



---

## DIPLOMARBEIT

# Thermische Modellierung von Netzkomponenten für die Elektromobilität

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)  
unter der Leitung von

em.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günther Brauner  
und  
Dipl.-Ing. Andreas Schuster

E373 - Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Wien**  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von  
Fasthuber Dominik BSc  
0626425  
Andiesen 10  
4774 St. Marienkirchen bei Schärding

Wien, im Mai 2013

---



# Danksagung

Die Diplomarbeit ist eine der letzten großen Hürden vor dem Abschließen eines naturwissenschaftlichen Studiums. Ein Studium, bei dem man mit Fug und Recht sagen kann, dass es einen erheblichen Stellenwert in meinem Leben eingenommen hat. Deshalb möchte ich bei dieser Gelegenheit ein paar dankende Worte niederschreiben.

Zuerst möchte ich mich bei Herrn em.Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günther Brauner bedanken, der es mir ermöglicht hat unter seiner Leitung diese Abschlussarbeit zu verfassen. Als wichtigster Begleiter dieser Arbeit sei an dieser Stelle jedoch mein Betreuer Dipl.-Ing. Andreas Schuster erwähnt, dem ich auf Grund seiner freundlichen und hilfsbereiten Unterstützung einiges an Dank verpflichtet bin. Seine ständige Beteiligung und Mithilfe an der Arbeit hat die endgültige Realisierung erst möglich gemacht.

Neben meinen zahlreichen Studienkollegen, Freunden und Wegbegleitern, ohne die sich mein Studium durchaus schwieriger gestaltet hätte, möchte ich noch meinen Eltern, Walter und Margarete Fasthuber, für ihre Unterstützung danken. Ihnen gilt sicherlich der größte Teil der Anerkennung, da ich ohne ihre jahrelange Mithilfe, Geduld und Bemühungen diesen schwierigen Weg nicht alleine bewältigen hätte können. Nicht nur die finanzielle Unterstützung, die ich dankenswerterweise ohne Kompromisse immer erhalten habe, sondern vor allem die Tatsache, dass mir immer jemand mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist, lässt mich sehr stolz auf meine Familie sein. Noch einmal herzlichen Dank.



# Kurzfassung

Aufgrund des stetig vorangetriebenen Bedarfs an Energie wird in der heutigen Zeit immer mehr versucht diesen Anspruch mit verschiedensten Formen der Energiegewinnung zu decken. Um den Grad des bereits vorherrschenden Klimawandels dabei jedoch zu minimieren, wird ein Großteil der zukünftigen Energie durch erneuerbare Energieträger wie Photovoltaik, Wind, Geothermie, Wasserkraft etc. bereitgestellt. Leider erreicht man durch den vermehrten Einsatz dieser erneuerbaren Energieträger einen stark fluktuierenden Verlauf der Auslastung der Leitungen. Durch diese dynamischen Einspeisepprofile, aber auch durch die Last-seitig immer dynamischeren Profile werden immer höhere Ansprüche an die bereitgestellte Infrastruktur gestellt.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Auswertung der Belastungsprofile und welche thermischen Auswirkungen diese auf die einzelnen Netzkomponenten besitzen. Durch eine transiente thermische Modellierung sollen diese Grenzen ausgelotet und vor allem für Niederspannungskabel erörtert werden. Anhand dieser Erkenntnisse soll eine effizientere Nutzung der bereitgestellten Ressourcen gewährleistet werden.

Zunächst wird eine kurze Einleitung über die grundsätzliche Thematik gegeben, um den Kern der Problematik genauer zu erfassen. Danach werden die Aufbauelemente für isolierte Kabel und Leitungen betrachtet. Hier werden materialspezifische Eigenschaften näher erörtert, aber auch grundlegende Zusammenhänge der Notwendigkeiten der einzelnen Schichten des Kabels, bzw. einer Leitung analysiert. Nachdem die Rahmenbedingungen geklärt wurden, wird die thermische Modellierung eines Kabels von Grund auf erarbeitet. Neben allgemeinen Verhältnissen werden die elektrischen Kenndaten besprochen und die Entstehung der Wärmewiderstände erklärt. Aufgrund einer Analogie, die auf das ohmsche Gesetz beruht, wird schließlich das konkrete in dieser Arbeit verwendete thermische Modell vorgestellt. Dieses zunächst stationäre Modell wird auf das transiente Modell erweitert und beschrieben. Die Implementierung in MATLAB/SIMULINK folgt anschließend. Wobei auf den genauen programmiertechnischen Hintergrund nach und nach näher eingegangen wird. Anhand der Daten aus dem *ZENEM*-Projekt können die für die Modellierung erforderlichen Input-Daten der Last- und Einspeisepprofile im beispielhaften Wiener Stadtnetz vorgestellt werden. Nachdem alle theoretischen Themen aufgearbeitet und das transiente Modell beschrieben worden ist, werden die Ergebnisse der vier verschiedenen Szenarien

rien durchgesprochen. Dabei lassen sich gut die Einflüsse der einzelnen Veränderungen gegenüber dem Basisszenario anhand diverser Grafiken anschaulich gegenüberstellen. Es lässt sich dabei zeigen, dass sich das Kabel im Basisszenario nur in geringer Auslastung befindet. Durch Einbringung zusätzlicher Verbraucher und Erzeuger lassen sich die Auslastungen deutlich erhöhen, wobei lediglich kurze thermische Grenzverletzungen in Kauf genommen werden müssen. Abschließend wird die Zusammenfassung der einzelnen Ergebnisse präsentiert und ein Ausblick über mögliche Entwicklungen und Chancen für die Zukunft gegeben, um die Möglichkeiten der Ressourcennutzung aufzuzeigen.

# Abstract

Nowadays mankind is more and more trying to cover the requirements of energy using various forms of energy. To minimize the degree of the already prevailing climate change, a major part of the future energy is used by renewable energy sources, such as solar, wind, geothermal, hydro-power and so on. Unfortunately, a strongly fluctuating course of capacity will be reached through the increased use of renewable energy sources. Because of this dynamic delivery profile and the through the load-side more dynamic profile, the demands on the provided infrastructure are increasing.

This thesis deals with the evaluation of the load profiles, and what thermal impact they have on the individual network components. By a transient thermal modelling these limits should be found, especially for low- voltage cable. Based on these findings, a more efficient use of the resources will be guaranteed. How this use might look like, will be treated in the following chapters.

Initially a short introduction is given about the fundamental issue in order to capture the essence of the problem in detail. Thereafter, the construction elements for insulated cables and wires will be treated. In this section material- specific properties are mainly discussed in detail. Once the basic conditions have been clarified, the thermal modelling of a cable will be developed. In addition to general conditions, electric characteristics are discussed as well as the origin of thermal resistances. Because of an analogy which is based on Ohm's law, the concrete thermal model which is used in this thesis is presented. Based on this stationary model, it is extended to the transient model and described thereafter. Then follows the implementation in MATLAB/SIMULINK. The precise technical programming background will be discussed consecutively. Through the data of the *ZENEM*-project the necessary input data for the modelling of load and delivery profile in a Vienna exemplary electrical network can be provided. As soon as all theoretical subjects have been worked up and the transient model has been described, the results of the four different scenarios will be discussed. There you can easily see the changes compared to the basic scenario. These changes are compared graphically in some plots. It is seen here that the cable in the basic scenario is only in low utilization. By introducing additional consumers and producers the workload can significantly increase with only short thermal boundary violations must be taken into account. Finally, the combination of the individual results is presented.

Furthermore, an outlook on possible developments and opportunities for the future is given to demonstrate the possibilities of the use of resources.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines . . . . .	1
1.2	Das Klimaproblem und die mögliche Lösung . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Aufbauelemente für isolierte Kabel und Leitungen</b>	<b>5</b>
2.1	Leiter . . . . .	5
2.1.1	Eigenschaften und Aufbau der Leiter . . . . .	5
2.1.2	Leiter für Kabel . . . . .	6
2.2	Isolierungen . . . . .	7
2.2.1	Thermoplaste . . . . .	8
2.2.2	Vernetzte Thermoplaste . . . . .	9
2.3	Elektrische Schirmung . . . . .	11
2.3.1	Kabel mit Papierisolierung . . . . .	11
2.3.2	Kabel mit PVC-Isolierung . . . . .	11
2.3.3	Kabel mit VPE-Isolierung . . . . .	12
2.4	Metallene Hüllen . . . . .	12
2.5	Nichtmetallene Hüllen . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Thermische Modellierung eines Kabels</b>	<b>13</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	13
3.2	Elektrische Kenndaten . . . . .	17
3.2.1	Widerstandsbelag des Leiters . . . . .	17
3.2.2	Induktivitätsbelag . . . . .	18
3.2.3	Kapazitätsbelag . . . . .	18
3.2.4	Ableitungsbelag . . . . .	19
3.2.5	Dielektrische Verluste . . . . .	19
3.3	Wärmewiderstände . . . . .	19
3.3.1	Wärmewiderstand des Kabels . . . . .	19
3.3.2	Wärmewiderstand der Luft . . . . .	21
3.3.3	Wärmewiderstand des Erdbodens . . . . .	24
3.4	Umgebungstemperaturen . . . . .	25

<b>4</b>	<b>Das thermische Modell</b>	<b>27</b>
4.1	Niederspannungskabel . . . . .	27
4.2	NS-Kabel Modellierung . . . . .	28
4.3	Hintergrund der stationären Modellierung . . . . .	29
4.4	Hintergrund der transienten Modellierung . . . . .	30
4.4.1	Erweiterung der Formeln auf n-Schichten . . . . .	32
4.5	Das thermische Modell in MATLAB/SIMULINK . . . . .	33
4.5.1	Der Parameterbereich . . . . .	34
4.5.2	Der Modellierungsbereich . . . . .	34
4.5.3	Der Ausgabe- und Visualisierungsbereich . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Stromdaten</b>	<b>41</b>
5.1	Stromdaten-Netz . . . . .	41
5.2	Stromdaten-Elektroauto . . . . .	42
5.3	Stromdaten-Photovoltaik . . . . .	43
5.4	Auslastung der Szenarien . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>47</b>
6.1	Szenario A . . . . .	47
6.1.1	Basisszenario . . . . .	47
6.1.2	Variation des Basisszenarios . . . . .	48
6.2	Szenario B . . . . .	50
6.3	Szenario C . . . . .	52
6.4	Szenario D . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>57</b>
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	57
7.2	Ausblick und Erkenntnisse für die Zukunft . . . . .	60
<b>A</b>	<b>Parameterliste</b>	<b>69</b>
A.1	Parameterliste für alle Berechnungen . . . . .	69
A.2	Parameterliste für die Variation des Basisszenarios . . . . .	70
<b>B</b>	<b>NEPLAN Netzpläne</b>	<b>73</b>
B.1	Szenario A und B . . . . .	73
B.2	Szenario C und D . . . . .	73

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Seit dem Jahre 1880 kann weltweit vom Beginn der öffentlichen Elektrizitätsversorgung gesprochen werden, die seither als entscheidender Antrieb der industriellen Entwicklung anzusehen ist. Der Erfolg der elektrischen Energie lässt sich anhand einiger Punkte zusammenfassen. Die elektrische Energie

- lässt sich aus jeder Primärenergieform gewinnen.
- lässt sich wirtschaftlich und mit hohem Wirkungsgrad über große Entfernungen übertragen und an ihrem Bestimmungsort leicht in alle Nutzenergieformen umwandeln.
- ist sauber und umweltfreundlich, soweit sie auch sauber erzeugt worden ist.
- ist für die moderne Kommunikation, Informatik und Automatisierung unentbehrlich.

Diese Eigenschaften stellen auch weiterhin sicher, dass die elektrische Energie *die* Energieform der Zukunft ist und bleiben wird, auch wenn die elektrische Energie im Jahr 2008 erst ca. 19 % des weltweiten Energiebedarfs geliefert hatte. Der Rest des Energiebedarfs wird zurzeit von nicht erneuerbaren Energieträgern wie Erdöl, Gas und Kohle zur Verfügung gestellt [3].

## 1.2 Das Klimaproblem und die mögliche Lösung

Entsprechend des Bericht des Umweltbundesamtes [16] soll der Anteil an nicht erneuerbaren Energieträgern deutlich reduziert werden. So lauten die zukünftigen Ziele des Klima- und Energiepaketes bis 2020 unter anderem eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 20 % (bezogen auf 1990), einen Anstieg der erneuerbaren Energieträger auf 20 % des Bruttoendenergieverbrauches sowie eine Steigerung der Energieeffizienz um 20 % in der gesamten Europäischen Union. Allerdings wird bereits eine Ausweitung dieser Ziele verhandelt um das 2 °C Ziel<sup>1</sup> zu erreichen. Dafür müssten die Industrieländer gemäß dem

---

<sup>1</sup>Maximal tolerierbare Erhöhung der durchschnittlichen Erdoberflächentemperatur bezogen auf das Niveau vor Beginn der Industrialisierung.

Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ihre Emissionen bis 2020 um 25 bis 40 % und bis 2050 sogar um 80 bis 95 % reduzieren. Dies stellt eine schier unmögliche Herausforderung dar, wenn man bedenkt, dass Ereignisse, wie die momentan auftretenden Wirtschaftskrisen, Ressourcenknappheiten von Öl, Gas etc. und politische Konflikte die Ziele zweitrangig erscheinen lassen.

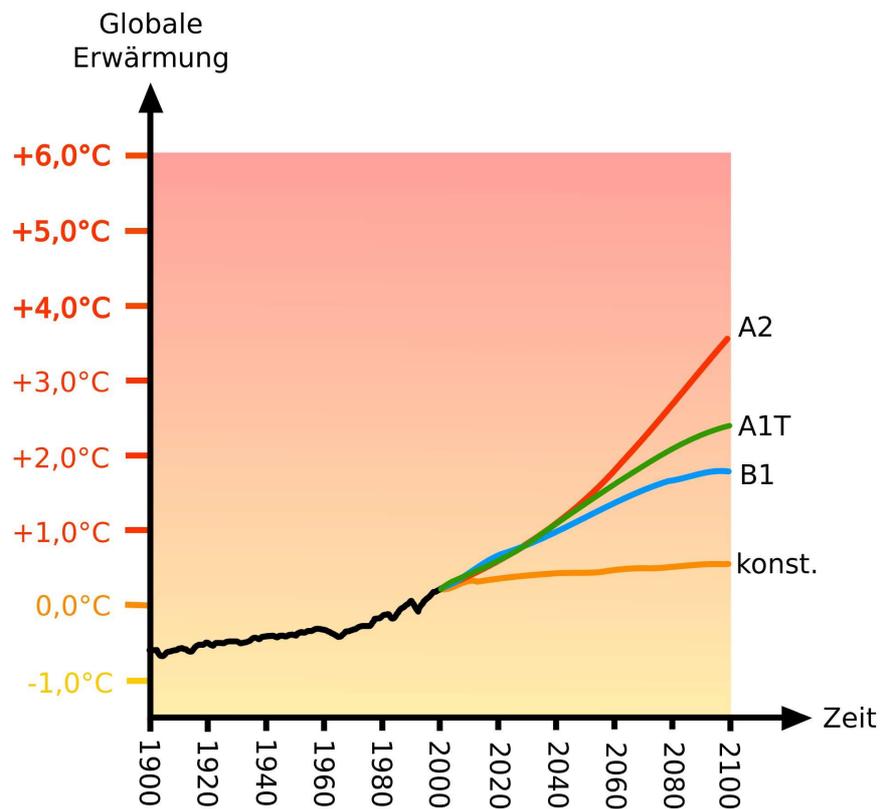


Abbildung 1.1: Geschätzte Mittelwerte für die Erwärmung der Erdoberfläche [15].

So stellt der vierte Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2007 [15] in seinen Prognosen auch eine eventuelle Verfehlung des 2°C Ziels für die Entwicklung im Jahr 2100 in Aussicht. Wie man aus Abbildung 1.1 sehen kann sind je nach Szenario die Schätzungen der Mittelwerte für die Erwärmung der Erdoberfläche angegeben. So liegt die beste Schätzung für das niedrigste Szenario (B1) bei 1,8°C und die beste Schätzung für das höchste Szenario (A2) bei 4°C. Die Orange Linie gibt die Entwicklung der Temperaturerwärmung an, wenn die Treibhaus-Konzentration aus dem Jahr 2000 konstant bleiben würde. Wie man aus diesem Bericht sieht ist der Handlungsbedarf in der Klimapolitik unausweichlich, um die Sicherheit der nachfolgenden Generationen auf diesem Planeten zu gewährleisten.

Laut [8] lässt sich seit den letzten 20 Jahren aufgrund von Energiesparmaßnahmen und dem Einsatz erneuerbarer Energien ein Stagnieren des Primärenergieverbrauches in Deutsch-

land und vor allem in Europa feststellen. Der **Strom**verbrauch steigt dagegen im Mittel weiter an und wächst jährlich mit ca. 0,5%. Diese Entwicklung ist sehr positiv zu beurteilen, da sich das Blatt des Klimaproblems durch den intensiven Ausbau der erneuerbaren Energieträger zu wenden scheint. Aufgrund des stets dynamischen Verlaufs der Natur (Tag-Nacht Wechsel, Exzentrizität der Umlaufbahn usw.) erweist sich der resultierende Verlauf der Auslastung der Leitungen als stark fluktuierend, was jedoch einen großen Nachteil darstellt. So erreicht etwa eine durchschnittliche netzgekoppelte Windenergieanlage eine Volllaststundenanzahl von 1400-3200 h/a und eine Photovoltaikanlage gar nur eine Volllaststundenanzahl von 800-1020 h/a [11].

Mit anderen Worten kann man sagen, dass es immer schwieriger wird die Belastungsprofile der Netzinfrastruktur in den Griff zu bekommen, da sich kurzzeitig hohe Auslastungsspitzen einstellen können. Um Überlastungen der einzelnen Komponenten ausschließen und dennoch die Leitungen ökonomisch betreiben zu können, wird es notwendig werden, gezieltes Temperatur-Monitoring durchzuführen und durch geeignete Maßnahmen, wie Verwendung von Hochtemperaturmaterialien die Grenzen in den Griff zu bekommen. Durch die Erkenntnisse von transienten thermischen Modellierungen sollen die bisherigen Materialgrenzen erkannt werden. Prinzipiell ist aber schon alleine die Tatsache interessant, dass in den heute verlegten Kabel- und Leitungssystemen ein enormes ungenutztes Potential schlummert, welches es für die Zukunft zu nutzen gilt und nicht durch stupiden Leitungsneubau zu verschwenden.

So ist etwa in [10] von einer deutlichen Überdimensionierung des deutschen Stromnetzes die Rede. Der Professor für Wirtschaftswissenschaften an der Hochschule Rhein-Main Prof. Dr. Lorenz Jarass meint hierzu in einer Stellungnahme zum Entwurf des deutschen Netzausbau 2012, dass anstelle eines Netzausbaues ein selektiver Netzbau deutlich effizienter wäre. So würden Einsparungen von 25 bis 50% möglich sein. Unter dem Slogan des *Repowering bestehender Leitungen* soll dieses Konzept vorangetrieben werden.

Diese ungenutzten Potentiale stellen die Motivationsgrundlage dieser Arbeit dar. Für die Sicherstellung des westlichen Lebensstandards ist eine Versorgung mit Strom einfach notwendig. Andererseits muss die Zukunft des Planeten durch die Reduktion des  $CO_2$ -Ausstoßes gesichert werden um die vorläufigen Klimaziele bis 2050 nicht völlig zu verfehlen. Diese Ziele sind aber nur in Kombination mit dem Ausbau erneuerbarer Energieträger vereinbar, welche ihrerseits wiederum eine Neuaufstellung der Netzstruktur verlangen. Diese Arbeit soll hierzu einen Beitrag leisten und so vielleicht zukünftige Entscheidungen in eine ökonomisch aber auch ökologisch richtige Richtung lenken.



## 2 Aufbauelemente für isolierte Kabel und Leitungen

Kabel und Leitungen für Starkstrom müssen in vielerlei Hinsicht einer hohen Anzahl an Anforderungen gerecht werden. Trotz unterschiedlicher Standard- und Sonderbauarten lässt sich zur Erfüllung der Funktionen die Struktur des Kabels bzw. der Leitung auf vier verschiedene Aufbauelemente reduzieren [6]:

- Der *Leiter* zur Stromübertragung (vgl. Kapitel 2.1)
- Eine *Isolierung* zur Aufrechterhaltung der Spannung (vgl. Kapitel 2.2)
- *Abschirmung* zur Feldbegrenzung und zum Führen der Ableit-, Lade- und Fehlerströme (vgl. Kapitel 2.3)
- *Schützende Aufbauelemente*, wie metallene und nichtmetallene Schutzhüllen (vgl. Kapitel 2.4 und 2.5).

In den nachfolgenden Kapiteln soll nun je nach Aufgabe und Einsatzort die richtige Wahl der Werkstoffe und Konstruktion der Aufbauelemente erörtert werden.

### 2.1 Leiter

Die Auswahl bezüglich des Werkstoffes für den Leiter stellt bereits zu Beginn der Projektierung eines Kabels oder Leiters wichtige Weichen für die späteren Betriebseigenschaften. Nachfolgend sollen die zwei wichtigsten Leitertypen, nämlich Kupfer und Aluminium, besprochen werden.

#### 2.1.1 Eigenschaften und Aufbau der Leiter

Bei Starkstromleitungen bestehen die Leiter hauptsächlich aus Kupfer (*Cu*) und Aluminium (*Al*). In IEC 60028 und IEC 60111 wird der Normwert des spezifischen Widerstandes der Leiter für Leitzwecke bei 20 °C sowie dessen Temperaturkoeffizient angegeben. Mit

diesen Werten wird die Temperaturabhängigkeit des Leiterwiderstandes bei der Berechnung berücksichtigt. Tabelle 2.1 zeigt diese Werte für Kupfer und Aluminium sowie deren spezifische Dichten und elektrische Leitfähigkeit.

Tabelle 2.1: Vergleich der Eigenschaften von Kupfer- und Aluminiumleitern [5].

Leiterwerkstoff:		Kupfer ( <i>Cu</i> )	Aluminium ( <i>Al</i> )	Einheit
Spez. Widerstand (20 °C)	$\rho_{20}$	0,017 241	0,028 264	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Temperaturkoeffizient (20 °C)	$\alpha_{20}$	$3,93 \times 10^{-3}$	$4,03 \times 10^{-3}$	1/K
Elektr. Leitfähigkeit (20 °C)	$\kappa_{20}$	58	35,4	$\text{m}/(\Omega \text{ mm}^2)$
Dichte	$d$	8,9	2,7	$\text{kg}/\text{dm}^3$
Spezifische Wärmekapazität	$c$	0,385	0,9	J/(g K)

Die Querschnittangaben in den Bestimmungen und Listen sind Nennwerte. Es wird folglich beim Leiterquerschnitt grundsätzlich *nicht* der geometrische, sondern der elektrisch wirksame Querschnitt angegeben, welcher durch Messung des elektrischen Widerstandes ermittelt wird. Die Gleichstromwiderstände entsprechen deshalb auch nicht den Werten, die sich bei Berechnung mit dem Nennquerschnitt und den spezifischen Widerständen ergeben würden. Für die Bemessung und für das Prüfen des Kabels sind daher stets die entsprechend der in der Fachliteratur angegebenen Werte zu verwenden.

### 2.1.2 Leiter für Kabel

Die Leiter unterscheiden sich in zwei Punkten. Als erster Punkt ist die Form des Leiters zu nennen. Neben runden (R) Leitern gibt es weiter noch sektorförmige (S), hohle (H) und ovale (O) Leiter. Hohlleiter besitzen dabei meist einen im Zentrum liegenden Ölkanal. Der zweite Punkt betrifft die Art des Leiters. Dieser kann ein- (E) oder mehrdrähtig (M) ausfallen. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die üblichen Leiterarten für Starkstromkabel. [9]

Die Leiter sollen aufgrund ihrer Beschaffenheit je nach Einsatzgebiet eine gute Ausnutzung des Kabelquerschnittes sicherstellen und dennoch ausreichende mechanische Eigenschaften aufweisen. Deshalb wird bei größeren Querschnitten mit Augenmerk auf die Biegebarkeit der Leiter mehrdrähtig ausgeführt und zur Minimierung der Hohlräume diese noch weiter verdichtet. Bei mehradrigen Kabeln werden die Leiter üblicherweise sektorförmig ausgeführt, was aufgrund der höheren Feldbeanspruchungen jedoch bis maximal 15 kV möglich ist.

Tabelle 2.2: Leiterarten für Starkstromkabel im Überblick nach [9].

Leiterform und Art						
Kurzzeichen	RE	SE	RM	SM	H	OM
Werkstoff	zulässiger Querschnittbereich der Leiter in mm <sup>2</sup>					
Kupfer	1,5-16	-	ab 25	35-400	ab 95	ab 95
Aluminium	25-150	50-240	ab 25	50-400	ab 95	ab 95
Kabelart	zulässig bis zu einer Kabelspannung $U_0/U$ in kV					
Massekabel	-	0,6/1	alle	6/10	-	-
PVC-Kabel	0,6/1	3,6/6	alle	3,6/6	-	-
VPE-Kabel	0,6/1	6/10	alle	6/10	-	-
Ölkabel	-	-	-	-	alle	alle
Gasaußendruckkabel	-	-	-	-	-	alle
Gasinnendruckkabel	-	-	alle	-	-	alle

## 2.2 Isolierungen

Als Isolierungsmaterial bei Kabeln und Leitungen sind hauptsächlich *Polymere* in Verwendung. Vor allem im Hochspannungsbereich wird bei Kabeln aber auch weiterhin *getränktes Papier* verwendet, welches in den anderen Spannungsebenen durch die Kunststoffe bereits vollständig abgelöst wurde.

Man klassifiziert die technisch wichtigsten Polymere nach ihren physikalischen Eigenschaften in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste. Tabelle 2.3 zeigt eine Gegenüberstellung dieser drei Typen und deren Beschaffenheiten nach [6].

Tabelle 2.3: Wichtige Polymere für Isolierungen [6].

POLYMERE		
THERMOPLASTE	ELASTOMERE	DUROPLASTE
Nichtvernetzte Kunststoffe, die bei höheren Temperaturen reversibel plastisch verformbar sind, d. h., die nach Abkühlung und erneutem Aufschmelzen nicht aushärten.	Vernetzte kautschukartige Polymere, die bei Gebrauchstemperatur gummielastische Eigenschaften aufweisen und auch bei höherer Temperatur nicht mehr plastisch verformbar sind.	Vernetzte, aus härtbaren Harzen hergestellte formstabile Kunststoffe.

Heutzutage können die meisten Isolierwerkstoffe synthetisch hergestellt werden. Nur bei den Elastomeren haben Naturprodukte, wie z. B. Kautschuk, noch eine gewisse Bedeutung. Durch die Anwendung der Polymere entstehen folgende Vorteile für die Kabel- und Leitungstechnik:

- schnellere und saubere Montage
- geringeres Gewicht
- höhere Belastbarkeit
- niedrigere stromabhängige und dielektrische Verluste
- keine Masseabwanderung bei Verlegung im Gefälle wegen der Eigenschaft als Feststoffdielektrikum

Nachfolgend werden nur die für diese Arbeit wichtigsten Isolierstoffe PVC, PE und VPE näher behandelt. Für weiterführende Informationen über getränktes Papier und andere in Verwendung befindliche Kunststoffe wird auf die Fachliteratur verwiesen.

### 2.2.1 Thermoplaste

Thermoplaste sind bei Umgebungstemperatur formfest, fangen jedoch bei höheren Temperaturen viskos zu fließen an. Sie sind somit reversibel plastisch verformbar. Dieser Temperaturbereich hängt wiederum stark vom Material und unter anderem auch maßgeblich von der Länge der Makromoleküle ab, welche durch die Wahl der Polymerisationsbedingungen in bestimmten Bereichen gesteuert werden kann.

#### Polyvinylchlorid (PVC)

Ausgangsstoff für PVC ist das Vinylchlorid, welches heute meist durch Chlorierung von Ethylen hergestellt wird. In der Kabel- und Leitungstechnik verwendet man im Normalfall PVC, welches nach dem Suspensionsverfahren gewonnen wird. Da bei reiner Polymerisation von Vinylchlorid das nicht einsatzfähige Hart-PVC entsteht, werden durch Beigabe von diversen Zusatzstoffen die thermischen und mechanischen Eigenschaften gezielt beeinflusst und festgelegt. Diese Zusatzstoffe sind Weichmacher, Stabilisatoren, Füllstoffe und Gleitmittel, die vor allem der Verarbeitung im Extruder dienen. In diesem Extruder (Schneckenpresse) wird das Granulat erwärmt und als Isolierung um den Leiter und/oder als Mantel um die Kabelseele gepresst.

Die größten Vorteile von PVC sind:

- mechanische Robustheit
- Unempfindlichkeit gegenüber Wasser im Vergleich zu Papier-Massekabeln
- Selbstlöschend und flammwidrig wegen Chloranteil

PVC ist für Betriebstemperaturen bis zu 70 °C geeignet. Für Leitungen kann es aber auch für höhere Temperaturen stabilisiert werden. Bei Verwendung unter  $-5\text{ °C}$  neigt PVC zur Versprödung, was aber durch Zusatz kältefester Weichmacher behoben werden kann. Durch den hohen dielektrischen Verlustfaktor und der starken Temperaturabhängigkeit eignet sich PVC allerdings nur bedingt für die Verwendung im Mittelspannungsverteilnetz. Hier werden bevorzugt VPE-isolierte Kabel verwendet, die im nachfolgenden Abschnitt 2.2.2 näher behandelt werden. Kabel und Leitungen mit PVC-Isolierung werden deshalb hauptsächlich in Niederspannungsverteilnetzen und in der Gebäudeinstallation verwendet. Beachten sollte man hierbei die hohe Rauchentwicklung im Brandfall und die Entstehung von Brandgasen durch die Abspaltung von Chlor. Deshalb sollte bei Installationen mit erhöhten Anforderungen auf halogenfreie Leitungen zurückgegriffen werden.

### **Polyethylen (PE)**

Polyethylen hat von allen Kunststoffen die einfachste Struktur. Es weist ähnliche Eigenschaften wie PVC auf und kann ebenfalls mit einer Temperatur bis 70 °C betrieben werden. Im Vergleich zu PVC besitzt es allerdings deutlich bessere dielektrische Eigenschaften, weshalb es auch lange Zeit als Isolierung von Starkstromkabel in Verwendung war. Heutzutage ist es jedoch nur mehr in der vernetzten Ausführung in Gebrauch. PE ist im Gegensatz zu PVC halogenfrei, leicht brennbar und verlöscht im Vergleich zu PVC auch nicht von selbst.

#### **2.2.2 Vernetzte Thermoplaste**

Polyethylen und Ethylen-Copolymere haben in der Kabeltechnik einen besonderen Stellenwert erlangt. Diese Thermoplaste können durch organische Peroxide bzw. energiereiche Strahlen vernetzt werden.

Zweck der Vernetzung ist die Verknüpfung der linearen Kettenmoleküle von Thermoplasten zu einem dreidimensionalen Netzwerk. Durch dieses Verfahren entstehen Werkstoffeigenschaften die bei Temperaturen über dem Kristallitschmelzpunkt elastomere Eigenschaften aufweisen. Dadurch werden selbst unter großer Wärmebeanspruchung die Formbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften verbessert. So sind weitaus höhere Leitertemperaturen gegenüber Thermoplasten im ungestörten Betrieb und im Kurzschlussfall möglich.

### Vernetztes Polyethylen (VPE)

Die Vernetzung von Polyethylen wird im wesentlichen durch drei Verfahrensvarianten erlangt:

- Vernetzung durch Peroxide
- Vernetzung durch Elektronenbestrahlung
- Vernetzung durch Siloxanbrücken

Eine ausführliche Beschreibung dieser Verfahren sei an dieser Stelle der Fachliteratur vorbehalten.

Vorwiegend wird VPE für Verteilungskabel in allen Spannungsebenen verwendet. Vor allem in Netzen mit Kompensation der Erdschlussströme ist VPE durch einen niedrigen Verlustfaktor und eine von der Temperatur nahezu unabhängige Kapazität ausgezeichnet. Die zulässige Leitertemperatur liegt bei 90 °C im ungestörten Betrieb und 250 °C im Kurzschlussfall. Das Material ist halogenfrei, leicht brennbar und besitzt einen hohen Ausdehnungskoeffizienten, was besonders bei der Auswahl der Garniturtechnik und bei angrenzenden Materialien wie z.B. bei Verlegung in Beton zu berücksichtigen ist. VPE ist empfindlich gegenüber UV-Strahlung, wodurch bei Anschluss an Freiluftanlagen entsprechende Maßnahmen (Schrumpfschlauch) getroffen werden müssen.

Abschließend wird in Tabelle 2.4 ein Überblick über die Eigenschaften der wichtigsten Kabelisolierstoffe nach [1, 5] gegeben.

Tabelle 2.4: Eigenschaften der wichtigsten Kabelisolierstoffe nach [1, 5].

	Polyvinylchlorid (PVC)	Polyethylen (PE)	vernetztes Polyethylen (VPE)	ölgetränktes Papier
Permittivitätszahl $\epsilon_r$ bei 20 °C	3,5 bis 5	2,3 bis 2,4	2,4	4 bis 4,3
Verlustzahl $\epsilon_r''$ bei 20 °C	0,2 bis 0,4	$(5 \text{ bis } 7) \times 10^{-4}$	$< 6 \times 10^{-4}$	$(2 \text{ bis } 4) \times 10^{-3}$
spezifischer Wärmewiderstand $\rho$ in K m/W	4,35	3,5	3,5	6,0
zulässige Betriebstemperatur in °C	70	70	90	65

## 2.3 Elektrische Schirmung

Ob und vor allem welche Art der elektrischen Schirmung bezüglich der verschiedenen Kabelbauarten zu verwenden ist, hängt hauptsächlich von der Nennspannung ab. Diese bestimmt die Höhe der elektrischen Beanspruchung und die Empfindlichkeit des Isolierwerkstoffes gegenüber Teilentladungen. Die elektrische Schirmung erfüllt folgende Aufgaben nach [6] :

- Homogenisierung des elektrischen Felds
- Potentialsteuerung und Begrenzung des elektrischen Felds
- Vermeidung von Teilentladungen an den Oberflächen der Isolierung
- Fortleitung von Ableit- und Ladeströmen
- Schutz gegen gefährliche Berührungsspannung (Berührungsschutz)

Je nach Nennspannung ergeben sich somit notwendige, aus leitfähigen Materialien aufbauende Schirmungsschichten. Durch Aufbringen einer leitfähigen Schirmung über jeder Ader erhält man einen radialen Verlauf der Feldlinien zwischen Leiter und Schirmung. Solche Maßnahmen verhindern eine höhere Beanspruchung der Isolierung. Ab gewissen Nennspannungen, die den Tabellen der Fachliteratur zu entnehmen sind, wird eine sogenannte innere (unter der Isolierung) und eine äußere (über der Isolierung) Leitschicht hinzugefügt.

### 2.3.1 Kabel mit Papierisolierung

Bei Kabeln mit Papierisolierung wird die innere Leitschicht aus mehreren Lagen Karbon- bzw. Rußpapier aufgebaut. Die äußere Leitschicht besteht meist aus metallisiertem Papier, auch Höchststädter-Folie (H-Folie) genannt.

### 2.3.2 Kabel mit PVC-Isolierung

Die innere Leitschicht von heute nicht mehr gebräuchlichen Mittelspannungskabeln bestand aus einer PVC-Mischung mit hohem Rußgehalt. Die äußere Leitschicht wurde bevorzugt mit einem elastischen, leitfähigen Kleber, welcher eine Abdeckung aus leitfähigen Bändern besaß, aufgebaut.

### 2.3.3 Kabel mit VPE-Isolierung

Sowohl die innere als auch die äußere Leitschicht bestehen in der Regel aus Ethylen-Copolymeren mit homogen verteiltem Leitruß, welche zusammen mit der Isolierung in einem Arbeitsschritt extrudiert werden. Dies ist notwendig um eine spalt- und hohlraumfreie Verbindung zu schaffen, da VPE im Vergleich zu PVC eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Teilentladungen besitzt.

## 2.4 Metallene Hüllen

Um die zu erwartenden Erdschluss-, Erdkurzschluss- und Doppelerdschlussströme führen zu können, werden metallene Aufbauelemente verwendet. Je nach Bauart sind dies nach [6]:

- eine Lage Kupferdraht mit Querleitwendel über den verseilten Adern
- eine Lage Kupferdraht mit Querleitwendel oder Kupferband über jeder einzelnen Ader
- ein Metallmantel (z. B. bei papierisolierten Kabeln) über jeder Ader oder über den verseilten Adern
- eine Stahldrahtbewehrung (z. B. bei Kunststoffkabeln) über den verseilten Adern

Zu beachten ist hierbei auch, dass die metallenen Aufbauelemente einen galvanischen Kontakt mit den darunterliegenden leitfähigen Schichten besitzen müssen, der entweder direkt oder über leitfähige Polster hergestellt wird.

## 2.5 Nichtmetallene Hüllen

Es kann abhängig von der Position der nichtmetallinen Hüllen zwischen innerer und äußerer Schutzhülle unterschieden werden. Sie können aus

- einer extrudierten Hülle aus Kunststoff oder Gummi,
- aus getränkten Faserstoffen (Kunstfasern oder Jute),
- ein oder mehreren Lagen von Kunststoffbändern, Vliesen, getränkten Textil- oder Papierbändern

bestehen. Für nähere Angaben, Ausführungen und Verwendung von Schutzhüllen sei an dieser Stelle wiederum auf die Fachliteratur, wie z. B. [6], verwiesen.

## 3 Thermische Modellierung eines Kabels

### 3.1 Allgemeines

Die Verluste eines Kabels bzw. einer Leitung setzen sich ganz allgemein aus den in den Leitern erzeugten Stromwärmeverlusten, den Verlusten in den metallenen Hüllen (bei Betrieb mit Wechselstrom) und den dielektrischen Verlusten zusammen. Diese Verluste sorgen für einen Temperaturanstieg, der die höchstzulässigen Werte für den Dauerbetrieb der Isolierung nicht überschreiten darf. Dabei werden die dielektrischen Verluste bei PVC-isolierten Kabeln bis  $U_0/U=3,6/6$  kV, bei Papier-Massekabeln bis  $U_0/U=18/30$  kV und bei VPE-isolierten Kabeln bis  $U_0/U=64/110$  kV vernachlässigt [9].

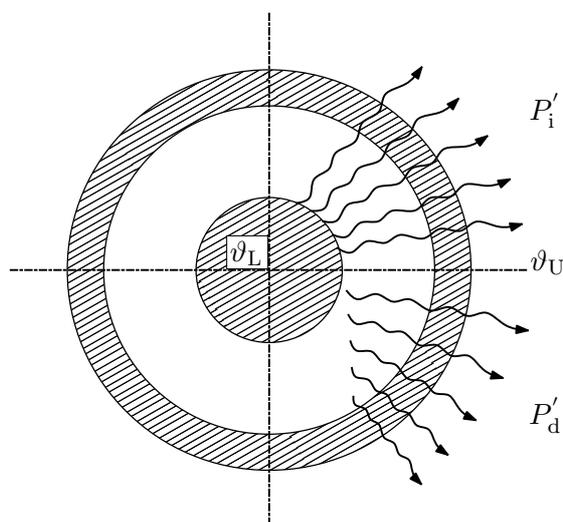


Abbildung 3.1: Koaxialer Zylinderleiter mit Feststoffisolierung. Eingezeichnet sind die Stromwärmeverluste und die dielektrischen Verluste nach [5].

Im stationären Zustand ist die abgeführte Wärme gleich groß der Summe aller Verluste im Kabel. Dabei strömt die Verlustwärme durch Wärmeleitung an die Kabeloberfläche und wird bei Verlegung in Luft von dort durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgegeben. Bei Verlegung in Erde fließt die Verlustwärme durch Wärmeleitung über den Erdboden in die angrenzende Atmosphäre. Abbildung 3.1 zeigt zur Veranschaulichung die

Entstehung der Stromwärmeverluste  $P'_i$  und der dielektrischen Verluste  $P'_d$  [5]. Abbildung 3.2 zeigt den qualitativen Verlauf der Temperatur im Kabelmaterial für  $\vartheta_L > \vartheta_U$ .

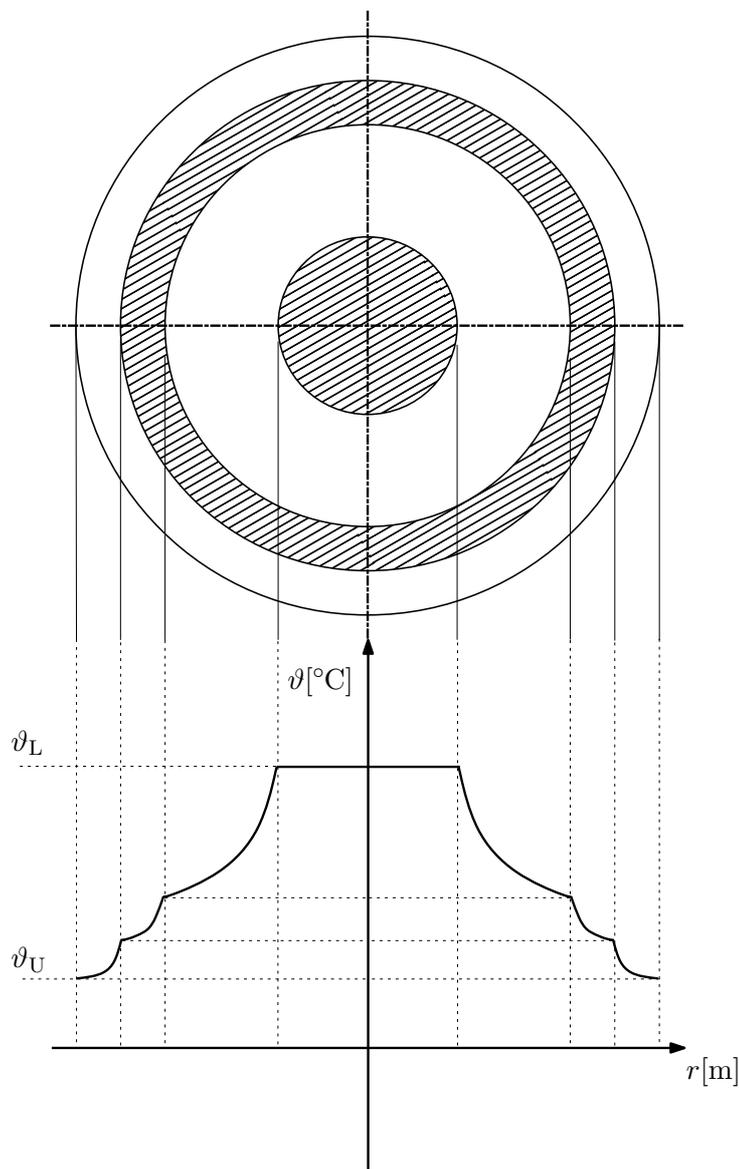


Abbildung 3.2: Qualitativer Temperaturverlauf im Kabelmaterial.

Für den entstehenden Wärmestrom kann man ein Gesetz angeben, welches dem Ohmschen Gesetz sehr ähnlich ist. Dabei entspricht die elektrische Spannung  $U$  der Erwärmung  $\Delta\vartheta_L$ , der elektrische Strom  $I$  dem Wärmestrom  $\Phi$  und der elektrische Widerstand  $R$  der Summe der Wärmewiderstände  $\Sigma T$ . Zusammenfassend ergibt sich nachfolgende Analogie in Gleichung 3.1 und Abbildung 3.3:

$$U = I \cdot R \quad \triangleq \quad \Delta\vartheta_L = \Phi \cdot \Sigma T \quad (3.1)$$

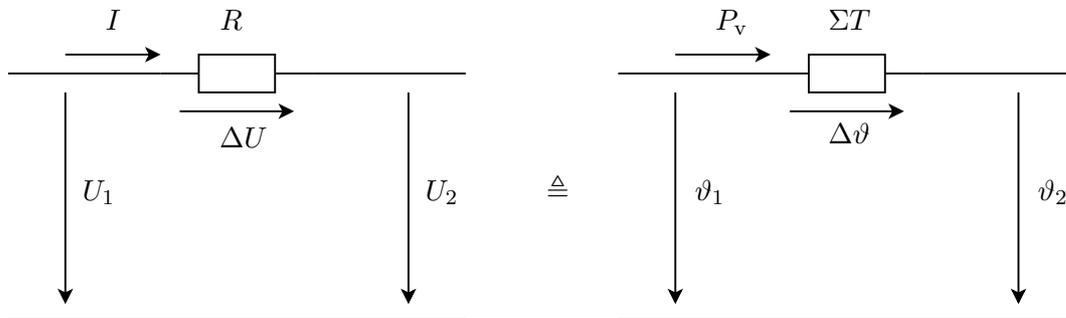


Abbildung 3.3: Analogien zur Erwärmungsberechnung.

Der Wärmestrom  $\Phi$  besteht aus der Summe der im Kabel auftretenden Stromwärmeverluste  $P'_i$  und den spannungsabhängigen dielektrischen Verlusten  $P'_d$ . Um die Wärme von ihrem Erzeugungsort abführen zu können, müssen die Wärmewiderstände der Isolierung ( $T'_1$ ), der inneren ( $T'_2$ ) und der äußeren Schutzhülle bzw. des Mantels ( $T'_3$ ) und der Umgebung ( $T'_4$ ) überwunden werden. Dabei kann je nach Verlegungsart für den Umgebungswiderstand  $T'_4$  entweder der Wärmewiderstand des Erdbodens  $T'_E$  oder der Luft  $T'_{Lu}$  eingesetzt werden<sup>1</sup>.

Aufgrund der soeben erläuterten Analogie zwischen Wärmestrom und dem elektrischen Strom kann man einen aus der Elektrotechnik bekannten Ersatzschaltplan für die in den Kabeln entstehenden Verluste aufstellen (Abb. 3.4). Wie bereits erwähnt, wird für den Umgebungswiderstand  $T'_4$  bei Verlegung in Erde der Erdbodenwiderstand in Serie mit dem Kabelwiderstand geschaltet (Abb. 3.4(a)). Bei Verlegung in Luft wird der Wärmewiderstand, in Folge von Konvektion und Strahlung, durch zwei parallele Widerstände anstatt eines Umgebungswiderstandes berücksichtigt und wiederum in Reihe mit dem Kabelwiderstand geschaltet (Abb. 3.4(b)). Diese beiden Ersatzanordnungen bilden nun die weitere Grundlage für das Erarbeiten eines thermischen Modells für diese Arbeit.

Die Stromwärmeverluste  $P'_i$  entstehen an sich im Leiter und, bei Vorhandensein eines Metallmantels und einer Bewehrung, auch in diesen beiden Bereichen. Die spannungsabhängigen, dielektrischen Verluste  $P'_d$  entstehen verteilt in der Isolierung. Diese Verluste werden als Wärmeströme dargestellt und der Schaltung zugeführt, *fließen* über die Widerstände und werden schließlich als Gesamtverluste an den umgebenden Raum wieder abgegeben. Dabei wird die Leitertemperatur  $\vartheta_L$  und die Oberflächentemperatur des Kabels

<sup>1</sup>Das hochgestellte Zeichen ' soll andeuten, dass die Parameter auf die Einheitslänge bezogen wurden. Dies gilt auch für die nachfolgend auftretenden Parameter.

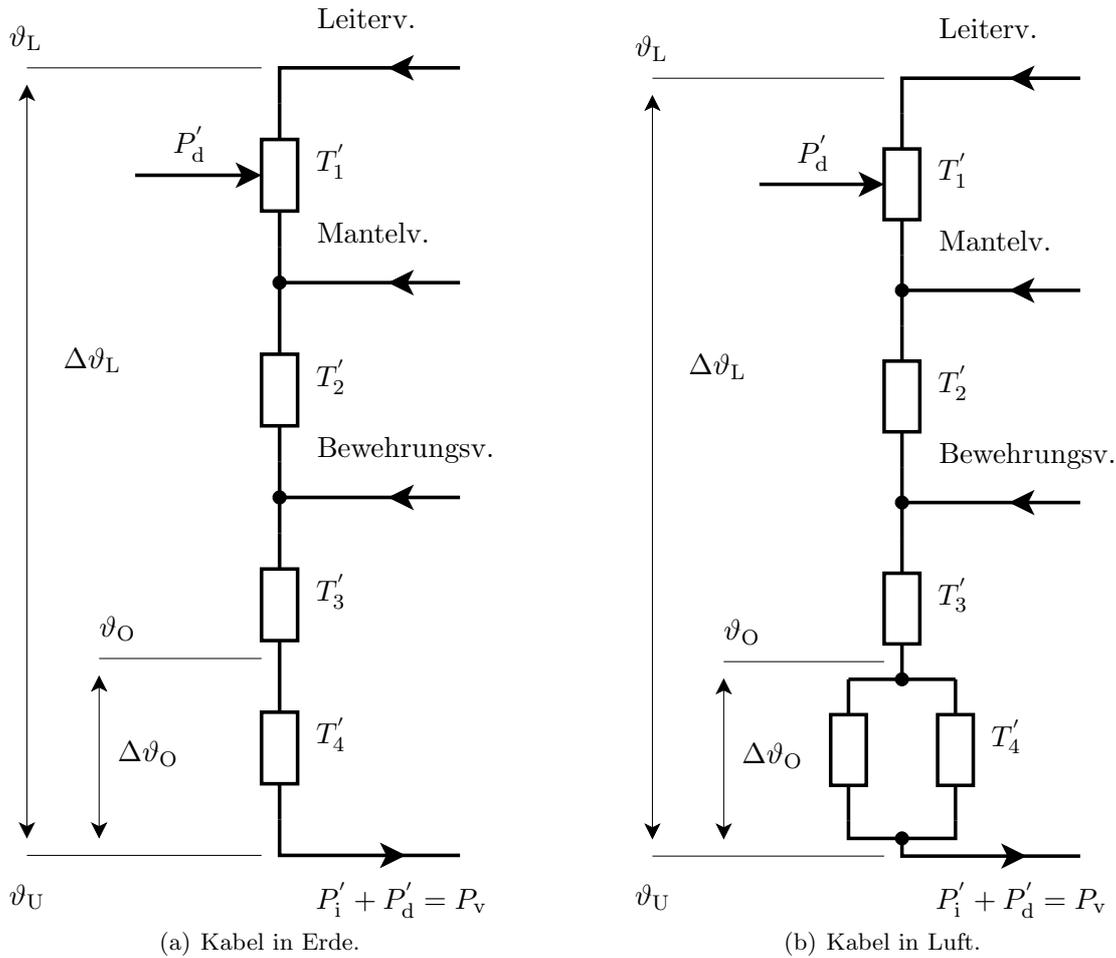


Abbildung 3.4: Ersatzschaltplan für den Wärmestrom bei Verlegung direkt in Erde und frei in Luft nach [6].

$\vartheta_O$  jeweils um  $\Delta\vartheta_L$  bzw. um  $\Delta\vartheta_O$  gegenüber der Umgebungstemperatur  $\vartheta_U$  erhöht. Dieses Temperaturgefälle ist eine wichtige und zwingende Voraussetzung für eine selbstständig ablaufende Wärmeübertragung. Nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre kann nämlich Energie in Form von Wärme nur dann von einem kälteren auf einen wärmeren Stoffbereich übergehen, wenn dieser Vorgang durch mechanische Arbeit erzwungen wird (vgl. [2]). Eine von selbst ablaufende Wärmeübertragung kann somit nur von Zonen höherer Temperatur zu Zonen niedrigerer Temperatur ablaufen.

Man erhält nun für ein Kabel mit  $n$  stromdurchflossenen Adern, welche einen Wirkwiderstandsbelag  $R'_{\text{wr}}$  besitzen, die Stromwärmeverluste mit der Gleichung

$$P'_i = n \cdot I^2 \cdot R'_{\text{wr}} \quad (3.2)$$

und die dielektrischen Verluste mit

$$P'_d = n \cdot \omega \cdot C'_b \cdot \left( \frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \tan \delta. \quad (3.3)$$

Zusammen bilden sie die resultierenden Gesamtverluste  $P_v = P'_i + P'_d$ .

## 3.2 Elektrische Kenndaten

### 3.2.1 Widerstandsbelag des Leiters

Der messbare Wirkwiderstand eines Leiters unterscheidet sich in seinem Wert je nachdem ob dieser bei Gleichstrom oder Wechselstrom betrieben wird. Die Erhöhung bei Wechselstrom wird im Wesentlichen durch die Faktoren des Hauteffektfaktors (Skin-Effekt) und des Näheeffektfaktors (Proximity-Effekt) berücksichtigt. Zusätzlich entstehen aber auch noch weitere Stromwärmeverluste in den Metallmänteln, Schirmen, im konzentrischen Leiter und der Bewehrung, die durch die Faktoren  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  ausgedrückt werden.

Der Widerstandsbelag des Leiters bei Gleichstrom und bei der zulässigen Betriebstemperatur  $\vartheta_{Lr}$  ist

$$R'_{\vartheta_{Lr}} = R'_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_{Lr} - 20)]. \quad (3.4)$$

Der Widerstandsbelag für Wechselstrom wird entsprechend der bereits erwähnten Effekte des Haut- ( $\gamma_s$ ) und Näheeffektes ( $\gamma_p$ ), sowie der Verluste aufgrund der Wirbelströme und Ummagnetisierungsverluste berücksichtigten Faktoren  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  gebildet. Diese Faktoren bilden zusammen den Zusatzwiderstandsbelag  $\Delta R'$ . Somit ist der gesamte Wirkwiderstandsbelag

$$R'_{wr} = R'_{\vartheta_{Lr}} + \Delta R' = R'_{\vartheta_{Lr}} \cdot (1 + \gamma_s + \gamma_p) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2). \quad (3.5)$$

Die Gleichstromwiderstände der Leiter bei 20 °C,  $R'_{20}$  sind genormt und der einschlägigen Fachliteratur (vgl. [6]), sowie der aktuell gültigen Norm zu entnehmen. Die Werte weichen leicht von den rechnerischen Werten der nachfolgenden Gleichung mit dem Nennquerschnitt  $q_n$  ab

$$R'_{20} = \frac{\rho_{20}}{q_n}. \quad (3.6)$$

Für genauere Erläuterungen zu den Hauteffektfaktor, Näheeffektfaktor, sowie zu den Mantel-, Schirm- und Bewehrungsverlustfaktoren, sei an dieser Stelle auf [6] sowie auf weitere Fachliteratur verwiesen, da sie in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle spielen und somit vernachlässigt werden.

### 3.2.2 Induktivitätsbelag

Die Induktivitätsbeläge von Kabeln ohne Erdstrom lassen sich aus denen einer Schleife aus parallelen Leitern mit Hilfe der mittleren geometrischen Abstände ableiten [9]. Für eine aus zwei parallelen, massiven runden Leitern gebildete Schleife ergibt sich der Induktivitätsbelag zu

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\bar{a}}{g_L}. \quad (3.7)$$

Im einfachsten Fall entspricht dabei der mittlere geometrische Abstand  $\bar{a}$  dem tatsächlichen Achsenabstand und der mittlere geometrische Radius  $g_L$  wird bei gleichmäßiger Stromdichte zu

$$g_L = r_0 \cdot \exp^{-\frac{1}{4}}. \quad (3.8)$$

### 3.2.3 Kapazitätsbelag

Die Formeln für die Betriebskapazitätsbeläge  $C'_b$  im Mit- und Gegensystem von Kabeln wird im Allgemeinen aus Tabellen laut Norm entnommen. Die Genauigkeit bei der Berechnung wird im Wesentlichen durch die Fertigungstoleranzen und vor allem bei Kabeln mit nicht radialem Feld durch Schwankungen in der Permittivität  $\varepsilon_r$  beeinflusst. Der im einfachsten Falle sich ergebende Betriebskapazitätsbelag von einadrigen Radialfeldkabeln ergibt sich zu

$$C'_b = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{\ln \frac{r_1}{r_0}}. \quad (3.9)$$

Wobei  $r_0$  den Radius der inneren Leitschicht bezeichnet und  $r_1$  den Radius der Isolierung. Bei Niederspannungskabeln wie NAYY liegen ähnliche Gegebenheiten wie bei einer Drehstromfreileitung vor. Der Wert der Betriebskapazität für NS-Netze liegt laut [8] bei ca.  $0,4 \mu\text{F}/\text{km}$ .

### 3.2.4 Ableitungsbelag

Der Ableitungsbelag ist der Kehrwert des Isolationswiderstandes. Dieser berechnet sich bei Radialfeldkabeln zu

$$G' = \frac{2\pi}{\rho_{120}} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}. \quad (3.10)$$

In dieser Formel ist  $\rho_{120}$  der spezifische Isolationswiderstand bei 20 °C, welcher in einschlägigen Tabellenbüchern bzw. Fachliteratur wie [9] gefunden werden kann.

### 3.2.5 Dielektrische Verluste

Der Strom  $I$  eilt der Spannung  $U$  in einem Dielektrikum nahezu um den Winkel  $\varphi \approx 90^\circ$  voraus. Diesen Sachverhalt stellt Abbildung 3.5 grafisch dar. Aufgrund von Polarisations- und Leitfähigkeitsverlusten weicht der Phasenwinkel  $\varphi$  nun aber um einen Verlustwinkel  $\delta$  von dem um  $90^\circ$  voreilenden Blindstrom  $I_C$  eines idealen verlustfreien Kondensators ab. Der Wirkstrom  $I_\delta$  ist in Phase mit der Spannung  $U$  und ergibt die im Dielektrikum umgesetzte Verlustleistung. Die Stromkomponente  $I_C$  eilt gegenüber  $U$  um  $90^\circ$  voraus und ergibt die kapazitive Blindleistung [12].

Für den Verlustwinkel  $\delta$  gilt

$$\tan \delta = \frac{I_\delta}{I_C}. \quad (3.11)$$

Der *Verlustfaktor*  $\tan \delta$  gibt somit auch das Verhältnis der dielektrischen Verlustleistung zur kapazitiven Blindleistung an.

Die dielektrischen Verluste treten erst ab höheren Spannungen merklich in Erscheinung und können deshalb im Niederspannungs- sowie teilweise im Mittelspannungsbereich vernachlässigt werden.

## 3.3 Wärmewiderstände

### 3.3.1 Wärmewiderstand des Kabels

Die einzelnen Wärmewiderstände des Kabels berücksichtigen die wärmedämmende Wirkung der Isolier- und Schutzhüllen. Diese sind aus den Aufbaudaten und den spezifischen Wärmewiderständen für Isolierung  $\rho_1$ , innerer Schutzhülle  $\rho_2$  und äußerer Schutzhülle  $\rho_3$

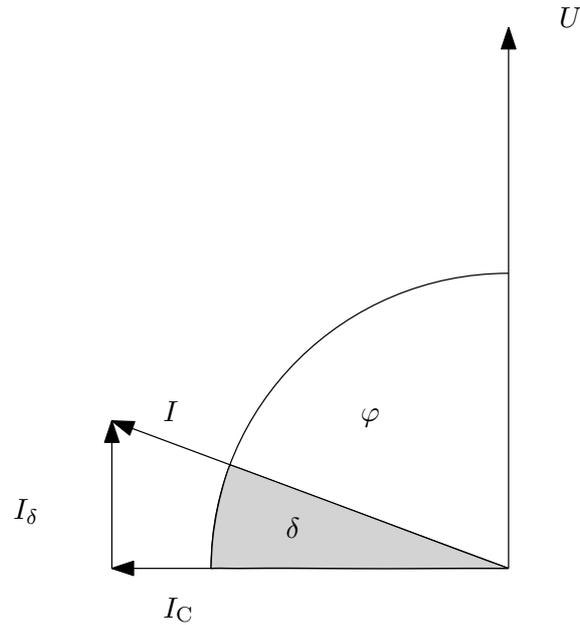


Abbildung 3.5: Zeigerdiagramm mit eingezeichnetem Verlustwinkel.

zu berechnen. Die einzelnen Leiterdurchmesser, Isolierdicken, Manteldicken etc. sind in den VDE-Vorschriften oder in den Herstellerlisten angegeben (vgl. [14]).

Allgemein kann man bei Annahme einer zur Kabelachse konzentrisch liegenden Leiteroberfläche den Wärmewiderstand zwischen Leiter- und Isolierungsoberfläche wie folgt berechnen. Der Wärmewiderstand der Isolation, welcher einen gewissen spezifischen Wärmewiderstand besitzt, kann als die Schichtung elementarer Wärmewiderstände der Länge  $dr$  und der Zylinderfläche  $A = 2\pi rl$  aufgefasst werden. Somit ergibt sich weiter der längenbezogene Wärmewiderstand der Isolation zu

$$T_1' = \int_{r=r_0}^{r_1} \frac{\rho_1}{2\pi} \cdot dr = \frac{\rho_1}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}. \quad (3.12)$$

Dabei stellen die Grenzschichten Isothermen dar. Die wärmedämmende Wirkung metalener Hüllen ist dabei so gering, dass sie in weiterer Folge vernachlässigt werden kann. Grund hierfür ist, dass Metalle sowohl gute elektrische als auch thermische Leiter sind. Die Werte für die spezifischen Widerstände werden innerhalb des zulässigen Betriebsbereiches als konstant angenommen und sind somit von der Temperatur unabhängig, was auch für die berechneten Wärmewiderstände gilt. Die Gleichungen für die innere und äußere Schutzhülle lassen sich in ähnlicher Weise wie für die Isolierung angeben und lauten somit

$$T_2' = \frac{\rho_2}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.13)$$

bzw.

$$T_3' = \frac{\rho_3}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2}. \quad (3.14)$$

Unter Berücksichtigung der in 3.2.1 erwähnten Mantelverlustfaktoren kann nun zusammenfassend der fiktive Wärmewiderstand  $T_{\text{Ki}}'$  angegeben werden, als

$$T_{\text{Ki}}' = \frac{\frac{T_1'}{n} + (1 + \lambda_1) \cdot T_2'}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} + T_3'. \quad (3.15)$$

Ferner kann ein fiktiver Wärmewiderstand  $T_{\text{Kd}}'$  unter Beachtung der dielektrischen Verluste angegeben werden. Hierbei gilt die Annahme dass die Verluste etwa in der Hälfte der Isolierung entstehen.

$$T_{\text{Kd}}' = \frac{T_1'}{2 \cdot n} + T_2' + T_3' \quad (3.16)$$

Abbildung 3.6 zeigt diese oben angeführten Wärmewiderstände und deren Abmessungen.

### 3.3.2 Wärmewiderstand der Luft

Die Wärmeabgabe bei waagrechter Verlegung eines Kabels in Luft erfolgt durch Strahlung und Konvektion. Im Ersatzschaltplan nach 3.4(b) wird somit der Wärmewiderstand der Umgebung als Wärmewiderstand der Luft dargestellt ( $T_4' = T_{\text{Lu}}'$ ). Dieser entsteht aus einer Parallelschaltung der entsprechenden Wärmewiderstände für Strahlung und Konvektion. Der Wärmewiderstand der Luft berechnet sich nach [9] zu:

$$T_{\text{Lu}}' = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot (f_k \cdot \alpha_k + f_s \cdot \alpha_s)}. \quad (3.17)$$

Für ein waagrecht, frei in Luft verlegtes Kabel, welches die Verluste ungehindert durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgeben kann, erhält man die Wärmeübergangszahl  $\alpha_k$ , für die Konvektion zu

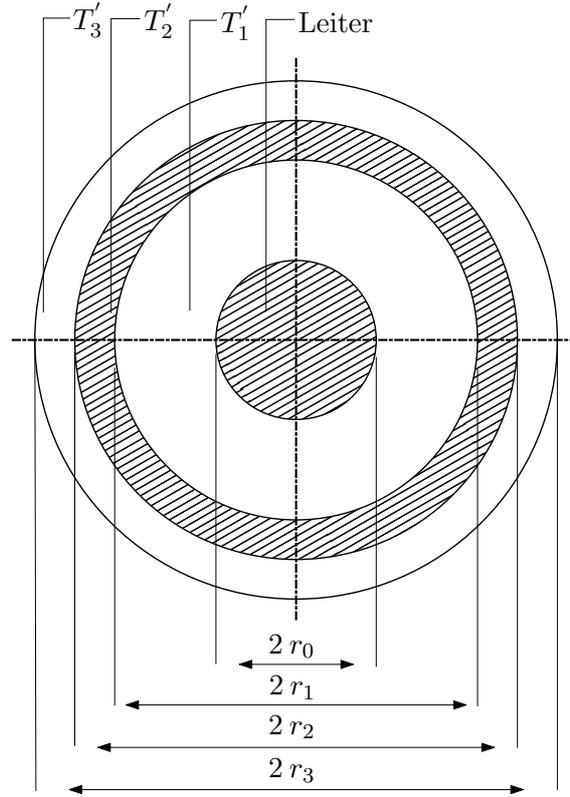


Abbildung 3.6: Wärmewiderstände eines einadrigen Kabels nach [6].

$$\alpha_k = k' \cdot \frac{0,0185}{k \cdot d} + k'' \cdot 1,08 \cdot \left( \frac{\Delta\vartheta_O}{k \cdot d} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.18)$$

und die Wärmetübergangszahl  $\alpha_s$  für Strahlung zu

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_O \cdot \sigma \cdot [(273 + \vartheta_O)^4 - (273 + \vartheta_U)^4]}{\Delta\vartheta_O} \quad (3.19)$$

Dabei gelten nachfolgende Definitionen

$$k' = 0,919 + \frac{\vartheta_m}{369} \quad , \quad k'' = 1,033 - \frac{\vartheta_m}{909} \quad (3.20)$$

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_O + \vartheta_U}{2} \quad , \quad \Delta\vartheta_O = \vartheta_O - \vartheta_U \quad (3.21)$$

$\varepsilon_O$  ist der Emissionsgrad der Kabeloberfläche und  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  ist die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers nach dem Stefan Boltzmann Gesetz.

Voraussetzungen sind für die Berechnung eine konstante Umgebungstemperatur und trockene Luft bei einem Normaldruck von 1013 hPa. Durch die Faktoren  $k'$  und  $k''$  werden

die veränderlichen Stoffwerte der Luft bei mittleren Temperaturen berücksichtigt. Den Hilfsgrößen  $f_s$ ,  $f_k$  und  $k$  werden je nach Anordnung unterschiedlichste Werte zugewiesen, die in der Fachliteratur nachzuschlagen sind. Für eine waagrechte Verlegung eines einzigen Kabels in Luft ergeben sich diese Größen zu eins [6, 9].

Dabei sagt der Faktor  $f_s = 1$  eine ungehinderte Wärmeabgabe durch Strahlung in allen Richtungen aus. Die Verluste werden an die Begrenzungswände des Raumes übertragen. Entscheidend ist hierbei die Temperatur dieser Wände, die im Allgemeinen gleich der Umgebungstemperatur ist. Der Emissionsgrad wird meist mit  $\varepsilon_0 = 0,95$  angenommen.

Bei Anordnungen mit mehreren Kabeln in unterschiedlichsten geometrischen Konstellationen zueinander muss eine Behinderung der Wärmeabgabe berücksichtigt werden.

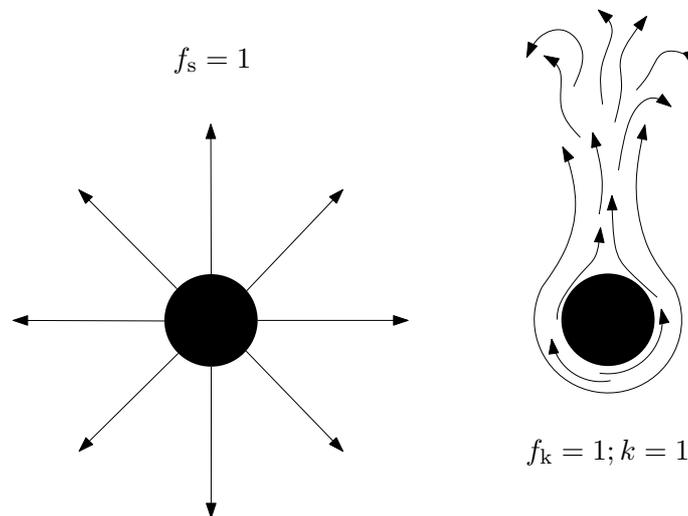


Abbildung 3.7: Wärmeabgabe bei Verlegung frei in Luft nach [9].

Die Faktoren  $f_k = 1$  und  $k = 1$  sagen eine ungestörte Wärmeabgabe durch Konvektion aus. Die erwärmte Luft strömt zunächst laminar um das Kabel, steigt dann gleichmäßig nach oben auf und vermischt sich dabei mit der kälteren Luft in einem Bereich turbulenter Strömung. Entscheidend ist auch hier wieder neben der Kabeloberfläche und den Verlusten die Umgebungstemperatur. Eine Darstellung der Situation mit den genannten Hilfsgrößen für ein Kabel welches waagrecht frei in Luft verlegt ist zeigt Abbildung 3.7.

Die Erwärmung der Kabeloberfläche beträgt

$$\Delta\vartheta_{\text{O}} = \frac{(\vartheta_{\text{Lr}} - \vartheta_{\text{U}} - \Delta\vartheta_{\text{d}}) \cdot T'_{\text{Lu}}}{T'_{\text{Ki}} + T'_{\text{Lu}}} + P'_{\text{d}} \cdot T'_{\text{Lu}}, \quad (3.22)$$

mit der Erwärmung des Leiters aufgrund der dielektrischen Verluste ( $\Delta\vartheta_{\text{d}}$ )

$$\Delta\vartheta_d = P'_d \cdot (T'_{Kd} + T'_{Lu}). \quad (3.23)$$

Der Wärmewiderstand der Luft ( $T'_{Lu}$ ) kann dabei durch Iteration berechnet werden und beträgt ca.  $T'_{Lu} = 1,0 \text{ K m/W}$ .

Alle bekannten Rechenmethoden und Angaben von Belastbarkeitswerten beziehen sich auf waagrecht verlegte Kabel. Für senkrecht verlegte Kabel sind weder theoretische noch experimentelle Untersuchungen bekannt [6].

Da aber aufgrund der besseren Eigenschaften der Konvektion bei senkrecht verlegten Kabeln die Belastungen günstiger ausfallen, als bei waagrechtlicher Verlegung, können die Werte für die Belastbarkeit der waagrechten Verlegung in jedem Fall verwendet werden.

### 3.3.3 Wärmewiderstand des Erdbodens

Um das Temperaturfeld im Erdboden darzustellen, werden zuerst einige Annahmen getroffen. Allgemein gilt eine konstante Erdbodentemperatur  $\vartheta_E$ , sowie ein konstanter, spezifischer Erdbodenwärmewiderstand  $\rho_E$ . Die gesamte im Kabel entstandene Verlustwärme strömt durch die Kabelhülle nach außen und über das umgebende Erdreich an die Erdoberfläche, an der sie an die Atmosphäre abgegeben wird. Ähnlich einer Linienladung im elektrischen Feld, wird auch hier angenommen, dass die Verluste aus dem Kabel (Quelle) von einem spiegelbildlich angeordneten Kabel (Senke) wieder aufgenommen werden. Abbildung 3.8 zeigt dieses Temperaturfeld.

Als Erdbodenwiderstand eines Kabels, also der Wärmewiderstand zwischen Erdoberfläche und Kabeloberfläche, wird nun für ein mehradriges Kabel festgelegt:

$$T'_E = \frac{\rho_E}{2\pi} \ln(k) \quad (3.24)$$

mit der Geometriekonstante des Kabels

$$k = \frac{h}{r_3} + \sqrt{\left(\frac{h}{r_3}\right)^2 - 1} \approx \frac{2h}{r_3}. \quad (3.25)$$

Für die spezifischen Wärmewiderstände des Erdbodens wird nach VDE0298 die in Tabelle 3.1 angegebenen Werte verwendet.

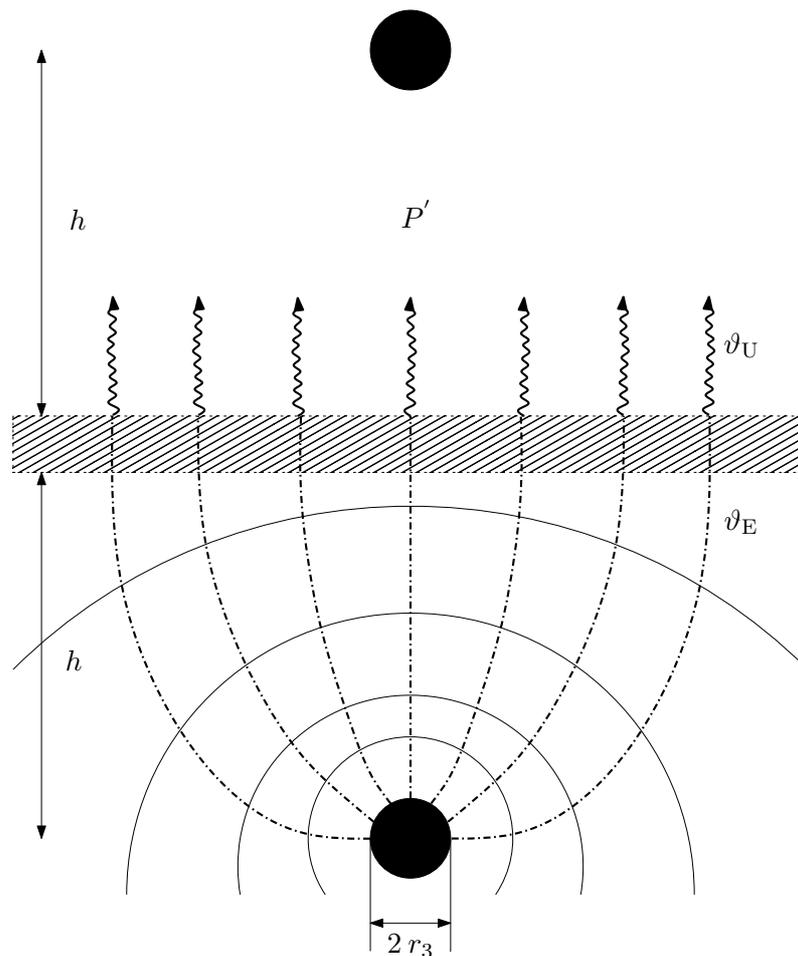


Abbildung 3.8: Temperaturfeld eines in der Tiefe  $h$  in Erde liegenden Kabels mit gespiegelter Wärmequelle.

### 3.4 Umgebungstemperaturen

Ein entscheidender Parameter bei der thermischen Modellierung ist die Umgebungstemperatur  $\vartheta_U$ . Anders als in den stationären Berechnungen wird aber in dieser Modellierung auf eine konstante Umgebungstemperatur verzichtet. Um der Realitätsnähe Folge zu leisten, wird deshalb die gemittelte Umgebungstemperatur je Monat verwendet. Damit soll der reale Verlauf der Temperaturen über den Jahreszeiten gewährleistet werden. Vor allem bei einer Verlegung in Erde befindet sich man hier näher der Wirklichkeit. In Luft müsste man aufgrund des Tag-Nachtwechsels die erhöhten Temperaturunterschiede je nach Tageszeit berücksichtigen. Da dies jedoch wegen weiterer Wetterphänomene (Sonneneinstrahlung, Windverhältnisse, Luftdruck etc.) den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, werden auch hier nur die Mittelwerte der Temperaturen je Monat verwendet. Tabelle 3.2

Tabelle 3.1: Spezifischer Wärmewiderstand des Erdbodens bei unterschiedlichen Gegebenheiten nach [6].

Bodenbeschaffenheit	$\rho_E$
Feuchter Boden	1 K m/W
Ausgetrockneter Boden	2,5 K m/W

zeigt die Monatsmittelwerte der Umgebungstemperaturen unter der Asphaltdecke, also bei Verlegung in Erde, sowie jene bei Verlegung in Luft ( vgl. [6, 17]).

Tabelle 3.2: Monatsmittelwerte der Umgebungstemperaturen unter der Asphaltdecke und in Luft nach [6, 17].

<i>Monat</i>	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni
<i>Erde</i>	-0,4 °C	4,1 °C	6,7 °C	14,8 °C	14,1 °C	23,3 °C
<i>Luft</i>	2,9 °C	5,1 °C	10,3 °C	15,2 °C	20,5 °C	23,4 °C

<i>Monat</i>	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
<i>Erde</i>	21,1 °C	19,6 °C	18,5 °C	17,4 °C	4,8 °C	1,9 °C
<i>Luft</i>	25,6 °C	25,4 °C	20,3 °C	14,2 °C	7,5 °C	4,0 °C

## 4 Das thermische Modell

Aufgrund der Ausführungen in Kapitel 3 lässt sich nun ein einfaches thermisches Modell eines Niederspannungskabels entwickeln. Hierzu wird eingangs das verwendete Niederspannungskabel näher bestimmt und im nächsten Schritt auf die genaue Vorgehensweise der Modellierung dieses Kabels eingegangen. Durch Erweiterung des Modells mit den jeweiligen Modellierungsmaßnahmen für die Umgebung ist das thermische Modell an sich bereits einsatzfähig.

### 4.1 Niederspannungskabel

Als Ausgangslage für die betrachteten Berechnungen und Analysen wird ein Standard Niederspannungskabel, kurz NS-Kabel, betrachtet, welches bei Wien Energie Stromnetz GmbH in Verwendung ist. Abbildung 4.1 zeigt ein solches Kabel der Firma *Schwechater Kabelwerke GmbH*. Die Bezeichnung für diesen Typ lautet E-XAYY 4 x 150 SM. Je Leiter ist bei Verlegung im Erdreich eine Strombelastbarkeit von 275 A bzw. 246 A in Luft sichergestellt [14].

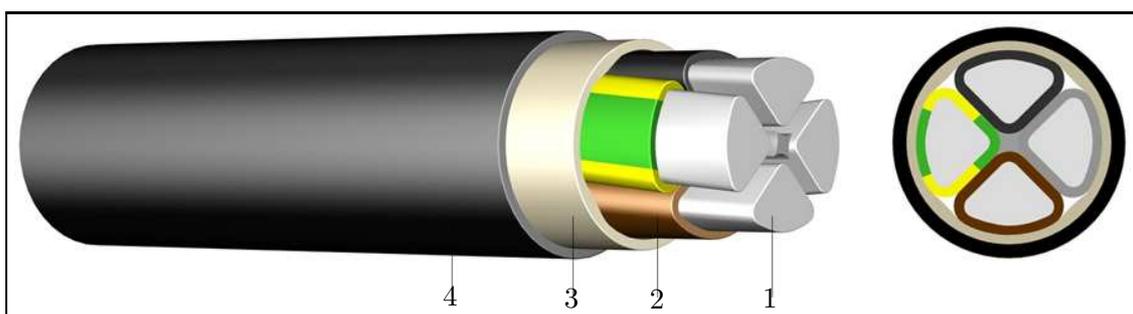


Abbildung 4.1: NS-Kabel E-XAYY 4 x 150 SM [14]

Der Aufbau des Kabels gestaltet sich, wie in Abbildung 4.1 ersichtlich ist, aus mehreren Schichten. Diese Elemente sind in Tabelle 4.1 näher erläutert.

Aus dieser Tabelle lässt sich auch die Bezeichnung des Kabeltyps laut den Kurzschlüssel für Energiekabel nach ÖVE K 23, K 24, K 25 und K 26 angeben (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.1: Der Kabelaufbau.

1	Aluminiumleiter, ein-(SE) oder mehrdräftig (RM/SM)
2	Aderisolation aus Polyvinylchlorid (PVC)
3	PVC-Füllmantel
4	Außenmantel aus Polyvinylchlorid (PVC), schwarz

Tabelle 4.2: Erläuterung der Kabelkennzeichnung

E	Energiekabel
X	Sonderausführung (Signalader in Abbildung 4.1 nicht abgebildet)
A	Leiter aus Aluminium
Y	Isolierhülle aus PVC
Y	Mantel aus PVC
4 x 150	Aderzahl mal Nennquerschnitt
SM	Leiteranordnung sektorförmig und mehrdräftig

Weitere Erläuterungen zu den Kabelbezeichnungen und Eigenschaften sind den Normen ÖVE K 23 sowie K 603 (HD 603) zu entnehmen. Aus diesen Normen wurden auch nachfolgend die Radien dieses Kabeltyps bzw. deren Abmessungen festgesetzt. Wegen des Querschnittes eines Leiters von  $150\text{ mm}^2$  ergibt sich rein rechnerisch ein Leiterradius von 6,91 mm. Darauf aufbauend befindet sich eine PVC-Isolierung über jeden einzelnen Leiter mit einer Dicke von 1,8 mm. Diese isolierte Leiteranordnung wird letzten Endes von einem Mantel welcher ebenfalls aus PVC besteht umschlossen. Die Dicke dieser Ummantlung beträgt 2,5 mm. Diese gängigen Dicken-Maße lassen sich in diversen Herstellerangaben bzw. in [6, 14] finden.

## 4.2 NS-Kabel Modellierung

Basierend auf Abbildung 3.6 kann man unter Vernachlässigung der Wärmewiderstände für die innere und äußere Schutzhülle<sup>1</sup> und des PE-Leiters (trägt keine wesentliche Verlustwärmeerzeugung bei) von einer Anordnung, wie in Abbildung 4.2 gezeigt, ausgehen.

In dieser Abbildung ist auch eine weitere Vereinfachung eingezeichnet. Der in Abbildung 4.1 erwähnte Außenmantel-Innendurchmesser wird nun durch den sogenannten *Bündelradius*  $r_B = 2 \cdot r_{\text{Iso}} = 2 \cdot r_2$  angenähert.

Zusammenfassend kann man nun eine Wärmeersatzschaltung ähnlich der allgemeinen Anordnung aus Abbildung 3.4 angeben. Abbildung 4.3 zeigt diesen Sachverhalt. Zu sehen sind hier die drei Phasen L1, L2 und L3, in denen die Stromwärmeverluste entstehen. Ergänzt

<sup>1</sup>Diese kommen in einem NS-Kabel am *Einzelleiter* nicht vor

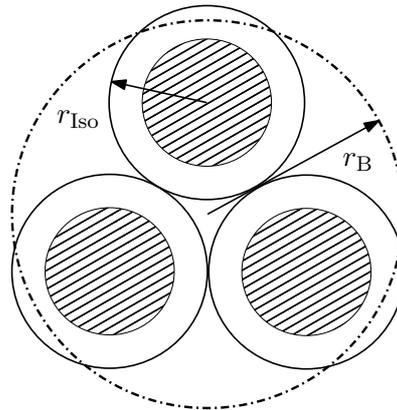


Abbildung 4.2: Isoliertes Mantelkabel bei gebündelter Verlegung

durch die dielektrischen Verluste der Isolation gelangt der Wärmestrom schließlich über die restlichen Wärmewiderstände an die Umgebung.

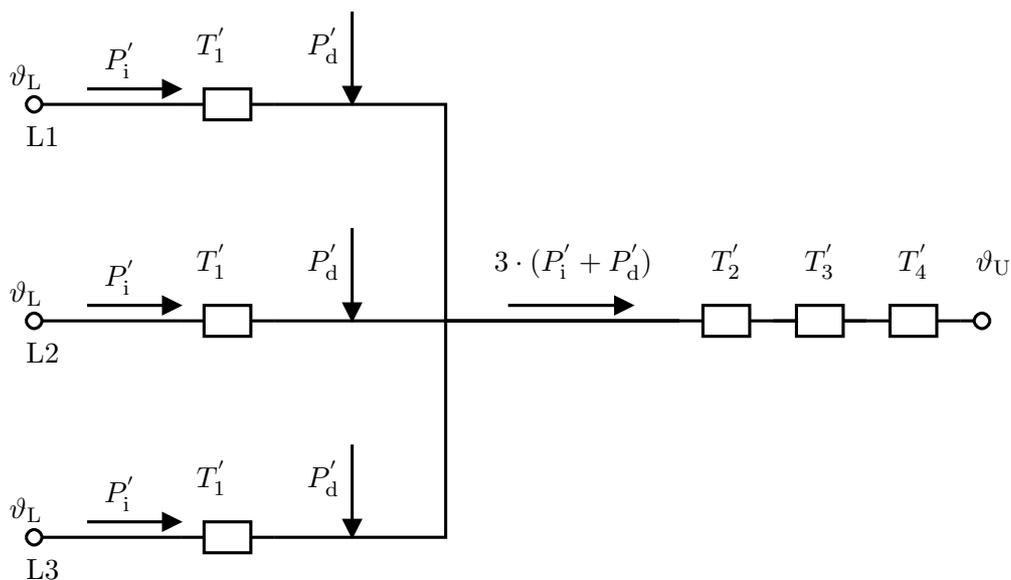


Abbildung 4.3: Wärmeersatzschaltung des NS-Kabels

### 4.3 Hintergrund der stationären Modellierung

Die stationäre Berechnung des thermischen Modells geht davon aus, dass sämtliche transienten Vorgänge abgeschlossen sind. Ausgehend von der Analogie des Ohmschen Gesetzes, welches bereits in Kapitel 3.1 behandelt wurde, wird nun das bereits erwähnte Ersatzschaltbild aufgebaut. Mit Hilfe der in Kapitel 3.3 erläuterten Vorgehensweise der Berechnung

der thermischen Widerstände kann nun die Strombelastbarkeit bei zulässiger Betriebstemperatur direkt angegeben werden. Diese lautet wie folgt:

$$I_z = \sqrt{\frac{\vartheta_{Lr} - \vartheta_U - \Delta\vartheta_d}{n \cdot R'_{wr} \cdot (T'_{Ki} + T'_4)}} \quad (4.1)$$

wobei  $\Delta\vartheta_d$  der Erwärmung durch die dielektrischen Verluste entspricht,

$$\Delta\vartheta_d = P'_d \cdot (T'_{Kd} + T'_4). \quad (4.2)$$

In weiterer Folge kann man mit Hilfe einiger Umformungen die Strombelastbarkeitsformel 4.3 in eine etwas andere Form bringen.

$$I_z = \sqrt{\frac{\frac{\vartheta_{Lr} - \vartheta_U}{\Sigma T} - P'_d}{n \cdot R'_{wr}}} \quad (4.3)$$

## 4.4 Hintergrund der transienten Modellierung

Die in einem Kabel oder allgemeiner gesagt in einem stromdurchflossenen Leiter hervorgerufenen Verluste erzeugen Wärme, welche durch Wärmeleitung, Wärmeübertragung (Wärmekonvektion) oder Wärmestrahlung in Bereiche geringerer Temperatur übertragen wird. Dieses Verhalten wiederum, das dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre entspricht, führt zu einem Transport der erhöhten Temperatur im Leiter an die Umgebung. In einem idealisierten Modell wird nun von einem homogenen Körper ausgegangen, in welchem pro Zeiteinheit die Verluste  $P_v$  entstehen. Für die Energiebilanz gilt für die Zeitspanne  $\Delta t$  (nach [2, 4, 7]):

$$\underbrace{P_v \cdot \Delta t}_{\text{Erzeugte Wärme}} = \underbrace{\alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot \Delta t}_{\text{Abgegebene Wärme}} + \underbrace{c \cdot m \cdot \Delta\vartheta}_{\text{Gespeicherte Wärme}} \quad (4.4)$$

Die pro Zeiteinheit über die Oberfläche  $A$  abgeführte Wärme ist von der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  des Mediums, sowie von der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  zwischen dem Körper und der Umgebung, abhängig.

Der gespeicherte Anteil der Wärme hängt von der Masse  $m$  des Körpers, seiner spezifischen Wärmekapazität  $c$  und der Temperaturzunahme  $d\vartheta/dt$  ab. Sie ist bei konstanter Umgebungstemperatur pro Zeiteinheit proportional  $\Delta\vartheta$ .

Die Energiebilanz liefert eine Differentialgleichung der Form

$$\boxed{P_v = \alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta + c \cdot m \cdot \frac{d\vartheta}{dt}} \quad (4.5)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung entspricht einer Exponentialfunktion (Abb.4.4) der Form:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty \left(1 - e^{-t/T_E}\right) \quad (4.6)$$

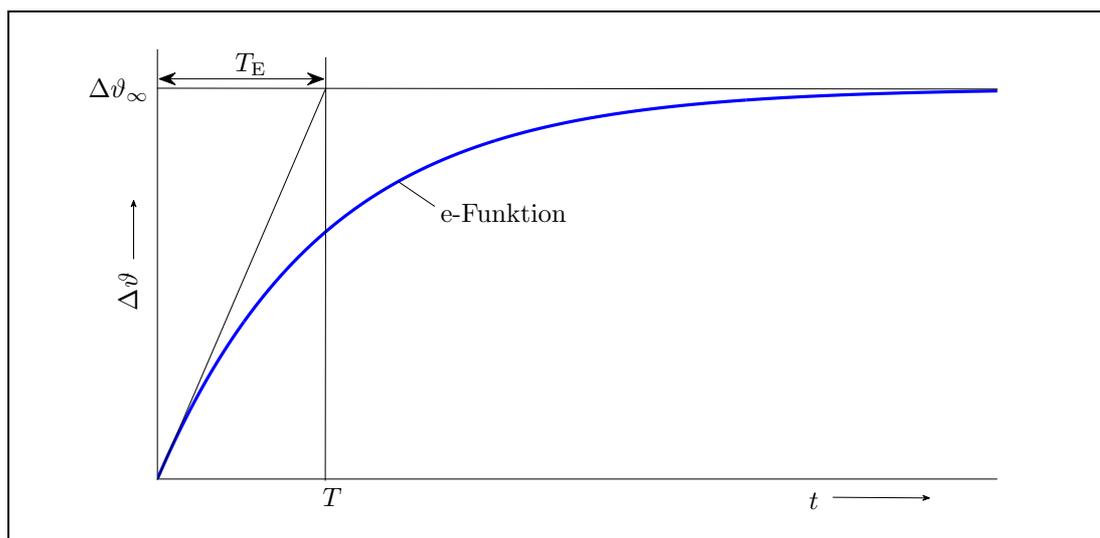


Abbildung 4.4: Erwärmungskurve eines verlustbehafteten Körpers

Die Endtemperatur des Körpers gegenüber der Umgebung ergibt sich dabei zu

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{P_v}{\alpha \cdot A} \quad (4.7)$$

Die Zeitkonstante des Einschwingvorganges errechnet sich weiter zu

$$T_E = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot A} \quad (4.8)$$

Allgemein kann man nun sagen, dass die Erwärmung von verlustbehafteten Körpern prinzipiell diesem Gesetz folgt, allerdings ist der genaue Verlauf wesentlich komplizierter und umfangreicher, da sich die einzelnen Komponenten unterschiedlich schnell erwärmen und sich zudem noch gegenseitig beeinflussen.

#### 4.4.1 Erweiterung der Formeln auf n-Schichten

In diesem Abschnitt werden nun die vormalig aufgestellten und allgemein gültigen Beziehungen auf mehrere Schichten erweitert. Durch diese Überlegungen ist ein modularer Aufbau in einem numerischen Computeralgebra-Programm wie MATLAB/SIMULINK erst möglich und soll die Erweiterbarkeit mit Hilfe von Subsystemen ermöglichen.

Zunächst werden die Wärmewiderstände wie in 3.3 beschrieben auf n-Schichten erweitert. Es gilt folgende allgemeine Form

$$T'_{(x+1)} = \frac{\varrho_{(x+1)}}{2\pi} \ln \frac{r_{(x+1)}}{r_x} \quad . \quad (4.9)$$

Wie schon erwähnt, beschreibt dieser Gleichungs-Typ eine konzentrische Verteilung der Widerstandsumgebung. Je nach Anwendungsfall wird für den *letzten* Umgebungswiderstand  $T'_4$  allerdings entweder der Erdbodenwiderstand  $T'_E$  oder der Luftwiderstand  $T'_{Lu}$  eingesetzt.

Bereits in Abschnitt 3.1 wurden die Gleichungen für die Stromwärmeverluste  $P'_i$  und für die dielektrischen Verluste  $P'_d$  näher behandelt. Nachfolgend sei diese in Form der gesamten Verlustleistung angegeben:

$$P'_v = R'_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_{Lr} - 20)] \cdot I^2 + P'_d \quad (4.10)$$

Hierbei sei auf die Temperaturabhängigkeit der Verlustleistung  $P'_v$  hingewiesen, welche auf den veränderlichen Leiterwiderstand zurückzuführen ist. Alle anderen Wärmewiderstände, sowie auch die dielektrischen Verluste sind hingegen als konstant anzusehen.

Der durch den stromdurchflossenen Leiter entstandene Wärmestrom wird durch die verschiedenen Schichten an die Umgebung abgegeben. Dieser entstandene Wärmestrom, welcher sich in Schicht  $x$  befindet wird entsprechend seines Temperaturunterschiedes und des Wärmewiderstandes in die nächste Schicht  $x + 1$  abgeleitet:

$$\dot{Q}'_x = \frac{\vartheta_x - \vartheta_{(x+1)}}{T'_{(x+1)}} \quad (4.11)$$

Der austretende Wärmestrom der vorigen Schicht ( $x-1$ ) tritt somit in die aktuelle Schicht  $x$  ein:

$$P'_{\text{IN},x} = \dot{Q}'_{\text{OUT},(x-1)} \quad (4.12)$$

Abschließend kann man nun die Formeln zusammenfassen und die Temperaturerhöhung in der Schicht  $x$  wie folgt angeben:

$$\Delta\vartheta_x = \frac{P'_{\text{IN},x} - \dot{Q}'_{\text{OUT},x}}{c_x \cdot d_x \cdot \left(r_x^2 - r_{(x-1)}^2\right) \cdot \pi} \cdot \Delta t \quad (4.13)$$

Entscheidend sind hier die ein- bzw. austretende Wärmeströme, sowie die spezifische Wärmekapazität  $c$  des Materials, die Dichte  $d$  und der zu durchdringende Querschnitt. Im Wesentlichen entspricht diese Formel der Erweiterung der Ausgangsformel 4.4. Diese wurde, was leicht nachzuprüfen ist, nur um die Indexschreibweise erweitert, auf die Einheitslänge bezogen und nach  $\Delta\vartheta$  umgeformt.

## 4.5 Das thermische Modell in MATLAB/SIMULINK

Ausgehend von den einleitenden Unterkapiteln in diesem Abschnitt kann nun begonnen werden ein thermisches Modell systematisch in einem rechnerunterstützten Simulationsprogramm zu entwickeln. Für diese Aufgabe wurde die grafische Simulationsumgebung MATLAB/SIMULINK von der Firma MATHWORKS<sup>©</sup> verwendet. Dieses eignet sich hervorragend für Simulationen mit Modellen, die in diskreten Zeitschritten durchlaufen werden.

Das thermische Modell in MATLAB/SIMULINK besteht im Grunde aus drei eigenständigen Teilbereichen. Sie werden nacheinander immer wieder bis zum Ende der Input-Daten durchlaufen. Diese Teilbereiche sind

- der Parameterbereich,
- der Modellierungsbereich,
- und der Ausgabe- bzw. Visualisierungsbereich.

Abbildung 4.5 zeigt diese Teilbereiche, wie sie beim Ausführen des MATLAB/SIMULINK Modells zu finden sind. Die Parameter befinden sich in der rot dargestellten Sub-Function und werden dann weiter in die grüne Sub-Function übergeben. Dieses Unterprogramm

stellt das eigentliche thermische Modell dar. Von dort werden die augenblicklichen Zustände ausgelesen und an den Visualisierungsbereich geführt (blaue Sub-Function). Dieser Bereich verarbeitet die diskreten Daten in einen Ergebnisvektor und speichert diese ab. Ferner werden die Ergebnisse grafisch in einem Plot gespeichert und zur Visualisierung zur Verfügung gestellt.

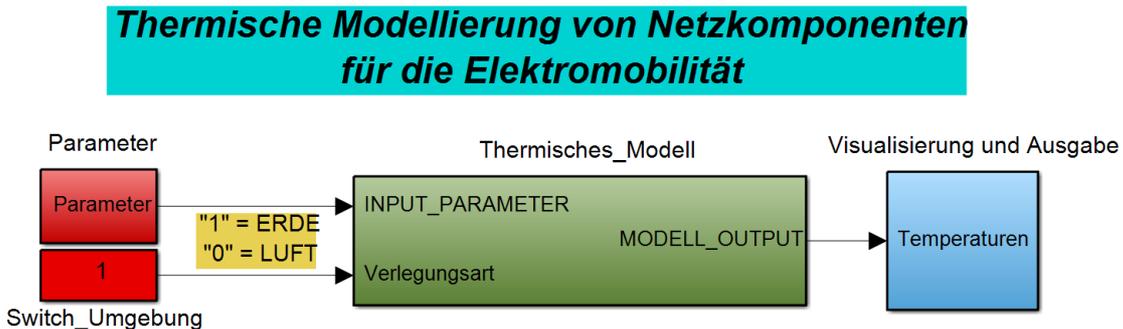


Abbildung 4.5: Hauptseite des thermischen Modells

#### 4.5.1 Der Parameterbereich

Im Parameterbereich (siehe Abbildung 4.6) werden sämtliche Radian der Aufbau- und Umgebungselemente, deren Dichten, spezifische Wärmekapazitäten bzw. Wärmewiderstände, sowie materialspezifische Kennwerte eingetragen. Die zu den jeweiligen Szenarien verwendeten Parameter können im Anhang A nachgeschlagen werden. In diesem Bereich wird auch festgelegt, ob eine konstante Strombelastung erfolgen soll, oder der Verlauf aus einem externen Datensatz gewonnen wird. Zur Überprüfung und Abschätzung des Modells im stationären Fall kann eine konstante Belastung angenommen werden. Für die transiente Modellierung werden Daten herangezogen, welche aus den verschiedenen Szenarien im NEPLAN Modell gewonnen wurden. Nähere Ausführungen zu diesen Daten sind dem Kapitel 5 zu entnehmen.

#### 4.5.2 Der Modellierungsbereich

Nachdem im Parameterbereich die zur Berechnung geforderten Daten eingegeben wurden, werden diese beim Start der Simulation an den Modellierungsbereich (vgl. Abbildung 4.7) übergeben. Dieser Bereich kann in drei Sub-Modelle unterteilt werden, wobei jeder davon eine eigene physikalische Umgebung darstellt. Es sind dies

- das Kabelmodell,

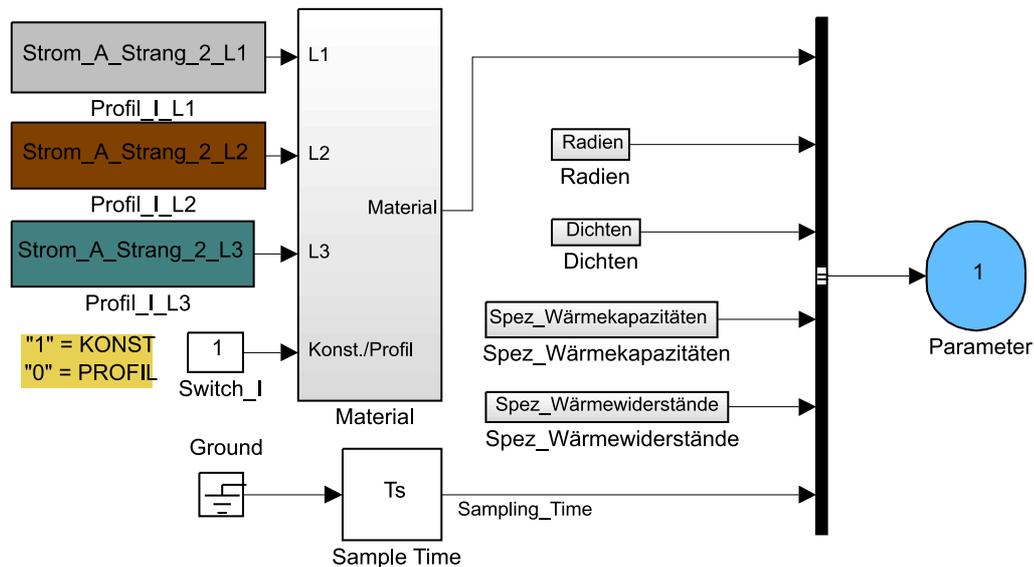


Abbildung 4.6: Der Parameterbereich

- das Erdmodell,
- und das Luftmodell.

Im Kabelmodell werden zunächst die Verluste anhand der Belastung (konstanter Strom bzw. Belastungsprofil) berechnet. Der somit entstandene Wärmestrom, bestehend aus den Stromwärmeverlusten und den dielektrischen Verlusten, wird weiter je nach Konfiguration entweder an das Erde- oder an das Luftmodell übergeben. So wird ein modularer Aufbau in der Programmierung gewährleistet. Dies vereinfacht die Überschaubarkeit und hält die komplexen Strukturen des Modells in Grenzen.

### Kabelmodell

Im Kabelmodell nach Abbildung 4.8 werden zuerst die aufgrund des Belastungsprofils bzw. der konstanten Belastung auftretenden Stromwärmeverluste berechnet (grüne Sub-Modelle). Diese jeweils einzeln für jeden Leiter berechneten Werte gelangen als Eingang in das (rote) Sub-Modell, welches die Temperaturerhöhung am Leiter berechnet. Diese Berechnung erfolgt, wie in den vorigen Abschnitten bereits beschrieben wurde, mit Hilfe des Wärmewiderstandes der nachfolgenden Schicht, deren Temperaturdifferenz, sowie den Materialspezifika Dichte, spezifische Wärmekapazität und Querschnittsfläche. Die errechnete Temperaturerhöhung wird an die gelbe Sub-Function gegeben, welche die aktuelle Leitertemperatur und die Differenz zwischen Isolation und Leiter berechnet. Bei der Berechnung der Temperaturerhöhung am Leiter wurde auch der abgegebene Wärmestrom an die Isolierung kalkuliert. Die dielektrischen Verluste, die in jeder einzelnen Isolation der

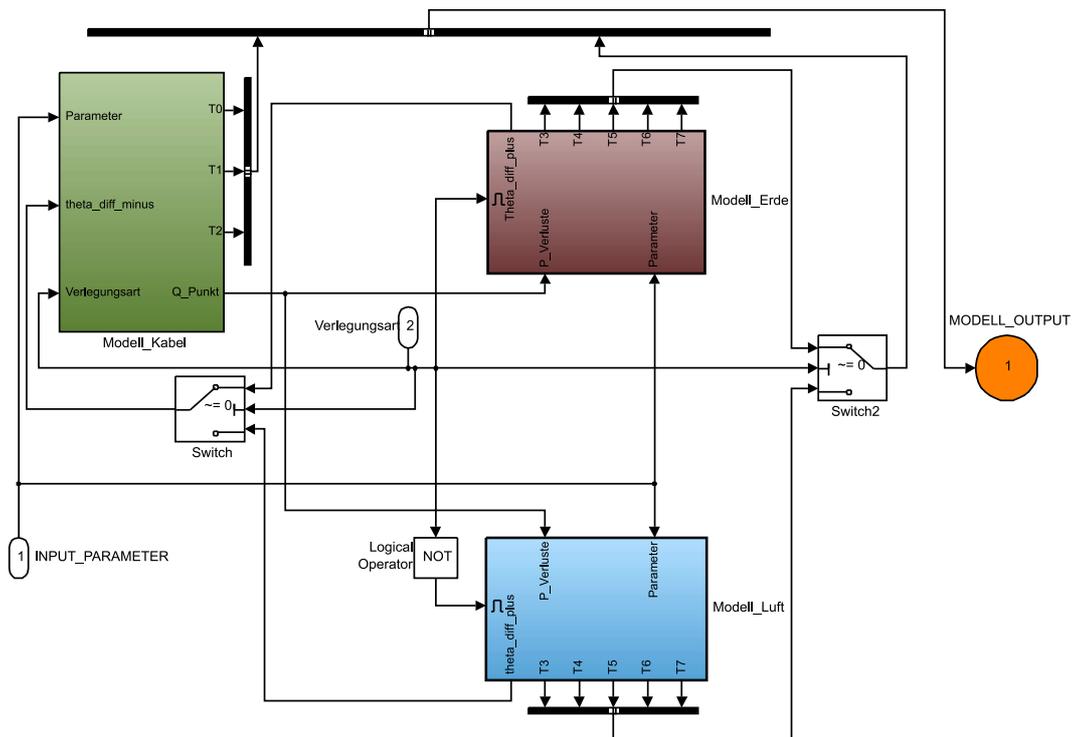


Abbildung 4.7: Der Modellierungsbereich

drei einzelnen Leiter auftreten, werden in den rosafarbenen Sub-Modellen generiert. Diese werden mit dem abgegebenen Wärmestrom des Leiters addiert und in die Sub-Function für die Temperaturerhöhung der Isolierung geführt. Nun werden die drei Wärmeströme der Isolation zusammengeführt und als ein einziger Wärmestrom zum Ausgang des Modells geführt.

Je nach Konfiguration gelangt nun dieser Ausgang als Eingang in das Erde- bzw. in das Luftmodell. Die Berechnung für die Temperaturerhöhung am Mantel befindet sich jeweils in dem zu betreffenden Modell, da hierfür bereits der Wärmewiderstand der nächsthöheren Umgebung (also entweder der Erde oder der Luft) notwendig ist. An dieser Stelle sei zu erwähnen, dass eine etwaige Schirmung nicht modelliert wird, da hier der Wärmestrom nahezu ungehindert die Schicht durchdringen würde.

## Erdemodell

Dieser Modellierungsbereich wird aus mehreren Schichten aufgebaut. Der Grund dafür liegt an den verschiedenen Umgebungen, welche sich rund um das Kabel befinden. Im Allgemeinen wird bei einer direkten Verlegung eines Kabels in Erde das Kabel in einem sogenannten Bettungsmaterial verlegt. Hierzu wird in der direkten Umgebung des Kabels

ein steinfreies, homogenes Füllgut, z. B. Sand verwendet. Dieser Sand soll für einen guten thermischen Zustand und somit für eine hohe Wärmeabgabe an die Umgebung sorgen. Auf diese Schicht wird danach entweder Erde, Kies oder Schotter gegeben. Findet die Verlegung unter der Straße oder einem Gehsteig statt, wie in unserer Betrachtung üblich, so wird letztlich die Asphaltsschicht aufgetragen.

Wie im Wiener Niederspannungsnetz üblich, wird als Bettungsgut Sand in einer Dicke von ca. 20 cm verwendet. Darüber wird eine Schicht Kies ( *Gräder* genannt ) in einer Höhe von ungefähr 50 cm aufgebracht. Abschließend wird eine Asphaltsschicht von 2,50 cm für den Gehsteig aufgetragen. Zusammenfassend kann man sagen, dass sich das Niederspannungskabel in einer *Legetiefe* von 72,5 cm vergraben befindet. Die Legetiefe ist dabei der Abstand zwischen Kabelachse und Erdoberfläche.

Weitere Idealisierungen werden dahingehend getroffen, dass man vereinfachend annimmt, dass keine Häufung mit anderen thermisch beeinflussenden Verlegungen stattfinden. Erdwärmeleitungen und Wasserleitungen werden im Normalfall unter der Straße und nicht unter dem Gehsteig verlegt, was diese Idealisierung weiter untermauert [6].

## Luftmodell

Wie schon im Erdmodell erwähnt wurde, geht man auch hier von einer *Übergabe* der Energie am Mantel an die Umgebung aus. Im Unterschied zur Erde wird dieser Wärmestrom aber nun in Form von Konvektion und Strahlung an die Luft abgegeben. Die genaue Beschreibung dieser Vorgänge und die Berechnungen des Wärmewiderstandes wurden bereits in Abschnitt 3.3.2 näher erläutert.

### 4.5.3 Der Ausgabe- und Visualisierungsbereich

Im letzten Bereich des MATLAB/SIMULINK Modells *fließen* die Ergebnisse bzw. Daten der augenblicklichen Temperaturverhältnisse in die Senken der Plot- und Abspeicherfunktionsblöcke ein.

Diese Blöcke stellen die Ergebnisse der einzelnen Szenarien zur Verfügung. Somit stehen weitere Auswertemöglichkeiten bereit, um die Szenarien zu vergleichen und Erkenntnisse zu gewinnen (Abb. 4.11).

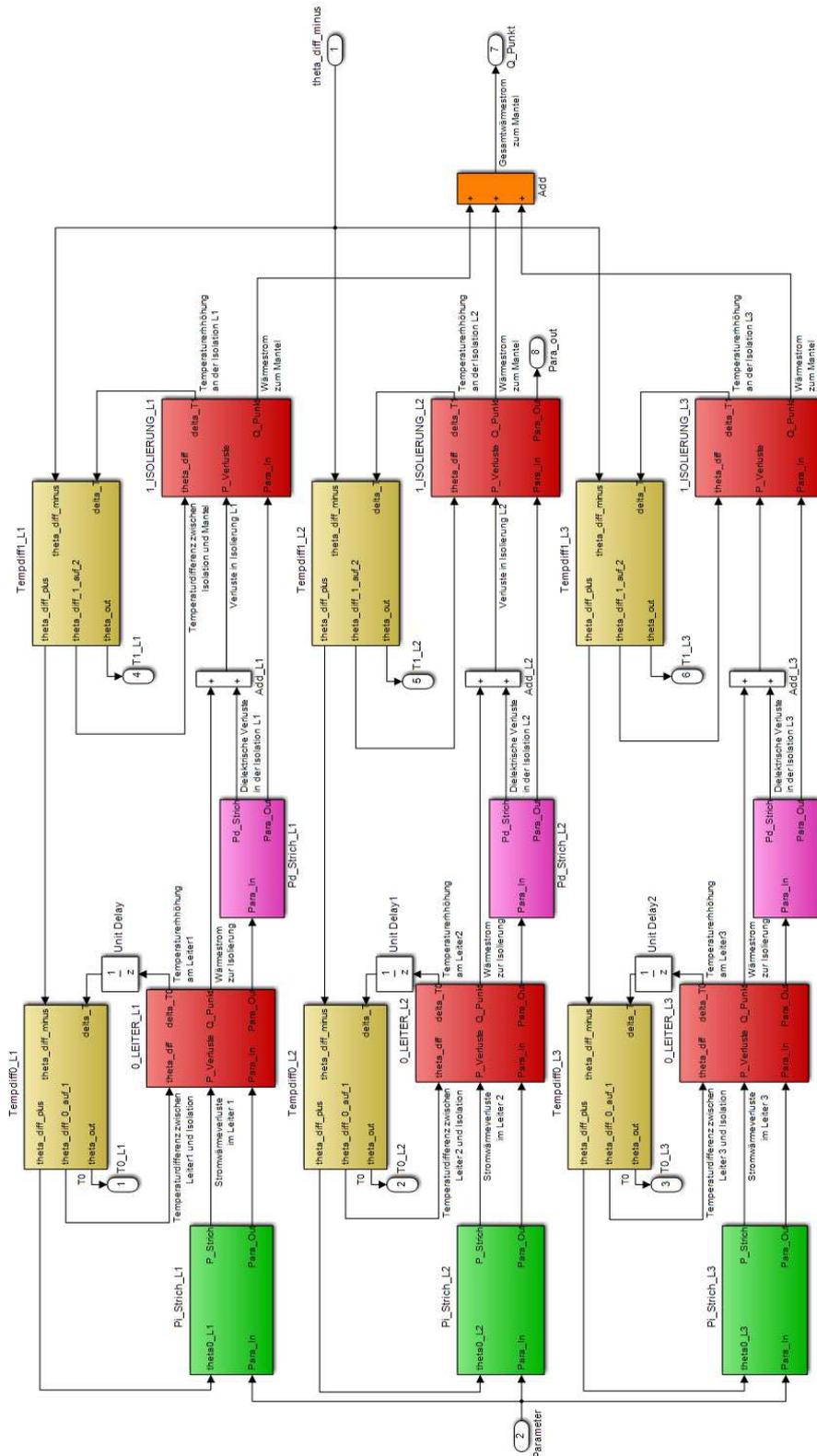


Abbildung 4.8: Das Kabelmodell

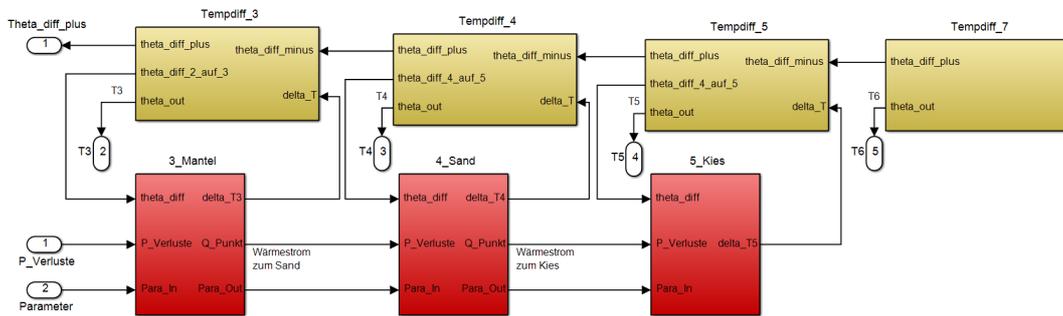


Abbildung 4.9: Das Erdmodell

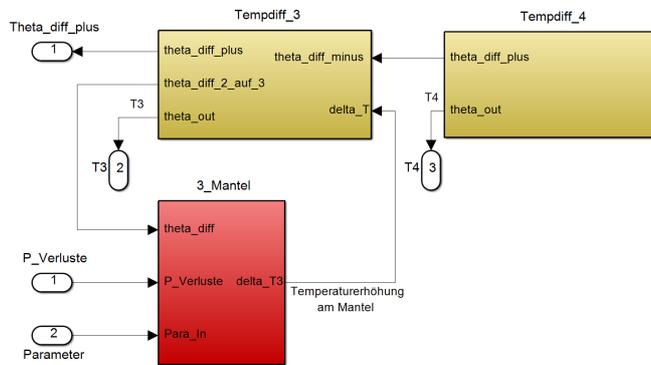


Abbildung 4.10: Das Luftmodell

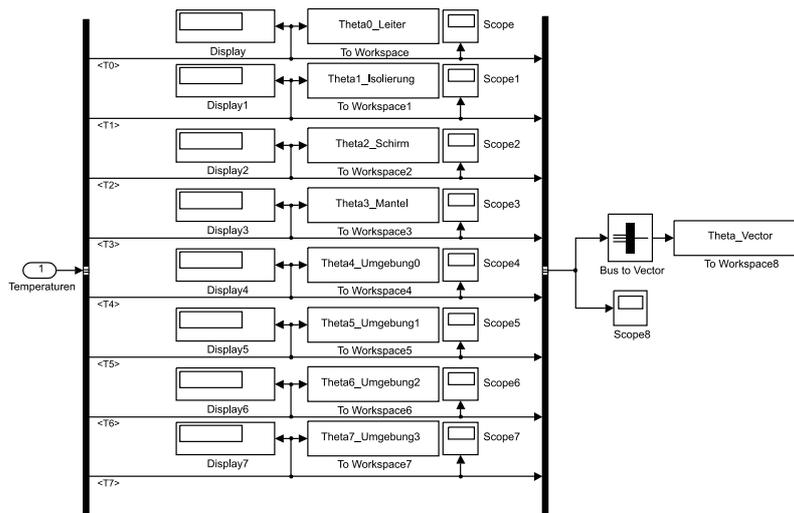


Abbildung 4.11: Der Ausgabe- und Visualisierungsbereich



## 5 Stromdaten

In diesem Kapitel werden die Last- bzw. Einspeiseprofile der verschiedenen Teilnehmer des Stromnetzes beschrieben. Die zugehörigen NEPLAN-Netzpläne sind in Anhang B wieder zu finden. Ferner werden die Auslastungen der verschiedenen Szenarien, welche den NEPLAN-Berechnungen zu Grunde liegen, in Abschnitt 5.4 analysiert.

Die Daten entstammen allesamt dem Projekt *ZENEM-Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität*, bei dem man sich zum Ziel gesetzt hat, zukünftige elektrische Verbraucher, wie die Elektromobilität, in das bestehende Stromnetz zu integrieren. Als Spezialfall wurde eine Taxiflotte betrachtet, die sich durch hohe Konzentration an den Standplätzen auszeichnet. Es sollen so die Auswirkungen von E-Taxis auf das Verteilnetz untersucht werden. Die Projektleitung von ZENEM liegt bei der TU-Wien, genauer gesagt beim Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe. Dadurch war es möglich mit Hilfe dieses Projektes die Daten zu erlangen. Diese liegen in einminütigen Zeitschritten für das Jahr 2011 vor und werden nachfolgend näher beschrieben.



Abbildung 5.1: ZENEM Logo

### 5.1 Stromdaten-Netz

Prinzipiell wird bei der Betrachtung dieser Arbeit von einem real existierenden Stadtnetz in Wien ausgegangen. Es soll hier ein typisches städtisches Verteilnetz symbolisiert werden, welches aus kurzen Leitungen aufgebaut ist und hohe Leistungen zu übertragen hat. Dieses Niederspannungsnetz besteht überwiegend (ca. 80 %) aus Haushalten und einigen Gewerbebetrieben. Für die Simulationen und Analysen wurden mehrere gemessene Haushaltsanschlussprofile wiederholend hintereinander gesetzt. Die Trafonennleistung beträgt 800 kV A und die Leitungslängen beschränken sich auf maximal 257 m. Um bei der Modellierung nahe an der Realität zu sein, ist es notwendig auch reale und keine gemittelten Profile zu verwenden. Diese Lastprofile sind das Ergebnis einer ausführlichen, dreiphasigen Messung mehrerer Netzknoten im Zeitraum von vier Wochen die im Zuge des Projektes *ZENEM* entstanden sind.

## 5.2 Stromdaten-Elektroauto

Ausgehend vom bereits bestehenden Netz aus Kapitel 5.1, soll in einem weiteren Schritt ein Netzknoten für die Ladevorgänge von Elektro-Taxis integriert werden. Die Daten für diese Profile wurden wiederum aus dem Projekt *ZENEM* herangezogen. Annahme hierbei ist, dass sich die Lademöglichkeiten nur an den Taxistandplätzen befinden. Als Ladeleistung wurden für heutige Verhältnisse durchaus übliche 50 kW pro Fahrzeug angenommen, womit sich mit Spitzen bis zu 350 kW in den Ladeprofilen durchaus beachtliche Belastungen für das Niederspannungs-Netz ergeben.

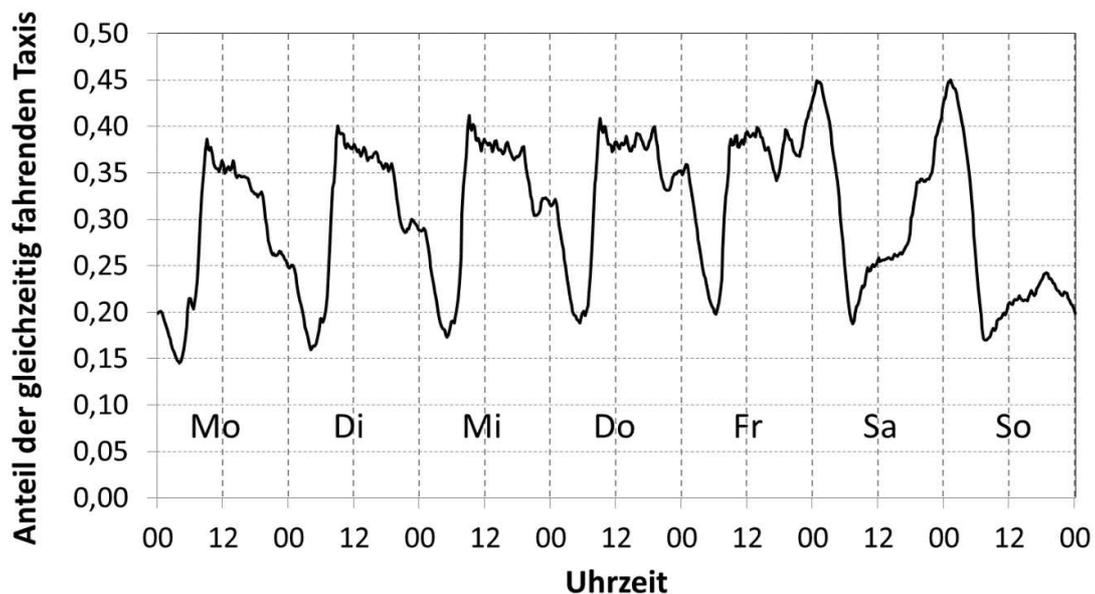


Abbildung 5.2: Gemittelter Wochenverlauf der gleichzeitig fahrenden Taxis der Flotte nach [13].

Abbildung 5.2 zeigt den mittleren Verlauf der gleichzeitig fahrenden Taxis. Man sieht dabei deutlich das erhöhte Aufkommen in den Nächten von Samstagen, Sonntagen und Feiertagen. Am frühen Vormittag hingegen befinden sich die wenigsten Taxis auf den Straßen. Betrachtet man nun das Ladeprofil eines beispielhaften Tages im Jahr (Abbildung 5.3), so lässt sich hier erkennen, dass vor allem um die Mittagszeit ein erhöhter Bedarf an Ladeleistung erforderlich ist. Da im Normalfall die Umgebungstemperaturen der zu betrachtenden Kabel und Leitungen auch hier am größten über den Tag sind, ist dies eine durchaus zu beachtende Erkenntnis für die weiteren thermischen Überlegungen.

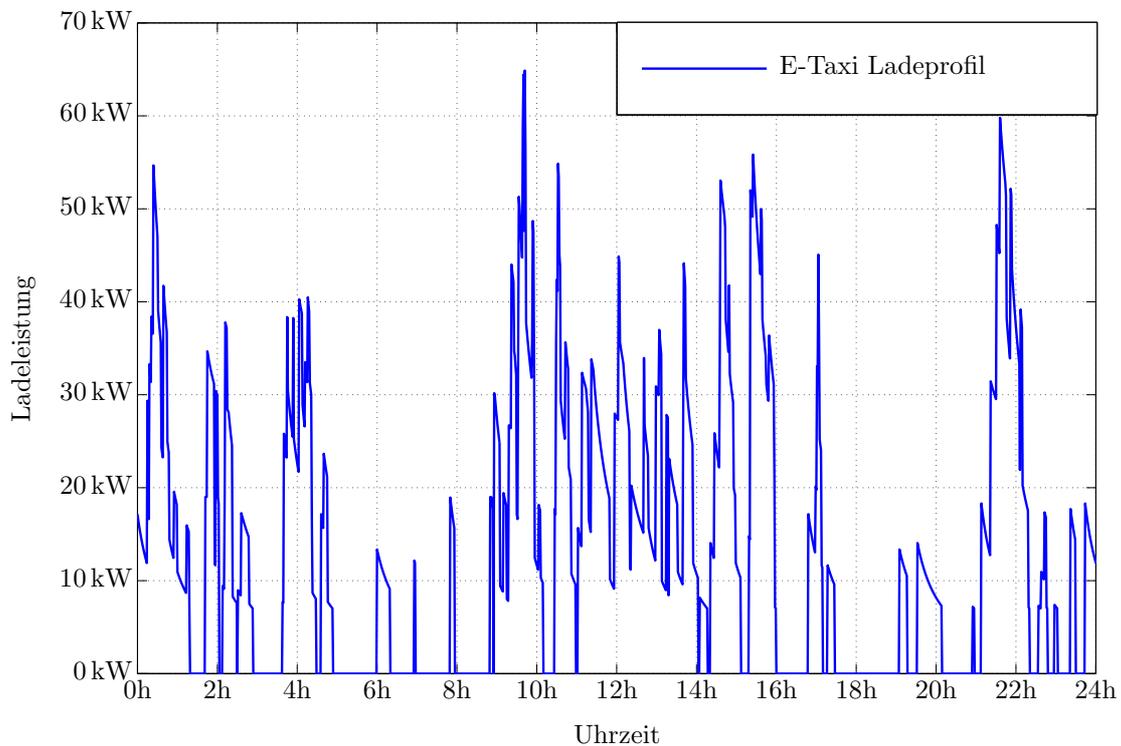


Abbildung 5.3: Verlauf des Ladeprofiles der Taxiladestation an einem beispielhaften Tag (Mittwoch, der 1. Juni 2011).

### 5.3 Stromdaten-Photovoltaik

Um den Gedanken des Ausbaus umweltfreundlicher Energieträger weiter fortzuführen, werden zusätzlich zu der bestehenden Infrastruktur dezentrale erneuerbare Energiequellen in Form von Photovoltaik-Anlagen angenommen. In Summe handelt es sich um vier Anlagen die zusammen eine Spitzenleistung von 200 kW liefern. Drei der Anlagen könnten sich dabei als Installation am Dach befinden. Bei der vierten Anlage würde sich eine großflächige Anbringung von Photovoltaik auf einer möglichen Überdachung der Taxistandplätze anbieten. Dadurch würden sich weiter ökonomische Synergieeffekte einstellen.

Abbildung 5.4 zeigt ein typisches Erzeugungsprofil einer PV-Anlage. Dabei wird beispielhaft der 1. August 2011 betrachtet. Deutlich zu sehen ist, dass die *Erzeugung* der Energie um etwa 05:30 Uhr morgens beginnt und um etwa 19:00 Uhr endet.

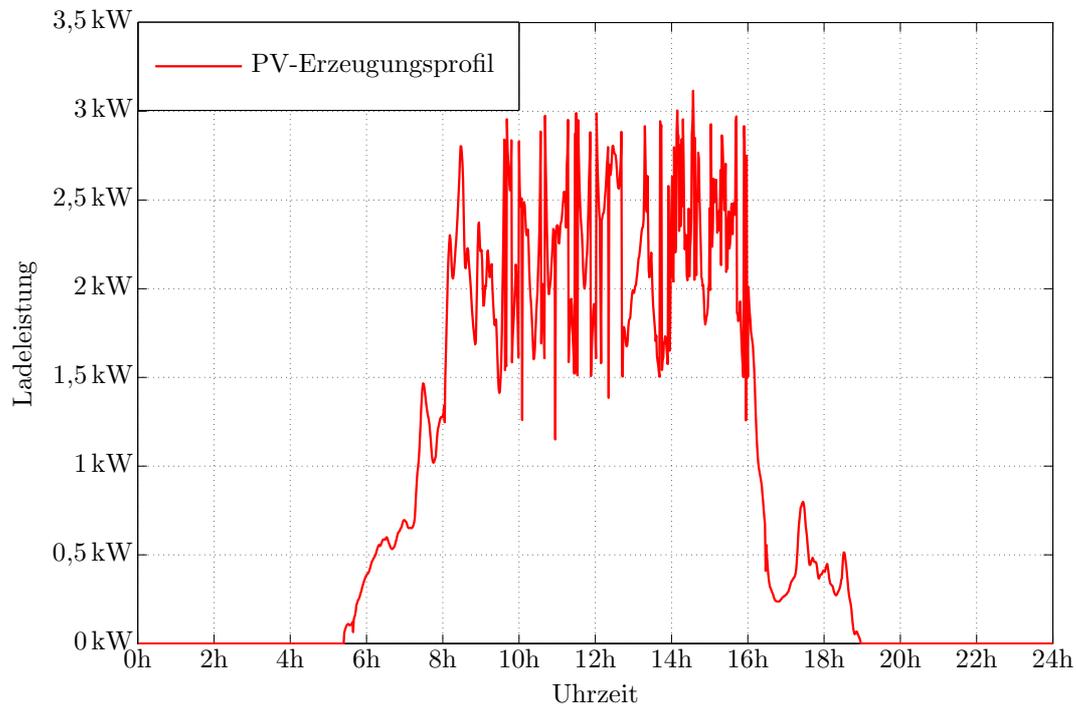


Abbildung 5.4: Verlauf des Erzeugungsprofils eines Stranges einer PV-Anlage.

## 5.4 Auslastung der Szenarien

Nachdem die Input-Größen in den vorangegangenen Abschnitten besprochen wurden, werden abschließend die NEPLAN-Berechnungen dazu verwendet, um die Auslastungen des zu beobachteten Stranges zu analysieren.

Wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist, werden die Auslastungen der vier Szenarien in Boxplots dargestellt. Um den Ausführungen im Kapitel 7 nicht vorzugreifen, wird hier nur kurz auf die Ergebnisse eingegangen.

Die rote Linie stellt den Median dar, die obere Grenze der Box das 75 % Quantil und die untere Grenze das 25 % Quantil. An der Box befindet sich die Antenne oder auch Whisker genannt. Dieser Whisker besitzt in dieser Darstellungsform eine maximale Länge von 1,5 mal dem Interquartilsabstand. Alle anderen Werte außerhalb diesen Bereichs werden als Ausreißer gesondert gekennzeichnet. Der oberste Wert bildet das Maximum, der unterste das Minimum.

Anhand dieser Eigenschaften erkennt man im ersten Szenario, *Ohne Taxi und Ohne PV*, dass eine maximale Auslastung von knapp 48 % auftritt. Der Median liegt dabei bei ca. 28 % und die minimale Auslastung bei 8 %.

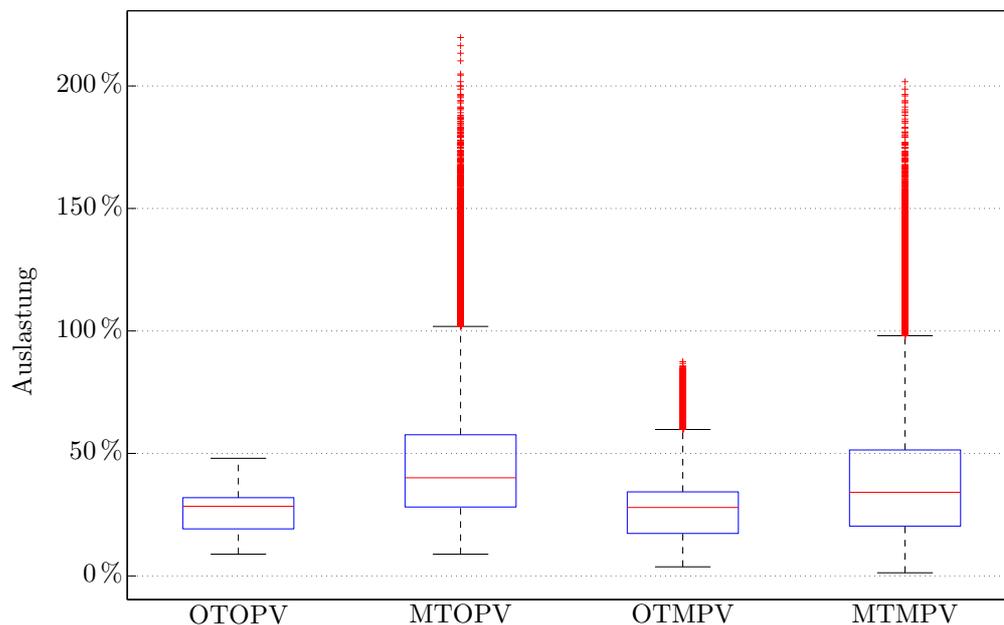


Abbildung 5.5: Boxplots der Auslastungen der einzelnen Szenarien.

Das zweite Szenario, *Mit Taxi und Ohne PV*, welche die Erweiterung des Stadtnetzes mit einer Ladestation für Elektro-Taxis behandelt, stellt hingegen eine deutlich höhere Auslastung dar. Vereinzelt kommen sogar Ausreißer über 200 % vor.

Nimmt man die Ladestation wieder aus dem vorhandenen Netz und gibt stattdessen die PV-Anlagen hinzu, so ergibt sich das dritte Szenario, *Ohne Taxi und Mit PV*. Wie man anhand der Verteilung sehen kann, wird in diesem Fall der Strang bereits mit etwas höherer Auslastung gegenüber dem Basisszenario betrieben, ohne dabei die 100 % Marke zu überschreiten.

Schließlich wird die Ladestation wieder ins vorhandene Netz gebracht, womit das vierte Szenario, *Mit Taxi und Mit PV*, entsteht. Es ist ähnlich dem dritten Szenario, allerdings sind die Werte der maximalen Auslastungen etwas geringer.



## 6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die einzelnen Szenarien noch einmal genauer beschrieben und die Ergebnisse der Simulationen erläutert. Es bildet die Grundlage für die Vergleichbarkeit der Szenarien untereinander. Die Erkenntnisse werden nachfolgend in Kapitel 7 zusammengestellt. Wenn nicht anders angegeben, sind alle Berechnungen ausgehend von den Werten in Anhang A.1 erstellt worden.

### 6.1 Szenario A

Im ersten Schritt wird das gegebene Städtetz untersucht. Die nachfolgenden Abschnitte stellen verschiedene Variationen dieser Ausgangslage dar.

#### 6.1.1 Basisszenario

Dieses Szenario stellt das Basisszenario der Berechnungen dar. Im Prinzip wird hier die aktuelle Situation im Städtetz wiedergegeben, also die derzeitigen baulichen Gegebenheiten ohne eine Photovoltaik-Einspeisung und ohne eine Lademöglichkeit für E-Mobilität. Der zugehörige Netzplan ist im Anhang B.1 ersichtlich. Die Simulationen wurden für Verlegung in Erde, sowie für Verlegung in Luft durchgeführt.

Ausgehend von den ursprünglichen Standardannahmen wurden die Simulationen durchgeführt und anschließend visualisiert. Abbildung 6.1 stellt die beiden Simulationen für Erde (grün) und Luft (blau) dar. Die rechte Abbildung zeigt dabei den Verlauf der Mittelwerte in den einzelnen Monaten in Erde (unmittelbar unter der Asphaltdecke) und in Luft. Wie zu erwarten ist, folgt der Verlauf der Leitertemperatur dem Verlauf der Umgebungstemperaturen und weicht nur wenige °C davon ab. Eine andere Sichtweise kann auch so interpretiert werden, dass diese Leitung nicht voll ausgenutzt wird, was auch durch einen Blick in die Output-Datei des NEPLAN-Files bestätigt wird. So ist dort lediglich eine Auslastung im Bereich von 10 bis 50 % zu finden. Im Abschnitt 5.4 ist dieses Ergebnis in Form eines Boxplots wieder zu finden.

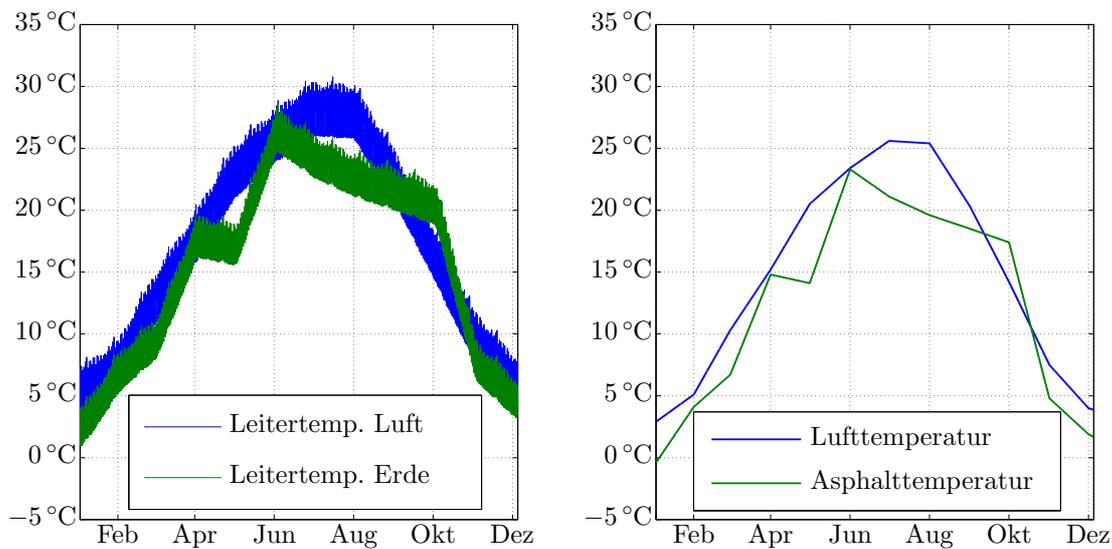


Abbildung 6.1: Temperaturverlauf für Szenario A in Erde und Luft

### 6.1.2 Variation des Basisszenarios

Um einen Vergleich der Auswirkungen der Variation der Materialien und Stoffparameter zu erlangen, werden in diesem Unterabschnitt mehrere Berechnungsparameter verändert und anschließend mit dem Basisszenario verglichen.

#### VPE statt PVC

VPE besitzt gegenüber PVC den Vorteil einer höheren zulässigen Betriebstemperatur. Auch die Tatsache, dass VPE im Vergleich zu PVC halogenfrei ist, stellt aus umwelttechnischer Sicht einen weiteren Vorteil dar. Anhand der unterschiedlichen Stoffparameter soll nun untersucht werden, wie sich dieses Isolationsmaterial, welches normalerweise erst bei Mittelspannungskabeln zum Einsatz kommt, verhält.

Durch einen ersten Blick auf Abbildung 6.2 lässt sich schnell feststellen, dass eine Veränderung der Isolationsmaterialien keine wesentliche thermische Verbesserung der Eigenschaften ermöglicht. In der Tat zeigt sich auch rechnerisch nur eine Verbesserung der maximal erreichbaren Leiterendtemperatur um nicht ganz ein Prozent. An dieser Stelle kann man nun argumentieren, dass sich so eine Investition nicht rechnen wird, da VPE gegenüber PVC bis zu 60 % teurer in der Anschaffung ist. Bei einem Kostenanteil von fünf bis acht Prozent des Kabels stellen sich hier doch beträchtliche Mehrkosten ein.

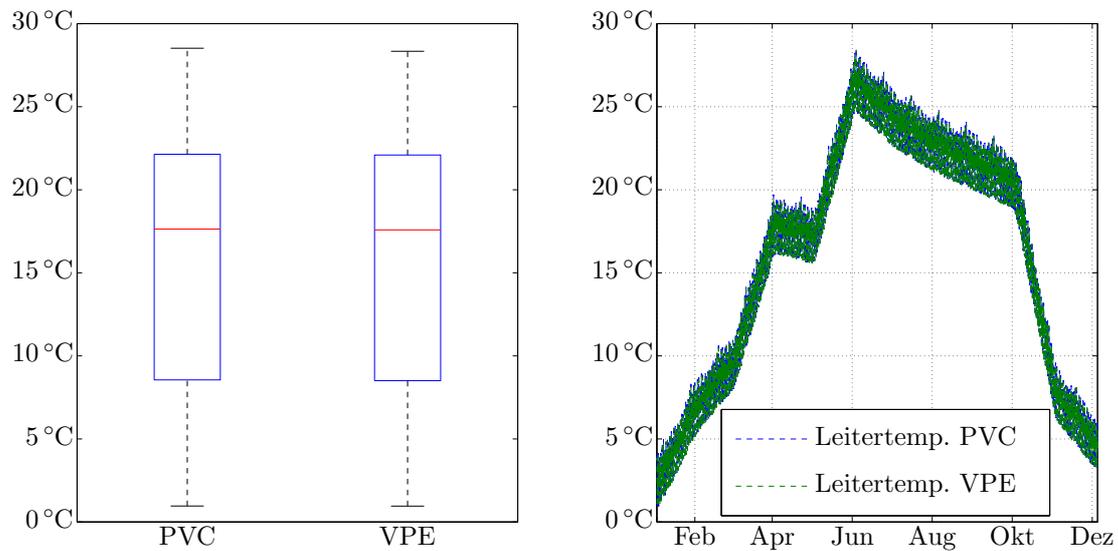


Abbildung 6.2: Vergleich der Leitertemperatur bei Isolierung mit PVC und mit VPE.

Als Gegenargument muss man aber auf die erhöhte Temperaturverträglichkeit von VPE hinweisen. So würde eine Ausstattung der Isolation mit VPE im erhöhten Auslastungsfall, wie zum Beispiel in Szenario 6.2, durchaus Sinn machen. Wie man bereits erkennen kann, muss man immer einen gewissen Kompromiss bei der Wahl der Materialien eingehen, entweder um Kosten zu sparen oder die zu Verfügung stehenden Ressourcen maximal auszunutzen.

### Trockenes und feuchtes Erdreich

Ferner soll noch untersucht werden, in wie weit sich eine Verlegung des Erdkabels im *normalen* Erdreich, also ohne üblichen Bettungsmaterial, auswirkt. Dabei wird einmal der Fall eines ausgetrockneten Bodens und einmal eines feuchten Erdreiches betrachtet.

Durch die Auswertung in Abbildung 6.3 lässt sich der Verlauf der Leitertemperatur in verschiedenen Erden darstellen. Zu sehen ist hier der Verlauf der Leitertemperatur über die ersten sieben Junitage. Wie zu erwarten war, erweist sich die Verlegung des Kabels in einem trockenen Erdreich als ungünstigste Variante, da hier die Wärme am schlechtesten an die Umgebung abgeführt werden kann (rote Kurve). Am besten wären die Verhältnisse, wenn das Kabel in einem feuchten Erdreich (blaue Kurve) verlegt werden würde. Hier sind im Mittel Leitertemperatur-Verringerungen von 15 % möglich. Allerdings sei hier anzumerken, dass auf Grund der natürlichen Austrocknung der Erde, wegen der erhöhten Kabeloberflächentemperaturen, sich die Verhältnisse mit der Zeit ohnehin an die eines

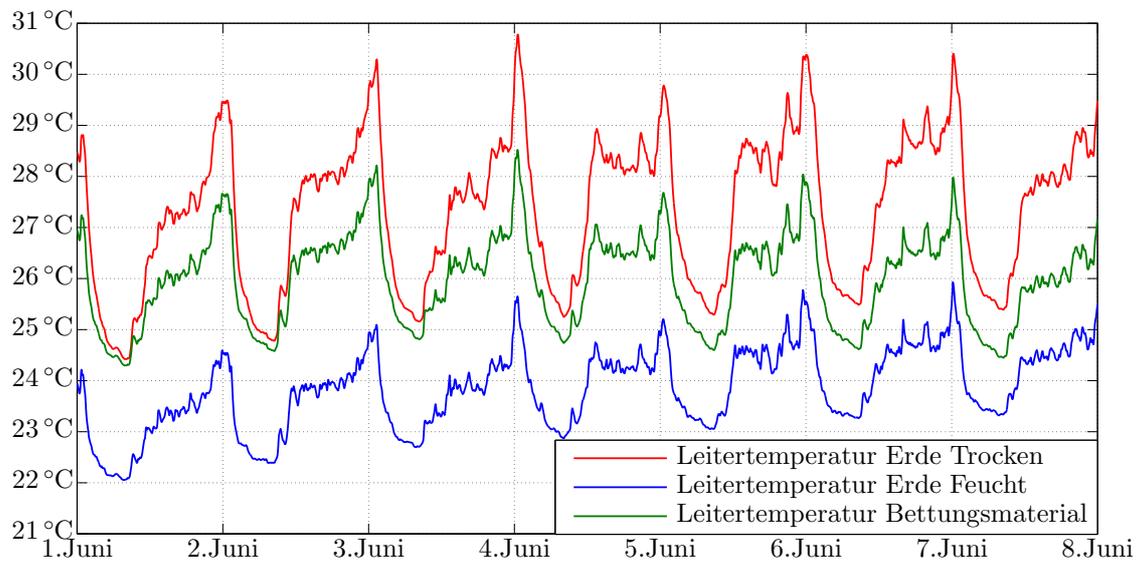


Abbildung 6.3: Vergleich der Leitertemperatur bei Verlegung in feuchter Erde (blau), trockener Erde (rot) und in *normalen* Bettungsmaterial (grün).

trockenen Erdreiches annähern würden, wenn nicht genügend Feuchtigkeit nachgeliefert wird.

Aus diesem Grund wird durch ein geeignetes Bettungsmaterial wie Sand und/oder Kies im Vorhinein für vorhersehbare Umgebungsbedingungen gesorgt.

## 6.2 Szenario B

Im Basisszenario wurde nur eine mittlere Auslastung des Stranges erreicht (vgl. Abschnitt 5.4). Daher wird im nächsten Schritt das Verteilnetz zusätzlich mit einer Elektro-Taxi-Ladestation ergänzt, um die Auslastung zu erhöhen. Im Netzplan in Abbildung B.1 wird zu diesem Zwecke der Knotenpunkt aktiviert und somit die Versorgung der Ladestation an die Sammelschiene gelegt.

Wie in den Abbildungen 6.4 und 6.5 zu sehen ist, sind die Temperaturverläufe des Leiters in diesem Szenario nur geringfügig erhöht. Allerdings treten aufgrund kurzzeitiger Auslastungsspitzen (bis zu 220 %) auch sehr kurzzeitige Leitertemperaturerhöhungen auf. Bei der vorliegenden PVC-Isolierung sind bis zu 70 °C thermisch vertretbar. Durch die Überhöhungen treten aber vorübergehende Leitertemperaturen von ca. 90 °C in Luft bzw. 100 °C in Erde auf.

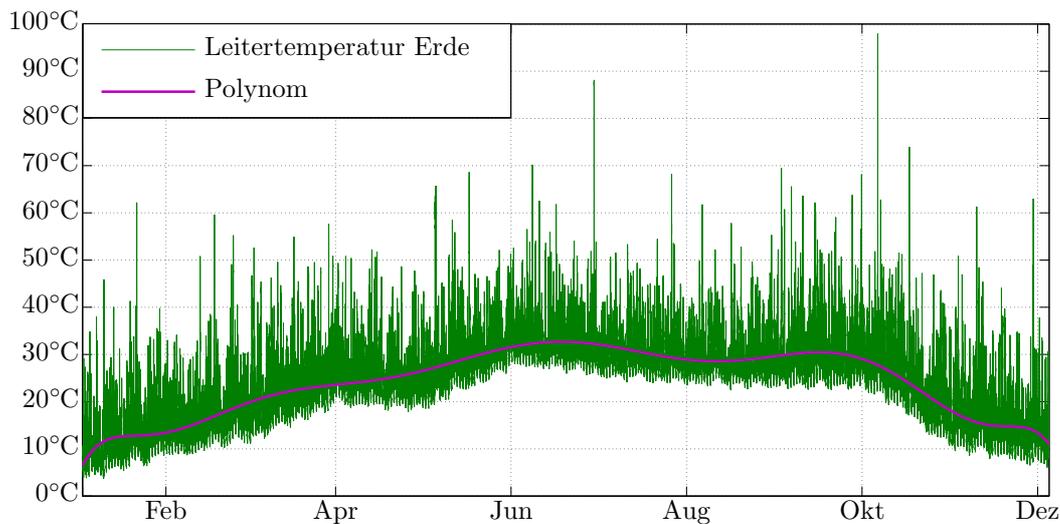


Abbildung 6.4: Temperaturverlauf des Leiters für Szenario B in Erde.

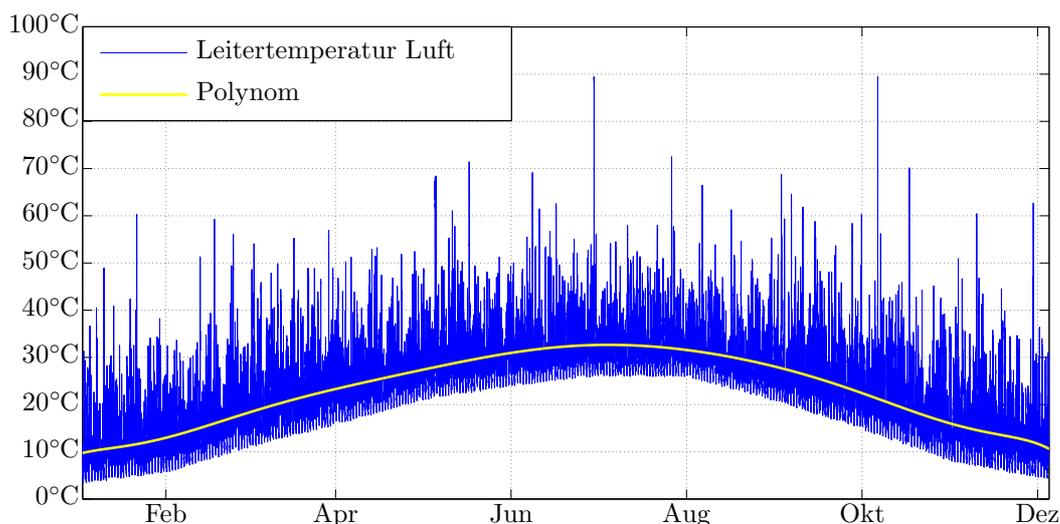


Abbildung 6.5: Temperaturverlauf des Leiters für Szenario B in Luft.

Eine genauere Betrachtung des zeitlichen Verlaufes zeigt Abbildung 6.6. Hierbei wurde ein typischer Tag des Jahres genauer betrachtet, welcher eine erhöhte Leitertemperatur aufweist. Dieser Tag (Donnerstag, 6. Oktober 2011) zeichnet sich, wie zu sehen ist, vor allem durch eine erhöhte Auslastungsspitze kurz vor Mittag aus. Diese zieht eine erhöhte Leitertemperaturbeanspruchung nach sich. Diese thermische Überbelastung, also die Überschreitung der zulässigen  $70^{\circ}\text{C}$  für eine PVC-Isolierung, findet um ca. 11:00 Uhr statt. In einer Zeitspanne von ungefähr 28 Minuten erhöht sich die Leitertemperatur bis auf  $97,8^{\circ}\text{C}$  und kühlt schließlich wieder unter die thermische Grenztemperatur ab.

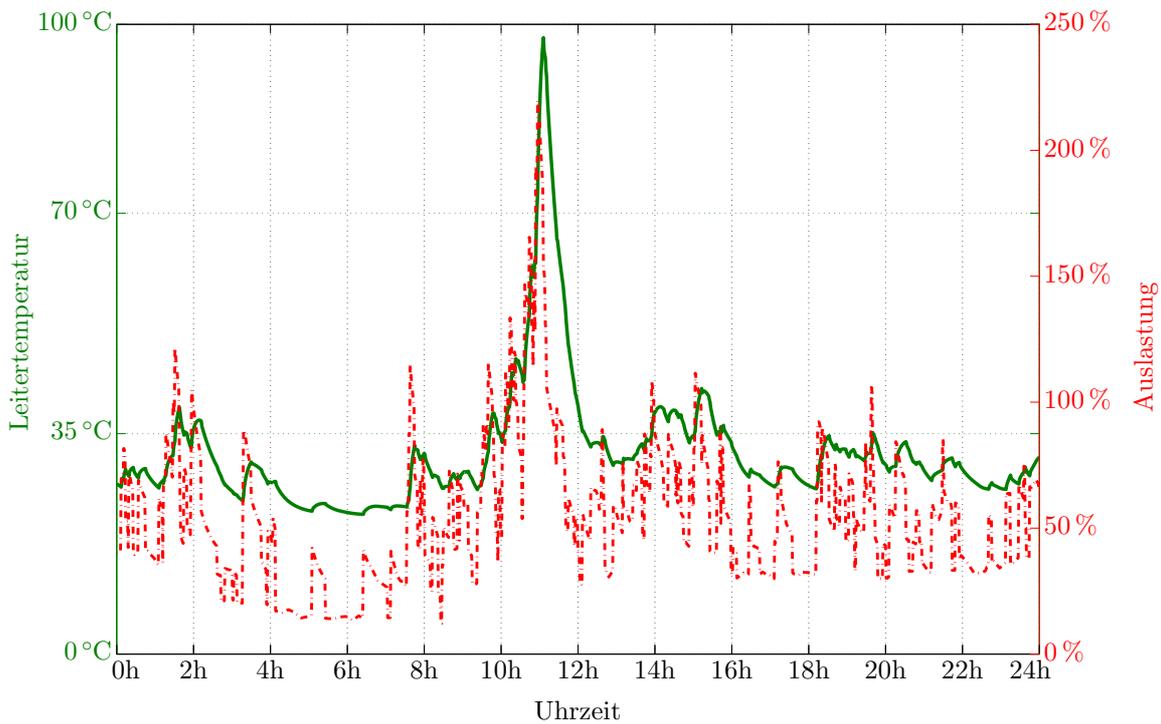


Abbildung 6.6: Ausschnitt der Leitertemperatur und der Auslastung im Strang 2 für Szenario B in Erde.

Insgesamt treten solche Auslastungsspitzen im betrachteten Jahr etwa drei mal auf. Die Zeitspannen belaufen sich im Viertelstundenbereich. Aufgrund der vergleichsweise geringen zeitlichen Überbelastung, tritt zwar eine Überschreitung der zulässigen Belastungstemperaturen auf, jedoch wäre hierzu zu klären, in wie weit eine schadhafte Materialermüdung in der Realität wirklich eintreten würde, oder würde es aus ökonomischer Sicht nicht doch sinnhafter sein diese Beanspruchungen zuzulassen.

### 6.3 Szenario C

Als nächstes wird das Basisszenario nicht um einen Verbraucher ergänzt, sondern um einen bzw. mehrere Erzeuger. Abbildung B.2 zeigt diese Erweiterung im Netzplan. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die Ladestation der E-Taxi Flotte in diesem Szenario wieder von der Sammelschiene getrennt wurde, lediglich eine zusätzliche Installation von PV-Anlagen soll berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurden den drei Haushalten die an der Sammelschiene des *Stranges 2* liegen, Photovoltaik-Anlagen hinzugefügt. Weiters wurde an die Sammelschiene eine größere Anlage gelegt. Diese Anlage soll eine große Freifläche, wie beispielsweise ein Dach, symbolisieren. In diesem Zusammenhang wäre bei einer Errichtung

einer Ladestation für die Elektro-Mobilität eine großflächige Anbringung der Anlage auf der Überdachung denkbar. Zusammen besitzen die vier Anlagen eine Spitzennennleistung von ca. 200 kW.

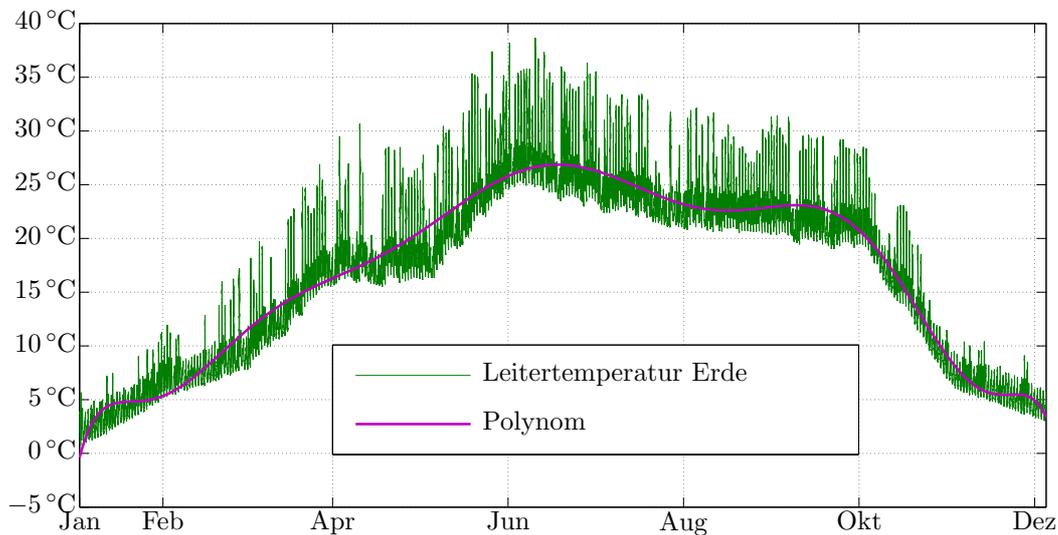


Abbildung 6.7: Temperaturverlauf des Leiters für Szenario C in Erde.

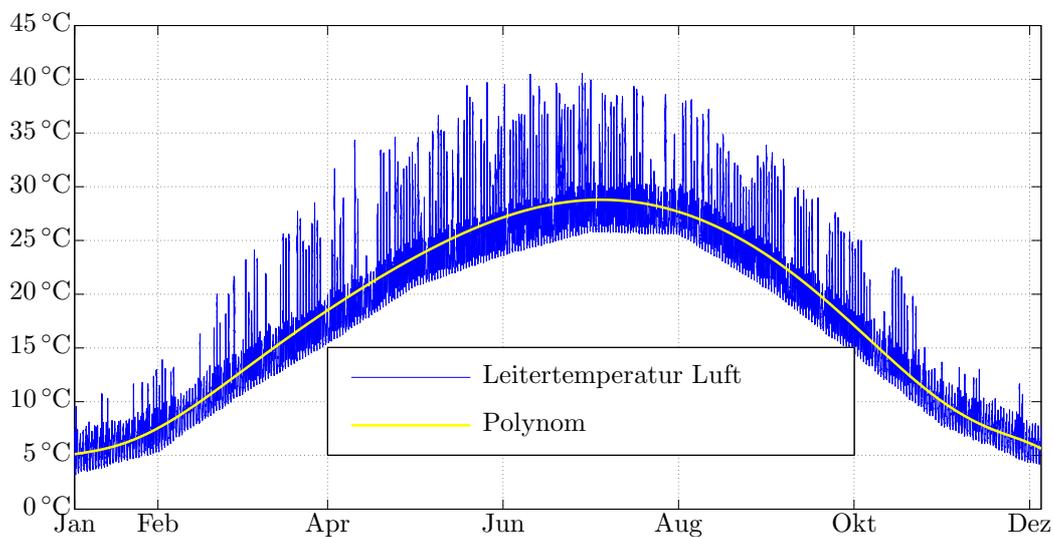


Abbildung 6.8: Temperaturverlauf des Leiters für Szenario C in Luft.

Die beiden Abbildungen 6.7 für Erde und 6.8 für Luft stellen wiederum den Temperaturverlauf über das Jahr dar. Zusätzlich wurde auch der angenäherte Verlauf durch ein Polynom höherer Ordnung eingetragen, um die Visualisierung zu vereinfachen. Man kann aus diesen beiden Grafiken erkennen, dass sich die Leitertemperatur gegenüber dem Ba-

sisszenario nur kaum erhöht hat. Aus den Ergebnissen der Netzsimulation lässt sich auch nur eine geringfügige Auslastungserhöhung (vgl. 5.4) zeigen, was zur Folge hat, dass solch eine Erweiterung für den belasteten Strang also ohne thermische Folgen betrieben werden kann.

## 6.4 Szenario D

Das letzte und vielleicht interessanteste Szenario, wird in diesem Abschnitt behandelt. Es wird im Netzplan aus Abbildung B.2 zusätzlich zu den installierten PV-Anlagen wiederum die Ladestation für die E-Taxi Flotte aktiviert. Somit wird untersucht, in wie weit sich die thermische Belastung erhöht, wenn sowohl ein neuer Erzeuger, als auch ein neuer Verbraucher in das System eingebunden werden.

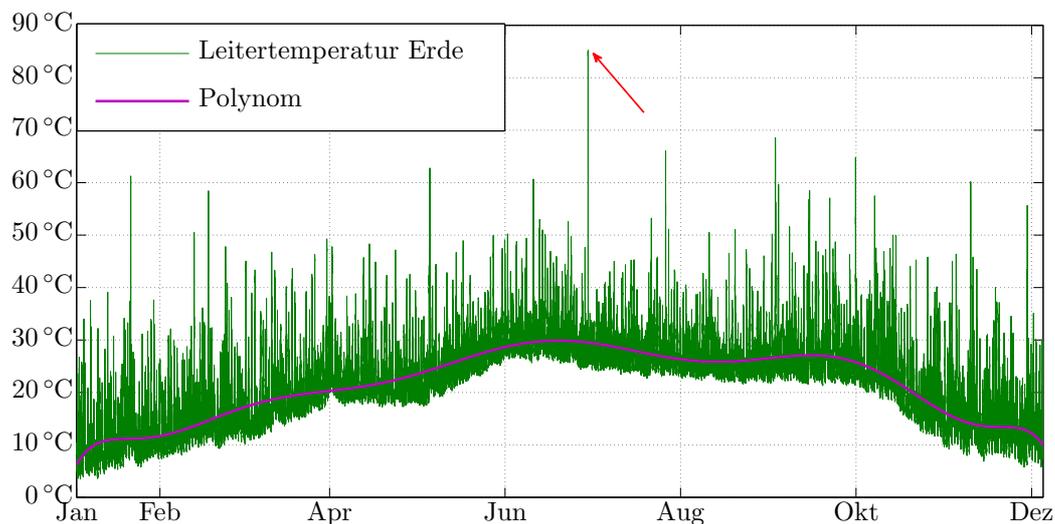


Abbildung 6.9: Temperaturverlauf des Leiters für Szenario D in Erde.

Anhand Abbildung 6.9 für Erde und 6.10 für Luft lassen sich einige interessante Aussagen treffen. Es wurden auch hier wieder zur besseren Darstellung, die angenäherten Verläufe durch Polynome höherer Ordnung dargestellt. Interessant ist hier, dass trotz der Einbringung eines weiteren Verbrauchers und weiterer Erzeuger die mittlere Leitertemperatur etwas gesunken ist, die Auslastung gegenüber dem Basisszenario sich jedoch um ca. 10% Punkte erhöht hat (vgl. 5.4). Diese Effizienzsteigerung erreicht man aber offensichtlich damit, dass bei Verlegung in Erde eine einmalige und bei Verlegung in Luft eine zweifache kurzzeitige Temperaturüberschreitung in Kauf genommen werden muss<sup>1</sup>. Allerdings könnte man, wie bereits in Abschnitt 6.1.2 gezeigt wurde, auf das Isolationsmaterial

<sup>1</sup>Dargestellt durch die roten Pfeile in den Abbildungen 6.9 und 6.10

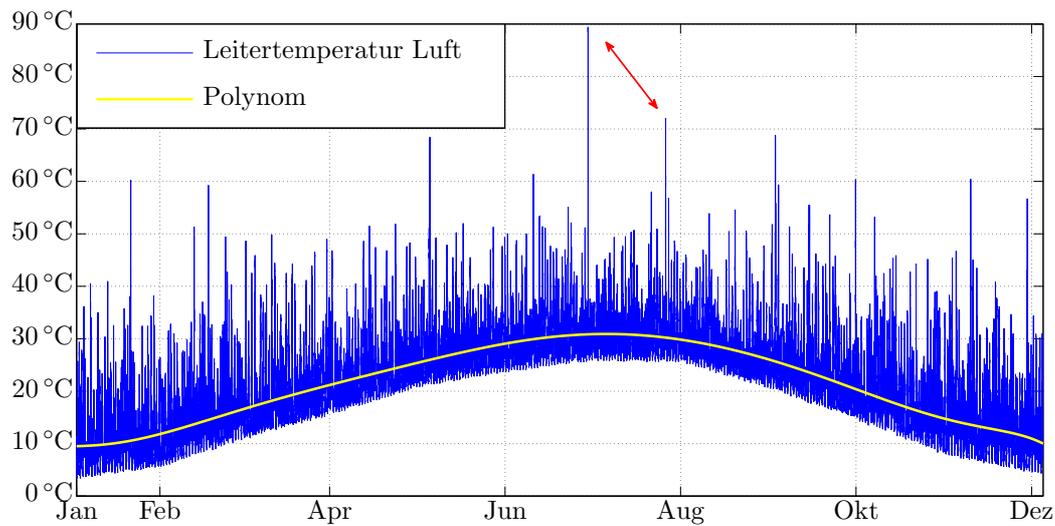


Abbildung 6.10: Temperaturverlauf des Leiters für Szenario D in Luft.

VPE wechseln, um auch hier die thermische Belastungsgrenze nicht zu überschreiten. Hier müssten genauere Untersuchungen durchgeführt werden, um abschätzen zu können, ob eine Materialanpassung ökonomisch sinnvoll ist, oder das Material doch kurzzeitig über den zulässigen Werten betrieben werden darf bzw. kann.



# 7 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend soll in diesem Kapitel eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse aus dieser Arbeit verfasst werden. Ferner wird ein Ausblick gegeben, welche Aussagen für die Zukunft getroffen werden können und welche Möglichkeiten hierfür in Frage kommen.

## 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zunächst kann man rückblickend sagen, dass im Bereich der elektrischen Energieverteilung ein deutliches Ressourcenpotenzial ruht. Aufgrund der Tatsache, dass die Kabel und Leitungen aus Sicherheitsgründen deutlich überdimensioniert sind, befinden sich diese zur größten Zeit in einem Auslastungsbereich unter 50 %. In Abbildung 7.1 werden die Ergebnisse der vier Szenarien noch einmal zusammen grafisch aufgearbeitet. Hier ist aber anzumerken, dass in der Endbetrachtung nur mehr die Ergebnisse bei Verlegung in Erde miteinander verglichen werden, da diese am ehesten den realen Verhältnissen entsprechen. Bei Verlegung in Luft müssten hierzu noch weitere Modellparameter, wie Sonneneinstrahlung, Luftdruck und vor allem die Windgeschwindigkeiten berücksichtigt werden, um die geforderten qualitativen Aussagen treffen zu können.

In der Grafik zeigt obere Illustration den sogenannten Boxplot der Szenarien für die auftretenden Leitertemperaturen. Die untere zeigt den Leitertemperaturverlauf der vier Szenarien an drei beispielhaften Tagen im Oktober des Jahres. Dabei sei an dieser Stelle noch einmal genau erklärt, welche Bedeutung die Boxen in der oberen Darstellung einnehmen.

Der rote Strich in der Box zeigt den Median der Verteilung an, der obere Rand das 75 % Quantil und der untere Rand das 25 % Quantil. Daraus folgt, dass sich in der Box die mittleren 50 % der Daten befinden (=Interquartilsabstand). An der Box befindet sich die Antenne oder auch Whisker genannt. Dieser Whisker besitzt in dieser Darstellungsform eine maximale Länge von 1,5 mal dem Interquartilsabstand. Alle anderen Werte außerhalb dieses Bereichs werden als Ausreißer gesondert gekennzeichnet. Der oberste Wert bildet das Maximum, der unterste das Minimum.

Im ersten Szenario, *Ohne Taxi und Ohne PV*, sieht man, dass sich das Kabel deutlich im zulässigen thermischen Bereich befindet. Ein Blick in den Temperaturverlauf zeigt weiter, dass sich auch kaum Temperaturschwankungen ausbilden, was aufgrund der geringen Auslastungen auch nicht weiter verwunderlich ist.

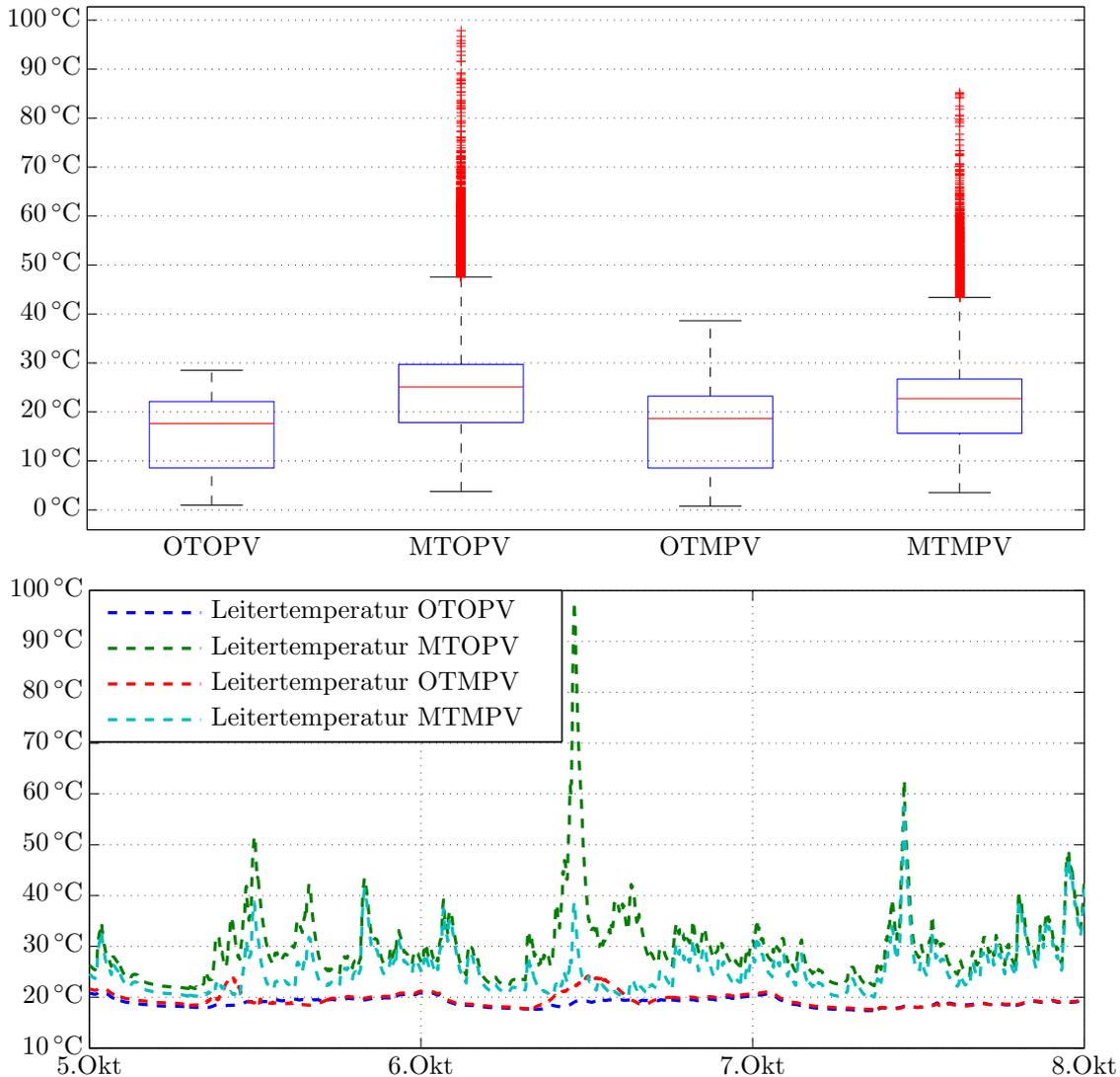


Abbildung 7.1: Vergleich der vier Szenarien anhand eines Boxplots und einiger beispielhafter Tage im Oktober.

Betrachtet man nun vergleichend das zweite Szenario, *Mit Taxi und Ohne PV*, welche die Erweiterung des Stadtnetzes mit einer Ladestation für Elektro-Taxis behandelt, so ergibt sich ein ganz anderes Bild. Wie im Boxplot erkennbar ist, verschiebt sich nicht nur der Median nach oben, auch der minimale Temperaturwert erhöht sich. Interessant ist in diesem Fall, dass sich der Interquartilsabstand gegenüber dem Basisszenario verengt

hat, was bedeutet, dass 50 % der Daten sich in diesem engeren Temperaturbereich (18 bis 30 °C) befinden. Im Unterschied zum Basisszenario kann man auch die hohe Fluktuation im Leitertemperaturverlauf erkennen, welche aus dem Verlauf der unteren Grafik ersichtlich ist. Umgelegt auf den Boxplot lässt sich aber erkennen, dass zwar diese Fluktuationen die zulässige Grenztemperatur von 70 °C überschreiten, diese Datenpunkte aber nur vereinzelt als Ausreißer (gekennzeichnet durch + Symbole) übers Jahr vorkommen. Der Großteil der Leitertemperaturwerte befindet sich im immer noch sicheren Temperaturbereich. In diesem Szenario kann man sagen, dass die Auslastung des Stranges bei weitem erhöht wurde. Will man die thermischen Verletzungen nicht akzeptieren, wäre eine Materialveränderung, wie in Abschnitt 6.1.2 behandelt wurde (VPE anstatt PVC), denkbar.

Nimmt man die Ladestation wieder aus dem vorhandenen Netz und gibt stattdessen die PV-Anlagen hinzu, so ergibt sich das dritte Szenario, *Ohne Taxi und Mit PV*. Im Vergleich zum Basisszenario erkennt man im Boxplot wiederum eine leichte Anhebung des Medians. Sieht man sich den Verlauf der Leitertemperatur an, so erkennt man augenscheinlich, dass lediglich zu den Mittagsstunden eine wirkliche Abweichung vom Verlauf des Basisszenarios auftritt. Dieses Ergebnis überrascht an dieser Stelle nicht weiter, da schon alleine wegen des Verlaufes des Erzeugungsprofils einer PV-Anlage (vgl. Abb. 5.4) nur am Tag Energie bereitgestellt werden kann und um die Mittagszeit eben die Erzeugungsspitzen auftreten. Für den Boxplot bedeutet dies nun, dass sich die Quantile nicht sonderlich weit weg von der Ausgangslage entfernt haben. Lediglich der *Whisker* hat sich aufgrund der neuen Mittagsspitzen, nach oben hin verlängert und weist somit auf eine neue maximal auftretende Temperatur hin. Diese ist aber noch immer weit genug von der Grenztemperatur entfernt.

Letztlich wird die Ladestation wieder ins vorhandene Netz gebracht, womit das vierte Szenario, *Mit Taxi und Mit PV*, entsteht. Betrachtet man in diesem Fall zuerst den Verlauf der Leitertemperatur, so erkennt man ähnliche Grundzüge wie im zweiten Szenario. Allerdings wurden die Auslastungsspitzen deutlich minimiert. Offensichtlich stellt eine dezentrale Erzeugung in Kombination mit einem lokalen Verbrauch in Form der E-Taxi-Batterie, eine gute Voraussetzung für die Entlastung des Stranges dar. Mit anderen Worten wird im Prinzip mehr Energie *umgesetzt* und dennoch die Auslastung minimiert. Im Bezug auf den Strang werden so die Spitzen abgefangen. Die Auslastung wird gegenüber dem zweiten Szenario somit noch weiter gesteigert. Dieses Ergebnis steht auch im Einklang mit dem Boxplot. Hier zeigen sich ähnliche Verhältnisse mit jenem des zweiten Szenarios. Auch hier erhöht sich der Median gegenüber dem Basisszenario, der Interquartilabstand verengt sich und auch einige Ausreißer, die die Leitergrenztemperatur überschreiten, treten auf. Allerdings fallen diese weniger und um einiges geringer aus, als im zweiten Szenario.

## 7.2 Ausblick und Erkenntnisse für die Zukunft

Nachdem die Ergebnisse der Szenarien zusammengefasst und gegenübergestellt wurden, lassen sich einige Erkenntnisse und Schlüsse aus dieser Arbeit ziehen. Grundsätzlich sei an dieser Stelle angemerkt, dass ganz allgemein in der Leitungs- und Verteilstruktur der Energiewirtschaft ein erhebliches Ressourcenpotential schlummert. So lässt sich eine deutliche Erhöhung der zu übertragenden Leistungen im bereits **bestehenden** Netz erreichen. Ein Grund für die schlechte Ausnutzung der bereits bestehenden Infrastruktur sind sicherlich die teils veralteten Berechnungsvorschriften der Norm, welche sich nicht immer am heutigen Stand der Technik orientieren. So zeigt beispielsweise [10] zu diesem Thema, dass die in der Norm verwendeten Extrembedingungen zwar an wenigen Stunden im Jahr auftreten, aber einfach zu viel Spielraum lassen um die Leitungen, bzw. Kabel effizient und vor allem ökonomisch zu betreiben.

Prinzipiell sollte die Devise lauten, dass eine *Netzoptimierung* vor einer *Netzverstärkung* und diese vor einem *Leitungsneubau* stattfinden sollte.

Diese Maßnahme mit dem Titel *Repowering der Leitungen* wird und muss auch die Zukunft des E-Netzes sein. Die Optimierung der Leitung kann dabei durch Regelung der Lastflüsse mittels Querregler stattfinden. Im Bezug auf diese Arbeit ist aber vor allem die Nutzung der vorhandenen Reserven durch den Einsatz von *Leitertemperaturmonitoring* interessant. Für die Netzverstärkung kommt eine schrittweise Ersetzung der herkömmlichen Leiterseile durch sogenannte Hochtemperaturleiter in Betracht. Eine Kombination aus Monitoring und neuen Materialien lässt die Auslastungseffizienz auf ein Maximum ansteigen.

Vor allem bei Freileitungsseilen, also bei einer Verlegung in Luft, sind hohe Auslastungsmaxima möglich. Wie in [10] gezeigt wird, wird bei herkömmlichen Leiterseilen in der Hochspannungstechnik bei einer zulässigen Leiterseiltemperatur von 80 °C, eine völlige Auslastung von 100 % nur bei den extremen Wetterbedingungen von 35 °C Lufttemperatur und 0,6 m/s Windgeschwindigkeit quer zum Leiterseil erreicht. Diese Werte treten in Mitteleuropa aber nur vereinzelt für einige Stunden in den Sommermonaten auf. Rechnet man mit durchaus realistischeren 20 °C für die Umgebungstemperatur und mit leichtem Wind, was ca. 2 m/s entspricht, so sind Auslastungen von rund 150 % möglich ohne die zulässigen Grenztemperaturen zu erreichen. Mit anderen Worten kann man sagen, dass gerade wegen der hohen Windgeschwindigkeiten erhöhte Erzeugungsspitzen der Windräder auftreten, welche durch die nun *erlaubten* Auslastungsmaxima abgeführt werden könnten. Dieses Beispiel soll exemplarisch zeigen, was alleine bei den Leitungen, aber auch bei den Kabeln in Zukunft an Auslastungssteigerung noch möglich wäre.

Wie schon erwähnt, ist die Erhöhung der Übertragungsleistungen kostengünstig auch *ohne* Leitungsneubau, alleine durch Netzoptimierung möglich. Durch diese Repowering-Maßnahmen würden nur noch vereinzelt neue Leitungen notwendig werden.



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Geschätzte Mittelwerte für die Erwärmung der Erdoberfläche. . . . .	2
3.1	Koaxialer Zylinderleiter mit Feststoffisolierung . . . . .	13
3.2	Qualitativer Temperaturverlauf im Kabelmaterial. . . . .	14
3.3	Analogien zur Erwärmungsberechnung. . . . .	15
3.4	Ersatzschaltplan für den Wärmestrom . . . . .	16
3.5	Dielektrische Verluste . . . . .	20
3.6	Wärmewiderstände eines einadrigen Kabels . . . . .	22
3.7	Wärmeabgabe bei Verlegung frei in Luft . . . . .	23
3.8	Temperaturfeld eines in Erde liegenden Kabels. . . . .	25
4.1	NS-Kabel E-XAYY 4 x 150 SM . . . . .	27
4.2	Isoliertes Mantelkabel bei gebündelter Verlegung . . . . .	29
4.3	Wärmeersatzschaltung des NS-Kabels . . . . .	29
4.4	Erwärmungskurve eines verlustbehafteten Körpers . . . . .	31
4.5	Hauptseite des thermischen Modells . . . . .	34
4.6	Der Parameterbereich . . . . .	35
4.7	Der Modellierungsbereich . . . . .	36
4.8	Das Kabelmodell . . . . .	38
4.9	Das Erdmodell . . . . .	39
4.10	Das Luftmodell . . . . .	39
4.11	Der Ausgabe- und Visualisierungsbereich . . . . .	39
5.1	ZENEM Logo . . . . .	41
5.2	Gemittelter Wochenverlauf der gleichzeitig fahrenden Taxis . . . . .	42
5.3	Verlauf des Ladeprofiles . . . . .	43
5.4	Verlauf des Erzeugungsprofiles eines Stranges einer PV-Anlage. . . . .	44
5.5	Boxplots der Auslastungen der einzelnen Szenarien. . . . .	45
6.1	Temperaturverlauf für Szenario A in Erde und Luft . . . . .	48
6.2	Vergleich der Leitertemperatur bei Isolierung mit PVC und mit VPE. . . . .	49
6.3	Vergleich der Leitertemperatur bei Verlegung in verschiedenen Erden . . . . .	50

6.4	Temperaturverlauf des Leiters für Szenario B in Erde. . . . .	51
6.5	Temperaturverlauf des Leiters für Szenario B in Luft. . . . .	51
6.6	Ausschnitt der Leitertemperatur und Auslastung . . . . .	52
6.7	Temperaturverlauf des Leiters für Szenario C in Erde. . . . .	53
6.8	Temperaturverlauf des Leiters für Szenario C in Luft. . . . .	53
6.9	Temperaturverlauf des Leiters für Szenario D in Erde. . . . .	54
6.10	Temperaturverlauf des Leiters für Szenario D in Luft. . . . .	55
7.1	Vergleich der vier Szenarien. . . . .	58
B.1	Netzplan für Szenario A und B . . . . .	74
B.2	Netzplan für Szenario C und D . . . . .	75

# Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Eigenschaften von Kupfer- und Aluminiumleitern . . . . .	6
2.2	Leiterarten für Starkstromkabel im Überblick . . . . .	7
2.3	Wichtige Polymere für Isolierungen . . . . .	7
2.4	Eigenschaften der wichtigsten Kabelisoliertstoffe. . . . .	10
3.1	Spezifischer Wärmewiderstand des Erdbodens . . . . .	26
3.2	Monatsmittelwerte der Umgebungstemperaturen . . . . .	26
4.1	Der Kabelaufbau. . . . .	28
4.2	Erläuterung der Kabelkennzeichnung . . . . .	28
A.1	Basis-Parameterliste für alle Berechnungen . . . . .	69
A.2	Radien der einzelnen Schichten . . . . .	69
A.3	Dichten der einzelnen Schichten . . . . .	70
A.4	Spezifische Wärmekapazitäten der einzelnen Schichten . . . . .	70
A.5	Spezifische Widerstände der einzelnen Schichten . . . . .	70
A.6	Parameterliste für die Variation des Basisszenarios mit VPE. . . . .	71
A.7	Parameterliste für die Variation des Basisszenarios mit trockener Erde . . .	71
A.8	Parameterliste für die Variation des Basisszenarios mit feuchter Erde. . . .	71



# Literaturverzeichnis

- [1] Anton Schweizer, "Projektierungshilfe für Stromaggregate",. [Online]. Available: <http://www.schweizer-fn.de/>
- [2] A. Böge, *Das Techniker-Handbuch: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, Reihe Studium und Praxis. Vieweg, 1999. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=rzNBPAACAAJ>
- [3] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 1: Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik*, Reihe Elektrische Energieversorgung. Springer, 2012. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=4ndBXwAACAAJ>
- [4] R. Fischer, *Elektrische Maschinen*, Reihe Hanser Lehrbuch. Hanser, 2001. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=UBuXAAAACAAJ>
- [5] R. Flosdorff und G. Hilgarth, *Elektrische Energieversorgung*, Reihe Leitfaden der Elektrotechnik. Teubner, 2003. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=ifxGPQAACAAJ>
- [6] L. Heinhold und R. Stubbe, *Kabel Und Leitungen Für Starkstrom- 5 Auf Teil 1 Werkstoffe, Aufbau, Auswahlkriterien, Planung Von Anlagen, Auslegen Und Montage, Garnituren, Messen*. Publicis MCD Verlag, 1999. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=o07IPQAACAAJ>
- [7] H. Herwig und A. Moschallski, *Wärmeübertragung: Physikalische Grundlagen - Illustrierende Beispiele - Übungsaufgaben mit Musterlösungen*, Reihe Studium Technik. Vieweg+Teubner Verlag, 2009. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=fRjPFPqtR1cC>
- [8] K. Heuck, K. Dettmann und D. Schulz, *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010. [Online]. Available: [http://books.google.at/books?id=D1u\\_yZmXOkC](http://books.google.at/books?id=D1u_yZmXOkC)

- [9] G. Hosemann, *Elektrische Energietechnik: Band 3: Netze*, Reihe Klassiker Der Technik. Springer Verlag, 2000. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=vx8wwZeWKKUC>
- [10] L. Jarass und G. Obermair, *Welchen Netzbau erfordert die Energiewende?: Unter Berücksichtigung des Netzentwicklungsplans Strom 2012*, Reihe MV-Wissenschaft. Monsenstein und Vannerdat, 2012. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=jID5HQcICLkC>
- [11] M. Kaltschmitt, W. Streicher und A. Wiese, *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer, 2005. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=uvW5pKxxyB0C>
- [12] A. Küchler, *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*, Reihe VDI-Buch. Springer, 2009. [Online]. Available: <http://books.google.at/books?id=VTZMoRoFtRAC>
- [13] M. Litzlbauer und A. Schuster, "Erfüllbarkeitsszenarien einer E-Taxiflotte - Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts ZENEM", 2013, abgerufen am 13.05.2013. [Online]. Available: [http://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/projekte/ZENEM/P\\_20\\_Litzlbauer\\_Markus\\_13-Feb-2013\\_13\\_48.pdf](http://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/projekte/ZENEM/P_20_Litzlbauer_Markus_13-Feb-2013_13_48.pdf)
- [14] Schwechater Kabelwerke, "Datenblätter Energiekabel 0,6/1kV", abgerufen am 16.04.2013. [Online]. Available: <http://www.skw.at/>
- [15] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor und E. H.L. Miller. (2007) IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC). [Online]. Available: <http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC2007-WG1.pdf>
- [16] Umweltbundesamt, "Ambitioniertere Klimaziele bis 2020 - Analyse und Auswirkungen auf Österreich", 2011, abgerufen am 10.05.2013. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0336.pdf>
- [17] ZAMG, "Klimadaten von Österreich 1971-2000", abgerufen am 16.04.2013. [Online]. Available: <http://www.zamg.ac.at>

# A Parameterliste

Nachfolgende Tabellen stellen die Zusammenstellung der verwendeten Parameter in dem Modell der thermischen transienten Modellierung dar.

## A.1 Parameterliste für alle Berechnungen

Dieser Abschnitt beinhaltet alle Parameter die in den Szenarien verwendet wurden. Die Werte stammen aus den in den vorangegangenen zitierten Quellen und stellen lediglich eine Zusammenstellung für die Input-Parameter des Modells dar.

Tabelle A.1: Basis-Parameterliste für alle Berechnungen

<b>Parameter</b>	<i>Kurzzeichen</i>	<i>Wert</i>
Leitererdspannung	$U$	600 V
Temperaturkoeffizient bei 20 °C (Al)	$\alpha_{20}$	$4,03 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$
Elektr. Leitfähigkeit bei 20 °C (Al)	$\kappa_{20}$	$35,4 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$
Permittivitätszahl bei 20 °C (PVC)	$\epsilon_r$	3,5
Verlustfaktor (PVC)	$\tan \delta$	0,013

Tabelle A.2: Radien der einzelnen Schichten

<b>Parameter</b>	<i>Kurzzeichen</i>	<i>Wert</i>
Radius eines Leiters	$r_0$	6,91 mm
Radius der Isolation	$r_1$	8,71 mm
Radius der Schirmung	$r_2$	19,5 mm
Radius des Mantels	$r_3$	22 mm
Radius der Umgebung 0 (Sand)	$r_4$	200 mm
Radius der Umgebung 1 (Kies)	$r_5$	700 mm
Radius der Umgebung 2 (Asphalt) = Legetiefe	$r_6$	725 mm

Tabelle A.3: Dichten der einzelnen Schichten

Parameter	Kurzzeichen	Wert
Dichte des Leiters	$d_0$	8,9 g/cm <sup>3</sup>
Dichte der Isolation (PVC)	$d_1$	1,4 g/cm <sup>3</sup>
Dichte der Schirmung	$d_2$	0,0 g/cm <sup>3</sup>
Dichte des Mantels (PVC)	$d_3$	1,4 g/cm <sup>3</sup>
Dichte der Umgebung0 (Sand)	$d_4$	1,65 g/cm <sup>3</sup>
Dichte der Umgebung1 (Kies)	$d_5$	1,55 g/cm <sup>3</sup>
Dichte der Umgebung2 (Asphalt)	$d_6$	— — —

Tabelle A.4: Spezifische Wärmekapazitäten der einzelnen Schichten

Parameter	Kurzzeichen	Wert
Spez. Wärmekapazität des Leiters	$c_0$	0,9 J/(g K)
Spez. Wärmekapazität der Isolation (PVC)	$c_1$	1,5 J/(g K)
Spez. Wärmekapazität der Schirmung	$c_2$	1,0 J/(g K)
Spez. Wärmekapazität des Mantels (PVC)	$c_3$	1,5 J/(g K)
Spez. Wärmekapazität der Umgebung0 (Sand)	$c_4$	0,84 J/(g K)
Spez. Wärmekapazität der Umgebung1 (Kies)	$c_5$	0,84 J/(g K)
Spez. Wärmekapazität der Umgebung2 (Asphalt)	$c_6$	0,84 J/(g K)

Tabelle A.5: Spezifische Widerstände der einzelnen Schichten

Parameter	Kurzzeichen	Wert
Spez. Wärmewiderstand des Leiters	$\rho_0$	0,00 K m/W
Spez. Wärmewiderstand der Isolation (PVC)	$\rho_1$	4,35 K m/W
Spez. Wärmewiderstand der Schirmung	$\rho_2$	0,00 K m/W
Spez. Wärmewiderstand des Mantels (PVC)	$\rho_3$	4,35 K m/W
Spez. Wärmewiderstand der Umgebung 0 (Sand)	$\rho_4$	1,43 K m/W
Spez. Wärmewiderstand der Umgebung 1 (Kies)	$\rho_5$	1,43 K m/W
Spez. Wärmewid. der Umgebung 2 (Asphalt)	$\rho_6$	1,25 K m/W

## A.2 Parameterliste für die Variation des Basisszenarios

Diese Parameterlisten zeigen die Ergänzungen, bzw. Veränderungen, die für die Variation des Basisszenarios notwendig sind. Anhand der angeführten Kurzzeichen lassen sich die Unterschiede der Parameter gegenüber der Basis-Parameterliste erkennen.

Tabelle A.6: Parameterliste für die Variation des Basisszenarios mit VPE.

Parameter	<i>Kurzzeichen</i>	<i>Wert</i>
Permittivitätszahl bei 20 °C (VPE)	$\varepsilon_r$	2,4
Dichte der Isolation (VPE)	$d_1$	0,92 g/cm <sup>3</sup>
Dichte des Mantels (VPE)	$d_3$	0,92 g/cm <sup>3</sup>
Spez. Wärmekapazität der Isolation (VPE)	$c_1$	1,8 J/(g K)
Spez. Wärmekapazität des Mantels (VPE)	$c_3$	1,8 J/(g K)
Spez. Wärmewiderstand der Isolation (VPE)	$\rho_1$	3,5 K m/W
Spez. Wärmewiderstand des Mantels (VPE)	$\rho_3$	3,5 K m/W

Tabelle A.7: Parameterliste für die Variation des Basisszenarios mit trockener Erde

Parameter	<i>Kurzzeichen</i>	<i>Wert</i>
Dichte der Umgebung (Erde trocken)	$d_4, d_5$	1,30 g/cm <sup>3</sup>
Spez. Wärmekapazität d. Umgebung (Erde trocken)	$c_4, c_5$	2,00 J/(g K)
Spez. Wärmewiderstand d. Umgebung (Erde trocken)	$\rho_4, \rho_5$	2,50 K m/W

Tabelle A.8: Parameterliste für die Variation des Basisszenarios mit feuchter Erde.

Parameter	<i>Kurzzeichen</i>	<i>Wert</i>
Dichte der Umgebung (Erde feucht)	$d_4, d_5$	1,50 g/cm <sup>3</sup>
Spez. Wärmekapazität d. Umgebung (Erde feucht)	$c_4, c_5$	4,00 J/(g K)
Spez. Wärmewiderstand d. Umgebung (Erde feucht)	$\rho_4, \rho_5$	1,00 K m/W



## B NEPLAN Netzpläne

### B.1 Szenario A und B

Abbildung B.1 zeigt den Netzplan für die beiden Szenarien A und B. Errechnet werden die entstandenen Ströme im *Strang 2* einmal ohne (Szenario A) und einmal mit (Szenario B) der E-Taxi Flotte. Zu diesem Zweck wird der Knotenpunkt der Ladestation an der Sammelschiene für das Szenario A deaktiviert und im Szenario B wieder aktiviert. Anschließend wird die Lastflussberechnung in NEPLAN über einen Zeitraum von 48 Wochen durchgeführt.

### B.2 Szenario C und D

Abbildung B.2 zeigt den Netzplan für die beiden Szenarien C und D. Errechnet werden die entstandenen Ströme im *Strang 2* einmal ohne (Szenario C) und einmal mit (Szenario D) der E-Taxi Flotte, sowie jedes Mal mit Photovoltaik-Einspeisung. Hierfür wurden dem bereits existierenden Stadtnetz bei jedem Haushalt eine PV-Anlage hinzugefügt. Zusätzlich wurde eine Anlage an die Sammelschiene gelegt, welche der Freifläche einer Überdachung der Ladestation entsprechen könnte. Für Szenario C wurde wiederum der Knotenpunkt der Ladestation deaktiviert und für Szenario D wieder aktiviert. Auch hier wurde die Lastflussberechnung in NEPLAN für einen Zeitraum von 48 Wochen durchgeführt.

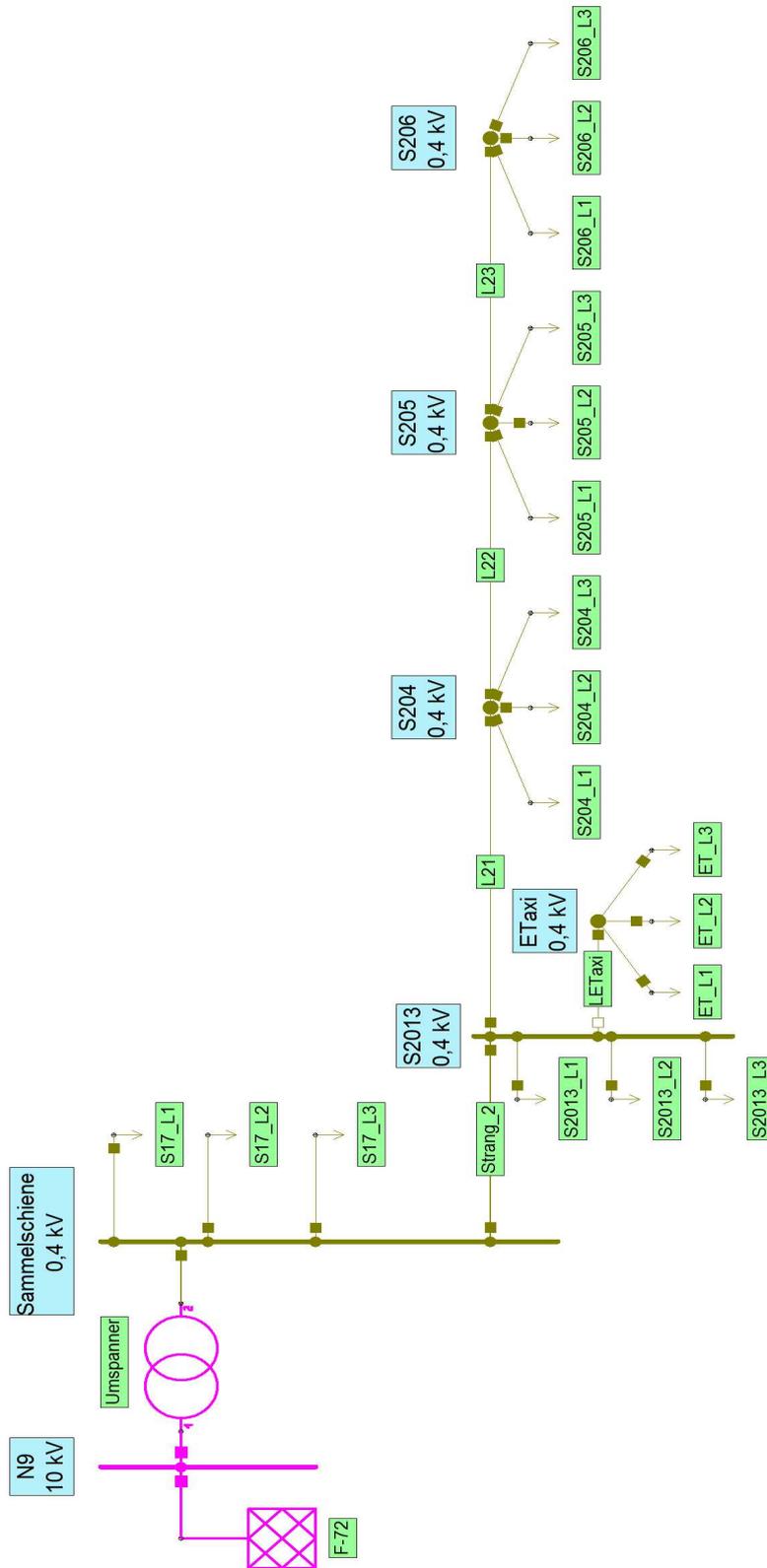


Abbildung B.1: Netzplan für Szenario A und B

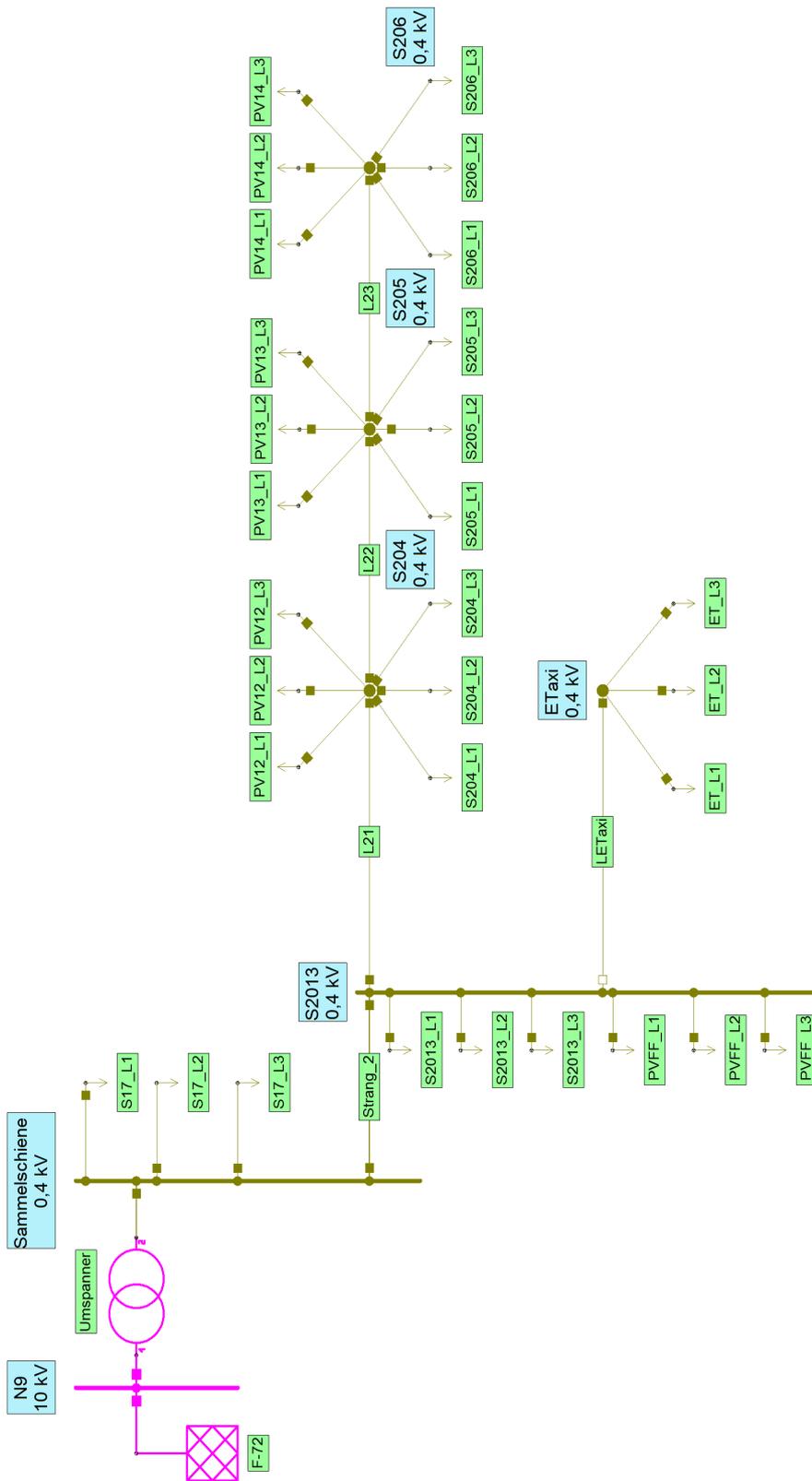


Abbildung B.2: Netzplan für Szenario C und D

