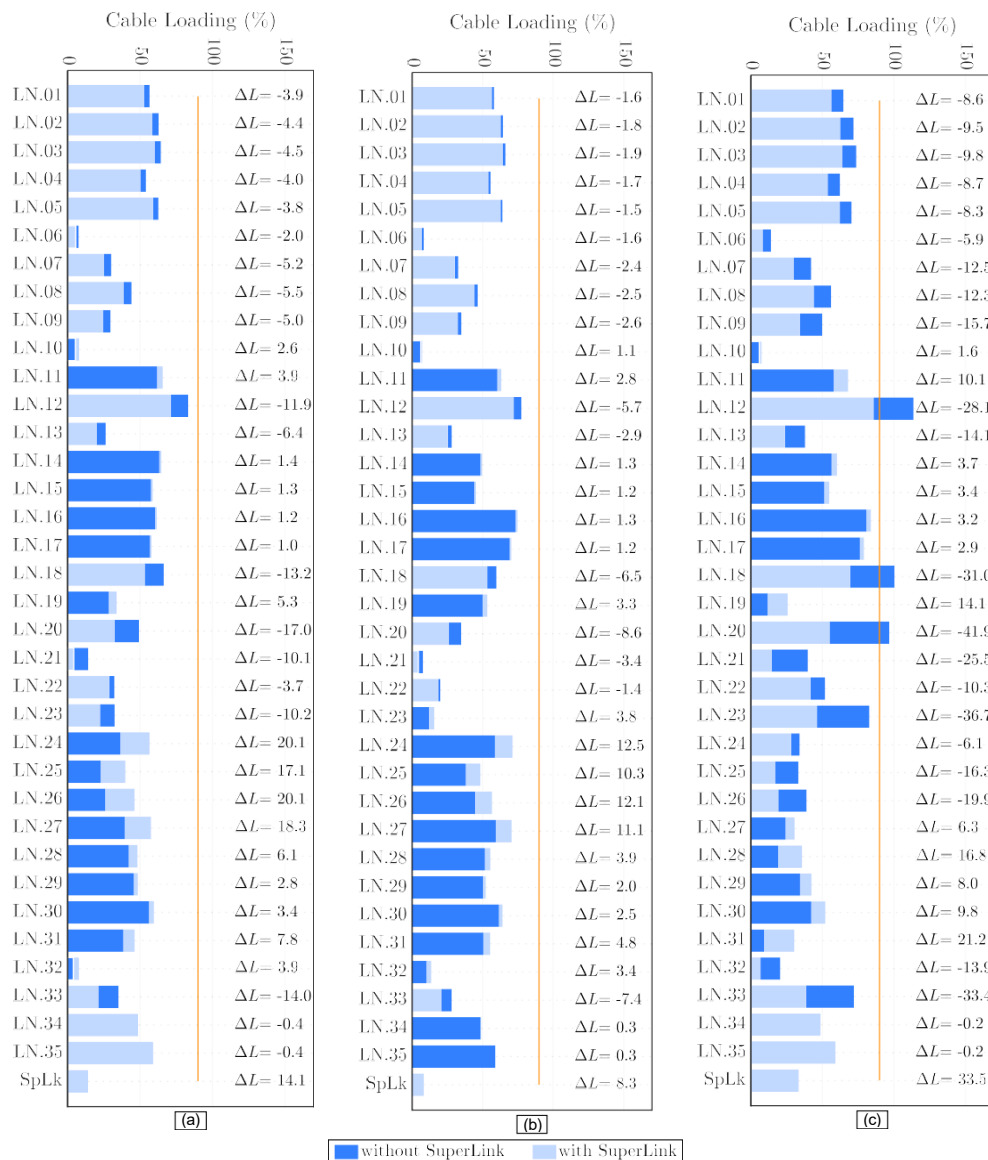


Abb. 4.2: Prozentuale Auslastung der Kabel im nördlichen Sektor, Vergleich der Netzleistung mit und ohne SuperLink-Kabel (SpLk) für (a) Szenario S01, (b) Szenario S02 und (c) Szenario S03. Die vertikale orangefarbene Linie stellt die 90 %-Auslastungsgrenze dar.

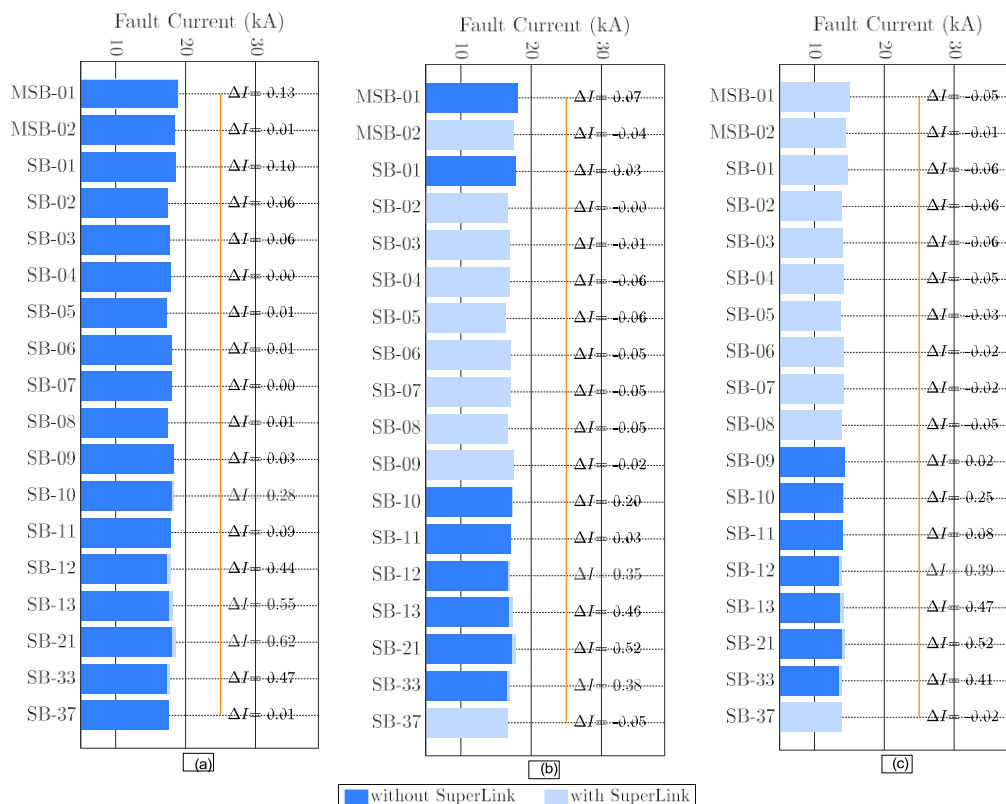


Abb. 4.3: Vergleich der Fehlerstrompegel an jeder Umspannstation im nördlichen Sektor mit und ohne SuperLink-Kabel (SpLk) für (a) Szenario S01, (b) Szenario S02 und (c) Szenario S03. Die vertikale orangefarbene Linie stellt den Schwellenwert von 25 kA dar.

Im Szenario S01 fließt Strom über das SuperLink-Kabel vom Hauptumspannwerk MS-01 zum Umspannwerk SB-21 (Abb. 4.2(a)). Infolgedessen ist eine Verringerung der Belastung der Leitungen LN.12, LN.18, LN.20 und LN.21 zu beobachten. Bei einigen Leitungen, wie LN.25 und LN.26, steigt der Prozentsatz jedoch leicht.

Im Allgemeinen beobachtet man, dass die Auslastung mit Integration des SuperLink-Kabels steigt. Dies liegt daran, dass in diesem Szenario mehr Leistung von SB-21 zu SB-10 übertragen wird als von MS-01. In ähnlicher Weise steigt die Belastung der Leitung LN.27 mit dem SuperLink, da mehr Leistung über diese Leitung zu SB.11 transportiert wird.

Insgesamt entlastet das SuperLink-Kabel in **Szenario S01** die Kabel, die Energie von MS-01 transportieren, während die Belastung der Kabel, die von SB-21 ausgehen, erhöht wird. **Aufgrund der veränderten Leistungsflussverteilung werden die Joule-Verluste im Nordnetz von 1,39 MW auf 1,25 MW (-9%) reduziert.** Darüber hinaus wird das SuperLink-Kabel in diesem Szenario nur zu 14,1 % seiner Kapazität ausgelastet.

In **Szenario S02**, dargestellt in Abb. 4.2 (b), sind die Auswirkungen von SuperLink auf das Netz ähnlich wie in Szenario S01. Die Entfernung der Leistung des TPP an SB-06 führt zu einer Erhöhung der prozentualen Auslastung der nördlichen Kabel, die an SB-21 angeschlossen sind. Dies liegt daran, dass das TPP an SB-21 zusätzliche Leistung liefern muss, um den Bedarf im nördlichen Teil der Stadt zu decken. In diesem Szenario wird das SuperLink-Kabel mit 8,3 % seiner Kapazität betrieben, transportiert Strom von MS-01 nach SB-21 und trägt zur erhöhten Belastung der nördlichen Kabel bei, da es Strom in den Norden der Stadt transportiert. **Infolgedessen steigen die Verluste im Nordnetz vernachlässigbar von 1,48 MW auf 1,49 MW.**

Die Vorteile des SuperLink-Kabels werden besonders deutlich in **Szenario S03**, dargestellt in Abb. 4.2 (c), in dem das TPP in SB-21 vom Netz getrennt ist. In dieser Situation wird die Stadt ausschließlich von MS-01 und MS-02 versorgt. Unter diesen Bedingungen wird beobachtet, dass drei Leitungen – LN.12, LN.18 und LN.20 – über ihre Belastungsgrenzen hinaus betrieben werden. Mit der Implementierung des SuperLink-Kabels wird jedoch die Last auf diesen drei Leitungen

verringert, sodass ihr Betrieb unter den Schwellenwert von 90 % sinkt. Obwohl der Stromfluss durch das SuperLink-Kabel in Szenario S03 von MS-01 zu SB-21 gerichtet ist, steigt die Last auf den Leitungen LN.25 und LN.26 nicht an. Dies liegt daran, dass der Strom nun von SB-10 zu SB-21 geleitet wird. Wie in den vorherigen Fällen kommt es bei den Leitungen LN.28, LN.29 und LN.30 zu einer leichten Erhöhung der Last aufgrund der höheren Leistungsdichte, die an SB-21 geliefert wird.

Es ist wichtig zu beachten, dass in [Szenario S03](#) das SuperLink-Kabel mit 33 % seiner Kapazität arbeitet und die [Verluste im Nordnetz von ca. 1,37 MW auf 1,13 MW \(-17,5%\)](#) reduziert werden. Abb. 4.3 vergleicht die Fehlerstrompegel für jedes Erzeugungsszenario mit und ohne SuperLink. Die Veränderungen des Fehlerstroms (in kA) wird als $\Delta I = I_{\text{mit}} - I_{\text{ohne}}$ dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass [die Integration des supraleitenden Kabels keine wesentlichen Änderungen verursacht und vor allem der Schwellenwert von 25 kA nicht überschritten wird](#).

Da SuperLink jedoch die Gesamtimpedanz zwischen den Umspannwerken MS-01 und SB-21 beeinflusst, kann es in diesen Umspannwerken zu einem deutlicheren Anstieg des Fehlerstroms kommen. An SB-21 kann es je nach Erzeugungsszenario zu einem Anstieg von bis zu 0,62 kA kommen. Aufgrund der erhöhten Leistungsabgabe an die Umspannwerke SB-12 und SB-13 – zuvor durch die höhere prozentuale Auslastung der Leitungen LN.25, LN.26, LN.27 und LN.30 angezeigt – ist außerdem ein entsprechender Anstieg der Fehlerstrompegel an diesen Umspannwerken zu beobachten.

Ergebnis – Südliches Netz

Abb. 4.4 zeigt die Ergebnisse der Lastflussanalyse für das südliche Netz. Eine wichtige Beobachtung aus [Szenario S01](#) (Abb. 4.4 (a)) ist, dass die Integration des SuperLink-Kabels in das Netz die Belastung aller Leitungen, die von MS-01 ausgehen und Strom in Richtung SB-21 übertragen (insbesondere LS.01, LS.02, LS.03 und LS.04), erheblich verringert. Darüber hinaus trägt das SuperLink-Kabel dazu bei, die Last auf der Leitung LS.25 zu verringern, da weniger Strom über dieses Kabel von SB-26 in den südlichen Bereich übertragen werden muss. Allerdings muss auf die Kabel geachtet werden, die für den Transport der zusätzlichen Leistung des SuperLink-Kabels an SB-21 zu benachbarten Umspannwerken zuständig sind. Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, wird die prozentuale Auslastung dieser Kabel (LS.13, LS.15, LS.16, LS.17, LS.18 und LS.19) steigen. Da das supraleitende Kabel zwischen MS-01 und SB-21 angeschlossen ist, werden die Leitungen, die von MS-02 ausgehen, nur minimale Änderungen ihrer prozentualen Auslastung erfahren. In diesem Szenario (S01) arbeitet das SuperLink-Kabel mit 5,3 % seiner Kapazität und trägt zu einer leichten Verringerung der gesamten ohmschen Verluste im südlichen Netz bei, die von [1,09 MW auf 1,08 MW](#) sinken.

Wie in Abb. 4.4 (b) dargestellt, stellt das [Erzeugungsszenario S02](#) die geringste Anforderung an die supraleitende Verbindung im südlichen Netz. In diesem Szenario muss das SuperLink-Kabel nur mit 4 % seiner Kapazität betrieben werden, und seine Integration in das Netz hat keine wesentlichen Auswirkungen auf die prozentuale Auslastung der herkömmlichen Kabel im Netz. Folglich bleiben die [gesamten ohmschen Verluste im Südnetz unverändert bei 1,16 MW](#). Dieses Szenario ist auch unter den analysierten Fällen einzigartig, da es das einzige ist, in dem Strom durch das supraleitende Kabel von SB-21 in Richtung MS-01 fließt. Die an MS-01 abgegebene Leistung wird anschließend an SB-32 weitergeleitet, was zu einer geringfügigen Erhöhung der Auslastung der Leitung LS.04 um etwa 0,3 % führt.

Die in Abb. 4.4 (c) dargestellten Daten resultieren aus dem Ausfall der TPPs an SB-06 und SB-21, entsprechend [Szenario S03](#). In dieser Situation würden die herkömmlichen Kabel von MS-01 und MS-02 sowie einige ihrer nachfolgenden Leitungen erheblich überlastet werden. Insbesondere würde die Leitung LS.01 die 90-prozentige Belastungsgrenze überschreiten, während LS.36 sich dieser Grenze stark annähern würde. Durch die Übertragung von Strom von MS-01 über das SuperLink-Kabel zu SB-21 kann die Belastung dieser herkömmlichen Kabel wirksam verringert werden, so dass alle Leitungen innerhalb der festgelegten Betriebsgrenzen bleiben. Die Verringerung der Belastung der Leitung LS.36 würde jedoch nur 3,7 % betragen.

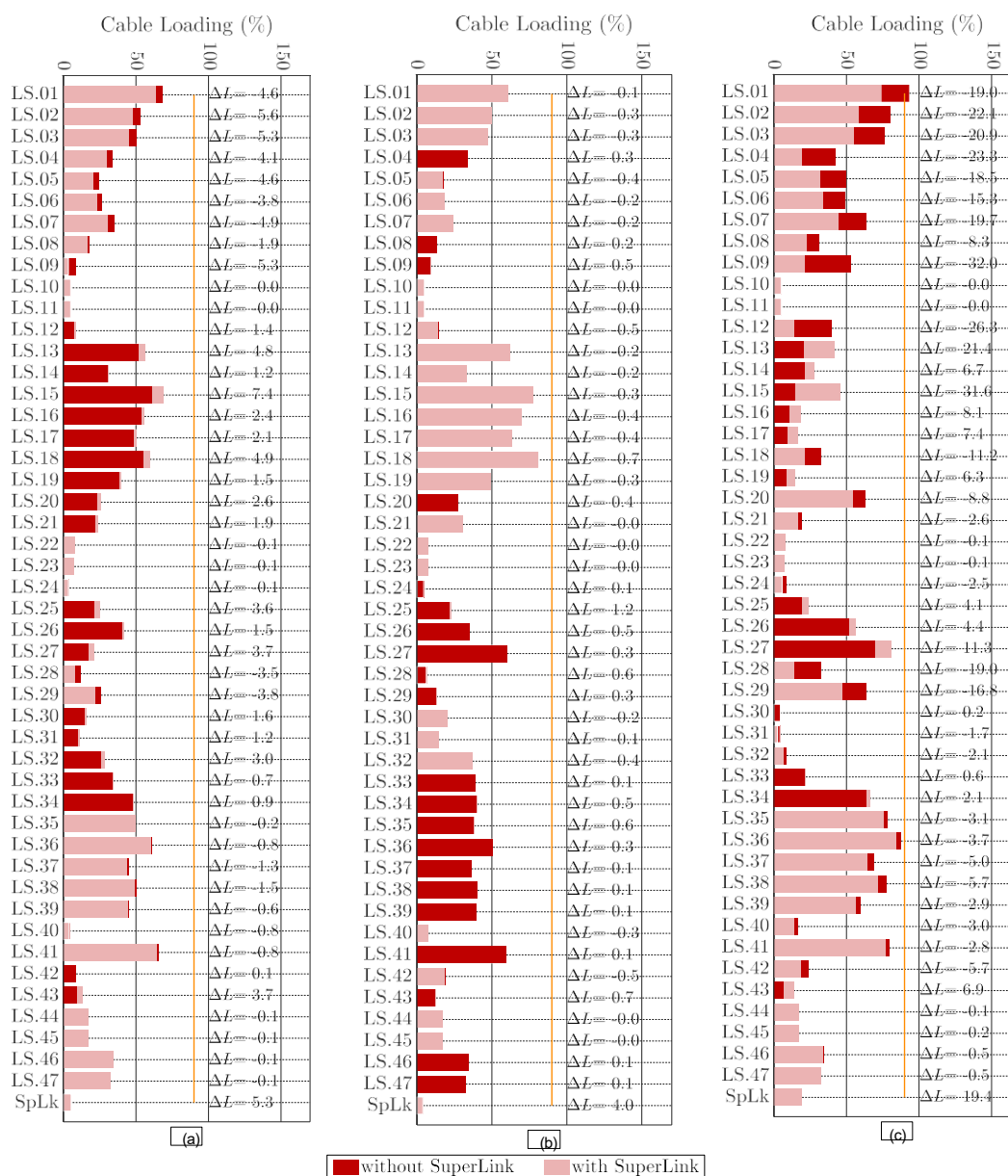


Abb. 4.4: Prozentuale Auslastung der Kabel im südlichen Sektor, Vergleich der Netzleistung mit und ohne SuperLink-Kabel (SpLk) für (a) Szenario S01, (b) Szenario S02 und (c) Szenario S03. Die vertikale orangefarbene Linie stellt die 90-prozentige Belastungsschwelle dar.

Wie bereits erwähnt, würde die Belastung der Leitungen, die für die Stromübertragung von SB-21 zuständig sind – nämlich LS.13, LS.15, LS.16 und LS.18 – steigen. In diesem Szenario S03 würde das SuperLink-Kabel mit 19,4 % seiner maximalen Nennstromstärke betrieben werden. Durch die Reduzierung des Strombedarfs in der Nähe von SB-21 ermöglicht SuperLink eine höhere Stromabgabe über die Leitungen LS.26, LS.27 und LS.34, die weiter von SB-21 entfernte Umspannwerke versorgen. Folglich würden die **ohmschen Verluste in diesem Szenario von 2,03 MW auf 1,62 MW (-20%) sinken**.

Die Fehlerstrompegel an jedem Umspannwerk im südlichen Sektor sind in Abb. 4.5 für jede analysierte Erzeugungsbedingung dargestellt. In Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen im nördlichen Sektor führt die Integration des SuperLinks nicht zu einem kritischen Szenario, da die Fehlerstrompegel in allen Fällen unter dem Schwellenwert von 25 kA bleiben. Die größten Schwankungen des Fehlerstroms, die weniger als 1 kA betragen, werden vor allem an der Hauptstation MS-01 und den Umspannwerken SB-21, SB-14 und SB-15 beobachtet.

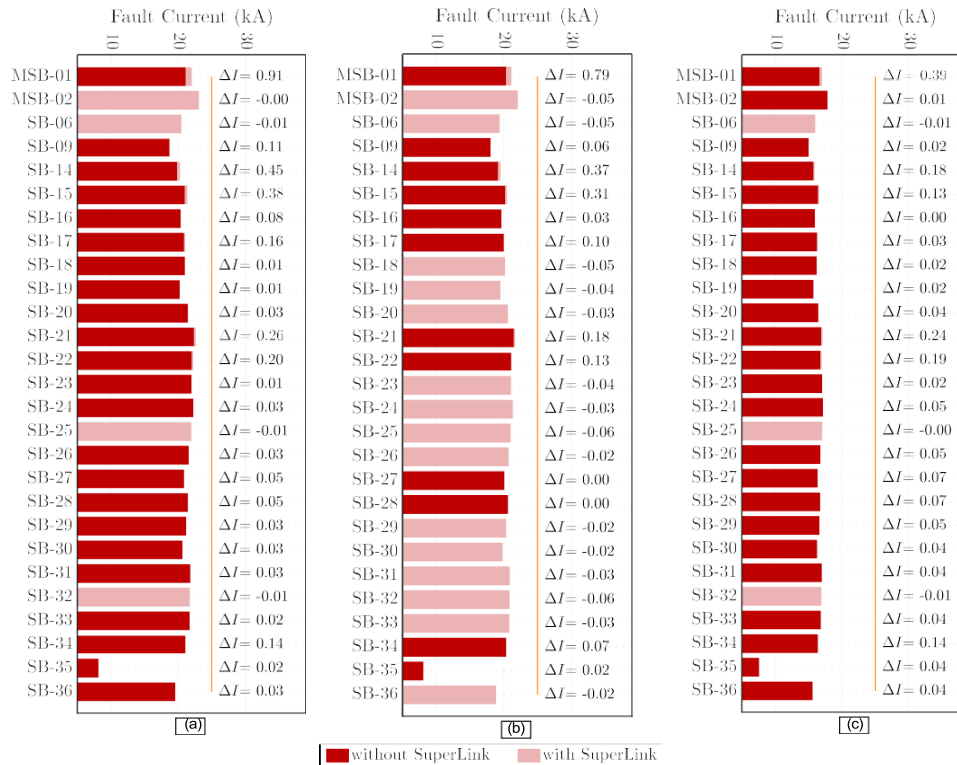


Abb. 4.5. Vergleich der Fehlerstrompegel an jeder Umspannstation im südlichen Sektor mit und ohne SuperLink-Kabel (SpLk) für (a) Szenario S01, (b) Szenario S02 und (c) Szenario S03. Die orangefarbene vertikale Linie stellt den Schwellenwert von 25 kA dar.

Transientes Verhalten

Wie oben erläutert, ist das SuperLink-Kabel so ausgelegt, dass es Fehlerströme von bis zu 40 kA für eine Sekunde standhält und somit die Kompatibilität mit potenziellen zukünftigen Konfigurationen des Münchner Netzes gewährleistet. In der aktuellen Netzkonfiguration beträgt der maximal zulässige Kurzschlussstrom 25 kA. Um die Auswirkungen des SuperLink-Kabels auf das Netz gründlich zu bewerten, wurde eine transiente thermische Analyse durchgeführt. Diese Analyse berücksichtigt ein allgemeines Worst-Case-Szenario und simuliert daher einen dreiphasigen Erdschluss ($I_{K''}$) mit 25 kA. Das resultierende transiente Verhalten ist in Abb. 4.6 dargestellt. Obwohl davon ausgegangen wurde, dass der Fehlerzustand eine Sekunde lang anhält, sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die ersten Millisekunden im Diagramm dargestellt.

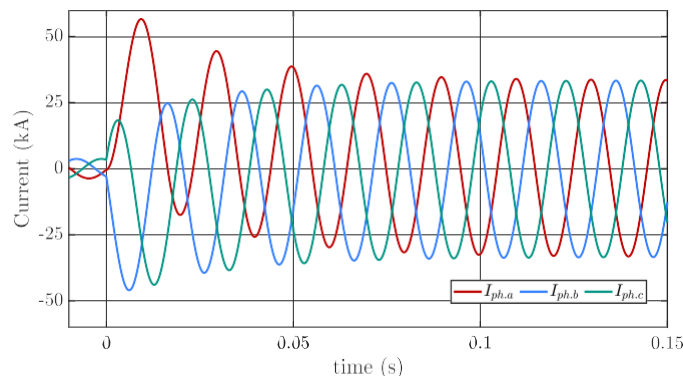


Abb. 4.6: Dreiphasige Fehlerströme gegen Erde. Der Kurzschluss dauert eine Sekunde.

Während eines solchen Fehlers überschreitet der Strom den kritischen Strom des Kabels und treibt dessen Widerstand in einen oszillierenden Zustand, wie in Abb. 4.7 dargestellt. Dieses oszillierende Verhalten ergibt sich aus der E-J-Charakteristik von HTS-Materialien, die deren Widerstandsverhalten bestimmt, wenn der Transportstrom den kritischen Strom überschreitet.

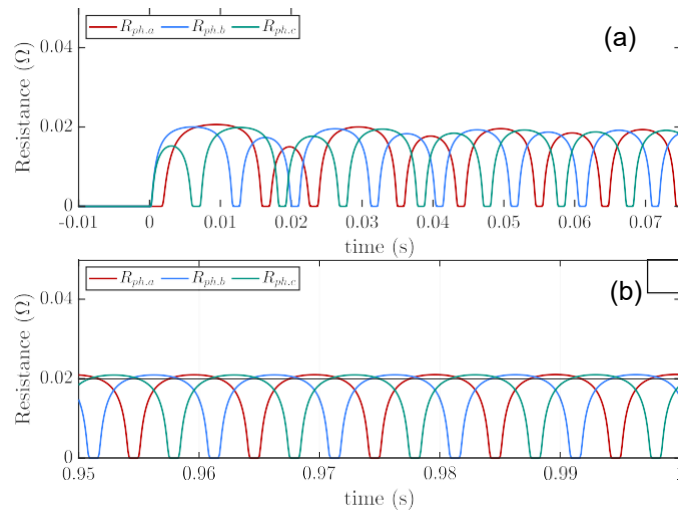
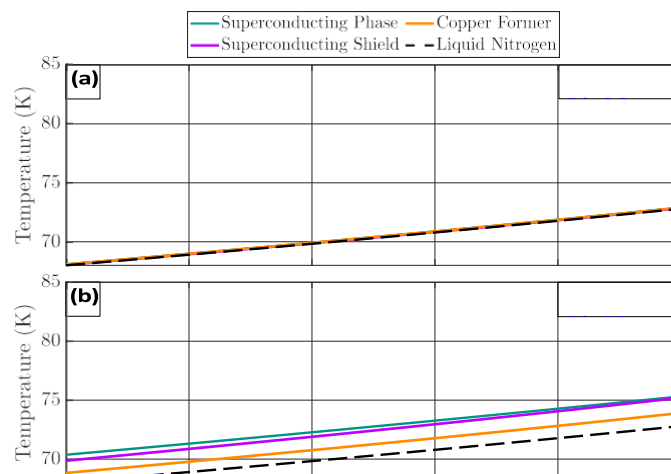


Abb. 4.7: Elektrischer Widerstand jeder Phase in einem 5 km langen Abschnitt des supraleitenden Kabels während eines Kurzschlussereignisses. (a) Erste 75 Millisekunden und (b) letzte 50 Millisekunden der 1-sekündigen Fehlerdauer.

Das 15 km lange Kabelsystem besteht aus drei HTS-Stromkabeln mit einer Länge von jeweils ca. 5 km, die in Reihe geschaltet sind. Das in Abb. 4.7 dargestellte Widerstandsverhalten entspricht einem einzelnen 5 km langen Kabelabschnitt. Wie zu sehen ist, überschreiten die Widerstandswerte 20 mΩ pro Segment und pro Phase nicht, was darauf hindeutet, dass der Widerstandsanstieg einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Dämpfung der Fehlerstrompegel hat. Wenn daher eine signifikante Reduzierung der Fehlerstrompegel erforderlich wäre, müsste ein Fehlerstrombegrenzer eingesetzt werden.

Das oszillierende Verhalten der elektrischen Reaktion des Kabels deutet darauf hin, dass **die HTS-Bänder im Kabel während des gesamten Fehlerzustands im supraleitenden Zustand bleiben**. Dies wird durch die Tatsache bestätigt, dass die Temperatur der Bänder die kritische Temperatur des supraleitenden Materials (92 K) nicht überschreitet. Abb. 4.8 zeigt die Temperaturverteilung der Kabelkomponenten entlang ihrer Länge zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Am Ende des Fehlerzeitraums beträgt die maximale Temperatur der supraleitenden Bänder etwa 77,5 K und bleibt damit deutlich unter dem für den Übergang in den Normalzustand erforderlichen Schwellenwert. Bei einem Übergang in den Normalzustand wäre ein linearer Anstieg des Kabelwiderstands zu beobachten. Nach der Fehlerbehebung hört die Wärmeentwicklung im Kabel auf und die Temperatur beginnt aufgrund der radialen Wärmediffusion in Richtung ihres Ausgangszustands zu sinken. Im analysierten Fall bleibt die Temperatur der supraleitenden Bänder etwa 90 Sekunden nach der Fehlerbehebung um einige Kelvin über ihrem Gleichgewichtszustand.



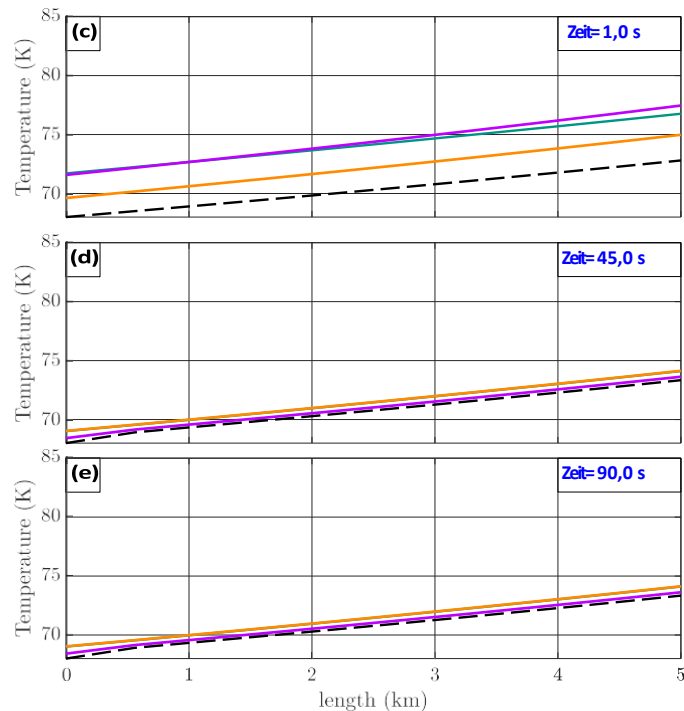


Abb. 4.8: Temperaturverteilung der Kabelkomponenten entlang der Länge der Phase A in drei Zeitintervallen: (a) zu Beginn des Fehlers, (b) nach 0,5 Sekunden, (c) am Ende des Fehlerregimes, (d) nach 45 Sekunden und (e) nach 90 Sekunden. Die Temperaturprofile für die Phasen B und C zeigen ein ähnliches Verhalten und wurden der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

Gesamteffekt

Die Integration des SuperLink-Kabels in das bestehende 110-kV-Netz wurde unter verschiedenen Erzeugungsszenarien gründlich untersucht, wobei sich mehrere wesentliche Vorteile und betriebliche Erkenntnisse ergaben. Das SuperLink-Kabel entlastet sowohl im nördlichen als auch im südlichen Teil des Münchner Netzes wirksam die herkömmlichen Kabel. In Szenarien, in denen thermische Kraftwerke abgeschaltet sind, trägt das supraleitende Kabel dazu bei, die Belastung kritischer Übertragungsleitungen zu reduzieren und deren Betrieb innerhalb sicherer Grenzen zu gewährleisten. Diese Fähigkeit ist besonders wertvoll für die Aufrechterhaltung der Netzstabilität in Spitzenlastzeiten oder bei unerwarteten Ausfällen der Stromerzeugung. Darüber hinaus führt die Integration zu einer deutlichen Verringerung der gesamten ohmschen Verluste im Netz. In Szenarien, in denen das Kabel mit höheren Kapazitäten betrieben wird, beispielsweise während der Abschaltung von TPPs, ist die Verringerung der Netzverluste (bis zu -20%) besonders ausgeprägt, was die Energieeffizienz der supraleitenden Technologie unterstreicht. Die vorgeschlagene Konstruktion des Kabels gewährleistet, dass die Fehlerstrompegel auch unter wechselnden Erzeugungsszenarien innerhalb der Netzgrenze von 25 kA bleiben. Die niedrige Impedanz des Kabels erhöht zwar die Fehlerströme an bestimmten Umspannwerken geringfügig, diese Änderungen sind jedoch minimal und beeinträchtigen die Netzsicherheit nicht. Seine Fähigkeit, Fehlerströme von bis zu 40 kA für eine Sekunde standzuhalten, unterstreicht seine Robustheit und Kompatibilität mit zukünftigen Netzkonfigurationen. Eine transiente thermische Analyse bestätigt, dass das SuperLink-Kabel während Fehlerzuständen im supraleitenden Zustand bleibt und einen stabilen Betrieb ohne nennenswerte Widerstandssteigerungen gewährleistet.

2.1.4 Künftige Netzstrukturen - Zielnetzplanung

Zu Beginn des Projekts konzentrierten sich unsere Berechnungen auf die Auswirkungen des SuperLink-Kabels auf das bestehende 110-kV-Netz Münchens und dessen Betriebszustände. Angesichts des künftig steigenden Strombedarfs ist perspektivisch jedoch auch eine Anpassung der Netzstruktur notwendig, um die Versorgung langfristig zu sichern. Dabei ist auch eine Reduzierung der Gesamtkabellänge vorgesehen.

Die neue Planung orientiert sich an den europäischen Network Codes der ENTSO-E. Ziel ist der Aufbau eines zukunftsfähigen Netzes, das künftige Anforderungen optimal erfüllt und als Grundlage für netzentwicklungspolitische Entscheidungen dient.

Randbedingungen der Netzplanung

Die Prognose der Entwicklung der Bezugswirkleistung und des Blindleistungsbedarfs sind eine entscheidende Basis für die abzuleitenden Maßnahmen zur Versorgungszuverlässigkeit und für die strategische Netzentwicklungsplanung.

Um ein zuverlässiges Stromnetz zu planen, wird zunächst ein Hochlastszenario mit einem Gesamtlast von 2485 MVA betrachtet. Eine Randbedingung des Münchener Netzes ist das Fehlerstrom Niveau. An jeder Sammelschiene des Netzes darf der Fehlerstrom nicht höher als 25 kA sein. Eine weitere Randbedingung ist die Querschnittsfläche der Stromkabel. Es ist wünschenswert, dass sie in die verfügbaren unterirdischen Rohre passen. Es werden daher für das zukünftige Stromnetz nur Kabel mit einem maximalen Querschnitt von 500 mm² berücksichtigt.

Tabelle 4.3 listet die eingespeisten Leistungen der im Stadtnetz verfügbaren Generatoren auf. Alle untersuchten Topologien wurden erstmals im Hochlastszenario betrachtet.

Tabelle 4.3 Einspeisungsszenario

HKW Süd	671 MVA
Freimann	100 MVA
Leitzach	70 MVA

Im Umspannwerk HKW Süd stehen fünf Generatoren zur Verfügung. Die Maschinen können ins Nord- oder Südnetz angeschlossen werden. Da die an das Südnetz angeschlossene Last größer ist, haben wir berücksichtigt, dass drei Generatoren an das Südnetz und zwei Generatoren an das Nordnetz angeschlossen sind. Der Ausfall von einige Generatoren im HKW Süd werden bei dem Anschluss des Superlink Kabels untersucht.

Zukünftige Netzstrukturen

Die in Tabelle 4.4 dargestellten Topologien wurden unter den im vorherigen Abschnitt genannten Randbedingungen ermittelt. Jeder Entwurf wurde anhand der Anzahl überlasteter Kabel (Auslastung > 85 %) und der Joule-Verluste bewertet. Die Topologien 03 und 04 verschieben Lasten vom Süd- ins Nordnetz, indem die Umspannwerke Theresienstr. (THE), Corneliusstraße (COR), Bogenhausen (BOG) und Arcisstr. (SWB) ins Nordnetz verlegt werden, um Überlastungen im Südnetz weiter zu reduzieren.

Tabelle 4.4 Vorgeschlagene 110 kV-Netz-Topologien

Topologie	Beschreibung
Tp.00	Derzeitiges 110 kV Netz
Tp.01	Neue Netz-Topologie, nur mit konventionellen Kabeln
Tp.02	Topologie SuperLink HTS-Kabel
Tp.03	Topologie mit SuperLink Kabel und aufgeteilten Lasten
Tp.04	Topologie mit aufgeteilten Lasten und mehreren supraleitenden Verbindungen

Netz-Topologie-Analyse

Tabelle 4.5 zeigt den Vergleich zwischen den oben genannten Topologien. Jede Topologie wurde unter Berücksichtigung der Anzahl der im KW Süd betriebenen Generatoren bewertet. Für jedes mögliche Einspeiseszenario wurde die Auslastung der Kabel analysiert. Szenarien, in denen die Kabelkapazität über 85 % (Ja) beträgt, sollen nicht als Option für den zukünftigen Betrieb in Betracht gezogen werden. Auf beide Tabellen sind auch die Länge von konventionellem Kabel zu sehen (L_N), sowie die Länge von supraleitenden Verbindungen (L_{HTS}). Die gesamte Länge L_G ergibt sich aus der Summe zwischen L_N und L_{HTS} .

Tabelle 4.5 Topologien Vergleich für das Hochlastszenario

Topologie	Anzahl der laufenden Generatoren im KW Süd			L _N (km)	L _{HTS} (km)	L _G (km)
	3 Gen. (671 MVA)	2 Gen. (536 MVA)	1 Gen. (455 MVA)			
	Kabel Auslastung über 85% ?					
Tp.00	Ja	Ja	Ja	373	0	373
Tp.01	Nein	Ja	Ja	339	0	339
Tp.02	Nein	Nein	Ja	332	15	347
Tp.03	Nein	Nein	Nein	316	15	331
Tp.04	Nein	Nein	Nein	298	23	321

Tabelle 4.5 zeigt sehr eindrücklich, dass ein rein konventionelles Netz (Tp.00 und 01) im Hochlastszenario an seine Grenzen kommt. Der Einsatz von HTS-Kabeln bringt eine deutliche Entlastung bei gleichzeitiger Reduktion der gesamten Kabellängen im Netz. Der Vergleich zwischen konventionellem Netzausbau ohne und mit konsequentem Einsatz von HTS-Kabeln (TP.02/TP.00 bzw. TP.04/TP.01) ergibt eine Reduzierung der Gesamtkabellängen um 9,5%. Die Zahl der (verlustbehafteten) konventionellen Kabel sinkt sogar um 12% (-41 km), was sich direkt in verringerten Netzverlusten widerspiegelt.

Tabelle 4.6 Topologien Vergleich – Gesamte Kabelverluste im Hochlastszenario

Topologie	Anzahl der laufenden Generatoren im HKW Süd		
	3 Gen. (671 MVA)	2 Gen. (536 MVA)	1 Gen. (455 MVA)
Tp.00	4.87 MW	5.26 MW	9.83 MW
Tp.01	3.14 MW	4.03 MW	7.30 MW
Tp.02	2.91 MW	3.10 MW	4.77 MW
Tp.03	3.30 MW	3.48 MW	3.62 MW
Tp.04	2.94 MW	2.98 MW	3.32 MW
Tp.04/TP.01	94%	74%	45%

Tabelle 4.6 fasst die gesamten Joule-Verluste in den Kabeln für jede Topologie zusammen. Dabei wird klar ersichtlich, dass die Optimierung des Netzes in Kombination mit dem Einsatz supraleitender Kabel zu einer zum Teil sehr drastischen Reduzierung der Netzverluste führen kann. Dabei bleibt wichtig hervorzuheben, dass der maximale Fehlerstromwert in den analysierten Topologien in keinem Fall überschritten wurde.

AP2.3 Kryogene Hochspannungsisolierung und Monitoring

2.3.1 Einleitung

In vielen Prototypentests und Pilotprojekten konnte der zuverlässige Einsatz von Supraleitern in Hochspannungskabelanwendungen bereits nachgewiesen werden. Einen essenziell wichtigen Aspekt für deren sicheren Betrieb der Anlagen stellt dabei das Isolationssystem dar. Kommt es zu einem Versagen der elektrischen Isolation, fällt das supraleitende Betriebsmittel unter Umständen dauerhaft aus. Deshalb ist es wichtig, die elektrische Isolationsfähigkeit jedes einzelnen Teils der Isolation zu kennen [9].

Bei HTS-Kabeln mit kaltem Dielektrikum (CD-HTS-Kabel) ist die Isolierung von der Kühlflüssigkeit, dem flüssigen Stickstoff, durchsetzt (vgl. Abb. 5.1). Diese Kühlflüssigkeit wird benötigt, um die supraleitenden Eigenschaften der HTS-Bandleiter zu gewährleisten, wodurch sich ein Mischdielektrikum ergibt. Der flüssige Stickstoff übernimmt entsprechend neben der Kühlung des Kabels eine wichtige Rolle in der Isolationskoordination der Verbundisolierung. Aufgrund der Variationen in der Dielektrizitätskonstante des festen Materials und der Kryoflüssigkeit in den Hohlräumen (Stoßfugen und Schichtspalte) konzentrieren sich die hohen Feldstärken in diesen Bereichen. Die relative Dielektrizitätskonstante von LN beträgt $\epsilon_r = 1,44$ und ist somit niedriger als die von polymeren Isolierfolien und Isolierpapieren ($\epsilon_r > 2$). Aufgrund dieser dielektrischen Verschiebung ergibt sich eine Erhöhung des elektrischen Feldes in den mit LN gefüllten Hohlräumen, abhängig von der Dielektrizitätskonstante um $\epsilon_r/1,44$ bezogen auf das Grundfeld.

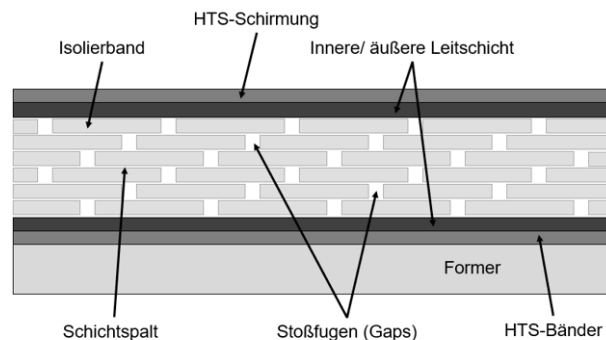


Abb. 5.1: Schematischer Aufbau einer HTS-Kabelader

Um eine langfristige Einsatzfähigkeit der Betriebsmittel sicherzustellen, ist es grundsätzlich erforderlich, Kenntnisse über das Alterungsverhalten des Isoliersystems zu haben. Zwar spielt die thermische Alterung bei Temperaturen um 77 K (-196°C) aller Wahrscheinlichkeit nach keine Rolle, doch kann das Auftreten von Teilentladungen (TE) hier zu einer Schädigung führen. TE sind in Isoliersystemen grundsätzlich zu vermeiden, da diese zu einer beschleunigten Degradation der Isolierung führen können. Obwohl Gase und Flüssigkeiten als (teil-)reversibel betrachtet werden, verursachen Teilentladungen in Feststoffen in der Regel irreversiblen Schaden, da diese kaum Selbstheilungsfähigkeiten aufweisen. Die elektrische Alterung durch Teilentladungen in kryogenen Isoliersystemen wird im Allgemeinen als aktiv angesehen.

Damit der langfristige, störungsfreie Betrieb ermöglicht werden kann, ist das Wissen über potenziell auftretende Schädigungsmechanismen und mögliche Degradation der Isolierung, auch weit außerhalb der nominellen Nennbetriebsbereiche, von entscheidender Bedeutung.

In den Untersuchungen sollte die Wirkung von Teilentladungen (TE) auf die Isolierfähigkeit von polymeren Isolierfolien an geeigneten Geometrien untersucht und mögliche Alterungseffekte durch TE ermittelt werden. TE sind Teildurchschlagsprozesse, die mit hohen Energieumsätzen auf kleinstem Raum verbunden sind. Sie sind in der Lage, Materialien zu zersetzen und die Isolierung damit nachhaltig zu schädigen. TE sind, wenn sie sich ausdehnen, als Vorstufe zu einem Durchschlag zu betrachten. Infolge des hohen Energieumsatzes sind lokale Temperaturerhöhungen

nicht gänzlich auszuschließen, die zur Bildung lokaler Dampfbereiche des flüssigen Stickstoffs führen können. Die Ausweitung einer solchen Fehlstelle ist bezüglich der Betriebssicherheit eines supraleitenden Kabels unbedingt zu vermeiden.

Die im Projekt an der FHSWF durchgeführten Untersuchungen umfassten deshalb:

- Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von polymeren Isolierfolien und deren Entladungsverhalten. Dabei wurde im speziellen eine polymere Isolierfolie mit Namenskennung Cryoflex untersucht, die als Hochspannungsisolierung im Projekt SuperLink diente und im Projekt eingesetzt wurde.
- Wirkung von TE auf das Isolationsmaterial. Reproduzierbare Oberflächenentladungen wurden gezielt auf der Materialoberfläche initiiert. Es sollte bestimmt werden, ob und unter welchen Bedingungen und in welchem Maße eine Materialveränderung eintritt und inwiefern dadurch mit einer Degradation der Isolationseigenschaften gerechnet werden muss.
- Die Entstehung und Entwicklung eines Durchschlagskanals durch eine gewickelte, polymere Kabelisolierung im flüssigen Stickstoff sollte betrachtet werden. Dazu wurde der Durchschlagprozess durch eine künstliche Fehlstelle gezielt hervorgerufen und die Probe zum Durchschlag geführt. Anschließend wurde der Entladungskanal visuell und mittels physikalischer Analyseverfahren untersucht.
- Im Rahmen der Untersuchungen wurde die konventionelle Teilentladungsmesstechnik nach DIN IEC 60270 verwendet. Alternativ zu dem leitungsgebundenen Messsystem wurden UHF-Sensoren auf ihre Eignung zum Einsatz im flüssigen Stickstoff betrachtet.

2.3.2 Versuche zur Wirkung von TE auf polymere Isolierfolien

Elektrische Eigenschaften von polymeren Isolierfolien

Die elektrische Kurzzeitfestigkeit ist ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung von elektrischen Isolierstoffen sowie zur Auslegung von Isoliersystemen und ist in Abhängigkeit von der Prüfspannungsart, dem Isolationsmedium und der Probengröße zu ermitteln. Darüber hinaus dient die Bestimmung der Kurzzeitspannungsfestigkeit bei der gegebenen Anordnung als Grundlage für die Bewertung der elektrischen Dauerfestigkeit der Isolierstoffe, sowie für die Untersuchung der Beeinflussung dieser Festigkeit durch Teilentladungen. Auch lässt sich hierdurch der Einfluss von TE auf das Langzeitverhalten ermitteln. Für die Versuchsdurchführung wurde ein geeigneter Versuchsplatz eingerichtet und spezielle Hochspannungsadapter entwickelt, die den Einsatz im flüssigen Stickstoff (LN) ermöglichen. Detaillierte Ausführungen finden sich in [10].

Die Bestimmung der Durchschlagsspannung erfolgte bei 50 Hz Wechselspannung durch eine 200 V_{rms}/s Spannungssteigerungsprüfung. Die Übersicht über die betrachteten Materialien und die Isolierdicke ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Neben dem im Projekt relevanten Material Cryoflex™ wurden als Referenzmaterialien folgende Folien verwendet:

- Kapton® HN aus Polyimid der Firma DuPont™, das speziell für einen weiten Temperaturbereich entwickelt wurde und spezifiziert ist,
- Polypropylenfolie Formex® GK-5BK von HALA,
- Mylar A® ein Polyethylenterephthalat-Polyesterfolie von Dr. Dietrich Müller GmbH.

Die Messungen wurden bei Atmosphärendruck, sowie bei 1 bar und 2 bar über Atmosphärendruck durchgeführt. Teilentladungen werden bei kryogenen Isolierstoffen als Ausgangspunkt elektrischer Alterung angesehen, weshalb zusätzlich die Bestimmung der Teilentladungseinsatzfeldstärke bezogen auf den Betriebsdruck zu ermitteln war. Die Bestimmung erfolgte ebenfalls bei einer 200 V_{rms}/s Spannungssteigerungsprüfung bei gleicher Elektrodenkonfiguration wie bei der Durchschlagsuntersuchung, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Tabelle 5.1 Materialien und Dicken der getesteten polymeren Isolierfolien

Material	Bez.	Hersteller	Dicke (µm)
Cryoflex Typ A	A	NKT Cable A/S	99,3
Cryoflex Typ B	B	NKT Cable A/S	119,0
Kapton HN 500	E	DuPont™	125,4
MylarA	G	Dr. Dietrich Müller GmbH	99,6
Formex	J	HALA	127,0

Die Ergebnisse der Prüfung auf Durchschlagsfestigkeit und der TE-Einsatzspannung sind in den Abb. 5.2 und Abb. 5.3 als $E = \hat{E}/\sqrt{2}$ -Werte, normiert auf die Probendicke dargestellt.

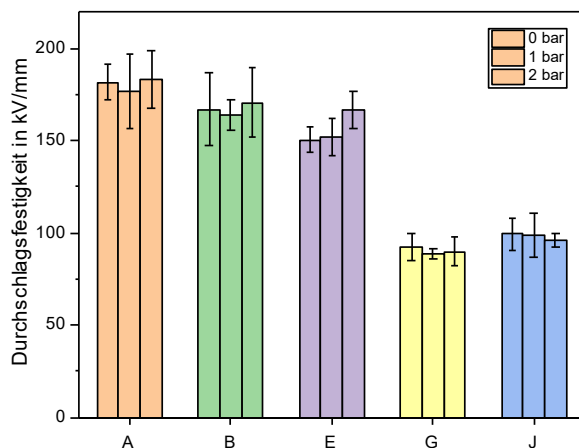


Abb. 5.2: Elektrische Durchschlagsfestigkeit der 200V/s-Spannungssteigerungsprüfung in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung der Messwerte an.

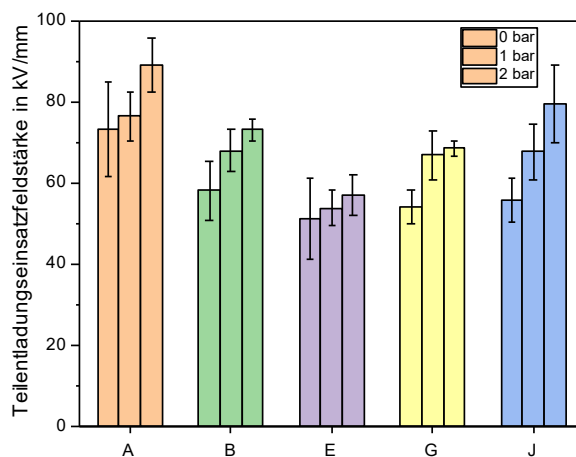


Abb. 5.3: Teilentladungseinsatzfeldstärke für polymere Isolierstofffolien. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung der Messwerte an.

Der Nachweis über das druckabhängige Teilentladungseinsatz-Verhalten von polymeren Isolierfolien dient der Einordnung der weiteren Untersuchungen, die sich mit den Schädigungsmechanismen der Isolierstofffolien beschäftigen. Diese wurden unter Atmosphärendruck durchgeführt und beschreiben sich bezogen auf den Druck-Teilentladungseinsatz-Zusammenhang als Worst-Case-Betrachtung. Überträgt man das druckabhängige Verhalten auf die Untersuchungen, ist davon auszugehen, dass sich das Verhalten und die auftretenden Schädigungsmechanismen der Durchschlagskanal-Untersuchung mit steigendem Umgebungsdruck ebenfalls verbessern. Im Folgenden sind die grundsätzlichen Erkenntnisse kurz zusammengefasst:

- In der Bestimmung der elektrischen Kurzzeit-Durchschlagsfestigkeit polymerer Isolierfolien konnte eine sehr hohe elektrische Festigkeit nachgewiesen werden. Die für das Projekt relevanten Materialien A und B weisen mit die höchsten Festigkeitswerte bekannter Isolierfolien im flüssigen Stickstoff auf.
- Die elektrische Durchschlagsfestigkeit der untersuchten, polymeren Isolierfolien verhielt sich weitestgehend druckunabhängig. Das druckabhängige Verhalten der polymeren Isolierstoffe entsprach der Beschreibung in der Literatur. Während poröse Isolierstoffe (z.B. PPLP) eine Tränkung des Materials mit flüssigem Stickstoff erfahren, der die Hohlräume des Materials füllt und mit seinem druckabhängigen Verhalten die elektrische Festigkeit des Materials verändert, verhalten sich Isolierfolien wie Feststoffe. Der Stickstoff dringt nicht in das Material ein, weshalb die Materialeigenschaften infolge der Druckbeaufschlagung unverändert bleiben.
- Die spezifische, mittlere Teilentladungseinsatzfeldstärke nahm je nach Material prozentual um 5 bis 10 % pro zusätzliche 1 bar Umgebungsdruck zu. Eine signifikante Änderung war für die meisten Messreihen festzustellen.

Wirkung von Oberflächenentladungen

Die Wirkung von Teilentladungen in Form von Oberflächenentladungen auf die elektrische Festigkeit von Isolierstofffolien und die mögliche Degradation der Isolierfähigkeit wurden untersucht. Entsprechend der hohen Festigkeit der Feststoffisolierung war zu vermuten, dass sich auftretende Entladungen als Oberflächenentladungen entlang der Isolierstoffoberfläche ausbreiten. Durch gezielte Erzeugung von Oberflächenentladungen sollten potenzielle Schädigungsmechanismen untersucht und die mögliche Degradation der Isolierfähigkeit ermittelt werden.

In Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch Oberflächenentladungen an einer Elektrode von 3 mm Durchmesser eine gezielte Schädigung der Isolierstoffoberfläche bei einigen polymeren Isolierstoffen im Bereich von 2-7 mm Durchmesser um die Elektrode, erzeugt werden kann. Für den Versuch wurde ein Adapter realisiert, mit dem durch eine Vielzahl von Elektroden an mehreren Punkten auf der Isolierfolie lokal Oberflächenentladungen erzeugt werden können. Der Versuchsaufbau und der Adapter sind schematisch in Abb. 5.4 dargestellt. Detaillierte Erläuterungen zur Versuchsdurchführung finden sich in [11]. Die resultierende Schädigung der Isolierstoffoberfläche ist exemplarisch in Abb. 5.5 gezeigt. Für die Diskussion der materialspezifischen Effekte wird auf die Literatur verwiesen.

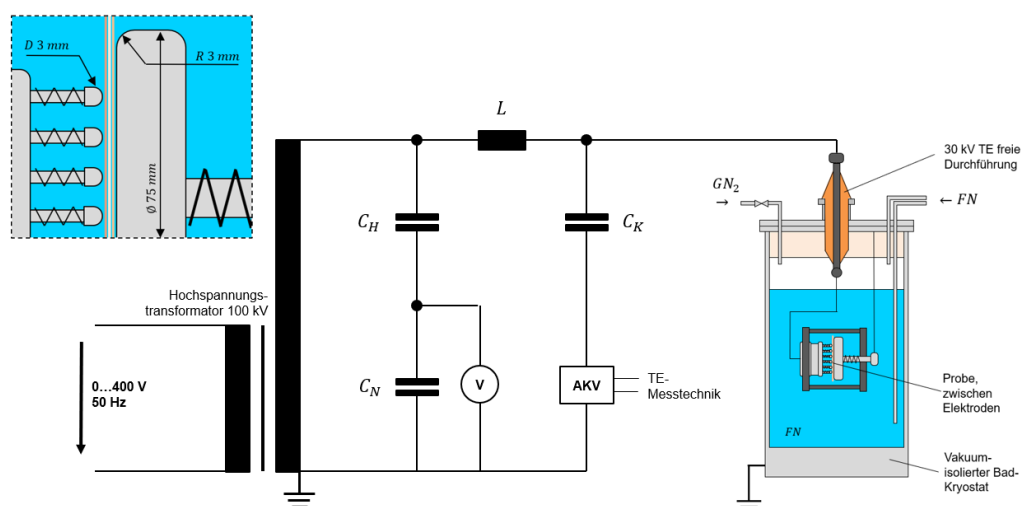


Abb. 5.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Wirkung von Oberflächenentladungen auf polymere Isolierfolien

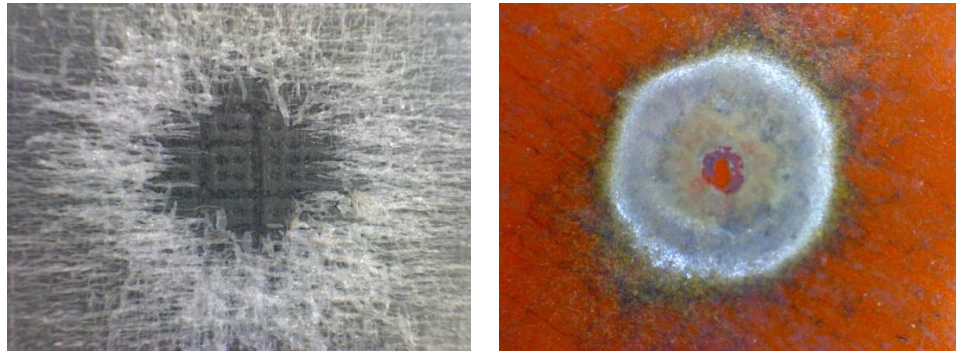


Abb. 5.5: Oberfläche von Cryoflex (B) links, und Kapton (E) rechts, im Bereich der Elektrode nach der Stehspannungsprüfung mit Gleitentladungswirkung

Die Untersuchungen bezüglich des Einflusses von Oberflächenentladungen auf die Isolationsfähigkeit der Isolierfolien zeigten:

- Die Wirkung der Gleitentladungen auf die Materialien konnte optisch festgestellt werden. Bei beiden Materialien resultiert eine erhöhte Oberflächenrauigkeit, vermutlich bedingt durch Entladungsprozesse in den Folien. Dies führt zur Ausprägung von Hohlräumen und Abplatzen der oberen Schichten der Isolierfolien.
- Bei Kapton (E) ist eine starke Reduktion der elektrischen Durchschlagsfeldstärke infolge der Vorbelastung durch Gleitentladungen nachgewiesen. Es zeigte sich, dass eine höhere Feldbelastung einen größeren Einfluss auf die Degradation der Isolierfähigkeit hat, als eine längere Belastungsdauer und dass die elektrische Festigkeit um mehr als 1/3 reduziert werden konnte.
- Die verbleibende Isolationsfähigkeit der vorbelasteten Cryoflex-Folien (B) zeigte dagegen kaum eine Reduzierung gegenüber dem Ausgangsmaterial, was auf die spezifischen thermo-mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu Kapton zurückgeführt wird. Bezogen auf das beschriebene Prüfregime scheint es, dass die Oberflächenentladungen nur geringfügigen Einfluss auf die elektrische Festigkeit des Materials haben.
- Bezüglich des Schädigungsmechanismus ist festzustellen, dass der Ausgangspunkt der Schädigung im Material selbst zu verorten ist, und sich durch lokale Schwachstellen oder Fehlstellen beschreibt. Eine direkte oberflächliche, erosive Wirkung der Entladungen kann nicht ausgeschlossen werden, auch eine kombinierte Schädigung ist denkbar. Bezogen auf das Schadensbild, die starke Hohlraumbildung bei Cryoflex, sowie die Treeing-Strukturen im Material bei Kapton, ist davon auszugehen, dass die Prozesse im Material einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Isolationsvermögen haben.

Die Oberflächenentladungen führten zu einer massiven Schädigung der Materialoberflächen. Dies führte wiederum dazu, dass die Isolationsfähigkeit teilweise stark reduziert wurde. Allerdings ist anzumerken, dass die Entladungen in diesem Versuchsregime auf hohe elektrische Feldstärken und die fehlende thermische Stabilität der Isolierung zurückzuführen waren.

Entwicklung des Durchschlagskanals in Kryo-Kabelisolierungen

HTS-Kabel sind im Allgemeinen aus gewickelten Isolierbändern oder -folien gefertigt, ähnlich wie Öl-Papier-Kabel, und mit flüssigem Stickstoff (LN) imprägniert (vgl. Abb. 5.1). Dies definiert sie als ein Verbundisolationssystem. Teilentladungen in diesem System können die Isolierung schädigen und letztlich zum vollständigen Versagen führen. Um die Auswirkungen von Teilentladungen auf die Isolierung von HTS-Kabeln zu untersuchen, wurde ein künstlicher Defekt in eine koaxiale, zylindrische Kabelprobe eingefügt (vgl. Abb. 5.6). Dieser künstliche Defekt ermöglicht die reproduzierbare Erzeugung von Teilentladungen im Verbundsystem einer Kabelisolierung. Ziel der Untersuchung war es, das Ausfallverhalten und die Entwicklung des Durchschlagkanals in einer Kryo-Verbundisolierung zu verstehen und die Wirkung der TE auf die Isolierung zu bestimmen. Die detaillierte Beschreibung von Versuchsaufbau und -durchführung ist [12].

Die Untersuchungen zur Durchschlagskanalentwicklung zeigen unterschiedliche Entladungsmechanismen die zur Kanalentwicklung durch die Isolierung beitragen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass ohne das Auftreten energieintensiver TE keine Materialveränderung der Isolierung festgestellt werden konnte und die chemische und physikalische Schädigung direkt auf die Teilentladungswirkung zurückzuführen ist. Trotz vorhandener künstlicher Fehlstelle in der Isolierung liegt die TE-Einsatzfeldstärke oberhalb der nominellen Betriebsnennfeldstärke. (Versuchsdurchführung als Worst-Case Betrachtung). Der nominelle Betriebsdruck und die Betriebstemperatur des Kabels verbessern die Eigenschaften entsprechend.

Die Untersuchungen zur Durchschlagkanalentwicklung zeigen unterschiedliche Entladungsmechanismen die zur Kanalentwicklung durch die Isolierung beitragen. Dabei sind insbesondere die flüssigkeitsgefüllten Hohlräume der Isolierung an der Ausbreitung der Entladungen beteiligt. Gezeigt werden kann dies an den Materialveränderungen des Isolierstoffs im Bereich der Hohlräume in der Isolierung (Abb. 5.7). Dabei führen die anhaltenden TE zur chemischen und physikalischen Schädigung der Feststoffisolierung. Diese Alterungsmechanismen führen wiederum zu lokalen, irreversiblen Veränderungen der Isolierung und schließlich zum elektrischen Ausfall des Isoliersystems. Die Schädigung durch TE in polymeren Wickel-Kabelisolierungen ist exemplarisch in Abb. 5.6 gezeigt.



Abb. 5.6: Durchschlagskanal durch die Isolierung. Es zeigt sich eine intensive Verfärbung und Tracking ausgehend von der eingebrachten Fehlstelle

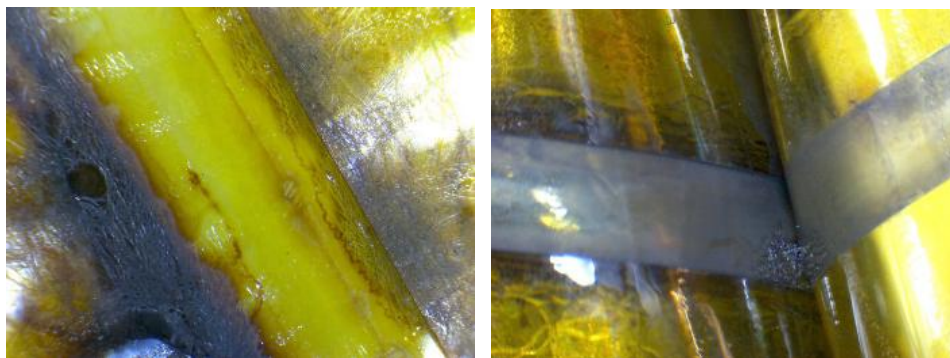


Abb. 5.7: Barriere Wirkung des Gap-Bereich (links) und Gap-Bereich als maßgeblicher Ausbreitungsbereich der Entladungen (rechts)

Die Entwicklung des Durchschlagskanals lässt sich folgendermaßen kurz zusammenfassen:

- Ausgehend vom künstlichen Defekt breiten sich optisch deutlich sichtbare, verästelte Entladungskanäle als Oberflächentracking aus. Die Entladungskanäle breiten sich aufgrund von Durchschlägen der Isolierfolien an mehreren Stellen, sowie im Bereich der Gaps weiter aus. Die einzelnen Durchschlagsstellen der Folien sind ihrerseits Ausgangspunkt der Erosionsprozesse an den tieferen Isolierfoliensichten. Die ausgeprägten, verzweigten Strukturen der Trackingkanäle nehmen in Häufigkeit und Intensität im Bereich der inneren Isolierstoffschichten stark ab.
- Im Bereich des Trackingkanäle ist eine teilweise starke braun-schwarze Verfärbung des Materials zu beobachten. Die Verfärbung folgt den fein verzweigten Trackingkanälen in der Nähe des eingebrachten Defekts. Mit abnehmender Anzahl der Isolierbandlagen von der Fehlstelle

nimmt die räumliche Ausdehnung und die Farbintensität zu. Die Materialveränderung ist nicht auf die vorhandenen Trackingkanäle beschränkt, sondern breitet sich über die gesamte Fläche aus. Während die Verfärbung zunächst vor allem im Bereich zwischen den Isolierbandlagen zu finden war, tritt die dunkle Färbung nah am Leiter verstärkt in den Gaps der Wickelisolierung auf.

- In der Nähe der eingebrachten Fehlstelle treten die Trackingeffekte und die Verfärbung der Oberfläche fast ausschließlich in dem Bereich zwischen den Isolierbandlagen auf. Die Gaps zwischen den Isolierbändern wirken Barriere-artig für die beschriebenen Prozesse. Nah am Leiter finden die Schädigungseffekte vorrangig im Bereich der Gaps statt, gut zu sehen an der starken dunklen Verfärbung, die sich helix-förmig mit dem Schlag der Wickelisolierung im Bereich der Gaps ausbreitet. Die unterschiedliche Wirkung von Teilentladungen in den Gaps lässt eine Änderung der elektrischen Eigenschaften vermuten, was mit dem möglichen Phasenübergang des flüssigen Stickstoffs infolge der lokalen, energiereichen Entladungen zusammenhängen kann.

Die beschriebenen Schädigungsmechanismen sind auf die anhaltende Wirkung von TE zurückzuführen. Transiente Spannungserhöhungen sind aufgrund der Teilreversibilität der Isolierung weniger schädlich, da der Phasenübergang des LN eine hohe elektrische Wiederverfestigung bewirkt. Gleichzeitig stellen auftretende TE in der Isolierung einen kritischen Betriebszustand dar. Kommt es zu anhaltenden TE bewirkt der lokale thermische Eintrag die Verdampfung des LN mit einhergehender Reduzierung der elektrischen Festigkeit. Dies verhindert das Wiederverlöschen der TE, was sich in einer stark verringerten TE-Aussetzspannung zeigt. Entsprechend der Festigkeitsreduktion entwickelt sich der Durchschlagskanal in relativ kurzer Zeit durch die Isolierung und führt zum Ausfall des Betriebsmittels. [Die Aufrechterhaltung der Flüssigphase ist evident für den Betrieb des Kabels.](#)

2.3.3 Monitoring

Basierend auf der Schädigungswirkung von TE in kryogenen-Schichtisolierungen stellt die frühzeitige Detektierbarkeit potentieller Schädigungen einen wichtigen Aspekt des sicheren Betriebs dar, um den ungeplanten Ausfall des Betriebsmittels zu verhindern.

Die Teilentladungsdetektion ist eine der wesentlichen Prüf- und Diagnosemethoden. Sowohl die ladungsbasierte Teilentladungsmessung nach IEC 60270, als auch unkonventionelle Verfahren wie die Teilentladungsmessung mit Ultrahochfrequenz (UHF)-Sensoren haben ihre Zuverlässigkeit bereits unter Beweis gestellt und werden in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt. Es ist bekannt, dass die „Phase Resolved Partial Discharge“ (PRPD)-Pattern der ladungsbasierten Messung und der UHF-Messung gleichwertige Ergebnisse liefern. Der aktuelle Stand der Forschung beschäftigt sich jedoch hauptsächlich mit dem Vergleich der beiden Methoden für verschiedene Isoliertgas (Luft, SF₆, N₂) oder Isoliertöle. Für den Anwendungsfall von flüssigem Stickstoff (LN), wie zum Beispiel bei supraleitenden Energieversorgungskabeln, gibt es vergleichsweise wenig Untersuchungen. In den Untersuchungen sollte daher die ladungsbasierte TE-Messung mit der UHF-TE-Messung verglichen werden. Für die Messungen wurden die künstlichen Fehlstellen einer Spitze-Platte-Anordnung und einer Gleitanordnungen verwendet, die unter Atmosphärenbedingungen und in Flüssigstickstoffumgebung genutzt wurden, um gezielt Teilentladungen zu erzeugen.

Die Versuchsdurchführung und der Versuchsaufbau ist in [11] beschrieben und die Ergebnisse bewertet und diskutiert. Im Folgenden sind die Ergebnisse kurz zusammengefasst.

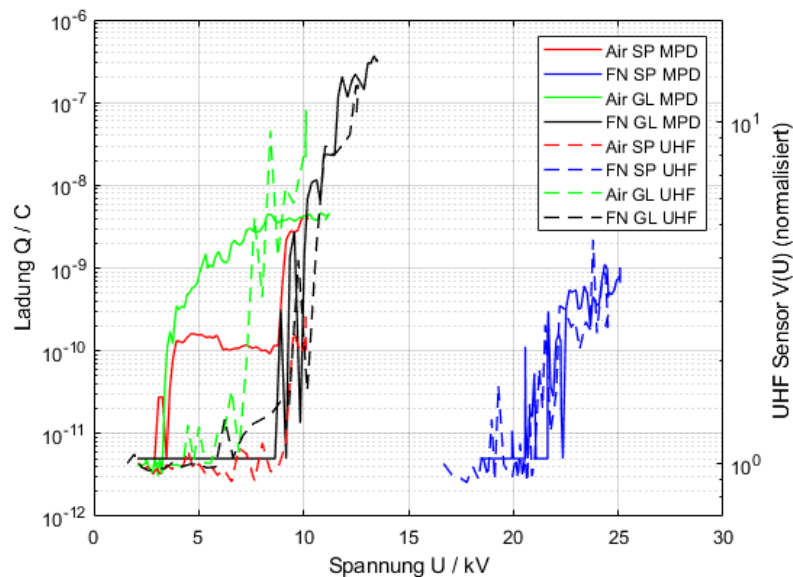


Abb. 5.8: Q(U)-Verhalten der konventionellen Messung und das V(U)-Verhalten der UHF-Messung der Spitze-Platte- und der Gleitentladungsanordnung in Luft und flüssigem Stickstoff

Das V(U)-Diagramm des UHF-Sensors korreliert weitestgehend mit dem Q(U)-Verhalten der konventionellen Messung, insbesondere für LN. Es zeigt sich ein ähnliches Verhalten hinsichtlich der Spannungsbelastung an der Fehlstelle und der Amplitude des Messsignals für die untersuchten Fehlstellen und Umgebungsmedien. Dies ist Abb. 5.8 dargestellt.

In den Untersuchungen wurde anhand einer Spitze-Platte- und einer Gleitanordnungsfehlstelle unter Atmosphärenbedingungen und im flüssigen Stickstoff die konventionelle Teilentladungsmesstechnik auf Basis eines MPD 600 von Omicron mit der unkonventionellen Teilentladungsmesstechnik mittels UHF-Sensoren betrachtet. Die Teilentladungserfassung und Detektionsfähigkeit wird anhand der verschiedenen Umgebungsmedien und Fehlstellen charakterisiert und miteinander verglichen.

- Es konnte gezeigt werden, dass die UHF-Sensoren direkt in den verschiedenen Medien eingesetzt werden können. Der Einsatz im LN bewirkte zwar die mechanische Schädigung der äußeren Epoxid-Hülle des Sensors. Die Funktionalität wurde dadurch jedoch nicht beeinflusst.
- Grundsätzlich sind die charakteristischen TE-Entladungen für die verschiedenen Fehlstellen und Umgebungsmedien mit beiden Messsystemen detektierbar. Unter Atmosphärenbedingungen zeigte sich für die UHF-Sensoren im Vergleich zur leitungsgebundenen TE-Messung eine Abweichung bezüglich der TE-Bestimmung bei niedrigeren Spannungsniveaus. Die Messung mit dem MPD zeigte hier eine höhere Sensitivität.
- Die Übereinstimmung der TE-Detektion mit dem UHF-Sensor war im LN sensibler als in Luft, was auf die Entladungsenergie und die Eigenschaften des Umgebungsmediums zurückgeführt wird. Dies gilt trotz deutlich reduzierter Entladungshäufigkeit in der Isolierflüssigkeit.

Die Untersuchungen zeigten die Einsatzfähigkeit von UHF-Sensorik als Alternative zur konventionellen TE-Messtechnik im LN. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich um Untersuchungen unter Laborbedingungen handelt. Der höhere Grundstörspegel in der praktischen Anwendung durch angeschlossene Peripherie wie die Kältemaschinen, die leitungsgebundene Störsignale in das System bringen, ist zu berücksichtigen und die Einsatzfähigkeiten der Messsysteme für den praktischen Einsatz spezifisch zu prüfen.

2.3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Folgenden sind die grundsätzlichen Erkenntnisse der Untersuchungen kurz zusammengefasst:

- Die Durchschlagsuntersuchungen einlagiger Isolierfolien zeigten eine sehr hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit von $> 100 \text{ kV/mm}$. Das Material Cryoflex, welches im Projekt für die Kabelisolierung zum Einsatz kommt, zeichnete sich durch besonders hohe Durchschlagsfestigkeiten von $> 165 \text{ kV/mm}$ aus. Das druckunabhängige Verhalten von polymeren Isolierfolien wurde bestätigt. Gleichzeitig konnte die Druckabhängigkeit auftretender Teilentladungen gezeigt werden.
- Die Wirkung von Oberflächenentladungen ist stark materialabhängig. Die Wirkung von Teilentladungen führt zu einer physischen Schädigung des Materials. Die Materialeigenschaften und die Wechselwirkung mit dem Umgebungsmedium beschreiben die Isolationsfähigkeit infolge der Oberflächenentladungen. Trotz massiver physischer Schädigung konnte für Cryoflex keine signifikante Reduktion der Isolationsfähigkeit im Prüfregime nachgewiesen werden.
- Die Untersuchungen an einer Modell-Kabel-Geometrie zeigen, dass das Auftreten von TE in der Isolierung unter normalen Betriebsbedingungen unwahrscheinlich ist. In den Untersuchungen wurde eine massive Fehlstelle in die Isolierung eingebracht und die Feldstärkebelastung auf ein Vielfaches der Nominalfeldstärke erhöht, um TE in der Isolierung zu generieren. Die Untersuchungen sind an der Grenze der Siedekennlinie durchgeführt (77 K , $1 \text{ bar}_{\text{abs}}$) worden. Dies ist bezüglich des Auftretens von TE als Worst-Case-Betrachtung anzusehen. Das TE-Einsatzverhalten verbessert sich den Druckuntersuchungen zufolge für die nominellen Kabel-Betriebsbedingungen, da dort ein höherer Druck herrscht.
- Die Entwicklung des Durchschlagskanals durch eine polymere Wickelisolierung ausgehend von einer künstlichen Fehlstelle mit geringer Restisolierdicke in eine Kabelprobe wurde untersucht. Entsprechend dem Schädigungsbild und des Entladungsverhaltens konnte die zeitliche Entwicklung des Entladungsmechanismus, abhängig vom Fortschreiten des Durchschlagkanals, ermittelt werden. Der Kanal entwickelte sich ausgehend von der Fehlstelle zunächst zwischen den Isolierstofflagen, während das größere Stickstoffvolumen in den Gaps als Barriere für die Schädigungsmechanismen wirkte. Der Wärmeeintrag in die Isolierung und der Phasenübergang bewirkte den Übergang der Entladungslokalität in die Gaps und die zunehmende Ausbreitung energiereicher Entladungen, die schließlich zum elektrischen Ausfall des Isoliersystems führten.
- Die beschriebenen Schädigungsmechanismen an der künstlichen Fehlstelle waren auf die anhaltende Wirkung von TE zurückzuführen. Schädigungsmechanismen ohne messbare TE waren nicht festzustellen. Entsprechend stellen auftretende TE in der Isolierung einen kritischen Betriebszustand dar. Kommt es zu länger anhaltenden TE bewirkt der lokale thermische Eintrag die Verdampfung des LN mit einhergehender Reduzierung der elektrischen Festigkeit. Dies verhindert das Wiederverlöschen der TE, was sich in einer stark verringerten TE-Aussetzspannung zeigt. Entsprechend der Festigkeitsreduktion entwickelt sich dann der Durchschlagskanal in relativ kurzer Zeit durch die Isolierung und führt zum Ausfall des Betriebsmittels. Die Aufrechterhaltung der Flüssigphase ist zwingend notwendig für den einwandfreien Betrieb der Kabelanlage.
- Die Möglichkeiten des TE-Monitorings wurde anhand konventioneller TE-Messtechnik mittels MPD 600 von Omicron und UHF-Messtechnik getestet. Dabei wurden die UHF-Sensoren in den LN eingelassen, um die Einsatzfähigkeit zu testen. Die Funktionalität wurde durch den Temperaturbereich nicht beeinflusst. Grundsätzlich zeigt die UHF-Messung eine gute Übereinstimmung mit der TE-Detektion des konventionellen Messsystems MPD und stellt potentiell eine Alternative zur lokalen TE-Überwachung dar. Die Untersuchungen wurden unter Laborbedingungen durchgeführt, weshalb der Einsatz unter praktischen Bedingungen separat zu prüfen ist.

F.6 NKT

AP2 Entwicklung und Auslegung des HTS-Kabels

AP2.2 Numerische thermo-hydraulische Simulation

Für die Erreichung größer HTS-Kabellängen mit wenigen Kühlstationen spielen Wärmeeintrag und Wärmeentwicklung im Kabel eine zentrale Rolle. Für letztere sind die Wechselstrom (AC)-Verluste in den Lagen (Former, Phase, Schirm) des Kabels verantwortlich. Erkenntnisse aus früheren Projekten zeigen eine sehr starke Abhängigkeit von AC-Verlusten zur dichten Belegung der HTS-Lagen und dem Abstand (Gaps) zwischen den einzelnen HTS-Bandleitern. Liegen diese dicht beieinander, wirken sie wie eine durchgängige Abschirmung für die begleitenden Magnetfelder. Bleiben Lücken zwischen den HTS-Leitern greifen Magnetfeldlinien durch diese hindurch und verursachen aufgrund der Feldüberhöhung an den Kanten und auch im Kabelkern starke AC-Verluste.

Zur Simulation dieser Effekte wurden fortschrittliche Modellierungsmethoden eingesetzt und ein optimierter Kabelkern mit geringen Wechselstromverlusten entwickelt. Als Ergebnisse der Simulation sind in Abhängigkeit der Gap-Breiten in Abb. 6.1 die Beiträge der verschiedenen Kabellagen (links) und die Temperaturabhängigkeit (rechts) der AC-Verluste im Kabelkern dargestellt (beides für maximalen Strombelag). Durch dichte Packung der HTS-Leiter konnten sehr geringe Verluste von $<0,8 \text{ W/m}/\Phi$ @ 77 K und unter $0,4 \text{ W/m}/\Phi$ @ 74 K erreicht werden. Diese geringen Verlustwerte konnten experimentell bei Versuchen im Labormaßstab bestätigt werden (vgl. Abb. 6.2).

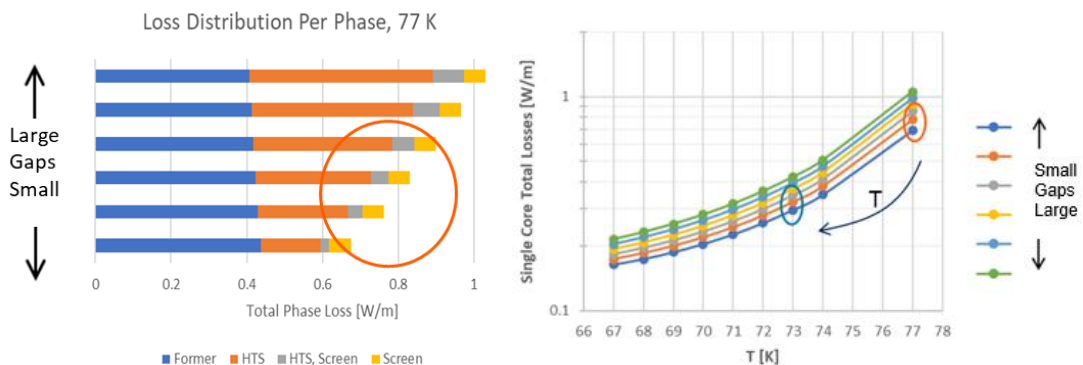


Abb. 6.1: Simulation der Wechselstromverluste in den Kabelkomponenten in Abhängigkeit der Lücken zwischen den Phasendrähten (links) und als Funktion der Temperatur (rechts).

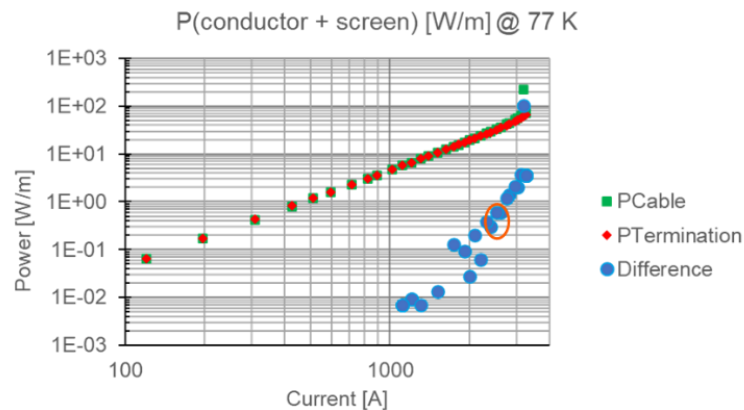


Abb. 6.2: Gemessenen Verlustleistung an 3 m Kabelprobe bestimmt aus der Differenz der gemessenen Gesamtverluste und der Verluste an den Endverschlüssen, die bei kurzen Kabelstücken dominierend sind.

Die Spezifikationen eines kommerziellen Kühlsystems wurden gemeinsam von NKT und Linde erarbeitet. Um den erforderlichen Kühlmittelstrom und den entsprechenden Druckabfall zu bestimmen, wurden fortschrittliche Modellierungsmethoden eingesetzt. Dazu gehörte die Analyse der turbulenten Strömung in den Lücken zwischen der gewellten Oberfläche des Kryostaten und der glatten Oberfläche des Kabelbündels (Abb. 6.3).

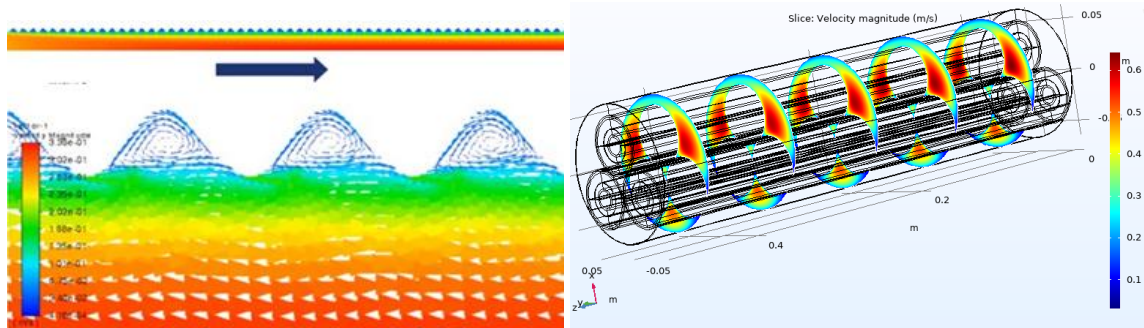


Abb. 6.3: Links: Fluidodynamisches Modell der Strömung von flüssigem Stickstoff in einem Spalt zwischen zwei verschiedenen Oberflächen. Rechts: Strömungsgeschwindigkeits-Vektorfeld in einem Kabelabschnitt

Kompakte und effiziente Wärmedämmtechnologie

Um die thermische Isolierung an das Kabeldesign anzupassen und die Performance bestehender Lösungen zu übertreffen, übersetzte NKT zunächst die grundlegenden physikalischen Mechanismen in ein Engineering-Modell. Dieses ermöglichte es, die verschiedenen Faktoren des Wärmeeintrag in das Kabelsystem zu quantifizieren und optimale Parameter abzuleiten.

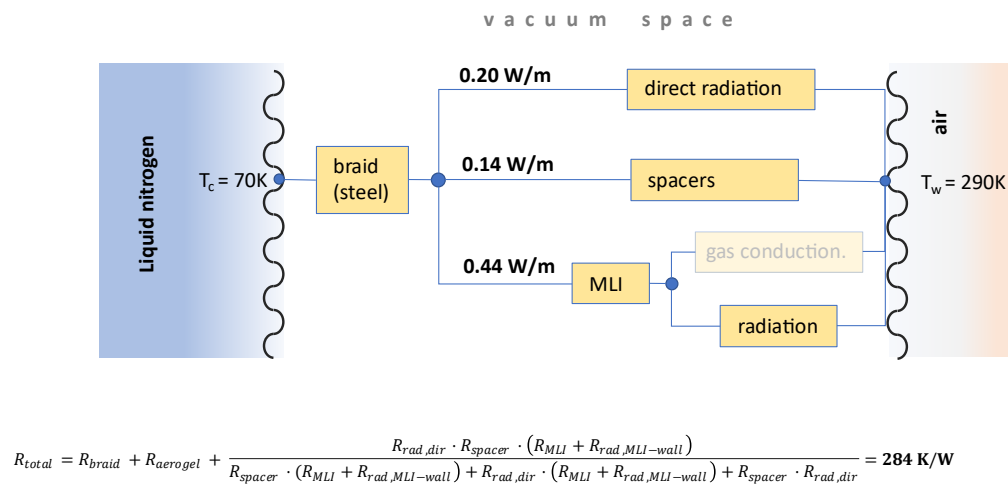


Abb. 6.4: Schema des Engineering-Modells zur Berechnung der thermischen Verluste im Kryostaten mit typischen Werten.

Die Erkenntnisse dieses Modells wurden in einem 12 m-Prototypen unter verschiedenen Bedingungen über die Verdampfungsrate von LN im Kryostat experimentell getestet. Das „Best-Case-Szenario“ liefert einen Wärmeeintrag von 0.8 W/m (vgl. Abb 6.5) für die angestrebten Dimensionen des Systems.

Daneben wurde auch ein deutlich realistischeres Szenario (mit Kabelgewicht im Innenrohr, 3 m-Biegeradius, verschlechterten Vakuumbedingungen) überprüft (vgl. Abb 6.6). In diesem Fall lag der Wärmeeintrag bei 1.0 W/m, was nur geringfügig höher war, als unter Idealbedingungen. Insgesamt ergaben die Messungen eine Halbierung der Verluste im Vergleich zum aktuellen, kommerziellen Industrie-Standard. Die Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass es Bau des Kryostaten noch deutlichen Verbesserungsspielraum gibt und es sich lohnt, an der Optimierung zu arbeiten.

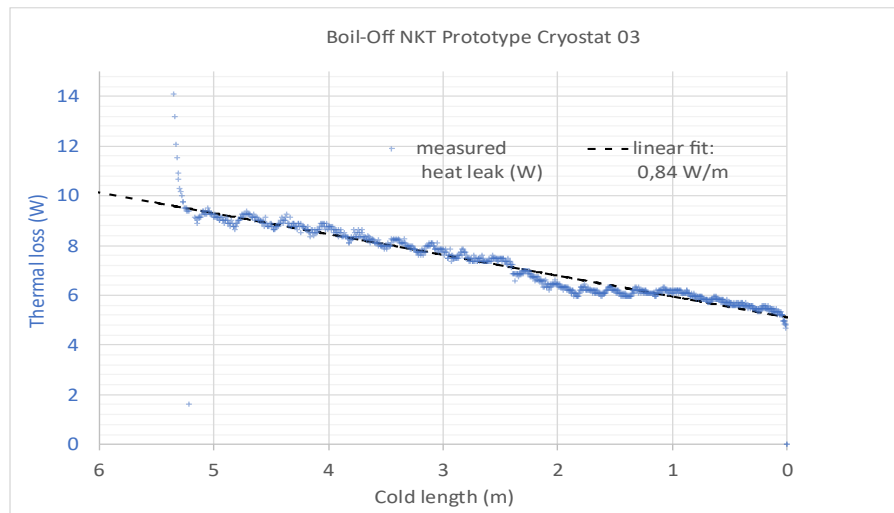


Abb 6.5: Messung des Wärmeeintrags in den Kabel-Kryostaten unter Idealbedingungen. Durch die LN-Verdampfungsverluste kann der Wärmeeintrag pro Meter präzise bestimmt werden.

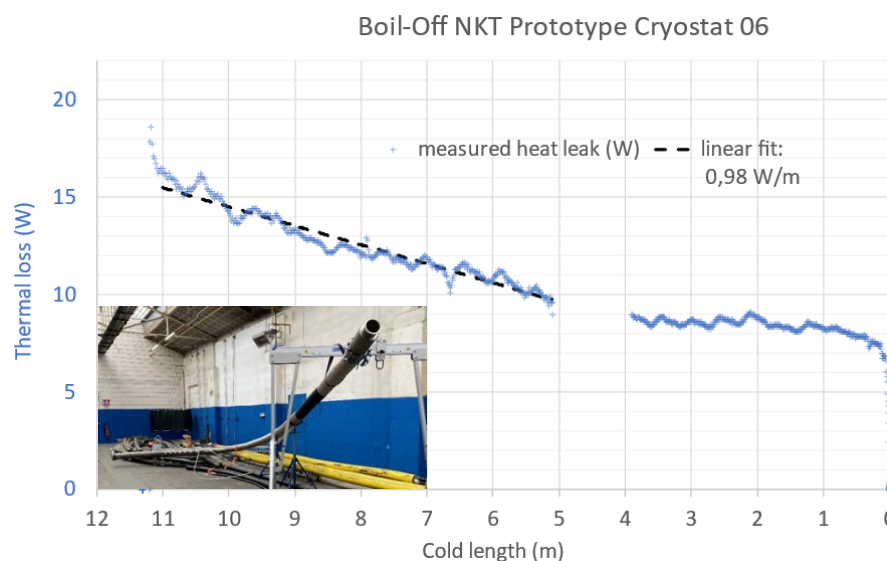


Abb 6.6: Messungen des Wärmeeintrags in den Kabel-Kryostaten unter Realbedingungen (Kabelgewicht, Biegung, schlechte Vakuumqualität). Die Unterbrechung der Messwerte ist auf Software-Problem des Messsystems zurückzuführen.

AP2.5 Auslegung des HTS-Kabelsystems

Kontraktionsfreies Kabeldesign

Bisherige Supraleiter-Kabel mussten an den Endverschlüssen oder innerhalb der Route Extralängen vorsehen, um die unausweichliche thermische Kontraktion des Kabels beim Abkühlen (ca. -0,3%) auszugleichen. Um dieses Problem zu adressieren, konzipierte und validierte NKT im Rahmen des Projekts ein innovative Kabelkonzept, das erstmalig in der Längsrichtung keine Kontraktion mehr aufweist. Die Idee basiert auf der Kompensation der Längsdehnung durch die radiale Ausdehnung (bzw. Schrumpfung). Da beim Abkühlen die Materialien im Kabel gleichermaßen in alle Richtungen schrumpfen und der Durchmesser des Formers kleiner wird, verringert sich Umfang. Werden alle Materialien als Helix um den Kern gewickelt, wird durch diese radiale Schrumpfung Material frei, das zur Kompensation der Längenschrumpfung dienen kann. Abb. 6.7 zeigt ein Schema der Kabelkontraktion zwischen Raumtemperatur (links) und bei 77 K (rechts). Basierend auf den unterschiedlichen Kontraktionseigenschaften der Kabelkomponenten hat NKT dieses Konzept zum Patent angemeldet (Patente US12051524B2, EP4064298A1). Messungen an kurzen Proben zeigten, dass das Konzept sehr gut funktioniert.

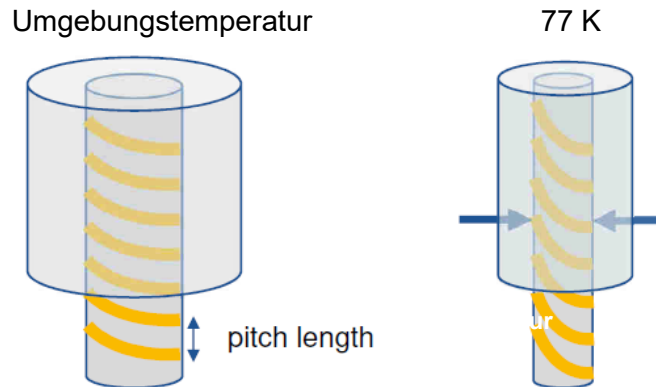


Abb. 6.7: Schematische Darstellung eines Kabelkerns zum Nachweis der radialen Kontraktion bei 77 K

Beim 150 m langen Demo-Kabel sollte der Kupferleiter nach dem Abkühlen eine Kontraktion von ca. 40 cm aufweisen, wenn keine der o.g. längenausgleichenden Maßnahmen für das Kabel verwendet würden. Beim Abkühlvorgang trat tatsächlich nur eine minimale Kontraktion von 2 cm auf jeder Seite auf, ohne Komponenten durch übermäßige mechanische Spannung zu beschädigen (Abb. 6.8). Somit kann bei zukünftigen Kabelstrecken auf längenkompensierende Maßnahmen verzichtet werden, was den Fußabdruck im Vergleich zu bisherigen Systemen deutlich reduziert.

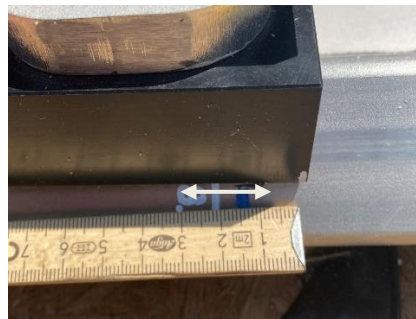


Abb. 6.8: Reduzierte Längskontraktion von 2 cm beim 150 m langen Demo-Kabel

Effiziente druckverstärkende Verbindung zur Zwischenkühlung

Da bei langen Kabelstrecken mehrere Kühlkreisläufe nötig sein werden, benötigt ein Kabelsystem druckverstärkende Muffen („ Δp -Muffe“), um das Kühlmittel auszuleiten, erneut zu kühlen und mit höherem Druck wieder einzuspeisen. Die einphasige Version der Δp -Muffe war im Qualifikationstest im DTU-Labor funktionsfähig und zeigte die gewünschte Druckdifferenz (Abb. 6.9).

Leider erwies sich die im Demo-System installierte Muffe als undicht. Die Ursache wurde in einer fehlerhaften Installation gesehen. Geplant ist deshalb zukünftig, die Schottkonstruktion in einem Prüfstand vorab zu testen und zudem das Installationskonzept zu optimieren, um zukünftige Montagen weniger fehleranfällig zu gestalten.



Abb. 6.9: Dichtigkeitstest der Delta-P-Muffe mit drei Kabelkernen

Kompakte Endverschlüsse und Verbindungen für begrenzte Platzverhältnisse in städtischen Umspannwerken

Das Design der Endverschlüsse verlief in mehreren Iterationsschritten, um den begrenzten Platzverhältnissen unter späteren, urbanen Bedingungen zu begegnen. Den Typtest bestanden die Endverschlüsse erfolgreich. Sechs dieser sogenannten T5 Endverschlüsse wurden im Demo-Test in Menzing verbaut; eine Erfolgsquote von 100% bei der Prüfung der Spannungsfestigkeit hat gezeigt, dass das elektrische und thermische Design der Endverschlüsse bereit ist für den Routineeinsatz.



Abb. 6.10: Die in Menzing installierten kompakten T5 Endverschlüsse.

AP2.6 Wirtschaftlichkeitsanalyse

NKT stützt die Wirtschaftlichkeitsprognose für das 110 kV-SuperLink HTS-Kabelsystem auf den in Abb. 6.11 gezeigten Vergleich der Energieverluste für unterschiedliche Belastungsszenarien in konventioneller und HTS-Bauart. Für das HTS-Kabelsystem wurden die folgenden Zielvorgaben angenommen:

- Wechselstromverluste von 0,2 W/m/Φ bei 100 % Last in jedem Leiter;
- Wechselstromverluste von 0,2 W/m/ Φ in jeder Abschirmung;
- 1,0 W/m Wärmeverlust im Kabel-Kryostat;
- 1,0 W/m in Rücklauf-Kryostat;
- 15 W/W Kühlerverlust (Carnot-Zahl 3,1, Maschinenwirkungsgrad 20 %). Dies entspricht Werten zwischen denen in Tab. 3.1 und Tab. 3.2.

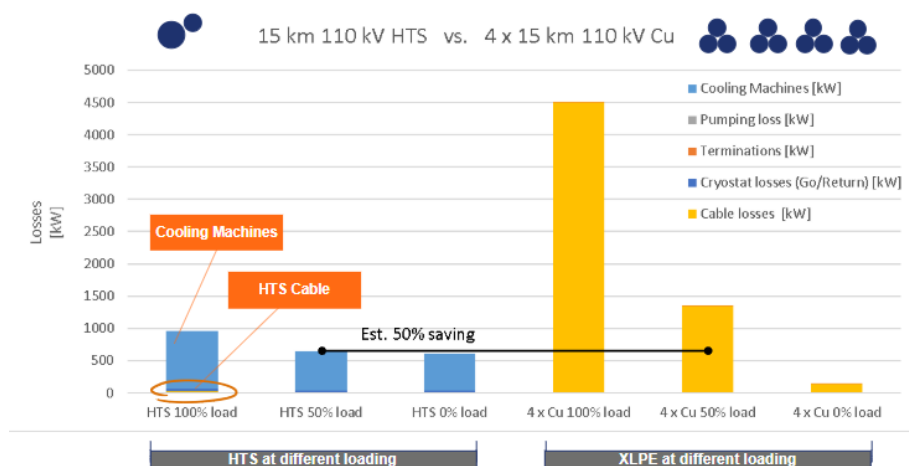


Abb. 6.11: Vergleich der Energieverlust-Bilanzen für ein 15 km SuperLink HTS Kabel und vier parallele XLPE Kabel-Systeme mit vergleichbarer Übertragungsleistung.

Die bemerkenswerte Leistung besteht darin, dass alle diese Zielwerte in diesem Projekt sowohl in Simulationen als auch in Tests unter realen Bedingungen erreicht oder übertroffen wurden.

Im Vergleich dazu sind die Leistungswerte für die herkömmliche Alternative aus Kupferkabeln für 4 × 110 kV XLPE wie folgt:

- Kabelquerschnitte 4 × 3 × 500 mm² Kupfer;
- 49 mΩ/km/Φ bei 100 % Nennleistung.

Bei einer durchschnittlichen Auslastung von 50 % nehmen die ohm'schen Verluste in den Cu-Kabeln quadratisch um den Faktor 4 ab, liegen damit aber immer noch doppelt so hoch wie im HTS-Kabelsystem. D.h. das HTS-Kabel spart in diesem Fall etwa 50 % der Energieverluste. Bei höheren Auslastungsfaktoren beträgt die Energieeinsparung bis zu 79 %.

Dies zeigt, dass die SuperLink-Technologie nicht nur ein Überlastungsproblem lösen und die Leistung des Stromnetzes in München verbessern kann, sondern auch zu geringeren Verlusten in hochbelasteten Netzen beitragen kann.

AP4 Konformitätstests und Testfertigung

AP4.1 & 4.3 Herstellung der HTS-Komponenten

Im Zuge des Projekts wurde die in Köln befindliche Kabelproduktionsanlage mit zusätzlichen Komponenten optimiert, um die für das Projekt erforderliche Isolationsdicke zu erreichen. Hierzu wurden unter anderem die vorhandenen zwei Papierkörbe um vier zusätzliche individuell angetriebene Köpfe erweitert (siehe Abb. 6.12).



Abb. 6.12: Einbringung der vier zusätzlichen Papierköpfe in die vorhandene HTS-Kabelproduktionsanlage

Die Elektrifizierung der zusätzlich eingebrachten Komponenten erwies sich dabei aufgrund der durch die Pandemie ausgelösten Lieferengpässe von elektronischen Maschinenkomponenten als äußerst herausfordernd und führte zu einer deutlichen Verzögerung innerhalb des Projekts. Die hausinterne Software ermöglicht eine individuelle Einrichtung und Steuerung von z.B. Steigungen, Rampen und Liniengeschwindigkeit. Mit diesen Entwicklungen war es möglich, im November 2021 das 25 m lange für ein Retrofit designte Pilotkabel herzustellen. Als Former diente bei diesem Kabel ein 15 mm starker Aluminium-Herzdraht. Das Kabel wurde anschließend zum Testfeld nach Kopenhagen versendet, um dort im Pilottestfeld eingezogen zu werden.

Die Fertigung des 75 m Qualifikationskabel erfolgte im März 2022. Hierbei wurde im Gegensatz zum Pilotkabel ein selbst-kompensierender Former als Basis eingesetzt, der aus NKT-interner Fertigung beigestellt wurde. Sowohl die Verseilung der HTS-Phasendrähte als auch die Aufbringung der Cryoflex™ Isolationslagen erfolgte ohne größere Probleme. Die Verseilqualität der HTS-Drähte erwies sich als zufriedenstellend dank gleichmäßiger Verteilung der Phasen- und Schirmdrähte (siehe Abb. 6.13).

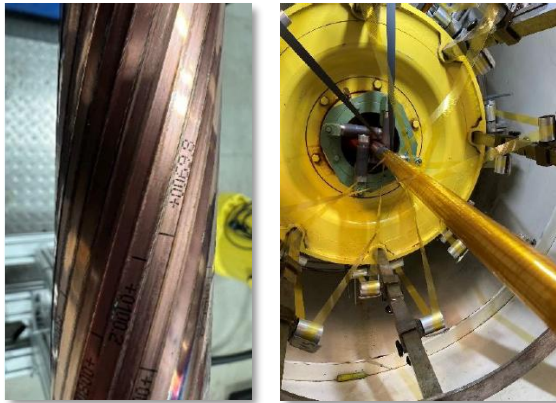


Abb. 6.13: Verseilung der HTS-Phasendrähte und Aufbringung der Cryoflex™ Isolation.

Nach erfolgreicher Qualifikation startete im November 2023 die finale Produktionskampagne für das in Menzing getestete Demokabel. Dabei wurden im Vorfeld diverse Optimierungen an der Produktionsanlage und den Prozessschritten durchgeführt, die vor allem das Risiko einer Degradation der HTS-Drähte während der Verseilung erfolgreich adressierten. Die Produktion erfolgte in dabei in vier Schritten:

- Schritt 1: HTS-Phasenleiter and 110 kV Isolation
- Schritt 2: HTS Neutraler Schirm und erste Lage Kupferschirm
- Schritt 3: Zweite Lage Kupferschirm, Isolierung und Mantel
- Schritt 4: Zurückspulen und Hinzufügen von Schutzpapier für den Transport

Insgesamt wurden ca. 565 m Kabel produziert anschließend auf die jeweilige Phasenlänge geschnitten und für den Transport auf eine 3-Kammertrommel verbracht (vgl. Abb. 6.14). Die gesamte Menge an eingesetztem HTS-Draht belief sich hierbei auf 19 km Phasendraht und 15 km Schirmdraht. Die Produktion lief dabei dank guter Vorbereitung und Unterstützung von THEVA im Vorfeld ohne größere Probleme. Während der Verseilung auch über die größere Länge zeigten sich keine Aufkorbungen am Leiter. Der Transport der Liefertrommel nach München zum HUW Menzing erfolgte Anfang Dezember 2023.

Insgesamt zeigten die Produktionskampagnen, dass im Rahmen des Entwicklungsprojekts das technische und organisatorische Know-How aufgebaut werden konnte, um kommerzielle Längen zuverlässig zu fertigen.



Abb. 6.14: Links: 565 m Kabelkern auf Maschinentrommel. Rechts. Auf korrekte Länge geschnittene Kabelkerne auf 3-Kammertrommel

AP4.2 Vortests der Komponenten

Die geprüften Werte, Spannungen und Dauern der Qualifikationsprüfung entsprachen der IEC 63075. Die Prüfreihefolge wurde in der Entwicklungsphase an die Projektanforderungen angepasst.

Das System bestand die Wechsellspannungsfestigkeit 160 kV für 30 min und die Impulsfestigkeit $10 \times \pm 550$ kV, ergänzt durch eine 96 kV-TE-Prüfung vor und nach den Hochspannungsprüfungen.

Das geprüfte System war einphasig und verfügte über zwei Endverschlüsse, zwei Splitterboxen, eine Kombination der elektrischen- und der ΔP -Muffe sowie vier Abschnitte mit je sechs Metern Kabel (skizziert in Abb. 6.15 und im Labor Abb. 6.16 und Abb. 6.17).

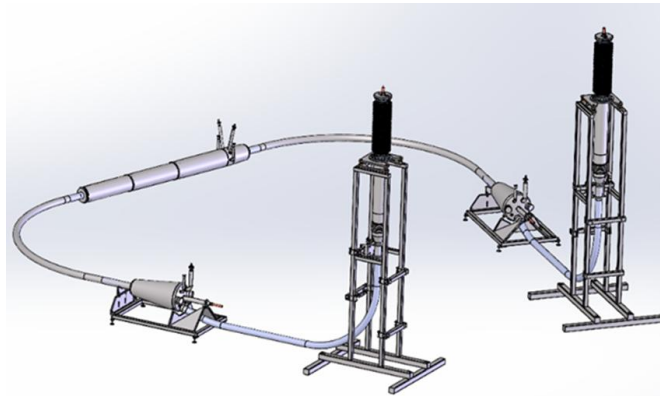


Abb. 6.15: Schematischer Aufbau der Qualifikationsprüfung an der DTU in Kopenhagen.

Die Tests wurden im September und Oktober 2023 an der Technischen Universität Dänemark (DTU) durchgeführt. Tabelle 6.1 listet nochmal die durchgeführten Prüfungen auf.

Tabelle 6.1 Qualifikationstests des HTS-Kabels

Eigenschaft	Wert	Anmerkung
Gleichstromwiderstand, Phase	1.9 m Ω warm 33 $\mu\Omega$ kalt	über den gesamten Prüfkreis
Gleichstromwiderstand, Schirm	1.4 m Ω warm, 41 $\mu\Omega$ kalt	über den gesamten Prüfkreis
Thermische Zyklen von Umgebungstemperatur auf Betriebstemperatur	6	Abkühlzeit 8h, Aufwärmzeit 50 – 100 h Wechsellspannungsfestigkeits-Prüfung während des 2. Zyklus; Impuls-Test während des 6. Zyklus
Teilentladungsmessung @ 1.73 U ₀ (96 kV)	Grenzwert: 5pC, bestanden	nach 10 Sekunden bei 2 U ₀ (128 kV)
Tan δ @ 65 kV	$2 \cdot 10^{-4}$, bestanden	
Blitzstoßspannungsprüfung	10 x ± 550 kV bestanden	
Netzfrequenzspannungs-Prüfung	2,5 U ₀ (160 kV) für 30 min, bestanden	
Schirmtest	25 kV DC für 60s, bestanden	

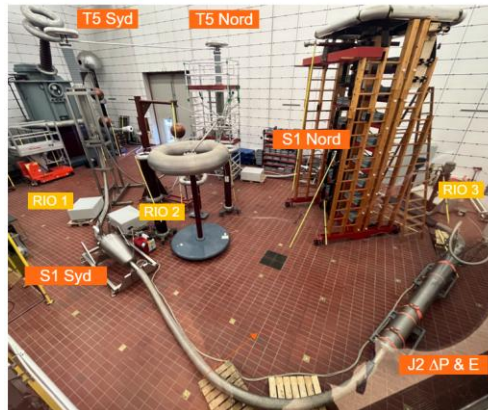


Abb. 6.16: Aufbau der Qualifikationsprüfung an der DTU in Kopenhagen. „T5“ = Endschlüsse, „S1“ = Splitterboxen, „J2“ = Kombinationsmuffe und „RIO“ = Sensorboxen

Im Zuge der Qualifikationsprüfung wurde auch ein Test-Setup für zukünftige Routineprüfungen von Systemkomponenten aufgebaut. Hierdurch kann eine einfache Qualitätskontrolle der zu installierenden Komponenten unter kryogenen Bedingungen durchgeführt werden.



Abb. 6.17: Elektrische Prüfung eines T5 Endverschlusses an der DTU.
Die Prüfung erfolgt bei kryogenen Bedingungen ($\sim 77\text{K}$) und Betriebsdruck (ca. 5 bar).

AP5 Langzeittest in Menzing

AP5.1 Vorbereitung des Testgeländes

Ein Kernstück des Projekts bestand darin, die Betriebsfähigkeit des HTS-Kabels in einem Langzeittest unter realistischen Bedingungen im Netzbetrieb zu demonstrieren. Dazu wurde auf einem Testfeld im Hauptumspannwerk Menzing der SWM eine 3-phasige, 150m lange Teststrecke inklusiver aller Kabel-Komponenten (6 Endverschlüsse, 2 Splitterboxen, 1 E-Joint, 1 ΔP -Joint) sowie ein Kühl- und Überwachungssystem installiert. Abb. 6.17 zeigt eine Übersicht der Testumgebung.



Abb. 6.18: Oben: Schematische Darstellung des Testaufbaus, Links: Erdaushubarbeiten für Kryostat-Legung
Mitte: Zelt für Endverschlussmontage, Rechts: Muffengrube mit DP-Joint

Die für den Langzeittest benötigte elektrische Sicherheitsinfrastruktur (Erdung, Blitzableiter) wurde nach Aufbau der Komponenten und Einzug des Kabels installiert (vgl. Abb. 6.19). Dadurch konnte ein ungestörter Betrieb unter 110 kV Netzspannung garantiert werden.



Abb. 6.19: Erdungsseile für Splitterbox und Endverschlüsse (1) sowie Blitzableiter (2)

AP5.2 Installation des Demo-Kabels

Als erster Teil des Kabelsystems wurden die drei Kryostat-Teilabschnitte verlegt. Dabei wurde eine Kombination aus Verlegung im offenen Graben und Einzug in vorinstallierte Rohre gewählt. Die

Installation verlief weitgehend problemlos. Es wurden Optimierungspotenziale bei der Spezifikation der Leer-Rohre, beim Verlege-Equipment und bei der Vorbereitung der Kryostat-Enden identifiziert, um zukünftige Installationsarbeiten effizienter zu gestalten.

Der Kabeleinzug fand im Februar 2024 statt und wurde durch das Installationsteam von NKT geleitet. Dabei wurden die drei einzelnen Phasen von der 3-Kammertrommel abgespult, an einen Zugkopf montiert und mittels Winde in den Kryostaten eingebracht (vgl. Abb. 6.20). Dabei wurden stets die auftretenden Zugkräfte dokumentiert, um eine Überlast zu verhindern. Der Einzug dauerte insgesamt zwei Tage und wurde von zwei entgegengesetzten Richtungen durchgeführt. Die Überlappungszone der beiden Kabelverbunde befand sich dabei innerhalb der zweiten Muffengrube um dort die korrekte E-Joint Montage zu gewährleisten.



Abb. 6.20: Links: Zugkopfmontage an drei Phasen, Rechts: 3-Kammertrommel während des Kabeleinzugs

AP5.3 Aufbau und Betrieb des Kühlsystems (NKT, Linde)

Als Kühlsystem für das Demo-Projekt wurde ein vorhandenes System von Stirling Cryogenics B.V. (Niederlande) angepasst. Kernstück war ein Wärmetauscher mit einem Flüssigstickstoffreservoir bei subatmosphärischem Druck, in dem der erwärmte LN aus dem Kabelsystem rückgekühlt wurde. Die Temperatur am Ausgang des Wärmetauschers konnte auf bis zu 66 K reduziert werden. Der geschlossene Kühlmittelkreislauf im Kabelsystem wurde durch einen externen Vorratstank mit Druck beaufschlagt; dieser Tank dient zugleich als Druckausgleichsgefäß bei den geringfügigen Temperaturschwankungen während des Betriebs des Kabelsystems.



Abb. 6.21: Splitterbox und Kühlcontainer

Zwei Stirling-Kryokühler (1 kW und 4 kW Kühlleistung) sollten dafür sorgen, das Stickstoff-Reservoir im Wärmetauscher zu kühlen. Auf diese Weise war ein geschlossener Kühlkreislauf möglich, der Stickstoffverluste auf ein Minimum reduzierte und das Nachfüllen des Vorratstanks minimierte. Das gesamte Kühlsystem (außer dem Vorratstank und der Kühlwasserversorgung) passte in einen Standard-20 Fuß-Container (s. Abb. 6.21).

Der 4 kW-Kryokühler, der in diesem Projekt verwendet wurde, stellte sich als unzuverlässig heraus. Aus diesem Grund wurden die Kühlkompressoren durch Vakuumpumpen ersetzt, um den subatmosphärischen Druck und die damit verbundene niedrige Temperatur im Stickstoffreservoir zu

gewährleisten. Dadurch wurde das System in ein „offenes“ Kühlsystem umgewandelt, das regelmäßige Stickstofflieferungen erforderte.

Dieses Kühlsystem funktionierte sehr zuverlässig und eignet sich somit auch als Backup und Redundanzsystem für ein zukünftiges geschlossenes System. Um auch bei Volllast die angestrebte niedrige Kühlmitteltemperatur zu gewährleisten, wurde für die zweite Hälfte des Langzeittests ein zusätzliches Kühlsystem nach dem gleichen Funktionsprinzip geliehen und parallel zu dem vorhandenen Kühlkreislauf betrieben. Beide Kühlsysteme wurden in dem vorhandenen 20-Fuß-Container installiert (s. Abb. 6.22)



Abb. 6.22: Komponenten innerhalb des Kühlcontainers

Monitoring- und Kontrollsystem (NKT, Linde)

Um das Kabelsystem im sicheren Parameter-Bereich zu betreiben und um mögliche Fehler frühzeitig zu erkennen, waren verschiedene Sensoren (Druck, Temperatur, Flussrate) im Kabelsystem verbaut. Diese wurden über einen remote-zugangsfähigen PC ausgelesen; sowohl Übersichts- als auch Detailansichten der verschiedenen Parameter konnten so dargestellt werden. In enger Abstimmung mit SWM und Linde wurde ein Satz an kritischen Parameter-Werten festgelegt, sowie eine Alarm-Logik definiert. Diese reichte von einfachen Warnmeldungen an das NKT-Team bis hin zu einer automatischen Abschaltung im Falle gravierender Fehlfunktionen.

AP5.4 Testbetrieb in Menzing (SWM)

In diesem Arbeitspaket wurde das Demo-Kabelsystem unter realen Netzbedingungen im HUW Menzing der SWM getestet. Dazu wurde das Kabelsystem mit der Hochspannung des SWM-Netzes verbunden. Der Strom durch die geschlossene Schleife des Testaufbaus wurde durch regelbare Transformatoren (Heiz-Trafos) aufgeprägt.

Im Testbetrieb konnten sowohl die Langzeitstabilität als auch die nominelle Leistung von 500 MVA erfolgreich demonstriert werden. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Testszenarien im Detail dargestellt.

5.4.1 Teil 1: Installations-Tests

Nach Installation und Abkühlen des Systems wurde die Spannungsfestigkeit ($2 \times U_0 = 128 \text{ kV}$) mit einer mobilen Testeinheit verifiziert (Abb. 6.23).



Abb. 6.23: Funktionstests mit Testtrailer

Während der Vorbereitungsphase des Langzeittests kam es aufgrund von Arbeiten an der Eigenversorgung im Umspannwerk (Sekundärtechnik) wiederholt zu Stromausfällen. Das Datenaufnahme- und Kontrollsystem war dank einer unterbrechungsfreien Spannungsversorgung (USV) kontinuierlich in Betrieb. Die anderen Komponenten starteten nach Wiederherstellung der Spannungsversorgung automatisch; das Kabelsystem selbst wurde durch die ungeplante Spannungsunterbrechung in der Sekundärtechnik in keiner Weise beeinträchtigt.

Zusätzlich zum initialen Kaltfahren wurde das System zudem zwei weiteren thermischen Zyklen ausgesetzt: Zum einen während eines Tauschs des Flüssigstickstoff-Versorgungstanks, zum anderen während eines geplanten Service-Intervalls. Beide Zyklen hatten keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Kabelsystems.

Aufgrund der wiederholten Füllungen des Vorratstanks war das System auch unter Spannung und Last höheren Druckschwankungen ausgesetzt als zunächst geplant. Abb. 6.24 zeigt einen Extremfall einer solchen Druckschwankungen. Auch hier zeigte sich keinerlei Beeinträchtigung der Funktion.

Insgesamt zeigten diese Extrem-Ereignisse, dass das Kabelsystem nicht nur unter idealen Bedingungen, sondern auch in diversen Fehlerszenarien einwandfrei funktionierte.

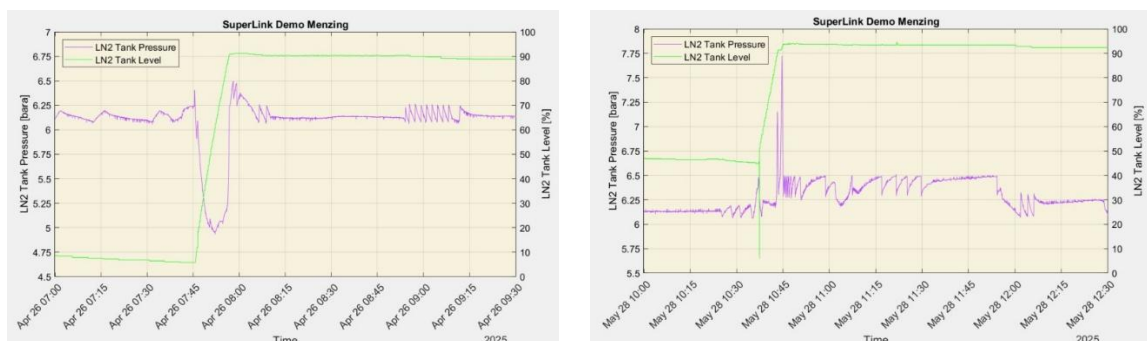


Abb. 6.24: Beispiel von Druckschwankungen (violett) von bis zu $\pm 1,5$ bar während des Betriebs. Es wurden keine Beeinträchtigungen des Kabelsystems festgestellt.

5.4.3 Teil 2: Langzeit-Tests

Nach erfolgreichem Abschluss der Funktionstest wurden zwei Dauerszenarien getestet.

- 30 Tage konstante Volllast
- 30 Tage Lastzyklus, definiert aus realen Netzdaten der SWM

Abb. 6.25 und Abb. 6.26 zeigen jeweils die Verläufe des aufgeprägten Stroms sowie die Temperatur im Kabelsystem während beider Testszenarien.

Die Kabelüberwachung und Kontroll-Logik funktionierten während der Testperiode einwandfrei. Während der gesamten 6-monatigen Testperiode wurde keine automatische Abschaltung ausgelöst; eine präventive manuelle Trennung vom SWM-Netz erfolgte einmal gegen Ende der Testperiode aufgrund einer Fehlfunktion im Ersatz-Kühlsystem.

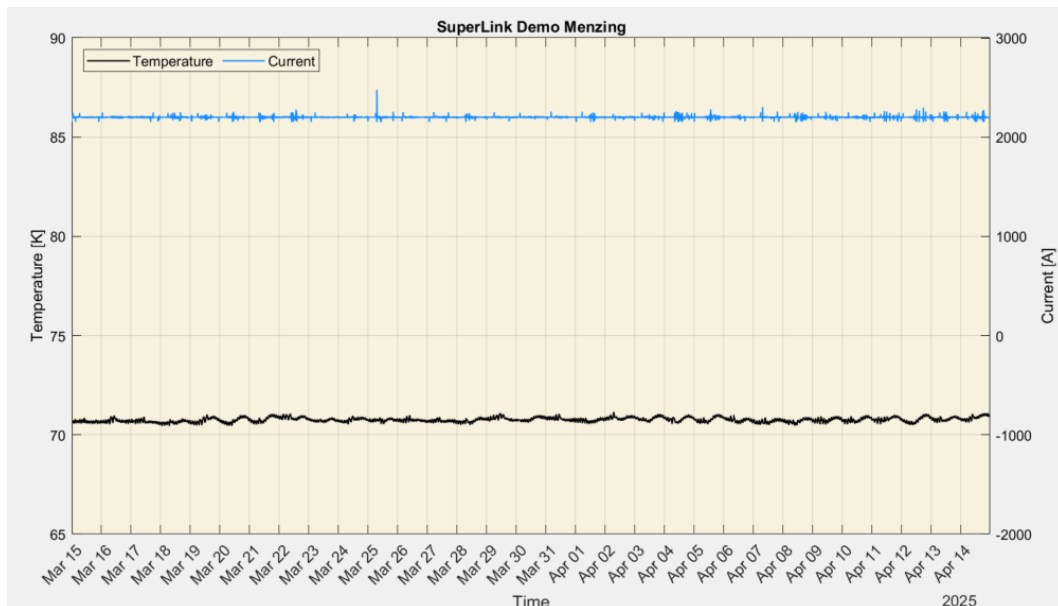


Abb. 6.25: Strom (blau) und Temperatur (schwarz) während des 30-Tage-Dauerlast-Tests.

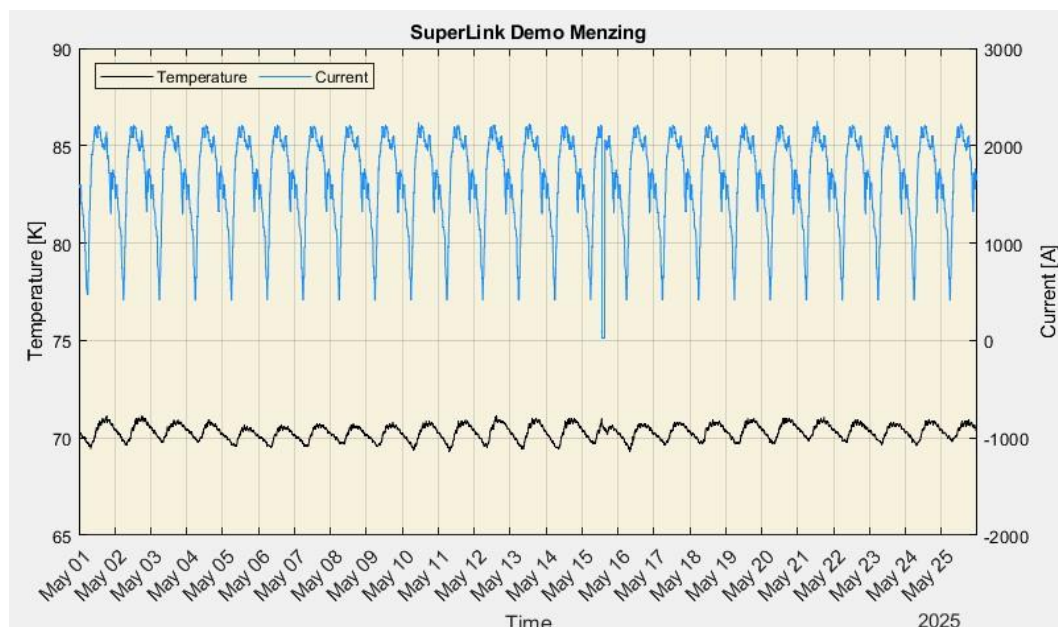


Abb. 6.26: Strom (blau) und Temperatur (schwarz) während des 30-Tage-Lastzyklus-Tests.
Am 15. Mai wurde durch einen Schaltvorgang im konventionellen Teil des SWM-Netzes kurzzeitig ein Signal zur Sicherheits-Abschaltung an das HTS-System gesendet.

Die sechsmonatigen Betriebsdaten wurden verwendet, um Verlustwerte für die verschiedenen Komponenten des Demosystems zu extrahieren. Jeder Punkt entspricht mehreren Stunden stabilen Betriebs. Abb. 6. zeigt die Systemverluste in Abhängigkeit des eingespeisten Transportstroms. Im relativ kurzen Demo-System werden die Null-Last-Verlustwerte (@ $I = 0$) durch das Demo-Kühlsystem selbst (1,2 kW), den hohen thermischen Leckverlust des Demo-Kryostaten in Standardqualität eines etablierten Lieferanten und die thermischen Leckverluste der zehn Garnituren, Splitterboxen und Muffen dominiert. Die Beiträge der einzelnen Komponenten sind bei Maximallast von 500 MVA in Abb. 6.28 aufgeschlüsselt.

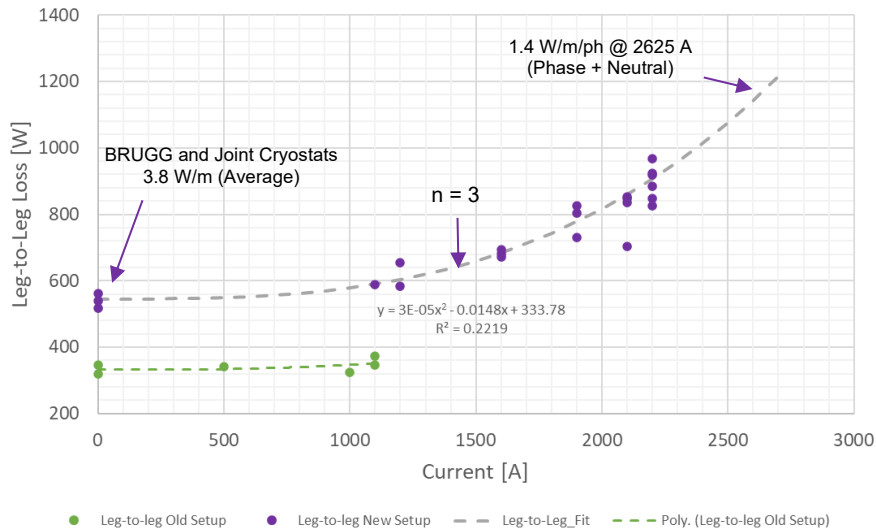


Abb. 6.27: Stromabhängige Verluste im 150 m langen Demo-System im HUW Menzing.

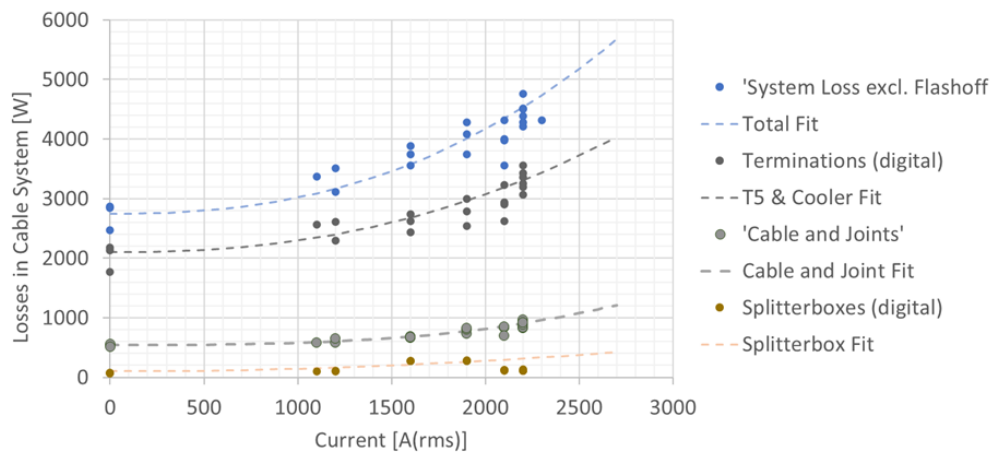


Abb. 6.28: Strom- und Temperatur-Verlauf bei 500 MVA-Last (Strom und Hochspannung angelegt).

Die ermittelten und erwarteten Verlustwerte der unterschiedlichen Komponenten des Demo-Kabels unter Voll-Last sind in Tab. 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2 Gemessene und erwartete Verlustbeiträge der Komponenten des SuperLink Kabel-Systems unter Voll-Last (500 MVA)

Komponente	Labor-skala	Demo-Kabel	15 km System
Kryostat	0.8 W/m	3 W/m	1.2-2,2 W/m
AC Verluste	0.3-0.4 W/m/ Φ	1.4 W/m/ Φ	0.4 W/m/ Φ
Endverschlüsse	n/a	536 W/ Φ	550 W/ Φ
Splitterbox	n/a	200 W/St.	250 W/St.
Muffen	n/a	8 W/m	10 W/m

Durch die Verwendung des in diesem Projekt entwickelten hocheffizienten Kryostat-Designs dürften die Kryostat-Verluste für ein System mit großer Länge, wie oben beschrieben, nahe 1 W/m liegen. Mit neuen, robusteren HTS-Drähten wird zudem eine Degradation vermieden, so dass auch die AC-Verluste noch geringer ausfallen werden.

5.4.4 Teil 3: Finaler nicht-destruktiver Limit-Test

Ein mittlerweile identifizierter Design-Fehler im Druckausgleich der Endverschlüsse führte zu einem unbeabsichtigten Gasfluss durch den Kabelkern. Dieser hatte zur Folge, dass die Temperaturen am Übergang Kupfer-HTS in den Endverschlüssen beim nominellen LN-Fluss leicht erhöht waren.

Aus diesem Grund wurden die Langzeittests mit leicht reduzierter Leistung (-16%), d.h. mit 420 MVA bzw. 2200 A durchgeführt. Durch eine geringfügige Modifikation der Endverschlüsse konnte der Gasfluss schließlich unterbunden werden, so dass zum Projektende der Dauerbetrieb bei der nominellen Maximal-leistung von 500 MVA möglich wurden.

Nach Ende des Langzeittests wurde der LN-Kühlmittelfluss angepasst, um den Gasfluss in den Endverschlüssen zu reduzieren. Zur Sicherheit wurde zuerst jede Phase einzeln für zwei Stunden bestromt. Während sich die Endverschlüsse bei dem geringeren Kühlmittelfluss stärker erwärmten, war die Gesamterwärmung des Kabelsystems nur geringfügig (Abb. 6.2 zeigt dies exemplarisch für Phase 2 (rot) von 9 bis 11 Uhr). Im Anschluss wurde der nominelle Maximalstrom von 2.625 A auf allen drei Phasen simultan aufgeprägt. Hier war aufgrund des geringen Kühlmittelflusses eine leichte Erhöhung der Kabel-Temperatur zu beobachten (Abb. 6.2, 14 bis 15 Uhr), die aber innerhalb des vorab definierten Betriebsbereichs blieb.

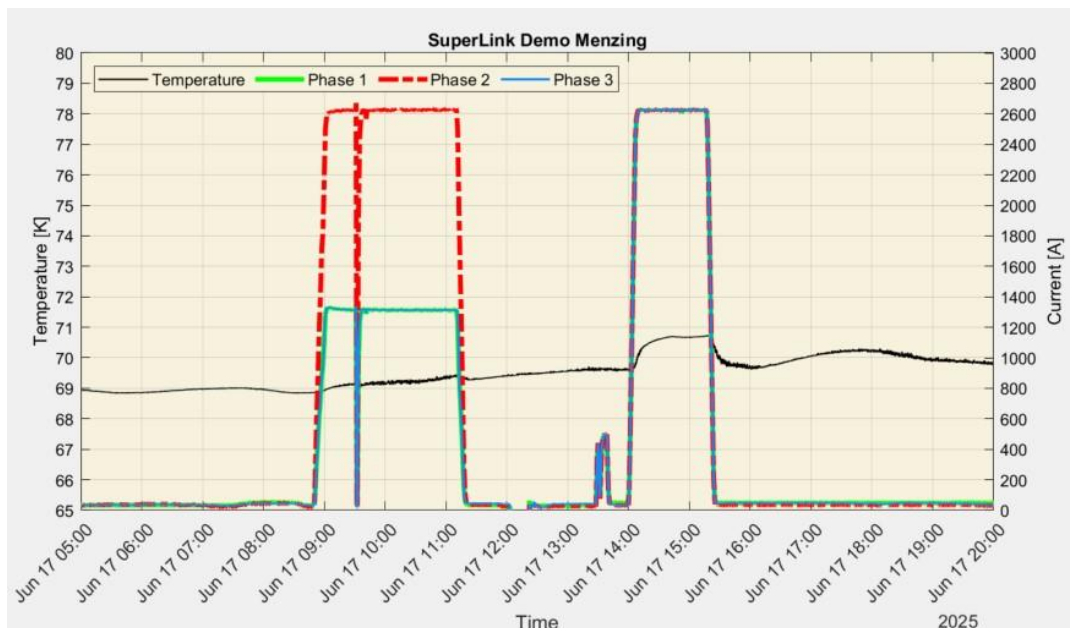


Abb. 6.29: Strom- und Temperatur-Verlauf in der roten Phase (links) und allen drei Phasen simultan (rechts).

Abb. 6. zeigt schließlich, dass selbst bei verringertem Kühlmittelfluss ein Betrieb mit 500 MVA Voll-Last über etwa 2,5 h problemlos möglich war. Mit leichten Verbesserungen an den Endverschlüssen kann der Kühlmittelfluss auf den Nennwert erhöht werden und die Leistung von 500 MVA auch im Dauerbetrieb erreicht werden.

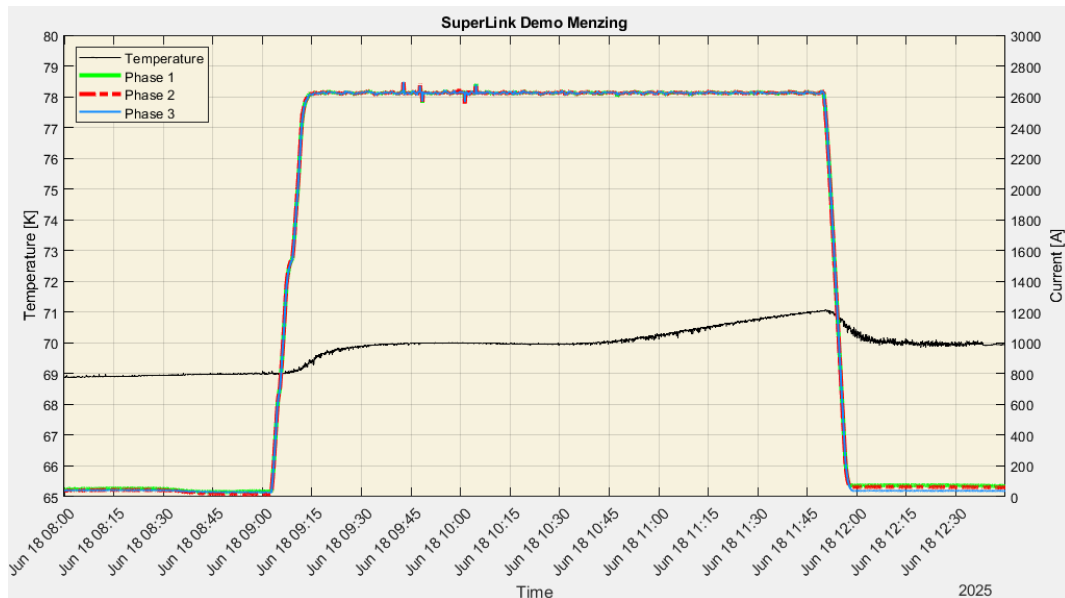


Abb. 6.30: Strom- und Temperatur-Verlauf bei 500 MVA-Last (Strom und Hochspannung angelegt).

AP5.5 Auswertungsphase (SWM)

Das Kabelsystem hat den Dauerbetrieb im 110-kV-Netz unter verschiedenen Lastszenarien und Witterungsbedingungen erfolgreich absolviert. Dabei konnte es seine volle Nennleistung von 500 MVA erreichen, wobei alle drei Phasen den spezifizierten Strom von $2.625 A_{rms}$ zuverlässig führten.

Während des Betriebs traten kleinere Designfehler in den Endverschlüssen zutage, die eine temporäre Leistungsbegrenzung auf 84 % (entsprechend 420 MVA) erforderlich machten. Die Ursache dieser Einschränkung ist inzwischen vollständig verstanden und wird in zukünftigen Systemdesigns behoben.

Verzögerungen beim Zuschalten sowie die einzige vorsorgliche Netztrennung waren ausschließlich auf Fehlfunktionen im (Stirling)-Kühlsystem zurückzuführen. Dank der kontinuierlichen Überwachung konnten jedoch wichtige Betriebsparameter wie der Wärmeeintrag in die verschiedenen Komponenten sowie Druckverluste präzise erfasst werden. Diese Erkenntnisse ermöglichen eine verbesserte Skalierung des Systems auf kommerzielle Leitungslängen und bilden eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung des Kabelsystems.

Literaturhinweise

- [1] C. Schaschke, Dictionary of Chemical Engineering. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- [2] W. T. B. de Sousa, E. Shabagin, D. Kottonau, and M. Noe, "An Open- Source 2D Finite Difference Based Transient Electro-Thermal Simulation Model for Three-Phase Concentric Superconducting Power Cables,"
- [3] Tadakuma, K.; Kajikawa, K.; Kamioka, Y.; Ishiyama, A.; Imagawa, S.; Nakamura, T.; Hirai, H.; Ozaki, S.: Optimum design of cryogenic pump for circulation cooling of high temperature superconducting cables. J. Phys.: Conf. Ser. 1293 012070 (2019).
- [4] Nakayama, Y.: Introduction to fluid mechanics. Second Edition. Butterworth-Heinemann (2018).
- [5] Ivanov, Y.; Watanabe, H.; Hamabe, M.; Kawahara, T.; Sun, J.; Yamaguchi, S.: Design study of LN2 circulation in a long SC power transmission lines. Physics Procedia 36 (2012).
- [6] Klöppel S: Konzept zur hocheffizienten kryogenen Kälteerzeugung mittels tiefsiedender Gemische, TU Dresden (2022).
- [7] Kochenburger, Thomas M.; Grohmann, Steffen; Oellrich, Lothar R. (2015): Evaluation of a Two-stage Mixed Refrigerant Cascade for HTS Cooling Below 60 K. In: Physics Procedia 67, S. 227–232. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.06.039.
- [8] Storn, Rainer; Price, Kenneth (1997): Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. In: Journal of Global Optimization 11 (4), S. 341–359. DOI: 10.1023/A:1008202821328.
- [9] Cigre Technical Brochure 644. (2015). Common Characteristics and Emerging Test Techniques for High Temperature Superconducting Power Equipment. Cigre.
- [10] Mansheim, P., Bach, R., Kurrat, M., & Willén, D. (2022). Untersuchungen zur elektrischen Durchschlagsfestigkeit und dem Teilentladungsverhalten von polymeren Isolierstofffolien in flüssigem Stickstoff. Berlin: VDE Hochspannungstechnik.
- [11] Mansheim, P., Bach, R., Kurrat, M., & Willén, D. (2023). Influence of surface discharges / partial discharges on the electrical strength of polymeric insulating foils in liquid nitrogen. Glasgow: International Symposium of High Voltage ISH.
- [12] Mansheim, P., Bach, R., Willén, D., & Kurrat, M. (2023). Effect of Partial Discharges Activity by Artificial Failure on composite Insulation Systems of Mini-Cable-Samples in LN2. Lyon: JICable.
- [13] Mansheim, P., Berkemeier, R., & Bach, R. (2024). Vergleich der ladungsbasierten Teilentladungs- und UHF-Messung in Luft, Silikonöl und LN2 anhand verschiedener künstlicher Fehlstellen. Berlin: VDE Hochspannungstechnik.

G) Voraussichtlicher Nutzen – Energieeinsparung

Der energetische Nutzen des SuperLink Kabels in Hinblick auf das Münchener Versorgungsnetz wurde in den Simulationsrechnungen in AP2.1 und der Wirtschaftlichkeitsanalyse in AP2.6 beschrieben.

Der Vorteil der HTS-Kabeltechnologie gegenüber konventionellen, Verlust-behafteten Kabeln liegt zwar auf der Hand, hängt aber, wie dort gezeigt, stark vom betrachteten Szenario und der Betriebsführung ab. Generell können zwei Effekte unterschieden werden:

- Ressourcenschonung, d.h. der CO₂-Fußabdruck des HTS-Kabels im Vergleich zu eingesparten konventionellen Kabeln
- Energie- und damit CO₂-Einsparung durch Verlustreduktion; diese hängen stark von der Betriebsführung und Netzauslastung ab

Ressourcenschonung – CO₂-Fußabdruck

Um die äquivalente Übertragungsleistung von 500 MVA wie das HTS-Kabel bereit zu stellen, werden 5 VPE-Kabelsysteme mit je 3 einphasigen 500 mm² Cu-Kabeln benötigt.

Tabelle 6.3 Vergleichende Abschätzung des CO₂-Fußabdrucks zweier 500 MVA-Kabelsysteme

Kabelsystem 500 MVA	Material	Inventar (kg/m)			
		Cu	PE	Stahl	CO ₂ -Abdruck
	CO ₂ -Faktor	4,1	2	5	
Cu-Kabel	5 × 3 × 500 mm ²	130	15	-	563
HTS-Kabel	3Φ in 1 Kryostat	12	3	2	65

Das Inventar (kg/m) der Kabel wurde dem Design (HTS) oder dem NKT-Kabelkatalog (VPE) entnommen, die Faktoren kg_{CO₂}/kg_{Mat} im Internet recherchiert. Letztere dürften tendenziell eher Minimalwerte darstellen, da Gewinnung (Bergbau) und Recycling-Anteile eingehen und unklar sind.

Unmittelbar auffällig ist jedoch, dass der CO₂-Fußabdruck des HTS-Kabel nur ca. 11% der klassischen Cu-Kabeltrasse entspricht, wobei hier rein der Materialeinsatz betrachtet wurde und der Aufwand für Tiefbau und Legung unbeachtet blieb.

Für das 15 km lange Kabelsystem beträgt der CO₂-Fußabdruck der Kabel jeweils 8.445 to (VPE) und 975 to (HTS), d.h. die unmittelbare Ersparnis durch das HTS-Kabel beträgt ca. 7.500 to.

Führt man sich vor Augen, dass HTS-Kabel beim Umbau des Gesamtnetzes ca. 41 km Kabel im Umfeld einsparen, dürfte dieser Zusatzeffekt zusätzlich mit 15.000 – 20.000 to CO₂-Ersparnis zu Buche schlagen.

Verlusteinsparung

Auch bei der Abschätzung der Verlusteinsparung empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtung. Zum einen kann man den direkten Äquivalenzvergleich der obigen Kabelsysteme durchführen, zum anderen die Auswirkung des HTS-Kabels auf die Gesamtnetzverluste betrachten. Der Umrechnungsfaktor beträgt beim aktuellen Energiemix (2024) 363 kg CO₂ / MWh laut Umweltbundesamt.

Im direkten Vergleich ist das HTS-Kabel erst ab einer mittleren Auslastung von 30+% der Nominalkapazität effizienter, d.h. der Aufwand der Kühlung ist geringer, als die Ohm'schen Verluste in einem vergleichbaren XLPE-Kabelsystem. Bei 50% Auslastung beträgt die Ersparnis ca. 600 kW bzw. aufs Jahr gerechnet 5,26 GWh oder 1.900 to CO₂.

Betrachtet man den Effekt auf das umliegende Gesamtnetz (vgl. AP2.1) so ist je nach Betriebsszenario eine Reduktion der Gesamtnetzverluste von ca. 20 % zu erwarten. Bei einer entsprechenden Verlustreduktion um 0,8 – 1 MW beträgt der Einspareffekt 7 – 9 GWh oder 2.500 – 3.200 to p.a..

H) Veröffentlichung der Ergebnisse

Das Projekt wurde bereits während der Projektlaufzeit bei einer extrem großen Zahl von internationalen Tagungen und Konferenzen vorgestellt (vgl. Tab. 6.4) und fand dabei riesiges Interesse und breite Resonanz.

Zudem entstanden sowohl diverse Fachpublikationen, sowie ein breites öffentliches Presseecho. Diese Veröffentlichungen sind in 6. aufgelistet.

Auch die Demo-Installation selbst erregte in der Betriebsphase Interesse mehrerer Netzbetreiber (auch aus dem Ausland). Während des Testbetriebs kamen u.a. Fachleute aus Japan (Universität Tokio/NEDO), Indien, Australien (AusGrid), Belgien (ELIA) nach München, um die Technologie vor-Ort zu besichtigen.

Tabelle 6.4 Tagungsbeiträge zum Projekt SWM Superlink

Tagung	Ort, Datum	Vortragende	Titel
ZIEHL 2020	Berlin; 3/20	Bach / FHSWF	Herausforderungen beim Einsatz eines 500-MVA-HTS-Kabels in München
DKV 2020	Online; 11/20	Alekseev / Linde	Anforderungen an das Kühlsystem für lange HTSL-Leistungskabel
EW Werkstatt Kabel 2020	Hannover; 11/20	Michalek / SWM Bach / FHSWF	Superlink – zukunftsorientierte Stromversorgung für Großstädte mittels Supraleiterkabel am Beispiel der Stadtwerke München
VDE ETG Fachtagung	Online; 6/21	Noe / KIT	Supraleitende Übertragungssysteme: Technologien, Projekte und Entwicklungspotential
EUCAS 2021	Online; 9/21	Noe / KIT	Superconductivity for Green Energy
CCA 2021	Online 10/21	Prusseit / THEVA	HTS Cable Technology – a Chance for Addressing the Challenges of Energy Transition
ZIEHL 2022	Berlin; 4/22	Michalek / SWM Bach / FHSWF	Supraleitung im urbanen Bereich – ein Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung und Umweltschutz Superlink – Kabelprojekt München 110kV
VDE FNN Workshop	Essen; 10/22	Prinz / SWM	Supraleitende Kabel Forschungsprojekt HTS-Kabel für 110KV
ASC 2022	Honolulu; 10/22	Prusseit / THEVA	Development & testing of 110 kV Superlink cable system using 2G HTS wires
ASC 2022	Honolulu; 10/22	Bach / FHSWF	SuperLink – Assessment of ageing for HTS-High-Voltage cable based on PD-impulses
EW Werkstatt Kabel 2022	Wiesbaden; 11/22	Bach / FHSWF	Supraleitendes 500-MW-110-kV-Kabel - Projektbericht
VDE Hochspannungstechnik 2022	Berlin; 11/22	Bach / FHSWF	Entwicklung eines kurzschluss-toleranten 110-kV-HTS-Kabels für die Energiewende in Großstädten
VDE Hochspannungstechnik 2022	Berlin; 11/22	Mansheim / FHSWF	Untersuchungen zur elektrischen Durchschlagsfestigkeit und dem Teilentladungsverhalten von polymeren Isolierstofffolien in flüssigem Stickstoff
DKV 2022	Magdeburg; 11/22	Boehm / KIT	Optimierung der Kühlung supraleitender Stromkabel
Zukünftige Stromnetze 2023	Berlin; 1/23	Bach / FHSWF	110-kV-Supraleiterkabel „SuperLink“ in München im Langzeittest
SL-Workshop Rheinland Pfalz	Mainz 4/23	Prinz / SWM	110kV HTS Kabel für die Energieversorgung von München
JiCable 2023	Lyon; 6/23	Willén / NKT	Development and testing of the 110 kV SuperLink system

JiCable 2023	Lyon; 6/23	Bach / FHSWF	Effect of partial discharges activity by artificial failure on composite insulation systems of mini-cable samples in LN ₂
ISH 2023	Glasgow; 8/23	Bach / FHSWF	Influence of surface discharges / partial discharges on the electrical strength of polymeric insulating foil in liquid nitrogen
EUCAS 2023	Bologna; 9/23	Hintze / THEVA	Development & Testing of 110 kV SuperLink Cable System using 2G HTS Wires
EUCAS 2023	Bologna; 9/23	De Sousa / KIT	SuperLink - Impacts of a Superconducting Power Cable in a 110kV Distribution Network
CEC-ICMC 2023	Honolulu; 7/23	De Sousa / KIT	Development and Impacts of a Superconducting Power Cable in a 110kV Distribution Network
CEC-ICMC 2023	Honolulu; 7/23	Boehm / KIT	Modelling and optimization of cryogenic mixed refrigerant cycles for the cooling of superconducting power cables
Braunschweiger Energieseminar 2023	Braunschweig; 6/23	Bach / FHSWF	Das Projekt - Superlink
ISIS 30	Daejeon, 11/23	Prusseit / THEVA	CONNECTUS – Superconductivity in Europe
ZIEHL 2024	Berlin; 4/24	Prinz / SWM	SuperLink - 110kV HTS-Kabel für die Energieversorgung von München
IEEE PES	Palm Springs; 5/24	Bach / FHSWF	Development of a Short-Circuit tolerant 110-kV-HTS-Cable for the Energy Transition in Urban Areas
ICEC-ICMC 2024	Genf; 7/24	Boehm / KIT	Optimization of cryogenic mixed-refrigerant cascades for intermediate cooling stations of the long-distance superconducting power cable SuperLink
ASC 2024	Salt Lake City; 8/24	De Sousa / KIT	SuperLink: Deployment of Superconducting Power Cables for Power Grid Enhancement
ASC 2024	Salt Lake City; 8/24	Willén / NKT	Development of the SuperLink HTS cable system for implementation in Munich
4. IWC-HTS	Matsue (JP); 10/24	Grohmann / KIT	HTS power applications and cooling system developments in Europe
4. IWC-HTS	Matsue (JP); 10/24	Decker / Linde	Industrial cooling system for 110 kV HTS cable system over 15 km in length
4. IWC-HTS	Matsue (JP); 10/24	Boehm / KIT	Application of Cryogenic Mixed-Refrigerant Cycles in HTS Systems
DKV 2024	Dresden; 11/24	Boehm /KIT	Optimierung einer Gemischkältekaskade für Zwischenkühlstationen des supraleitenden Kabels SuperLink
Werkstatt Kabel 2024	Wiesbaden; 11/24	Bach / FHSWF	Projekt SUPERLINK Entwicklung und Demobetrieb eines supraleitenden Kabels für 500 MVA @ 110-kV
ISS 2024	Kanazawa; 11/24	De Sousa / KIT	Development and impacts of a superconducting power cable in a 110 kV distribution network
CIGRE 2024	Paris; 11/24	Bach / FHSWF	Superconducting power cable for 500 MVA at 110 kV in Munich – first insights in the test run
VDE Hochspannungstechnik 2024	Berlin; 11/24	Mansheim / FHSWF	Vergleich der ladungsbasierten Teilentladungs- und UHF-Messung in Luft, Silikonöl und LN ₂ anhand verschiedener künstlicher Fehlstellen
Industriewende Dialog	5/25	Prinz / SWM	Superlink 110 kV HTS-Kabel für die Energieversorgung von München
ISS 2025	Nagasaki; 12/25	Prinz / SWM	SuperLink Vortrag geplant

Tabelle 6.5 Veröffentlichungen zum Projekt SWM Superlink

Fachjournal	Ausgabe	Autor	Titel
Netzpraxis Fachthema	ISSN 1611-0412-D 7656 E, Vol. 60 , No.1-2, p. 24-28, (2021)	J. Bach et al.	Supraleitende Hochleistungskabel Unterstützung der Energiewende in Großstädten
Transformers Magazine	Special: Superconductivity S.10, (2021)	W. Prusseit, R. Bach	The Munich SuperLink project Toughening up city distribution grids with high voltage HTS cables
Phys. unserer Zeit	6/2021 , S. 290, DOI: 10.1002/piuz.202101615	M. Noe, M. Bauer	Supraleitende Hochstromkabel und Leitungen Ohne Widerstand in die Anwendung
EP Patentschrift	EP 4087075 A1, 2022	Willén et al.	Superconducting power cable system
Erneuerbare Energien	3/2023, S. 50	R. Bach et al.	Innovative Lösung für Großstadt- Kabelnetze Projekt Superlink: Supraleitende Kabel könnten als Bestandteil von Netzen in Ballungszentren Platzprobleme unter der Erde lösen
Jicable 2023	6/23	Willén et al.	Development and testing of the 110 kV SuperLink system
IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.	1301 , 012132, DOI 10.1088/ 1757-899X/1301/1/012132	Boehm / KIT	Modelling and optimization of cryogenic mixed-refrigerant cycles for the cooling of superconducting power cables
e+i Elektrotechnik und Informationstechnik	Nov. 2023 https://doi.org/10.1007/s00502-023-01191-9	R. Bach, W. Prusseit	Innovative supraleitende Energiekabel für die Umsetzung der Energiewende
IEEE Trans. On Applied Supercond.	35 , No. 5; S. 1-8 (2024), DOI: 10.1109/TASC.2025.3553829	D. Willén et al.	Development of the SuperLink HTS cable system for implementation in Munich
US Patentschrift	US 12051524 B2, 2024	Willén et al.	Superconducting power cable
IEEE Trans. on Power Delivery	DOI: 10.5445/IR/1000177340 (2024)	W. de Sousa et al.	Development and impacts of a superconducting power cable in a 110 kV distribution network
Presse	Ausgabe	Autor	Titel
FAZ	1.3.21; S. 22	H. Peitsmeier	Thermoskanne gegen Blackout
ampere (ZVEI)	1 & 2 2021; S. 34	Peter Gaide	Kühlschränke in der Leitung
Het Financieele Dagblad	3.7.21, S. 18	Bram Vermeer	Strom ohne Verlust
VDE Dialog	Q4/21; S. 27	Heinz Arnold	Supraleiter - Boom für einen Exoten
SZ	29.10.24	Justin Patchett	Wie München den Energiehunger stillen will