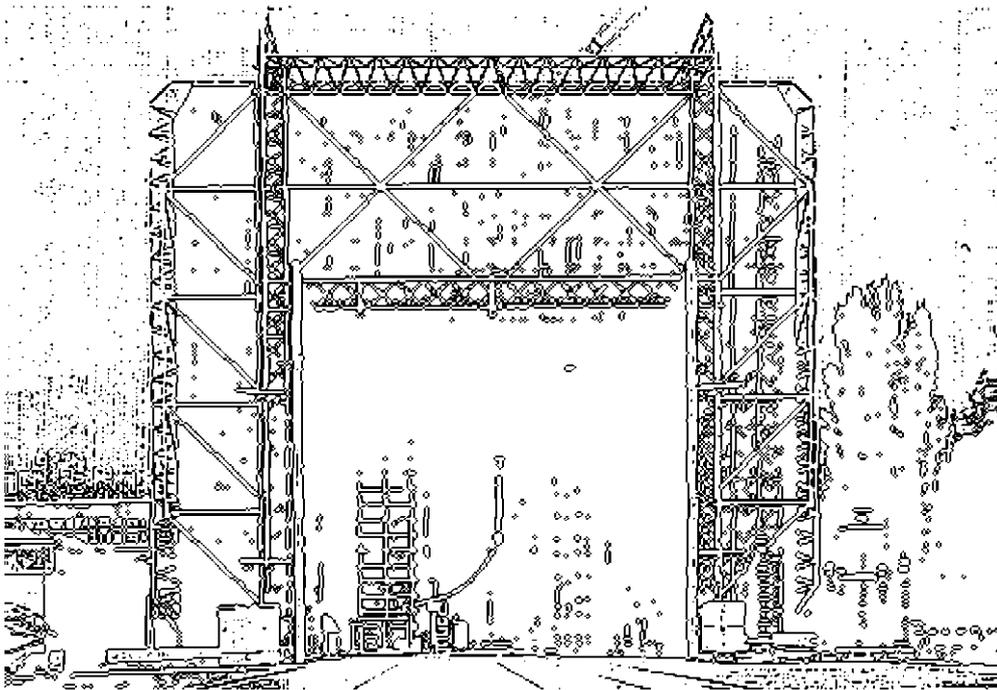


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

MASTERARBEIT

Michael Tieber, BSc
August 2014



INSTITUT FÜR
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND SYSTEMMANAGEMENT
UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER

Masterarbeit

Neue Kabeltechnologien und Kabelprüftechnik



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Technische Universität Graz

Betreuer

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Hans Michael Muhr

Vorgelegt von Michael Tieber, BSc

8010 Graz, Inffeldgasse 18-I

Telefon: (+43 316) 873 – 7401

Telefax: (+43 316) 873 – 7408

<http://www.ihs.tugraz.at>

<http://www.tugraz.at>

Graz / August 2014



Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	9
2. Übertragung und Verteilung elektrischer Energie.....	10
2.1. Kabel.....	10
2.3. Gasisolierte Leitungen (GIL).....	13
2.4. Freileitung	14
2.5. Vergleich Freileitung, Kabel und GIL.....	15
3. Supraleitung.....	17
3.1. Einleitung	17
3.2. Elektrotechnische Grundlagen.....	18
3.3. Supraleitende Materialien	25
3.4. Wechselspannungsverhalten.....	26
3.5. Herstellung.....	27
3.6. Warmes und kaltes Dielektrikum.....	29
3.7. Kühlsystem.....	33
3.8. Endverschluss von HTS-Kabeln	38
3.9. Übertragungsverhalten.....	40
3.10. Anwendung von supraleitenden Kabeln.....	46
3.11. Vergleich der Verluste von VPE, AC- und DC-Kabel.....	51
3.12. Resümee.....	54
4. Nanotechnologie.....	56
4.1. Einleitung	56
4.2. Miniaturisierung.....	59
4.3. Analytische Verfahren.....	60
4.4. Anwendungsgebiete in der Kabeltechnik	64
4.5. Kabeln mit Nanofüllern	66
4.6. Resümee.....	67
5. Prüf- und Diagnosetechnik.....	69
5.1. Stehspannungsprüfung	69
5.2. Durchschlagspannungsprüfungen	69
5.3. Blitzstoßspannungsprüfungen	71
5.4. Schaltstoßspannungsprüfung	72
5.5. Teilentladungsprüfung (TE).....	73
5.6. Verlustfaktormessung (tan δ -Messung)	77
5.7. Wechselspannungsprüfung	78
5.8. Damped Alternating Voltage Test.....	79

5.9.	Very Low Frequency (VLF) Test.....	81
5.10.	PDC-Analyse.....	83
5.11.	IRC-Analyse.....	84
5.12.	RVM Analyse.....	85
6.	Zusammenfassung.....	86
7.	Literaturverzeichnis.....	87
8.	Abbildungsverzeichnis.....	93
9.	Tabellenverzeichnis.....	95

Vorwort

Diese Arbeit entstand aus meiner Tätigkeit als studentischer Mitarbeiter der Technischen Universität Graz am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement unter der damaligen Leitung von Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr.h.c. Hans Michael Muhr, der zugleich mein Betreuer, aber viel mehr mein Mentor war. Danke für deine Unterstützung und dein offenes Ohr, auch wenn es an Wochenenden war. Diese Arbeit eröffnet mir auch die Gelegenheit, all den Menschen zu danken, die zum erfolgreichen Abschluss dieses Projektes beigetragen haben.

Weiters möchte ich mich bei dem jetzigen Institutsvorstand des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler für seinen Beitrag zu dieser Arbeit bedanken.

Bedanken möchte ich mich aber auch bei meinem Onkel Dkfm. Ing. Franz Tieber, der sich opferte und sich als „unbeteiligter“ Lektor zur Verfügung stellte, sowie bei allen Freunden und Bekannten für ihre moralische Unterstützung.

Besonderen Dank möchte ich meiner Familie aussprechen, die immer für mich da war und mir auch in schwierigen Zeiten ihre ganze Liebe und Unterstützung gegeben hat.

Ich möchte mich noch bei allen anderen Personen, die mich während meiner Studienzeit unterstützt haben und mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen, bedanken. Dazu gehören alle Mitglieder des Hochspannungszeichensaales sowie der Fachgruppe Elektrotechnik, bei Ernst, Hase, Volli und Martin, mit denen ich im Laufe meines Studiums zahlreiche Prüfungen gemeinsam erfolgreich bestritten habe.

Abschließen möchte ich das Vorwort mit einem Zitat von Seneca „Non scholae, sed vitae discimus“ „Nicht für die Schule, sondern für das Leben lernen wir“!

Oberdorf, 11.8.2014

Michael Tieber

Meiner Familie gewidmet

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt neue Kabeltechnologien im Bereich der Hochtemperatursupraleitung und der Nanotechnologie sowie Verfahren zur Diagnose von Kabeleigenschaften. Zunächst werden die physikalischen Grundlagen der Supraleitung zusammengefasst, und es wird ein Überblick über die Herstellungsmethoden von supraleitenden Bändern und Rundleitern gegeben. Danach werden konventionelle Kabel sowie HTS- Kabel in technischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht verglichen und die besonderen Erfordernisse für den Einsatz von HTS- Kabeln beschrieben. Im Kapitel „Nanotechnologie“ werden die grundlegenden Eigenschaften von Nanopartikeln sowie Messverfahren zur Quantifizierung und Qualifizierung dieser Partikel dargestellt und zukünftige Einsatzmöglichkeiten der Nanotechnologie in der elektrischen Energieübertragung diskutiert. Abschließend werden Prüf- und Diagnoseverfahren zur Beurteilung des Zustands von Kabeln vorgestellt.

Schlagworte

Supraleitende Kabel
Hochtemperatursupraleiter
Nanotechnologie
Prüf- und Diagnoseverfahren für Kabel

Abstract

This paper describes new cable developments in the area of high temperature superconductivity and nanotechnology as well as diagnostic methods to determine the properties of cables. In the first part the physical basics of superconductivity are summarized and an overview of the production methods of superconducting tapes and wires is given. Then conventional cables and high-temperature superconductor (HTS) cables are compared from a technical, economic and ecological perspective and the special requirements for using HTS cables are described. In the section on nanotechnology the basic properties of nanoparticles are presented, as well as measurement techniques to quantify and describe these particles. Moreover, future possibilities of applying nanotechnology in transferring electrical energy are discussed. In the final part of the paper methods to determine the electrical properties of cables are presented.

Keywords

Superconductivity
High Temperature Superconductor
Nanotechnology
Test- and Diagnostic Techniques for Cables

1. Einführung

Damit Motoren, Kühlschränke, Herde und alle elektrischen Geräte im Haushalt bzw. in der Industrie funktionieren, benötigen sie elektrische Energie. Damit diese von den Kraftwerken zum Endkunden gelangen kann, muss die Energie übertragen und verteilt werden. Dies kann über Kabel, Freileitung oder über eine gasisolierte Leitung (GIL) geschehen. Mit dem Stromverbrauchszuwachs von 2% pro Jahr und der regenerativen Energie sind viele „Player“ gefragt, Wege zu finden, wie diese Energie gut übertragen und verteilt werden kann.

Die bahnbrechende Entdeckung der supraleitenden Eigenschaft von speziellen Materialien, die im letzten Jahrhundert gefunden wurden, hat heute durch die Hochtemperatursupraleiter neue Einsatzmöglichkeiten aufgetan und besitzt ein großes Forschungspotenzial. Einige Forscher, wie z.B. Onnes oder Cooper, haben durch ihre wissenschaftliche Arbeit die höchste Auszeichnung im wissenschaftlichen Bereich, den Nobelpreis, bekommen.

Die Supraleitung findet ihre Anwendung in der Hochspannungstechnik unter anderem bei Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik und bei Magneten. Die Technologie der supraleitenden Kabel wurde zur Energieübertragung über einen Kilometer erfolgreich umgesetzt. Das war ein erster Schritt, um den Laborstatus zu verlassen und in Feldversuchen einzusetzen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden zwei große zukunftssträchtige Themen für die kabelgebundene Energieübertragung aufgegriffen. Dabei werden supraleitende Kabel und die Nanotechnologie behandelt. Ein weiterer Teil befasst sich mit der Prüftechnik, um die Kabel auf ihre Belastungsfähigkeit bzw. Qualität zu überprüfen.

Diese Arbeit soll den Stand der Technik der supraleitenden Technologie sowie der Nanotechnologie aufzeigen. Die zwei Typen von Supraleiter werden dargestellt, wie solche Kabel produziert werden, welche Komponenten zum Betreiben von solchen Betriebsmittel nötig sind und welche Projekte realisiert, in Planung bzw. in der Umsetzung sind.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit ist, den aktuellen Stand der Technik die Vorteile und Nachteile von supraleitenden Kabel aufzuzeigen sowie auf die Nanotechnologie einzugehen. Die Einsatzmöglichkeiten sowie die zukünftige Entwicklung dieser beiden Technologien sollen untersucht werden. Die Prüftechniken sowie Diagnoseverfahren für Kabel sind aufzuzeigen.

2. Übertragung und Verteilung elektrischer Energie

2.1. Kabel

Bis jetzt kommen noch keine Ultrahochspannungskabel zum Einsatz, allerdings gibt es schon Überlegungen, etwa 1100-kV-Kabel zu entwickeln und zu fertigen [EHV1]. Die höchste Spannungsebene, die bei Kabel derzeit zum Einsatz kommt, ist 525kV [EKN1]. Bei Freileitungen ist das isolierende Medium Luft, bei Kabeln werden feste bzw. fest-flüssige Dielektrika verwendet. Durch die wesentlich höhere elektrische Festigkeit des Isoliermediums kommt das Kabel mit einer dünnen Wandstärke, in Bezug auf die Isolierung, aus. Es reicht allerdings nicht nur eine elektrische Festigkeit, ein Kabel muss die thermischen sowie auch teilweise mechanischen Belastungen standhalten. Da die Isolierwandstärke wenige Zentimeter stark ist, hat ein Kabel im Vergleich zur Freileitung ein anderes kapazitives Verhalten. Der hohe Kapazitätsbelag von einem Kabel bewirkt, dass bei einem leerlaufenden Kabel ein Ladestrom fließt, der Verluste produziert. Dadurch ist das Kabel in der Länge begrenzt. Eine bedingte Abhilfe schafft dabei nur eine Kompensation mit Drosselspulen [EHV1]. Aufgrund des Kapazitätsbelages C' kommt ein wesentlich kleinerer Wellenwiderstand Z_w zustande, und dadurch ist die natürliche Leistung um den Faktor 3 bis 4 höher. Die Induktivität L' kann vernachlässigt werden, weil diese zum elektrischen Widerstand addiert wird (siehe Kapitel 3.9).

Die Zuverlässigkeit ist ein weiterer wichtiger Aspekt. Kabel haben insofern den Vorteil, dass sie meist in der Erde verlegt sind und dadurch kein direkter Blitzeinschlag möglich ist. Allerdings ist eine Kabelmuffe eine potenzielle Fehlstelle. Auch durch Grabarbeiten, z. B. durch einen Bagger, kann ein Kabelschaden entstehen. Die Folge daraus ist ein großer Aufwand, der durch die Fehlerortung und die Reparatur entsteht. Durch diese Reparaturarbeiten entstehen einerseits hohe Kosten und andererseits ist eine längere Stromunterbrechung wahrscheinlich. Kabelprojekte die bis dato installiert wurden haben gezeigt, dass die Verfügbarkeit von Kabeln unter jener von Freileitungen liegt [KHH1].

Abbildung 1 zeigt eines XLPE- Kabel das zur Energieübertragung eingesetzt wird.



Abbildung 1: XLPE- Kabel [Quelle: pdc-cables.com]

2.1.1. Gleichspannungskabel

Ein Wechselspannungskabel ist im Prinzip wie ein zylindrischer Kondensator aufgebaut, der eine Kapazität von 0,2 μF bis 0,3 μF pro Kilometer besitzt. Daher ist das AC-Kabel für Längen von ca. 60 km bis 80 km beschränkt, da sonst die Verluste zu hoch werden, woraus eine Verringerung der effektiv übertragbaren Leistung resultiert.

Bei der Gleichspannungsübertragung ist das nicht der Fall, denn das Kabel muss sich nur einmal aufladen, daher gibt es nach der Inbetriebnahme keine Umpolarisierungsverluste mehr. Es spielt dann nur mehr der elektrische Widerstand eine tragende Rolle bei den Verlusten. Daher gibt es auch keine Längeneinschränkung.

Drei Typen von DC-Kabel werden hauptsächlich eingesetzt, diese sind das Papier-Masse-isolierte Kabel (Mass Impregnated, MI), das ölprägnierte (self-contained fluid filled, SCFF) Kabel und das Kunststoff (VPE)-Kabel.

Beim Masse-imprägnierten Kabel kann auf über 100-jährige Erfahrung zurückgegriffen werden. Dieses Kabel ist die am meisten eingesetzte Kabelart und hat eine sehr hohe Zuverlässigkeit. Sie kann für Spannungshöhen bis 500kV eingesetzt werden und hat einen typischen Leiterquerschnitt von 2500 mm². Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines solchen Kabels. [ICC1]



Abbildung 2: Aufbau eines Masse-imprägnierten Kabel [ICC1]

Die Betriebstemperatur des Leiters liegt bei ca. 55 °C und das Kabel kann bis zu einer Länge von 1000 m in einem Stück verlegt werden. Ein neues Design wurde für die Gleichspannung entwickelt, das eine Verbesserung des Gesamtverhaltens ermöglicht. Es wird Paper Polypropylene Laminated (PPL) genannt. Es kann mit einer Spannung von bis zu 600 kV betrieben werden und hält einer Leitertemperatur von 85 °C stand [ICC1].

Das Papier-Öl-imprägnierte Kabel hat einen ähnlichen Aufbau wie das Papier-Masse-Kabel und kann für Gleichspannungsanwendungen bis zu einer Spannung von 600 kV verwendet werden. Dieses Kabel ist aber durch die hydraulischen Eigenschaften beschränkt, dadurch wird dieses Kabel nur bei kurzen Strecken eingesetzt. Aktuell wird der Kabeltyp für eine Spannungshöhe von 500 kV mit einem Leiterquerschnitt

von 3000 mm² eingesetzt. Abbildung 3 zeigt den Aufbau eines solchen Papier-Öl-impregnierten Kabels [ICC1].



Abbildung 3: Aufbau eines Öl-Papier Kabels [ICC1]

Die VPE-Kabel sind speziell für Gleichspannungsanwendung noch in der Entwicklung. Diese Gleichspannungskabel werden für eine Spannungshöhe bis zu 320 kV eingesetzt. Diese Technologie wird hauptsächlich mit Quellenspannungs-Konvertern betrieben. Diese erlauben, den Leistungsfluss umzudrehen, wobei die Polarität im Kabel nicht geändert wird. Ein Fakt ist, dass bei VPE- Kabeln eine ungleichmäßige Verteilung der freien Ladungen im Dielektrikum entstehen kann. Das wiederum hat zur Folge, dass es auf Grund des elektrischen Feldes innerhalb der Isolierung zu Raumladungen kommen kann. Bei schnellen Spannungsänderungen sowie des Temperatureinflusses kommt es bei diesen Stellen zu einer höheren Beanspruchung in weiterer Folge zu einem schnelleren Altern der Isolierung [ICC1].



Abbildung 4: Aufbau eines vernetzten Polyethylen-Kabels [ICC1]

2.3. Gasisolierte Leitungen (GIL)

Die gasisolierte Leitung ist zwar die teuerste Variante, um elektrische Energie zu übertragen, allerdings hat diese Technologie den Vorteil, dass sie fast kein Magnetfeld aufweist, im Vergleich zur Freileitung und zum konventionellen Kabel. (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Bei sehr hohen Spannungen wird die Übertragungsfähigkeit der bisher betrachteten Kabel durch die dielektrischen Verluste begrenzt. Dieser Effekt fällt beim Einsatz von Rohrleitungen, die mit Gas gefüllt sind, fast vollkommen weg. Da die Rohrleitung durch ihren großen Durchmesser, üblicherweise 500 mm bis 600 mm, eine sehr geringe Kapazität aufweist, ist der Ladestrom sehr gering. Diese Technik wird bei Kraftwerksausleitungen sowie bei Schaltanlagen bereits verwendet und fand ihren Ursprung bei den gasisolierten Schaltanlagen (GIS). Die bis dato längste GIL ist in Sai Noi in einem thailändischen Umspannwerk und hat eine Spannungshöhe von 550 kV und eine Länge von 1200 m. Die Verlegung solcher GIL- Systeme erfolgt unter der Erde, in Schächten, in Tunnels verlegt bzw. über der Erde auf Gerüsten. [KHH1]

Ein Nachteil des Schwefelhexafluorid (SF_6) ist, da dieses Gas ein starkes Treibhausgas ist in Schaltanlagen verwendet und in Verbindung mit Stickstoff N_2 in gasisolierten Leitungen eingesetzt. Solange noch kein alternatives umweltfreundliches Gas gefunden wird, das ähnliche Eigenschaften wie SF_6 hat, sind Strecken von 100 km sind wirtschaftlich schwer vorstellbar.

Der Aufbau einer solchen Leitung ist in Abbildung 5 ersichtlich. Das Innere ist der stromtragende Leiter (Hohlleiter), der von Isolatoren abgestützt wird. Zwischen dem Leiter und dem Außenmantel ist das isolierende Medium. Bei bisher gebauten GIL-Strecken werden SF_6 - und N_2 - Gasmische verwendet. Das gesamte System benötigt wenig Wartung.



Abbildung 5: Gasisolierte Leitung (GIL) [Quelle: Siemens]

2.4. Freileitung

Um elektrische Energie auf über lange Strecken zu transportieren ist die Freileitung ist die technisch einfachste und preisgünstigste Möglichkeit. Außerhalb von Großstädten werden diese, mit ein paar Ausnahmen, im Hoch- und Höchstspannungsnetz eingesetzt. Der Grund dafür ist einfach, da eine gute Zugänglichkeit, Reparaturfähigkeit, Vorteile der Trassenherstellung, sowie andere technische Vorteile. Einer größten Kritikpunkte ist die Beeinträchtigung der Landschaft durch die Leiterseile und der Masten. Bei der Mittelspannungsebene geht der Trend dagegen eher zu Kabeln [NTU1].

Im Winter hat die Freileitung noch einen weiteren Nachteil, denn unter dem Gewicht der vereisten Leitungen kann es zu einem Seilbruch kommen. Bei einem starken Sturm können Bäume in die Leitungen fallen. Abbildung 6 zeigt einen Mehrfachleitungsmasten.

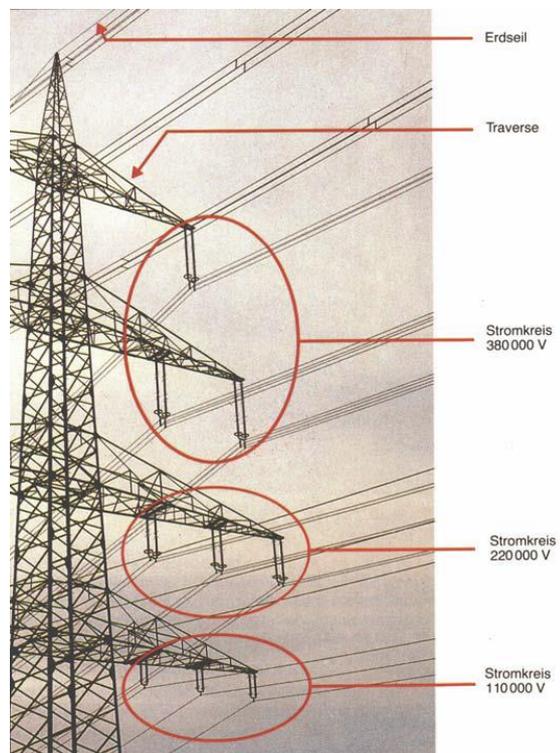


Abbildung 6: Mehrfachleitung mit den Spannungen 380 kV, 220kV und 110 kV
[Quelle: RWE AG] [NTU1]

2.5. Vergleich Freileitung, Kabel und GIL

Tabelle 1 zeigt grundsätzlich die Unterschiede zwischen Freileitung, Kabel und GIL, angefangen von der Verlegung, über die Leistung bis zur ökologischen Akzeptanz der Hochspannungsübertragung.

Tabelle 1: Technischer Vergleich zwischen Freileitung, Kabel und GIL [STV1]

	Freileitung	Kabel	GIL
Verlegung	oberirdisch	unterirdisch (eingegraben)	unterirdisch oder oberirdisch
Anzahl der notwendigen Blindleistungskompensationsstationen	niedrig	hoch	mittel
Betriebsleistung	unternatürlich, übernatürlich	unternatürlich	unternatürlich
Primär verwendetes Isolationsmaterial	Luft	Kunststoff (VPE) imprägniertes Papier	Isoliergas
Primär verwendetes Leitermaterial	Stahl/Aluminium	Kupfer Aluminium	Aluminium
Notwendige Erdbewegung	niedrig	hoch	hoch
Trassennutzungsgrad	mittel	hoch	hoch
übertragbare Leistung pro Korridor	AC: bis zu ~1,5 GVA DC: bis zu ~2 GVA	AC: bis zu ~1 GVA DC: bis zu ~1,5 GVA	AC: bis zu ~2 GVA DC: bis zu ~4 GVA
Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte von 100µT (Österreich & Deutschland)	durchgehende Einhaltung nur mit hohem Aufwand	durchgehende Einhaltung nur mit hohem Aufwand	wenn eingegraben, dann ist Einhaltung kein Problem
Platzbedarf	hoch	niedrig	niedrig
Landschaftsbeeinträchtigung	hoch	niedrig	niedrig
akustische Wahrnehmung	möglich durch Koronaerscheinungen und durch Luftströmung	nein	nein
Instandhaltung	Instandhaltung des Übertragungskorridors, Service der Masten und Leitungen	nein (Ölsystem in Ölkabeln)	Korrosionsschutz, Gasdruckeinrichtung

	Freileitung	Kabel	GIL
Lebensdauer	lang	mittel	mittel
Sicherheit für Mensch und Tier	Bruch, runterfallende Komponenten und Eislast	niedrig	niedrig (eventuell durch Verlust von SF ₆)
Umweltrisiko	keines	niedrig (eventuell im Fall eines Feuers und in der Bodenerwärmung)	Verlust von SF ₆ (solange kein umweltfreundliches Gas existiert)
Mögliche Fehlerursachen	atmosphärische Entladung, Mast oder Isolatorbruch, Wind- und Eislasten, Isolatorverschmutzung, empfindlich gegen Erdbeben	Schäden durch Grabungsarbeiten, Feuer, Leiterfehler, Isolationsfehler,	Schäden durch Grabungsarbeiten, empfindlich gegen Erdbeben
Durchschnittliche Ausfallszeit pro Fehlerfall	Minuten	Stunden bis Tage	keine Angaben
Empfindlichkeit gegen atmosphärische Einflüsse	hoch, (Überschläge, Blitze, Eis- und Windlasten)	niedrig	niedrig
Investitionskosten	niedrig	hoch	hoch

3. Supraleitung

3.1. Einleitung

Eine der wichtigsten Komponenten der Energieübertragung vom Kraftwerk zum Verbraucher ist das stromführende Kabel. In Kraftwerken wird in der Regel elektrische Energie als Dreiphasenwechselstrom mit den Frequenzen 50 Hz bzw. 60 Hz erzeugt. Es werden Leistungen im Gigawattbereich produziert und dann zum Stromabnehmer geliefert. Um die Verluste auf dem Transportweg vom Kraftwerk zum Stromkunden gering zu halten, wird die Spannung auf 380 kV und höher transformiert und anschließend am Ende der Übertragungsleitung diese hohe Spannung wieder runtertransformiert. Dadurch fallen weniger Verluste beim Stromtransport an, mit anderen Worten, es wird weniger Verlustleistung beim Stromtransport erzeugt. Diese hohen Spannungen können durch den Einsatz von supraleitenden Kabeln entfallen. Supraleitende Kabel besitzen keinen elektrischen Widerstand, und damit kann die elektrische Energieübertragung auf der Mittelspannungsebene erfolgen. Seit den 1960er Jahren gibt es Untersuchungen zum supraleitenden Kabel in Kombination mit korrespondierenden Transformatoren und Strombegrenzern. In dieser Zeit war es gemäß der nach dem damaligen Wissenstand bekannten Materialien bzw. Materiallegierungen nur mit Hilfe von flüssigem Helium möglich, die supraleitenden Eigenschaften zu erhalten. M.a.W. die Materialien, die die supraleitende Eigenschaft besitzen, konnten nur mit flüssigem Helium gekühlt werden, um Temperaturen von nur wenigen Kelvin, die für die spezielle Eigenschaft der Supraleitung erforderlich sind, zu behalten. Dieses kostenintensive Verfahren mit flüssigem Helium eignet sich daher nur für ausgewählte Anwendungsbereiche. Mit dem Hochtemperatursupraleitern (HTSL oder HTS für high-temperature superconductor) haben sich neue Forschungsbereiche aufgetan. Spezielle HTSL- Materialien besitzen die supraleitende Eigenschaft bis zu 135 K. Diese HTSL- Klasse von keramischen Supraleitern kann mit flüssigem Stickstoff (LN₂, Liquid Nitrogen) gekühlt werden. Flüssiger Stickstoff ist zur Kühlung wesentlich preiswerter und damit wirtschaftlicher als die Verwendung von flüssigem Helium. In den folgenden Kapiteln werden einige Grundlagen dargestellt, Anwendungsbeispiele aufgezeigt und auch welche zukünftigen Anwendungen gefunden werden können, insbesondere worauf geachtet werden muss. Zudem wird auf die zwei grundlegenden Typen von Supraleitern eingegangen. Weiters werden einige Pilotprojekte vorgestellt, die weltweit bereits in verschiedensten Feldversuchen durchgeführt werden. Die Bestrebung ist, diese supraleitende Technologie im größeren Stil kommerziell einzusetzen. Ein erheblicher Vorteil besteht darin, dass eine wesentlich höhere Stromdichte erreicht wird, da keine elektrischen Stromverluste auftreten. Die Energie kann damit auf einer niedrigeren Spannungsebene mit der gleiche Leistung übertragen werden. [CIG1] [KUC1]

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen der Supraleitung sowie die Anwendungsbereiche von supraleitenden Kabeln, das Herstellungsverfahren und wo die Herausforderungen der Supraleitung liegen besprochen. Es wird ein Vergleich aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht zwischen konventionellen Kabeln und supraleitenden Kabeln durchgeführt.

3.2. Elektrotechnische Grundlagen

Wie in der allgemeinen Physik bekannt ist, hängt die elektrische Verlustleistung vom Strom und Widerstand ab. Die Berechnungsformel (Formel 01) hierfür lautet

$$P_v = R * I^2 \quad \text{Formel 01}$$

d. h. bei steigendem Strom steigt die Verlustleistung quadratisch. Zudem muss die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Leiters berücksichtigt werden. Wenn die Temperatur des Leiters steigt, steigt auch der Widerstand (siehe Abbildung 7 – Normalleitungsbereich und Formel 02).

$$R(t) = R(t_0) * [1 + \alpha_{t_0}(t - t_0) + \beta_{t_0}(t - t_0)^2] \quad \text{Formel 02}$$

Generell ist der Grund der, dass bei steigendem Widerstand die Temperatur steigt, indem das Atomgitter mit steigender Temperatur immer stärker zu Schwingen beginnt und dadurch die Elektronen beim Fluss behindert werden (höherer Widerstand). Durch die verschiedenen Stöße von den Elektronen auf das Atomgitter geben die Elektronen Energie in Form von Wärme ab und dadurch steigt die Temperatur im Material. Sozusagen schwingt sich das System auf, wenn die Temperatur nicht an die Umwelt abgegeben wird. [SUP1]

Eine Alternative, die Verlustleistung zu minimieren, ist die Supraleitung. Diese Technologie wird eingesetzt, weil bei gewissen Materialien, subsumiert unter „Supraleiter“, der Gleichstrom bei korrespondierenden niedrigen Temperaturen verlustarm übertragen werden kann. M.a.W. der elektrische Widerstand ist gleich Null. Die Temperatur der supraleitenden Materialien muss allerdings unter der „kritischen Temperatur“ bzw. „Sprungtemperatur“ bleiben (siehe Abbildung 7). Diese kritische Temperatur ist eine Material- bzw. Materiallegierungseigenschaft und somit von Material zu Material unterschiedlich. [SUP1]

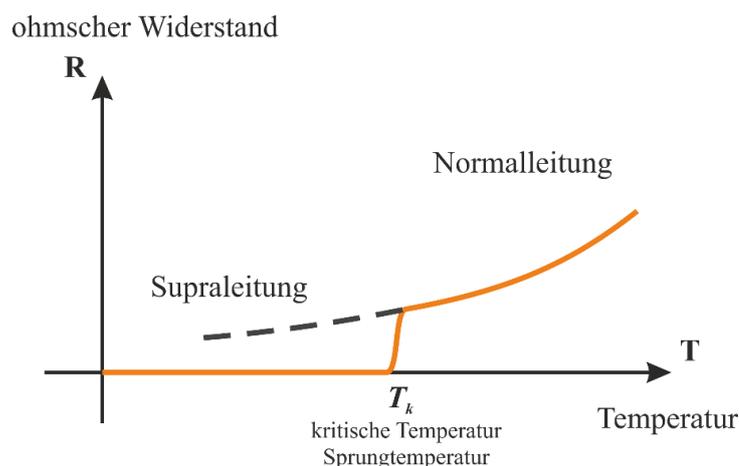


Abbildung 7: Supraleitende Eigenschaften, Sprungtemperatur [SUP1]

Die Supraleitung wurde 1911 von Heike Kamerlingh Onnes, einem dänischen Physiker, entdeckt, indem es ihm als ersten gelang, das letzte Edelgas Helium bei 4,2 K und atmosphärischem Druck zu verflüssigen. Nach diesem Durchbruch konnten nun

weitere Versuche nahe dem absoluten Nullpunkt durchgeführt werden, indem der Druck verringert wurde und damit eine noch niedrigere Temperatur erreicht werden konnte. Quecksilber steht sehr rein zur Verfügung, deshalb verwendete Kamerlingh Onnes Quecksilber. Mit dem flüssigen Helium kühlte er dann Quecksilber auf unter 4,2 K herunter und stellte fest, dass der Leiter keinen elektrischen Widerstand mehr aufwies. 1913 erhielt Onnes für diese bahnbrechende Entdeckung den Nobelpreis für Physik [NOB1]. Von 1911 bis 1986 wurden weitere superleitende Materialien mit einer höheren Sprungtemperatur als Quecksilber, wie z. B. Niobium oder Materialverbindung wie Nb_3Sn , gefunden. Bei diesen Materialien liegt die Sprungtemperatur bei ca. 20 K. Auf die Niedertemperatursupraleiter (Supraleiter 1. Art und teilweise 2. Art) wird später noch näher eingegangen. Nach 1986 wurden Supraleiter auf Oxidbasis entdeckt. Diese wurden Hochtemperatursupraleiter getauft, weil diese die Eigenschaften der Supraleitung auch noch über dem Siedepunkt von flüssigem Stickstoff von 77 K besitzen. Dadurch kann flüssiger Stickstoff als Kühlmedium verwendet werden. [SUP1]

Physikalisch gesehen kommt es immer zur Bildung sogenannter Cooper-Paare, das sind zwei Elektronen, die sich ohne ohmschen Widerstand in der Gitterstruktur bewegen können. Die Gründe, wie es zu solch einer Cooper-Paar-Bildung kommt, sind unterschiedlich. Es gibt aber in allen Fällen ein Austauschteilchen. Bei dem Supraleiter 1. Art ist ein solches Austauschteilchen ein Phonon. Ein Phonon ist ein Quasiteilchen, mit dem die quantenmechanische Gitterschwingung in einem Modell beschrieben werden kann. Bei Supraleiter 2. Art existiert zurzeit noch keine von den Wissenschaftlern akzeptierte Modellbeschreibung wie es zu einer Cooper-Paar-Bildung kommt.

Allgemein ist das Phänomen der Supraleitung auf die Summe der drei Faktoren limitiert:

- die kritische Temperatur T_k
- die kritische magnetische Flussdichte B_k
- die kritische Stromdichte J_k .

Übersteigt die Summe dieser drei Faktoren den Grenzwert, dann wird genügend Energie freigesetzt, und das Material verliert seine supraleitende Eigenschaft. M.a.W. die Supraleitung ist eine Funktion der magnetischen Flussdichte, der Stromdichte und der Temperatur. Abbildung 8 stellt den Zusammenhang dieser drei Faktoren dar. Zur Erhaltung der supraleitenden Eigenschaft müssen alle drei Faktoren unterhalb der kritischen Grenze liegen. Wenn z.B. keine Stromdichte ($J = 0$) und keine magnetische Flussdichte ($B = 0$) vorliegt, dann ist bis zur kritischen Temperatur ($T \leq T_k$) die Eigenschaft der Supraleitung gegeben. Liegt keine magnetische Flussdichte ($B = 0$) vor, aber eine Stromdichte ($0 < J < J_k$) dann ist die kritische Temperatur kleiner als die Temperatur, wenn kein Strom fließen würde. Wenn alle drei Parameter vorhanden sind, ist die Supraleitereigenschaft eine Funktion von allen drei Parametern.

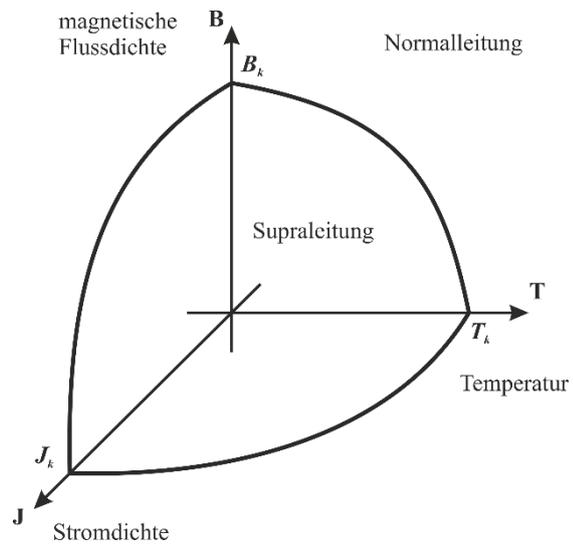


Abbildung 8: Existenz der supraleitenden Eigenschaft

3.2.1. Typ I und Typ II Supraleiter im Magnetfeld

Wie in den vorhergehenden Kapiteln schon kurz erwähnt, wird zwischen zwei Arten von Supraleitern unterschieden: der ersten Art, dieser ist der Typ I Supraleiter bzw. Supraleiter 1. Art und die zweite Art, also ein Typ II Supraleiter bzw. Supraleiter 2. Art. Das Unterscheidungskriterium wird unter anderem durch das Verhalten der Supraleiter im Magnetfeld bestimmt.

Der Supraleiter 1. Art verdrängt, wie in Abbildung 9 ersichtlich, das von außen angelegte Magnetfeld fast komplett, aber nur bis zur Grenze von maximal B_k , dem kritischen Magnetfeld. Ein weiterer Effekt ist auch noch zu beobachten: Wenn am Supraleiter ein äußeres Magnetfeld anliegt, werden magnetische Feldlinien in eine dünne Außenschicht gedrängt, und das Innere des Materials bleibt von magnetischen Feldlinien frei.

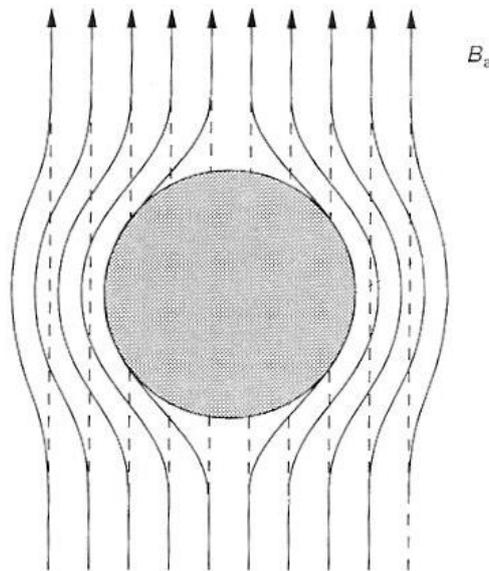


Abbildung 9: Verdrängung des Magnetfeldes (durchgezogene Feldlinien).
Homogenes Feld vor der Einbringung der Kugel (gestrichelte Feldlinien) [SUP1]

Dieser Effekt der vollständigen Feldverdrängung wird idealer Diamagnetismus oder Meißner-Ochsenfeld-Effekt genannt, nach den Entdeckern Walther Meißner und Robert Ochsenfeld. In Abbildung 9 ist klar ersichtlich, dass die gestrichelten Feldlinien nach außen verdrängt werden, wenn das Material, die Kugel, supraleitend wird. Es entsteht danach ein Magnetfeldverlauf, wie es die durchgezogenen Feldlinien darstellen. Zudem ist anzuführen, dass in der Meißner-Phase, in der kein Magnetfeld im Inneren des Leiters vorherrscht, im Inneren des Leiters auch kein Strom fließt, weil ansonsten durch den Stromfluss ein Magnetfeld hervorgerufen werden würde. [SUP1] Geeignete Vertreter von Supraleitern 1. Art sind Materialien wie Quecksilber (Hg) und Blei (Pb). Eine (alles) erklärende Beschreibung für den Typ I Supraleiter ist die BCS-Theorie, nach den Forschern Bardeen, Cooper und Schrieffer benannt [BCS1]. Diese Forscher erhielten 1972 den Nobelpreis der Physik [NOB1].

Ein Supraleiter 2. Art hat bei kleinem Magnetfeld ($B_k < B_{k1}$) die gleichen Eigenschaften wie ein Supraleiter 1. Art. M.a.W er befindet sich in der Meißner-Phase.

Ist aber das äußere Magnetfeld größer als B_{k1} ($B > B_{k1}$), geht der Supraleiter in die Schubnikow-Phase über. Die Schubnikow- oder Mischphase gilt für Supraleiter 2. Art, wenn das magnetische Außenfeld B_a im Bereich zwischen B_{k1} und B_{k2} liegt. Der magnetische Fluss B_{k2} kann allerdings um ein Vielfaches größer sein als B_{k1} und Werte von über 100 Tesla erreichen. Dieser Bereich zwischen den beiden kritischen magnetischen Feldern B_{k1} und B_{k2} wird Schubnikow-Phase genannt. Es dringt in dieser Phase teilweise ein Magnetfeld ein, und es bilden sich Ableitströme, die sich zu so genannten Flussschläuchen bündeln. Diese Schläuche oder Wirbel ordnen sich, beim ideal homogenen Supraleiter, allgemein dreieckförmig an. Dies ist in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Jeder Flussschlauch besteht aus einem System von Ringströmen. Diese erzeugen ein magnetisches Feld, und das äußere Feld wird in die Flussschläuche hineingedrängt und dadurch gibt es kein Magnetfeld zwischen den Schläuchen. Wenn nun ein höheres äußeres Magnetfeld angelegt wird, wird der Abstand zwischen den Flussschläuchen bzw. Flusswirbeln kleiner. [SUP1] Prinzipiell ist zu sagen, wenn die magnetische Flussdichte über B_{k2} tritt, verliert der Supraleiter seine Eigenschaften als solcher und geht in die normalleitende Phase über.

Für den Typ II Supraleiter, zu der auch die Gruppe der Hochtemperatursupraleiter dazugehört wurde noch keine allgemein gültige Theorie entwickelt.

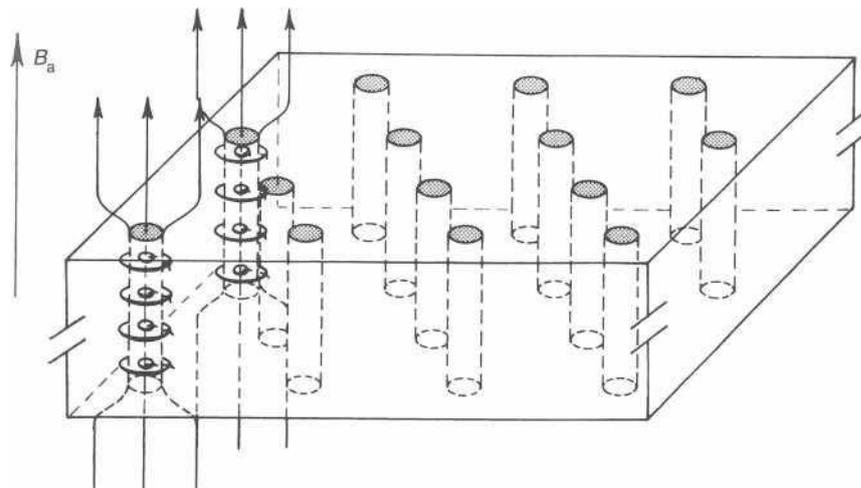


Abbildung 10: Schubnikow-Phase (schematisch) Magnetfeld und Supraströme sind für zwei Flussschläuche gezeichnet [SUP1]

3.2.2. Kritische Stromdichte [SUP1]

Der dritte Parameter ist die Stromdichte J . Wie oben erwähnt darf die kritische Stromdichte ($J < J_k$) nicht überschritten werden. Bevor die kritische Stromdichte detaillierter betrachtet wird, soll noch der Josephson-Effekt dargestellt werden. Der Josephson-Effekt wurde von Brian Josephson in einer theoretischen Arbeit 1962 beschrieben und konnte später durch zahlreiche Experimente verifiziert werden. 1973 erhielt Brian Josephson den Nobelpreis der Physik [NOB1]. Stellen wir uns zwei Supraleiter vor, welche durch nur eine wenige nm dicke, nicht supraleitende Schicht (z. B. ein Isolator) getrennt sind. M.a.W. eine Sandwichbauweise aus drei Schichten, die obere und untere Schicht bestehen aus Supraleitermaterial und die mittlere aus einer nichtleitenden dünnen Barriere. In Abbildung 11 ist der Aufbau schematisch

dargestellt. Cooper-Paare können von einer Supraleiterschicht durch die Barriere in die andere Supraleiterschicht tunneln. Dieses Phänomen wird in der Physik als quantenmechanischer Tunneleffekt bezeichnet. Der Josephson-Effekt tritt nur in Verbindung mit Supraleitung auf. Mit den Josephson-Kontakten können Spezialanwendungen realisiert werden. Diese Grundlage bzw. Tatsache macht es überhaupt möglich, dass es Hochtemperatursupraleiter gibt.

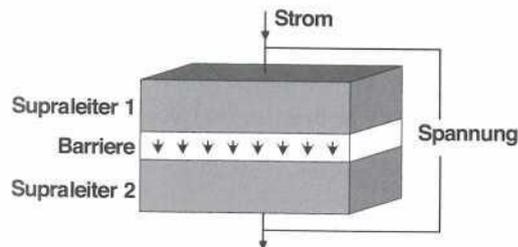


Abbildung 11: Sandwich-Struktur von zwei Supraleitern durch eine dünne Barriere getrennt [SUP1]

Wie vorhin erwähnt, gibt es eine kritische Stromdichte J_k bzw. eine kritische Geschwindigkeit des Suprastromes, bei der die Cooper-Paare aufgebrochen werden und dem Material die supraleitende Eigenschaft verloren geht. Diese Überlegungen für den kritischen Strom sind speziell für Supraleiter 2. Art von Bedeutung. Die Leiter auf Basis des Supraleiters 2. Art können zwar extrem hohen Magnetfeldern standhalten, aber einem verhältnismäßig kleinen Strom. Es ist natürlich auch wichtig, dass sie einen großen Strom widerstandsfrei transportieren können. Diese Anforderung konnte mit sogenannten harten Supraleitern weitgehend gelöst werden. Es werden nun die beiden Typen separat betrachtet.

Bei dem Typ I Supraleiter ist der Strom mit dem Magnetfeld gekoppelt. Wie unter 3.2.1 angeführt, fließt im Inneren des Supraleiters der 1. Art kein Strom, wie Abbildung 12 zeigt. Die Ströme fließen daher nur an der Oberfläche des Supraleiters. Die Ringströme des Supraleiters werden Transportströme bzw. Abschirmströme genannt. Die Eindringtiefe des Stromes ist stets die Londonsche Eindringtiefe λ_L , die typischerweise eine Bandbreite von mehreren 10 nm bis zu 100 nm aufweist [TTP1]. Je kleiner die Differenz zwischen der Temperatur des Supraleiters und der kritischen Temperatur T_k ist, desto größer wird die Londonsche Eindringtiefe λ_L , bis es zum Zerfall der supraleitenden Eigenschaft kommt. M.a.W. die kritische Stromstärke ist somit von der Geometrie des Leiters abhängig. Eine Erhöhung der kritischen Stromstärke kann z. B. durch einen größeren Radius bewirkt werden, da der gesamte Strom auf der dünnen Oberflächenschicht transportiert wird. Wenn die kritische magnetische Feldstärke B_k erreicht wird, ist auch gleichzeitig die kritische Stromdichte J_k erreicht. Das wiederum heißt, dass der Strom mit dem Magnetfeld gekoppelt ist. Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, fällt die Stromdichte von der Leiteroberfläche nach innen exponentiell ab. Damit diese Bedingung erfüllt ist, muss der Radius des Supraleiters immer größer als die Londonsche Eindringtiefe λ_L sein. Angenommen, der Strom wird erhöht, und zwar über die leiterkritische Stromdichte, dann wird der Supraleiter instabil und geht in den normalleitenden Zustand über, und der gesamte Querschnitt leitet. Es verteilt sich allerdings der Strom auf den ganzen Querschnitt.

Dadurch ist die kritische Stromdichte des Leiters wieder unterschritten. In diesem Fall geht der Supraleiter in einen Zwischenzustand über, indem supraleitende und normalleitende Bereiche koexistieren.

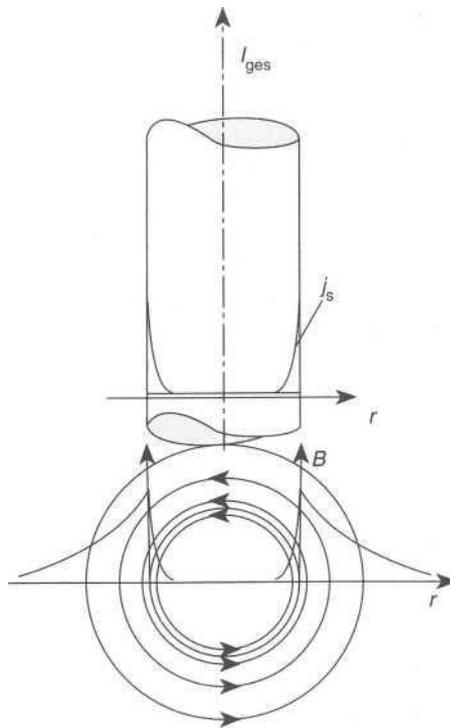


Abbildung 12: Stromdichte- und Magnetfeldverteilung in einem supraleitenden Transportstrom [SUP1]

Die kritische Stromstärke I_k verhält sich beim Typ II Supraleiter wie beim Supraleiter der 1. Art, wenn genügend kleine Ströme und Magnetfelder vorherrschen. M.a.W. er befindet sich in der Meißner-Phase. Dies bedeutet, das Magnetfeld wird vollkommen aus dem Innenraum verdrängt, und der Strom fließt nur in der dünnen Oberflächenschicht mit der Eindringtiefe λ_l . Wie unter 3.2.1 erklärt, bildet sich erst oberhalb der ersten kritischen magnetischen Feldstärke B_{k1} Flussschläuche, und der Leiter geht in die Schubnikow-Phase über. Auch bei einem idealen homogenen Typ II Supraleiter gibt es in der Schubnikow-Phase normalleitende Bereiche, wie aus der Anordnung und Lage der Flussschläuche zu erkennen ist. D. h. bei kleinen Belastungsströmen existiert ein endlicher Widerstand [PLK1]. In Abbildung 13 ist ersichtlich, dass eine Kraft auf die Flussschläuche wirkt. Dies ist die Lorentz-Kraft, laut Formel 03.

$$F_L = I * l * B \quad \text{Formel 03}$$

Da der Strom im Metall festgehalten wird, werden die Flusswirbel in Richtung der eingezeichneten Kraft getragen, d. h. die Flusswirbel wandern quer zum Fluss Schlauch, also zur eigenen Achse. [PLG1]. Da bei der Bewegung von diesen Flussschläuchen Energie verloren geht, m.a.W elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird, tritt eine elektrische Spannung auf, das heißt, es gibt einen Widerstand. Somit muss der Strom bei einem idealen Typ II Supraleiter in der Schubnikow-Phase gleich Null sein, um keinen Widerstand zu haben. Es kann aber verhindert werden, dass die

Flussschläuche wandern, indem sie verankert (pinning) werden. Dies ist mit harten Supraleitern möglich, indem Haftstellen ins Material eingebracht werden - sogenannte pinning centers, um trotzdem hohe Ströme zu transportieren.

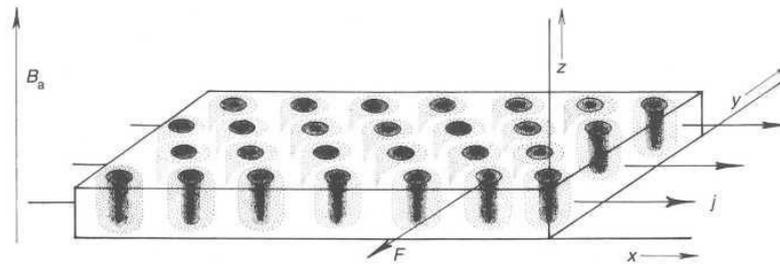


Abbildung 13: Schubnikow-Phase Transportstromdichte J , Flussschlauchkraft F und äußere Feld B_a [SUP1]

Diese harten Supraleiter besitzen Eigenschaften, die für praktische Anwendungen wie z. B. zur Übertragung elektrischer Energie wirtschaftlich einsetzbar sind. Die Verankerung solcher Flusswirbel erfolgt durch erzeugte Fehlstellen, die für diese eine energetisch bevorzugte Lage haben. Wie allgemein bekannt ist, wandern die Flussschläuche solange nicht, bis die Lorentz-Kraft F_L größer als die Haftkraft ist. Wenn F_L gleich der Haftkraft ist, wird der kritische Strom erreicht, und es treten mehr Verluste auf.

3.3. Supraleitende Materialien

Nachfolgend, in Abbildung 14, findet sich eine kurze Übersicht, in welchem Jahr die verschiedenen supraleitenden Materialien entdeckt wurden. Einen großen Entwicklungssprung im Hinblick auf die Temperatur gab es mit den Supraleitern auf Keramikbasis, die Kuprate. Dieses sogenannten HTS-Material wurden Mitte der 1980er Jahre entdeckt.

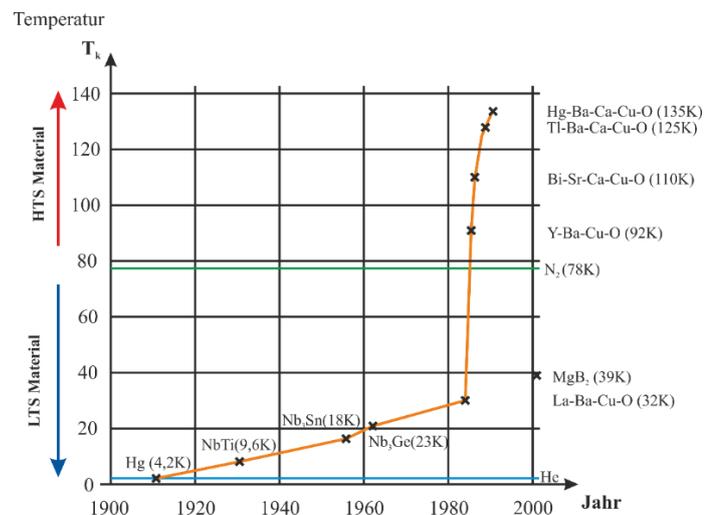


Abbildung 14: Supraleitende Materialien mit der kritischen Temperatur auf das Jahr der Entdeckung aufgetragen [SUP1]

Die recht spät entdeckte Supraleitung von MgB_2 im Jahr 2001 kam etwas überraschend, weil das Material schon in den 1950er Jahren kommerziell erhältlich war. Dieses Material ist ein Typ II Supraleiter und gehört zu der Gruppe der Niedrigtemperatursupraleiter (LTS-Material). MgB_2 könnte damit auch mit flüssigem Neon gekühlt werden, aber wegen der damit verbundenen Explosionsgefahr wurde stets Helium als Kühlmedium verwendet [CHS1]. Der große Vorteil von Hochtemperatursupraleitern ist, dass diese Leiter relativ günstig im Vergleich zu Helium oder Neon mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden können. [SUP1]

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind keramische Hochtemperatursupraleiter mit Kupferoxid und deren Sprungtemperatur in Kelvin dargestellt. Aus dieser Tabelle ist der Zusammenhang zwischen Anzahl der Kupferoxidpaare (CuO_2) und der kritischen Temperatur ersichtlich. Je mehr Kupferoxidpaare (CuO_2) eine Verbindung eingehen, desto höher ist die kritische Temperatur.

Tabelle 2: Kristallstruktur/Verbindung von Hochtemperatursupraleitern (HTSC) mit der kritischen Temperatur und deren Abkürzungen [CSS1] [KIT1]

Kristallstruktur	Verbindung	Anzahl von CuO_2 -Paaren	T_c in K	Abkürzung
(Y, Ca) HTSC	$(Y,Ca)Ba_2Cu_3O_{7-x}$	3	90	(Y,Ca)-123 (2G)
Bi HTSC	$Bi_2Sr_2CuO_6$	1	~12	Bi-2201
	$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	2	95	Bi-2212
	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	3	110	Bi-2223 (1G)
Tl HTSC	$Tl_2Ba_2CuO_6$	1	95	Tl-2201
	$Tl_2Ba_2CaCu_2O_2$	2	105	Tl-2212
	$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	3	125	Tl-2223
Hg HTSC	$HgBa_2CuO_4$	1	98	Hg-1201
	$HgBa_2CaCu_2O_6$	2	128	Hg-1212
	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{28}$	3	135	Hg-1223

3.4. Wechselfeldverhalten

Wir haben bisher im Allgemeinen nur den Gleichstrom betrachtet, dort besitzt der Supraleiter keinen elektrischen Widerstand, aber was passiert bei Wechselstrom? Durch den sinusförmigen Strom entsteht ein sinusförmiges magnetisches Wechselfeld mit dem Wert $\pm B_{ac}$ um einen Mittelwert B_0 . Dadurch erhält man eine Hystereseschleife in der Magnetisierungskurve, in der ein Energieverlust auftritt, indem in der eingeschlossenen Fläche bei jedem Umlauf Energie umgesetzt bzw. freigesetzt wird. Bei diesem Wechselfeld dringen Flusswirbel in den Supraleiter ein und wieder aus, dabei geht Energie verloren. Steigt aber das magnetische Feld, dringen die Flusswirbel immer tiefer in das Material ein und es entstehen größere Verluste. Wenn ein kritisches B_{ac} erreicht wird und diese Flusswirbel im Zentrum angelangt sind, treten die maximalen Verluste auf. Wenn das Feld weiter erhöht wird, werden die Flusswirbel wieder auf die Leiteroberfläche hinausgedrängt, und die Verlustleistung sinkt wieder. Wenn das Material komplett mit Flusswirbel durchsetzt ist, wandern die Flusswirbel nur noch über kurze Distanzen. Grundlegend ist noch zu sagen, dass bei zeitlich veränderlichen Magnetfelder sich elektrische Felder aufbauen, die nach der zweiten

Maxwellgleichung (Formel 04) definiert sind. Dadurch entstehen Verluste durch Wirbelströme.

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Formel 04}$$

Es ist aus der zweiten Maxwellgleichung ersichtlich, dass sich ,wenn das Feld \mathbf{B} ändert, sich dadurch die elektrischen Felder verändern. Daraus resultiert, dass sich die Verluste erhöhen. Eine recht einfache Möglichkeit, diese Felder teilweise zu kompensieren, ist die Verdrillung der einzelnen Leiter, damit heben sich die Felder gegenseitig fast vollkommen auf. [SST5]

3.5. Herstellung

Bei Kupraten, wie sie als Hochtemperatursupraleiter eingesetzt werden, finden sich CuO_2 , das sind in diesem Fall Kupfer-Sauerstoff-Verbindungen bzw. MgB_2 . Bei diesen beiden Materialverbindungen ist die Herstellung eines guten Leiters schwieriger als bei Nb_3Sn [SST4]. Ein häufig eingesetztes Verfahren bei der Herstellung von sogenannten HTS-Leitern der 1. Generation ist die PIT(Powder in Tube)-Technik. Es können mit der PIT-Methode sowohl runde Drähte als auch Bandleiter hergestellt werden. Die PIT-Technik eignet sich besonders gut für die Herstellung von Leitern bzw. Bändern auf der Basis von Bi-HTSC Materialien. Bei der Herstellung solcher Bänder bzw. Leiter wird das Ausgangsmaterial in Silberrohre gefüllt und mit einer komplexen Abfolge von Zieh-, Walz-, Glühritten (Abbildung 15) in die endgültige Form gebracht, wie in Abbildung 16 als Querschnittsdarstellung ersichtlich ist. [ZIE2]

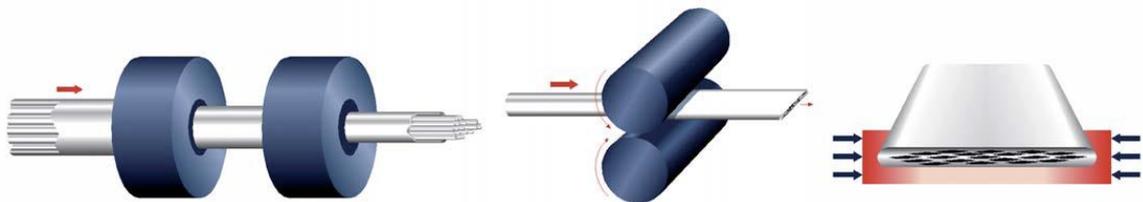


Abbildung 15: Herstellungsverfahren im PIT Verfahren (Ziehen, Walzen und Glühen) [ZIE2]]

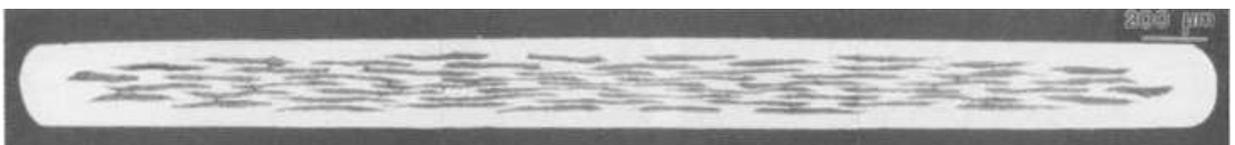


Abbildung 16: Querschnitt von Bi-2223-Bandleiter [SUP1]

Diese Herstellungsverfahren sind einerseits wegen der Komplexität und Anzahl der benötigten Fertigungsschritte und andererseits von der Silbermatrix sehr aufwendig und teuer. Ein neueres Verfahren, das in den letzten Jahren stark forciert wurde und auch schon eingesetzt wird, ist eine Fertigungsmethode, bei der als Basis ein Nickel- oder Nickel-Kupfer-Band verwendet wird und darauf eine $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Schicht aufgebracht wird, welche mit möglichst perfekter Kristallorientierung wächst. Dieses

Fertigungsverfahren ist auch bei längeren Bändern noch preiswert und zudem praktikabel. Abbildung 17 zeigt den Größenunterschied von supraleitenden Kabeln und konventionellen Kupferkabeln mit derselben Stromtragfähigkeit. Bei den supraleitenden Leitern handelt es sich um sogenannte Bänder der zweiten Generation, die in hoher Qualität, mit Längen von über 1 km und Strombelastbarkeit von über 100 A hergestellt werden können. [SUP1]

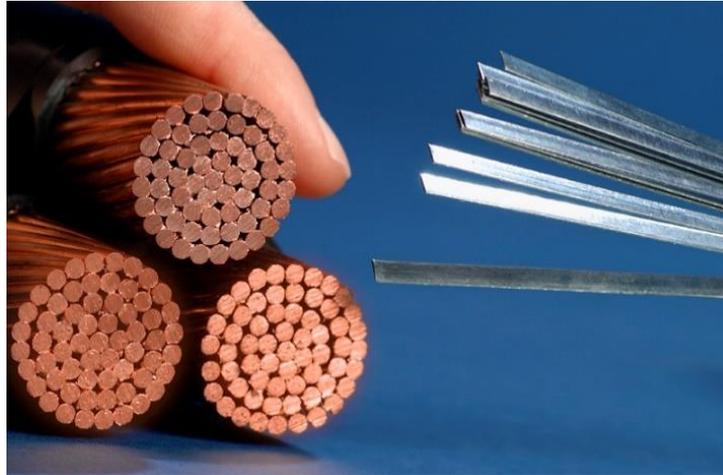


Abbildung 17: Konventionelle Kupferkabel vs. supraleitende Bänder mit gleicher Stromtragfähigkeit [SBK1]

Deswegen gibt es auch zwei weitere wichtige Herstellungsmethoden, um die Kosten bei Massenproduktion zu senken und lange Leiter zu produzieren. Die eine ist die „RABiTS“-Methode, das für „Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate“ [PLG2] steht, und die andere ist das „IBAD“-Beschichtungsverfahren, welches für „Ion Beam Assisted Deposition“ steht [SST2] [SST3]. Mit diesen beiden Verfahren können Hochtemperatursupraleiter der 2. Generation hergestellt werden, bei denen auf die teure Silbermatrix verzichtet werden kann. Durch den Verzicht auf die teure Silbermatrix ist die Produktion dieser HTS-Kabel wesentlich preisgünstiger. Bei der RABiTS-Methode werden durch Rollprozesse die Kristalle in zwei Richtungen ausgerichtet, im nächsten Arbeitsgang wird das YBa_2CuO_x auf der Nickellegierung aufgedampft, um diese Schicht dann wachsen zu lassen. Die kritische Stromdichte bei solchen Leitern beträgt 10^5 A/cm^2 bei 77 K. Mit einem äußeren Magnetfeld verhält sich der Supraleiter analog zu Materialien auf einkristallinem Keramik-Substrat. Ein ähnliches Verfahren ist die sog. MOD-Methode, die für „Metal Organic Deposition“ steht, hierbei wird das YBa_2CuO_7 aus einer organischen Lösung heraus abgeschieden. Abbildung 18 zeigt das Schichtenmodell eines RABiTS/MOD-Prozesses einen auf Kupfer- und Silberbasis hergestellten Supraleiters. [SUP1]

Die andere Herstellungsmethode ist eine ionenstrahlgestützte Beschichtungstechnik (IBAD-Verfahren). Hierbei wird in der Regel die vergleichsweise teure und sehr aufwendige Laserdeposition angewendet. Beim Aufwachsen der Pufferschichten wird zusätzlich ein Ionenstrahl verwendet, um die falsch ausgerichteten Kristalle wieder wegzuzüchten. Es kommt dann zusätzlich noch eine Kalziumschicht darüber, um die Korngrenzen zu überdecken und den kritischen Strom zu erhöhen. Es gibt dadurch weniger Aufladungseffekte an der Korngrenze. [ZIE2]

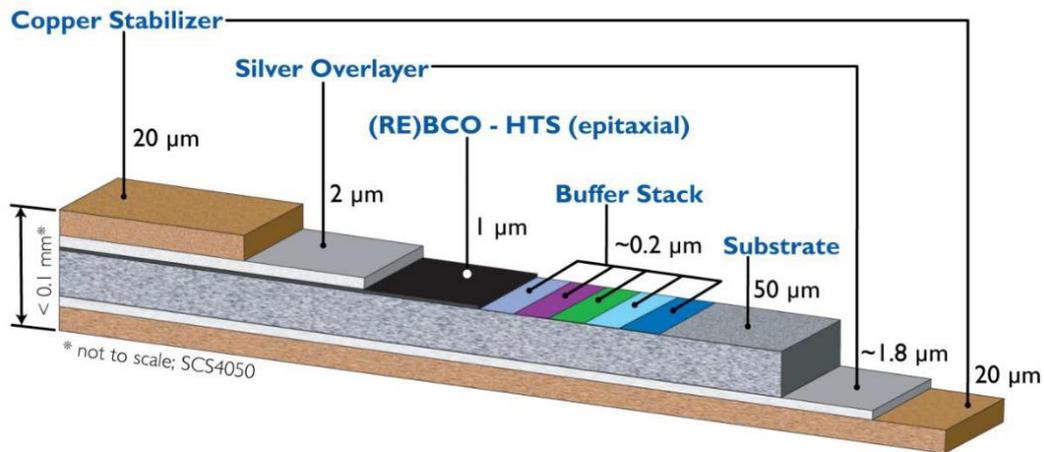


Abbildung 18: Schematische Darstellung RABiTS/MOD-Prozess auf Basis von Kupfer und Silber [Quelle: Superpower]

Da der Stromfluss wie eingangs erwähnt in der Meißner-Phase nur an einer sehr dünnen Oberfläche fließt, werden größtenteils sehr dünne Bandleiter hergestellt, die dünner als 0,1 mm sind.

Nicht nur bei der Energieübertragung in Großstädten ist der Einsatz von Hochtemperatursupraleitern und MgB_2 -Supraleitern interessant, sondern auch die Zuführung bei 77 K zu supraleitenden Magneten wie NbTi oder Nb_3Sn , die mit flüssigem Helium bei 4 K betrieben werden. Diese Stromleitungen haben einen sehr hohen Strom zu tragen, um möglichst wenig Wärme in das System zu bringen, wie es ansonsten mit konventionellen Kabeln der Fall wäre. Dies war eine der ersten kommerziellen Anwendungen von supraleitenden Kabeln in der Energietechnik, natürlich über eine sehr kurze Strecke. [SUP1]

3.6. Warmes und kaltes Dielektrikum

Wie aus Abbildung 19 ersichtlich, sieht der Aufbau ähnlich normaler Energiekabel aus, anstelle des Kupfer/Aluminium-Leiters werden supraleitende Materialien verwendet. Der Aufbau besteht aus einem evakuierten Kryostat und den Kühlpipelines, wo das LN_2 durchströmt. Die Kühlung wird mit einem Stickstoffvorlauf sowie einem Rücklauf durchgeführt, der innerhalb eines Kryostats verläuft. Diese Art von Kabel wird auch „Cold Dielectric“ oder „kaltes Dielektrikum“ genannt, weil sich das Dielektrikum, d. h. die elektrische Isolierung, innerhalb des Kryostats befindet. Konventionelle Isoliermedien, die bei normalen Kabeln verwendet werden, können nur in seltenen Fällen eingesetzt werden, weil diese bei tiefen Temperaturen spröde werden bzw. die mechanischen Eigenschaften für den Einsatz nicht geeignet sind. Daher wird als Dielektrikum Polypropylen-laminiertes Papier, kurz PPLP (Polypropylene laminated paper), verwendet. Es wird in mehreren Schichten aufgetragen und befindet sich jeweils zwischen zwei leitfähigen Schichten, um das Feld zu homogenisieren und damit Teilentladungen zu reduzieren. Der große Vorteil von Kabeln mit kaltem Dielektrikum ist der supraleitende Schirm, damit kann das Magnetfeld vollkommen kompensiert werden, und es treten keine Streufelder auf. Durch die vollkommene Kompensation des Magnetfeldes können die Abmessungen des Kabels sehr kompakt

gehalten werden. Der einzige Nachteil sind die Kosten, weil für den Schirm ein supraleitendes Material verwendet werden muss. [KIT2]

In der folgenden Abbildung 19 ist ein Triaxialkabel dargestellt, das auch beim AmpaCity-Projekt verwendet wird. Hierbei ist der Schirm aber nicht supraleitend aufgebaut. Indem alle drei Leiter in einem Kryostat konzentrisch angeordnet sind, kann das Kabel wesentlich kompakter gebaut werden als bei Verwendung von drei Einzelleitern. Die Spannungshöhe ist von der Isolierung abhängig. Ist die Isolierung allerdings zu stark, also zu dick, kann es nicht auf einer Kabeltrommel zum Transport aufgerollt werden. Auf Grund des verhältnismäßig großen Kabeldurchmessers und der fehlenden Flexibilität ist das Kabel nur für Anwendungen der Mittelspannung bis zur niedrigen Hochspannung verwendbar, also bis zu einer Spannung von ca. 154 kV. Ein Kabel dieser Art ist in Entwicklung und wird voraussichtlich 2014/15 zum Einsatz kommen, siehe Tabelle 9 von LS Cable in Korea.

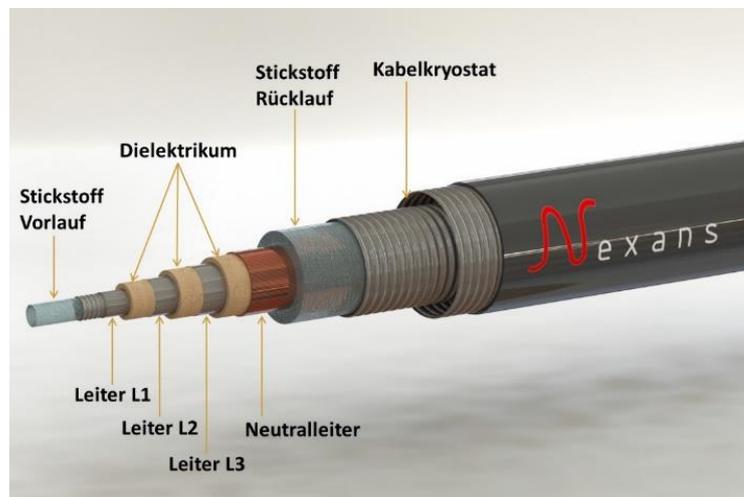


Abbildung 19: Triaxialkabel mit 10 kV und 2400 A Dauerstrom, kaltes Dielektrikum (Quelle: Nexans Deutschland)

Der Aufbau eines „Warm Dielectric“-Kabels ist wesentlich anders, wie in Abbildung 20 dargestellt. Hier können nur einphasige Kabel hergestellt werden, weil die Isolierung nach dem Kryostat kommt. Indem das Kryostat innerhalb der Isolierung ist, gestattet diese nur die Herstellung von einphasigen Leitern. Da zwischen den Leitern immer ein Dielektrikum vorhanden sein muss, ist es nicht möglich, mehrere Leiter durch die Verwendung eines Kryostats zu realisieren. Jeder Leiter benötigt jeweils als thermische Isolierung ein Kryostat.

Der Aufbau eines „Warm Dielectric“-Kabels besitzt

- einen Vorlauf der Kühlung im Inneren,
- den Supraleiter,
- den Rücklauf der inneren Kühlung,
- das Kryostat
- und dann erst die Isolierung mit einem Schutzschirm und einer Ummantelung.

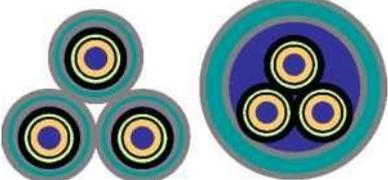
Die elektrische Isolierung ist mit zwei leitfähigen Schichten aufgebaut. Zwischen den beiden leitfähigen Schichten befindet sich das Dielektrikum, um die Aufladungen im Dielektrikum zu mindern, ähnlicher Aufbau wie bei einem Kabel mit kaltem Dielektrikum. Danach kommen noch ein Schirm und eine Schutzhülle aus PVC dazu, um vor Korrosion und vor Montagebeschädigungen zu schützen. Der Vorteil der Anwendung von einem warmem Dielektrikum ist, dass im Vergleich zum kaltem Dielektrikum weniger vom teuren supraleitenden Material benötigt wird denn der Schirm bzw. Rückleiter wird bei Kabeln mit warmem Dielektrikum nicht supraleitend aufgebaut. Dadurch kommt es bei dieser Anordnung zu hohen Streufeldern, und damit sind die elektrischen Verluste höher. Aufgrund der höheren Kräfte, die auftreten können, wenn das Kabel durch einen Fehler belastet wird, können die einzelnen Kabel nicht gebündelt werden, und dadurch ist ein höherer Platzbedarf bei der Verlegung erforderlich. [KIT2]



Abbildung 20: Ein HTS-Kabel mit warmem Dielektrikum [NSC2]

In der Tabelle 3 sind die möglichen und sinnvollen Anordnungen sowie Vorteile und Nachteile von einem Einleiter HTSL-Kabel mit warmen Dielektrikum, einem Einleiter HTSL-Koaxialkabel mit kaltem Dielektrikum und einem HTSL-Triaxialkabel ebenfalls mit einem kaltem Dielektrikum zusammengefasst.

Tabelle 3: Anordnung und technischer Vergleich von HTSL-Kabeln [KIT2]

Einleiter HTSL-Kabel (warmes Dielektrikum)	Einleiter HTSL-Koaxialkabel (kaltes Dielektrikum)	HTSL-Triaxialkabel (kaltes Dielektrikum)
Anordnung		
	 <p style="text-align: center;">(a) (b)</p>	
Eigenschaftenvergleich		
<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ geringer Supraleiterbedarf ➤ elektrische Isolation auf Raumtemperatur <p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Streufeld ➤ Übertragungseigenschaften ähnlich einem konv. Kabel ➤ Abstand zwischen den Leitern (Kräfte) ➤ relativ großer Durchmesser (abhängig von der Spannungsebene) ➤ daher nur praktikabel für Mittelspannung 	<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ kein Streufeld ➤ größte Längen (a) ➤ höchste Spannungen (a) ➤ kompaktes Design (b) ➤ Ausdehnung innerhalb des Kryostats (b) ➤ für Mittel- und „niedrige“ Hochspannung (b) <p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ höherer Supraleiterbedarf ➤ kleinere Induktivität als konv. Kabel ➤ größere Kapazität als konv. Kabel 	<p>Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ kein Streufeld (wenn der Schirm supraleitend ausgeführt ist) ➤ geringer Supraleiterbedarf ➤ kompaktes Design ➤ geringe Induktivität <p>Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ nur für Mittelspannung

3.7. Kühlsystem

Das Kühlsystem für eine HTS-Leistungsanwendung, welche mit LN_2 gekühlt wird, besteht aus mehreren Komponenten. Die Kühlung wäre auch mit flüssigem Neon (Siedepunkt bei 27,15 K) möglich. Neon kommt auf der Erde selten vor, erfordert eine komplizierte Herstellung und ist trotz der hohen Kühlleistung teurer als flüssiger Stickstoff [LTP1]. In Abbildung 21 sind die Hauptkomponenten schematisch dargestellt.

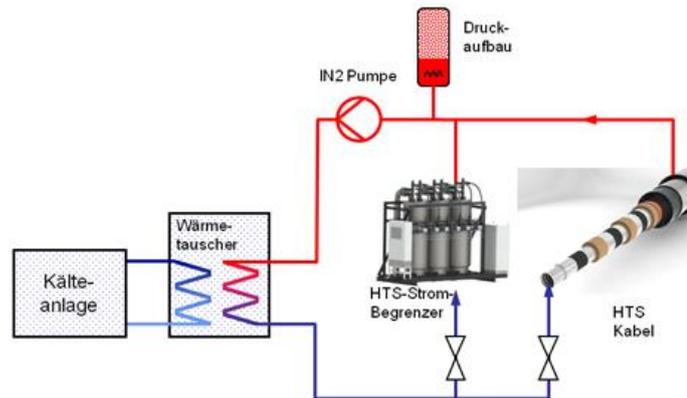


Abbildung 21: Schematischer Aufbau von einem Kühlsystem eines HTS-Kabels und HTS-Strombegrenzers [SCO1]

Die Kühlflüssigkeit wird mit Druck durch das System gepumpt, dies geschieht mit einer LN_2 -Pumpe. Wenn der flüssige Stickstoff wieder zurück zum Wärmetauscher kommt, wird der leicht erwärmte flüssige Stickstoff wieder auf Solltemperatur über einen Wärmetauscher heruntergekühlt. Der Wärmeeintrag in das Kryostat beträgt zwischen 1,5 - 2,5 Watt pro Meter Leiterlänge [TAS1]. Zudem kommen noch die Verluste der Endverschlüsse, diese Verluste liegen i.d.R. zwischen 20 - 40 W/kA, sowie der Verlust des supraleitenden Fehlerstrombegrenzers (falls vorhanden). Um das Kühlsystem richtig dimensionieren zu können, müssen noch kleinere Verluste, wie die Verbindung vom Kühlsystem zum Wärmetauscher, zur Kälteanlage, der Tank selber sowie die Pumpe und die Ventile, die auch Verluste erzeugen, berücksichtigt werden. Diese kleineren Verluste sind aber meist vernachlässigbar. Die gesamten Verlustleistungen müssen in dem Kühlkreislauf wieder zugeführt werden. Dies kann auf zwei Arten geschehen, entweder mit einer Kältemaschine oder mit einem flüssigen Stickstofftank. Um die Kälteanlage elektrisch richtig dimensionieren zu können, muss auch der Wirkungsgrad der Kälteanlage, der bei nur ca. 5 % bis 8 % liegt, berücksichtigt werden.

Bei einem dreiphasigen Supraleiterkabel, das einen koaxialen Aufbau hat, ist bei einem Kabel von Nexans im innersten Rohr der Stickstoffvorlauf und in einem äußeren Rohr der Rücklauf, wie in Abbildung 19 gut veranschaulicht dargestellt ist. Eine andere Alternative ist bei Einleiterkabeln möglich, wenn der Vorlauf in einem Kabel und der Rücklauf in einem anderen Kabel erfolgt. Praktisch betrachtet sind alle drei Kabel in

einem Kryostat. Ein Vergleich der Kabeltypen ist in Tabelle 3 ersichtlich. Die Kälteanlage bzw. das Kühlsystem kann auf zwei Arten aufgebaut sein: einer autarken Kälteanlage, die die tiefen Temperaturen für den Wärmetauscher selber erzeugt, also Vorort (geschlossenes System) [TAS1], oder ein Kühlsystem, bei dem das Kühlmittel durch einen großen Flüssigkeitstank bereitgestellt wird. Beim ersten System mit einer Kälteanlage müssen eventuell Vakuumpumpen verwendet werden, um die erforderliche Betriebstemperatur unter dem atmosphärischen Druck sowie Siedepunkt des Kühlmittels zu bringen. Das zweite „offene“ System ist nicht so komplex aufgebaut wie das geschlossene System und hat dadurch das Potenzial einer höheren Zuverlässigkeit, allerdings muss es regelmäßig mit neuem Kühlmittel aufgefüllt werden. Wenn das geschlossene Kühlsystem nach Inbetriebnahme und der einmaligen Bereitstellung des Kältemittels in Betrieb geht, benötigt es „nur“ mehr elektrische Energie, um flüssigen Stickstoff herzustellen, d. h. elektrischen Strom. Die Nachteile sind allerdings die höheren Investitionskosten und spezielle Methoden um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit sicherzustellen. [KIT2]

Die physikalischen Grenzen des flüssigen Stickstoffs von der Temperatur sind 77 K (Siedetemperatur) m.a.W. der Bereich, bei dem mit LN_2 gearbeitet wird, liegt daher unter 77 K. Sinnvoller Weise wird im Temperaturbereich zwischen 65 K und 77 K gearbeitet. Der Druck kann zwischen 3 bar und 20 bar liegen. Bei welcher Temperatur oder Druck gearbeitet wird, hängt von der Länge zwischen den Einspeisepunkten sowie von den Verlusten, die im Kabel auftreten, ab, wie z. B. Anzahl der Endverschlüsse, Kryostat etc. [NSC2]

Für das AmpaCity-Projekt wurde beim Kabelsystem von einer Wärmeentwicklung von 4 kW bei 67 K Innentemperatur ausgehend das Kühlsystem aufgebaut. Der flüssige Stickstoff wird in das Kabel mit 400 g/s bei 10 bar zugeführt. Aus finanziellen Gründen wurde auf eine Kälteanlage verzichtet, und es wurde, wie in Abbildung 22 ersichtlich ein Stickstofftank aufgestellt. [KIT2]



Abbildung 22: Stickstofftank für das AmpaCity-Projekt in Essen

3.7.1. Thermische Isolation

Das Eindringen von Wärme soll mithilfe der thermischen Isolation weitgehend verhindert werden. Es gibt drei Mechanismen des Wärmeeintrages, und zwar

- die Wärmeleitung,
- die Konvektion und
- die Wärmestrahlung.

Diese drei werden näher betrachtet, um einen groben Überblick zu bekommen, worauf geachtet werden muss. Die Wärmeleitung ist der Transport von Energie in Stoffen, die von Stößen zwischen benachbarten Molekülen zustande kommt. Der Wärmestrom zwischen den beiden Enden eines Materials ist sehr stark von der Geometrie und der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. Bei Flüssigkeiten ist es allerdings nicht wirklich tragend, dort ist es primär die Konvektion, die die Wärmeleitung ausmacht. Um diese Wärmeleitung allerdings gering zu halten, wird auf die Wärmeleitfähigkeit sowie auf die geometrische Form geachtet, kleiner Querschnitt und eine große Länge. Die Konvektion ist hauptsächlich für den Wärmetransport in Flüssigkeiten zuständig. Es ist aber sehr schwer, genaue Berechnungen anzustellen, weil durch die sehr komplexen Strömungsfelder eine detaillierte Berechnung sehr aufwendig und teilweise sogar unmöglich ist. Ein gutes Beispiel dafür ist das Wetter, allerdings können hier Vorhersagen auf Basis von Modellen berechnet werden [GPM1]. Die Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Welle im Infrarotbereich. Dieser Wärmestrom ist sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig, das heißt je größer die Oberfläche, desto mehr Reflexionen. M.a.W. je höher der Reflexionsgrad im Infrarotbereich, desto geringer ist der Wärmestrom durch die Wärmestrahlung [KIT2].

Das Kryostat, das beim supraleitenden Kabel die thermische Isolierung übernimmt, wie in Abbildung 23 dargestellt, besteht aus Wellenrohren. Dadurch bleibt das fertige Kabel flexibel genug zum Verlegen. Zwischen den beiden Wellrohren befindet sich eine mehrlagige Superisolation (Abbildung 24). Dieser Raum wird mit Hilfe einer Hochleistungsvakuumpumpe evakuiert, und es entsteht ein Vakuum von ca. 10^{-9} mbar zwischen den beiden Wellrohren. Durch das Vakuum im Inneren wird die Wärmekonvektion vermindert, allerdings nie ganz verhindert, weil auch bei theoretisch vollkommenem Vakuum ein Wärmestrom auf Grund der Wärmestrahlung entsteht. Im Inneren des Kabels herrscht die Arbeitstemperatur von einem Supraleiter. Bei Hochtemperatursupraleitern mit flüssigem Stickstoff liegt sie unter dem Siedepunkt von Stickstoff, also unter 77 K. Eine PE-Schutzschicht schützt das Kabel, also das äußere Wellrohr vor Beschädigungen bei der Verlegung und vor Korrosion. [KIT2]

Es ist auch noch anzumerken, dass durch die gute Isolierung keine Bodenerwärmung zustande kommt. Es wird der Boden allerdings durch die natürliche Wärmestrahlung etwas abgekühlt.



- | | |
|---|--------------------|
| 1 | Inneres Wellrohr |
| 2 | Abstandhalter |
| 3 | Superisolation |
| 4 | Vakuumzwischenraum |
| 5 | Äußeres Wellrohr |
| 6 | PE-Schutzhülle |

Abbildung 23: Thermische Isolation für supraleitende Kabel [Quelle: Nexans]

Das netzförmige Flies von Abbildung 24 und die hoch reflektierende Folie minimieren den Eintrag an Wärme durch Wärmestrahlung und besitzen außerdem eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit. Die Abstandhalter sorgen auch dafür, dass die Aluminiumfolie auf Abstand gehalten wird und damit keine Feststoffwärmebrücke entsteht. [KIT2]

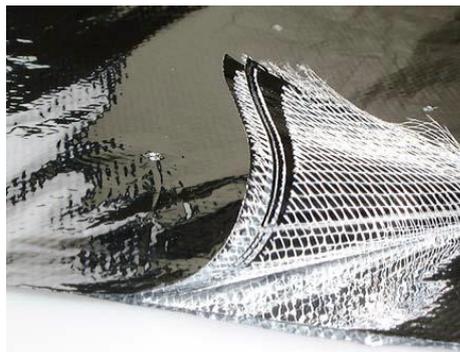


Abbildung 24: Mehrere Lagen Superisolation aus hochreflektierender Folie und netzförmigem Flies [KIT2]

Wie vorhin schon erwähnt, wird als kaltes Dielektrikum Polypropylene Laminated Paper als elektrischer Isolator verwendet. Diese Folie ist, wie in Abbildung 25 dargestellt, aufgebaut und wird auf das Kabel mit mehreren Lagen je nach geforderter Spannungsfestigkeit gewickelt. Dieser Polypropylenfilm ist ca. 50-100 μm dünn und ist zwischen zwei Papierlagen angeordnet. Das Dielektrikum wird vor der Inbetriebnahme unter Druck mit flüssigem Stickstoff getränkt und unter Druck gehalten. Durch diese Tränkung unter Druck wird ein höherer Siedepunkt des Stickstoffes erreicht, und dieser höhere Siedepunkt reduziert die Blasenbildung. Denn wenn sich viele Blasen im LN_2 bilden, kommt es durch die geringere Permittivitätszahl zu Teilentladungen. Wenn Teilentladungen auftreten, wird Energie im flüssigen Stickstoff frei, und es kommt wiederum zu einer erhöhten Blasenbildung. Des Weiteren kommt es zur Ausdehnung des Volumens. Wenn ein Liter flüssiger Stickstoff unter gleichbleibendem Druck verdampft, entstehen bis zu 1000 Liter gasförmiger Stickstoff. Dieser expandierte Stickstoff kann somit einen erheblichen Überdruck verursachen. [KIT2]

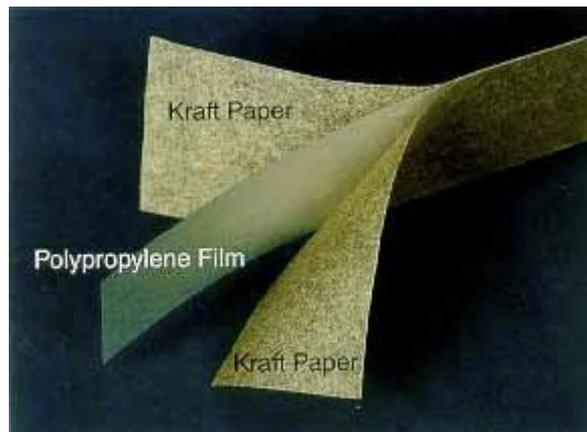


Abbildung 25: Polypropylene laminated paper PPLP-Folie [Quelle: Nexans]

In Abbildung 26 sind die Vorzüge eines supraleitenden Gleichspannungskabels gegenüber eines Wechselspannungskabels dargestellt. Die Wechselspannung ist aufgrund ihrer sinusförmig wechselnden Polarität, die zur jouleschen Erwärmung führt, im Nachteil gegenüber der Gleichspannungstechnik. Diese Hitzentwicklung entsteht bei einem supraleitenden Gleichspannungskabel nicht, weil dort kein wechselndes Feld existiert. Deswegen gibt es bei Wechselstrom auch ein Stromlimit. Einerseits bedingt durch die Grenze der Kühlung, die ökonomisch nicht mehr sinnvoll ist, sowie andererseits die begrenzte Stromstärke, bei der es nicht mehr möglich ist, die erzeugte Verlustwärme abzuführen.

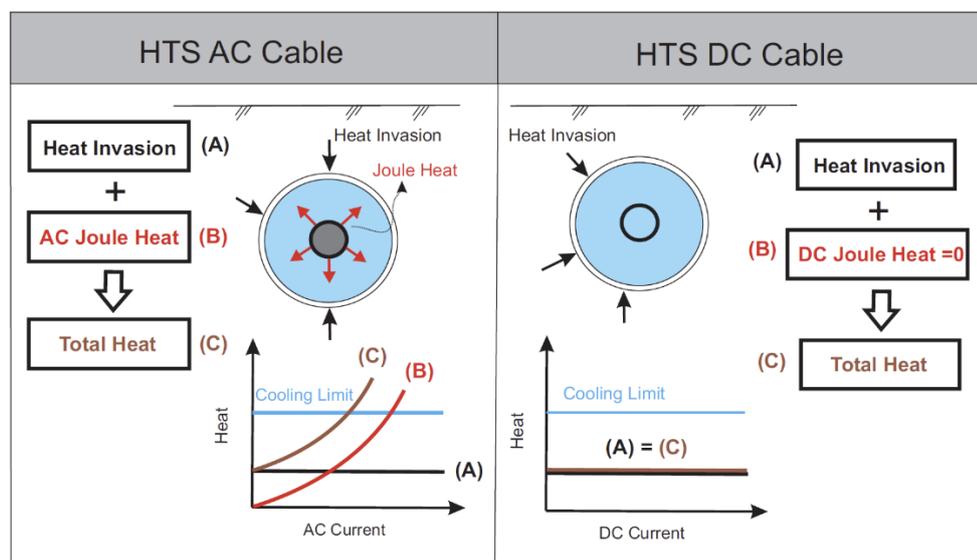


Abbildung 26: Vorzüge von HTS-DC-Kabel zu HTS-AC-Kabel [HTS1]

Wie vorhin näher gebracht, befindet sich die Großproduktion erst im Anfangsstadium, denn es gibt weltweit nur wenige Pilotprojekte und die Technik bzw. die Umsetzung befinden sich noch in den verschiedensten Erprobungsphasen. Dadurch sind die Kosten noch verhältnismäßig hoch. Es existiert auch noch eine Lücke von der prognostizierten zur realisierten Kapazität von Supraleitern (siehe Tabelle 4). Der Grund, weshalb die tatsächliche Herstellung von Supraleitern der 2. Generation noch nicht das

prognostizierte Niveau erreicht hat, liegt einerseits in den mit der Einführung einer neuen Technik verbundenen Anfangsproblemen, wie z. B. Fertigungsstrecken, Qualitätsproblemen und andererseits in der fehlenden Nachfrage, um hochqualitative Supraleiter in großen Mengen zu erzeugen.

Tabelle 4: HTS-Leiterkapazität der Jahresproduktion und real produzierte Supraleiter, Stand 2014 [ZIE1]

Kapazität	MgB2	1G	2G
progn. (km p.a.)	> 2.000	1.200	3.700
reale (km p.a.)	2.000	1.200	850

3.8. Endverschluss von HTS-Kabeln

Energiekabel werden immer an beiden Enden mit Endverschlüssen abgeschlossen. Wie in Abbildung 27 gezeigt, wird jedes Kabel auf Grund des coaxialen Aufbaus separat mit je einem Endverschluss versehen und mit dem Freileitungsnetz verbunden. Dagegen gibt es beim Triaxialkabel, wie in Abbildung 28 gezeigt, pro Kabelende nur einen Endverschluss für alle drei Phasen.



Abbildung 27: Einleiter HTS-Kabel Endverschlüsse auf Freileitung [NSC2]

Die Aufgaben eines Endverschlusses vom supraleitenden Kabel sind vielfältig und im Gegensatz zum konventionellen Kabel wesentlich aufwendiger. Eines haben sie aber gemeinsam, sie bewerkstelligen die elektrische Verbindung des Kabels mit dem weiteren elektrischen Netz. Ein HTS-Endverschluss ist allerdings wesentlich komplexer. Die Aufnahme des Temperaturgradienten zwischen Raumtemperatur und flüssigem Stickstoff muss der Endverschluss bewerkstelligen. Bei einigen Endverschlussarten kommen zusätzliche Übergänge von flüssigem Stickstoff über gasförmigen Stickstoff und dann auf Raumtemperaturniveau, dadurch ist der Temperaturgradient nicht mehr so ausgeprägt.

Die nachfolgende Abbildung 28 zeigt einen Endverschluss, wie er beim AmpaCity-Projekt verwendet wird. Es werden hier auf Grund des Aufbaues alle drei Phasen mit einem Endverschluss abgeschlossen.

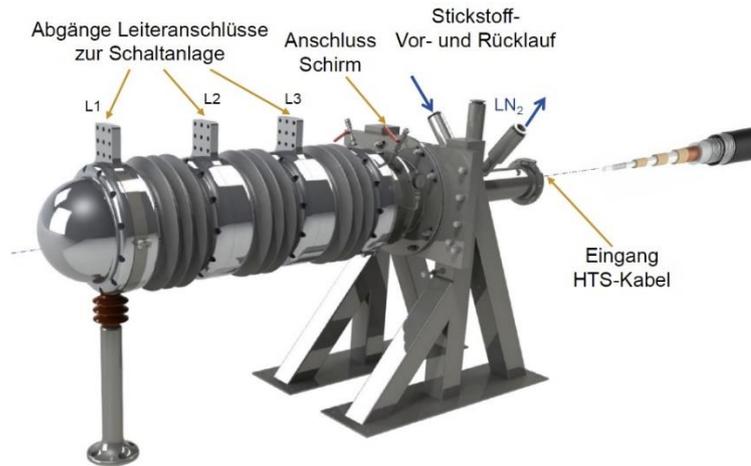


Abbildung 28: Triaxial-HTS-Kabel-Endverschluss, AmpaCity-Projekt [AMP1]

Der Aufbau eines Einleiter-Endverschlusses ist in Abbildung 29 schematisch dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass der Aufbau sehr komplex ist, denn es gibt einen Übergang von flüssigem Stickstoff auf gasförmigen Stickstoff. Das Kühlsystem benötigt einen Anschluss, und auch die Längenänderung muss ausgeglichen werden. Es kommt zudem zu erhöhten Wärmeverlusten, denn es gibt einen Übergang vom Supraleiter zu konventionellen Normalleiter i.d.R. Kupfer oder Aluminium. Es kommt daher durch die physikalische Verbindung und die hohe Temperaturdifferenz, von unter 77 K auf 300 K, also Raumtemperatur, zu einem Wärmeeintritt in das Kabelsystem.

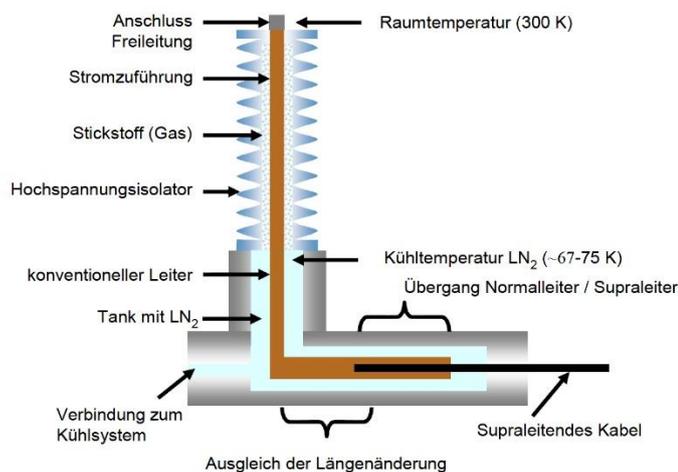


Abbildung 29: Schematischer Aufbau eines Endverschlusses für supraleitende Kabel [KIT2]

Bei der Abkühlung eines Supraleiters von Raumtemperatur auf ca. 77 K beträgt die Längenänderung ca. -0,3 %. Zur Illustration erfolgt bei einer Länge von 100 m eine Verkürzung von 30 cm oder 0,3 m. Es muss daher bei der Planung und Gesamtkonstruktion des Endverschlusses auch die Kontraktion beim Abkühlen und Erwärmen berücksichtigt werden. [KIT2]

3.9. Übertragungsverhalten

Die nachfolgende Abbildung 30 stellt die Unterschiede des Übertragungsverhaltens von einem 400-kV-VPE-Kabel, einer 400-kV-Freileitung und einem 110 kV supraleitenden Kabel dar. Der zulässige Dauerstrom wird von den Leitungsverlusten determiniert und dadurch die maximale Erwärmung bestimmt. Die natürliche Leistung P_{nat} ist durch die gestrichelt gezeichnete Linie dargestellt und ist bei konventionellen VPE-Kabeln weit oberhalb der tatsächlich übertragbaren Leistung. Bei der Übertragung mit der natürlichen Leistung benötigt die Leitung keine Blindleistung. Die Transportleistung wird durch den zulässigen maximalen Dauerstrom begrenzt. Die Prozentangabe in der Grafik ist jeweils die Spannungserhöhung am Ende der Leitung. Die übertragbare Leistung ist somit vom Dauerstrom und um die Abweichung von maximal 5 % der Nennspannung beschränkt. Wenn eine Leitung angepasst ist, dann entspricht die übertragene Leistung der natürlichen Leistung, und diese Leitung ist dann, nach außen hin, rein ohmsch. Wenn die Leitung unter der natürlichen Leistung betrieben wird, benötigt die Leitung kapazitive Blindleistung, d. h. der Betrieb erfolgt im unternatürlichen Bereich. Wenn die Leitung allerdings über P_{nat} betrieben wird, ist sie induktiv bzw. erfolgt der Betrieb im übernatürlichen Bereich. Bei konventionellen Energiekabeln ist die Übertragung der natürlichen Leistung nicht möglich, sie liegt immer darunter, das hat zur Folge, dass die konv. Kabel immer kapazitiv sind. Bei dem supraleitenden Kabel wird der kritische Strom vom verwendeten Supraleiterkabel vorgegeben [EKN1][EEV1].

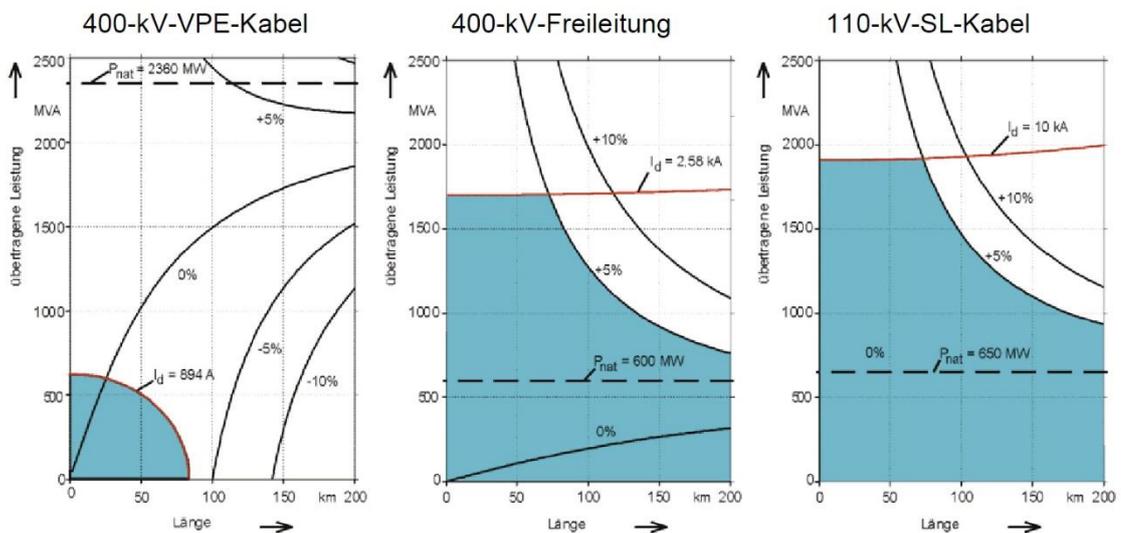


Abbildung 30: Übertragungsverhalten Kabel, Freileitung, HTS-Kabel [KIT2]

Die rote durchgezogene Linie I_d ist der maximal zulässige Dauerstrom. Die schwarz gestrichelte Linie ist die natürlich Leistung P_{nat} , und die durchgezogenen Linien mit den Prozentangaben sind die Spannungserhöhung bzw. -abfall am Leitungsende. In den blau markierten Bereichen kann die Leitung betrieben werden. Es ist gut ersichtlich, dass mit konventionellen Kabeln, im Vergleich zu den beiden anderen Technologien, keine hohen Leistungen über große Entfernungen übertragen werden können. Mit Freileitungen lässt sich eine höhere Leistung über größere Entfernungen

transportieren. Mit der supraleitenden Technologie lässt sich theoretisch die höchste Leistung über die größte Strecke bei einer „kleineren“ Spannungsebene (110 kV versus 400 kV) realisieren. Jedoch ist auf Grund der erforderlichen niedrigen Betriebstemperatur von flüssigem Stickstoff die Kabelstrecke sehr eingeschränkt. Alle paar Kilometer ist eine Kühlstation nötig um das Kabel auf durchwegs konstanter Temperatur zu halten. Dies ist für größere Entfernungen weder praktikabel noch wirtschaftlich sinnvoll. Daher bietet sich der Einsatz dieser Technologie in Ballungsräumen oder bei Kraftwerksauskopplungen an, wo hohe Leistungen über kurze Distanzen übertragen werden müssen. Tabelle 5 gibt die Leistungsdaten an, die in Abbildung 30 verwendet wurden. [KIT2]

Tabelle 5: Vergleich der grundlegenden Daten von 400-kV-VPE-Kabel, 400-kV-Freileitung und 110 kV supraleitendes Kabel [KIT2]

		400-kV-VPE-Kabel	400-kV-Freileitung	110-kV-HTSL-Kabel
Nennspannung	U_N	400 kV	400 kV	110 kV
Dauergrenzstrom	I_d	0,894 kA	2,56 kA	10 kA
Natürliche Leistung	P_{nat}	2360 MW	600 MW	650 MW
Dauergrenzleistung	S_d	357,6 MW	1024 MW	1100 MW

3.9.1. Wechselstromverluste

Beim supraleitenden Energiekabel treten zum Teil andere Verlustmechanismen auf als bei konventionellen Kabeln. Die verschiedenen Verlustarten sind in Tabelle 6 aufgeführt. Sie führt auch typische Werte der Verluste auf, die in späterer Folge für die Berechnung der Gesamtverluste herangezogen werden.

Tabelle 6: Vergleich der Verluste bei konv. Kabel versus supraleitendem AC- und DC-Kabel mit typischen Verlustleistungen und Wirkungsgraden [KIT2]

110 kV, 3 kA, 1000 m 2-VPE-Kabel parallel	110 kV, 3 kA, 1000 m 1-HTSL-AC-Kabel	110 kV, 3 kA, 1000 m 1-HTSL-DC-Kabel
Leiterverluste ➤ Stromverluste 30,8 W/m/Phase ➤ Skineneffekt ➤ Proximityeffekt +5 % (beide Effekte) Dielektrische Verluste Mantel-Bewahrungsverluste	AC-Leiterverluste ≤ 1 W/m/Phase Dielektrische Verluste 0,4 W/m/Phase Thermische Verluste ➤ Kryostat 1 - 1,5 W/m/Phase ➤ Endverschluss 20 - 40 W/kA Wirkungsgrad Kältemaschine 5-8 %	Thermische Verluste ➤ Kryostat 1 - 1,5 W/m/Phase ➤ Endverschluss 20 - 40 W/kA Wirkungsgrad Kältemaschine 5-8 %

Wie hierbei gut ersichtlich ist, hat das supraleitende DC-Kabel nur thermische Verluste und dadurch die wenigsten Verluste. Die meisten Verluste hat in diesem Vergleich das konventionelle Energiekabel, die sich durch den Stromtransport aus den dielektrischen Verlusten in der Isolierung sowie Wirbelstrom- und Ummagnetisierungsverlusten im Mantel und auch der Bewahrung zusammensetzen. Die Leitungsverluste beim konv. Kabel setzen sich durch den Widerstand der Leitung sowie die Verluste resultierend

aus Skineffekt und Proximityeffekt zusammen [RDG1]. Die letzte große Verlustart sind die dielektrischen Verluste, aus der Summe der Restleitfähigkeit des Werkstoffs sowie die frequenzabhängigen Verluste, die sich aus den verschiedenen Polarisationsverlusten ergeben [WDE1]. Anders ist es bei den supraleitenden Kabeln im Wechselspannungsfall, bei diesen ergibt sich der Gesamtverlust aus der Summe des dielektrischen Verlustes, der Isolierung, dem thermischen Verlust des Kryostats und dem elektrischen und thermischen Verlust der Endverschlüsse. Es liegt in der Natur der Sache, dass alle Verluste in Wärme umgewandelt werden und über das Kühlsystem abgeführt werden müssen. Dafür muss die Kälteanlage richtig dimensioniert und auch der Wirkungsgrad der Kälteanlage berücksichtigt werden. Bei einem supraleitenden Gleichspannungskabel fallen die Verluste, die auf Grund der Wechselspannungsspannung erzeugt werden, weg. Das wären einerseits die Wechselspannungsverluste selber und andererseits die dielektrischen Verluste. Es treten dann nur mehr die thermischen Verluste auf, und die werden vom Kryostat und vom Endverschluss erzeugt. [WDE2]

Die Wechselstromverluste P_{AC} , die bei Supraleitern entstehen, sind einerseits die Hystereseverluste, verursacht durch die Bewegung der Flussschläuche in der supraleitenden Schicht, und andererseits die Wirbelstromverluste in den normalleitenden Schichten. Für beide Verlustarten sind die wechselnden Magnetfelder verantwortlich. Diese durch das Magnetfeld verursachten Verluste werden in zwei Kategorien unterteilt: Die erste Kategorie beinhaltet die Eigenfeldverluste. Diese werden damit definiert, dass das Magnetfeld durch den Transportstrom im Supraleiter erzeugt wird. Als Fremdfeldverluste werden die Verluste bezeichnet, welche vom äußeren Magnetfeld verursacht werden. Diese müssen in der Praxis aber von Fall zu Fall getrennt betrachtet werden, denn dafür muss zuerst die magnetische Feldverteilung des äußeren Magnetfeldes für den Supraleiter erstellt werden. Auf Basis dieser magnetischen Feldverteilung können dann die Wirbelstrom- und Hystereseverluste, die das äußere Feld erzeugt, bestimmt werden. [KIT2]

Die Eigenfeldverluste können laut der Norris-Gleichung nach Formel 05 bestimmt werden.

$$P_{AC} = \frac{I_C^2 \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot l}{\pi} \left\{ (1 - i) \cdot \ln(i + 1) + i - \frac{1}{2} i^2 \right\} \text{ mit } i = \frac{I_{max}}{I_C} \quad \text{Formel 05}$$

Die Variablen und Konstanten in dieser Formel sind

- I_C der kritische Strom des Supraleiters,
- μ_0 die magnetische Feldkonstante,
- ω die Kreisfrequenz des Wechselstromes,
- l die Länge des Supraleiters und
- I_{max} der Scheitelwert des Stroms im Supraleiter. [JAP1]

Die zweite große Verlustart sind die dielektrischen Verluste P_d und diese werden meistens durch den Verlustfaktor $\tan\delta$ bestimmt. In der Praxis gibt es keine verlustfreie Kapazität, und deswegen hat sie bei einer anliegenden Wechselspannung neben dem kapazitiven Stromanteil I_{kap} auch einen Wirkstromanteil I_δ . Eine ideale Kapazität hat eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung immer 90° (Strom eilt 90°

vor, siehe Abbildung 59), weil aber von einer realen Kapazität gesprochen wird, gibt es Verluste, und die Phasenverschiebung weicht um den Winkel δ ab. Dieser Winkel ist durch das Verhältnis der Stromanteile bestimmt (siehe Formel 06).

$$\tan\delta = \frac{I_\delta}{I_{kap}} = \frac{P_\delta}{Q_{kap}} \quad \text{Formel 06}$$

Da allerdings der Quotient der Stromanteile I_δ und I_{kap} analog dem Quotienten der Leistungsgrößen P_δ und Q_{kap} ist, kann $\tan\delta$ auch über den Quotienten der Leistungsgrößen bestimmt werden. In der nachfolgenden Formel 07 werden letztendlich die dielektrischen Verluste P_d berechnet. [KIT2]

$$P_d = \omega \cdot C \cdot U_r^2 \cdot \tan\delta \quad \text{mit } C = C' \cdot l \quad \text{Formel 07}$$

Hierin ist ω die Kreisfrequenz der Wechselspannung, C die Kapazität des Kabels, U_r die Nennspannung des Kabels, $\tan\delta$ der Verlustfaktor, C' der Kapazitätsbelag und l die Länge des Kabels.

Die letzte Verlustart sind die thermischen Verluste P_{th} , die nur bei den supraleitenden Kabeln ins Gewicht fallen. Diese Verlustart umfasst den Wärmeeintrag durch die Kryostatwand und den Wärmeeintrag durch die Endverschlüsse des Kabels. Bei den Endverschlüssen kommt es zu thermischen Verlusten, einerseits infolge der Erwärmung durch den Übergang vom Supraleiter zum Normalleiter, und andererseits durch die elektrischen Leitungsverluste. Der Wärmeeintrag durch das Kryostat wird wie folgt berechnet:

$$P_{th} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{iso} (T_a - T_{Kühl})}{\ln\left(\frac{r_{th,a}}{r_{th,i}}\right)} \quad \text{Formel 08}$$

In dieser vorgehenden Formel 08 ist λ_{iso} der thermische Leitwert der Isolation, T_a die Umgebungstemperatur, $T_{Kühl}$ die Temperatur des Kühlmittels, $r_{th,i}$ der Innenradius der thermischen Isolation und $r_{th,a}$ der Außenradius der thermischen Isolation. Die gesamte Energie, die in Wärme umgewandelt wird, muss natürlich von der Kältemaschine weggekühlt bzw. abgeführt werden, damit im Kabel eine konstante Temperatur vorherrscht. Um die thermischen Gesamtverluste zu berechnen, muss noch der Wirkungsgrad der Kältemaschine mit einbezogen werden, der bei ca. 5-8 % liegt, um die Gesamtverluste von einem supraleitenden Kabel zu bestimmen. [KIT2]

3.9.2. Ferranti-Effekt

Der Ferranti-Effekt ist eine Spannungserhöhung am Ende einer Leitung. Diese kommt zustande, wenn die Leitung unbelastet ist. Dieser Zustand kann bei einem Leistungsabwurf auftreten oder wenn die Leitung unternatürlich betrieben wird. Dieser Effekt kann mit Kompensationsdrosselspulen, die parallel geschaltet werden, eingeschränkt werden. Zur Berechnung der Spannungserhöhung kann die Leitungsgleichung Formel in 10 herangezogen werden. Der Term I_2 in dieser Formel fällt weg, weil kein Strom durch den Leiter fließt ($I_2 = 0$). Die Formel muss nach U_{Ende} umgeformt werden, um die Spannungserhöhung am Ende der Leitung zu erhalten (Formel 11). Die Spannung am Ende der Leitung hängt daher von der Anfangsspannung, also der Ausgangsspannung, ab sowie von der

Ausbreitungskonstante γ , die wiederum vom Ableitungsfaktor G' , dem Widerstand R' , der Induktivität L' und der Kapazität C' abhängt. (Formel 12)

$$U_{Anf}(l) = U_{Ende}(l) \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + I_2 \cdot Z_w \sinh(\gamma \cdot l) \quad \text{Formel 10}$$

$$U_{Ende}(l) = \frac{U_{Anf}}{\cosh(\gamma \cdot l)} \quad \text{Formel 11}$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad \text{Formel 12}$$

Dabei wird der Ableitungsfaktor G' mit dem Verlustfaktor $\tan\delta$ der Isolation, der Winkelgeschwindigkeit und dem Kapazitätsbelag C' laut Formel 13 berechnet.

$$G' = \tan\delta \cdot \omega \cdot C' \quad \text{Formel 13}$$

Die Bezugsspannung U_{Anf} ist die Spannung vom Sternpunkt zur Phase. Am Anfang der Leitung wird mit der Nennspannung U_N , entspricht U_{Anf} eingespeist. Die Höhe der Spannungserhöhung hängt stark vom Übertragungssystem ab. Die Werte zur Berechnung der in Abbildung 31 dargestellten Verläufe sind Tabelle 7 zu entnehmen und wurden mit Hilfe der Formel 11 berechnet.

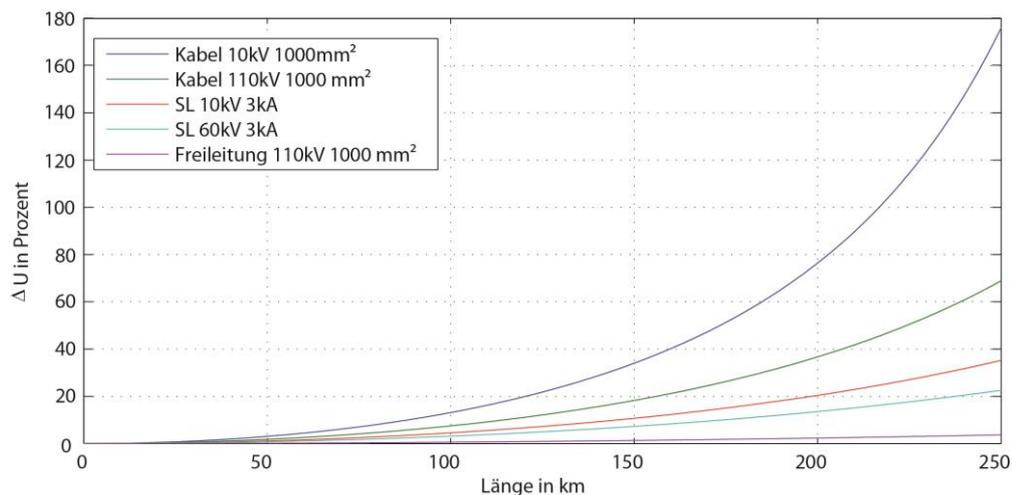


Abbildung 31: Spannungserhöhung in Prozent in Abhängigkeit der Leiterlänge in km

Abbildung 31 zeigt die Spannungserhöhungen ΔU , diese setzt die Ausgangsspannung zur Eingangsspannung ins Verhältnis und wird in Prozent angegeben. Es ist hierbei gut ersichtlich, dass ein 10-kV-Kabel bei 250 km fast die 1,8-fache Spannung im Verhältnis zur Eingangsspannung aufweist. Beim 110-kV-Kabel kommt der Ferranti-Effekt nicht mehr so stark zum Tragen, ist aber immerhin noch bei 60 % über der Nennspannung von 110 kV. Noch besser sind die supraleitenden Kabel, die Spannungserhöhung reicht je nach Spannungshöhe von 20 % bis 40 %. Daher sind die supraleitenden Kabel in Bezug auf den Ferranti-Effekt gegenüber den konventionellen Kabeln zu bevorzugen. Die Tabelle 8 stellt die Spannungsüberhöhung in Prozent dar. Diese wurde bis 250 km in 50-km-Schritten durchgeführt. Die Maßnahme, um den Ferranti-Effekt zu reduzieren, ist die Verwendung von Querkompensationsdrosseln.

Diese werden für jeden Leiter benötigt und sind auf Erde geschaltet. Bei der Freileitung tritt dieser Effekt aufgrund des verhältnismäßig geringen Kapazitätsbelages kaum auf. [KIT3]

Tabelle 7: Elektrische Eigenschaften der verschiedensten Leitungssystemen [KIT3]

		Einheit	VPE-Kabel 10 kV 1000 mm ²	VPE-Kabel 30 kV 1000 mm ²	VPE-Kabel 110 kV 1000 mm ²	Freileitung 110 kV	SL 10 kV 3 kA	SL 60 kV 3 kA
Nennspannung	U_N	kV	10	30	110	110	10	60
Maximalspannung	U_m	kV	12	36	123	121	12,2	72
Gleichstrombelag	R'_{dc}	Ω/km	0,0176	0,0176	0,0176	0,176	0,00001	0,00001
Induktivitätsbelag	L'	mH/km	0,276	0,3	0,51	1,3	0,017	0,028
Kapazitätsbelag	C'	nF/km	870	390	280	8,9	5200	2200
Verlustfaktor	$\tan\delta$	-	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0012	0,0012
Cu-Nennquerschnitt	A_N	mm ²	1000	1000	1000	300	0	0
Dauergrenzstrom	I_d	A	832	853	1165	735	3000	3000
Dauergrenzleistung	S_d	MW	14,41	44,32	221,96	140,03	51,96	311,76
Natürliche Leistung	P_{nat}	MW	5,38	31,34	279,97	29,59	55,3	1009,1
Wellenwiderstand	$ Z_w $	Ω	19,8	30,4	44,2	408,91	1,8	3,56

Tabelle 8: Spannungsüberhöhung ΔU in Prozent auf die Länge von 250 km in 50-km-Schritten aufgetragen

	VPE-Kabel 10 kV 1000 mm ²	VPE Kabel 30 kV 1000 mm ²	VPE Kabel 110 kV 1000 mm ²	Freileitung 110 kV	SL 10 kV 3 kA	SL 60 kV 3 kA
Übertragungslänge in km	Spannungsüberhöhung ΔU in Prozent					
50	3,03	1,46	1,79	0,14	1,1	0,76
100	13,12	6,06	7,48	0,58	4,53	3,13
150	34	14,53	18,24	1,3	10,68	7,25
200	76,4	28,44	36,7	2,33	20,41	13,52
250	175,98	50,97	68,89	3,68	35,22	22,55

3.10. Anwendung von supraleitenden Kabeln

Die supraleitenden Kabeln wirtschaftlich im großem Maß einzusetzen, muss auch die Betriebssicherheit und Wartungsfreundlichkeit betrachtet werden. Der flächendeckender Einsatz ist kostenintensiv und damit zurzeit nicht wirtschaftlich. Daher finden sich Anwendungen von supraleitenden Kabeln vorzugsweise in Großstädten wieder, wo auf kurzen Strecken hohe Leistungen übertragen werden müssen. Ein Paradebeispiel ist das Projekt „AmpaCity“ in Essen. Die supraleitenden Kabel werden zurzeit größtenteils in der Forschung eingesetzt, um supraleitende Magnete in Laboreinrichtungen mit elektrischer Energie zu versorgen. Ein anderes Einsatzgebiet für Supraleiter ist z. B., wenn vorhandene Kabelschächte im städtischen Bereich fast vollständig ausgelastet sind und für den Einsatz neuer konventioneller Kabel neue Schächte gebaut werden müssten. Hierbei kann auf die supraleitende Technologie zurückgegriffen werden, weil mit dieser der Platzbedarf drastisch reduziert werden kann (siehe Vergleich Abbildung 32). Es soll nun auf Basis dieser Kenntnisse über supraleitende Kabel eine Konzeptplanung einer Energieübertragung mit Supraleiter einschließlich einer wirtschaftlichen Bewertung für den Bau und Betrieb einer Anlage erstellt werden. Für einen wirtschaftlichen Einsatz kommen nur harte Supraleiter in Frage. Es müssen die hohen Magnetfeldern, welche bei diesem Einsatzzweck auftreten können, bewältigt werden. Dabei muss eine geforderte hohe Strombelastung mit Stromdichten von mindestens 10^4 A/cm^2 umgesetzt werden [SUP2].

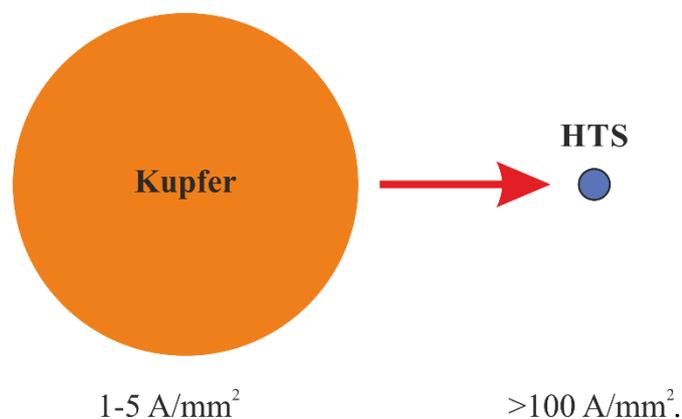


Abbildung 32: Vergleich der Querschnitte von Kupfer- und HTS-Leiter gleicher Stromtragfähigkeit [SUP2]

Außerdem sollen Auswirkungen von Störfällen berücksichtigt werden, z. B. als Folge einer Leckage. Beim Hochtemperatursupraleiter tritt Stickstoff aus, beim heliumgekühlten Niedertemperatursupraleiter Helium austritt. Niedertemperatursupraleiter werden i.d.R. nur für Sonderanwendungen und meistens in geschlossenen Räumen verwendet. Im Gegensatz dazu tritt bei den kommerziellen Öl-Papier-Hochspannungskabeln im Falle eines Lecks Öl aus, da diese mit Öl gekühlt werden. Hierzu sei erwähnt, dass einer der ersten veröffentlichten Vorschläge für den Betrieb eines einphasigen supraleitenden Wechselstromkabels mit einer Leistung von 750 MVA bei 200 kV von McFee aus 1962 stammt. Der Einsatz von Blei wurde als Leiter vorgeschlagen und sollte durch mehrere unterteilte Leiter in parallelen Strängen

angeordnet in einem heliumgekühlten Rohr verlaufen. Dadurch wäre der Betrieb eines so großen Stromes möglich, dass die Übertragung statt auf der 200-kV-Hochspannungsebene mit der Generatorspannung, die i.d.R. bei ca. 10 kV liegt, die gleiche Leistung transportiert werden könnte. Dies hätte den Vorteil, dass die Transformatoren auf der Hochspannungsebene entfallen. [EEM1]

Wie in den vorhergehenden Kapiteln schon erwähnt, treten bei Wechselspannungskabeln höhere Verluste auf als beim Gleichspannungskabel. Diese Verluste müssen dann vom Kühlmittel abtransportiert werden. Bei einem elektrischen Wechselfeld werden nicht nur Cooper-Paare bewegt, sondern auch Normalelektronen, und außerdem werden durch die zeitlich veränderten Flüsse Wirbelströme induziert, die aber durch geeignete Verdrillung niedrig gehalten werden können. Bei Gleichspannung kann die elektrische Verlustleistung gegen Null gehalten werden. Verluste treten bei Restwelligkeit, bei transienten Vorgängen und bei Lastschwankungen auf, weil sich dort durch die Stromänderung immer ein anderes magnetisches Feld aufbaut, das wiederum Verluste verursacht. Zwischen 1960 und 1980 gab es viele Untersuchungen im Bereich der Gleichstrom- und Wechselstromkabel auf Basis der herkömmlichen Supraleiter. Allerdings kamen herkömmliche Supraleiter (Niedertemperatursupraleiter) nie kommerziell zum Einsatz, weil einerseits das Kühlen mit flüssigem Helium sehr aufwendig und somit teuer ist, andererseits gab es immer wieder Energiekrisen, die zur Stagnation des Leistungsbedarfs führten. Mitte der 1980er Jahre kam neuer Schwung in die Technologie, indem die Hochtemperatursupraleiter entdeckt wurden, welche mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden können und dadurch wirtschaftlich sehr viel interessanter sind als die mit flüssigem Helium gekühlten Niedertemperaturleiter. Die heliumgekühlten Kabel sind erst ab einer Leistung von über 5 - 10 GVA gegenüber den konventionellen Kabeln konkurrenzfähig. Bei stickstoffgekühlten Kabeln liegt der Wert etwa bei 300 - 500 MVA [SUP 1]. Derzeit liegt das Hauptaugenmerk bei Wechselstromkabeln, weil diese recht einfach in das bestehende Netz eingebunden werden können, wie im Pilotprojekt AmpaCity gezeigt wird. In Zukunft können womöglich supraleitende Gleichspannungskabel für die Übertragung der elektrischen Energie von Kraftwerken in weiter entfernte Ballungsräume wirtschaftlich eingesetzt werden. [TAS1].

Es kommen in der Wechselstromtechnik verschiedene Kabeldesigns zur Anwendung, und im einfachsten Fall ist dies eine supraleitende Schicht, die vom flüssigen Stickstoff gekühlt wird. Das Kryostat ist die thermische Isolation und besteht aus konzentrischen flexiblen Wellschläuchen, die evakuiert sind und sich direkt über dem Leiter befindet. Abbildung 33 zeigt ein einfaches Kabeldesign, wie es bei dem Long-Island-Power-Authority 1-Projekt kurz LIPA 1, auf Long Island in New York zum Einsatz kommt. Das Kabel hat einen inneren Kupferkern, der von einer dielektrischen Schicht getrennt wird und mit zwei spiralförmig gewickelten Schichten aus Bi-2223-Bandleitern umschlossen ist. Die äußerste und letzte Lage der leitenden Schicht besteht wieder aus Kupfer, das insbesondere zur Stabilisierung des Ganzen dient. Danach kommt das Kryostatsystem, indem im inneren Rohr flüssiger Stickstoff fließt und zwischen den beiden Wellrohren ein evakuierter Isolationsraum besteht. Zur Vermeidung eines Streufeldes wäre es besser, wenn ein koaxialer supraleitender Rückleiter verwendet werden würde. Die dielektrischen Schichten zwischen den

supraleitenden Materialien sind in dieser Anordnung ebenfalls kalt, dadurch kann kein etabliertes Dielektrikum, wie z. B. ölprägnierte laminierte Papierisolierung, verwendet werden. Der Schutz außerhalb ist eine PVC-Ummantelung, das Kabel wird dadurch vor äußeren Schäden und Korrosion geschützt.



Abbildung 33: LIPA - Supraleitendes Kabel bei 138 kV und 2400 A, Einsatz auf Long Island, NY, kaltes Dielektrikum (Quelle „Nexans Deutschland“)

Dieser Kabeltyp in Abbildung 33 hat in dem Projekt LIPA 1 (Long Island Power Authority, 1. Phase) eine Länge von 600 m und ist seit 2008 im Einsatz. Es ist ein System von drei separaten Kabeln mit einer Übertragungsspannung von 138 kV und einem Strom von 2400 A. Es wird bereits am Projekt LIPA 2 gearbeitet, indem ein Verfahren der 2. Generation anstatt eines der 1. Generation angewendet wird. Bei dem Herstellungsverfahren der 2. Generation entfällt die Silbermatrix.. In der nachfolgenden Abbildung 34 ist die Einleitung in den supraleitenden Kabelverbund aus dem Freileitungsnetz des LIPA1-Projektes illustriert.



Abbildung 34: Endverschlüsse des 660 m langen LIPA1-Kabels [Quelle: AMSC]

Die folgende Tabelle 9 zeigt alle bis 2014 abgewickelten und bis 2016 in Planung

befindlichen Projekte sowie die Firmen, die an der supraleitenden Kabelentwicklungen und Umsetzungen beteiligt sind. Es ist gut ersichtlich, dass der Schwerpunkt bei der 2. Generation von HTS-Kabeln und in der Gleichspannung liegt. Es wurden schon Längen von 1000 m realisiert. Ein Projekt mit einer Länge von 2500 m ist in Russland in Planung. Die Tendenz geht also eindeutig in Richtung von mehreren Kilometern.

Tabelle 9: Abgewickelte und bevorstehende supraleitende Kabelprojekte weltweit [KIT1]

Projektleiter	Land / Jahr	Standort	Länge (m)	Spezifikationen		Leistung (MVA)	Phasen	Material
				kV	kA			
TEPCO / SEI	Japan / 1997	CRIEPI	30	66	1	66	1-ph.	1G
Southwire / IGC	USA / 2000	Carrollton, GA	3x30	12.4	1,25	27	3x1-ph.	1G
NKT Cables / NST	Denmark / 2001	Copenhagen	3x30	30	2	104	3x1-ph.	1G
Pirelli / Detroit Edison / AMSC	USA / 2002	Detroit, IL	120	24	2,4	100	3-ph.	1G
TEPCO / SEI	Japan / 2002	CRIEPI	100	66	1	114	3-ph.	1G
SuperAce / Furukawa / CRIEPI	Japan / 2004	CRIEPI	500	77	1	77	1-ph.	1G
KERI / SEI	Korea / 2004	LG Cable	30	22	1,2	47	3-ph.	1G
Innopower/ Yunnan EP	China / 2004	Puji	33,5	35	2	121	3-ph.	1G
KEPRI / SEI	Korea / 2006	Gochang	100	22.9	1,25	50	3-ph.	1G
Tratos Cavi, AMSC	Italy / 2005	Pieve Santo Stefano	50	45	2	156	3-ph.	1G
CAS / AMSC	China / 2005	Länzhou	75	10.5	1,5	27	3-ph.	1G
AEP / Ultera / Oak Ridge	USA / 2006	Columbus, OH	200	13.2	3	69	3-ph.	1G
Superpower / SEI	USA / 2006	Albany, NY	350	34.5	0,8	48	3-ph.	1G
DAPAS 1: LS Cable	Korea / 2007	Gochang	100	22.9	1,26	50	3-ph.	1G
ConduMex / AMSC / CFE	Mexico / 2007	Queretaro	100	23	2	80	3-ph.	1G
LI PA / AMSC / Nexans	USA / 2008	Long Island, NY	600	138	2,4	573	3-ph.	1G
Superpower / SEI	USA / 2007	Albany, NY	30	34.5	0,8	48	3-ph.	2G
ENIN / VNIKIP	Russia / 2010	Moscow	200	20	1,5	50	3-ph.	1G
LIPA2 / AMSC / Nexans* (DOE)	USA / 2010	Long Island, NY	600	138	2,4	574	1-ph.	2G & SFCL
SEI, Chubu	Japan / 2010	Lab Test	20/200	10	3/1,2	30	DC	1G
DAPAS 2: LS Cable	Korea / 2011	Gochang	100	154	3,75	1000	3-ph.	1G
GENI: LS Cable	Korea / 2011	Seoul, Incheon	500	22.9	1,5	60	3-ph.	1G&SFCL
Yokohama: TEPCO / SEI	Japan / 2012	Asahi, Kanagawa	200	66	2	200	3-ph.	1G
Hydra: ConEd / Ultera / AMSC* (DHS)	USA / 2013	New York	240	13.8	4	96	3-ph.	2G & SFCL
RWE, Nexans	Germany / 2013	Essen	1000	10	2,4	42	3-ph.	1G
LS Cable	Korea / 2014/15	Jeju	1000	154	2,25	600	3-ph.	
LS Cable	Korea / 2015	Jeju	500	80	3,13	250	DC	
VNIKIP	Russia / 2016	St. Petersburg	2500	20	2,5	50	DC	

Die Studie in Abbildung 35 zeigt, dass der prognostizierte Preis von HTSC-Material der 2. Generation ab diesem Jahr 2014 bzw. 2015 im Materialkostenband von Kupfer liegen wird. Dieses Diagramm zeigt auch, dass im Jahr 2014, der supraleitende Bandleiterpreis unter 100\$/kAm liegt. Wenn die 2. Generation von HTS-Bandleitern in die Großproduktion geht, ist es sicherlich möglich, in das Preissegment von langfristig 10 - 20 \$/kAm zu fallen.

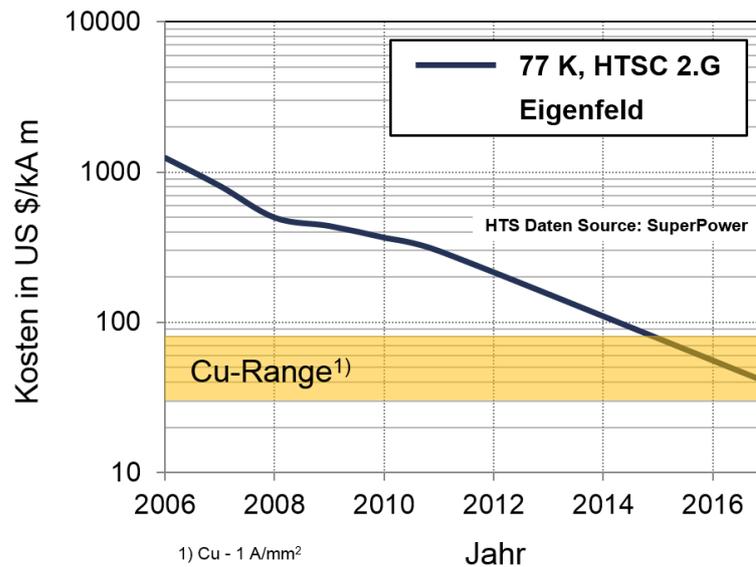


Abbildung 35: Kostenvergleich von Kupfer zu HTSC der 2. Generation [Quelle: SuperPower] [KIT1]

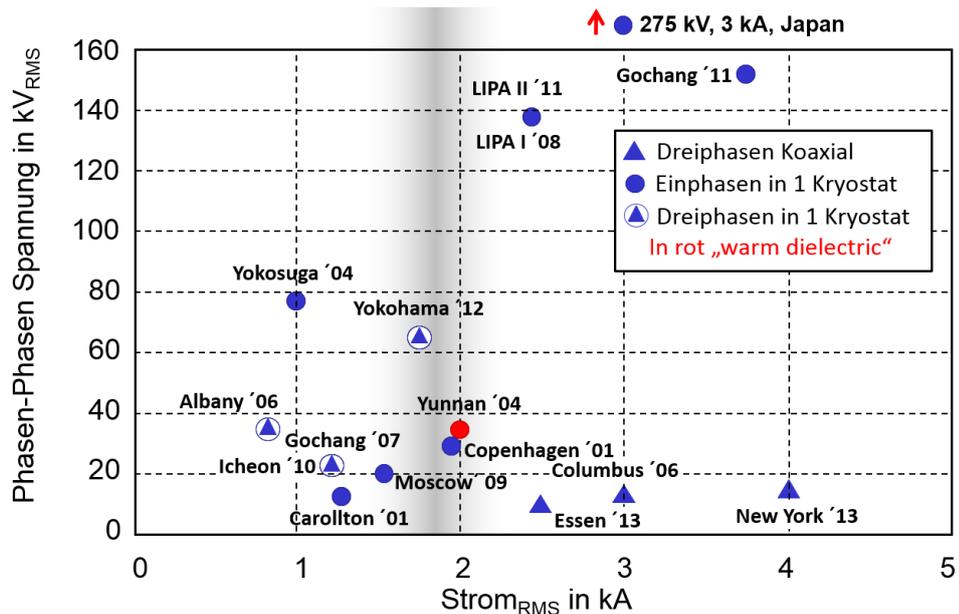


Abbildung 36: Stand der Technik, wo Wechselspannungssupraleitungen eingesetzt werden, aufgetragen in Strom-Spannungsverhältnis [KIT1]

In Abbildung 36 ist gut ersichtlich, welche Projekte weltweit und auf welcher Spannungsebene umgesetzt werden. Weiter ist ersichtlich, dass die meisten HTS-Kabel mit kaltem Dielektrikum betrieben werden. Das hat einerseits den Grund, dass der Aufbau des Kabels leichter ist und andererseits eine höhere Stückzahl dieser Kabel produziert wird. Durch die Großmengenproduktion sinkt der Preis, und dadurch ist diese Kabeltechnologie mit kaltem Dielektrikum kostengünstiger.

Die nachfolgende Tabelle 10 zeigt die Gegenüberstellung einer Kalkulation von einem konventionellen Wechselspannungskabel und einem HTS-Gleich- sowie HTS-Wechselspannungsupraleiterkabel. Es kam dabei heraus, dass die Anzahl der Kabel von neun konv. Kabeln auf vier supraleitende Kabel auf der Wechselspannungsseite verringert werden könnte und noch einmal um ein Viertel, wenn vom HTS unter Wechselspannung auf ein HTS und Gleichspannung gewechselt werden würde. Hier ist gut ersichtlich, welche Einsparung ein Wechsel von der Wechselspannung zur Gleichspannung an Umwelteinfluss und auch an einem ökonomischen Einfluss für die Zukunft haben könnte. Ein Umstieg würde insofern der Umwelt helfen indem CO₂ in der Größenordnung vom Faktor 10 eingespart werden kann. [HTS1].

Tabelle 10: Umwelteinfluss und ökonomischer Vergleich zwischen HTS und konventionellen Kabelsystemen [HTS1]

Kabelsystem	AC		DC
	Konventionell	HTS	HTS
Spannung (kV)	275 (rms)	66 (rms)	130
Strom (kA/Phase)	1	3.3	12
Übertragbare Leistung	1500 MVA (500 MVA *3)	1500 MVA (375 MVA*2*2)	1500 MVA (1500 MVA*1)
Kabeltyp	Einphasiges XLPE	3-in-One HTS	3-in-One HTS
Übertragungsverluste (kW/km)	740	200	20
Anzahl von Kabeln	9	4	1
Übertragungsverlustkosten (\$/km/Jahr)* (Kostensparnis)	648 000 (-)	175 000 (473 000)	18 000 (630 000)
CO ₂ Emission (Tonnen-C/km/Jahr) ** (CO ₂ -Reduktion)	778 (-)	210 (568)	21 (757)
CO ₂ -Kostensparnis in 30 Jahren (\$/km) @ \$50/Tonne-C	(-)	853,000	1,135,500

*Berechnung von 10 cents pro kWh Generationskosten

** Berechnung mit Kohlenstoffumrechnungsrate von 0,12 kg- C/kWh

3.11. Vergleich der Verluste von VPE, AC- und DC-Kabel

In der folgenden Tabelle 11 werden die Verlustleistungen von einem konventionellen 110-kV-Kabelsystem mit einer Stromübertragungsleistung von 3 kA und HTSL-AC- und HTSL-DC-Kabel mit den gleichen Leistungsmerkmalen gegenübergestellt. Das konv. System besteht aus zwei VPE-Kabel die parallel verlaufen. Die beiden anderen Vergleichssysteme sind jeweils ein 110-kV-HTSL-Kabel mit 3kA Nennstrom, ein Kabel zur Wechselspannungsübertragung und eines für die Gleichspannungsübertragung. Die zu Grunde liegenden Verlustleistungen wurden aus Tabelle 6 entnommen.

3.11.1. Berechnung der Gesamtverlustleistung eines konv. Kabels

Zur Berechnung der Gesamtverlustleistung eines konventionellen Kabels werden die

Leiterverluste mit den Gleichstromverlusten (P_{VerDC}) berechnet. Der Wert von 30,8 W/m/Phase wird hierbei verwendet. Dieser wird wiederum mit der Länge des Kabels mit der Anzahl der Phasen in einem System sowie der Systemanzahl multipliziert. Danach werden noch fünf Prozent für den Skineneffekt und den Proximityeffekt (P_{VerSP}) hinzugerechnet. Die dielektrischen Verluste sowie die Bewährungsverluste im Mantel können hierbei vernachlässigt werden, weil diese einen sehr geringen Einfluss, im Vergleich zu den Leiterverlusten, auf die Gesamtverluste haben. In der unten angeführten Berechnung wird die Gesamtverlustleistung von zwei parallelen 110-kV-Kabelsystemen kalkuliert, die bei einer Belastung von 3 kA über eine Länge von 1000 m durchgeführt wurde.

$$P_{VerDC} = 30,8 \text{ W/m/Phase} * 1000\text{m} * 3\text{Phasen} * 2\text{Systeme} = 184800\text{W}$$

$$P_{VerSP} = P_{VerDC} * 0,05 = 9240\text{W}$$

$$P_{GesamtVer} = P_{VerDC} + P_{VerSP} = 184800\text{W} + 9240\text{W} = \underline{194040\text{W}}$$

Bei der Berechnung der Gesamtverlustleistung eines supraleitenden Wechselspannungskabels fallen auch Leiterverluste an. Diese sind aber im Verhältnis viel geringer und liegen bei ca. einem Watt pro Meter und Phase. Die dielektrischen Verluste sind hierbei nicht mehr vernachlässigbar klein und werden mit 0,4 Watt pro Meter pro Phase berechnet. Es fallen natürlich auch thermische Verluste an, die durch das Kryostat hervorgerufen werden. Diese liegen bei 1 - 1,5 Watt pro Meter und Phase. Die Endverschlüsse müssen dann natürlich auch noch berücksichtigt werden, die Werte für die Verluste liegen zwischen 20 und 40 Watt pro Kiloampere. Die größte Verlustart in einem Supraleitersystem ist die Kälteanlage, diese hat nur einen Wirkungsgrad von etwa fünf bis neun Prozent. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurden die gleichen Rahmenbedingungen angesetzt. Es handelt sich hier um 110 kV, 3 kA HTSL-AC-Kabel bei einer Länge von 1000 m.

Anzumerken ist, dass bei der Berechnung immer der Mittelwert genommen wurde. Für die Kältemaschine wurde ein mittlerer Wirkungsgrad von sieben Prozent angenommen.

$$P_{VerAC} = 1 \text{ W/m/Phase} * 1000\text{m} * 3\text{Phasen} = 3.000\text{W}$$

$$P_{VerDielektrisch} = 0,4 \text{ W/m/Phase} * 1000\text{m} * 3\text{Phasen} = 1200\text{W}$$

$$P_{VerKryostat} = 1,25 \text{ W/m/Phase} * 1000\text{m} * 3\text{Phasen} = 3.750\text{W}$$

$$P_{VerEndverschluss} = 30 \text{ W/kA} * 3\text{kA} * 3\text{Phasen} * 2 (\text{Endverschlüsse}) = 540\text{W}$$

$$P_{VerOhneKältemaschine} = P_{VerAC} + P_{VerDielektrisch} + P_{VerKryostat} + P_{VerEndverschluss}$$

$$P_{VerOhneKältemaschine} = 3000\text{W} + 1200\text{W} + 3750\text{W} + 540\text{W} = 8.490\text{W}$$

$$P_{GesamtVer} = P_{VerOhneKältemaschine} * 100/7 = \underline{121.500\text{W}}$$

Die Berechnung eines supraleitenden Gleichspannungskabels sieht ähnlich der Berechnung eines supraleitenden Wechselspannungskabels aus. Allerdings fallen die dielektrischen Verluste weg, indem keine wechselnde Polarität auftritt, wie sie bei der Wechselspannung vorkommt, und es fallen auch keine AC-Leiterverluste an. Dieses

System verfügt über nur zwei Phasen, um die gewünschte Leistung zu übertragen.

$$P_{VerKryostat} = 1,25 \text{ W/m/Phase} * 1000\text{m} * 2\text{Phasen} = 2500\text{W}$$

$$P_{VerEndverschluss} = 30 \text{ W/kA} * 3\text{kA} * 2\text{Phasen} * 2 (\text{Endverschlüsse}) = 360\text{W}$$

$$P_{VerOhneKältemaschine} = P_{VerKryostat} + P_{VerEndverschluss}$$

$$P_{VerOhneKältemaschine} = 2500\text{W} + 360\text{W} = 2860\text{W}$$

$$P_{GesamtVer} = P_{VerOhneKältemaschine} * 100/7 = \underline{40857\text{W}}$$

In der folgenden Tabelle 11 wurde eine Aufstellung der Gesamtverlustleistungen gegeben. In der Berechnung von einem supraleitendem AC-Kabel im „worst case“ fallen annähernd die gleichen Verluste an wie bei einem konv. Kabels. Beim supraleitenden Gleichspannungskabel ist die Differenz wesentlich größer. Der Unterschied im Bezug auf die Verluste im DC-Kabel ist im „worst case“-Szenario nicht ganz ein Dittel der Verluste eines konv. Kabels. Jedes Watt, das bei supraleitenden Kabeln anfällt, schlägt sich stark auf die Gesamtverluste nieder, dafür ist der verhältnismäßig schlechte Wirkungsgrad der Kältemaschine verantwortlich. Im „best case“ hat das supraleitende AC-Kabel die halben Verluste gegenüber dem konventionellen Kabel. Noch deutlicher sind die Verlustleistungseinsparungen bei der DC-Übertragung ersichtlich, hier sind die Verluste im „best case“ nur ein Siebtel im Vergleich zum konv. Kabel.

Tabelle 11: Gesamtverlustleistungsvergleich eines konventionellen Kabels, eines supraleitenden AC-Kabels und eines supraleitenden DC-Kabels laut obrige Berechnung und worst/best case-Berechnung

	110 kV, 3 kA, 1000 m 2-VPE-Kabel, parallel	110 kV, 3 kA, 1000 m 1-HTSL-AC-Kabel	110 kV, 3 kA, 1000 m 1-HTSL-DC-Kabel
Gesamtverlustleistung laut Berechnung (Mittelwert)	194,04 kW	121,5 kW	40,857 kW
Gesamtverlustleistung 1,5 W/m/Phase, 40 W/kA/Phase, Wirkungsgrad 5 % (worst case)		188,4 kW	69,6 kW
Gesamtverlustleistung 1 W/m/Phase, 20 W/kA/Phase Wirkungsgrad 8 % (best case)		94,5 kW	28 kW

Bei dieser Berechnung ist zu beachten, dass die Kabel unter Vollast betrieben werden. Das heißt bei maximalem Strom hat das supraleitende Kabel geringere Verluste gegenüber dem konventionellen Kabel. Die Gesamtverluste, die auf der supraleitenden Kabelstrecke anfallen, hängen somit stark von der Belastung ab, denn wenn auf dem supraleitenden Kabel keine Leistung übertragen wird, muss das System trotzdem auf Arbeitstemperatur, also zwischen 69 - 75 K gehalten werden. Bei dem konventionellen

Kabel fallen bei einer geringen Belastung weniger Verluste an. Welches Kabel in Bezug auf die Verluste eingesetzt werden sollte, muss in jedem Anwendungsfall mittels eines Belastungsprofils ermittelt werden. Mithilfe der Aufzeichnungen der letzten Jahren kann auf die zukünftige Leistungsübertragung geschlossen werden.

3.11.2. AmpaCity-Projekt

Es wurden schon ein paar technische Daten des AmpaCity Projekt erwähnt. Das Projekt wird in Essen/Deutschland von RWE, Nexans, KIT (Karlsruhe Institut für Technologie), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie sowie vom Projektträger Jülich durchgeführt. Zum einen läuft das Projekt schon im Testbetrieb, zum anderen ist es das erste Projekt weltweit, das mit einer Kabellänge über 1000 m realisiert wurde. Als Kabelsystem wurde ein Triaxialkabel gewählt, welches aus drei Phasen und einem gemeinsamen Neutralleiter besteht, wie Abbildung 19 zeigt. Bei dem Kabel handelt es sich um ein Hochtemperatursupraleiterkabel der 1. Generation, welches für eine Länge bis über 500 m produziert werden kann. Insbesondere in einer Großstadt ist es zweckmäßig mit so einem Energiekabel die Effizienz und die Leistungsdichte zu steigern. Zudem kann auf eine Hochspannungsübertragung von 110 kV verzichtet werden, denn der Energietransport erfolgt auf der 10-kV-Spannungsebene. Dadurch konnten zwei Transformatoren und ein ganzes Umspannungsfeld eingespart werden. In der nachfolgenden Abbildung 37 ist auf der Basis eines Satellitenbildes der supraleitende Kabelverlauf im Stadtzentrum von Essen dargestellt.

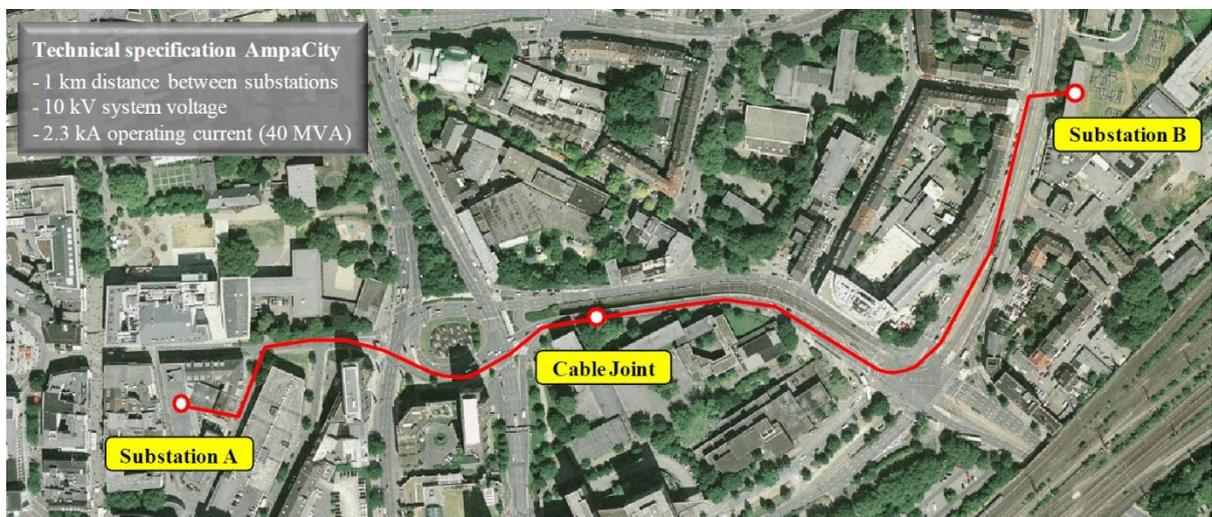


Abbildung 37: Kabelverlauf vom AmpaCity-Projekt in Essen [AMP2]

3.12. Resümee

Das große Potenzial der supraleitenden Kabeltechnologie liegt darin, dass die gleiche Leistung auf einer geringeren Spannungsebene transportiert werden kann. Dadurch können große und teure Transformatoren eingespart werden. Zudem können hohe Übertragungsleistungen bei gleichem Durchmesser und dies bei wesentlich geringeren Übertragungsverlusten erfolgen. Wenn insbesondere in Ballungsräumen der Platz

knapp wird und für den Ausbau neuer Kabelstrecken ein neuer Tunnel benötigt werden wird, können supraleitende Kabel durch den kleineren Leiterquerschnitt und höheren Leistungsdurchsatz den Platzverbrauch erheblich minimieren. Zudem treten beim Einsatz von Koaxialkabeln oder Triaxialkabeln weniger Streufelder auf. Nachteilig sind bei supraleitenden Kabeln die sehr aufwendigen und teureren Kabelendverschlüsse und das benötigte Kühlsystem. Es gibt viele Anwendungspotenziale, wie das AmpaCity-Projekt, indem die Energieübertragung zwischen zwei Umspannwerken erfolgt, oder die Kraftwerksausleitung sowie den Betrieb von Industrienetzen. Vorteile bzw. Nachteile sowie Einsatzmöglichkeiten sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Wesentliche Eigenschaften supraleitender Kabel [KIT2]

Vorteile der supraleitenden Ausführung
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Übertragung bei kleineren Spannungsebenen (z. B. 380 kV auf 110 kV oder 110 kV auf 10 kV) ➤ Höhere Übertragungsleistung bei gleichem Leiterquerschnitt ➤ Geringere Übertragungsverluste ➤ Geringere Installationskosten, wenn dadurch kein neuer Tunnel benötigt wird ➤ Keine elektrischen Streufelder beim Einsatz von Koaxialkabeln und Triaxialkabeln ➤ Keine Bodenerwärmung
Nachteile der supraleitenden Ausführung
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sehr aufwendige Kabelendverschlüsse (elektrisch und thermisch) ➤ Aufwendiges Kühlsystem ➤ Herstellungsprozess sehr kostenintensiv
Einsatzmöglichkeiten von supraleitenden Kabeln
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Energieübertragung und -verteilung in Großstädten (Metropolenregionen) ➤ Energieübertragung von Kraftwerken in Großstädte die in der Nähe liegen ➤ Industrienetze, insbesondere für energieintensive Betriebe (z. B. Aluminiumherstellung)

4. Nanotechnologie

4.1. Einleitung

Der erste wirkliche Visionär der Nanotechnologie war, aus heutiger Sicht, der Physiker Richard P. Feynman. Er erhielt für seine Grundlagenforschung im Bereich von Quantenelektrodynamik und elementaren Partikel den Nobelpreis für Physik im Jahr 1965. [NOB1].

Nanotechnologie setzt sich aus zwei Wörtern zusammen, einerseits aus dem Wort „Technologie“ im Sinne von Technik, nicht üblicherweise einschränkend auf technische Verfahren, und andererseits aus dem Wort „nano“, das sich aus dem griechischen „nanos“ für „Zwerg“ oder „zwerghaft“ ableitet. Das Präfix „nano“ dient zudem zur Beschreibung physikalischer Maßeinheiten. Bei Nano handelt es sich um ein Milliardstel Teilchen (10^{-9}) einer Maßeinheit.

Unter Nanotechnologie werden Eigenschaften, die auf Grund der Größe der Teilchen hervorgerufen werden, subsumiert. Diese speziellen Eigenschaften treten in der Regel im Bereich von ca. 1 nm bis 100 nm auf. Innerhalb dieses Bereiches besitzen die meisten Materialien nicht mehr ihre üblichen Eigenschaften. In der Norm ISO 80004 ist die Nanotechnologie definiert. Diese Definition beschreibt, dass Eigenschaften und Phänomene von der Größe und Struktur einzelner Partikel abhängig sind und diese kontrolliert und manipuliert werden können. Dies kann mithilfe einzelner Atome, Moleküle oder Bulk-Materialien geschehen. Das heißt, dass die Teilchen in der Größenordnung von einigen nm bis hundert nm ein anderes Verhalten bzw. andere Eigenschaften aufweisen als im Bulk (im großen Materialverbund). [ISO1]

Die Tatsache, dass sich die Materialeigenschaften von massiven Masseteilchen und Nanoteilchen drastisch unterscheiden, ist empirisch schon seit der Römerzeit bekannt, jedoch nicht physikalisch. Die Römer verwendeten schon in ihrer Zeit feinste Goldpartikel bzw. Gold-/Silberpartikel der Größe von ca. 70 nm, um Gläser spezielle Farbeffekte zu verleihen. Mit dieser Art der Veredelung gelang es, die sogenannten Rubingläser zu produzieren. Wie in Abbildung 38 ersichtlich, hat der Lycurgus-Pokal die Eigenschaft, dass dieser bei direkter Beleuchtung eine grüne Reflexion (linker Pokal) hat und wenn der Pokal von hinten beleuchtet wird, wirkt er rot (rechter Pokal). Es wurde natürlich nicht gezielt in diesem Bereich geforscht, es verdeutlicht allerdings den kausalen Zusammenhang zwischen Partikelgröße und den unterschiedlichen Eigenschaften von herkömmlichem Material. [FNT1]



Abbildung 38: Lycurgus-Pokal aus dem 4. Jahrhundert, National British Museum of History [LPH1]

Feynman verwendete den Begriff „Nanotechnologie“ nie konkret, dieser Terminus wurde später von dem Japaner Norio Taniguchi im Jahre 1974 eingeführt.

Allein die Größe solcher Teilchen ist aussagekräftiger als eine reine Längen- oder Volumenangabe, es kann mit der Größe der Teilchen auch die Härte, die Farbe die chemische Reaktivität oder die elektrische Leitfähigkeit vom kleinsten Partikel abhängig gemacht werden. Diese Eigenschaften können dann direkt vom Partikeldurchmesser abgeleitet werden, der bei größeren Strukturen von Materialien nicht beobachtet bzw. getroffen werden kann. Ein kleines Beispiel zur Illustration: ein Stecknadelkopf, der aus Metall, z. B. Stahl, besteht, silbrig glänzend ist und eine allgemeine elektrische Eigenschaft besitzt. Diese Nadel hat eine bestimmte Härte und verhält sich gleich wie ein großer Gegenstand aus dem gleichen Material, der aber tonnenschwer ist. Dagegen verhalten sich Halbleitermaterialien komplett anders, wenn die kritische Größe, ob Dicke oder Volumen, von solch einem Material erreicht wird. Es können elektrische Ströme durch isolierende Keramiken fließen, wie im vorherigen Kapitel der Supraleiter dargestellt wurde. Halbleitermaterialien können supraleitende Eigenschaften besitzen und können bei richtiger Dotierung hohe Stromstärken tragen. Andere Halbleiter haben die Eigenschaft, dass bei steigender Spannung der Strom nur noch stufenförmig steigt. Dies waren nur zwei Beispiele, um aufzuzeigen, dass diese Eigenschaften schon Einzug in die Praxis gefunden haben. [FNT1]

Wissenschaftlich wurde nachgewiesen, dass sich gerade in diesem Nanobereich komplett neue Funktionalitäten auf tun. Es gibt zwei grundlegende Verfahren, um solche Nanostrukturen zu erzeugen: einerseits wird die Bottom-up-Methode verwendet, wie in Abbildung 39 ersichtlich. Dabei wurde ein Nanobauteil aus einzelnen Atomen bzw. Molekülen zusammengesetzt. Allerdings ist hierbei die große Herausforderung, diese in tausendfacher Ausführung zu synthetisieren.

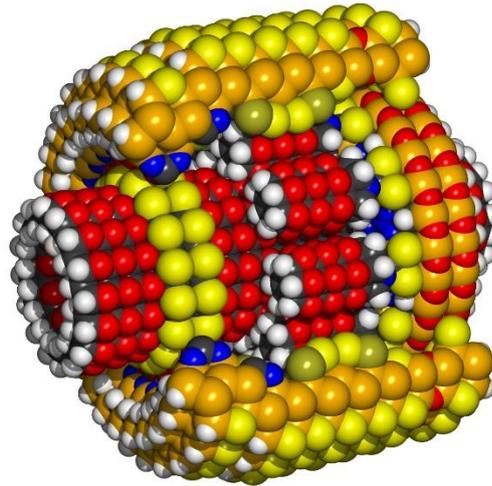


Abbildung 39: Ein Nanobauteil, aus einzelnen Atomen zusammengesetzt [IMM1]

Das zweite Verfahren ist die Top-down-Methode. Hier wird im Gegensatz zum Bottom-up eine sukzessive Verkleinerung von Materialien vom Milli- in den Mikro- und dann in den Nanobereich vorgenommen, bis die Materialien die speziellen Eigenschaften aufweisen.

Speziell in der Chemie wird indirekt schon seit Jahrzehnten auf Nanostrukturen gesetzt, wie es in Abbildung 40 gezeigt wird. Gut zu beobachten ist allerdings, dass sich die Festkörperphysik in den letzten 80 Jahren stark an die Chemie angenähert hat und sich so ein neues gemeinsames Forschungsfeld der Nanostrukturen bzw. Nanotechnologie gebildet hat. Es zeigt auch die schrittweise Verkleinerung der Festkörperphysik bis in den Nanometerbereich.

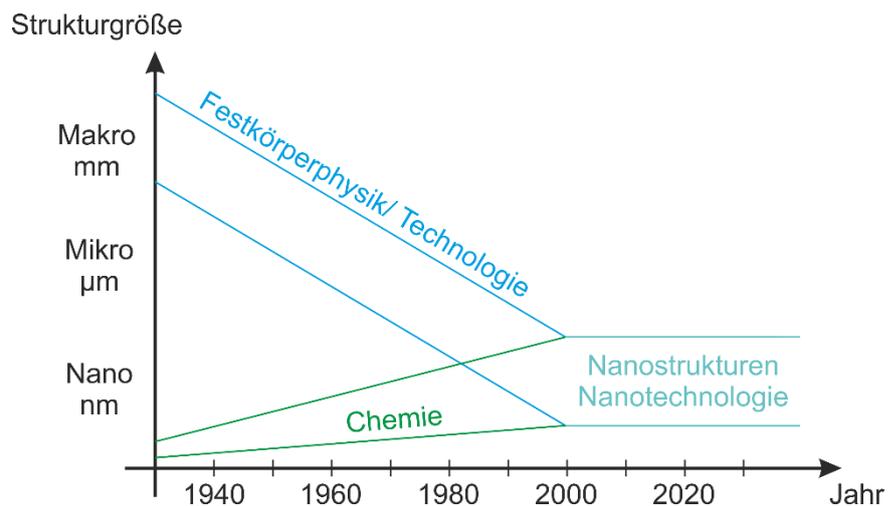


Abbildung 40: Entwicklung mittels Top-down- und Bottom-up-Ansätzen, um Nanostrukturen zu gewinnen [FNT1]

4.2. Miniaturisierung

Das Top-down-Verfahren verfolgt das Prinzip, von einer großen Struktur zu einer immer kleineren Struktur zu werden. Dies findet schon seit Jahren bei den Prozessoren ihre Anwendung, um immer kleinere Strukturen zu fertigen. Die Miniaturisierung hat allerdings wissenschaftliche, technische und ökonomische Grenzen, die die Weiterentwicklung aufhalten könnten. Denn wenn eine gewisse Grenze überschritten wird, kommt es zu quantenmechanischen Phänomenen, die noch erforscht werden müssen. Gerade bei den Computerprozessoren, die immer kleiner gefertigt werden, kommt es im Hinblick auf die Strukturbreite zu Einschränkungen, da Quantenphänomene auftreten. Durch die Miniaturisierung werden diese Prozessoren immer leistungsfähiger, effizienter, kostengünstiger und damit ökonomischer. Auf Grund der Miniaturisierung kosten die Prozessoren das Gleiche, wie die Prozessoren der letzten Generationen davor gekostet haben. Nach dem Moor'schen Gesetz, benannt nach Gordon Moore, einem der Intel-Gründer, verdoppelt sich ca. alle 18 Monate die Transistorenanzahl und somit auch die Integrationsdichte bei gleichbleibender Fläche, d. h. die Strukturbreite der Bauteile wird immer kleiner [INT1]. Der kontinuierliche Fortschritt kommt allerdings jetzt schon teilweise an seine Grenzen. Bei einem Technologiesprung von einer größeren Fertigungsgröße auf eine kleinere müssen meist neue Fabriken gebaut werden. Immer wieder neue Fabriken zu bauen, ist aber auf Dauer nicht wirtschaftlich bzw. rentabel, deswegen werden Joint-Ventures mit anderen großen Herstellern eingegangen. Ein anderer essenzieller Grund ist, wenn ein Schaltkreis nur noch aus wenigen Atomlagen besteht, dann verliert das Bauteil die gewünschten Eigenschaften. Es kommen dann quantenphysikalische Phänomene zum Tragen, diese stecken bei der Erforschung noch in ihren Kinderschuhen. [NIT1]

Gerade die Miniaturisierung hat sich schon immer für die Entwicklung neuer Technologien als würdig erwiesen, um einen Fortschritt zu erringen. Es gibt aber immer wieder Grenzen, seien es wirtschaftliche, technische oder gar wissenschaftlich. Somit sind immer wieder neue Herausforderungen zu meistern, um eine homogene Strukturierungsgrundlage zu schaffen. Dabei haben die lithographischen Verfahren einen großen Einfluss, wie bei asymptotischer Strukturierung von sehr dünnen Schichten. Diese Technik kann auch bei dickeren Halbleitermaterialien angewendet werden. Das Fertigen solcher Schaltungen geschieht mit einer Belichtung einer Maske. Nach der Belichtung ist die Schaltung auf dem Silizium mit Hilfe des lichtempfindlichen Resistfilms aufgebracht. Resist ist ein Polymermaterial, das bei der Belichtung seine Eigenschaften ändert. Danach folgt auf Strukturbasis die Fertigung mithilfe von Ätz-, Depositions- und Implantationsvorgängen. [NIT1]

Für Bauelemente mit Nanostruktur wird meistens Silizium als Basiswerkstoff verwendet. Auf diese Siliziumbasis werden verschiedene Metalle aufgebracht, um die gewünschte Funktion zu bekommen. Es werden Verbindungshalbleiter sowie auch polymere und organische Materialien aufgetragen. Jedes Material verlangt teilweise ein eigenes Verfahren, um bearbeitet werden zu können. Eines der beiden grundlegenden Top-down- und Bottom-up-Verfahren findet dabei immer seine Anwendung. Traditionell dominiert das Top-down-Verfahren, denn es ist bis zu einem gewissen Grad leichter, etwas zu verkleinern als mithilfe von Atomen oder Molekülen etwas aufzubauen. Das Bottom-up-Verfahren wird allerdings dort eingesetzt, wo

spezifische Kompositionen entstehen müssen.

Ein weiteres Kriterium sind die quantenmechanischen Naturgesetze. Diese schränken das Downscaling bzw. Top-down-Verfahren ein. Denn wenn das Bauteil nur mehr aus einer sehr dünnen Oberflächenschicht besteht, hat es wesentlich andere Eigenschaften als ein Bauteil mit einem Volumen. Einen guten Vergleich stellt ein Transistor dar: Wenn dieser in Mikrometertechnologie gefertigt wird, kommt er auf ca. 10^{12} Atome im Unterschied zu einem Transistor in der Nanometertechnologie, der gerade einmal 1000 Atome aufweist. Es ist nicht verwunderlich, dass das physikalische Funktionsprinzip nicht mehr ohne Weiteres anwendbar ist. Wenn es noch kleiner werden soll, kommt die Bottom-up-Methode ins Spiel, denn bei dieser Methode sind die physikalischen und chemischen Verhaltensmuster nicht maßgeblich einschränkend, wie eine solche Nanostruktur hergestellt wird. Es kommt dabei auf jedem Fall zu einem Paradigmenwechsel, denn bekannte Materialien bzw. Bauelemente haben bei Unterschreitung einer gewissen Größe komplett andere Eigenschaften, die in der Quantenphysik begründet sind. Diese Bottom-up-Methode hat daher noch ein großes Forschungspotenzial.

4.3. Analytische Verfahren

Eine Herausforderung ist die Erzeugung von solchen Nanopartikeln. Die wesentlich größere Herausforderung aber ist der Nachweis von diesen Nanopartikeln, diese zu analysieren und die Größe zu bestimmen. Daher kam ein erster großer Vorstoß mit der Rastertunnelmikroskopie, die Ende 1981 von den beiden Physikern Gerd Binnig und Heinrich Rohrer vom IBM-Forschungslabor entwickelt wurde. Die beiden Forscher bekamen den Nobelpreis für Physik im Jahr 1986 [NOB1]. Die Entwicklung dieses Gerätes ist eine wertvolle Errungenschaft in Bezug auf die Nanotechnologie und Ausgangspunkt für die Erforschung von Nanopartikeln. Denn dieses Gerät macht es erst möglich, das Material auf der atomaren und molekularen Ebene zu analysieren und auch zu manipulieren. In der Forschung sind die Rastersondenmikroskope durch ihren einfachen Aufbau und ihre gute Verfügbarkeit in der Nanotechnologie nicht mehr wegzudenken. Diese Entwicklung ist in der Mikroelektronik essentiell, denn handelsübliche Desktopprozessoren, wie z. B. der Intel i7 mit Haswell-Architektur, werden mit einer Strukturbreite von 22 nm gefertigt (Stand 2013/14) [INT1].

Um sicherzustellen, ob es sich wirklich um ein Nanoteilchen handelt und um welches es sich handelt sowie welche Eigenschaften dieses besitzt, muss das Objekt gründlich analysiert werden. Es gibt eine Reihe von analytischen Verfahren, die alle das Ziel haben, einen Werkstoff zu vermessen, ob im Hinblick auf Geometrie, Härte, chemische Zusammensetzung, elektronisches Transportverhalten oder optisches Verhalten. Ohne diese Werkzeuge zur Analyse der Komponenten einer Nanostruktur wäre die Erforschung der Nanotechnologie nicht möglich. Es ist jedoch nur dann sinnvoll, präparative Verfahren für die Nanotechnologie zielgerichtet zu entwickeln, wenn zur Überwachung analytische Verfahren zur Verfügung stehen.

Um nun die Eigenschaften von solchen Materialien zu qualifizieren und zu quantifizieren, muss zum Detektieren der Struktur bzw. Größe immer eine geeignete Sonde zur Analyse verwendet werden. Einerseits sind mögliche Methoden auf Grund der Eigenschaften nicht einsetzbar und andererseits wird bei jedem Messvorgang das

Material in irgendeiner Form beeinflusst, z. B. fließen Elektronen oder es werden Photonen abgestrahlt. In Abbildung 41 ist schematisch dargestellt, welche Möglichkeiten bestehen, um die Eigenschaften von einem Material analytisch zu bestimmen. Es wird von außen auf die Probe eingewirkt, und die Reaktion von dem Stimulus wird dann ausgewertet. Ein Beispiel ist die Beleuchtung der Probe, und geladene Teilchen bewegen sich. Dieser Elektronenfluss, der gemessen wird, gibt Erkenntnisse auf die Eigenschaft des Materials, aber auch die Erwärmung kann Erkenntnisse liefern. Eine Kombination aus mehreren Stimuli ergibt immer ein genaueres Eigenschaftsmuster und dadurch exaktere Ergebnisse. Allgemein funktioniert die Messung mit Hilfe von Sonden, die auf die Probe einwirken und daraus eine Antwort erzeugen. Meist ist es ein elektrisches Signal, welches gemessen wird. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Sonde immer einen physikalischen Einfluss auf die Probe hat und somit das Messergebnis nie 100 % des wahren Wertes widerspiegeln kann. Durch das Messen wird auch die Probe verändert. Deswegen ist die Wahl der geeigneten Sonde bzw. Sondenkombination für jedes Material von zentraler Bedeutung. [FNT1]

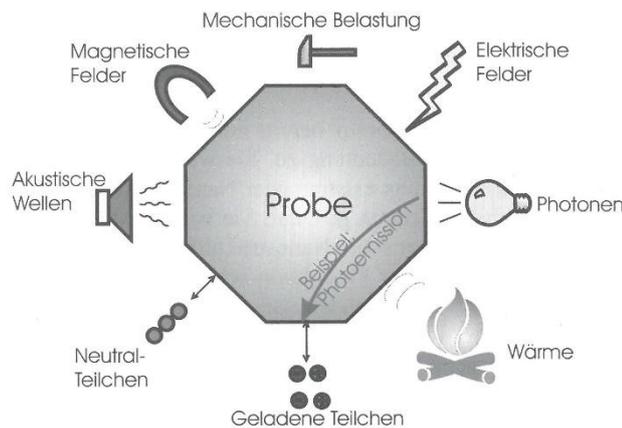


Abbildung 41: Die Analytik hat die Reaktion auf einer Probe von einer externen Quelle zur Grundlage [FNT1]

Rastertunnelmikroskopie ist ein Verfahren zur Analyse von Materialeigenschaften bzw. -struktur. In Abbildung 42 ist so ein abgetastetes Bild erkennbar, das mit einem Rastertunnelmikroskop (RTM) aufgenommen wurde. Es wird mithilfe einer spitzen Nadel, der sogenannten Sonde, mit einem Abstand von nur wenigen Atomen über die Oberfläche bewegt. Es kommt zu einem Stromfluss, obwohl ein Abstand zwischen Sonde und Messobjekt besteht, der sogenannte Tunneleffekt wird hierbei ausgenutzt. Es ist mit Hilfe dieser Technik möglich, im Vakuum, in Luft und sogar in Flüssigkeiten zu messen. Das anzuwendende Messverfahren ist natürlich von der Probe bestimmt. Selbst Materialien, die elektrischen Strom sehr schlecht leiten, können mit dem RTM gemessen werden, ohne die Oberfläche vorher zu präparieren. Durch eine gezielte Änderung des Messinstrumentes können Kräfte, elektrische Ladungen, Temperaturen und magnetische Momente gemessen werden. [RTM1]



Abbildung 42: Aufnahme eines Elektronenrastertunnelmikroskops: Es handelt sich hierbei um eine Kupferoberfläche, die mit Stickstoff beschossen wurde [RTM2]

Es kann nicht nur, wie in der oberen Abbildung 42, die Oberflächenbeschaffenheit gemessen werden. Mit einem RTM ist es auch möglich, diese Oberfläche zu verändern, wie in Abbildung 43 gezeigt wird. Diese IBM-Struktur wurde von zwei IBM-Wissenschaftlern, Binnig und Rohrer, in einem IBM-Forschungslabor mit Hilfe eines RTM erstellt.

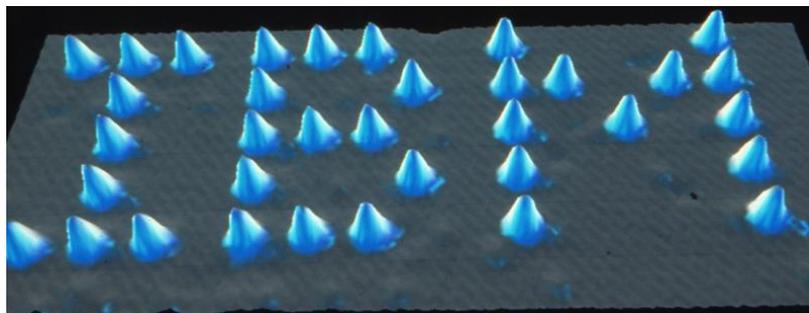


Abbildung 43: IBM-Schriftzug, der mit Hilfe der RTM erstellt wurde [RTM3]

Es ist allgemein von Interesse, die Struktur sowie die Eigenschaften räumlich und zeitlich zu messen, denn die Teilchen bei der Makrostruktur können noch als statisch angenommen werden. Bei der Nanostruktur ist das nicht mehr möglich, diese Teilchen sind nämlich besonders dynamisch. Deswegen ist nicht nur die räumliche Auflösung wichtig, sondern auch eine hohe zeitliche Auflösung nötig. Wie in Abbildung 44 ersichtlich, gibt es noch kein Verfahren mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Die Verfahren für die räumliche Oberflächenanalyse sind das scanning tunneling microscope, kurz STM, im englischen Sprachraum, und im deutschen Sprachraum ist es das RTM. SFM für scanning force microscope (Rasterkraftmikroskop), SEM für scanning electron microscope, als Rasterelektronenmikroskop. Die Charakterisierung der funktionalen Eigenschaften im zeitlichen und räumlichen Spektrum ist in Abbildung 44 illustriert. Ein gutes Beispiel für die hohe Dynamik ist das Erfassen der Geschwindigkeit von in Wasser gelösten Ionen. Diese H₂O-Moleküle reorientieren

sich unter Umständen 10^{14} mal in der Sekunde. Um das dynamische Verhalten sowie die Charakteristik der Ionen in der Hydrathülle nachzuvollziehen, wird keine sonderlich hohe Auflösung benötigt, lediglich die zeitliche Auflösung muss mit 10^{-14} Sekunden erfasst werden können. Es gibt zwar Messverfahren, wie die optische Mikroskopie, die im Verhältnis zum RTM schnell ist, jedoch leidet hierbei die räumliche Auflösung.

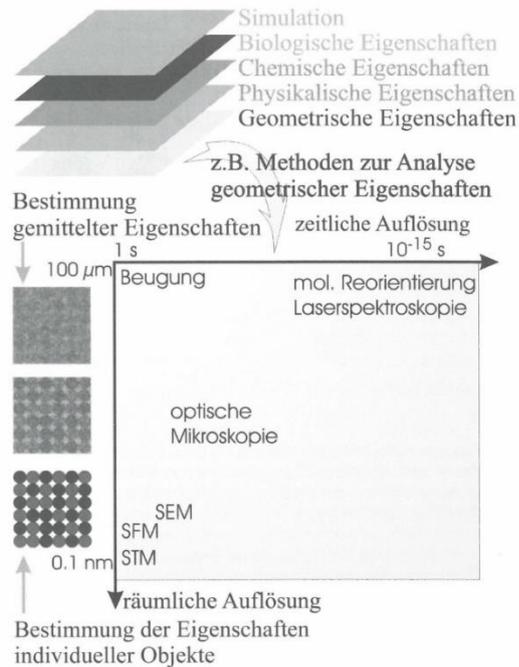


Abbildung 44: Charakterisierung von räumlicher Auflösung zur zeitlichen Auflösung und welches Verfahren verwendet werden kann [FNT1]

Es steckt gerade hier enormes Forschungspotenzial, und Entwicklungsarbeit ist erforderlich, um Verfahren zu entwickeln, die eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung besitzen. Denn kein Naturgesetz, auch nicht die Heisenberg'sche Unschärferelation, verbietet so eine grundsätzliche Entwicklung.

Mit der heutigen Computertechnik können Nanostrukturen simuliert werden, die in Form von numerischen Modellen erstellt werden. Die Eigenschaften von Nanosystemen können durch diese Modellierungen im Verhältnis zu realen Experimenten preislich attraktiver sein und können auch wesentlich leichter zugänglich gemacht werden.

Letztendlich besteht die Nanoanalytik im Allgemeinen aus den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften, die auf der Nanometerebene analysiert werden. Es ist hierbei wichtig, ein Verfahren zu entwickeln, das eine hohe räumliche Auflösung wie das RTM und auch eine zeitliche Auflösung wie die mol. Reorientierungs-Laserspektroskopie aufweist. Grundsätzlich ist noch zu erwähnen, dass die Materialstruktur im Nanometerbereich mithilfe von Beugungs-Streumethoden oder mikroskopischen Methoden gemessen wird. Individuelle Strukturen sind nur mit mikroskopischen Methoden genau genug aufzulösen. [FNT1]

4.4. Anwendungsgebiete in der Kabeltechnik

Polymere Nanokomposite (PNC von polymer nanocomposites) oder auch Polymer Nanoverbundwerkstoffe genannt, sind definiert als kleine Anzahl von Nanometer großen Füllern, die homogen und nur von wenigen Gewichtsprozent (weight percentage, %wt), in einem synthetischen Polymer eingebettet werden. Die Beigabe von nur wenigen Gewichtsprozenten hat schon einen großen Einfluss auf die physikalischen, chemischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften von einem Polymer. Diese Errungenschaft in der Nanokompositentechnologie hat eine große Bedeutung für die Kunststoffherstellung. Dies hat großes Potenzial für Anwendungen in der Materialstruktur wie z. B. bei Beschichtungen, im medizinischen und biomedizinischen Bereich sowie in der Elektronik und bei photonischen Geräten. IBM-Forscher, unter Jamie Garcia, erfanden allerdings durch Zufall ein Polymer, das sich selber heilen kann, sehr stark, leicht und widerstandsfähig gegen Lösungsmittel ist. Mit der Zugabe von Kohlenstoffnanoröhrchen wird das Material noch einmal deutlich stabiler. Dies ist nur ein aktuelles Beispiel, welches großes Potenzial von Nanopartikeln es gibt [IBM1]. Es ist somit auch vorstellbar, selbstheilende Kabel zu entwickeln. Durch die großen Fortschritte in den letzten Jahren wurde auch das allgemeine Interesse für die Forscher im Bereich des Dielektrikums und der elektrischen Isolation geweckt. [PNC1]

Einige dieser Verfahren, um Nanopartikel einzubringen, sind reaktives Vermischen, geschmolzenes Mixen, thermisch-kinetisches Mixen, extrudieren, hineinblasen und injizieren. Materialien, bei denen diese Methoden angewendet wurden sind unter anderem die Gruppe der Polyolefine, wie z. B. Polyethylen, Polypropylen Polyethylenterephthalate, Epoxid, sowie Elastomere, wie Silikonelasten, Ethylene-Propylene Rubbers und Elastomers (EPR/EPDM), Polyamide und Polyimide. [PNC2]

Mit vernetztem Polyethylen, im englischen als Cross Linked Polyethylene kurz XPLE-Kabel bekannt, gibt es schon seit Jahren gute Erfahrungen, jedoch nur für Hochspannungswechselstromkabel. Der Grund, wieso diese XPLE-Kabel nur eingeschränkt für die Gleichspannung eingesetzt werden, ist das Risiko der Raumladungsbildung in einem elektrischen Gleichfeld von nicht modifizierten Kabeln. Daher wird dieses Material nur sehr selten für hohe Gleichspannungsanwendungen verwendet. [PNC2]

Was können wir nun von dieser Nanopartikeldotierung im Dielektrikum sowie der elektrischen Isolation erwarten? Die höchste Priorität hat die Durchschlagspannungsfestigkeit, diese liegt von Polymeren bei Raumtemperatur generell bei ca. 10 MV/cm. Doch in der Praxis ist diese sehr viel niedriger. Der Grund dafür sind die internen Defekte des Materials. Für diesen Fall sollen Nanofüller dafür sorgen, dass trotz der Defekte im Polymer die praktische, also reale, Durchschlagspannungsfestigkeit ansteigt. Gerade in dieser Betrachtung können die Nanofüller bzw. die imprägnierten Nanopartikel eine ausgezeichnete Beteiligung an der Festigkeit in Bezug auf Teilentladungen und Treeing leisten. Die Dielektrizitätskonstante sowie der Verlustfaktor der Isolation sollen für die elektrische Isolation möglichst klein gehalten werden. Für Gleichspannungsanwendungen soll die Anordnung der Partikel so sein, dass sich die Raumladungen markant verringern. Die Wiederverwendbarkeit bzw. Recycelbarkeit ist generell immer ein großes Thema, um

unsere Umwelt und Natur zu schützen und nicht zusätzlich zu belasten. Alle diese Eigenschaften können mit der Nanotechnologie erreicht werden. [DEI1]

Ein kleiner Auszug der dielektrischen Eigenschaften von Polymere Nanocomposites (PNC) ist, dass die AC- und DC-Durchschlagspannungsfestigkeit bei einer nur geringen Zuführung von wenigen Gewichtsprozenten an Nanofüllern merklich steigt. Die Zeit zum Durchschlag in Treeing-Experimenten sowie die Teilentladungsfestigkeit steigt dabei signifikant. Die dielektrischen Verluste steigen bei höheren Frequenzen, und in den meisten Fällen haben Verunreinigungen und Wasserabsorptionen einen großen Effekt auf die dielektrische Materialantwort. Die nachfolgende Abbildung 45 gibt einen Einblick auf die Mikrostruktur eines polyolefinbasierenden Materials mit Nanokompositzusatz, das im flüssigen Zustand beigefügt wurde. [PNC1]

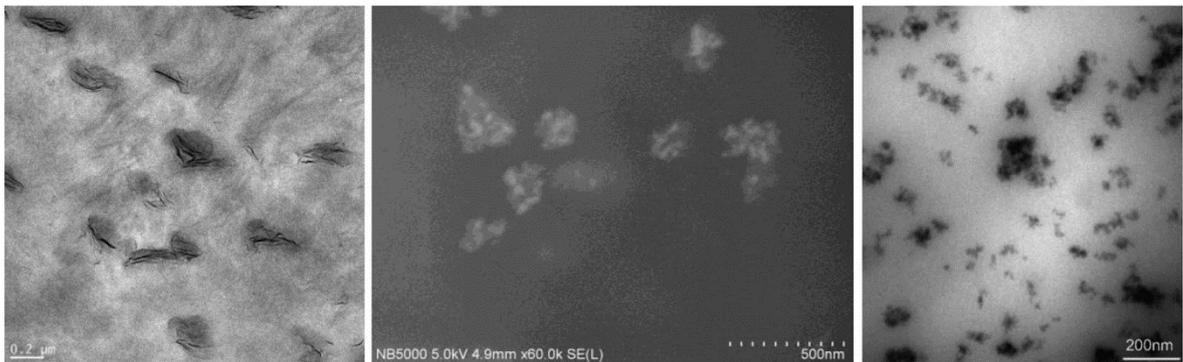


Abbildung 45: Polyethylene mit Füllern versetzt: Schichtsilikate (links), Siliziumoxid (Mitte), Nanopartikel von Siliziumoxid (rechts) [PNC1]

Ein etabliertes Verfahren, um PNC zu testen, ist der „Short-Time Breakdown Test“. Dieser wird angewendet, um isolierende Materialien für Hochspannungsapparaturen zu entwickeln. Dabei müssen diese eine höhere dielektrische Ausfallstärke, ein höheres dielektrisches Haltevermögen oder beides aufweisen. Der Short-Time Breakdown Test ist in der Norm IEC 60263-1 oder EN 60263-1:2013 standardisiert. In Abbildung 46 ist eine typische Messanordnung ersichtlich. Allerdings muss immer darauf geachtet werden, welche Prozedur angewendet wird. Es kommt auf Spannungssteigerung, geometrische Eigenschaften, Typ der Elektroden, auf die Dicke der Probe und das umgebende Medium an. Dabei muss mit äußerster Vorsicht vorgegangen werden, um die richtigen Eigenschaften zu bekommen. Prinzipiell sind die Messergebnisse im gleichen Labor unter gleichen Bedingungen gut vergleichbar. Wenn die Versuche allerdings in unterschiedlichen Laboren und Umgebungen durchgeführt werden, sind diese standardisierten Versuche sehr schwer zu vergleichen.

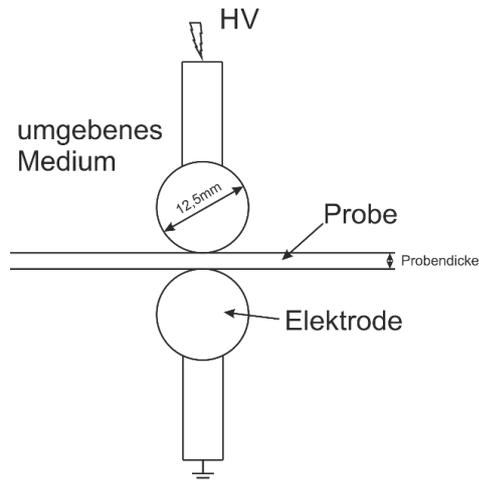


Abbildung 46: Messanordnung zum Messen des dielektrischen Zumsammenbruch [PNC1]

In einem Versuch mit vernetztem Polyethylen, welches mit verschieden großen Zinkoxid-(ZnO)-Partikeln versetzt wurde, haben Forscher aus Korea folgendes durchgeführt, siehe Paper [PNC2]: Hierbei wurde XPLE mit ZnO-Nanopartikel von durchschnittlich 20 nm und ZnO-Partikel von durchschnittlich 200 nm versetzt. Es wurden jeweils drei Proben mit unterschiedlichen Gewichtsprozent angefertigt. Die Proben wurden mit 1wt%, 3wt% und mit 5wt% und eine Probe mit keinem ZnO versetzt. Es wurden zweierlei Durchschlagsspannungsversuche durchgeführt. Der erste Versuch war bei pos. Polarität, der zweite war ein Polaritätsumkehrdurchschlagversuch. Diese Proben wurden wiederum bei zwei Temperaturen getestet, bei 25 °C und bei 90 °C. Der Versuch zeigte, dass jede der mit ZnO versetzten Proben eine kleinere Durchschlagsspannung gegenüber des reinen XPLE-Kabels ohne Nanopartikel hat. Die besten Ergebnisse erzielten die Proben mit 20nm bei 90°C und die 200nm bei 25°C. Es ist dabei anzumerken, dass die 20 nm Nanozinkoxide die Bewegung der freien Ladungen besser behinderten als die 200 nm großen Partikel, und es zeigte sich auch ein besseres Verhalten der 20 nm Partikel im Falle einer Entladung über eine Elektronenlawine. Schlussendlich lässt sich sagen, dass die 20nm Partikel mehr Entwicklungspotenzial haben als die größeren mit 200 nm. [PNC2]

4.5. Kabeln mit Nanofüllern

Das Electric Power Research Institute (EPRI) mit Sitz in den USA in Kalifornien hat, wie Abbildung 47 zeigt, einige Vorteile der Nanotechnologie entwickelt. Bei Kabeln mit Nanotechnologie kann dadurch die Isolierung reduziert werden. Diese VPE-Kabel wurden mit Vinylsilane Nanosilika versetzt.

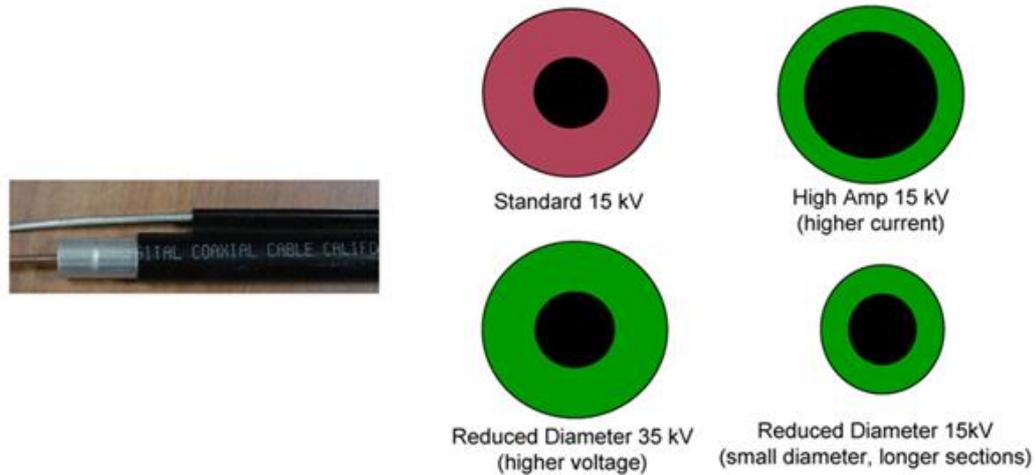


Abbildung 47: Nanokomposite Kabel, Größenvergleich [Quelle: EPRI] [DAE1]

Abbildung 48 zeigt ein 500-kV-VPE-DC-Seekabel das mit MgO Nanofillern versetzt wurde, das von der Firma Hitachi Cable Ltd. stammt.



Abbildung 48: 500-kV-VPE mit MgO-Nanofillern, DC-Seekabel [Quelle: Hitachi Cable Ltd.] [DAE1]

4.6. Resümee

Es wurden schon einige Methoden und Verfahren entwickelt, um die Nanotechnologie voranzubringen. Die Nanokomposite können für verschiedenste Anwendungsgebiete verwendet werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass vom Standpunkt der dielektrischen und elektrischen Isolation die Nanokomposite-Technologie große Vorteile gegenüber konventionellen Isolierstoffen hat. In Bezug auf elektrische, thermische und mechanische Eigenschaften ist noch viel Potenzial vorhanden. Die Ergebnisse können dann in den verschiedensten technischen Anwendungen eingesetzt werden. Um

vielleicht ein kompakteres Design von elektrischen Betriebsmitteln zu erreichen, mit einer höheren Zuverlässigkeit sowie einer Kostensenkung für das Gesamtsystem und die gesamte Instandhaltung. Schlussendlich ist es in der nahen Zukunft sicherlich möglich, dass auch quantenmechanische Effekte gezielt eingesetzt werden, um dabei noch bessere Gesamteigenschaften zu verwirklichen. Um ein exzellentes und kostengünstiges Polymer-Nanokomposite zu produzieren, müssen die Verfahren, die heute angewendet werden, weiterentwickelt werden, um dadurch die elektrischen und dielektrischen Isolationseigenschaften zu verbessern. Einige Anwendungsbereiche für die Zukunft sind in der elektrischen Isolation von Leistungsgeräten, Energiekabeln, Isolatoren und isolierten Kabeln für die Leistungselektronik wie auch für Platinen. Diese genannten Bereiche können mit Hilfe der Nanokompositentechnologie kompakter und preisgünstiger gebaut und installiert werden. Polymer Nanokomposite werden mit Sicherheit einen großen Beitrag zur Innovation von Dielektrika und Isolationen in der Elektrotechnik leisten. [DEI1]

5. Prüf- und Diagnosetechnik

5.1. Stehspannungsprüfung

Die Standardisierung des Stehspannungstestes ist in der Isolationskoordinationsnorm IEC 60071-1:2006 definiert. Des Weiteren wird nach der Norm IEC 60060-1:2010 die Spannungshöhe definiert und stellt die Anforderung, dass die Spannung hinreichend klein sein muss, die an den Prüfling angelegt wird. Es sollen dadurch Schalthandlungen, die zu Überspannungen führen, vermieden werden. Die Spannungssteigerung darf nicht zu schnell erfolgen, um das Ablesen der Instrumente zu ermöglichen, aber auch nicht zu langsam, um den Prüfling nicht unnötig mit Prüfspannung zu beanspruchen. Dies kann in den meisten Fällen erfüllt werden, wenn ab 75 % der Nennspannung die Spannungssteigerung von 2 % der Nennspannung pro Sekunde beträgt.

Typische Stehspannungsprüfungen dauern 60 s, wenn nicht anders vom zuständigen technischen Komitee festgelegt; d. h. wenn die Prüfspannungshöhe ± 1 % erreicht wurde, ist die Testzeit eine Minute. Danach soll die Spannung langsam auf 50 % gesenkt werden, dann kann der Prüfkreis abgeschaltet werden. Die Prüfung ist erfolgreich, wenn es zu keinem Durchschlag am Prüfling kommt.

Prinzipiell wird zwischen einer Wechselfspannungsprüfung und einer Gleichspannungsprüfung unterschieden. Bei der Wechselfspannungsprüfung muss die Spannung eine festgelegte Zeit aufrechterhalten bleiben und nach der Prüfung schnell abgesenkt werden. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Prüfung nicht blitzartig abgeschaltet wird, da dies zu Überspannungen führen kann und unter Umständen auch zu einem verfälschten Prüfergebnis. Die Prüfdauer hängt vom Prüfling ab und die Frequenz muss zwischen 45 Hz und 65 Hz liegen. Bei der Gleichspannungsprüfung muss die Spannung die gesamte Prüfzeit anliegen, danach müssen mithilfe eines geeigneten Widerstandes der Prüfkreiskondensator und der Prüfling entladen werden. Die Prüfdauer hängt wie bei der Wechselfspannungsprüfung vom Prüfling ab, wobei am Prüfling eine stationäre Spannungsverteilung anliegen muss [IEC1][IEC2].

5.2. Durchschlagspannungsprüfungen

Die Durchschlagspannungsprüfung kann bei selbstheilenden Isoliermedien mehrmals durchgeführt werden, bei nicht selbstheilenden in der Regel nur einmal, weil es zu einer Zerstörung des isolierenden Mediums kommen kann. Deshalb wird bei Kabelsystemen die Durchschlagspannungsprüfung selten angewendet. Ein allgemein wichtiger Punkt ist die Unabhängigkeit der einzelnen Messergebnisse. Dies kann statistisch bestimmt werden, indem z. B. ein Iterationstest oder ein Phasenhäufigkeitstest durchgeführt wird [TMT1].

Im nach nachfolgenden Verfahren werden rein selbstheilenden Materialien betrachtet. Es gibt drei große Verfahren, wie die Durchschlagspannung bestimmt werden kann. Ein Verfahren kann durchgeführt werden, indem die Spannung erhöht wird und es dann zu einem Durchschlag kommt. Es wird danach immer wieder von der Ausgangsspannungshöhe von Neuem angefangen. Dies ist in Abbildung 49

schematisch dargestellt. Das erste Verfahren wurde von Van Brunt 1981 und von Hauschild 1982 entwickelt. Das Wichtige dabei ist der stochastische Prozess, der durch die Zufälligkeit charakterisiert wird. Ein guter Indikator, dass die Messergebnisse nicht unabhängig voneinander sind, ist auch grafisch ersichtlich, wenn die Durchschlagsspannung mit den Versuchen stetig sinkt [TMT1].

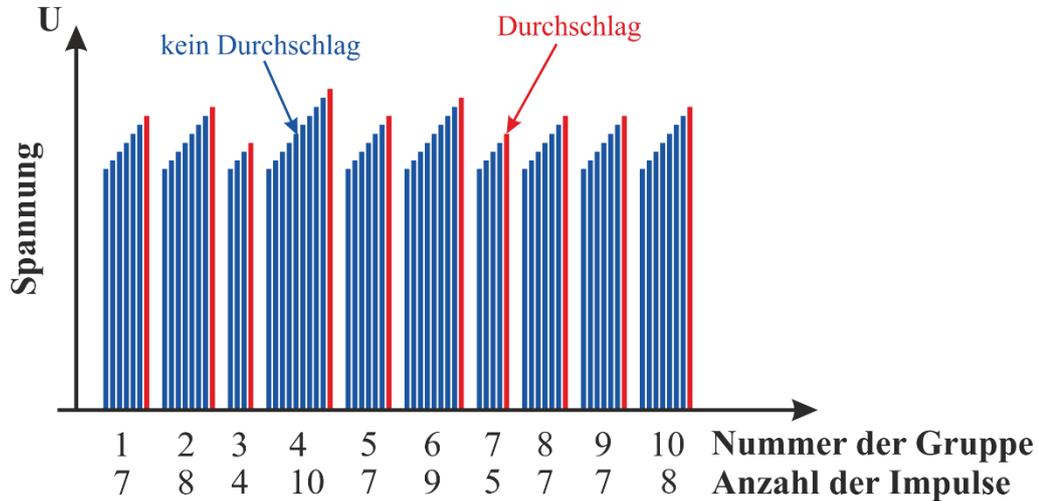


Abbildung 49: Steigerung der Impulsspannung bis zum Durchschlag mit mehreren Durchgängen

Das zweite Verfahren wird durchgeführt, indem z. B. der Prüfling mit zehn Impulsen der gleichen Spannungshöhe belastet wird. In Abbildung 50 ist die zweite Durchschlagprüfung dargestellt. Bei steigender Spannungshöhe kommt es immer öfter zu Durchschlägen.

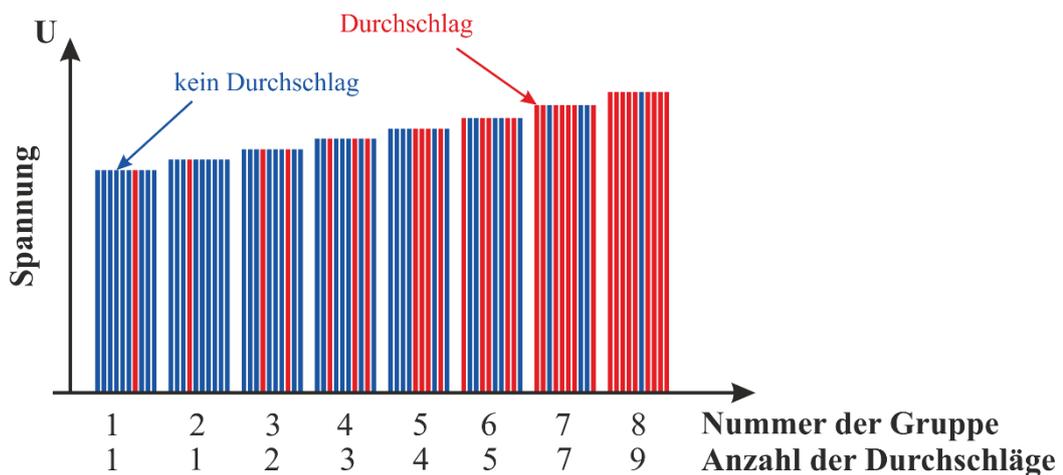


Abbildung 50: Durchschlagprüfung mit zehn Impulsen und steigender Spannung

Das dritte Verfahren, das öfters Anwendung findet ist das „Up and Down“-Verfahren. Es wird der Spannungsimpuls so lange erhöht, bis es zu einem Durchschlag kommt. Dann wird der Spannungsimpuls so lange verringert, bis kein Durchschlag mehr auftritt, danach wird die Spannung wieder erhöht. Abbildung 51 stellt so ein Diagramm dar. Wie bei den vorherigen Diagrammen ist ein Durchschlag mit einer roten Linie

angegeben.

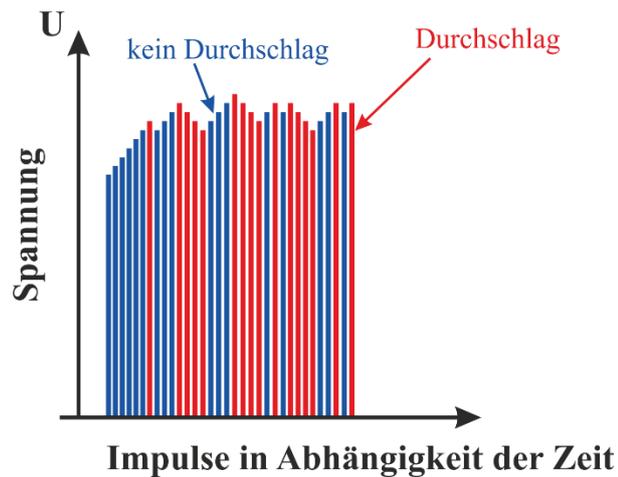


Abbildung 51: Up- and Down- Verfahren

5.3. Blitzstoßspannungsprüfungen

Die Blitzstoßspannungsprüfung ist insofern von Interesse, weil es immer wieder vorkommen kann, dass ein Blitz in einen Leitungsmasten, ins Erdseil oder in andere Gegenstände, die dem Leiter nahe liegen, einschlägt. Es entstehen dann sogenannte Wanderwellen, die sich im gesamten Netz, auch bei Kabelstrecken, ausbreiten. Der zeitliche Spannungsverlauf sieht jedes Mal anders aus, dennoch bewegt er sich im Mikrosekundenbereich.

Um eine einheitliche Prüfung durchführen zu können, wurde deshalb in der Norm IEC 60060-1:2010 der Blitzspannungsverlauf mit der Stirnzeit von $1,2 \mu\text{s}$ und einer Rückenhalbwertszeit von $50 \mu\text{s}$ definiert. Der Verlauf ist in Abbildung 52 ersichtlich [KUC1][IEC1].

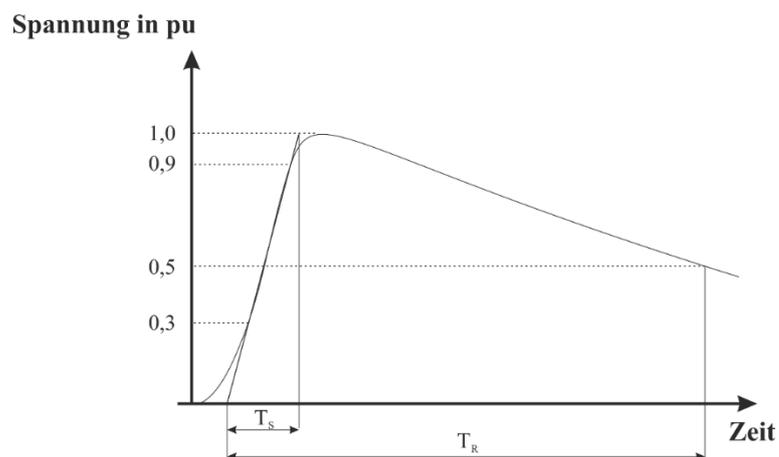


Abbildung 52: Blitzstoßspannungsverlauf

5.4. Schaltstoßspannungsprüfung

Die zweite Stoßspannungsprüfung wird verwendet, um Unterbrechungen von Strömen in induktiven Stromkreisen von einem Netz zu simulieren. Wenn z. B. ein Leistungsschutzschalter einen Fehler erkennt und abschaltet, kann es zu energiereichen Spannungsüberhöhungen kommen.

Diese Schaltstoßspannungsprüfung ist energieintensiver, da die Scheitelzeit T_{sch} laut der Norm IEC 60060-1:2010 von $250 \mu s$ und die Rückenhalbwertszeit T_R von $2500 \mu s$ um ein Vielfaches höher sind als die der Blitzstoßspannungsprüfung. Abbildung 53 zeigt symbolisch die Charakteristik eines solchen Impulses.

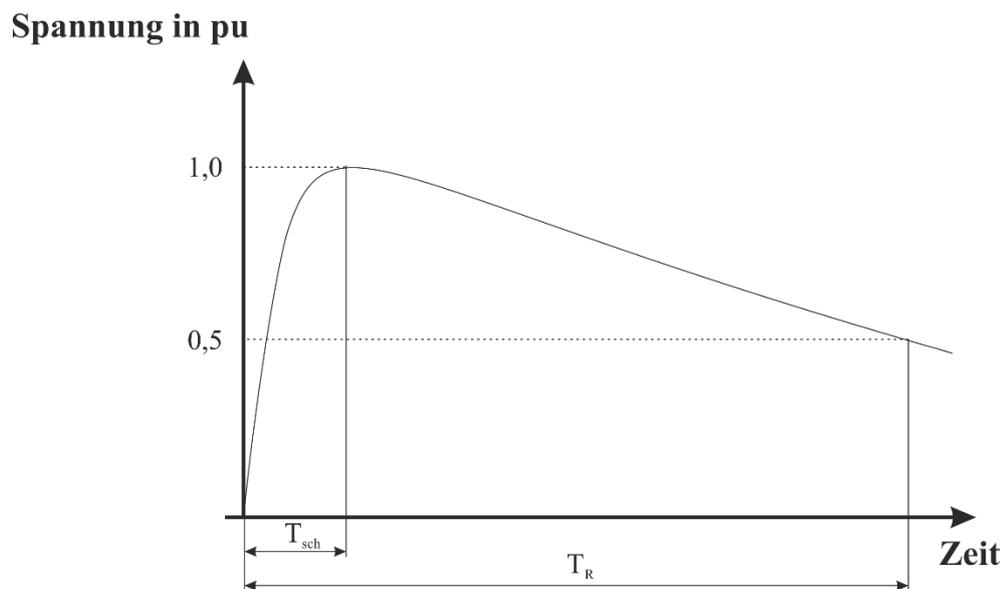


Abbildung 53: Schaltstoßspannungsverlauf

5.5. Teilentladungsprüfung (TE)

Teilentladungen treten auf Grund von Fehlern bzw. Inhomogenitäten in Dielektrika auf sowie auch bei Ecken oder scharfen Kanten. Prinzipiell wird die Teilentladung bei Wechselspannung (50/60 Hz) gemessen. Die Teilentladung wird in der Norm IEC 60270:2000 beschrieben. Diese kommen in der Umgebungsluft sowie bei eingeschlossenen Gaskammern in Flüssigkeiten sowie in festen Isolierstoffen vor. [MTM1], [IEC3]

Die Teilentladungsmessung kann wie in Abbildung 54 elektrisch, optisch, chemisch und akustisch eingeteilt werden. In dieser Arbeit wird auf die elektrische Messung näher eingegangen.

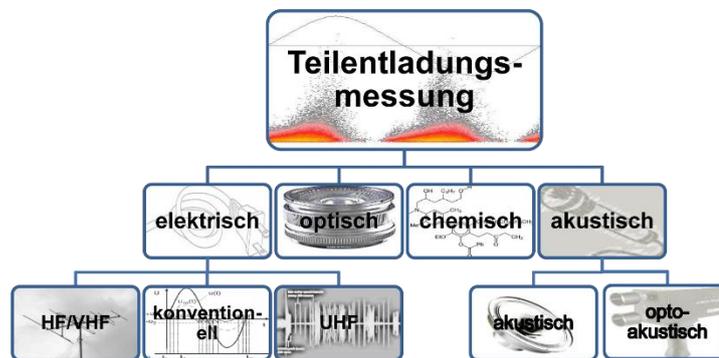


Abbildung 54: Teilentladungsmessungsmöglichkeiten [MDH1]

Grundsätzlich gibt es drei Arten von Teilentladungen:

Die erste Art ist die Koronaentladung, die bei Spitzen und Inhomogenität auftritt und auch äußere Teilentladung genannt wird, in Abbildung 55 als (e) geführt. Diese können durch die Vermeidung von scharfen Kanten abgeschwächt bzw. ausgeschlossen werden.

Die zweite Gruppe sind die Gleitentladungen. Diese treten wiederum bei großen Tangentialfeldstärken auf, wie z. B. bei Durchführungen oder Kabelendverschlüssen, siehe (f).

Zur dritten Gruppe gehören Fehlstellen bzw. Gaseinschlüsse von Isoliermedien und werden Hohlrumentladungen oder innere Teilentladung genannt. Diese spiegeln die Fehlstellen (a-d) wieder.

Bei inneren Teilentladungen ist Vorsicht geboten, wenn ein Betriebsmittel bewertet werden soll, denn wenn ein Betriebsmittel kurz vor dem Ausfall steht, kann die Teilentladung geringer sein als die im Vorfeld gemessenen Werte. Dies hat zur Folge, dass es weniger Teilentladungen gibt, aber das Betriebsmittel trotzdem ausfällt. Deshalb ist eine kontinuierliche Beobachtung von Vorteil. Der Grund dafür ist, dass bei den Entladungen die Gaskammerwände verkohlen, diese dadurch leitend werden und somit weniger Teilentladungen aufweisen. Dadurch ist aber die Isolierung wie am Beispiel (c) stark geschwächt. Ein weiteres Problem ist auch das „electrical-treeing“. Dieser elektrische Baum kann sich vom Gaskanal ausgehend auf die Gegenseite ausbreiten und zum kompletten Durchschlag führen. [DEE1]

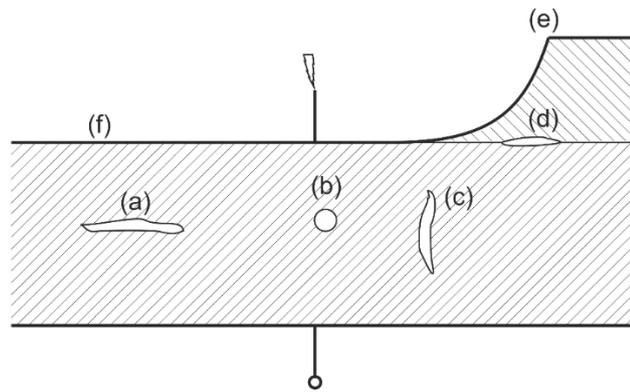


Abbildung 55: Typische Gaseinschlüsse, die Teilentladungen erzeugen (a-d) sowie äußere Teilentladungen (e)

Bei den festen Isolierstoffen gibt es zwei Kategorien: Die eine sind die teilentladungsbeständigen Isolierstoffe, wie Glimmer, Porzellan oder auch Glas, die bei langer Teilentladungsbeanspruchung keine Beeinträchtigung erleiden. Die zweite Kategorie sind die teilentladungsunbeständigen Isolierstoffe, dazu zählen Polyethylen (PE), vernetztes Polyethylen (VPE) oder flüssige Isolierstoffe. Dies hat zur Folge, dass es wenn Teilentladungen über eine längere Zeit stattfinden, zu einem Durchschlag kommt. [TBE1]

Teildurchschläge, wie in Abbildung 56 (a) dargestellt, kommen bei Hohlräumen speziell bei festen Isolierstoffen vor. Das Ersatzschaltbild zeigt die Kapazitäten sowie die Funkenstrecke, die im Hohlraum zu finden ist. Bei Kabeln kann dies als Spalte zwischen der Isolierung und den feldbegrenzenden Schichten sein. Diese Gasblase weist eine geringere Dielektrizitätszahl ϵ_r auf als das feste Isoliermedium, und dadurch ist eine höhere elektrische Feldstärke möglich. [HST1]

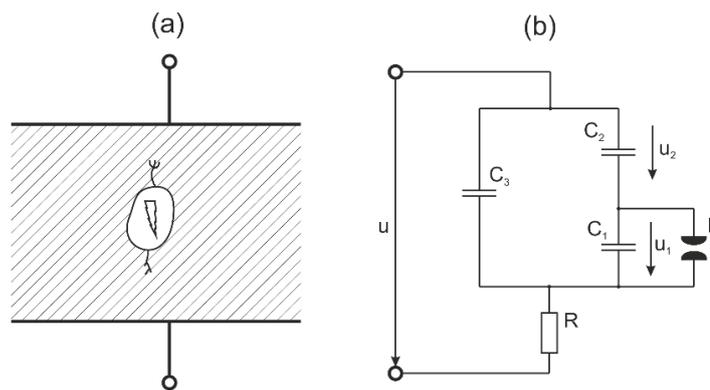


Abbildung 56: Prüfanordnung (a) Hohlraum mit Teildurchschlag und (b) Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild zeigt eine Funkenstrecke F , an der die Spannung U_1 anliegt, die auf den Hohlraum hinweist. Wenn nun ein Teildurchschlag erfolgt, wird C_1 kurzgeschlossen. Dies ist der Fall, wenn die an den Hohlraum anliegende Spannung der Durchschlagsspannung U_d entspricht. Es kommt zu einem Durchschlag, wie in Abbildung 57 gezeigt. C_2 ist die serielle Kapazität, C_3 ist die restliche parallele Kapazität des Prüflings. Der Widerstand R ist zum Messen eingezeichnet. U_1 zeigt

dementsprechend den Spannungsverlauf im Hohlraum. [HST1]

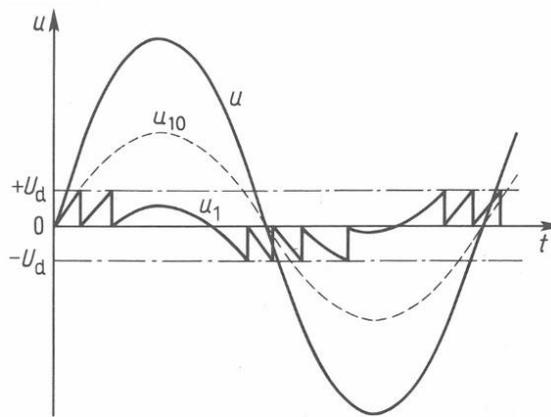


Abbildung 57: Verläufe der Durchschlagsspannung sowie der Spannung u_{10} wenn kein Durchschlag auftritt [HST1]

Jede Teilentladung verursacht im Messkreis einen hochfrequenten Impuls, der bei der konventionellen Teilentladungsmessung über die scheinbare Ladung in pC bzw. nC bestimmt wird. Grundgrößen der konventionellen Messung sind in Abbildung 12 angeführt.

Tabelle 13: Grundgrößen der konventionellen Teilentladungsmessung [TEE1]

Grundgrößen	Symbol	Einheit
Scheinbare Ladung bzw. Intensität	q	pC oder nC
Phasenlage der TE zur Versorgungsspannung	φ	Grad
Impulshäufigkeit	n	Impulse/s
Einsetzspannung	U_E	V
Aussetzspannung	U_A	V
Polarität der TE	+, -	

In Abbildung 58 sind zwei prinzipielle Messanordnungen dargestellt. Bei der in (a) gezeigten Messschaltung ist der Prüfling parallel zum Koppelkondensator und der Messeinrichtung. Das hat den Vorteil, dass, wenn es zu einem Durchschlag kommt, das Messgerät besser geschützt ist. Der Nachteil ist allerdings, dass bei dieser Messung die Streukapazitäten mitgemessen werden. In Punkt (b) ist die Koppelkapazität parallel angeordnet und der Prüfling in Reihe zum Messgerät geschaltet. Dabei ist eine empfindlichere Messung möglich, allerdings könnte bei einem Überschlag oder Durchschlag das Messgerät beschädigt werden. Die dritte Möglichkeit, um eine noch genauere Messung durchzuführen, ist die Brückenanordnung. Diese hat den Vorteil, externe Störeinflüsse zu unterdrücken. Allerdings ist auch hier die Gefahr gegeben, dass das Messgerät einen Schaden davontragen kann, falls es zu einem Überschlag

kommt. [HST1]

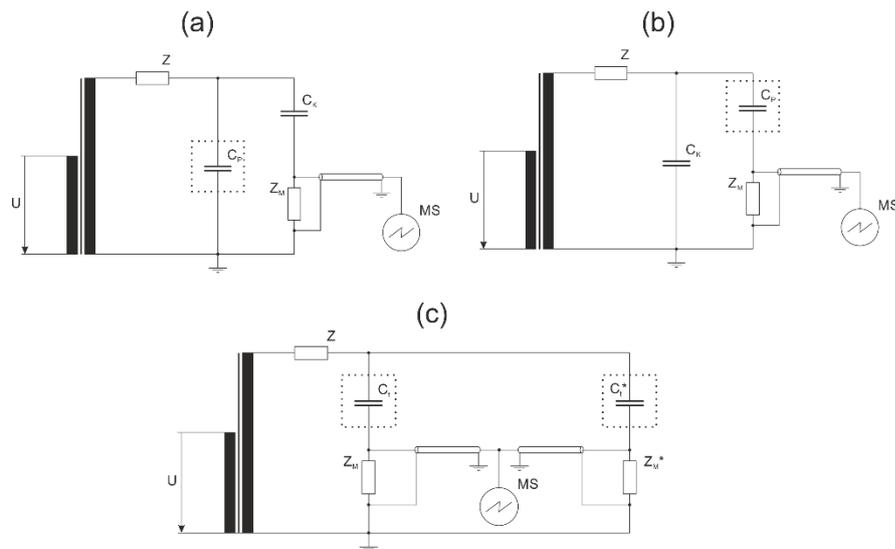


Abbildung 58: Messschaltung für Teilentladungsprüfung mit Koppelkondensator (a) in Reihe, (b) parallel und (c) Brückenordnung, Messeinrichtung (MS)

Das zweite elektrische Verfahren, um Teilentladungen zu messen, ist das HF/VHF, das für high frequency/ very high frequency steht. Die HF-Teilentladungsmessung spielt sich im Frequenzbereich von 3 - 30 MHz ab, die VHF-Teilentladungsmessung bewegt sich im Bereich von 30 - 300 MHz. Diese Verfahren werden oft bei hochpolymeren Materialien angewendet, die bei Kabeln eingesetzt werden. Die TE breitet sich in Form von Wanderwellen aus, diese werden allerdings gedämpft. Gemessen kann mit kapazitiven, induktiven und elektromagnetischen Sensoren werden. Der Messkreis wird durch die geometrische Anordnung stark beeinflusst, wie z. B. Brechung, Reflexion und frequenzabhängige Dämpfung. Daher wird diese Methode auch zur Fehlerortung herangezogen. [IEC4], [TEE1]

Das dritte elektrische Verfahren ist das UHF-Verfahren, das für ultra high frequency steht. Mit diesem Verfahren können Frequenzen von 300 MHz bis über 3 GHz gemessen werden. Diese Methode ist gut geeignet, um sehr kurze Teilentladungen zu erkennen. Diese Methode ist nicht mit dem Stromleiter verbunden. Sensoren sind Scheibensensor, Konsensensor, Feldsteuerelektroden. Dieses Verfahren kann gut für GIL- bzw. GIS-Anlagen verwendet werden und kommt zunehmend auch bei Transformatoren zum Einsatz. [TEE1]

Ein immer wichtiger werdendes Thema ist die Teilentladungsprüfung während der Prüfung unter Gleichspannung. Die Prüflinge, die aus fest und/oder flüssig imprägnierter Isolierung bestehen, zeigen wesentlich andere Messergebnisse unter DC-Einfluss gegenüber den mit Wechselspannung geprüften Proben. Bei Gasisolierung kann der Unterschied geringer ausfallen.

Prinzipiell können die Prüfkreise und Messgeräte, die bei der Wechselspannung verwendet werden, auch für die Gleichspannung eingesetzt werden. Während bei der Wechselspannungsteilentladungsprüfung die Stärke der scheinbaren Ladung betrachtet wird, sollte bei der Gleichspannungsprüfung auch die Anzahl der Impulse gezählt

werden, welche eine festgelegte Größe nicht überschreiten darf. Durch die Gleichspannungsbeanspruchung ist bei der TE-Messung kein Phasenbezug möglich. Es gibt noch kein standardisiertes Verfahren für die Teilentladungsmessung unter Gleichspannung, allerdings wird die Norm IEC 60270-3:2000 für Teilentladungsprüfungen gerade überarbeitet. Egal welches Verfahren schlussendlich eingesetzt wird, es ist immer wichtig, dass sich bei konstanter Prüfspannung die Teilentladungsaktivitäten, in Bezug auf die Stärke und deren Impulsanzahl, nach einer größeren Zeitspanne unterscheiden können. [IEC3] [TMT1]

5.6. Verlustfaktormessung ($\tan\delta$ -Messung)

Diese Messung erfolgt im Frequenzbereich, bei definierten Frequenzen wie z. B. 50 Hz oder 0,1 Hz. Im Prinzip wird bei diesem Verfahren der Winkel δ , der als Verlustwinkel bezeichnet wird und von einem idealen Kondensator abweicht, bestimmt.

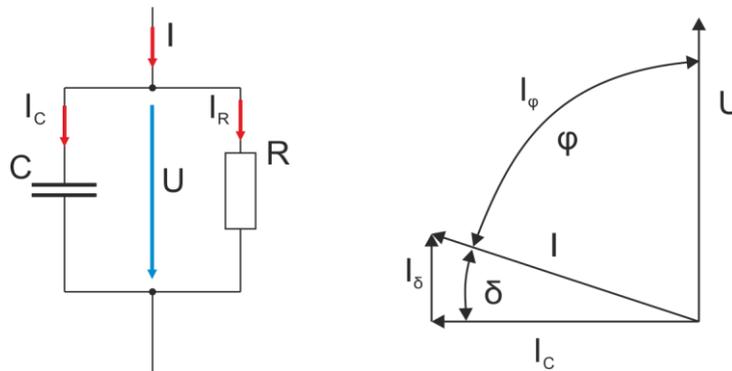


Abbildung 59: Verlustfaktormessung, Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm

Durch die Verlustfaktormessung kann z. B. gealtertes von einem neuwertigen Öl-Papier-Dielektrikum im Zuge der Lebensdauer, unterschieden werden. [KUC1]

Die Berechnung wurde in Kapitel 3.9.1 näher erläutert.

5.7. Wechsellspannungsprüfung

Diese Wechsellspannungsprüfung ist für Vor-Ort-Prüfungen konzipiert und speziell für Stehspannungsprüfungen mit Teilentladungsmonitoring gedacht. Die drei wichtigsten Prüfspannungsgeneratoren sind Compensated Transformer Circuits ACTC, Inductance-Tuned Resonant Circuits (ACRL) und Frequency-Tuned Resonant Circuits (ACRF). Der Aufbau dieser Generatoren ist in Abbildung 60 ersichtlich.

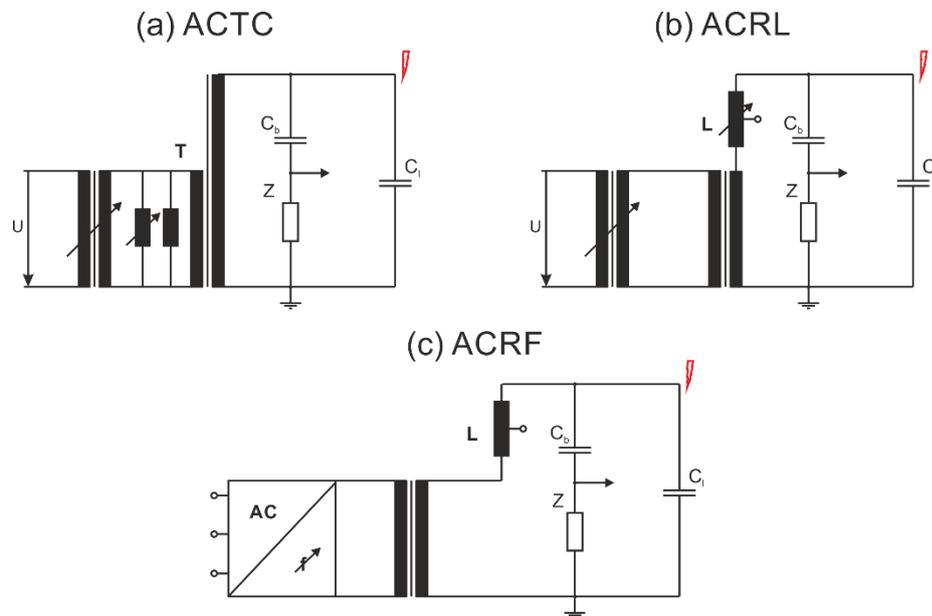


Abbildung 60: Compensated Transformer Circuits (a), Inductance-Tuned Resonant Circuits (b) und Frequency-Tuned Resonant Circuits (c) [TMT1]

Der Vergleich der unterschiedlichen Merkmale der Schaltungen ist in Tabelle 14 dargestellt. Der ACTC wird aufgrund des schlechten Gewichts- zu Leistungsverhältnisses selten eingesetzt und kommt bei Kabelprüfungen gar nicht zum Einsatz. Am häufigsten wird durch das gute Verhältnis von Gewicht zu Leistung und den hohen Frequenzbereich, die ACRF Methode angewendet. Allerdings werden bei der ACRF-Messmethode IGBTs eingesetzt. Diese erzeugen hochfrequente Schaltimpulse und können dadurch die Messergebnisse beeinflussen.

Tabelle 14: Vergleich der Schaltungen für Vor-Ort-Wechselspannungsmessung [CIG4]

		Transformer circuits (ACTC)	Tunable reactor circuits (ACRL)	Tunable frequency circuits (ACRF)
Frequenz		50 Hz oder 60 Hz	50 Hz oder 60 Hz	20 Hz bis 300 Hz
Qualitätsfaktor $q = P_{\text{Prüfung}} / P_{\text{Versorgung}}$		Bis zu 5	40 bis 100	70 bis 200
Leistungsbedarf		Einphasig oder zweiphasig	Einphasig oder zweiphasig	Dreiphasig
Gewicht zu Leistungsverhältnis	Mittelspannungskomponenten	> 10 kg / kVA	2 bis 10 kg / kVA	1,0 bis 2,0 kg / kVA
	HV Kabel, GIL	bedingt anwendbar	2 bis 7,5 kg / kVA	0,8 bis 1,5 kg / kVA
	GIS, HV-Komponenten	> 10 kg / kVA	2 bis 8 kg / kVA	0,6 bis 1,0 kg / kVA
Oberwellen		Muss beobachtet werden	< 1 %	< 1 %
TE Rauschen des Generators		Keine	Keine	IGBT-Schaltimpulse (können angenommen werden)
Mechanische Charakteristik		Bewegende Teile im Regler	Bewegende Teile im Regler und in der einstellbaren Drosselspule	Keine bewegenden Teile
Transportgewicht und Volumen		Etwa das gleiche Verhältnis wie das Gewicht zu Leistungsverhältnis		

5.8. Damped Alternating Voltage Test

Der damped-alternating-voltage Test wurde in den späten 1980er Jahre entwickelt und für die Vor-Ort-Teilentladungsprüfung konzipiert. Das zu testende Kabel wird mit einer Gleichspannungsrampe auf die gewünschte Spannung gebracht. Anschließend wird es über eine Luftdrosselspule entladen, und dadurch entsteht eine oszillierende Spannung. Abbildung 61 zeigt einen typischen Spannungsverlauf einer DAC-Kabelprüfung. Das Laden mit Gleichspannung verursacht keine Belastung des Prüfobjektes und dauert je nach Kabellänge und Kapazität unterschiedlich lang, kann also schwer reproduziert werden. Die Frequenz der ausschlagenden Wechselspannung hängt wiederum stark von der Kapazität, der Dämpfung sowie den Verlusten im Testkreis ab. Der DAC-Test wird in der Norm IEC 60060-3:2006 deklariert und ist für die Diagnose in Kombination einer Teilentladungsmessung und Verlustfaktormessung gedacht. [TMT1] [DAC1] [IEC5]

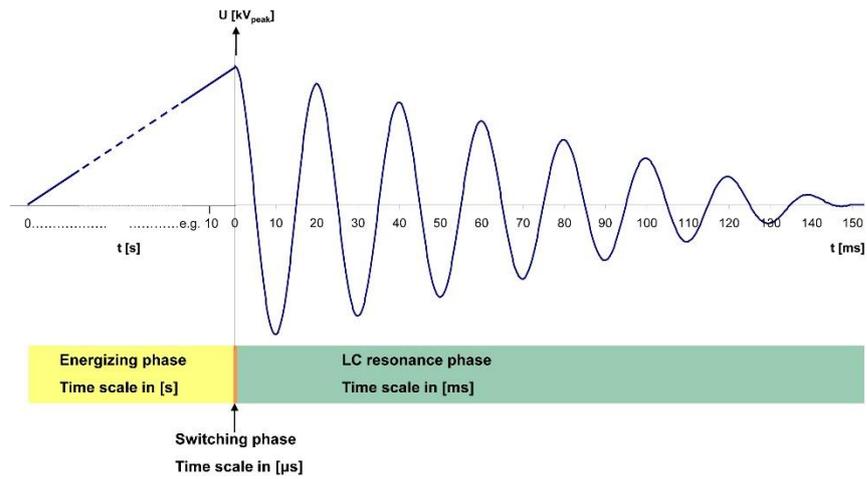


Abbildung 61: DAC-Spannungsverlauf, DC-Ladekurve (gelb), Entladeverlauf (grün) [DAC1]

Der Schaltungsaufbau ist in Abbildung 62 ersichtlich. Die obere Schaltung zeigt die Ladephase und die untere die Entladephase.

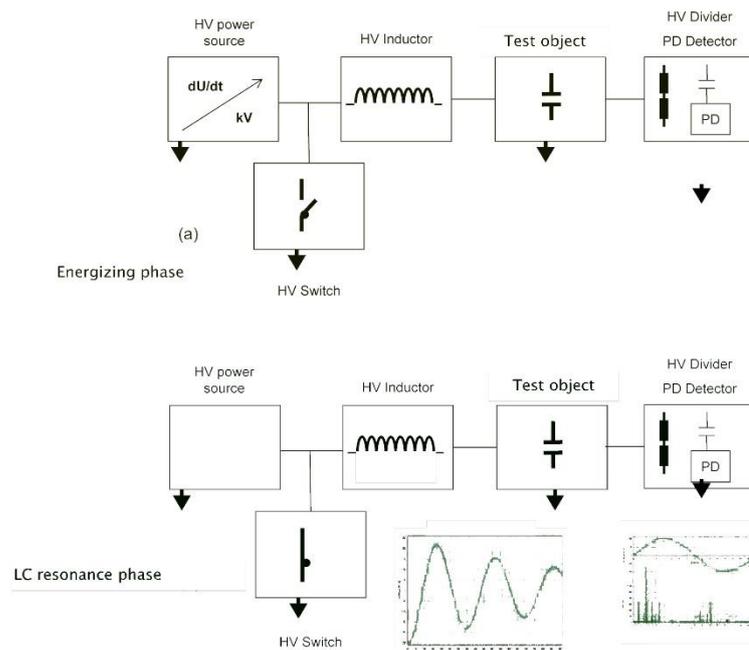


Abbildung 62: DAC-Schaltungsaufbau, Ladephase (oben) und Entladephase (unten) [DAC1]

5.9. Very Low Frequency (VLF) Test

Die Niederfrequenzspannungsprüfung, auch very low frequency voltage test genannt, ist in der Norm 60060-3:2006 definiert. Diese wird hauptsächlich bei der Vor-Ort-Prüfung eingesetzt. Der Frequenzbereich liegt zwischen 0,01 Hz und 1 Hz. Der Grund für diese niedrige Frequenz liegt in der geringeren Leistungsanforderung im Vergleich zur 50-Hz-Prüfung. Die Messgeräte sind sehr kompakt und ideal geeignet, um Mittelspannungskabel vor Ort zu prüfen, und haben keine zusätzliche Beanspruchung für das Kabel im Betrieb. Allerdings muss die Spannung um 50 % höher sein als die des 50Hz Spannungstests. Mit dieser Prüfmethode kann typischerweise bis zu 200 kV gemessen werden. Abbildung 63 zeigt den Vergleich zwischen 0,1-Hz-Spannungstest und einem 50-Hz-Spannungstests. [IEC5]

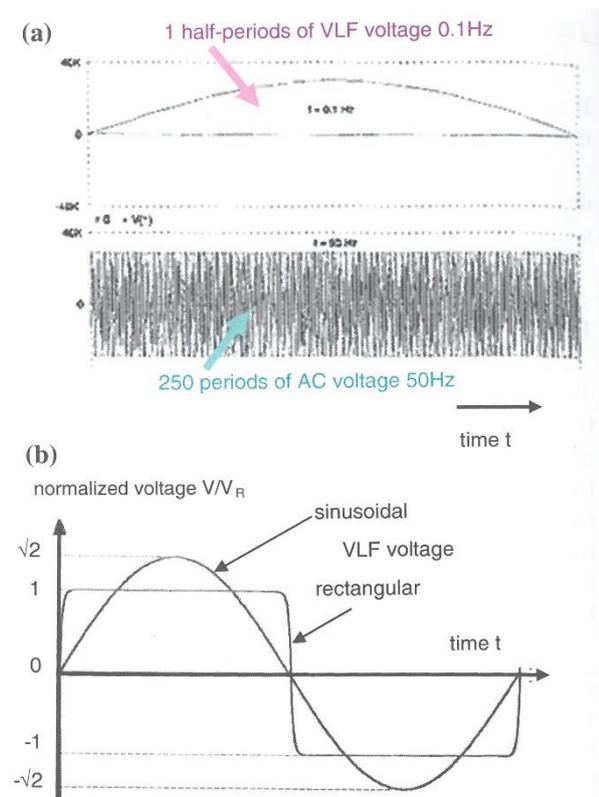


Abbildung 63: VLF-Spannungstest und 50-Hz-Spannungstest, Vergleich von 0,1 Hz und 50 Hz (a), Sinus- und Rechteckspannungsverlauf mit identischem rms-Wert (b) [TMT1]

Einen Nachteil hat diese Methode allerdings, und zwar die fehlende Eindeutigkeit bei Teilentladungen, da durch die längere Periodendauer wesentlich weniger TE in der gleichen Zeit detektiert werden können, wie es Abbildung 64 zeigt [CIG4].

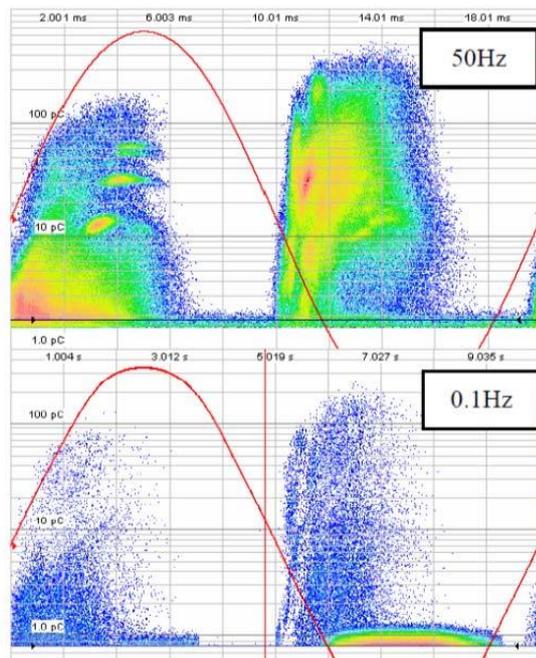


Abbildung 64: Phasenaufgelöstes TE-Diagramm mit 50 Hz (oben) und 0,1 Hz (unten) von einer 110-kV-Kabelmuffe im Kabelsystem [CIG4]

5.10. PDC-Analyse

Bei der PDC-Analyse (Polarization Depolarization Currents) wird der Polarisationsstrom bzw. Ladestrom gemessen, indem eine Gleichspannung angelegt wird. Der Spannungs- bzw. Stromverlauf ist in Abbildung 65 ersichtlich. Nachdem ein stationärer Gleichstrom fließt, wird die Gleichspannung abgeschaltet. Wenn die stationäre Spannung auf 90 % der Ladespannung durch die Selbstentladung gefallen ist, wird ein Kurzschluss eingeleitet, um den Depolarisationsstrom zu messen. Es können nun Rückschlüsse auf die Leitfähigkeit des isolierenden Mediums getroffen werden. Bei der ganzen Messung handelt es sich um eine Sprungantwortmessung. [CIG3]

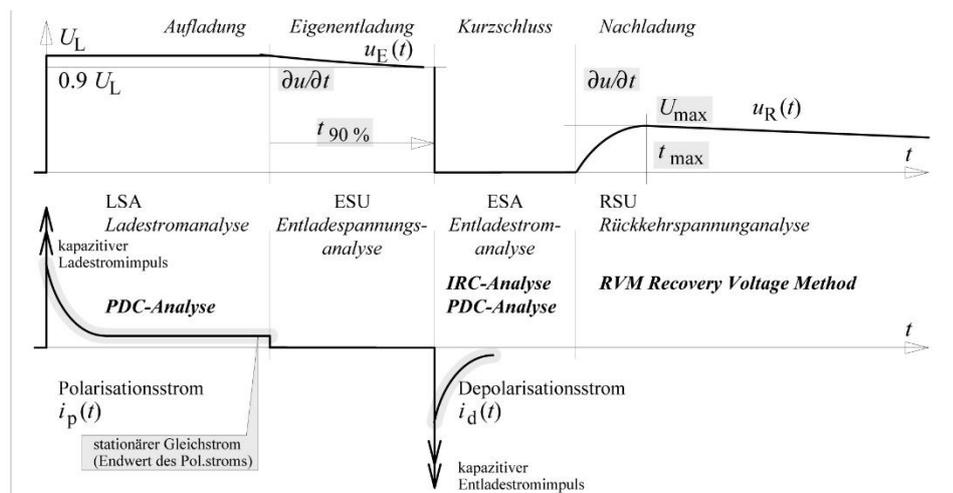


Abbildung 65: PDC-, IRC-, RVM Analyse, Spannungs-Stromverlauf [KUC1]

Durch die Kombination aus Zeit- und Frequenzbereichsmessung und durch geeignete Transformation können alle anderen diagnostischen Kenngrößen abgeleitet werden [CIM1]. Bei sehr langsamen Vorgängen, also bei niedrigen Frequenzen im Frequenzbereich kommt es zu langen Messzeiten; diese sollten daher im Zeitbereich gemessen werden. Wiederum können sehr schnelle Vorgänge im Zeitbereich nicht aufgelöst werden, daher ist es sinnvoll, diese im Frequenzbereich zu messen. Die Kombination aus beiden Messungen kann dann sinnvoll eingesetzt werden, indem die Messung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert wird. [RMD1]

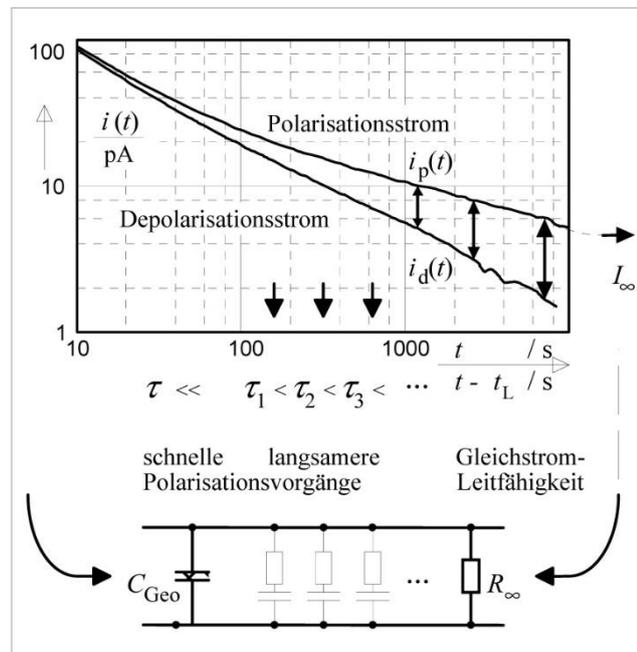


Abbildung 66: PDC-Analyse und Modellbildung [KUC1]

Abbildung 66 zeigt eine typische Polarisations-Depolarisationskennlinie mit dem dazugehörigen Modell. Diese Methode kann als Maßstab des Wasseranteils im Dielektrikum herangezogen werden.

5.11. IRC-Analyse

Die IRC-Analyse steht für isothermic relaxation currents, also „isothermer Relaxationsstrom“. Diese Analyse funktioniert ähnlich der PDC-Analyse, mit dem Unterschied, dass Oberflächen- und Isolationswiderstände parallel zur niederohmigen Strommessimpedanz angeordnet sind, daher können diese nicht erfasst werden. Es kann auch keine Gleichstromleitfähigkeit gemessen werden, die bei Öl-Papier-Isolierungen ein wichtiger Indikator zur Feuchtigkeitsbestimmung ist. Diese Analyse liefert allerdings gute Ergebnisse, wenn Polarisationsvorgänge mit großen Zeitkonstanten gegeben sind. [KUC1]

Dieses Verfahren wird bei neuen und bei Water-tree-geschädigten Mittelspannungskabeln angewendet. Bei Epoxidharzwerkstoffen kann auch der Härtezustand bestimmt werden. Es kann mit dieser Analyse auch eine Aussage getroffen werden, welche Kabelstrecken erneuert werden sollen. Das Schema dieser Methode ist in Abbildung 65 ersichtlich. [KUC1]

5.12. RVM Analyse

Die Recovery Voltage Currents(RVM)-Analyse, auch Rückkehrspannungsmethode genannt, ist eine Kabeldiagnoseart, in der die wiederkehrende Spannung gemessen wird. Das Prüfobjekt wird mit Gleichspannung aufgeladen, danach kommt eine schnelle Entladung über einen Widerstand. Die rückkehrende Spannung, die durch den Umladeprozess entsteht, wird dabei gemessen. Dieses Verfahren wird mehrmals mit verschiedenen Parametern angewendet, und es kann dadurch auf die Kabelalterung zurückgeschlossen werden. Diese Methode schließt an die PDC- bzw. IRC-Methode an. In Abbildung 65 ist im rechten Teil des Bildes die Rückkehrspannung ersichtlich.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurden eingangs die Möglichkeiten der kabelgebundenen elektrischen Energieübertragung erläutert.

Der größte Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit supraleitenden Kabeln, deren elektrischen Grundlage sowie deren Materialien. Die Herstellung von Supraleitern erfolgt, indem supraleitende Bänder und Rundleiter, bis zu einer Länge von 1000 m, gefertigt werden. Diese Supraleiter finden dann in der Kabeltechnik ihren Einsatz. Des Weiteren wird auf den Unterschied zwischen warmem Dielektrikum und kaltem Dielektrikum eingegangen, wobei sich das kalte Dielektrikum als bessere Kabelbauart erweist. Die Gründe dafür sind, dass die supraleitenden Kabel einen kleineren Durchmesser haben, wodurch eine leichtere Handhabung sowie die Möglichkeit einer komplett magnetfeldfreien Energieübertragung resultiert.

Ein Hemmnis für den Einsatz von supraleitenden Kabel ist unter anderem der Einsatz eines Kühlsystems, welches in der HTS-Technologie mit flüssigem Stickstoff (LN₂) betrieben wird. Hierbei sind besondere Faktoren der Lebensdauer, Investitionskosten sowie der Zuverlässigkeit zu beachten.

Des Weiteren beschäftigt sich diese Arbeit mit den Supraleiterprojekten, die aktuell in Planung sind bzw. schon umgesetzt wurden. Es werden technische, ökologische und ökonomische Vergleiche zwischen konventionellen Wechselspannungskabeln sowie Hochtemperatursupraleitern in Wechselspannungs- und Gleichspannungsausführung durchgeführt. Ein spezieller Vergleich von 3 kA und 110 kV Übertragungsleistung bei konv. AC sowie supraleitenden AC- und DC-Kabeln wurde angestellt. Die Verluste der AC-HTS-Kabel sind bei einem „worst case“-Szenario kleiner als jene von AC-Kabeln. Im „best case“ ist das DC-HTS-Kabel fast um den Faktor 7 besser. Allerdings ist zu beachten, dass die Kabel immer zu 100 % ausgelastet sein müssen.

Das zweite große Thema, auf welches eingegangen wird, ist die Nanotechnologie. Hierbei werden die Grundlagen näher gebracht, wie z. B. zur Erschaffung von Nanopartikeln mittels Top-down- und Bottom-up-Verfahren. Die Miniaturisierung sowie die analytischen Verfahren stellen eine große Herausforderung dar, um die Eigenschaften dieser Nanopartikel zu bestimmen. Die Dielektrika können durch die Nanopartikel besondere Eigenschaften erreichen, indem z. B. eine höhere Spannungsfestigkeit erreicht wird oder sich weniger Hohlraumladungen bilden. Mit diesen Kabeln kann auch der Platzbedarf, auf Grund der dünneren Isolierwandstärke, minimiert werden.

Das dritte Thema dieser Arbeit sind die Kabelprüfarten, hierbei sind die Stehspannungsprüfungen sowie die Teilentladungsprüfungen speziell zu erwähnen, weil diese bei Kabelprüfungen am öftesten eingesetzt werden. Die PDC-, IRC- und RVM-Analysen sind Methoden, die den Gesamtzustand eines Kabels abschätzen können. Dabei ist die Very Low Frequency-Messung für Vor-Ort-Prüfungen vorgesehen, weil die Messgeräte transportabel und leicht im Aufbau sind. Durchschlagspannungsprüfungen sowie Blitz-/Schaltstoßspannungsprüfungen werden bei Kabelprüfungen selten eingesetzt, weil diese zerstörende Verfahren und von Nachteil bei nicht selbstheilenden Dielektrika sind.

7. Literaturverzeichnis

- [AMP1] A. Breuer: Einsatz eines HTS*-Kabelsystems in der Innenstadt von Essen, Pressegespräch, Hannover, 11. März 2013
- [AMP2] M. Stemmle, F. Merschel, M. Noe, A. Hobl: AmpaCity – Installation of Advanced Superconducting 10 kV System in City Center Replaces Conventional 110 kV Cables, IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Beijing, China, October 25-27, 2013
- [BCS1] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer: Theory of Superconductivity, Phys. Rev. July 1957, p. 1175
- [CHS1] Ch. Sumereder: Dielektrische Untersuchungen an Tieftemperaturisolationssystemen, Dissertation, TU Graz, November 2003
- [CIG1] Cigre Technical Brochure: High Temperature Superconducting (HTS) Cable systems, Ref. No.: 229, Study Committee B1, Working Group 21.20, June 2003
- [CIG2] CIGRE SC D1 WG38 August 29, 2012 – Paris, France Investigation of HTS Materials for Electric Power Equipment, URL: http://www.superpower-inc.com/system/files/2012_0829+CIGRE+WS+Pres_Lehner_HTS+Materials+FINAL.pdf Download am 02.04.2014
- [CIG3] T. Leibfried, A.J. Kachler, W.S. Zaengl, V. Der Houhanessian, A. Kuchler, B. Breitenbauch; Ageing and Moisture Analysis of Power Transformer Insulation Systems; CIGRÉ 2002, Paris, Aug. 2002
- [CIG4] Cigre Technical Brochure: High-Voltage On-Site Testing with Partial Discharge Measurement, Ref. Nr.: 502, Working Group D1.33, Task Force 05, June 2012
- [CIM1] J.J. Alff, V. Der Houhanessian, W.S. Zaengl, A.J. Kachler: A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis on Electric Power App.; IEEE Symp.on El. Insulation, Anaheim, USA, 2000
- [CSS1] V. F. Shamray, A. B. Mikhailova, A. V. Mitin: Crystallography Reports, Vol. 54, No. 4, pp. 584–590, (2009) - Crystal Structure and Superconductivity of Bi 2223
- [DAC1] E. Gulski, R. Bach: Die Anwendung von gedämpften Wechselspannungen für Vor-Ort Prüfung und Zustandsbestimmung von Hochspannungskabeln, Stuttgarter Hochspannungssymposium, März 2012
- [DAE1] M. Muhr: Developments and Applications in High Voltage Engineering, Vortrag, 2011
- [DEE1] R. Porzel, E. Neudert und M. Sturm: Diagnostik der Elektrischen Energietechnik, Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnischen Betriebsmitteln, expert verlag, 1996.
- [DEI1] T. Tanaka, G. C. Montanari, R. Mülhaupt: Polymer Nanocomposites as Dielectrics and Electrical Insulation-Perspectives for Processing Technologies, Material Characterization and Future Applications, IEEE Transactions on

Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 5, 2004

- [EEM1] R. Mcfee: Electrical Engineering Volume 81 , Issue 2 (1962) , Page(s) 122 - 129 - Applications of superconductivity to the generation and distribution of electric
- [EEV1] R. Flosdorff: Elektrische Energieverteilung, 9. durchges. und aktualisierte Aufl. – Wiesbaden, Teubner Verlag, 2005, ISBN 978-3-519-36424-5
- [EHV1] R. Das Begamudre: Extra High Voltage AC Transmission Engineering, 3. Auflage, New Age International Publishers Verlag, 2006, ISBN: 81-224-1792-2
- [EKN1] D. Oeding, B. R. Oswald: Elektrische Kraftwerke und Netze, 7. Auflage, Springer Verlag, 2011, ISBN 978-3-642-19245-6
- [FNT1] U. Hartmann: Faszination Nanotechnologie, 1. Auflage, Elsevier GmbH, München, 2006, ISBN 3-8274-1658-2
- [GPM1] D. Meschede: Gerthsen Physik, 24. überarbeitete Auflage, Springer Verlag, ISBN 978-3-642-12893-6, 2010
- [HKO1] H. K. Onnes: Further experiments with liquid helium. G. On the electrical resistance of pure metals, etc. VI. On the sudden change in the rate at which the resistance of mercury disappears. Leiden Comm. 1911, 124c
- [HNT1] Definition Bulk Material: Nanotechnologie, Download am 12.5.2014, URL: http://www.hessen-nanotech.de/dynasite.cfm?dssid=336&dsmid=10891#dstitle_73608
- [HST1] G. Hilgarth: Hochspannungstechnik, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage B.G. Teubner Stuttgart, 1992, ISBN 3-519-16422-1
- [HTS1] M. Hirose, T. Masuda, K. Sato, R. Hata, SEI Technical Review, Nr. 6, (Jan. 2006) High-Temperature Superconducting (HTS) DC Cable
- [IBM1] J. Garcia: IBM Research's Jamie Garcia and Her Fantastic Plastic, 2014, Aufgerufen am 21.05.2014, Url: <http://smarterplanet.com/blog/2014/05/ibm-researchs-jamie-garcia-fantastic-plastic.html>
- [ICC1] E. Zaccone: HVDC Transmission Cable System, state of the art and future Trends, Spring 2009 ICC meeting, USA, Download am 20.3.2014, URL: http://www.pesicc.org/iccwebsite/subcommittees/subcom_c/Presentations/2009_Spring/C-4-HVDCTransmissionCableSystems-Zaccone.pdf
- [IEC1] Internationale Norm, IEC 60060-1:2010: Hochspannungsprüftechnik – Teil 1, Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen, 2010
- [IEC2] Internationale Norm IEC 60071-1:2006: Isolationskoordination - Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen, 2006
- [IEC3] Internationale Norm, IEC 60270:2000: High-voltage test techniques - Partial discharge measurement, 2000
- [IEC4] M. Muhr: A Prospective Standard for Acoustic and Electromagnetic Partial Discharge Measurements, Vortrag Univeristy of West Bohemia, Tschechien, 2007

- [IEC5] Internationale Norm, IEC 60060-3:2006: Hochspannungsprüftechnik – Teil 3, Begriffe und Anforderungen für die Vor-Ort-Prüfung, 2006
- [IMM1] Nanotechnologie: Bottom-Up Methode Atomgebilde, Institut für Molekulare Manufaktur, Los Altos, URL: <http://www.siintusa.com/2014/07/01/thin-film-solar-panels-can-revolutionize-renewable-energy-3/>, download am 13.5.2014
- [INT1] Intel Prozessorpreisliste: Download am 12.5.2014 http://files.shareholder.com/downloads/INTC/3161202255x0x752697/319951B2-14C0-49F9-AB45-3F5EFE445B34/May_11_14_Recommended_Customer_Price_List_.pdf
- [ISO1] ISO/TS 80004-1:2010(en), Aufruf am 12.5.2014, Url: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-1:ed-1:v1:en>
- [JAP1] W T Norris Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac isolated conductors and edges of thin sheets, J. Phys. D Appl. Phys. 3, 1970, p489
- [KHH1] E. Peschke et. al.: Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung, 1. Auflage, Publicis MCD Verlag, 1998, ISBN: 3-89578-057-X
- [KIT1] M. Noe: Institute for Technical Physics, KIT Karlsruhe Institute of Technology, Vortrag vom 9.Juli 2013 - Opportunities of High-Temperature Superconducting Power Equipment
- [KIT2] M. Noe: Institute for Technical Physics, KIT Karlsruhe Institute of Technology, Skript zur Vorlesung Supraleitende Systeme für Ingenieure WS2009/2010
- [KIT3] S. Strauß: Wirtschaftlicher und technischer Vergleich von Energieübertragungssystemen, Diplomarbeit, Institut für Technische Physik, Karlsruhe Institut für Technologie, 2011
- [KUC1] A. Kuchler: Hochspannungstechnik, 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage (2009), ISBN 978-3-540-78412-8
- [LPH1] Lycurgus-Pokal Bild: Download am 12.05.2014 <http://newundersol.blogspot.co.at/2013/09/nanotechnology-in-roman-empire.html>
- [LTP1] A. T. A. M. De Waele: Basic Operation of Cryocoolers and Related Thermal Machines, Journal of Low Temperature Physics, vol. 164(5- 6), pp. 179-236, June 2011
- [MDH1] M. Muhr, S. Pack, R. Schwarz, B. Körbler: Monitoring und Diagnostik in der Hochspannungstechnik, e&i elektrotechnik und informationstechnik, Mai 2002
- [NIT1] Rainer Waser: Nanoelectronics and Information Technology, 3rd Edition, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2012, ISBN: 978-3-527-40927-3
- [NOB1] Nobelpreisträger der Physik, eingesehen am 5.5.2014 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/
- [NSC1] Nexans Broschüre: Superconducting Cable Systems PDF Link <http://www.nexans.de/eservice/Germany->

de_DE/fileLibrary/Download_540144810/Germany/files/Nexans_Superconducting_cable_systems.pdf Download am 2.04.2014

- [NSC2] F. Schmidt, A. Allais: Superconducting Cables for Power Transmission Applications, Nexans – Superconducting Cable System (Hanover – Germany)
- [NTU1] H. Brakelmann: Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel?, Studie, Rheinberg, 2004
- [PLG1] C. J. Gorter: Physics Letters, Volume 1, Number 3 (1962), S 69
- [PLG2] A. Goyal, DP Norton, JD Budai, M Paranthaman, ED Specht, DM Kroeger, DK Christen, Qing He, B Saffian, FA List, DF Lee, PM Martin, CE Klabunde, E Hartfield, VK Sikka: High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of YBa₂Cu₃O_x thick films on biaxially textured metals, Applied Physics Letter 69, Nubmer 12, 1795 (1996)
- [PLK1] W. Klose: Physics Letters, Volume 8, Number 1, (1964)
- [PNC1] E. David, Michel Fréchet: Polymer Nanocomposites – Major Conclusions and Achievements Reached So Far, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 29, No. 6, 2013
- [PNC2] Yu-Min Kim, Young-Kwng Cha, Kee-Joe Lim, Jin-Ho Nam, Gun-Ju Lee: Electrical Insulation Evaluation of Crosslinked Polyethylene Nanocomposite Blended with ZnO, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Indonesien, 2012
- [RDG1] St. Gottlieb, R. Süße: Rotation, Divergenz und Gradient: Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie, 6. durchges. u. erg. Aufl. – Wiesbaden, Teubner, 2006, ISBN 978-3-8351-0048-0
- [RMD1] M. Koch; Reliable Moisture Determination in Power Transformers; Dissertation Univ. Stuttgart, 2008
- [RMP1] W. K. H. Panofsky and M. Breidenbach: Reviews of Modern Physics Volume 71, Number 2 S121 (1999) - Accelerators and detectors
- [RTM1] L. Koenders: Das Rastertunnelmikroskop eine „Pinzette für Atome“ Physik in unserer Zeit 24. Jahrg, Nr. 6, 1993
- [RTM2] Rastertunnelmikroskopie: Zugriff am 13.5.2014 URL: <http://www.weltderphysik.de/gebiete/stoffe/untersuchung-und-analyse/rastesondenmethoden/rastertunnelmikroskopie/>
- [RTM3] IBM Forscher: Modifizierung mittels Rastertunnelmikroskopie, Aufruf am 13.05.2014, Url: <http://www.itmittelstand.de/home/a/ibm-feiert-heute-100-geburtstag.html>
- [SBK1] Supraleitendes Band YBa₂CuO₇, URL: <http://home.slac.stanford.edu/pressreleases/2011/20110324.htm> download am 4.4.2014
- [SCO1] Kühlsystem, Nexans Deutschland GmbH, <http://www.ideen2020.de/de/3070/> Download am 21.04.2014
- [SMM1] V. F. Shamray, A. B. Mikhailova, A. V. Mitin: Crystal structure and

superconductivity of Bi-2223

- [SST1] S H Wee, A Goyal, P M Martin, J Li, M Paranthaman and L Heatherly: Superconductor Science and Technology, Volume 19, Number 10 (2006)
- [SST2] K. Kim, M Paranthaman, D P Norton, T Aytug, C Cantoni, A A Gapud, A Goyal, D K Christen: Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) R23–R29 - A perspective on conducting oxide buffers for Cu-based YBCO-coated conductors
- [SST3] Y. Iijima, K. Matsumoto: Supercond. Sci. Technol. 13 (2000) 68–81, High-temperature-superconductor coated conductors technical progress in Japan
- [SST4] Per Vase, René Flükiger, Martino Leghissa and Bartek Glowacki: Supercond. Sci. Technol. 13 (2000) R71–R84,
- [SST5] S Takács: Supercond. Sci. Technol. 10 (1997) 733–748. - AC losses in superconducting cables and their expected values in magnetic systems
- [STV1] T. Kern: System- und Technologievergleich von UHV Übertragungssystemen, Diplomarbeit, TU Graz, 2010
- [SUP1] Werner Buckel, Reinhold Kleiner: Supraleitung – Grundlagen und Anwendungen, 7. aktualisierte und erweiterte Auflage Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013, ISBN: 978-3-527-41139-9
- [SUP2] R. Bach, W. Goldacker, M Noe, J. Poelchau, W. Prusseit, D. Willén: Supraleitung in EVU Netzen, EW Medien und Kongresse GmbH (2009) ISBN 978-3-8022-0970-3
- [TAS1] W. V. Hassenzahl: IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 11, NO.1, MARCH 2001 - Superconductivity, An Enabling Technology for 21st Century Power Systems?
- [TAS1] M. Watanabe et a.: Thermo-Mechanical Properties of a 66 kV Superconducting Power Cable System. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 13, Issue 2, S. 1956–1959, 2003.
- [TBE1] K. Dieter: Teilentladungen in Betriebsmittel der Energietechnik, VDE Verlag, 1993, ISBN 3-8007-1764-6
- [TEE1] R. Schwarz: Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik, Vorlesungsskriptum, TU Graz, SS 2012
- [TMT1] Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke: High Voltage Test and Measuring Techniques, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-642-45351-9
- [TTP1] Christian Enss, Siegfried Hunklinger: Tieftemperaturphysik, Springer Verlag 2000, ISBN: 978-3-642-63202-0
- [WDE1] E. Ivers-Tiffée, Waldemar von Münch: Werkstoffe der Elektrotechnik, Springer Verlag, 2007, ISBN: 978-3-8351-0052-7
- [WDE2] H. Hofmann, J. Spindler: Werkstoffe in der Elektrotechnik, Grundlagen Struktur Eigenschaften Prüfung Anwendung Technologie, 7. neu bearbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag München, ISBN 978-3-446-43220-8
- [ZIE1] Werner Prusseit: ZIEHL IV Konferenz Bonn, (März 2014)

[ZIE2] M. Bäcker, C. Börner, R. Hellinger, B. Holzapfel, M. Noe, W. Prusseit:
Hochtemperatur-Supraleitung für die Energietechnik – Materialien und
Anwendungen, Begleitbuch zur Fachtagung ZIEHL II, Bonn, 2010

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: XLPE- Kabel [Quelle: pdc-cables.com]	10
Abbildung 2: Aufbau eines Masse-imprägnierten Kabel [ICC1]	11
Abbildung 3: Aufbau eines Öl-Papier Kabels [ICC1]	12
Abbildung 4: Aufbau eines vernetzten Polyethylen-Kabels [ICC1]	12
Abbildung 5: Gasisolierte Leitung (GIL) [Quelle: Siemens]	13
Abbildung 6: Mehrfachleitung mit den Spannungen 380 kV, 220kV und 110 kV [Quelle: RWE AG] [NTU1]	14
Abbildung 8: Supraleitende Eigenschaften, Sprungtemperatur [SUP1]	18
Abbildung 9: Existenz der supraleitenden Eigenschaft	20
Abbildung 10: Verdrängung des Magnetfeldes (durchgezogene Feldlinien). Homogenes Feld vor der Einbringung der Kugel (gestrichelte Feldlinien) [SUP1]	21
Abbildung 11: Schubnikow-Phase (schematisch) Magnetfeld und Supraströme sind für zwei Flussschläuche gezeichnet [SUP1]	22
Abbildung 12: Sandwich-Struktur von zwei Supraleitern durch eine dünne Barriere getrennt [SUP1]	23
Abbildung 13: Stromdichte- und Magnetfeldverteilung in einem supraleitenden Transportstrom [SUP1]	24
Abbildung 14: Schubnikow-Phase Transportstromdichte J , Fluss Schlauchkraft F und äußere Feld B_a [SUP1]	25
Abbildung 15: Supraleitende Materialien mit der kritischen Temperatur auf das Jahr der Entdeckung aufgetragen [SUP1]	25
Abbildung 16: Herstellungsverfahren im PIT Verfahren (Ziehen, Walzen und Glühen) [ZIE2]	27
Abbildung 17: Querschnitt von Bi-2223-Bandleiter [SUP1]	27
Abbildung 18: Konventionelle Kupferkabel vs. supraleitende Bänder mit gleicher Stromtragfähigkeit [SBK1]	28
Abbildung 19: Schematische Darstellung RABiTS/MOD-Prozess auf Basis von Kupfer und Silber [Quelle: Superpower]	29
Abbildung 20: Triaxialkabel mit 10 kV und 2400 A Dauerstrom, kaltes Dielektrikum (Quelle: Nexans Deutschland)	30
Abbildung 21: Ein HTS-Kabel mit warmem Dielektrikum [NSC2]	31
Abbildung 22: Schematischer Aufbau von einem Kühlsystem eines HTS-Kabels und HTS-Strombegrenzers [SCO1]	33
Abbildung 23: Stickstofftank für das AmpaCity-Projekt in Essen	34
Abbildung 24: Thermische Isolation für supraleitende Kabel [Quelle: Nexans]	36
Abbildung 25: Mehrere Lagen Superisolation aus hochreflektierender Folie und netzförmigem Flies [KIT2]	36
Abbildung 26: Polypropylene laminated paper PPLP-Folie [Quelle: Nexans]	37
Abbildung 27: Vorzüge von HTS-DC-Kabel zu HTS-AC-Kabel [HTS1]	37
Abbildung 28: Einleiter HTS-Kabel Endverschlüsse auf Freileitung [NSC2]	38
Abbildung 29: Triaxial-HTS-Kabel-Endverschluss, AmpaCity-Projekt [AMP1]	39
Abbildung 30: Schematischer Aufbau eines Endverschlusses für supraleitende Kabel [KIT2]	39
Abbildung 31: Übertragungsverhalten Kabel, Freileitung, HTS-Kabel [KIT2]	40
Abbildung 32: Spannungserhöhung in Prozent in Abhängigkeit der Leiterlänge in km	44
Abbildung 33: Vergleich der Querschnitte von Kupfer- und HTS-Leiter gleicher Stromtragfähigkeit [SUP2]	46
Abbildung 34: LIPA - Supraleitendes Kabel bei 138 kV und 2400 A, Einsatz auf Long Island, NY, kaltes Dielektrikum (Quelle „Nexans Deutschland“)	48
Abbildung 35: Endverschlüsse des 660 m langen LIPA1-Kabels [Quelle: AMSC]	48
Abbildung 36: Kostenvergleich von Kupfer zu HTSC der 2. Generation [Quelle: SuperPower] [KIT1]	50
Abbildung 37: Stand der Technik, wo Wechselspannungssupraleitungen eingesetzt werden, aufgetragen in Strom-Spannungsverhältnis [KIT1]	50
Abbildung 38: Kabelverlauf vom AmpaCity-Projekt in Essen [AMP2]	54
Abbildung 39: Lycurgus-Pokal aus dem 4. Jahrhundert, National British Museum of History [LPH1]	57
Abbildung 40: Ein Nanobauteil, aus einzelnen Atomen zusammengesetzt [IMM1]	58
Abbildung 41: Entwicklung mittels Top-down- und Bottom-up-Ansätzen, um Nanostrukturen zu gewinnen [FNT1]	58
Abbildung 42: Die Analytik hat die Reaktion auf einer Probe von einer externen Quelle zur Grundlage [FNT1]	61
Abbildung 43: Aufnahme eines Elektronenrastertunnelmikroskops: Es handelt sich hierbei um eine Kupferoberfläche, die mit Stickstoff beschossen wurde [RTM2]	62

Abbildung 44: IBM-Schriftzug, der mit Hilfe der RTM erstellt wurde [RTM3]	62
Abbildung 45: Charakterisierung von räumlicher Auflösung zur zeitlichen Auflösung und welches Verfahren verwendet werden kann [FNT1]	63
Abbildung 46: Polyethylene mit Füllern versetzt: Schichtsilikate (links), Siliziumoxid (Mitte), Nanopartikel von Siliziumoxid (rechts) [PNC1]	65
Abbildung 47: Messanordnung zum Messen des dielektrischen Zumsammenbruch [PNC1]	66
Abbildung 48: Nanokomposite Kabel, Größenvergleich [Quelle: EPRI] [DAE1]	67
Abbildung 49: 500-kV-VPE mit MgO-Nanofüllern, DC-Seekabel [Quelle: Hitachi Cable Ltd.] [DAE1]	67
Abbildung 50: Steigerung der Impulsspannung bis zum Durchschlag mit mehreren Durchgängen	70
Abbildung 51: Durchschlagprüfung mit zehn Impulsen und steigender Spannung.....	70
Abbildung 52: Up- and Down- Verfahren	71
Abbildung 53: Blitzstoßspannungsverlauf	71
Abbildung 54: Schaltstoßspannungsverlauf	72
Abbildung 55: Teilentladungsmessungsmöglichkeiten [MDH1]	73
Abbildung 56: Typische Gaseinschlüsse, die Teilentladungen erzeugen (a-d) sowie äußere Teilentladungen (e)	74
Abbildung 57: Prüfanordnung (a) Hohlraum mit Teildurchschlag und (b) Ersatzschaltbild	74
Abbildung 58: Verläufe der Durchschlagspannung sowie der Spannung u_{10} wenn kein Durchschlag auftritt [HST1]	75
Abbildung 59: Messschaltung für Teilentladungsprüfung mit Koppelkondensator (a) in Reihe, (b) parallel und (c) Brückenordnung, Messeinrichtung (MS)	76
Abbildung 60: Verlustfaktormessung, Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	77
Abbildung 61: Compensated Transformer Circuits (a), Inductance-Tuned Resonant Circuits (b) und Frequency-Tuned Resonant Circuits (c) [TMT1].....	78
Abbildung 62: DAC-Spannungsverlauf, DC-Ladekurve (gelb), Entladeverlauf (grün) [DAC1]	80
Abbildung 63: DAC-Schaltungsaufbau, Ladephase (oben) und Entladephase (unten) [DAC1]	80
Abbildung 64: VLF-Spannungstest und 50-Hz-Spannungstest, Vergleich von 0,1 Hz und 50 Hz (a), Sinus- und Rechteckspannungsverlauf mit identischem rms-Wert (b) [TMT1]	81
Abbildung 65: Phasenaufgelöstes TE-Diagramm mit 50 Hz (oben) und 0,1 Hz (unten) von einer 110-kV-Kabelmuffe im Kabelsystem [CIG4]	82
Abbildung 66: PDC-, IRC-, RVM Analyse, Spannungs-Stromverlauf [KUC1]	83
Abbildung 67: PDC-Analyse und Modellbildung [KUC1]	84

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technischer Vergleich zwischen Freileitung, Kabel und GIL [STV1].....	15
Tabelle 2: Kristallstruktur/Verbindung von Hochtemperatursupraleitern (HTSC) mit der kritischen Temperatur und deren Abkürzungen [CSS1] [KIT1].....	26
Tabelle 3: Anordnung und technischer Vergleich von HTSL-Kabeln [KIT2]	32
Tabelle 4: HTS-Leiterkapazität der Jahresproduktion und real produzierte Supraleiter, Stand 2014 [ZIE1].....	38
Tabelle 5: Vergleich der grundlegenden Daten von 400-kV-VPE-Kabel, 400-kV-Freileitung und 110 kV supraleitendes Kabel [KIT2].....	41
Tabelle 6: Vergleich der Verluste bei konv. Kabel versus supraleitendem AC- und DC-Kabel mit typischen Verlustleistungen und Wirkungsgraden [KIT2].....	41
Tabelle 7: Elektrische Eigenschaften der verschiedensten Leitungssystemen [KIT3]	45
Tabelle 8: Spannungsüberhöhung ΔU in Prozent auf die Länge von 250 km in 50-km-Schritten aufgetragen	45
Tabelle 10: Umwelteinfluss und ökonomischer Vergleich zwischen HTS und konventionellen Kabelsystemen [HTS1].....	51
Tabelle 11: Gesamtverlustleistungsvergleich eines konventionellen Kabels, eines supraleitenden AC-Kabels und eines supraleitenden DC-Kabels laut obige Berechnung und worst/best case-Berechnung.....	53
Tabelle 12: Wesentliche Eigenschaften supraleitender Kabel [KIT2].....	55
Tabelle 13: Grundgrößen der konventionellen Teilentladungsmessung [TEE1].....	75
Tabelle 14: Vergleich der Schaltungen für Vor-Ort-Wechselspannungsmessung [CIG4]	79