



Fehim Music, BSc

Fixe und regelbare Kompensationsdrosselspule für Spannungsniveaus bis zu 72,5 kV

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Renner Herwig

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Dipl.-Ing. Hans Christian Loder

Siemens AG Österreich - Transformers Weiz

Graz, Mai 2020

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagungen / Acknowledgements

Ein Dankeschön an dieser Stelle an alle, von denen ich während meines Studiums Unterstützung und Motivation erhalten habe.

Zuallererst möchte ich mich bei meinem Mentor an der Technischen Universität, bei Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Renner Herwig bedanken, der mich mit seinem Fachwissen und seiner Kompetenz während meiner gesamten Masterarbeit tatkräftig unterstützt hat.

Ein Dankeschön auch an meinen Mentor seitens Siemens, dem Herrn Hans Christian Loder, der mich beim Verfassen dieser Masterarbeit unterstützt hat.

Mein Dank gilt auch Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Fickert Lothar, welchen ich in der Zeit meines Bachelorstudiums als technischer Projektassistent unterstützt habe.

Einen besonderen Dank an meine Eltern, meine Familie und meine Frau, die mir das Studium ermöglicht und mich während des gesamten Studiums moralisch unterstützt haben.

Abstract

The market demand for products with which reactive power can be compensated is continuously increasing. From the manufacturers point of view the inquiries for such devices are becoming more and more interesting. The interest in reactive power compensation and the associated increase in grid efficiency was awakened especially by the Commission Regulation of the European Union describing the grid code for load connections, which came into force on 18 August 2019. In addition, the enormous increase in the use of renewable energy sources has also led to increased demand for stability-enhancing facilities in the grid.

Among the numerous variants with which reactive power compensation and grid stability can be realized, the SHR (shunt reactor) is one of the most cost-effective solutions on the market with which both problem areas can be treated. As these have been in use for several years and such an application is not unknown, their use in medium-voltage systems has only just awakened the interest of various consumers in recent years.

The present master thesis was done in cooperation with SIEMENS LIDT (Siemens Liquid immersed distribution transformers) in Weiz, which intends to add the SHR to its product portfolio. In view of the fact that SIEMENS LPT (Siemens Large power transformer) at the same location is one of the world's leading manufacturers in design and production of large high-voltage SHR and VSR (variable shunt reactors), the expansion of the Siemens LIDT portfolio has proved to be of interest to the company due to the easily accessible transfer of know-how and the possibility of continuous support.

The aim of this thesis is to carry out a global market study to determine the current market status and to observe the development of demand over several years. In the following an insight into the components and the physical parameters of the shunt reactor is given. Finally, the design of the reactor in the offer phase is described using professional tools and simulated in a calculation program designed for transformers. Finally, the simulation of the shunt reactor in the offer phase is compared with the calculation of the engineering team of the already manufactured and tested reactor.

Kurzfassung

Die Marktnachfrage nach Produkten, mit denen Blindleistung kompensiert werden kann, steigt kontinuierlich an. Aus Sicht der Hersteller werden daher die Anfragen nach derartigen Vorrichtungen immer interessanter. Das Interesse an der Blindleistungskompensation und der damit zusammenhängenden Steigerung der Netzeffizienz wurde vor allem durch die am 18. August 2019 in Kraft getretene Kommissionsverordnung der Europäischen Union zur Beschreibung des Netzkodex für Lastanschlüsse geweckt. Daneben hat auch die enorme Zunahme der Nutzung erneuerbarer Energiequellen zu einer erhöhten Nachfrage nach stabilitätssteigernden Einrichtungen im Netz geführt.

Unter den zahlreichen Varianten, mit denen Blindleistungskompensation und Netzstabilität zu realisieren sind, ist die Kompensationsdrosselspule (KDS) eines der kostengünstigsten Produkte auf dem Markt, mit dem beide Problemgebiete behandelt werden können. Da sie bereits seit mehreren Jahren im Einsatz ist und eine derartige Anwendung nicht unbekannt ist, hat ihr Einsatz in Mittelspannungsnetzen in den vergangenen Jahren das Interesse verschiedener Konsumenten geweckt.

Die vorliegende Masterarbeit entstand in Zusammenarbeit mit SIEMENS LIDT (Siemens Liquid immersed distribution transformers) in Weiz, die ihr Produktportfolio um die KDS ergänzen möchten. Angesichts der Tatsache, dass SIEMENS LPT (Siemens Large power transformer) am gleichem Standort als eines der weltweit führenden Unternehmen in der Entwicklung und Produktion von großen Hochspannungs-KDS sowie variablen KDS ist, hat sich die Erweiterung des Siemens LIDT-Portfolios aufgrund des leicht erreichbaren Know-how-Transfers und der möglichen kontinuierlichen Unterstützung als interessant für das Unternehmen erwiesen.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine globale Marktstudie durchzuführen, um den aktuellen Marktstatus zu ermitteln. Außerdem soll die Nachfrageentwicklung über mehrere Jahre beobachtet werden. Im Anschluss wird ein Einblick in die Komponenten und die physikalischen Parameter der KDS gegeben. Daraufhin wird die Auslegung der KDS in der Angebotsphase mit einem professionellen Berechnungstool beschrieben und in einem für Transformatoren ausgelegten Berechnungsprogramm simuliert. Zum Abschluss wird die Simulationsberechnung der KDS in der Angebotsphase mit der Berechnung des Engineering-Teams für die bereits gefertigte und getestete KDS verglichen.

Symbolverzeichnis / List of Symbols

a	Abstand der Platten
a_I	Radius der Isolierung
A	Querschnittsfläche
A_c	Plattengröße
b_1	Breite des blanken Einzelbandes
B_D	Axiale Breite des Drilleiters
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor
C'	Kapazitätsbelag
C_b	Betriebskapazität
C_e	Leiter- Erde- Kapazität
C_L	Leiter-Leiter-Kapazität
d_m	Mittlerer Phasenabstand
D_m	Mittlerer Spiegelungsabstand
f	Frequenz
G'	Leitwertbelag
h_m	Mittlere Höhe über Grund
H_D	Radiale Höhe des Drilleiters
I	Strom
I_N	Nennstrom
l_L	Länge des Leiters
l_z	Zylinderlänge
L	Induktivität
L'	Induktivitätsbelag
L_N	Nenninduktivität

N	Anzahl der Windungen
P	Wirkleistung
P_o	Leerlaufverluste
P_{Ges}	Gesamtverluste
P_k	Kurzschlussverluste
$P_{V,Kessel}$	Notwendige Kesselkühlleistung
P_z	Zusatzverluste
Q	Blindleistung
r_L	Radius des Leiters
R'	Wirkwiderstandsbelag
s_1	Dicke des blanken Einzelbandes
S	Scheinleistung
U	Spannung
U_{max}	Maximale Betriebsspannung
U_m	Reihenspannung
U_N	Nennspannung
U_v	Verkettete Spannung am Punkt wo die KDS zugeschaltet wird
W_{mag}	Magnetische Energie
X_0	Nullreaktanz einer dreiphasigen, sternförmig angeschlossenen Drosselpule
X_m	Gemeinsame Reaktanz einer Dreiphasendrossel
X_N	Nennreaktanz
ε	Dielektrizitätskonstante
ε_0	Elektrische Feldkonstante
ε_r	Relative Dielektrizitätskonstante
φ	Phasenwinkel

μ_0	Magnetische Feldkonstante
μ_r	Permeabilitätszahl
$\vartheta_{\text{öl,max}}$	Maximal zulässige Öltemperatur
ω	Kreisfrequenz

Abkürzungsverzeichnis / List of Abbreviations

ANSI	American National Standards Institute
EVU	Energieversorgungsunternehmen
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EWR	Europäischer Wirtschaftsraum
EZS	Erzeugerzählpfeilsystem
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KDS	Kompensationsdrosselspule
LIDT	Liquid immersed distribution transformers
LPT	Large power transformers
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLTC	On Load Tap Changer
OS	Oberspannung
SHR	Shunt reactor
SVC	Static var compensator
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VSR	Variable shunt reactor
VNB	Verteilnetzbetreiber
VZS	Verbraucherzählpfeilsystem

Inhaltsverzeichnis / Table of contents

1	Einführung	13
1.1	Ziel und Aufbau der Masterarbeit	14
2	Blindleistung in Energieversorgungsnetzen	15
2.1	Definition der Blindleistung	16
2.1.1	Blindleistungsbedarf	18
2.1.2	Warum wird Blindleistung kompensiert?	20
2.1.3	Grundlagen der kapazitiven Blindleistung von Leitungen	20
2.1.3.1	Freileitung.....	23
2.1.3.2	Kabel.....	25
3	Kompensationsdrosselspule.....	27
3.1	Hauptkomponenten einer KDS	27
3.1.1	Eisenkern.....	28
3.1.2	Wicklungen.....	31
3.1.3	Kessel.....	31
3.1.3.1	Wellwandkessel.....	31
3.1.3.2	Flachwandkessel mit Radiatoren	32
3.1.4	Ausdehnungsgefäß.....	33
3.1.5	Durchführungen	33
3.1.6	Stufenschalter (OLTC).....	34
3.2	Klassifizierung der KDS in Bezug auf das Design	34
3.2.1	Aufgabengebiet der KDS	35
3.2.2	Fixe KDS	36
3.2.3	Variable KDS	37
3.2.4	Fix oder Variabel.....	39
3.2.5	Static Var Compensator.....	40
3.3	Anwendungsbereiche der KDS	41

4	Marktsituation.....	42
4.1	Marktsituation innerhalb ENTSO-E	43
4.2	Demand Connection Code, DCC	45
4.2.1	Anforderungen hinsichtlich der Blindleistung.....	45
4.3	Investitionskosten der KDS	48
4.3.1	Beispielrechnung	49
4.4	Globale Marktanalyse	51
5	Konstruktion und Designparameter der KDS	60
5.1	Designparameter	60
5.1.1	Schaltgruppe	62
5.1.2	Maximale Temperatur	62
5.1.3	Definition von Blindleistung, Bemessungsspannung, Bemessungsstrom, Frequenz und Isolationspegel	63
5.1.4	Kühlung	63
5.2	Beschreibung der Parametervorgabe im Berechnungstool	65
5.2.1	Obligatorische und optionale Daten	65
5.2.1.1	Allgemeine Daten	65
5.2.1.2	Kern.....	66
5.2.1.3	Wicklung.....	68
5.2.1.4	Temperatur.....	70
5.3	Simulation im Transformatorenberechnungsprogramm.....	71
5.3.1	Elektrisch.....	71
5.3.1.1	Wärmeabfuhr vom Kessel.....	71
5.3.1.2	Aktivteilgeometrie	72
5.3.2	Mechanisch	74
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	75
5.4.1	Aktivteil	75
5.4.1.1	Kern.....	75
5.4.1.2	Wicklung.....	76

5.4.2 Kessel.....	78
6 Zusammenfassung und Diskussion	79
7 Literaturverzeichnis.....	- 81 -

1 Einführung

Die Voraussetzung für ein sicheres Energieversorgungssystem ist ein sorgfältig ausgebautes Versorgungsnetz. Dabei sind modernste Technologien sowie eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit der Anlagen unerlässlich. Kompensationsdrosselspulen (KDS) ermöglichen den Energieversorgungsunternehmen (EVU) Vorteile auf verschiedenen Spannungsebenen, um diese Zielsetzung zu realisieren.

Die KDS ist aus technischer, wirtschaftlicher wie auch aus unternehmerischer Sicht ein wichtiger Bestandteil des Stromversorgungssystems. Technisch gesehen ermöglicht ihr Einsatz insbesondere die Spannungskontrolle infolge Spannungsregelung, eine geringere Blindleistungsbelastung sowie die Erfüllung von Vertragsverpflichtungen.

Durch die Verwendung von KDS wird dem Netzbetreiber eine kosteneffiziente Lösung für das Problem der Blindleistungskompensation angeboten. Darüber hinaus ergeben sich weitere wirtschaftliche Vorteile durch die geringere Blindleistungsbelastung, die geringen Verluste und eine höheren Leitungsbelastung mit Wirkleistung. Aus unternehmerischer Sicht ist die Flexibilität und Unabhängigkeit von anderen Netzbetreibern erstrebenswert.

In einem Stromversorgungssystem haben KDS wichtige Aufgaben, darunter die Kompensation der kapazitiven Blindleistung von Leitungen mit dem Fokus auf das schwach belastete oder leerlaufende Netz. Sie dienen auch dazu, netzfrequente Überspannungen bei Lastschwankungen oder Lastabfällen zu reduzieren. Durch diese Funktionen sorgen sie für eine stabile und effiziente Energieübertragung. [1], [2]

1.1 Ziel und Aufbau der Masterarbeit

Zum besseren Verständnis dieser Masterarbeit wird hier ihre Struktur dargestellt. Die vorliegende Arbeit ist in fünf Kapitel unterteilt:

Auf die Einführung im ersten Kapitel folgt in Kapitel 2 und Kapitel 3 ein Einblick in den aktuellen Stand der Technik. Als erstes wird in Kapitel 2 die Theorie der Blindleistung im Allgemeinen erläutert. Im Anschluss wird im Kapitel 3 der Bezug zur KDS erklärt. Anschließend werden die kapazitiven Blindleistungsanteile von Freileitungen und Kabeln behandelt. Ebenso wird in diesem Kapitel auf die Gestaltungsmöglichkeiten der KDS eingegangen. Am Ende dieses Kapitels werden das Aufgabengebiet und die Anwendungsbereiche der KDS erläutert.

Die Teilaufgabe der Masterarbeit, die im vierten Kapitel dargestellt wird, besteht darin, einen Überblick über den Bedarf an KDS auf der Grundlage einer globalen Marktanalyse zu geben. Dabei wird so vorgegangen, dass zunächst die Situation innerhalb ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) vorgestellt wird. Neben der Marktanalyse wird auch die neue Verordnung zur Festlegung eines Netzkodex für den Lastanschluss (Demand Connection Code (DCC)) vorgestellt, die u. a. die Anforderungen hinsichtlich des Blindleistungsbedarfs im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) bestimmt. Auf die Erläuterung dieser Themen folgt eine Berechnung der Investitionskosten für eine Beispieldrossel, die in einer Tabelle zusammengefasst werden.

Aufbauend darauf werden im Kapitel 5 die physikalischen Parameter herausgearbeitet. Das Hauptziel der Masterarbeit ist die Erstellung einer Konstruktionsbeschreibung der KDS, basierend auf einer Berechnung mittels eines professionellen Siemens Large Power Transformer (Siemens LPT)-Programms, das anhand weniger Parameter und einfacher Formeln die physikalischen Parameter der KDS effizient kalkuliert. Im Rahmen der Angebotsauslegung werden hier nur die wichtigsten und gleichzeitig kostenintensivsten Komponenten berücksichtigt. Um die entsprechenden Produktionszeiten und die korrekten Kosten für Siemens Liquid Immersed Distribution Transformer (Siemens LIDT) zu ermitteln, wird die KDS mit einem Siemens LIDT-Programm zur Transformatorberechnung nachgebildet, woraufhin die Vorgehensweise der Simulation festgehalten wird.

Zur Umsetzung des Angebotsentwurfs wurde ein Prototypenmodell einer KDS verwendet. Diese wurde vom Siemens LIDT-Ingenieurteam berechnet und anschließend konstruiert und getestet. Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Masterarbeit zusammengefasst.

2 Blindleistung in Energieversorgungsnetzen

„Die Energieversorgungssysteme überall auf der Welt sind im Wandel. Angesichts weltweiter Klimaveränderung liegt die Energiezukunft Europas und der Welt im Ausbau erneuerbarer Energiequellen. Künftig sollen große Windparks vor den nordeuropäischen Küsten und riesige Solarstromanlagen im Süden gepaart mit Wasserkraft die europäischen Ballungszentren mit umweltfreundlichem Strom versorgen.“

[3]

Mit der dezentralen Energieerzeugung sowie der Nutzung regenerativer Energiequellen stehen die Netzbetreiber vor neuen Herausforderungen. Denn im Zuge des volatilen Verhaltens der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien treten in den Versorgungsnetzen Lastschwankungen auf, die auf allen Spannungsebenen Schwankungen verursachen. Neben der Diskontinuität in der Stromerzeugung stellt auch die Verteilung der Energie aus Großanlagen wie Offshore-Windparks an entfernte Verbraucherzentren ein neues Problem für die Stromnetze dar.

KDS in verschiedenen Spannungsebenen, die sich auch variabel steuern lassen, können einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Netzstabilität leisten. Dadurch – sowie durch den damit verbundenen positiven Effekt auf die Wirtschaftlichkeit – spielen sie eine zentrale Rolle bei der Lösung der dargestellten Herausforderungen. [4]

2.1 Definition der Blindleistung

Die Blindleistung wird bei der Auslegung und dem Betrieb von Wechselstromanlagen als ein wichtiger Einflussfaktor angesehen. Aufgrund der Tatsache, dass die Impedanz der Netzkomponenten größtenteils reaktiv ist, ist für die Übertragung der Wirkleistung ein Winkelphasenunterschied zwischen den Spannungen auf der Sendeseite und der Empfangsseite erforderlich.

Bei der Blindleistung ist jedoch eine Differenz in der Amplitude der gleichen Spannungen erforderlich. Die Blindleistung wird nicht nur von den meisten Netzkomponenten, sondern auch von den meisten Konsumenten verbraucht. [5]

Die Blindleistung wird zur Erzeugung eines Magnetfeldes in induktiven Verbrauchern wie Motoren, Transformatoren, Induktionsöfen und dergleichen, d.h. Spulen in beliebiger Ausführung, benötigt. Im Gegensatz zur Wirkleistung wird die Blindleistung nicht in Wärme, Licht oder Drehmoment umgewandelt, sondern oszilliert zwischen Verbraucher und Energieversorger. Bei Wechselstrom- und Drehstromsystemen ist zu beachten, dass Ströme und Spannungen in der Regel, wie in der *Abbildung 1* zu sehen ist, nicht phasengleich sind. Die Phasenlage ist von der Höhe der Induktivität, der Kapazität und dem ohmschen Widerstand an der Impedanz abhängig. [6]

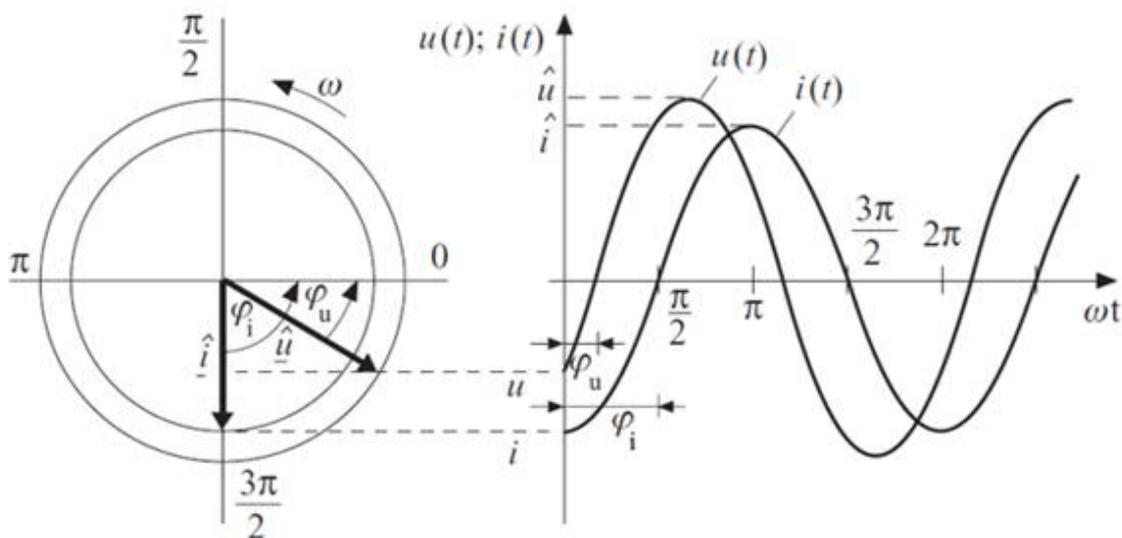


Abbildung 1 Vektordiagramm und Zeitverlauf in der Wechselspannung [6]

Das Verhältnis zwischen Schein-, Wirk- und Blindleistung kann mittels folgender Formeln für ein einphasiges Wechselstromsystem dargestellt werden:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \rightarrow P = S \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \rightarrow Q = S \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

Der Leistungsfaktor, mit dem die elektrischen Verbraucher Wechselstrom verbrauchen, ist unterschiedlich. Er wird verwendet, um den Wirkungsgrad zu beschreiben, mit dem Lasten Wechselstrom verbrauchen. Der Leistungsfaktor kann ausgehend von den oben dargestellten Formeln wie folgt berechnet werden:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Die Beziehung von Wirk- zu Blindleistung hingegen wird durch den Tangens des Phasenwinkels ausgedrückt:

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (5)$$

Wenn ein Verbraucher mit einem Leistungsfaktor von 0,8 beschrieben wird, liefert dies jedoch nicht zwangsläufig einen Hinweis darauf, ob es sich um kapazitive oder induktive Ströme handelt. Blindströme werden aber stets durch induktive oder kapazitive Verbraucher hervorgerufen. Bei induktiven Verbrauchern spricht man von einem ‚nacheilenden‘ (engl. *lagging*) Leistungsfaktor; bei kapazitiven Lasten ist der Leistungsfaktor hingegen ‚voreilend‘ (engl. *leading*).

Wie gesagt vermittelt ein Leistungsfaktorwert von beispielsweise 0,8 keine Informationen über den Zeitpunkt der phasenverschobenen Ströme, die ihn verursacht haben. Aus diesem Grund wird der Leistungsfaktor bezogen auf den Blindstrom häufig durch den Zusatz ‚0,8 voreilend‘ oder ‚0,8 nacheilend‘ genauer spezifiziert. [6], [7]

Zur Verdeutlichung der Bedeutung von der Blindleistungsaufnahme bzw. -abgabe wird darüber hinaus eine Bezugsrichtung in Form eines Bezugspfeiles vereinbart, auf den sich die Vorzeichen der Wirkleistung und der Blindleistung beziehen.

Außerdem wird zur Definition des Richtungssinnes festgestellt, dass die Induktivität Blindleistung analog zu einem Widerstand - der Wirkleistung verbraucht - angesehen wird, wobei die Kapazität in diesem Fall das Gegenteil bewirkt und somit Blindleistung erzeugen würde.

Die Richtung der Bezugspfeile werden schließlich durch das Zählpfeilsystem bestimmt, wobei in diesem Fall zwischen Verbraucherzählpfeilsystem (VZS), dass die Aufnahme von Wirk- und Blindleistung bestimmt, und Erzeugerzählpfeilsystem (EZS), dass die Abgabe derselben regelt, unterschieden werden muss. [8]

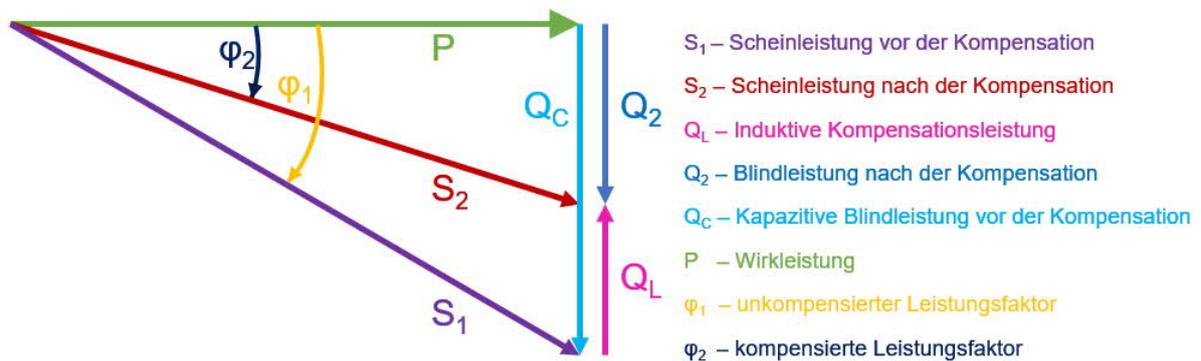


Abbildung 2 Kompensation der kapazitiven Blindleistung mittels einer zugeschalteten Spule

Wie in der *Abbildung 2* zu sehen ist, wurde ein Zeigerdiagramm erstellt, das die Kompensation der kapazitiven Blindleistung bzw. den Blindleistungsverbrauch der Spule veranschaulicht. Die x-Achse, in die der Wirkleistungspfeil zeigt, stellt den Realteil der Scheinleistung dar und die y-Achse, auf der die Blindleistungspfeile aufgetragen sind, den Imaginärteil. Falls, wie hier dargestellt, die Blindleistung überwiegend kapazitiv sein sollte, was durch Q_C ausgedrückt ist, kann eine Spule mit der hier als Q_L eingetragenen Blindleistung diesem Umstand entgegenwirken und somit den Leistungsfaktor steigern.

2.1.1 Blindleistungsbedarf

Wie schon im *Kapitel 2.1* erwähnt oszilliert die Blindleistung zwischen der Blindleistungserzeugung und den Blindleistungsverbrauchern, wobei die Fähigkeit, diese zu speichern, sowohl auf Seiten der Erzeuger- als auch der Verbraucheranlage vorhanden sein muss.

Unter Berücksichtigung klassischer elektrischer Verbraucher und Anlagen ist eine Speicherung lediglich durch ein Magnetfeld in Form von magnetischer Energie als auch durch ein elektrisches Feld in Kapazitäten in Form von elektrischer Energie möglich. Die magnetische

Energie wird durch Wechselstrommotoren, Transformatoren und induktive Lasten sowie im Magnetfeld von Freileitungen und Kabeln gespeichert. Die Speicherung elektrischer Energie in elektrischen Feldern ist bei allen Kapazitätsarten und im elektrischen Feld von Freileitungen und Kabeln möglich. Die in einem Magnetfeld gespeicherte Energie kann mittels folgender Formel berechnet werden [6]:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{max}^2 \quad (6)$$

Dabei ist bei einer einfachen Spule mit N Windungen die Induktivität von der geometrischen Ausführung abhängig:

$$L = A \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l_L} \quad (7)$$

Die Blindleistung wird dann im Falle eines dreiphasigen Wechselstromsystems wie folgt angegeben:

$$Q = 3 \cdot I^2 \cdot \omega L \quad (8)$$

Dabei ist

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (9)$$

Ausgehend von diesen Erkenntnissen kann die Induktivität der durch Luftspalte getrennten KDS nach dem in *Abbildung 3* dargestellten Grundprinzip wie folgt berechnet werden. [9]

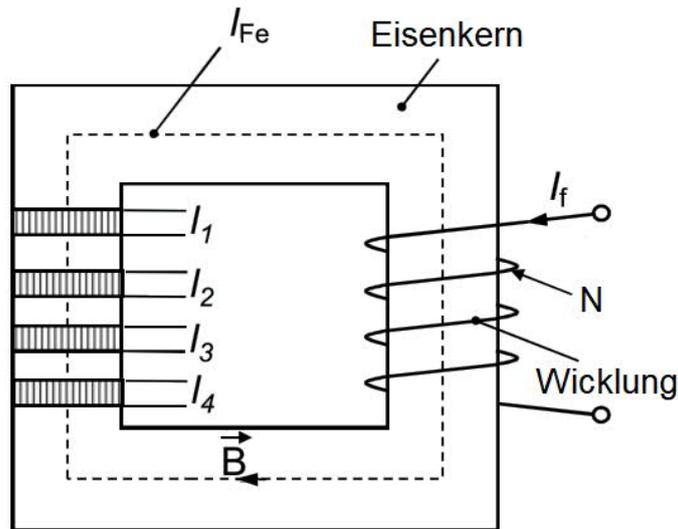


Abbildung 3 Grundprinzip einer durch Luftspalte getrennten Eisenkernkompensationsdrosselspule [9]

$$L = A_{fe} \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l_{luft}} \quad (10)$$

$$l_{luft} = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \quad (11)$$

2.1.2 Warum wird Blindleistung kompensiert?

Die von der Wechselstromquelle erzeugte Blindleistung wird während eines Viertelzyklus in einem Kondensator oder einer KDS gespeichert und im folgenden Viertelzyklus an die Stromquelle zurückgeführt. Die Blindleistung pendelt dabei zwischen der Wechselstromquelle und dem Kondensator bzw. der KDS mit einer Frequenz, die dem doppelten Nennwert entspricht. Sie kann daher mit statischen Vorrichtungen kompensiert werden, wodurch ihre Zirkulation zwischen Verbraucher und Quelle vermieden und somit die Spannungsregelung und Stabilität des Stromversorgungssystems verbessert wird. [10]

2.1.3 Grundlagen der kapazitiven Blindleistung von Leitungen

Da die vorliegende Masterarbeit sich auf die Lösung des Problems kapazitiver Blindleistungen konzentriert, wird in weiterer Folge nur auf diese eingegangen und nicht auf die induktiven Blindleistungen.

Der Begriff Blindleistungskompensation beschreibt die Regelung der Blindleistung zur Steigerung des Leistungsfaktors von Wechselspannungsversorgungssystemen. Mit dem Konzept der Blindleistungskompensation ist ein breites und vielfältiges Anwendungsspektrum von System- und Kundenproblemen, insbesondere in Verbindung mit der Netzqualität, abgedeckt. Denn durch eine adäquate Blindleistungsregelung kann die Netzqualität verbessert werden, indem die Kompensationsvorrichtung in Verbrauchernähe positioniert wird. [5]

Wie aus *Kapitel 2.1* ersichtlich ist, sind die induktiven gegenüber den kapazitiven Verbrauchern im System dominant. Aus diesem Grund ist der Einsatz der KDS im Mittelspannungsnetz praktisch nur in Schwachlastfällen interessant, bei denen das Netz abhängig vom Verkabelungsgrad und dem Verbraucherverhalten kapazitive Eigenschaften aufweisen kann.

Tritt der Zustand ein, bei dem nur wenige Verbraucher im Netz Strom beziehen bzw. das Netz schwach induktiv belastet wird, kann dies dazu führen, dass diese Verbraucher einen nicht optimalen Beitrag zur Blindleistungsbilanz im Netz leisten und daher nur in geringem Maße zum Ausgleich des kapazitiven Bedarfs zum Einsatz kommen können. Dies führt aufgrund des hohen Kapazitätsbelagsanteils zu einer höheren kapazitiven Blindleistung.

Zum Ausgleich der Blindleistungsbilanz werden zuschaltbare Induktivitäten installiert, da der Schwachlastfall in den verschiedenen Netzebenen auftreten kann. Wurden für die Netzkomensation durch Steuerung der betrieblichen Kompensationsanlagen entsprechend dem Netzbedarf auch geeignete Verfahren im Verteilnetz eingesetzt, z. B. Abschalten oder induktive Kompensation beim zuvor beschriebenen Schwachlastfall, konnte in einigen Fällen auf zusätzliche Induktivitäten im Hochspannungs-Netz verzichtet werden. [11]

Die Blindleistungsbilanz an einem Übergabepunkt zwischen VNB (Verteilnetzbetreiber) und ÜNB (Übertragungsnetzbetreiber) kann aus *Abbildung 4* abgelesen werden. Diese Werte beziehen sich auf den Blindleistungsaustausch zwischen dem Salzburger Verteilnetz mit dem österreichischem Übertragungsnetz.

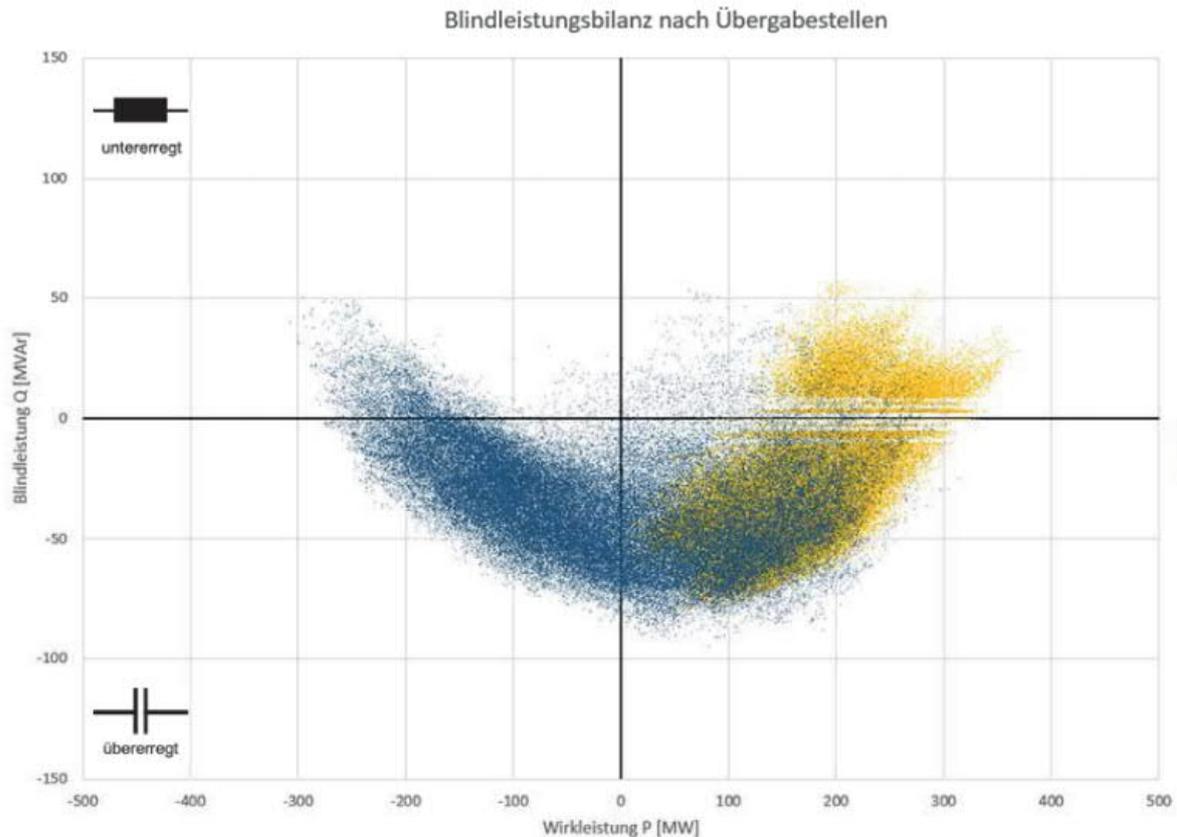


Abbildung 4 Darstellung des Blindleistungsverhaltens des Salzburger Verteilnetzes als P-Q-Diagramm [12]

Hier ist zu sehen, dass die mit Messwerten überlagerte Punktwolke eine V-förmige Charakteristik aufweist. Je nach Art des Netzes können die Zweige verschieden ausgeprägt sein. Der Punkt wo sich die Zweige schneiden, liegt nicht unbedingt unterhalb der Abszisse, sondern kann sich auch näher am Ursprung des Koordinatensystems befinden. [11]

Wie bereits erwähnt, erfolgt der Einsatz von KDS in Mittelspannungsnetzen unter anderem bei hohem Verkabelungsgrad. Eine solche Anwendung kann nach der Veranschaulichung der Kapazitäten von Leitungen erklärt werden.

Sowohl Freileitungen als auch Kabel, die vereinfacht durch ein π -Ersatzschaltbild im Mittelsystem dargestellt werden können, besitzen einen gewissen Kapazitätsanteil, der in der *Abbildung 5* ersichtlich ist. Dieser wird durch die Betriebskapazität vorgegeben, die wiederum aus anderen Kapazitäten gebildet wird.

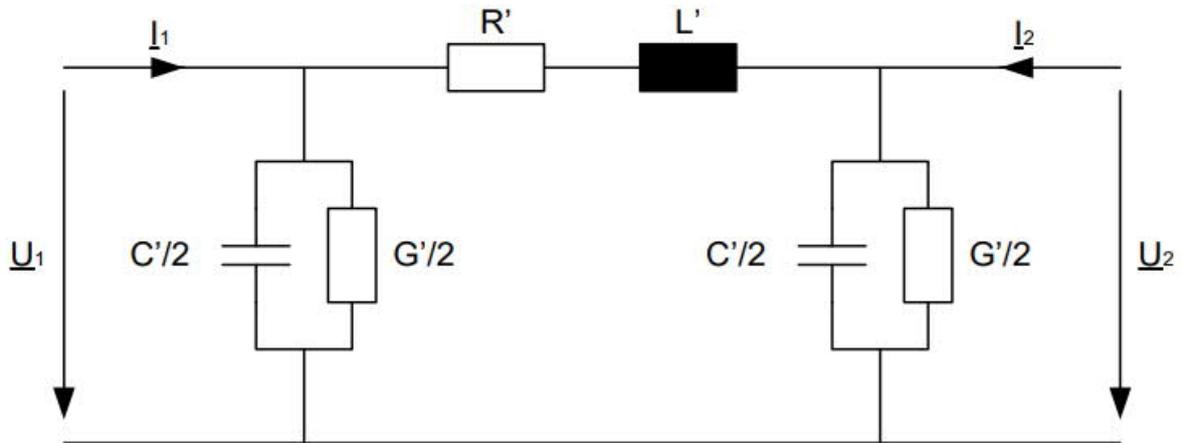


Abbildung 5 allgemeines π -Ersatzschaltbild einer Leitung (Mittelsystem) [13]

Ausgehend von der *Formel 12*, mit der die Kapazität des Plattenkondensators bestimmt werden kann [14],

$$C = \frac{A_c \cdot \varepsilon}{a} \quad (12)$$

lässt sich die Kapazität der Leitung – bei der es sich im Prinzip um einen zylindrischen Kondensator handelt, dessen Oberfläche ein Kreis ist – wie folgt bestimmen:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_z \cdot \varepsilon}{\ln \frac{a_L}{r_L}} \quad (13)$$

2.1.3.1 Freileitung

Die Betriebskapazität einer Freileitung für den Einsatz in einem 20 kV-Mittelspannungsnetz beträgt ca. 9 nF/km. Sie kann mit Hilfe der folgenden Formeln berechnet werden:

$$C_b = C_e + 3 \cdot C_L \quad (14)$$

$$C_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln \frac{2 \cdot h_m \cdot d_m}{r \cdot D_m}} \quad (15)$$

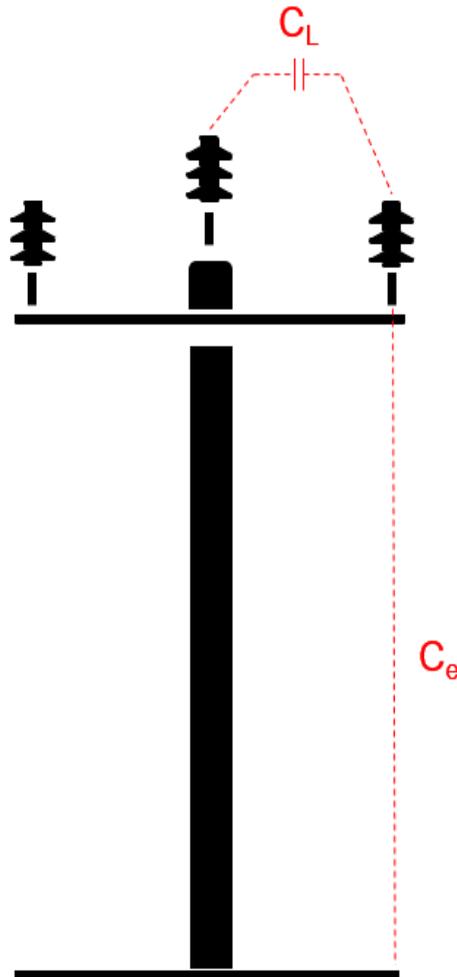


Abbildung 6 Kapazitäten in einer Freileitung anhand der Beispielszeichnung eines 20 kV-Masts

Typische Kennwerte einer Freileitung, die in einem 20 kV-Netz oder 110 kV-Netz verwendet wird, sind in folgender Tabelle aufgeführt.

	C_b	C_e	C_L	I_e	I_L
20 kV-Freileitung	~ 9 nF/km	~ 4,5 nF/km	~ 1,5 nF/km	0,05 A/km	0,03 A/km
110 kV-Freileitung	~ 11 nF/km	~ 5 nF/km	~ 1,6 nF/km	0,3 A/km	0,22 A/km

Tabelle 1 Kennwerte einer 20 kV-Freileitung und einer 110 kV-Freileitung [14]

Die *Tabelle 1* zeigt deutlich, dass die Kapazitätsanteile einer 20 kV-Freileitung sich nicht wesentlich von denen der 110 kV-Freileitung unterscheiden.

Zum besseren Verständnis der Menge an Blindleistung, die durch die Kapazitäten einer Freileitung erzeugt wird, ist in *Tabelle 2* ein Überblick, bei verschiedenen Spannungsebenen eines bestehenden Netzes, dargestellt.

Leitungstyp	Systemlänge	Erzeugte Blindleistung
110 kV-Freileitung	577 km	18,8 MVar
30 kV-Freileitung	1731 km	4,7 MVar
10 kV-Freileitung	61 km	0,2 MVar
0,4 kV-Freileitung	604 km	0,0 MVar

Tabelle 2 Blindleistungserzeugung durch Kapazitätsanteile in Freileitungen bei verschiedenen Spannungsebenen, Systemlängen eines realen Netzes [12]

2.1.3.2 Kabel

Zur Ermittlung der im Kabel vorhandenen Kapazitäten wird ein einadriges Radialfeldkabel (*Abbildung 7*) herangezogen. Die Kennwerte sind aus der *Tabelle 3* zu entnehmen. Die Betriebskapazität kann mittels folgender Formel errechnet werden [14] :

$$C_b = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{a}{r_L}} \quad (16)$$

wobei:

$$C_b = C_e \quad (17)$$

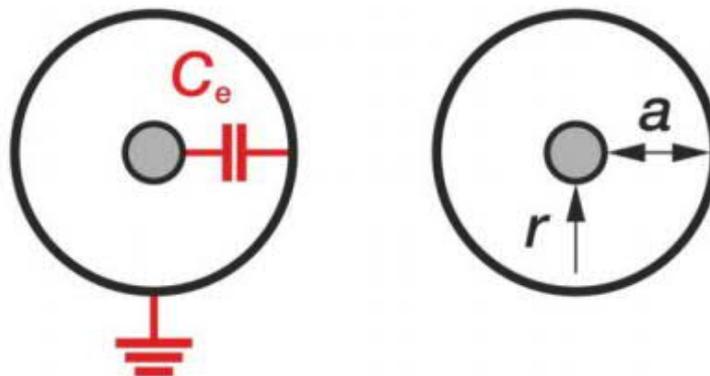


Abbildung 7 Betriebskapazität eines einadrigen Kabels [14]

Im Vergleich zur Freileitung verfügt das Kabel über ca. das 28-Fache an Kapazitätsbelag.

Typische Kennwerte eines Kabels, das in einem 10 kV- oder 20 kV-Netz verwendet wird, sind in *Tabelle 3* ersichtlich.

	C_b	C_e	C_L	I_e	I_L
10 kV-Kabel	~ 560 nF/km	~ 410 nF/km	~ 50 nF/km	2,2 A/km	1,0 A/km
20 kV- Kabel	~ 250 nF/km	~ 250 nF/km	~ 0 nF/km	3,0 A/km	1,0 A /km

Tabelle 3 Kennwerte eines 10 kV-Kabels und eines 20 kV-Kabels [14]

Wie zu erkennen ist, beträgt der Anteil der Kapazitäten bei Kabelleitungen wesentlich mehr als bei Freileitungen. Weiterhin ist zu bemerken, dass der Kapazitätsanteil hinsichtlich der zu verwendenden Spannungsebene sehr unterschiedlich ist. Deshalb kann für ein 10 kV-Netz ein 20 kV-Kabel eingesetzt werden. Durch diese Maßnahme ergeben sich kleinere kapazitive Ströme. [14] Die *Tabelle 4* gibt einen Überblick über die Blindleistungsmenge, die durch die Kapazitäten eines Kabels erzeugt wird. Die Spannungen und Systemlängen beziehen sich auf das gleiche Netz wie aus *Tabelle 2*.

Leitungstyp	Systemlänge	Erzeugte Blindleistung
110 kV-Kabel	41 km	28,1 MVar
30 kV-Kabel	1771 km	103,8 MVar
10 kV-Kabel	723 km	10,3 MVar
0,4 kV-Kabel	11537 km	0,5 MVar

Tabelle 4 Blindleistungserzeugung durch Kapazitätsanteile in Kabeln bei verschiedenen Spannungsebenen, Systemlängen eines realen Netzes [12]

Vergleicht man *Tabelle 2* mit *Tabelle 4*, so zeigt sich, dass die Kapazitätsanteile des Kabels auf der 30 kV-Spannungsebene und bei annähernd gleicher Länge der verwendeten Freileitungen an gleicher Spannungsebene zu einem ca. 22-fach höheren Blindleistungswert führt.

Die erzeugte Blindleistung für ein anderes Netz kann im Kapitel 4.2.1 eingesehen werden.

3 Kompensationsdrosselspule

In diesem Kapitel wird die Theorie der Kompensationsdrossel erläutert. Zunächst wird ein Überblick über die Hauptkomponenten gegeben. Anschließend folgt ein Vergleich zwischen einer nicht regelbaren und einer unter Last regelbaren KDS. Die Anwendungsbereiche schließen das Kapitel ab.

3.1 Hauptkomponenten einer KDS

Eine KDS besteht im Prinzip aus einem:

- Aktivteil, der wiederum aus einem
 - Eisenkern (1) und Wicklungen (2) besteht,
- einem mit Kühlmedium befülltem Kessel (3), der als ein
 - Wellwand- oder
 - Flachwandkessel (der in diesem Fall mit Radiatoren (5) ausgestattet ist)
- einem Satz Durchführungen (6) für die OS-seite (Oberspannungsseite)
- einem Ausdehnungsgefäß (4) und einem
- Schalter, der entweder spannungsfrei oder unter Last betrieben werden kann, dem sogenannten OLTC (On Load Tap Changer) (7) [15], [16]

Der Grundaufbau einer KDS ist in *Abbildung 8* dargestellt. In diesem Kapitel wird auf die Theorie einiger Komponenten eingegangen, um deren Funktion als Teil der KDS besser zu verstehen.



Abbildung 8 Hauptkomponenten einer KDS [15], [16]

Der Aktivteil ist der innere Teil der KDS. Er besteht aus einem Eisenkern und drei Wicklungen. Der Eisenkern setzt sich im Wesentlichen aus Pressplatten, einem oberen und unteren Joch, drei Schenkeln und mehreren keramischen Abstandshaltern zusammen, die den Luftspalt der Konstruktion definieren.

3.1.1 Eisenkern

Die KDS besteht aus einem Eisenkern, der durch Luftspalte getrennt ist, was eine kompakte Bauweise mit niedrigem Geräuschpegel sowie geringen Vibrationen und Verlusten ermöglicht. Ein weiterer Vorteil des Eisenkerns mit Luftspalten ist ein Dämpfungseffekt, wobei Spannung unter extremen Überstrombedingungen begrenzt wird. [2]

Wie in *Abbildung 9* zu sehen ist, existieren für ein dreiphasiges System zwei verschiedene Arten der Kernschenkelausführung. Die erste Ausführung ist als 3/0-Kernvariante bekannt. Bei

diesem Typ sind ein oberes und ein unteres Joch sowie drei Schenkel vorhanden. Die Schenkel weisen durch nichtmagnetische Distanzrollen einen Luftspalt auf.

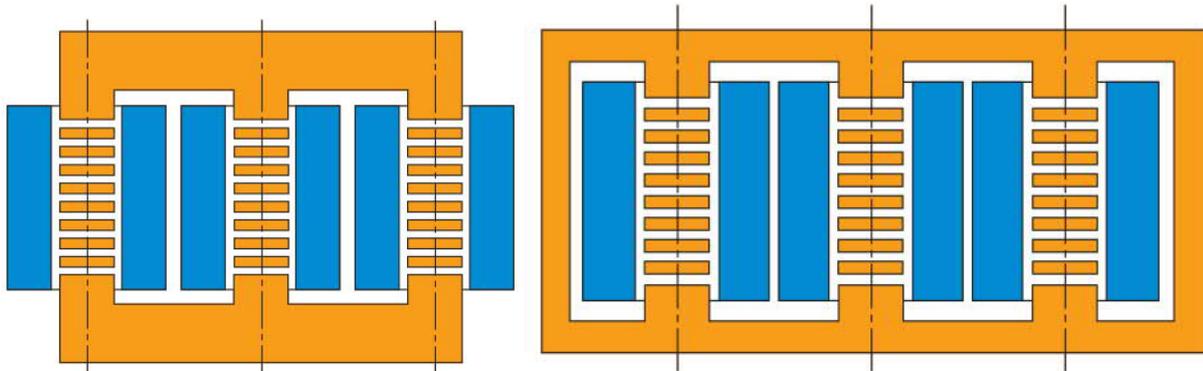


Abbildung 9 Kernvariante in 3/0- (links) und 3/2-Ausführung (rechts) [15]

Beim Fünf-Schenkel-Konzept bzw. der 3/2-Kernvariante sind drei bewickelte und zwei freie Schenkel vorhanden. Bei dieser aus Kostengründen selten verwendeten Variante ist es von Vorteil, dass bei Höhenbeschränkungen weniger Probleme auftreten als bei der 3/0-Variante. Der Nachteil liegt im Eigengewicht der zusätzlichen Schenkel.

Der Eisenkern besteht aus kaltgewalzten, kornorientierten, hochlegierten Kernblechen. Die Blechoberflächen haben eine sehr dünne, hitzebeständige Isolierschicht. Die Kernbleche werden je nach Anforderung, radial oder parallel positioniert und fixiert. Die radiale Anordnung der Kernplatten verhindert, dass die Streuflüsse in die flache Oberfläche des äußeren Kernblechs gelangen, was zu Wirbelstromüberhitzung und Hot Spots führt; jedoch sind durch diese Anordnung die Herstellungskosten größer. [9]

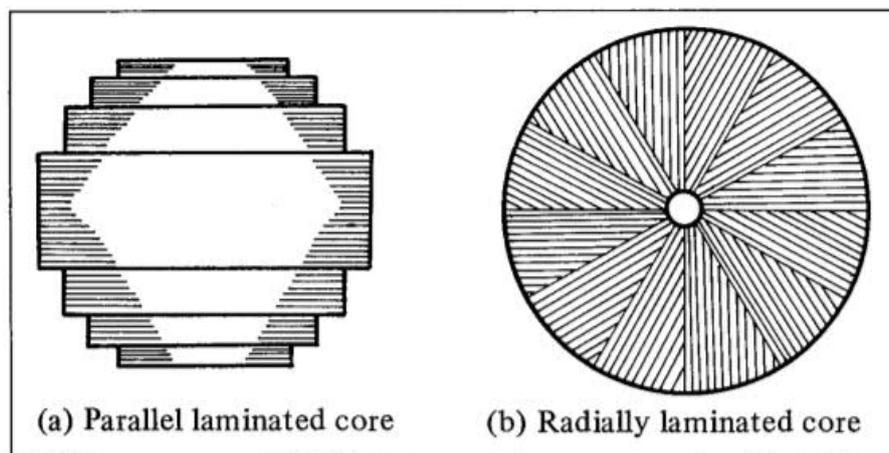


Abbildung 10 Parallel und radial angeordnete Kernpakete [9]

Durch die Luftspaltänderung ist es möglich, das Niveau der Streuflüsse zu begrenzen, die in das Gestell und in die angrenzenden Teile gelangen könnten, wodurch eine Fremderwärmung dieser Komponenten reduziert werden kann. Ein bedeutenderer Effekt der Sättigung ist das Problem der Streuflüsse am Luftspalt. Diese Flussverteilung kann in der vereinfachten Darstellung des Flussverlaufs in der *Abbildung 11* eingesehen werden.

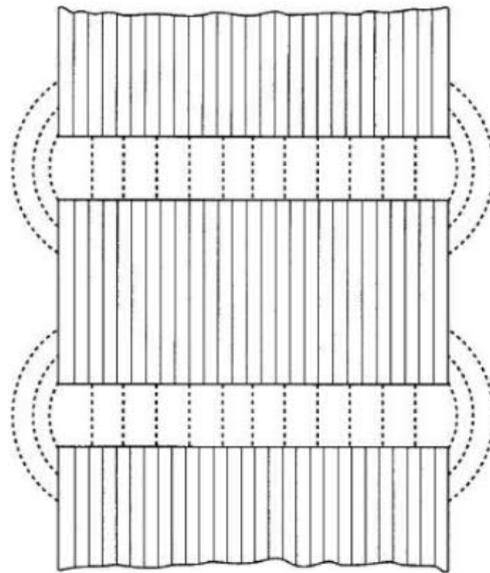


Abbildung 11 Vereinfachte Darstellung des Flussverlaufs [17]

Dies bedeutet, dass ein Teil des Flusses in die Bleche in einem Winkel eintritt, was lokal den Wirbelstromverlust und die Vibration erhöht. Die Reduzierung der Streuflüsse kann durch Reduzierung des Spalts erreicht werden; dies erfordert aber mehr Spalten und reduziert die mechanische Steifigkeit des Kerns. Die Optimierung des Designs erfordert einen Kompromiss zwischen diesen Faktoren. [17]

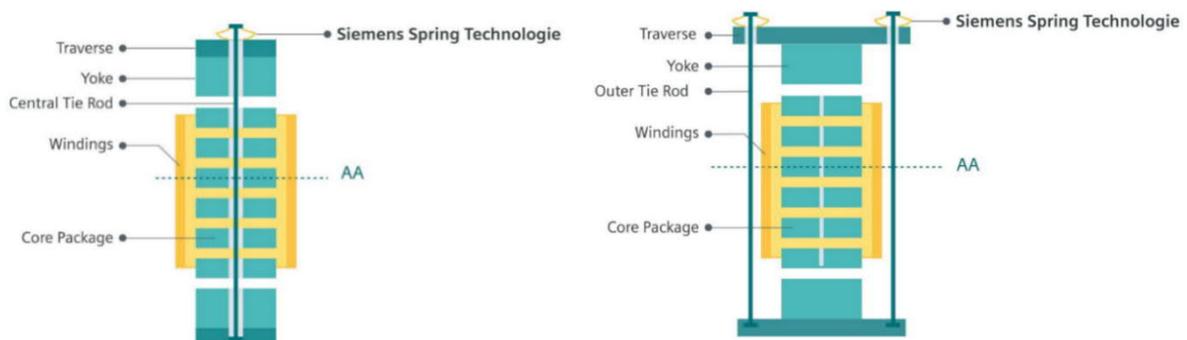


Abbildung 12 Unterschied zwischen einer Innen- und Außenverspannung [18]

Bei Verspannung des Aktivteils weist besonders die Außenverspannung Vorteile auf, da sie eher bei geringen Spannungen zur Anwendung kommt, was in diesem Fall durch den Einsatz im Mittelspannungsnetz begründet ist. Dies hat den Vorteil, dass das Gewicht des Kerns und der Wicklung geringer ist. Der Vorteil der Innenverspannung besteht dagegen in den geringeren Geräuschemissionen. [2]

3.1.2 Wicklungen

Die Wicklungen werden konzentrisch angeordnet und gegen die Joche verspannt. Als Isolation wird meistens Papier verwendet, das in Öl eingetaucht eine ausgezeichnete Durchschlagsfestigkeit aufweist. Die Schichtstärke der Wicklungsisolation wird entsprechend der Stoßspannungsbeanspruchung ausgelegt. Alle Leitungen sind im Inneren mit ausreichendem Isolationsmaterial versehen. Die Wicklungen werden mit entsprechend geformten Jochklemmkonstruktionen mittels Zugstangen geklemmt. Für den Wicklungsaufbau kann aus drei verschiedenen Typen gewählt werden, die zusammengefasst als Lagenwicklung bezeichnet werden. Je nach gewünschtem Leiterquerschnitt kann entweder ein Rund-, Flach- oder Drillleiter verwendet werden. [19]

3.1.3 Kessel

Der Kessel ist aus Stahlblech geschweißt. Dabei ist die Stärke der Stahlbleche so definiert, dass die vorgegebenen Anforderungen erfüllt werden. Die Hebeböcke am Kessel dienen zum Anheben mit Hydraulikzylindern. Am Kessel befinden sich auch Hebebolzen zum Anheben mit einem Kran. Wenn Fahrrollen vorgesehen sind, sind sie für Längs- oder Querbewegungen ausgelegt. Für das Ziehen des Kessels in Längs- oder Querrichtung sind Zuglaschen vorgesehen. [19]

3.1.3.1 Wellwandkessel

Bei dieser Kesselbauart wird die Wärme über die Oberfläche der an der Außenseite angeordneten Wellenwände abgeführt. Die Oberfläche und die Anzahl der Wellenwände werden durch die abzuführende Wärmemenge bestimmt. Der Deckel kann durch Verschrauben oder Schweißen am Kessel befestigt werden. [19]

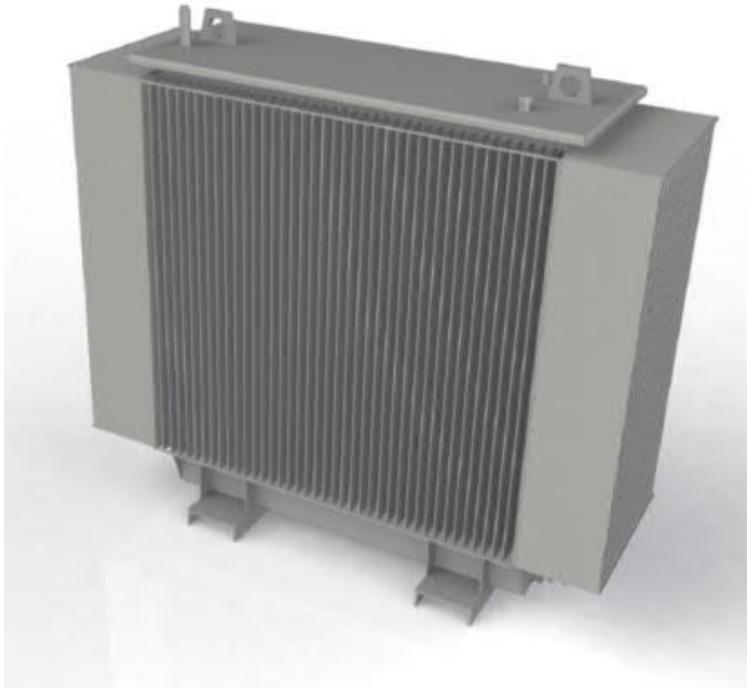


Abbildung 13 Wellwandkessel [19]

3.1.3.2 Flachwandkessel mit Radiatoren

Bei dieser Kesselbauart wird die Wärme über Radiatoren abgeführt, die an der Außenseite befestigt sind. Die Anzahl der Radiatoren wird durch die Menge der abzuführenden Wärme bestimmt. Die Radiatoren werden über zwei Flansche mit dem Kessel verschraubt. Zwischen den Flanschen ist ein Absperrventil montiert, um den Radiator von der verbleibenden Isolierflüssigkeit im Kessel zu trennen, sodass er für Wartungszwecke demontiert werden kann.



Abbildung 14 Flachwandkessel mit Radiatoren [19]

3.1.4 Ausdehnungsgefäß

Das Ausdehnungsgefäß ist mit einem Entlüftungssack ausgestattet, um den Kontakt des Öls mit Sauerstoff und Feuchtigkeit zu verhindern.

In der Expansionsleitung vom Deckel zum Ausdehnungsgefäß befinden sich ein Buchholzrelais und ein Absperrventil. Im Betrieb muss sich das Absperrventil immer in der geöffneten Position befinden.

Die Ölleitung wird in das Restaurationssystem verlängert, um sie vor möglichen Verunreinigungen oder Ölschlamm schützen zu können.

Das Entlüftungsrohr endet knapp unter der Oberseite des Ausdehnungsgefäßes. Eine Zugangsöffnung zur Reinigung ist vorgesehen. [19]

3.1.5 Durchführungen

Die Wicklungen werden entsprechend der vorgegebenen Vektorgruppe angeschlossen und über Anschlussleitungen und Durchführungen, die sich typischerweise am Deckel befinden, aus der KDS herausgeführt. Je nach Anforderung können die Durchführungen in verschiede-

nen, vom Kunden spezifizierten Ausführungen realisiert werden. Zum Berührungsschutz können die Durchführungen mit spannungsisolierten Abdeckungen oder als steckbare Durchführungen mit Schutzfunktion gegen Berührungen ausgeführt werden. In beiden Fällen wird der direkte Zugriff auf die spannungsführenden Durchführungen verhindert. [19]

3.1.6 Stufenschalter (OLTC)

Die Fähigkeit zur Regelung der KDS wird erreicht, indem ein Teil der Wicklung als Anzapfungswicklung ausgeführt wird. Das bedeutet, dass dieser Teil der Wicklung über Anzapfungen verfügt, die über den Laststufenschalter angesteuert werden können. Dadurch ist es möglich, die Induktivität der KDS präzise zu konfigurieren und damit die Blindleistung nach den jeweiligen Bedürfnissen zu regeln. Die Blindleistungsaufnahme der KDS ist umgekehrt proportional zum Quadrat der aktiven Windungen, d. h. je kleiner die Anzahl der aktiven Windungen ist, desto größer ist die Aufnahme der Blindleistung. [16] [19]

3.2 Klassifizierung der KDS in Bezug auf das Design

Das nachfolgende Unterkapitel gibt einen Überblick über die Problemlösung, die mittels der KDS in Bezug auf das Vorhandensein der kapazitiven Blindleistung in den Netzen realisiert werden kann. Außerdem wird die Auswahl einer Drossel mit einer unter Spannung möglichen Regelung begründet. Die Erläuterung des Designs wird in Bezug auf Transformatoren durchgeführt, da im *Kapitel 5* die Simulation in einem für Transformatoren ausgelegten Programm durchgeführt wird.

Mit Blick auf den Aktivteil einer KDS wird deutlich, dass die Drossel ein Transformator ohne Sekundärwicklung ist. Wird ein Transformator mit seiner Primärwicklung an eine Versorgung angeschlossen, während sich der Sekundärkreis im Leerlauf befindet, wird mit Ausnahme eines sehr kleinen Magnetisierungsstroms kein Strom fließen. Erst wenn in der Sekundärwicklung ein Laststrom fließt, wird Strom aus der Primärwicklung gezogen.

Dasselbe wäre auch bei Verwendung einer KDS, die an eine Versorgung angeschlossen ist, der Fall. Wenn durch die Entnahme eines Magnetisierungsstroms aus dieser Einspeisung ein Fluss von vergleichbarer Größe wie der im Kern eines Transformators entstünde, würde kein Strom fließen – mit Ausnahme des kleinen Magnetisierungsstroms – und die Drossel könnte

ihre Funktion der Absorbierung von Blindleistung nicht erfüllen. Für die Funktionsfähigkeit der KDS muss daher die Reluktanz des Magnetkreises stark erhöht werden, so dass die Flussdichte stark reduziert wird.

Die Reluktanz des Magnetkreises kann durch eine Reihe von Maßnahmen erhöht werden, beginnend mit der Einführung von Luftspalten in den Eisenkreislauf bis hin zum vollständigen Entfall des Eisenkreises. Die Bauweise der KDS kann laut Martin J. Heathcote in zwei Grundausführungen realisiert werden:

- ölgetauchter Luftspalteisenkern
- ölgetaucht, magnetisch abgeschirmt, kernlos

KDS mit Eisenkern haben in ihrem Aussehen und ihrer Konstruktion eine ähnliche Struktur wie Transformatoren. Bei einer Dreiphasendrossel ist der Kern, der oberflächlich ähnlich aufgebaut ist wie ein normaler Transformator Kern, mit einer Wicklung an jedem Schenkel versehen. Dabei unterscheidet sich dieser Kern jedoch von einem Transformator Kern dadurch, dass die Kernpakete in axialer Richtung der gewickelten Schenkel durch das Einsetzen von Distanzstücken aus nichtmagnetischem Material durch Lücken getrennt werden. [17]

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die für die KDS geltende IEC-Norm (International Electrotechnical Commission) zwischen den nachfolgenden Ausführungen unterscheidet:

- einphasig oder dreiphasig;
- trocken oder flüssig eingetaucht;
- eisenkernlos oder mit Luftspaltkern;
- mit oder ohne magnetische Abschirmung;
- für die Innen- oder Außenaufstellung;
- für feste oder variable Reaktanz;
- linear oder gesättigt [20]

3.2.1 Aufgabengebiet der KDS

Der Aufstellungsort der KDS wird so gewählt, dass der Netzbetreiber die größte Ausnutzung der Anlage erreicht, was in der Regel am Anfang oder Ende einer langen Freileitungs- oder Kabelstrecke sowie in zentralen Schaltanlagen ist. Während Freileitungen, wie schon im *Kapitel 2.1.3* erläutert, vergleichsweise kapazitätsarm sind und deshalb in der Regel nur bei höheren Spannungen und/oder entlang sehr langer Freileitungen kompensiert werden müssen,

weisen Kabel einen deutlich höheren Kapazitätsbelag auf. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, schon bei niedrigeren Spannungen und kürzeren Kabelstrecken eine Kompensation vorzusehen.

Die Hauptaufgaben der KDS können folgendermaßen beschrieben werden:

- Reduzierung des unnötigen kapazitiven Blindleistungstransports durch Kompensation desselben, wodurch die Leitungsverluste reduziert und der mögliche Wirkleistungstransport auf der Leitung erhöht werden.
- Spannungsregelung der unter Leerlauf- und Schwachlastbedingungen steigenden Spannung entlang der Leitung, wenn diese über die im Netzcode angegebenen Spannungswerte ansteigt (Ferranti-Effekt). [2]

3.2.2 Fixe KDS

Wie schon der Name der fixen KDS verdeutlicht, ist dieses Konzept auf die konstante Induktivität der KDS zurückzuführen. Dabei ist es mit den in *Kapitel 2.1* vorgestellten Gleichungen möglich, die aufgenommene induktive Blindleistung zu ermitteln.

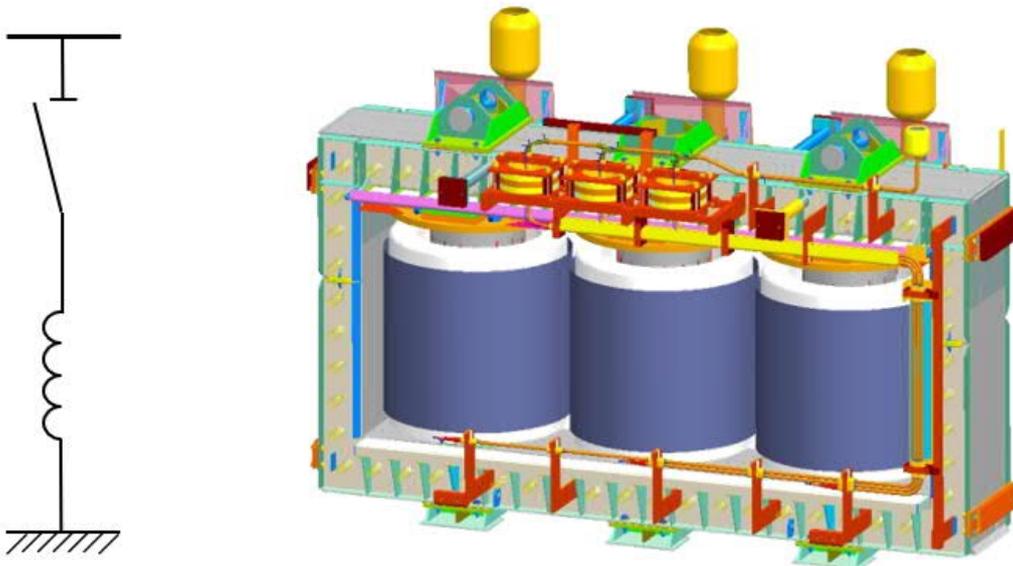


Abbildung 15 Symbolzeichen und Konzept einer fixen KDS [21]

Die KDS, die in Trockenausführung hergestellt werden, sind meist mit der Tertiärwicklung von Transformatoren verschaltet. Die Verwendbarkeit der trockenen KDS im Gegensatz zu den

ölgefüllten im ENTSO-E Raum ist in *Kapitel 4* anhand eines Tortendiagramms in der *Abbildung 19* dargestellt.

Bei der Konstruktion der fixen KDS, die in der Luftspaltkernvariante ausgeführt wird, besteht das Ziel darin, eine vorgegebene Induktivität bei einer bestimmten Luftspatlänge zu erreichen, die bei Nennspannung eine bestimmte Blindleistung verbraucht. Als erste Möglichkeit wäre hier ein großer Luftspalt denkbar oder es könnten mehrere kleine Luftspalte hintereinander gesetzt werden. Im Allgemeinen erfolgt die Konstruktion mit vielen kleinen Luftspalten, da es mit zunehmender Luftspatlänge zu erhöhten Streuverlusten kommt. Der durch Luftspalte getrennte Kern erzeugt unterschiedliche Magnetfelder; es entstehen Schubkräfte, die bei doppelter Netzfrequenz pulsieren und quadratisch proportional zum Strom sind. Aus diesem Grund muss das Schenkelsystem einschließlich des Kerns sehr kompakt und steif sein, um diesen Kräften entgegenzuwirken. Der positive Effekt der kompakten Bauweise spiegelt sich im niedrigen Geräuschpegel wider. [22]

3.2.3 Variable KDS

Ist eine stufenweise Regelung der Blindleistung erforderlich, kann dies beispielsweise dadurch umgesetzt werden, dass mehrere KDS zu- oder weggeschaltet werden, um ein bestimmtes Verhältnis zu erreichen, bei dem mehrere Leistungsschalter auf mehr Platz im Umspannwerk erforderlich wären. Eine Alternative ist die Anschaffung einer variablen KDS. Mit einer variablen KDS ist es möglich, die Induktivität durch unterschiedliches Anzapfen der Wicklungen in einer gewissen Bandbreite der Steuerbarkeit stufenweise zu verändern. Generell ist eine variable KDS die effektivste Blindleistungskompensationseinheit, wenn im System eine langsame Laständerung vorliegt.

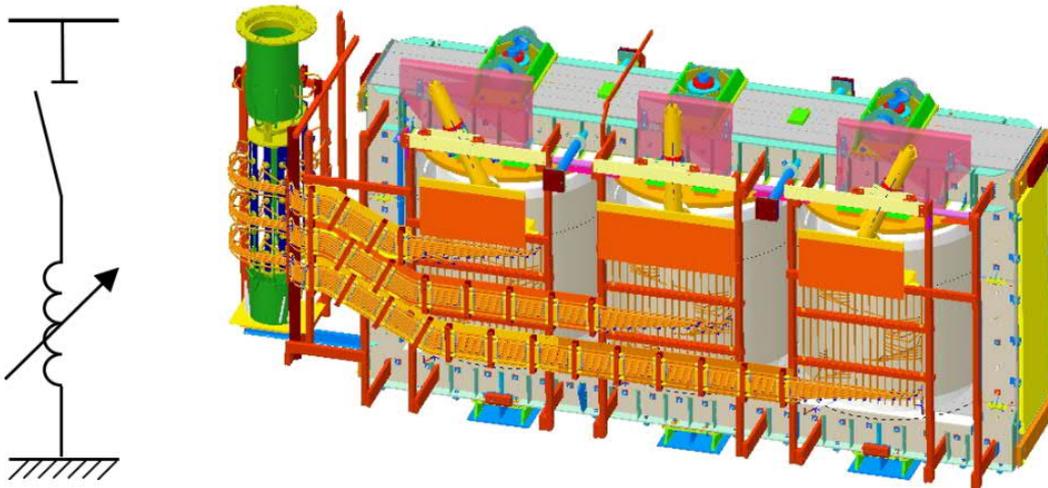


Abbildung 16 Symbolzeichen und Konzept der variablen KDS [21]

Der Einsatz von variablen KDS empfiehlt sich insbesondere dann, wenn entweder auf der Verbraucherseite (z. B. durch Lastunterschiede zwischen Tag und Nacht) oder auf der Erzeugerseite Schwankungen auftreten können. Dies ist bei immer mehr Netzen der Fall, vor allem aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Je nach Erfordernissen kann die Blindleistung an die aktuellen Netzbedingungen angepasst und der Blindleistungsbezug bei Bedarf reduziert werden.

Ein weiterer Vorteil der variablen KDS besteht darin, dass die Anzahl der Leistungsschalter reduziert werden kann, indem zwei fixe KDS durch eine variable ersetzt werden. Hinzu kommt, dass der Betreiber, wenn die KDS weniger belastet wird, von geringeren Verlusten und weniger Geräuschemissionen profitiert.

Der Verbrauch der Blindleistung ist proportional zum Quadrat der Spannung. Unter der Annahme eines konstanten Spannungsniveaus ist die Blindleistung indirekt proportional zur Induktivität. Steigt die Induktivität, sinkt der Strom durch die KDS, was zur Folge hat, dass weniger Blindleistung verbraucht wird. Aus der *Formel 10* ist zu erkennen, dass die Induktivität proportional zum Quadrat der Windungszahl ist, also bei maximaler Windungszahl die geringste Blindleistung verbraucht wird und umgekehrt. [22]

3.2.4 Fix oder Variabel

Dieses Unterkapitel soll die Auswahlmöglichkeit in Bezug auf die fixe und die variable KDS veranschaulichen. Es enthält lediglich eine Zusammenfassung der beiden vorherigen Unterkapitel.

Auch wenn die Investitionsentscheidung für eine fixe KDS in der Regel aus technischen Gründen getroffen wird, zahlt sich die Zusatzinvestition für die variable KDS schon allein durch die optimierte Kompensation und die geringeren Verluste aus. Die Vor- und Nachteile einer KDS sind in *Tabelle 5* und *Tabelle 6* aufgelistet. [21]

Fixe KDS	
Vorteile	Nachteile
weniger Blindleistungsbezug	zusätzliche Verluste durch die KDS
geringere Verluste	Investitionskosten
bessere Netzspannungskontrolle	
reduzierte Blindleistungsbelastung des Netzes	
einhalten der vertraglichen Blindleistungsbegrenzung	

Tabelle 5 Vor- und Nachteile der fixen KDS [21]

Variable KDS	
Vorteile	Nachteile
weiter reduzierter Blindleistungsbezug	höhere Investitionskosten
weiter reduzierte Verluste	
bessere Netzspannungskontrolle	
flexibilität bei Netzveränderungen	
einhalten der vertraglichen Blindleistungsbegrenzung	

Tabelle 6 Vor- und Nachteile der variablen KDS [21]

Die *Abbildung 17* zeigt, worauf die Anwender bei der Auswahl einer KDS achten. Es ist festzustellen, dass die fixe KDS für volatiles Verhalten nicht geeignet ist und hier die Wahl eher auf eine variable KDS fallen sollte.

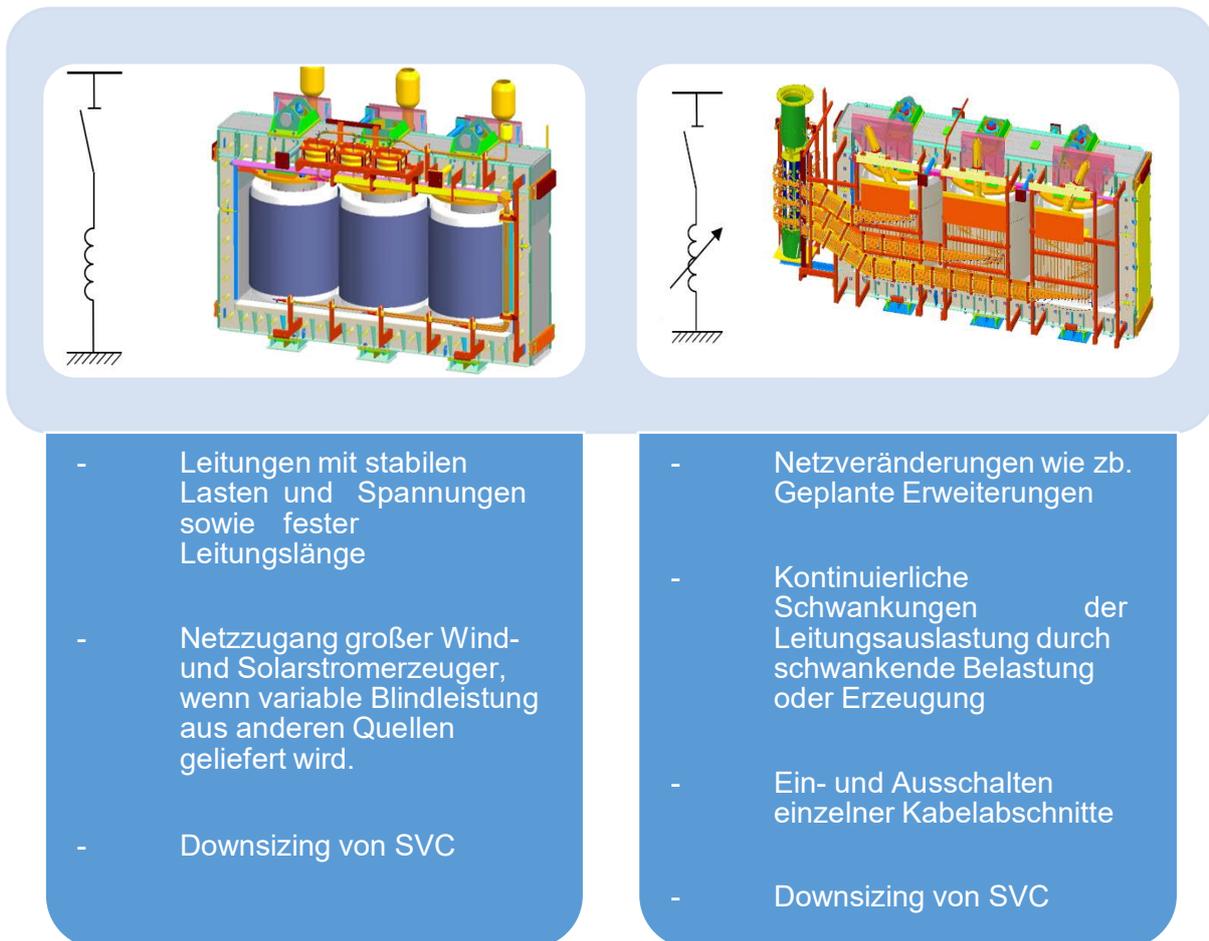


Abbildung 17 Entscheidungskriterien für die Investition in eine KDS [21]

3.2.5 Static Var Compensator

Der statische Blindleistungskompensator (SVC) ist ein Gerät, das Leistungselektronik zur Steuerung des Leistungsflusses in Stromnetzen verwendet. Der SVC reguliert die Spannung am Anschlusspunkt, indem die in das Stromnetz eingespeiste oder aus dem Netz aufgenommene Blindleistung gesteuert wird. Er ist ein Gerät zur automatischen Anpassung der Impedanz, das entwickelt wurde, um das System näher an den Leistungsfaktor heranzuführen.

Beim SVC ist die Kapazität immer zugeschaltet und die Blindleistung wird durch eine thyristorgesteuerte Drossel geregelt. [23]

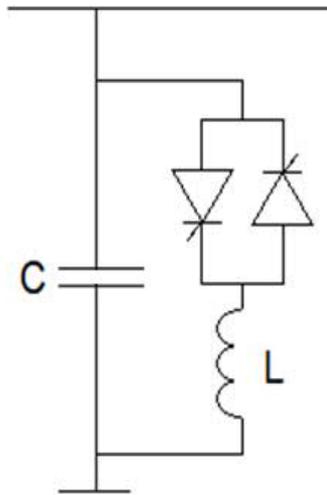


Abbildung 18 Struktur eines SVC [23]

3.3 Anwendungsbereiche der KDS

In der heutigen neuen Energielandschaft, die eine zunehmende Anzahl von dezentralen Stromerzeugern aufweist, was höhere Schwankungen der Netzeinspeisung mit sich bringt, haben sich die Anwendungsgebiete, insbesondere für variable KDS, deutlich erweitert:

- Kompensation von Spannungsschwankungen, die durch dezentrale Stromerzeugung (Netzanbindung von großen Windenergie- und Photovoltaikanlagen) verursacht werden
- Anbindung zukünftiger großer Energiespeichersysteme, die zu höheren Lasten beim Laden und Nutzen und während der Speicherdauer zu Leerlaufbedingungen auf den Versorgungsleitungen führen
- Adaption an topologische Veränderungen wie Netzerweiterung oder Umbau von Freileitungen auf Kabel

Darüber hinaus bieten variable KDS aufgrund der ständig wachsenden Bandbreite an Spannungs-/Leistungskombinationen die Möglichkeit, flexible Ersatzgeräte für mehrere Leistungsklassen gleichzeitig einzusetzen, was die Anzahl der Ersatzgeräte, die für einen Ersatzteilplan gelagert werden müssen, minimiert. [2]

4 Marktsituation

Ständiges Unternehmenswachstum ist ein kontinuierlicher Prozess, der sich positiv auf die Geschäftsentwicklung des Unternehmens auswirkt. Mit dem Ziel, Gewinne zu erwirtschaften, streben die Unternehmen ein Niveau an, um im Wettbewerbsumfeld konkurrenzfähiger zu werden. Zur Erreichung dieses Ziels ist es notwendig, die existierenden Produkte zu verbessern oder das Produktportfolio sogar, um neue Produkte zu erweitern. Aufgrund des großen Erfolges in der Produktion von KDS von Siemens LPT Weiz und zahlreicher bisheriger Erfahrungen, hat sich das Verteiltransformatorenwerk (Siemens LIDT) am gleichen Standort entschieden, das bestehende Produktportfolio um KDS für den Einsatz im Netz bis zu einem Spannungsniveau von 72,5 kV zu erweitern.

Aus diesem Grund gibt dieses Kapitel zunächst einen Überblick über die Marktsituation innerhalb des ENTSO-E-Raums. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an die Blindleistung beschrieben, die durch die Europäische Kommission mit der im Jahr 2019 in Kraft getretenen Verordnung (VERORDNUNG (EU) 2016/1388 DER KOMMISSION vom 17. August 2016 zur Festlegung eines Netzkodex für den Lastanschluss) eingeführt wurden. Sodann wird der Investitionsumfang für eine KDS anhand einer Beispielrechnung für eine Anlage abgeschätzt.

Das hier erläuterte Beispiel soll realitätsnahe Investitionskosten ermitteln, die auf den im Rahmen dieser Masterarbeit erforschten Werten basieren. Diese Daten sind in der *Tabelle 9* zusammengefasst und bieten eine ungefähre Kostenaufteilung einer regelbaren KDS.

Anschließend werden durch gezielte Datenerhebung und -analyse der potenzielle Markt, das Marktwachstum und der Einsatz von Kompensationsspulen in verschiedenen Bereichen verglichen.

Die Marktanalyse befasst sich mit dem aktuellen Marktprofil auf globaler Ebene. Die Grundlage für die Marktanalyse bilden Daten, die seitens Siemens in den vorherigen Jahren durch Anfragen gesammelt wurden.

4.1 Marktsituation innerhalb ENTSO-E

Dieses Unterkapitel zeigt anhand einer Forschungsarbeit mit dem Titel „Grundlagenforschung zur Blindleistungskompensation im österreichischen Übertragungsnetz“ [22], wie das Problem der Blindleistungskompensation aus Sicht der Energieversorgungsunternehmen im ENTSO-E-Raum geregelt wird. Die Studie dient im Wesentlichen als Einführung in den globalen Markt, der im *Kapitel 4.4* thematisiert wird.

Im Rahmen dieser Studie wurden die Mitglieder des ENTSO-E-Raums über die Regelung der Blindleistungskompensation befragt.

Wie in *Abbildung 19* zu sehen ist, kommt die Öldrosselausführung mit fast 80 % deutlich häufiger zum Einsatz als die Trockenausführung. Diese Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtkompensationsleistung. Dass hier hauptsächlich Öldrosseln eingesetzt werden, liegt daran, dass die Spannungsfestigkeit von Trockendrosseln für eine Spannungsreihe von max. 35 kV ausreicht.

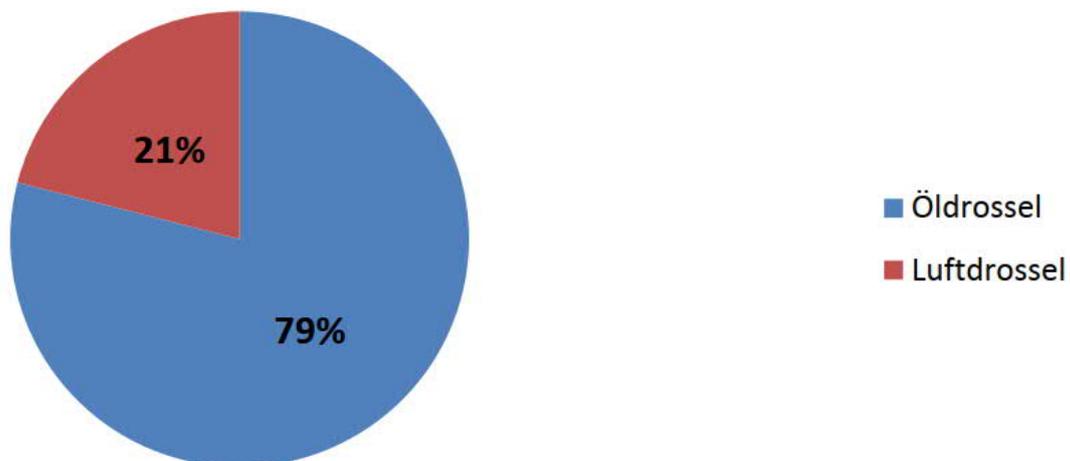


Abbildung 19 Einsatzverteilung zwischen Öl- und Luftkompensationsdrosselspulen [22]

Die *Abbildung 20* stellt die Aufteilung der KDS bei verschiedenen Spannungsniveaus dar. Wie erwähnt können bei Spannungsniveaus mit mehr als 35 kV nur Öldrosselspulen zu Kompensation verwendet werden

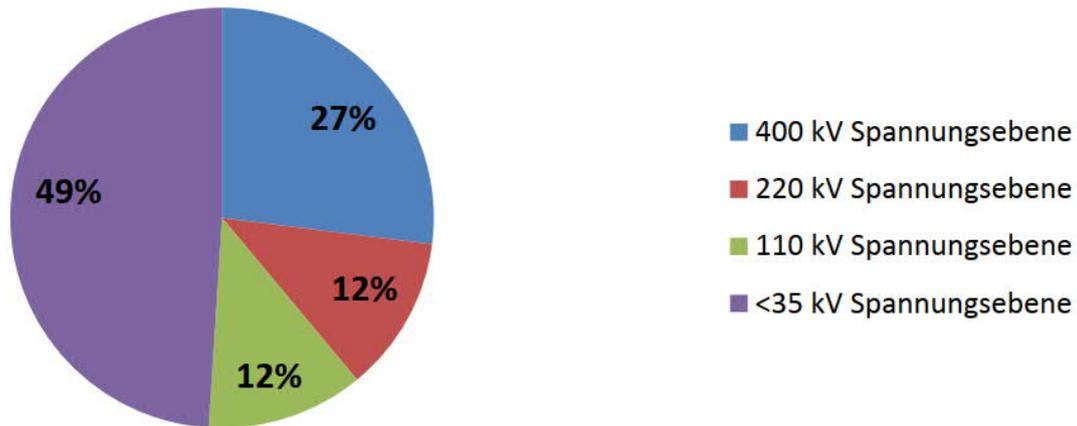


Abbildung 20 Kompensationsleistungsverteilung bei verschiedenen Spannungsebenen [22]

Die Kompensation von 49 % der kapazitiven Blindleistung für das Spannungsniveau unter 35 kV ist durch die Tatsache der Zuschaltung solcher KDS an die Tertiärwicklung von Transformatoren zu erklären.

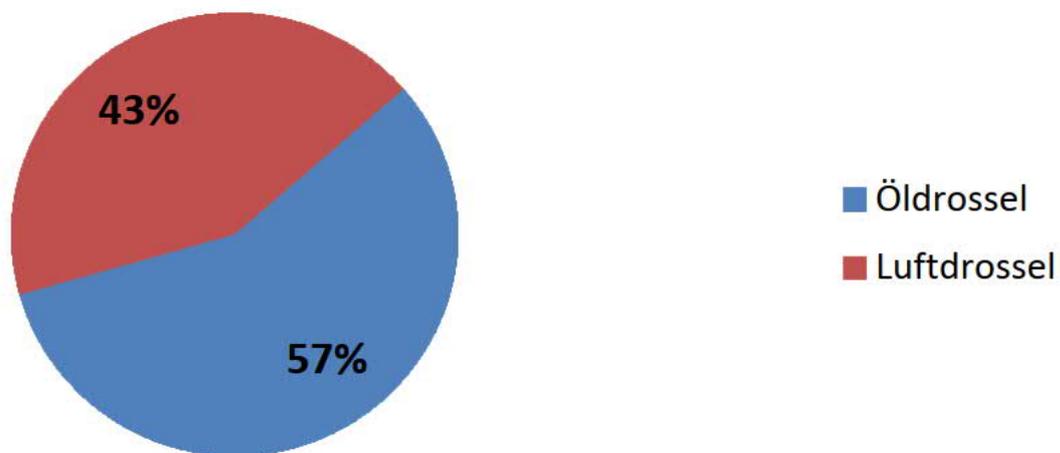


Abbildung 21 Kompensationsdrosselverteilung zwischen Öl- und Luftdrosselausführungen unter einem Spannungsniveau von 35 kV [22]

In *Abbildung 21* ist die Verteilung von Öl- und Luftdrosselspulen, die an Spannungsebenen unter 35 kV angeschlossen sind, dargestellt. Auf diesen Spannungsebenen dominiert die Öldrossel mit 57 %. [22]

4.2 Demand Connection Code, DCC

Die Anforderungen im Hinblick auf die Blindleistung sind in der am 07.09.2016 in Kraft tretenden Verordnung (EU) 2016/1388 zur Festlegung eines Netzkodex für den Lastanschluss (Demand Connection Code (DCC)) im Artikel 15 festgelegt. Der DCC ist seit dem 18.08.2019 verpflichtend anzuwenden und von allen in der Verordnung aufgeführten Dritten umzusetzen. Dabei geht es vor allem darum, faire Wettbewerbsbedingungen im Elektrizitätsbinnenmarkt zu schaffen. Die Systemsicherheit soll auch durch eine vermehrte Integration von erneuerbaren Energieträgern in das Stromnetz und die angemessene, transparente und nichtdiskriminierende Nutzung der Fähigkeiten der Verbrauchseinrichtungen und Verteilnetze durch die Netzbetreiber gewährleistet werden.

Die folgende Abbildung veranschaulicht die Implementierung der Meilensteine des Netzworkcodes für den Lastanschluss. Diese Anforderungen beziehen sich nur auf den EWR. [24]

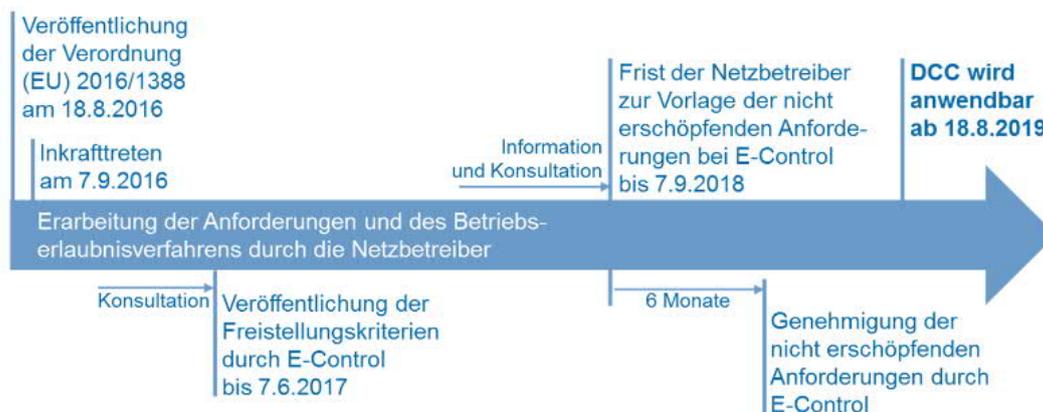


Abbildung 22 Meilensteine bei der Umsetzung des Netzcodes für den Lastanschluss [24]

4.2.1 Anforderungen hinsichtlich der Blindleistung

Nach Artikel 15 der Verordnung (EU) 2016/1388 sind Verbraucheranlagen und Verteilernetze mit Übertragungsnetzanschluss aufgefordert, unter den in der *Tabelle 7* aufgeführten Bedingungen einen stabilen Betrieb am Netzanschlusspunkt innerhalb des vom Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) vorgegebenen Blindleistungsbereichs zu gewährleisten. Teilen sich die Erzeuger- und die Verbrauchsanlage einen Netzanschlusspunkt, so sind gleichwertige Anforderungen an einem festgelegten Punkt zu erfüllen.

Der Blindleistungsbereich wird üblicherweise seitens des ÜNB anhand des Leistungsfaktors festgelegt, kann jedoch auch durch andere Maßeinheiten bestimmt werden.

Verbrauchsanlagen	Verteilernetze
<p>Der vorgegebene Bereich der Blindleistungsaufnahme und -abgabe, der vom ÜNB spezifiziert ist, darf nicht größer sein als 48 % – was einem Leistungsfaktor von 0,9 entspricht – der maximalen Bezugs- oder der maximalen Einspeisekapazität bei der Wirkleistungsaufnahme bzw. -abgabe, je nachdem, welcher Wert größer ist – es sei denn, es werden seitens des Eigentümers der Verbrauchsanlage technische oder finanzielle Vorteile nachgewiesen, sodass diese vom ÜNB angenommen werden.</p>	<p>Der vorgegebene Bereich der Blindleistungsaufnahme und -abgabe, der vom ÜNB spezifiziert ist, darf nicht größer sein als:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 48 % – was einem Leistungsfaktor von 0,9 entspricht – der maximalen Bezugs- oder der maximalen Einspeisekapazität bei der Blindleistungsaufnahme, je nachdem, welcher Wert größer ist; und • 48 % – was einem Leistungsfaktor von 0,9 entspricht – der maximalen Einspeise- oder der maximalen Bezugskapazität bei der Blindleistungseinspeisung, je nachdem, welcher Wert größer ist. <p>Es sei denn, es werden in einer gemeinsamen Analyse* (Der Umfang der Analyse wird zwischen dem Übertragungsnetz- und dem Verteilernetzbetreiber vereinbart, um die optimale Lösung für den Austausch von Blindleistung zu gewährleisten. Die Merkmale der zu betrachtenden Netze sind die Variabilität der Leistungsübertragung, bidirektionale Ströme und die Blindleistungskapazitäten des Verteilernetzes.) zwischen den Beteiligten technische oder finanzielle Vorteile nachgewiesen.</p>
	<p>Falls anwendbar, kann der ÜNB die Anforderung, dass Verteilernetze in der Lage sein müssen, am Netzanschlusspunkt keine Blindleistung einzuspeisen, wenn der Wirkleistungsfluss weniger als 25 % der maximalen Bezugskapazität beträgt, durch eine gemeinsame Analyse mit dem Verteilernetzbetreiber (VNB) begründen.</p>

	<p>Falls die Bestimmungen anhand der Analyse nicht ausreichend gerechtfertigt sind, so vereinbaren der ÜNB und der VNB die erforderlichen Bestimmungen auf der Grundlage der Analyseergebnisse.</p>
	<p>Unbeschadet von Punkt 1 kann der ÜNB mit dem VNB vereinbaren, dass der VNB den Blindleistungsaustausch im Interesse des gesamten Netzes aktiv regelt, um ein angemessenes Maß an Versorgungssicherheit für beide Parteien zu gewährleisten. Dazu gehört auch ein Zeitplan für die Erfüllung der Anforderungen. Demzufolge kann der VNB vom ÜNB verlangen, dass dieser sein Verteilnetz für das Blindleistungsmanagement berücksichtigt.</p>

Tabelle 7 DCC für die Verbrauchsanlagen und Verteilnetze [24]

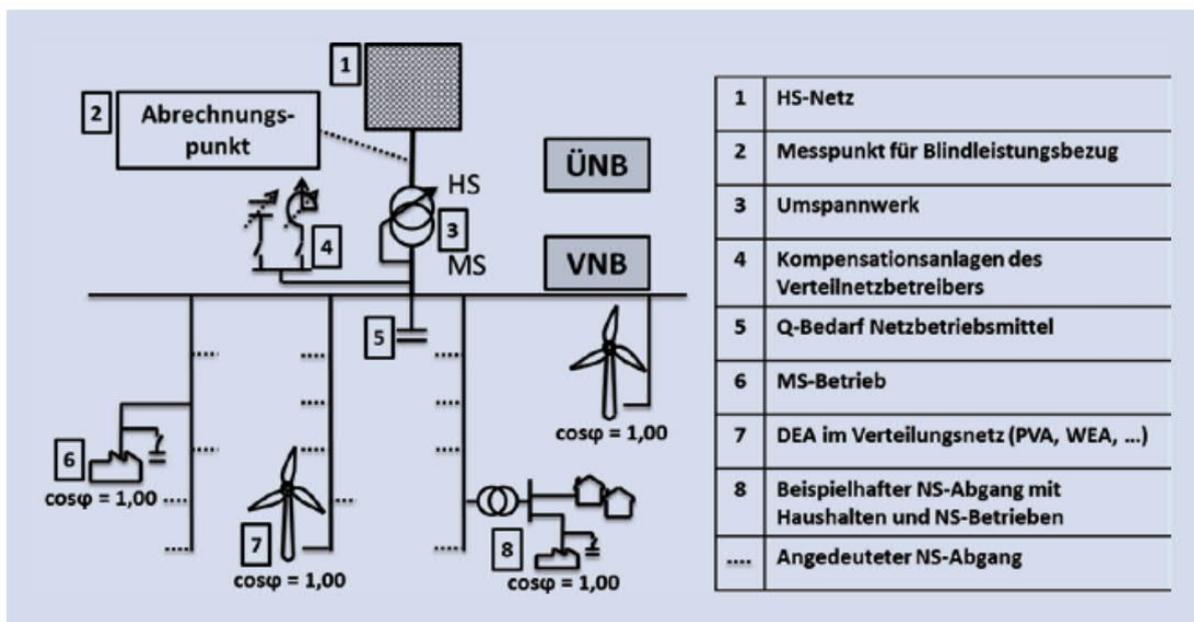


Abbildung 23 Beispielhafter Abrechnungspunkt zwischen ÜNB und VNB [11]

Mit diesen Erkenntnissen sowie mit der nachfolgenden Berechnung soll ein Einblick in das in diesem Kapitel beschriebene Marktpotenzial durch die Abschätzung der Blindleistungserzeugung gegeben werden. Für die anschließende Ermittlung wurden aus bereits vorhandenen

Untersuchungen im Rahmen einer existierenden Diplomarbeit zum Thema „Blindleistungsoptimierung an der Übergabestelle ÜNB/VNB“ [25] die Leitungslängen von Mittelspannungsnetzen übernommen. Dabei handelt es sich um Werte aus einem österreichischen Verteilnetz, die als Längen des Nord- und Südnetzes angeführt wurden. Auf der Grundlage der gewonnenen Kenntnisse wird der nördliche Teil des Netzgebietes meist mit 30 kV und der Südteil mit 20 kV betrieben. Die Leitungsdaten einschließlich der berechneten Blindleistungserzeugung sind in der *Tabelle 8* zusammengefasst.

	Leitungstyp	Systemlänge	Blindleistungserzeugung
		km	MVAr
Norden	30 kV-Freileitung	1258	3,8
	30 kV-Kabel	1640	139,1
Süden	20 kV-Freileitung	2242	3
	20 kV-Kabel	2460	92,7

Tabelle 8 Durch Leitungskapazitäten generierte Blindleistung [25]

Mit der Formel 18 ist es möglich, die generierte Blindleistung zu bestimmen, die durch die Leitungskapazitäten verursacht wird.

$$Q = l \cdot C' \cdot \omega \cdot U^2, \text{ wobei } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (18)$$

Beim Mittelspannungskabel ist ein Kapazitätsbelag von $C' = 300 \text{ nF/km}$ und für die Mittelspannungsfreileitungen ein Kapazitätsbelag von $C' = 10,8 \text{ nF/km}$ für die Berechnung abgeschätzt worden. Aus den Berechnungen in *Tabelle 8* wird deutlich, warum KDS in Mittelspannungsnetzen bei Netzabschnitten, in denen Kabel zum Einsatz kommen, eingesetzt werden. [25]

4.3 Investitionskosten der KDS

Während insbesondere die Beschaffung von fixen KDS von technischen Anforderungen bestimmt wird, steigern diese Anlagen stets die Effizienz. Im Vergleich zum Betrieb ohne KDS ist der Bedarf an Blindleistung von Dritten, die möglicherweise Gebühren verursacht, geringer.

Der Blindleistungstransport kann ebenfalls minimiert werden, was die Leitungsverluste reduziert und die Wirkleistung der Leitungen erhöht.

Die Anschaffung einer variablen KDS kann in vielen Fällen die Kosten für den Betreiber noch weiter senken. Zahlreiche Vorteile sorgen für eine schnelle Amortisation der höheren Investitionskosten:

- Der Bezug von Blindleistung seitens des Betreibers wird weiter reduziert.
- Reduzierung der Verluste von Leitungen und angeschlossenen Geräten
- niedrigere durchschnittliche Verluste des variablen KDS im Vergleich zur fixen KDS
- Möglichkeit, flexibel auf sich ändernde Netzbedingungen zu reagieren [2]

4.3.1 Beispielrechnung

In der folgenden exemplarischen Investitionsaufstellung werden in Anlehnung an eine dena-Studie, die sich mit dem Thema der verschiedenen Blindleistungsbereitstellungsoptionen [26] befasst, sowie aufgrund eigener Untersuchungen die Anschaffungskosten für die KDS sowie die Netzanschluss-, Instandhaltungs- und die Verlustkosten der Anlage untersucht.

In Abhängigkeit von den Kundenanforderungen oder der jeweiligen Netzsituation muss die KDS optimal in die Struktur des bestehenden Netzes integrierbar sein, wodurch die Kosten sehr unterschiedlich sein können. Zusätzlich zur optimalen Ausführung für die Netzstruktur ist auch auf die geographische Lage des Installationsortes zu achten, wo beispielsweise aufgrund der Umgebungstemperatur die Investitionskosten stark schwanken können.

Auf Basis eigener Untersuchungen betragen die Anschaffungskosten für KDS für den Einsatz auf Spannungsebenen unter 72,5 kV und bei einer Leistung von weniger als 25 MVar ca. 11 €/kVar bis 55 €/kVar, was auch durch die oben genannte Studie bestätigt werden kann.

Die Netzanschlusskosten variieren stark und sind je nach Installationsort erheblich hoch. Grundsätzlich können drei verschiedene Installationsvarianten für die Installation des KDS in Betracht gezogen werden:

- dichtbesiedelte Region
- dünnbesiedelte Region
- bestehendes Umspannwerk

Zu einem könnte die KDS in einem dicht besiedelten Gebiet untergebracht werden, wo neben allen technischen Anforderungen auch Wert auf die Geräuschemissionen gelegt werden

müsste, was die Installation weiter verteuert. Darüber hinaus können Kosten für Konstruktionen im Hinblick auf den Aufstellungsort der KDS entstehen.

Wird die KDS für die Spannungshaltung aufgrund von mit Kabeln verbundenen Fernlasten eingesetzt, könnte der zweite denkbare Installationsort ein ländliches Gebiet sein, in dem die Lärmemissionen in der Regel unbedeutend sind, sodass eine Umzäunung ausreichen würde.

Eine dritte Möglichkeit ist die Installation in einem bestehenden Umspannwerk. Bei dieser Variante fallen – wenn alle wesentlichen Komponenten vorhanden sind – die geringsten Kosten an.

Die Kosten für den Anschluss der Kompensationsspulen im Mittelspannungsbereich beinhalten laut der dena-Studie Folgendes:

- Abgangsfeld,
- Leitungsschutzschalter,
- Anschlusskabel,
- Spulenschaltung (RC-Glied),
- Schutztechnik,
- Fernwirktechnik und
- Regelungstechnik im Falle einer regelbaren Ausführung.

Die Lebensdauer der KDS wird auf ca. 35 bis 40 Jahre ausgelegt. Die für die Anlage anfallenden Instandhaltungskosten, die sich auf Kosten für die regelmäßige Inspektion, Störungsbehebungen, kleinere Reparaturen, Umbaumaßnahmen und ggf. Wartung der Laststufenschalten aufteilen, können auf 0,3 % der Investitionskosten geschätzt werden.

Die Verlustkosten variieren auch je nach verwendetem Material bei der Aktiviteilausführung. Nach eigenen Untersuchungen liegen die Verluste in einem Bereich von ca. 2 W/kVAr bis ca. 11 W/kVAr. Der Durchschnitt wird jedoch auf 6 W/kVAr aufgerundet, was mit den Ergebnissen der dena-Studie ungefähr übereinstimmt. Um die Kosten der durch die KDS verursachten Verluste zu ermitteln, wird hier der mittlere Preis von 3,6 ct/kWh verwendet, der auf den Untersuchungen der Studie für das Jahr 2016 basiert.

Eine Kostenaufstellung für eine Musterdrossel mit einer Blindleistung von 25 MVar und einem OLTC könnte wie in *Tabelle 9* aussehen:

Kostenfaktor	Betrag	Annahmen
Anschaffungskosten für eine 25 MVar-KDS mit OLTC	400.000 € (einmalig)	im mitteleuropäischen Raum einsetzbar
Netzanschlusskosten	150.000 € (einmalig)	Installation im bestehenden Umspannwerk
Instandhaltungskosten	2.000 € / Jahr	ca. 0,5 % des Investitionspreises
Durch KDS generierte Verlustkosten (ca. 3 W/kVar)	ca. 2000 € / monatlich	Mittelpreis von 3,6 ct/kWh beim Ganzjahreseinsatz

Tabelle 9 Übersichtsdarstellung der Investition in eine variable KDS

Die Anschaffungskosten einer variablen KDS sind im Vergleich zu einer fixen geringfügig höher. In der Anwendung bringt sie jedoch nur Vorteile. Die niedrigeren Verluste der Einheit sowie der geringere Blindstrombezug gleichen den höheren Preis schnell aus. Empfehlenswert ist die variable KDS insbesondere bei fluktuierender Erzeugung, z. B. von erneuerbaren Energieträgern. [26]

Zusammenfassend kann man sagen, dass bei konstanten Netzbedingungen die fixe KDS die wirtschaftlichste Lösung darstellt. Bei hohen Netzschwankungen und zukünftigen Netzausbauten ist hingegen die variable KDS die bessere Lösung. Der Nachteil der fixen KDS liegt darin, dass diese überkompensieren könnte, wodurch sich ein unerwünschter weiterer Spannungsabfall und ein zusätzlicher induktiver Blindleistungstransport durch die Leitung ergeben würde. Variable KDS können im Unterschied dazu an die jeweilige Lastsituation angepasst und so immer exakt nachgeregelt werden.

4.4 Globale Marktanalyse

In diesem Kapitel wird ein Überblick über das internationale Nachfrageverhalten im Hinblick auf die KDS zwischen den Jahren 2008 und 2019 gegeben. Die hier vorgestellten Ergebnisse resultieren aus zahlreichen Anfragen nach KDS, die an Siemens gerichtet wurden, und sind in der vorliegenden Masterarbeit berücksichtigt.

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird dabei nicht auf individuelle Anfragen eingegangen bzw. es werden nur sehr allgemeine Auskünfte gegeben. Mit den nachfolgenden Zahlen soll ein Überblick über die Nachfrage nach KDS im globalen Markt gegeben werden, wobei auch eine Prognose für das Nachfragewachstum der kommenden Jahre erstellt wird.

Die Analyse des globalen Marktes wird in verschiedenen Regionen durchgeführt. Diese werden nach geografischer Lage festgelegt. Um die Transparenz der einzelnen Regionen zu erhöhen, ist der europäische Raum aufgrund des höchsten Nachfragebedarfs in vier Regionen aufgeteilt worden. Im Rahmen dieses Unterkapitels wurden auch die Verbrauchernutzung sowie das Marktwachstum für die KDS analysiert. Die Auswertung und die Analyse der Ergebnisse wurden mit dem online verfügbaren Programm Tableau Public 2019.3 analysiert und ausgewertet.

Auf der Karte des globalen Nachfrageverhaltens in *Abbildung 24* kann eingesehen werden, dass die Nachfrage nach KDS in sämtlichen Weltregionen stark ausgeprägt ist. Hier wurde versucht, mit drei verschiedenen Farben nicht nur die Verteilung der Anfragen, sondern auch ihr Ausmaß zu repräsentieren, wobei der geringe Bedarf (gelb) eine Anfragemenge von kleiner als 5 % des gesamten Volumens der Anfragen im Zeitraum zwischen 2008 und 2019 darstellt. Die jeweiligen Länder, die mit Lila gefärbt sind, was einen mittleren Bedarf kennzeichnet, stehen für zwischen 5 und 50 % der Anfragen bezogen auf das gesamte Volumen. Folgerichtig machen in den blau eingefärbten Ländern die Anfragen mehr als die Hälfte des gesamten Volumens aus. Wie zu erwarten war, stellt sich in Afrika und in Südamerika, wo sich die meisten Länder noch in der Entwicklungsphase befinden, keine große Nachfrage dar, wobei es hier einzelne Ausreißer aufgrund von Großprojekten gibt, die in manchen Jahren durchgeführt wurden. In den restlichen Regionen ist die Verteilung der Anfragen über die ganze Region gegeben.

In Europa weisen manche Länder – zum Beispiel Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Schweden – ein immenses Marktpotenzial auf, da dort in den vergangenen Jahren die Nachfrage im Vergleich zu den anderen europäischen Ländern relativ stark anstieg. Auch in Nordamerika und in Australien zeigt sich eine zunehmende Nachfrage nach KDS.

Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang die Länder des Nahen Ostens. In dieser Region haben sich das Netzwerk und die Infrastruktur in den letzten Jahren stark entwickelt. Die Länder Irak, Jordanien und Vereinigte Arabische Emirate haben einen hohen Bedarf an

KDS. Die Erklärung für das Nachfrageverhalten der übrigen Teils Asiens könnte nach persönlicher Annahme im Bedarf nach KDS aufgrund von größeren Schwachlastzeiten liegen.

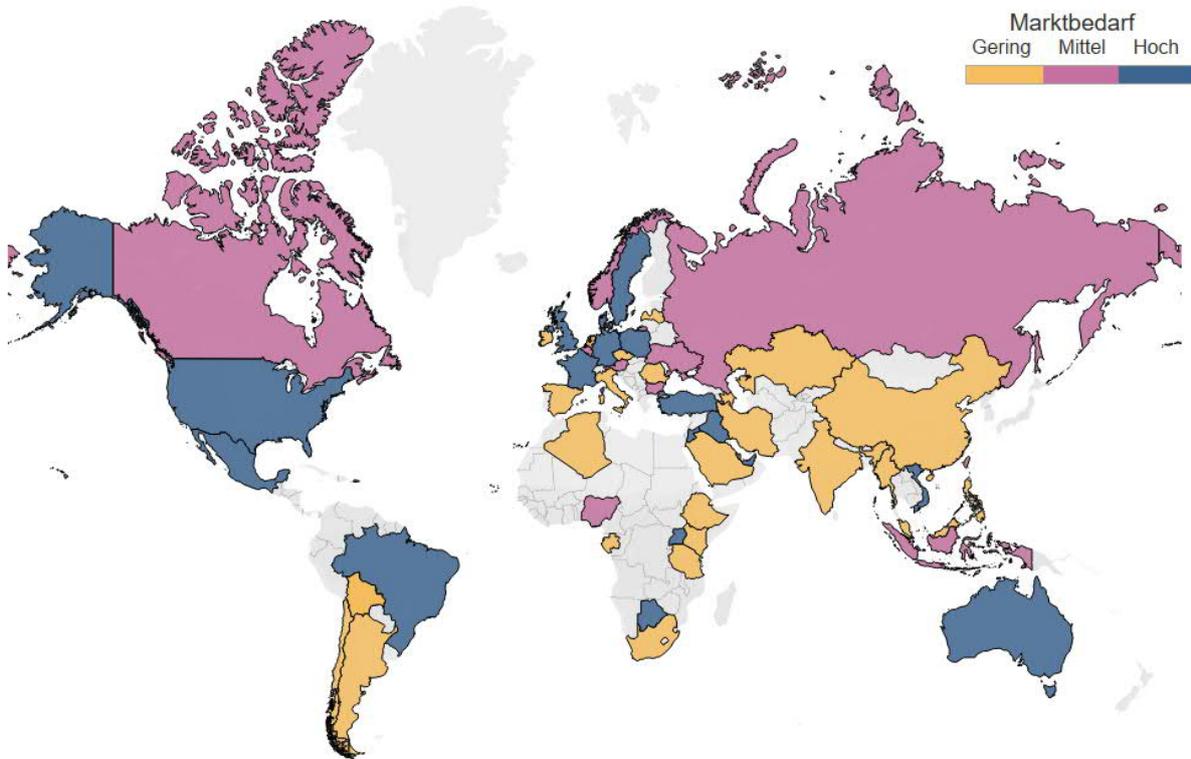


Abbildung 24 Globales Anfrageverhalten für KDS im Zeitraum von 2008 bis 2019

Des Weiteren wird in *Abbildung 25* die Aufteilung nach Einsatzbereichen in den jeweiligen Regionen veranschaulicht. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass ca. jede vierte Anfrage aus dem mitteleuropäischen Raum kommt. Die Energieversorgungsunternehmen sind in nahezu jeder Region die dominierende Gruppe. Mit knapp über 65 % werden die KDS von den EVUs am häufigsten angefragt. Anzumerken ist außerdem, dass sich im nordeuropäischen Raum die Blindleistungskompensation im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien am

stärksten durchsetzt. Dieses Phänomen könnte durch die großen Offshore-Windparks erklärt werden.

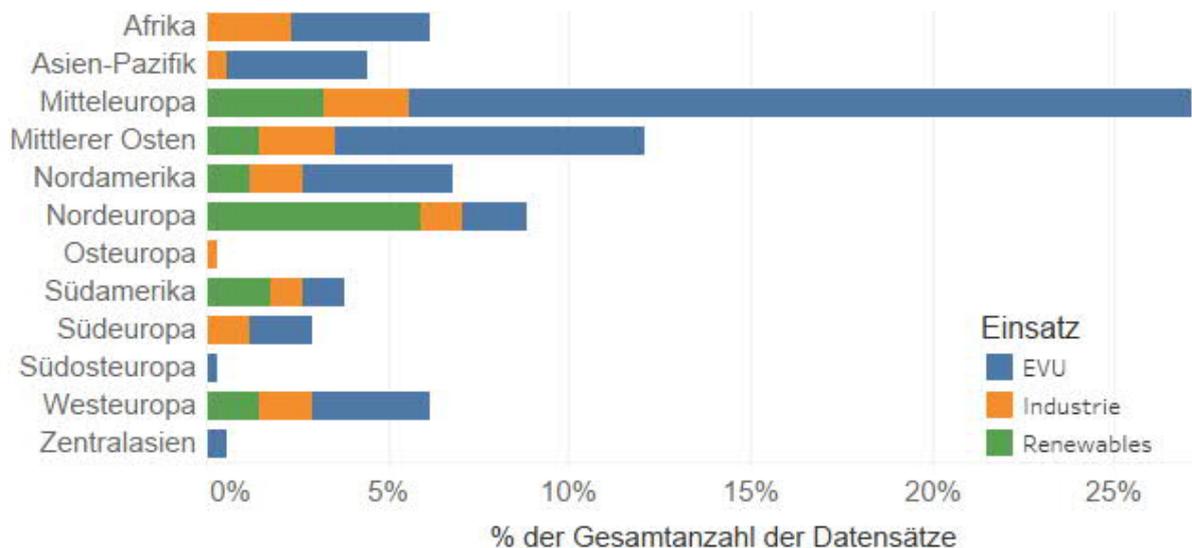


Abbildung 25 Anfrageverhalten in verschiedenen Regionen hinsichtlich des Einsatzbereichs

Abbildung 26 zeigt, wie sich das Anfragevolumen im Betrachtungszeitraum verteilt. Bei den meisten Regionen hat sich der Trend der Anfragen ins Positive entwickelt, jedoch ist auch zu sehen, dass in einigen Regionen nur eine Anfrage in einem Jahr gestellt wurde.

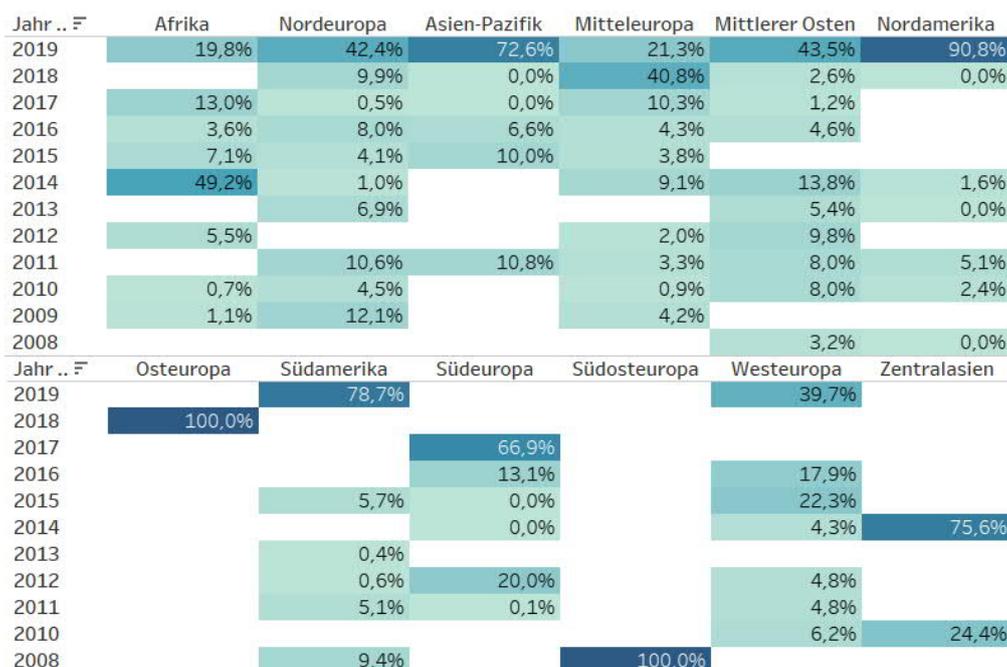


Abbildung 26 Anfrageentwicklung für KDS im Zeitraum von 2008 bis 2019

Die *Abbildung 27* gestattet detailliertere Einblicke in den Bedarf der europäischen Länder. Wie hier zu sehen ist, ist bei österreichischen EVUs und anderen Industrien ebenfalls ein Bedarf an KDS vorhanden.

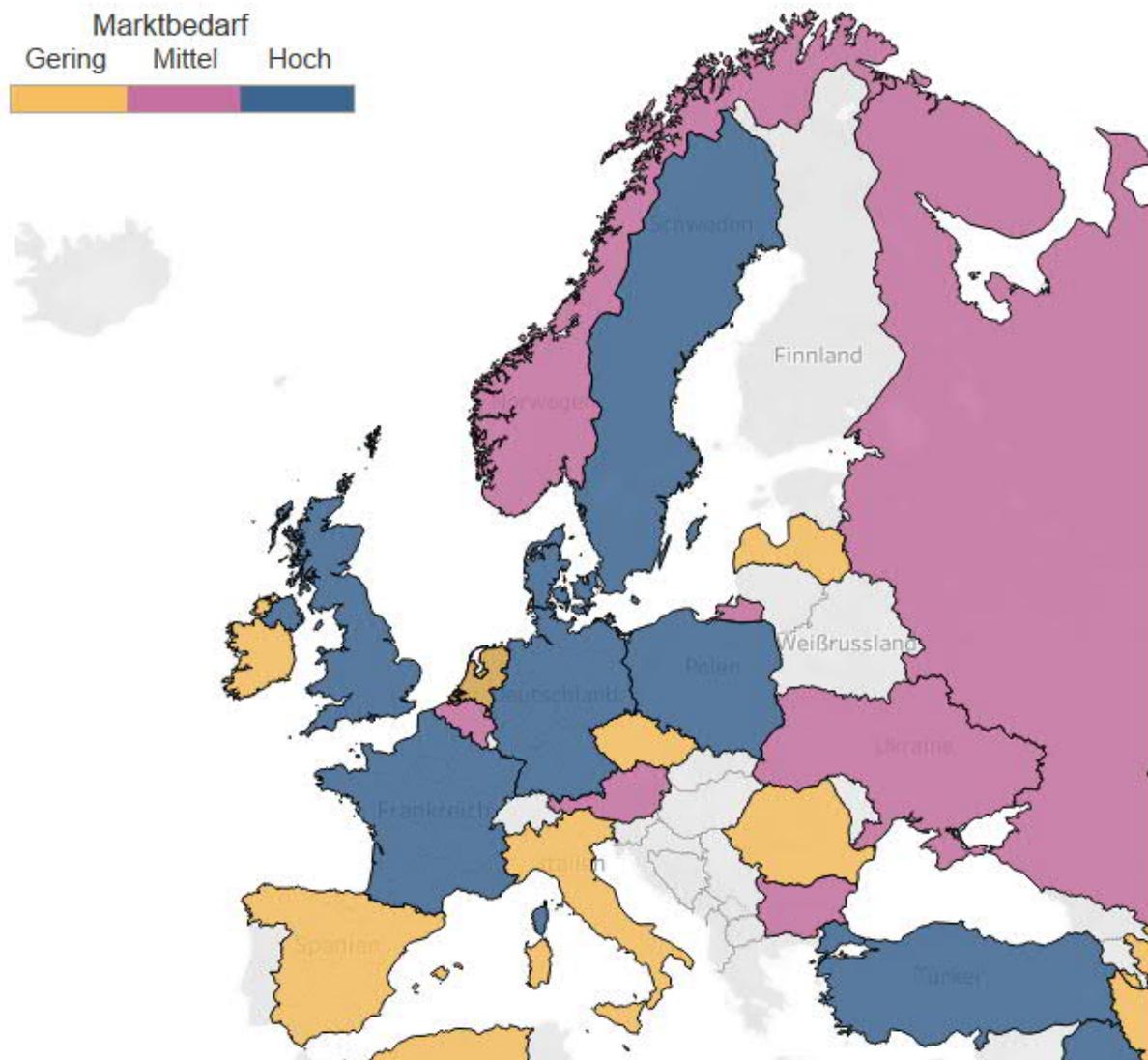


Abbildung 27 Anfrageverteilung für KDS im Europäischen Raum

Die Regierungen in sämtlichen Regionen, die danach streben, den Zugang zum Strom für alle zugänglich zu machen, schaffen eine Nachfrage nach KDS. So beabsichtigt beispielsweise das US-Energieministerium (2017-40), den Zugang zu Energie zu erweitern und eine kostengünstige, zuverlässige, nachhaltige und moderne Energieversorgung für alle bereitzustellen.

„... global energy needs rise more slowly than in the past but still expand by 30% between today and 2040. This is the equivalent of adding another China and India to today’s global demand.“ [27]

Als Ergebnis solcher Initiativen kommt es zur Netzerweiterungen, die zu einer höheren Nachfrage nach KDS führen, da diese als kostengünstige und nachhaltige Lösung für die Kompensation der kapazitiven Blindleistung dienen. [28]



Abbildung 28 Prognosemodell für die Anzahl der Anfragen nach KDS bis 2022

Die Internationale Energieagentur schätzt, dass nahezu 1,3 Milliarden Menschen in den Entwicklungsländern noch immer keinen Stromzugang haben. Es wird erwartet, dass die Energienachfrage auf den Nicht-OECD-Märkten (Organisation for Economic Co-operation and Development) bis 2035 mehr als dreimal so schnell wachsen wird wie in den Industrieländern, was zu rascheren Investitionen in die Strominfrastruktur führt. Laut der Emerging Markets Private Equity Association (EMPEA) werden für die Jahre 2017–2035 insgesamt 10,2 Milliarden US-Dollar in die Strominfrastruktur der Schwellenländer investiert werden. [28]

Wie in *Abbildung 28* zu sehen ist, bekräftigen diese Zahlen das Wachstum der KDS, da diese eine wichtige Komponente bei der effizienten Energieübertragung darstellen. Das Prognosemodell basiert auf einer additiven Berechnung mit einem Vorhersageintervall von 75 %. In einem additiven Modell ist die kombinierte Wirkung mehrerer unabhängiger Faktoren die Summe der einzelnen Effekte jedes Faktors. Die Daten wurden für den Trend der additiven

Eigenschaften und die Saisonalität der additiven Eigenschaften ausgewertet. Im Vorhersagebereich sind das obere und untere Vorhersageintervall, in dem die Zahlen tatsächlich liegen können, gelb schattiert.

Die aussichtsreiche Zukunft der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen wird auch dadurch bestätigt, dass bis 2040 zwei Drittel der weltweiten Investitionen in Kraftwerke aus erneuerbaren Energiequellen stammen werden, die für viele Länder zur kostengünstigsten Stromquelle werden.

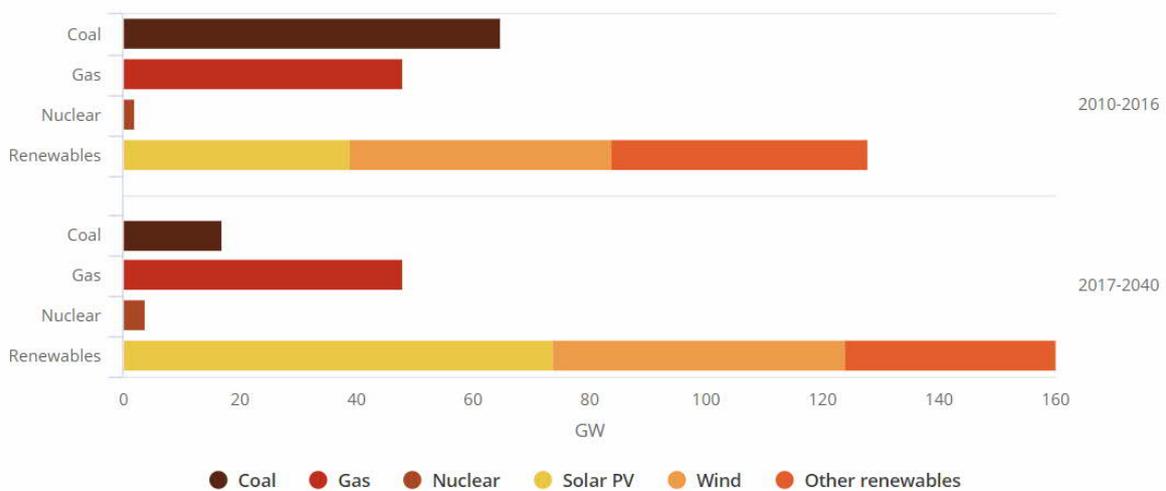


Abbildung 29 Globaler Jahresdurchschnitt der Nettokapazitätserweiterungen nach Typen [27]

Der aus erneuerbaren Energiequellen (Wind, Photovoltaik) erzeugte Strom, der über Stromleitungen verteilt wird, führt im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung zu höheren Leistungsverlusten und unvorhersehbarer Wirkleistung. Die KDS, die Blindleistung absorbieren kann, wird somit für elektrische Versorgungs- und industrielle Unternehmen unerlässlich werden, um eine unterbrechungsfreie und stabile Stromversorgung von Wohnungen, Büros und anderen Einrichtungen zu gewährleisten. [28]

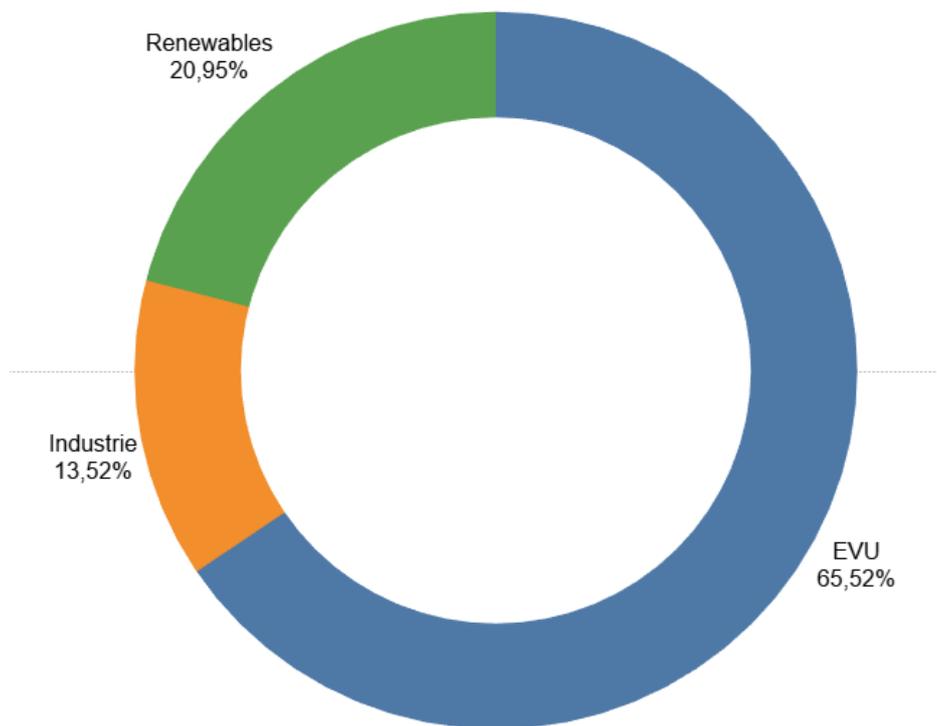


Abbildung 30 Anfragevolumen bei verschiedenen Anwendungsarten

Die aus Windkraftanlagen gewonnene Energie wird aufgrund des starken Wachstums sowohl an Land als auch auf dem Meer schon kurz nach 2030 zur führenden Stromproduktionsquelle werden. In der Politik werden erneuerbare Energien nach wie vor auf internationaler Ebene unterstützt – zunehmend auch durch wettbewerbsorientierte Auktionen anstatt durch Einspeisetarife – und der Wandel des Stromsektors wird durch Millionen von Haushalten, Gemeinden und Unternehmen verstärkt, die direkt in dezentrale Solaranlagen investieren. [27]

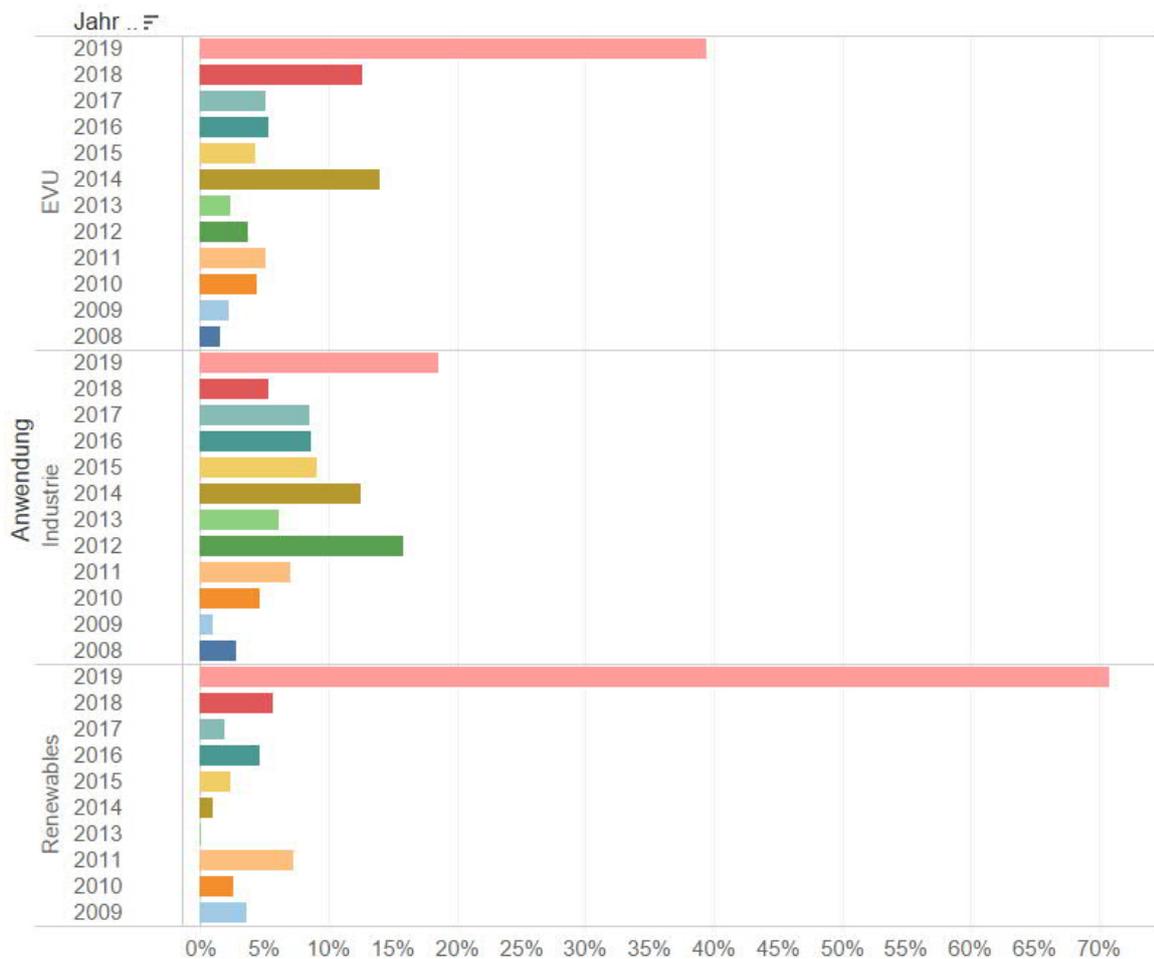


Abbildung 31 Anfrageentwicklung der verschiedenen Einsatzbereiche

Auf der Grundlage dieser Fakten verwundert es nicht, dass die Anfragen für die KDS im Zusammenhang mit erneuerbaren Energiequellen am stärksten zugenommen haben, wie in der *Abbildung 31* zu sehen ist.

5 Konstruktion und Designparameter der KDS

In diesem Kapitel wird die Konstruktion der KDS im Zuge der Angebotsphase behandelt. Dabei werden zunächst nur die wichtigsten Designparameter für die Auslegung dargestellt und erläutert. Aufgrund des Entwurfs in der Preengineeringphase werden im Folgenden lediglich die für die Angebotsphase relevanten Parameter behandelt. Nach der Festlegung der Parameter wird die KDS mit Hilfe des Siemens LPT-Berechnungsprogramms ausgelegt. Um die korrekten Produktionszeiten und -kosten zu ermitteln, wird die KDS mittels des Siemens LIDT-Programms zur Berechnung der Transformatoren nachgebildet. Die zur Simulation erforderlichen Vorgehensweisen werden hier beschrieben.

5.1 Designparameter

Im Folgenden sind die Designparameter aufgelistet, die vom Kunden zur Verfügung gestellt werden müssen, um eine KDS für die Angebotsphase zu konstruieren. Auf dem Leistungsschild, das in *Abbildung 32* dargestellt ist, sind die für die Auslegung wichtigsten Nenndaten zu entnehmen. Mithilfe dieser wenigen Vorgaben kann eine Gesamtlösung angeboten werden. Allerdings kann die technische Dokumentation zu weiteren Anforderungen führen, die einen großen Einfluss auf das Konstruktionskonzept in Verbindung mit dem Preis haben.

3 Phasen Kompensationsdrossel für Außenanwendung								
Typ	TMQ-204A03S9K-TU	F.Nr.	1 808 317	Bj.	2019	Vorschrift	IEC 60076-6	
Schaltgruppe	YN	Isolierflüssigkeit	NYNAS Nytro Taurus					
Max. Ölüber Temperatur	K	60	Aushebbarer-Teil	kg	11260	Öl	kg	5800
Max. Wicklungsüber Temperatur	K	65	Gesamtgewicht	kg	22400			
Blindleistung	kVA	20000	Kühlung	ONAN	Frequenz	Hz	50	
Bemessungsspannung	V	34000	Isolationspegel	LI 170 // AC 70	Um	kV	36	
Bemessungsstrom	A	339,62	Impedanz bei Bemessungsdauerstrom	X	Ω			
Blindleistung	kVA	28800	Kühlung	ONAF	Frequenz	Hz	50	
Nennspannung	V	40800	Isolationspegel	LI 170 // AC 70	Um	kV	36	
Bemessungsstrom	A	407,54	Impedanz bei Bemessungsdauerstrom	X	Ω			

Abbildung 32 Leistungsschild der Prototyp-KDS [19]

An diesem Leistungsschild ist im oberen Bereich erkenntlich, dass es sich hier um eine 3-phasige KDS, die nach der IEC 60076-6 gebaut wurde, handelt. Weiterhin ist die Schaltgruppe YN zu erkennen, was auf eine parallele Anbindung mit dem Netz und nicht mit der Tertiärwicklung eines Transformators schließen lässt. Die nach der IEC-Norm maximal zulässigen Temperaturwertgrenzen sind ebenfalls aufzufinden. Diese werden im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert. Außerdem ist das errechnete Gewicht der Gesamtanlage sowie auch der Isolierflüssigkeit angegeben.

Der untere Teil des Leistungsschilds teilt sich wiederum in zwei Bereiche auf. Dies hat den Grund, dass bei der Prototyp-Ausführung eine ONAN/ONAF-Kühlung (Oil Natural Air Natural/ Oil Natural Air Forced) in Verbindung mit einem Wellwandkessel durchgeführt wurde. Durch diese Kühlungsart ist die KDS imstande, höheren Beanspruchungen standhalten zu können. Wie hier zu sehen ist, kann die Blindleistung um einen Faktor 1,44 erhöht werden. Die mit der Erhöhung der Blindleistung anfallenden Verluste können durch die Lüfter, die bei der ONAF Kühlung verwendet werden, abgeführt werden. Weiterhin ist zu sehen, dass die Nennspannung um 20 % höher als die Bemessungsspannung liegt, was auf die Möglichkeit der Übererregung der KDS hindeutet. Die Isolationspegel und die Spannungsreihe, für die die KDS ausgelegt ist, richten sich nach der IEC-Norm. Die Frequenz bleibt bei beiden Ausführungsarten unverändert.

Im weiteren Verlauf wird auf einige Parameter, die im Leistungsschild aufgeführt sind, detaillierter eingegangen.

5.1.1 Schaltgruppe

Der Anschluss der Wicklungen einer Dreiphasen-KDS kann sowohl im Stern – was die häufigste Ausführungsart ist – als auch im Dreieck erfolgen. [29] Wie aus dem Leistungsschild zu entnehmen ist, wurde bei den Prototypen die Wicklung im Stern geschaltet. Der Buchstabe N bedeutet, dass der Sternpunkt der Wicklung ausgeführt ist.

5.1.2 Maximale Temperatur

Für die KDS gilt – wie für die Transformatoren – nach der IEC-Vorschrift [20] die nachfolgende Tabelle, die die maximal zulässigen Dauertemperaturen beschreibt. Die in *Tabelle 10* angegebenen Grenzwerte für die Erwärmung gelten für eine Feststoffisolierung, die nach IEC 60085 als Klasse 105 °C bezeichnet wird und in ein Mineralöl oder eine synthetische Flüssigkeit eingetaucht ist.

Anforderungen an	Grenzwerte für die Erwärmung in K
Isolierflüssigkeit oben	60
mittlere Wicklung (bestimmt durch Widerstandsmessung):	
– ON...- und OF...-Kühlung	65
– OD...-Kühlung	70
Heißpunkt der Wicklung	78

Tabelle 10 Zulässige Übertemperaturen für KDS nach IEC [30]

Die zulässigen Grenztemperaturen der Wicklung bzw. des Öls können bei einer Umgebungstemperatur von 40°C wie folgt berechnet werden:

Zulässige Grenztemperatur der Wicklung:

$$\vartheta_W = 40^\circ\text{C} + 65\text{K} = 105^\circ\text{C} \quad (19)$$

Zulässige Grenztemperatur des Öls:

$$\vartheta_{\text{öl}} = 40^{\circ}\text{C} + 60\text{K} = 100^{\circ}\text{C} \quad (20)$$

5.1.3 Definition von Blindleistung, Bemessungsspannung, Bemessungsstrom, Frequenz und Isolationspegel

Die am Leistungsschild angegebene Blindleistung ist jene Leistung, die vom Verbraucher spezifiziert wird. Sie dient als Grundlage für die Auslegung der KDS und muss vom Hersteller garantiert werden. Die Blindleistung errechnet sich – wie schon im *Kapitel 2.1* beschrieben – mit folgender Formel:

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (21)$$

Die Bemessungsspannung ist der Bemessungswert der Spannung, die der Hersteller der KDS zuweist und auf die sich die Betriebs- und Leistungsmerkmale beziehen. Bemessungsstrom ist der Stromwert, der durch die jeweilige Leistung der KDS festgelegt wird.

Die Isolationspegel, die aus der gültigen IEC 60076 entnommen werden können, sind ein Satz spezifizierter Stehspannungen, die die Spannungsfestigkeit der Isolierung charakterisieren. [31]

5.1.4 Kühlung

Wie in jeder elektrischen Maschine entstehen auch in KDS Verluste, die zu einer Erwärmung der Wicklungen und des Eisengestells führen. Diese müssen auf irgendeine Weise von der KDS an die Umgebung abgegeben werden. In der Regel unterscheiden sich die gängigsten Kühlarten nicht von denen der Transformatoren, da der Kessel für beide Maschinen im Prinzip gleich ist. Im Folgenden werden die Arten der Kühlung nach IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [32] beschrieben. Beim Prototyp-Modell handelt es sich, wie auf dem Leistungsschild zu erkennen ist, um ein ONAN/ONAF-Kühlsystem.

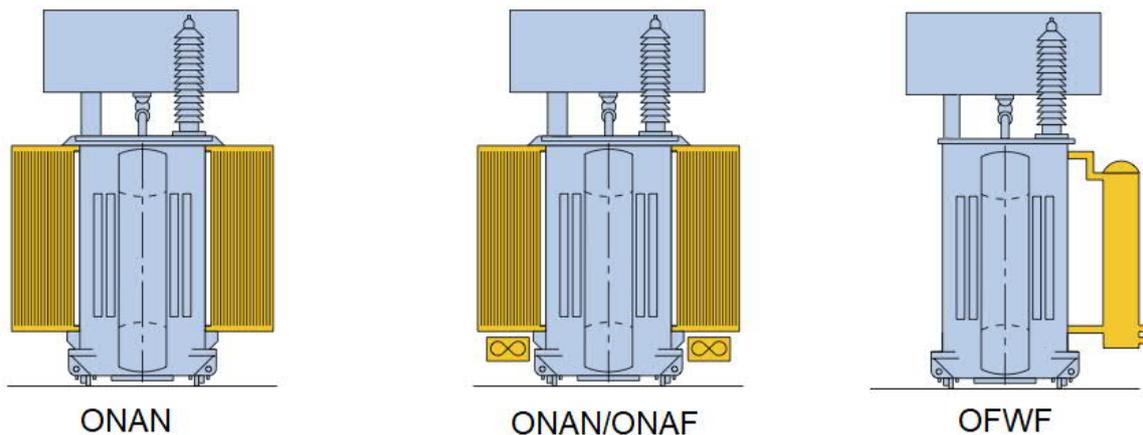


Abbildung 33 Gängigste Kühlungsarten der KDS

In *Abbildung 33* sind die häufigsten Kühlungsarten dargestellt. Diese können sowohl bei Wellwandkesseln als auch bei Flachwandkesseln zum Einsatz kommen. Der Unterschied der Kesselkonstruktionen ist im *Kapitel 3.1.3* erläutert.

Im Folgenden sind die Buchstaben, die die Kühlungsart repräsentieren, erklärt:

1. Buchstabe :

- O (Mineralöl oder synthetische Isolierflüssigkeit mit Brennpunkt ≤ 300 °C)
- K (Isolierflüssigkeit mit Brennpunkt > 300 °C)
- L (Isolierflüssigkeit ohne messbaren Brennpunkt)

2. Buchstabe :

- N natürliche Konvektionsströmung durch die Kühlvorrichtung und in den Wicklungen
- F forcierte Zirkulation durch Kühlvorrichtungen, natürliche Konvektionsströmung in den Wicklungen
- D forcierte Zirkulation durch Kühlvorrichtungen, von der Kühlvorrichtung zumindest in die Hauptwicklungen geleitet

3. Buchstabe :

- A Luft
- W Wasser

4. Buchstabe :

- N natürliche Konvektion
- F forcierte Zirkulation

5.2 Beschreibung der Parametervorgabe im Berechnungstool

Nach der Erläuterung der wichtigsten physikalischen Parameter wird in diesem Kapitel die Eingabe in das Siemens-Berechnungsprogramm *DROS* vorgestellt. Da es sich um ein Design handelt, das für die Angebotsphase relevant ist, werden die kostenverursachenden Parameter angegeben. Die anzugebenden Daten sind in zwei Klassen unterteilt. Zuerst sind die Daten erläutert, die notwendig sind, damit das Programm eine Auswertung vornehmen kann; diese werden im Folgenden als obligatorische Daten bezeichnet. Die optionalen Daten wiederum sind die Optimierungsdaten, die die Konstruktion der KDS z. B. aufgrund der Kundenwünsche einschränken sollen.

5.2.1 Obligatorische und optionale Daten

5.2.1.1 Allgemeine Daten

Bei allgemeinen Daten handelt es sich grundsätzlich um die Angaben, die dem Typenschild bei den so genannten Garantiewerten zu entnehmen sind. Das sind die im *Kapitel 5.1* beschriebenen Daten wie die Bemessungsblindleistung, die Nenn- und die Reihenspannung, ggf. auch die des Sternpunktes, und die Frequenz. Das Gewicht und die Art der Kühlung werden nicht vorgegeben, sondern im Zuge der Berechnung ermittelt. Zur Gewährleistung erfolgt über das Berechnungstool eine Warnmeldung bei Überschreitung dieser Werte. Diese Warnmeldung kann durch entsprechende Optimierung behoben werden.

ALLG 3 20000 34000 36 17.5 50

BESCHREIBUNG:

3	dreiphasig, 3/0-Kerntyp
20000	Bemessungsblindleistung in kVAr
34000	Nennspannung in V
36	Reihenspannung in kV
17,5	Reihenspannung des Sternpunktes in kV
50	Frequenz in Hz

Die Vorgabe optionaler Daten, die für die Berechnung nicht erforderlich sind, aber auf Wunsch des Kunden spezifiziert wurden, ist zu berücksichtigen und anzugeben. Dabei handelt es sich um diejenigen Anforderungen, die sich von der Norm unterscheiden, nach der die KDS konstruiert wird – in diesem Fall die IEC –, wobei die Norm im Programm vorgegeben werden kann. Exemplarisch seien hier z.B. die erhöhte Kurzschlussdauer, der die KDS standhalten muss, oder der Wert der Übererregung erwähnt, für den die KDS über den in der Norm angegebenen Werten ausgelegt werden muss. Darüber hinaus sind optionale Daten auch diejenigen, die der Kunde während des Konstruktionsprozesses zur freien Auswahl stellt. Ein Beispiel dafür ist das Material der Wicklungen.

NORM (Entweder die IEC oder die ANSI-Norm (American National Standards Institute) kann vorgegeben werden)

KURZ 1

BESCHREIBUNG:

1 Kurzschlussfestigkeitsdauer

UERR 5/20 60 65

BESCHREIBUNG:

5/20 5 % Übererregung bei 20 kV

60 Max. Ölübererregung bei Übererregung in K

65 Max. Wicklungsübererregung bei Übererregung in K

ALUC (Durch die Vorgabe des Parameters ALUC wird Aluminium als Wickelmaterial berücksichtigt.)

5.2.1.2 Kern

Bei der Vorgabe der Kerndaten muss zuerst die Kernvariante, die in diesem Fall als dreiphasige 3/0-Variante ausgeführt wurde, vorgegeben werden. Diese wird, wie erläutert, mit dem Parameter ALLG festgelegt. Anschließend ist die Art der Konstruktion in Bezug auf die Kühlung anzugeben. In diesem Fall ist es möglich, eine Auslegungsberechnung ohne Kühlung zu spezifizieren, in der diese nachträglich für die Abfuhr der Wärme berechnet und ausgelegt wird. Durch die Vorgabe der mittleren Kerninduktion können die Gesamtmaße des Kerns aus-

gelassen werden. Durch diese Vorgabe ist es möglich, einen Orientierungswert für die Kerndimensionen zu erhalten, der bei Bedarf optimiert werden kann. Um die Verlustrechnung durchzuführen, wird außerdem das Material des Kernblechs spezifiziert.

BAUA 2	
BESCHREIBUNG:	
2	Auslegungsberechnung ohne Kühlung
KERN 0 0 0 1.3 1.3 2	
BESCHREIBUNG:	
0	(Die ersten drei Parameter sind lediglich die Maße, die ausgelassen werden können, falls die Vorgaben danach getätigt werden. Hier handelt es sich um den inneren und äußeren Kerndurchmesser in mm sowie den Querschnitt des Kerns im dm ² .)
1.3	max. durchschnittliche Kerninduktion in Tesla
1.3	max. durchschnittliche Jochinduktion in Tesla
2	ohne Kesselabschirmung
BLEQ 8 8	
8	Index des Kernblechs
8	Index des Jochblechs

Die Qualität der Kernbleche kann nach Bedarf angepasst werden. Es sei darauf hingewiesen, dass nicht unbedingt das gleiche Material für den Kern und die Joche verwendet werden muss.

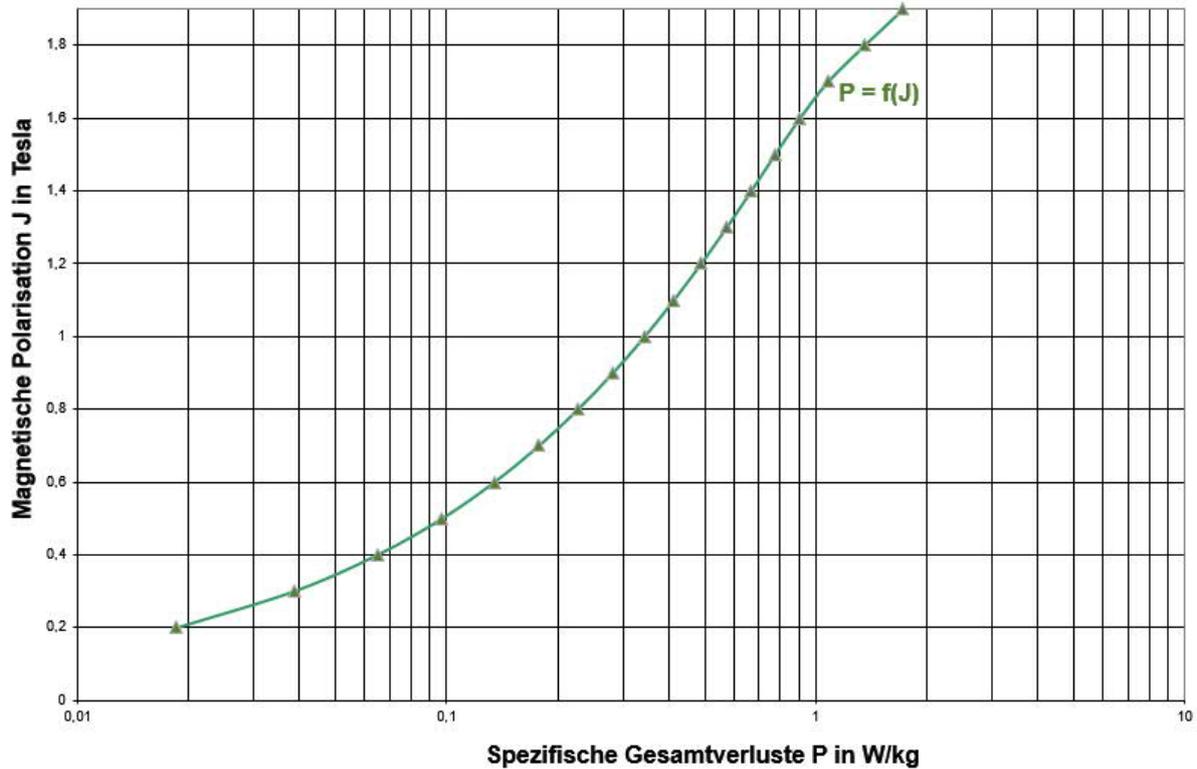


Abbildung 34 Verlustkurve eines 110-30 Kernblechs [19]

Ein Beispiel für die Kernplattenqualität wäre 110-30, wobei 110 die Verluste in Watt/kg bei einer magnetischen Polarisierung von 1,7 T definiert. Der zweite Wert beschreibt die Dicke der Kernplatte in mm/100. Eine Verlustkurve bei 50 Hz kann wie in *Abbildung 34* aussehen. Bei einer Frequenz von 60 Hz verschiebt sich die Funktion nach rechts bzw. die Verluste nehmen entsprechend zu.

5.2.1.3 Wicklung

Da die Wicklungsangabe für den Aktivteil von maßgeblicher Bedeutung ist, ermittelt das Programm durch die Vorgabe der – durch firmeninterne Vorschrift geregelten – Angabe der oberen und unteren Jochdistanz genau die auf die Schenkellänge hingerechnete Wicklung.

VORG 0 48.5 36.5

BESCHREIBUNG:

0	Vorgabe der Leiterisolation in mm
48.5	oberer Jochabstand (mm)
36.5	unterer Jochabstand (mm)

Der Leitertyp kann nach Bedarf variiert werden, um eine kostenoptimierte Variante zu erstellen. Bei der Optimierung der Wicklung kann das Leitermaterial angepasst werden. Anstelle von Kupfermaterial könnten, wie schon oben erwähnt, Aluminiumwicklungen verwendet werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass auch die Grenzwerte für z. B. die Stromdichte entsprechend angepasst sein müssen. Neben der Kostenersparnis durch den Wechsel des Leitermaterials kann, wie im *Kapitel 3.1.2* beschrieben, bei der Simulation auch ein anderer Leitertyp berücksichtigt werden.

MASS	(Durch entsprechende Vorgaben der Leiterbreite bzw. Leiterhöhe und der Gangzahl kann der Flachleiter vorgegeben werden.)
RUND	Die Vorgabe dieses Parameters ermöglicht die Berechnung mittels eines Rundleiters.
DRIL	Der Drillleiter kann mittels des Parameters DRIL vorgegeben werden.

Die Optimierung der Drosselwicklung oder ein erster Entwurf kann über den Parameter REPU festgelegt werden.

Hier kann die Stromdichte der Wicklungen sowie deren elektrische Höhe angegeben werden. Optimierungsschritte können frei gewählt werden, wobei darauf zu achten ist, dass sich mit zunehmenden Iterationsschritten die Rechenzeit erhöht.

REPU	2.6 3.0 20 600 1200 30
BESCHREIBUNG:	
2.6	untere Grenze der Stromdichte in A/mm ²
3.0	obere Grenze der Stromdichte in A/mm ²
20	Anzahl der iterierten Stromdichten
600	untere Grenze der elektrischen Wicklungshöhe in mm
1200	obere Grenze der elektrischen Wicklungshöhe in mm
30	Anzahl der iterierten elektrischen Höhen

5.2.1.4 Temperatur

Bei der Auslegung ist einzubeziehen, dass die Drosseleinrichtung ölfüllt ist, da die Ölsorten unterschiedliche Charakteristiken aufweisen.

OIL 3000

BESCHREIBUNG:

3000 Index für die Ölvorgabe (in diesem Fall Nynas Nytro TAURUS)

Wie bereits in den Designparametern erläutert, muss die maximale Wicklungs- bzw. Öltemperatur unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur ausgelegt werden. Dabei sind neben der Angabe dieser Garantiewerte der entsprechende Temperatursprung in der Wicklung beziehungsweise die Grenzen für den Temperatursprung festzulegen, woraufhin das Berechnungsprogramm die bestmögliche Variante errechnet. Anschließend werden dem Programm die garantierten Gesamtverluste in kW und die garantierte Schalleistung vorgegeben, so dass bei Überschreitung dieser Grenzen eine Warnmeldung erfolgt und eine entsprechende Optimierung durchgeführt werden kann.

GARA 70 90 60 65 40

BESCHREIBUNG:

70 garantierte Gesamtverluste in kW

90 garantierter Geräuschpegel in dB(A), wobei je nach vorgegebener Norm in 0,3m bei ANSI und 1m bei IEC gemessen wird.

60 max. Ölerwärmung in K

65 max. mittlere Wicklungserwärmung in K

40 Umgebungstemperatur in °C

5.3 Simulation im Transformatorenrechnungsprogramm

Damit die für das LIDT anwendbaren Produktionszeiten und -kosten errechnet werden können, sind die aus *DROS* berechneten Drosselparameter in dem für die Transformatorenberechnung geeigneten Programm *Traopt* zu simulieren.

Die Simulationsschritte werden in einen elektrischen und einen mechanischen Teil unterteilt.

5.3.1 Elektrisch

Nachfolgend wird die Simulationsrechnung der elektrischen Kenngrößen der KDS in zwei Teilbereiche gegliedert. Mit der ersten Simulationsrechnung soll die vom Kessel benötigte Wärmeverlustabgabe berechnet werden. Beim zweiten Teil geht es darum, die Geometrie des aktiven Teils nachzubilden.

5.3.1.1 Wärmeabfuhr vom Kessel

Die aus dem Kessel abzuleitende Wärmeenergie kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$P_{V,Kessel} = \left(\frac{55}{\vartheta_{\text{öl,max}}} \right)^{\frac{1}{0,72}} \cdot P_{Ges} \quad (22)$$

Bei einer KDS setzen sich die Gesamtverluste in Form von Leerlauf, Kurzschluss und Zusatzverlusten zusammen. Die Leerlaufverluste entstehen vor allem im Eisenkern, weshalb diese auch als Eisenverluste bezeichnet werden. Zum anderen entstehen Kurzschlussverluste, die vor allem in der Wicklung auftreten und daher auch als Kupferverluste bezeichnet werden. Zusätzlich sind neben den beiden am meisten tragenden Verlusten zu den Gesamtverlusten auch die Zusatzverluste zu nennen, die als Streuverluste und auch Wirbelstromverluste im Kessel entstehen.

$$P_{Ges} = P_0 + P_k + P_z \quad (23)$$

5.3.1.2 Aktivteilgeometrie

Für die Simulation der Aktivteilgeometrie werden die Parameter an das für die Transformatorberechnung geeignete Programm angepasst.

Zuerst wird die anzugebende Nennleistung durch Halbierung der Blindleistung vorgegeben.

$$S_N = \frac{Q}{2} \quad (24)$$

Zu beachten ist ferner, dass die Schaltungsgruppe entsprechend angepasst werden muss. Da die für die Transformatoren verwendbare Schaltgruppe nun festgelegt werden muss, wird eine YNy-Wicklung gewählt. Dabei ist die Stundenziffer unbedeutend, da hierdurch keine signifikante Kostendifferenz entsteht.

Die KDS besteht nur aus einer Wicklung, die auf der HV-Seite ausgeführt wird, weshalb die Geometrie entsprechend für das Transformatorberechnungsprogramm aufgeteilt werden muss. Die Vorgehensweise besteht hier darin, die Wicklung in zwei gleiche Teile zu teilen. Ist dies aufgrund der ungeraden Lagenaufteilungen nicht möglich, sollte die Wicklung mit minimaler Differenz zwischen den Aufteilungen durchgeführt werden. Zur Prototyp-Drosselberechnung wurde, die aus sieben Lagen bestehende Wicklung in vier Lagen in der Niedervoltwicklung und drei Lagen in der Hochvoltwicklung unterteilt.

Nach der entsprechenden Wicklungsteilung muss auch die Spannung bestimmt werden, mit der die KDS simuliert wird. Da jetzt beide Spannungsniveaus (für HV und NV) vorgegeben werden müssen, kann die Spannung durch Umrechnung auf die Lagenwicklung angepasst werden.

$$U_{neu,HV} = \frac{3}{7} \cdot U_N \quad (25)$$

$$U_{neu,NV} = \frac{4}{7} \cdot U_N \quad (26)$$

Damit die Wicklung entsprechend gekühlt werden kann, müssen zwischen den Lagen der Wicklung Kühlkanäle vorgesehen werden. Die Kühlkanäle der simulierten Wicklung sind in *Abbildung 35* ersichtlich. Der Spalt zwischen Kern und Wicklung wird als Hauptstreuspalt dargestellt.

Bei der Simulation der Wicklung entspricht also der Abstand zwischen NV- und HV-Wicklung einer Kühleiste. Dadurch kann die Wicklung als durchgehende Wicklung simuliert werden. Der mögliche Aufbau einer Drilleiterwicklung ist in *Abbildung 38* ersichtlich.

Nach der Übertragung der Wicklungsdaten muss die Windungszahl pro Lage festgehalten werden, um die richtigen Abmessungen der Wicklung zu erhalten. Vorerst muss aber die Windungszahl durch folgende Formeln angepasst werden:

$$N_{neu,NV} = \frac{4}{7} \cdot N \quad (27)$$

Entsprechend errechnet sich die Windungszahl für die Hochvoltwicklung:

$$N_{neu,HV} = \frac{3}{7} \cdot N \quad (28)$$

Da die Windungszahl angepasst wurde, kann jetzt die richtige Windungszahl für die Simulierten Lagen mit folgender Formel vorgegeben werden. Diese werden mit dem Buchstaben *W* gekennzeichnet. Es ist zu beachten das bei der Vorgabe dieses Werts die zwei Zahlen nicht multipliziert werden.

$$W_{HV} = 4 \times \frac{N_{neu,HV}}{4} \quad (29)$$

$$W_{NV} = 3 \times \frac{N_{neu,NV}}{3} \quad (30)$$

```

HW : CU-DRILLEITER-LAGENWICKLUNG, 3 LAGEN, 1 GAENGE 11.53x14.67mm DI/DA= 614 / 726mm 14571 V, 194 Wdg CU-LG=LGNR_2_REPLACE
                                     1N=2
3  --->-----64.67-----0 194.01
   |----- 5.5L 2 PRx0.08 (D= 684) LEITER Isol. DL/ABL KGbl/isol HEL WLG JAo/JAu
   <-----64.67-----129.34
   ----- 5.5L 2 PRx0.08| (21x(45.35x 1.13)0.1+0.04BL+0.50DDP 1227/ 3 1337/ 1358 752 764 21.5+ 0/ 21.5
1U1V1W-->-----64.67-----64.67

0.2 PR 614 / 614
5.0 L

NW : CU-DRILLEITER-LAGENWICKLUNG, 4 LAGEN, 1 GAENGE 11.53x14.67mm DI/DA= 452 / 604mm 19429 V, 259 Wdg CU-LG=LGNR_2_REPLACE
Y 0---<-----64.75-----259
   ----- 5L 2 PRx0.08 |
   >-----64.75-----194.25
   ----- 5L 2 PRx0.08 LEITER Isol. DL/ABL KGbl/isol HEL WLG JAo/JAu
   <-----64.75-----129.5
   ----- 5L 3 PRx0.08 | 21x( 5.35x 1.13)0.1+0.04BL+0.50DDP 1291/ 3 1406/ 1428 753 765 21.0+ 0/ 21.0
2U2V2W-->-----64.75-----64.75
    
```

Abbildung 35 Simulation der Drosselwicklung im Berechnungsprogramm für Transformatoren

5.3.2 Mechanisch

Beim mechanischen Teil sind die entsprechenden Kesseldimensionen auf die Geometrie des aktiven Teils abgestimmt. Dabei ist zu beachten, dass die Spannungsabstände der spannungsführenden Teile entsprechend ausgelegt werden müssen. Um mögliche Fehleingaben zu vermeiden, wird vom Programm eine entsprechende *AutoCad*-Datei mit den Dimensionsdaten erstellt. Durch den Import dieser Datei in *AutoCad* lässt sich eine 2D-Prinzip-Zeichnung erhalten, wie in *Abbildung 36* dargestellt. Hier können die Abmessungen der KDS noch einmal überprüft werden.

Zur Vermeidung möglicher Probleme bei der Konstruktion werden in dieser Phase auch die notwendigen Schutzeinrichtungen und spezifizierten Zusatzgeräte in die Zeichnung eingefügt. Der Kessel der KDS wurde vom Engineering als Wellwandkessel mit forcierter Kühlung konzipiert. Zur Vergleichbarkeit des Gewichts des Kessels mit dem Gewicht, das bei der Angebotsberechnung berechnet wird, ist hier der gleiche Kesseltyp ausgewählt. In diesem Teil der Berechnung muss der Kessel so dimensioniert werden, dass die Wärme entsprechend abgeführt werden kann. In der Angebotsphase wird auf die Variation der Abmessungen zurückgegriffen, da z. B. bei entsprechender Kesselhöhenverlängerung größere Wellwände verwendet werden können, was zu einer besseren Wärmeabgabe führt.

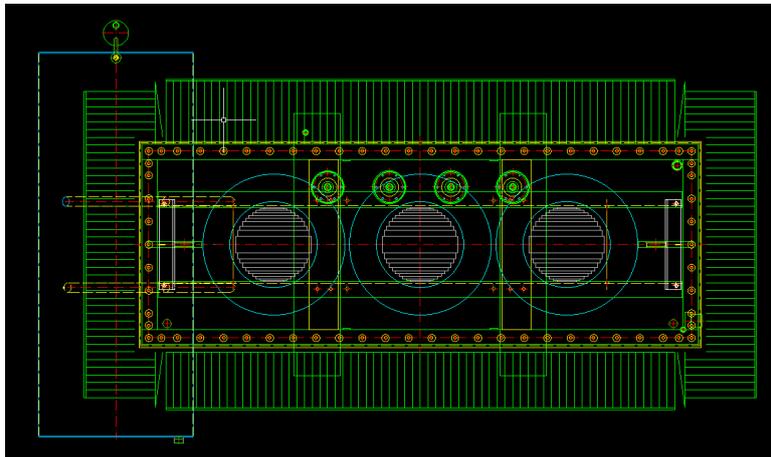


Abbildung 36 AutoCAD-Plot in der Angebotsphase

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Dieser Teil der Studie kommt zum Schluss, dass auf der Grundlage der in der Angebotsphase durchgeführten detaillierten Berechnungen eine recht genaue Kostenschätzung für die zu berechnende KDS vorgenommen werden kann. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Angebotskalkulation im Vergleich zur Ingenieurkalkulation dargestellt. Um diese beiden Berechnungen vergleichen zu können, wird das Gewicht des Aktivteils und des Kessels der beiden Berechnungsvarianten verglichen.

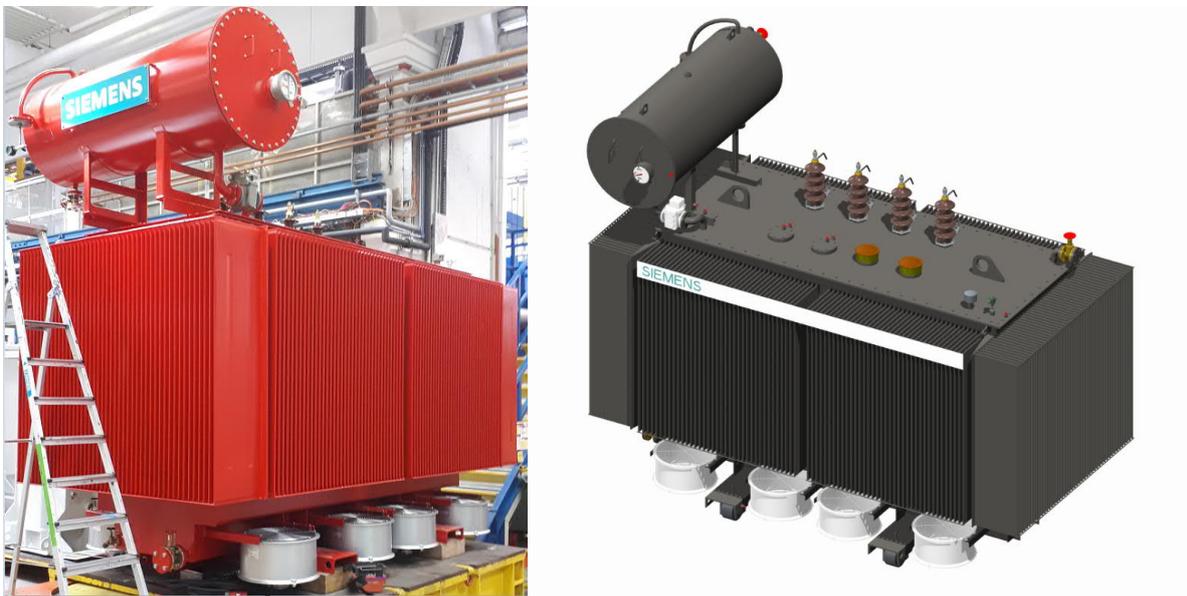


Abbildung 37: Außenansicht der Prototyp-KDS [19]

5.4.1 Aktivteil

5.4.1.1 Kern

Der Eisenkern, der in der Variante 3/0 ausgeführt wurde, besteht aus dem unteren und oberen Joch und den drei vertikalen Schenkeln. Beide Joche haben einen rechteckigen Querschnitt und sind jeweils mit zwei Rahmenpressplatten und Befestigungsschrauben eingespannt. Somit liegt eine Außenverspannung des Kerns vor. Die Schenkel werden in fünf übereinander angeordneten Schenkelpaketen mit keramischen Abstandhaltern getrennt, die eine genaue Einhaltung des spezifischen Luftspaltanspruchs gewährleisten. Der Kern besteht aus kaltgewalzten, kornorientierten, hochlegierten, radial angeordneten Kernblechen.

Bei der Auslegung des Kerns wurden für die Konstruktion der Jochblechkerne ca. 2232 kg Blech in einem Joch verarbeitet. Die Gesamtmasse beider Joche liegt bei 4464 kg. Bei der Ausführung der Schenkel wurde Blech in einer Menge von 555 kg pro Schenkel verwendet. Durch die Simulation der KDS in der Angebotsberechnung wurde das Gesamtgewicht des Kerns ermittelt. Das aus der Angebotsphase berechnete Kernmaterial betrug 6065 kg. Somit ergibt sich, wie aus der Tabelle ersichtlich ist, eine Gewichtsdivergenz von 1,012 % beim Vergleich der beiden Designs.

Element	Angebots-Auslegung	Engineering-Auslegung
Joch	6065 kg	2.232 kg / Stk. 4.464 kg
Schenkel		555 kg / Stk. 1665 kg
Differenz		+1,012%

Tabelle 11 Vergleich des Kernmaterialgewichts in der Angebots- und Engineering-Auslegung

5.4.1.2 Wicklung

Die Wicklung ist aus einem Drillleiter gefertigt. Dieser besteht aus mehreren lackisolierten Einzelleitern. Durch die ungerade Teileiteranzahl ergibt sich eine Platzersparnis aufgrund des kleineren Gesamtquerschnitts.

Diese Wicklung wurde in sieben Lagen realisiert. Zwischen den Lagen befinden sich die Kühlkanäle, durch die das Öl zirkulieren und die von den Wicklungen erzeugte Wärme ableiten kann. Am inneren Rand der Wicklung befindet sich ein Hauptstreuspalt, der das Gestell und die Wicklung trennt.

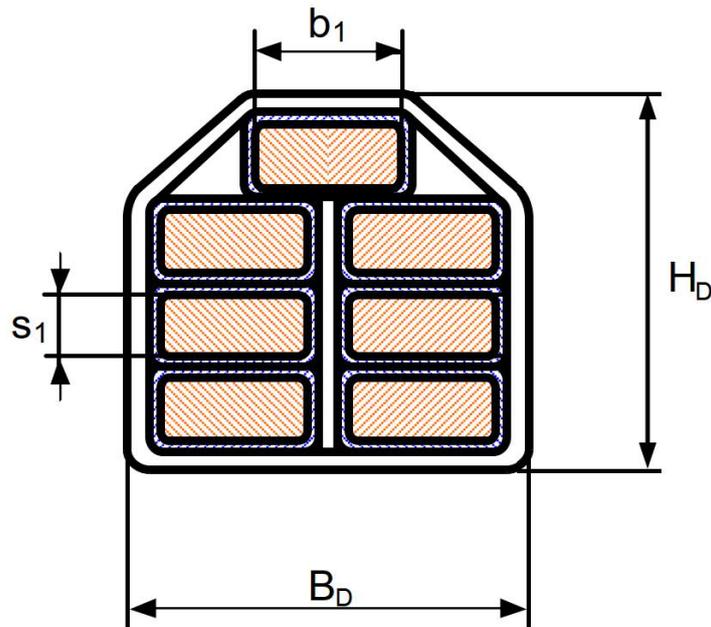


Abbildung 38 Aufbau eines Drillleiters

Abbildung 39 veranschaulicht den Unterschied in der Wicklungsberechnung zwischen dem Angebot und der Engineering-Phase. Aus dieser Abbildung und der *Tabelle 12* ist ersichtlich, dass das Leitergewicht nahezu identisch berechnet wird.

Element	Angebots-Auslegung	Engineering-Auslegung
Wicklung	2836 kg (21 / 5.35 x 1,13)	2799 kg (27 / 5.32 x 0,9)
Differenz	+1.013%	

Tabelle 12 Vergleich des Wicklungsgewichts in der Angebots- und Engineering-Auslegung

<pre> W. : CTC-layerwinding: 7 Layers CTC 11.65 x 14.43 mm insulated 453 turns/disc 64.71*1 -----5L+10P -----5L+10Pconductor bare: -----5L+10P2lx(5.35x1.13) -----5L+10P -----5L+10Pconductor insulation: -----5L+12P 0.70+0.10 64.71*1 ----- total conductor len.: 2605 m total weight copper: 2836 kg </pre>	<pre> HW : CU-DRILLLEITER-LAGENWICKLUNG, 7 LAGEN, 1 GAENGE 11.47x15.36mm 439 Wdg 1N=Y 7 -->-----62.71-----0 439 ===== 5.5L 7 PR-TUx0.08 6 --<-----62.71-----376.28 ===== 5.5L 7 PR-TUx0.08 5 -->-----62.71-----313.57 ===== 5.5L 7 PR-TUx0.08 4 --<-----62.71-----250.86 ===== 5.5L 7 PR-TUx0.08 3 -->-----62.71-----188.14 ===== 5.5L 7 PR-TUx0.08 2 --<-----62.71-----125.42 ===== 5.5L 7 PR-TUx0.08 27x(5.32x0.90) 1U1V1W-->-----62.71-----62.71 GESAMT-LEITERGEW.= 2799 KG </pre>
---	---

Abbildung 39 Angebotsberechnung (links) & Engineering-Berechnung (rechts)

5.4.2 Kessel

Bei der mechanischen Konstruktion werden Änderungen am Kessel vorgenommen, so dass die vom aktiven Teil erzeugte Wärme abgeführt werden kann. In der Angebotsphase werden die Kesselmaße entsprechend variiert, wobei die durch die Spannungsabstände unter Öl vorgegebenen Mindestmaße eingehalten werden müssen. Durch die Vergrößerung der Kesselhöhe ist es möglich, größere Wellenwände zu verwenden. Mit der Längen- und Breitenverlängerung können mehr Glieder in den Wellen eingesetzt werden, was sich positiv auf die Kühlung auswirkt. Bei der Auswahl der Höhe der Wellwände ist zu beachten, dass deren Unterkante nicht niedriger ist als die Unterkante der Wicklung, da diese Anordnung zu einer ineffizienten Kühlung führt.

Aufgrund der begrenzten Zeit, die bei der Gestaltung des Angebots zur Verfügung steht, ist ein Zuschlag von 10% auf die tatsächliche Kesselleistung als Sicherheit hinzugefügt worden.

Element	Angebots-Auslegung	Engineering-Auslegung
Kessel	5114 kg	5003 kg
Differenz	+1.022%	

Tabelle 13 Vergleich des Kesselgewichts in der Angebots- und Engineering-Auslegung

Beim Vergleich der Gesamtmasse ist die Differenz zwischen den Auslegungen beim Design des Angebots um 1,022 % höher. Sogar die für die KDS verwendeten Kleinteile sind ungefähr gleich berechnet worden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Kalkulationsrechnung zeigt, dass die Kostenschätzung in der Angebotsphase mit Hilfe der verwendeten Berechnungstools sehr genau durchgeführt werden kann.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Um den neuen Anforderungen hinsichtlich der Stabilität gerecht werden zu können, versuchen Netzbetreiber diese auf verschiedene Arten zu bewältigen. Unter den zahlreichen Ursachen, die Netzinstabilität verursachen können, sind die Probleme der Spannungsanhebung infolge schwach belasteter Netze, die durch den Ferranti-Effekt erklärt werden kann, und des unbrauchbaren und zu zusätzlichen Verlusten führenden kapazitiven Anteils im Netz besonders hervorzuheben. Diesen Problemen kann mittels einer fixen oder variablen KDS entgegengewirkt werden. Ein kompaktes und kostengünstiges Design der KDS kann in dieser Hinsicht vielen Kunden, die unter anderem aus Sektoren wie EVUs, Renewables oder Industrie stammen, zahlreiche Vorteile bieten. Um den Bedarf an KDS, die in Netzen bis 72,5 kV eingesetzt werden können, zu ermitteln, wurde in dieser Masterarbeit eine Auswertung der in den letzten Jahren an Siemens gerichteten Anfragen durchgeführt. Das Ergebnis wurde mit einer bestehenden Untersuchung, die sich mit dem Thema der Blindleistungskompensation in dem ENTSO-E-Raum auseinandersetzt, verglichen. Auf dieser Grundlage konnte festgestellt werden, dass bei Betrachtung des gleichen geografischen Raums die Ergebnisse beider Forschungen ungefähr die gleichen sind wie die, was die Gültigkeit der Studie belegt.

Die Auswertung der Anfragen gestattet überdies einen Einblick in den potenziellen Markt, auf dem KDS eingesetzt werden können. Durch Veranschaulichung der Sektoren, aus denen die Kunden stammen, ist deutlich geworden, dass die EVUs diese Anwendung bisher am meisten nachgefragt haben, aber auch, dass die Kunden im Renewables-Sektor in letzter Zeit häufiger Anfragen stellen. Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass in Mittelspannungsnetzen kein Bedarf an KDS besteht. Diese Annahme wurde auch von einem regionalen Netzbetreiber bestätigt, der in seiner Netzstruktur keine Mittel zur Blindleistungskompensation im Mittelspannungsnetz einsetzt. Die Annahme wurde jedoch durch die Ergebnisanalyse der Untersuchungen auf globaler Ebene widerlegt. Aufgrund der Auswertung der an Siemens weltweit gerichteter Anfragen konnte gezeigt werden, dass Bedarf an KDS besteht. Durch das Prognosemodell, das die Anfrageentwicklung der nächsten Jahre darstellt, war klar ersichtlich, dass die Anfragen in dieser Hinsicht nicht weniger werden.

Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis ist die Forschung von Mordor Intelligence [28], die zu dem Schluss kam, dass die jährliche Wachstumsrate ausgehend vom beobachteten Jahr 2018 für den Zeitraum 2018–2024 auf 6 % geschätzt werden kann. Das Ergebnis kann auch darauf beruhen, dass die Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien stark wächst und die damit verbundenen volatilen Zusammenhänge durch die Versorgungssysteme mit KDS kostengünstig gelöst werden können. Darüber hinaus ist erwähnenswert, dass die Übertragungs- und Verteilungsnetze weltweit erweitert und modernisiert werden. Damit soll in erster Linie der wachsende Energiebedarf gedeckt und mit aufkommenden erneuerbaren Energien, die intermittierend Energie erzeugen, kompatibel gemacht werden. Überdies konzentrieren sich die Regierungen weltweit auf Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien, da sie umweltfreundlich sind und langfristige, nachhaltige Lösungen bieten können. Die globalen Energieeffizienzprogramme wurden von den meisten Regierungen auf der ganzen Welt initiiert, um internationale Vorschriften zu erfüllen, indem sie Energieanlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Wind und Sonne errichten.

In diesem Zusammenhang muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die vorliegende Forschung zum größten Teil mit Angebotsanfragen auseinandergesetzt hat. Da die Zahl der Anfragen deutlich größer, als die der Aufträge ist, soll nicht unerwähnt bleiben, dass keine Filterung jeglicher Kundenanfragen für die Kompensation in Hochspannungsnetzen durchgeführt wurde, durch die möglicherweise die Ergebnisse anders ausgesehen hätten. Durch eine derartige Filterung ließe sich im Prinzip erkennen, ob sich die Kunden für eine Variante der Blindleistungskompensation im Hochspannungsnetz oder mehrere im Mittelspannungsnetz entscheiden, wobei mit Sicherheit auch der Kostenfaktor eine große Rolle spielt.

Aus diesem Grund lautet die Empfehlung für die weitere Forschung, eine ähnliche Studie durchzuführen, in der die bereits installierten Mittel zu kapazitiven Blindleistungskompensation im Mittelspannungsnetz hinterfragt werden. Auch zu hinterfragen ist, wie viel Kabel und wie viele Freileitungssysteme im System verbaut sind. Diese Informationen können wichtige Erkenntnisse für den zukünftigen Einsatz der KDS liefern.

Im zweiten Teil der Masterarbeit wurde die Berechnung und die Simulation in einem für Transformatorberechnungen geeigneten Berechnungsprogramm in der Angebotsphase dargestellt. Anschließend wurde ein Vergleich zu der fertigen Engineering-Auslegung durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass mit Hilfe einiger weniger Parameter eine Standardlösung für die Auslegung des Reaktors berechnet werden kann. Ebenfalls wurde deutlich, dass ein minimaler Unterschied zwischen dem Angebot und der Engineering-Berechnung besteht, was durch die begrenzte Zeit für den Entwurf in der Angebotsphase erklärt werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- [1] O. Brückl *et al.*, "Zukünftige Bereitstellung von Blindleistung und anderen Maßnahmen für die Netzsicherheit," no. September, 2016.
- [2] Siemens AG, "Kompensations- und Reihendrosselspulen für Mittel- und Hochspannungsnetze," 2016.
- [3] Austrian Power Grid AG, "Strom Bewegt," 2014.
- [4] Siemens AG, "Variable Drosselspulen," *Var. Dros.*, p. 2, 2014.
- [5] T. J. E. Miller, *Reactive Power Control in Electric Systems*. John Wiley and Sons Ltd, 1982.
- [6] W. Hofmann, J. Schlabach, and W. Just, *Reactive Power Compensation: A Practical Guide*. 2012.
- [7] N. (Schneider E. Rasmussen, "Impact of leading power factor on data center generator systems," pp. 1–19, 2018.
- [8] Prof. Bernd Rüdiger Oswald, "Elektromobilität Herausforderung Netzintegration," *ETG J*.
- [9] C. Jayasenan and E. S. T. I. En, "Shunt Reactor Know How Session," 2017.
- [10] L. L. Grigsby, *Power Systems*, Third Edit. 2012.
- [11] Dr. Marcus Dietrich; Prof. Dr.-Ing. Oliver Brückl, "Beitrag industrieller Blindleistungs-Kompensationsanlagen und -Verbraucher für ein innovatives Blindleistungs-Management in der Stromversorgung Deutschlands," p. 76, 2013.
- [12] C. Groiss, D. Grunbinger, and R. Schwalbe, "Blindleistungsbilanz im salzburger verteilnetz," 15.

- Symp. Energieinnovation*, vol. 1, p. 14, 2018.
- [13] P. Stefan and R. Herwig, "Berechnung elektrischer Energienetze," p. 34, 2017.
- [14] D. Spiertz, "Kapazität von Leitungen," p. 2, 2013.
- [15] S. A. P. T. and D. Transformers, "Kompensations-Drosselspulen für Mittel- und Hochspannungsnetze: Von der Entstehung bis zum Einsatz," *Kompensations-Drosselspulen für Mittel- und Hochspannungsnetze Von der Entstehung bis zum Einsatz*, p. 8.
- [16] Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, "the Solution for Variable Shunt Reactors Vacutap ® Vrx for the Highest Requirements for the Regulating Range .," pp. 1–6.
- [17] M. Heathcote, *J & P Transformer Book*. 2007.
- [18] S. 1996 – 2020, "Kompensationsdrosselspulen und Reihendrosselspulen," 2020. [Online]. Available:
<https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/hochspannung/transformatoren/drosselspulen.html>.
- [19] "Siemens AG." .
- [20] IEC, "IEC 60076 About Power Transformer," *Communication*, 2000.
- [21] Martin A. Stoessl, "Siemens Phase Shifting Transformers and (variable Shunt) Reactors a profitable investment for highest performance & customer intimacy," p. 65, 2019.
- [22] F. Javernik, *Grundsatzuntersuchung über die Blindleistungskompensation im österreichischen Übertragungsnetz*. 2013, p. 84.
- [23] B. Oum, E. Fadhel, and M. Fellah, "The Static Var Compensator (SVC) Device in the power systems Using Matlab / SimPowerSystems The Static Var Compensator (SVC) Device in the power systems Using Matlab / SimPowerSystems ICEPS laboratory (Intelligent Control & Electrical Power Systems)," no. February 2015, pp. 54–59, 2008.
- [24] e-control, "Verordnung zur Festlegung eines Netzkodex für den Lastanschluss (Demand Connection Code oder DCC)," 2019. [Online]. Available: <https://www.e-control.at/dcc-network-code>. [Accessed: 16-Nov-2019].

- [25] C. Schred and M. Elektrotechnik, "Blindleistungsoptimierung an der Übergabestelle ÜNB / VNB," no. November, 2018.
- [26] M. Stefan, W. Mareike, and S. Hannes, "Entwicklung einer Verfahrensweise zur quantitativen Bewertung verschiedener Blindleistungsbereitstellungsoptionen." GmbH, Deutsche Energie-Agentur, p. 160, 2017.
- [27] International Energy Agency, "Global shifts in the energy system," 2017. [Online]. Available: <https://www.iea.org/weo2017/>.
- [28] M. Intelligence, "GLOBAL SHUNT REACTOR MARKET," p. 26, 2015.
- [29] A. T&D, "Shunt Reactors in Power Systems," 2007.
- [30] IEC, *INTERNATIONAL STANDARD Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*. 2011.
- [31] "InternationalElectrotechnicalCommission," 2001-07, 2019. [Online]. Available: <http://www.electropedia.org/>.
- [32] IEEE, *IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Shunt Reactors Rated Over 500 kVA*, no. August 2008. 2008.